

Maija Paasonen-Kivekäs, Rauno Peltomaa, Pertti Vakkilainen, Helena Äijö (toim.)



MAAN VESI- JA RAVINNETALOUS

Ojitus, kastelu ja ympäristö

Maija Paasonen-Kivekäs, Rauno Peltomaa, Pertti Vakkilainen, Helena Äijö (toim.)

Maan vesi- ja ravinnetalous

Ojitus, kastelu ja ympäristö

Maan vesi- ja ravinnetalous

Ojitus, kastelu ja ympäristö

2. täydennetty painos

Toimitus	Maija Paasonen-Kivekäs Rauno Peltomaa Pertti Vakkilainen Helena Äijö
Layout ja taitto	Juha Peltomaa
Kannen kuva	Hannu Vallas / Lentokuva Vallas Oy
Julkaisija	Salaojayhdistys ry Simonkatu 12 A 11, 00100 Helsinki www.salaojayhdistys.fi
Paino	Grano Oy, Helsinki, 2016
ISBN	978-952-5345-34-6

Maan vesi- ja ravinnetalous

Ojitus, kastelu ja ympäristö

Sisältö

Esipuhe.....	9
Esipuhe 2. painokseen	11
1. Johdanto Pertti Vakkilainen.....	13

I MAAPERÄN OMINAISUUDET JA PROSESSIT

2 Maaperä Helinä Hartikainen.....	17
2.1 Johdanto.....	17
2.2 Maaperän muodostuminen.....	18
2.3 Suomen maaperän ominaispiirteet.....	19
2.4 Maalajit.....	23
2.5 Maa-aineksen koostumus.....	31
2.6 Maan biologia.....	40
2.7 Maannokset ja niiden luokittelu Markku Yli-Halla ja Tommi Peltovuori.....	43
2.8 Maan rakenne Laura Alakukku.....	53
3 Hydrologian perusteita Pertti Vakkilainen.....	73
3.1 Johdanto.....	73
3.2 Hydrologian perussuureita.....	73
3.3 Maaperässä olevat vedet.....	90
3.4 Veden liikkeet maaperässä.....	101
3.5 Maan lämpötila ja routa.....	110
3.6 Mitoitustulokset Hanne Laine-Kaulio ja Pertti Vakkilainen.....	113
3.7 Vuonovirtaus.....	123
4 Aineiden käyttäytyminen maaperässä	129
4.1 Johdanto Helinä Hartikainen.....	129
4.2 Maaperän reaktiot Helinä Hartikainen.....	130
4.3 Veteen liuenneiden aineiden kulkeutuminen maaperässä Tuomo Karvonen.....	155
4.4 Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen Thomas Franti.....	169
4.5 Fosfori Helinä Hartikainen.....	182
4.6 Typpi Maija Paasonen-Kivekäs.....	191
4.7 Kasvinsuojeluaineet Katri Siimes, Ilona Bärlund, Pirkko Laitinen ja Timo Seppälä.....	205

II MAAPERÄN VESITALouden JÄRJESTELY

5 Maaperän vesitalouden järjestelyn lähtökohdat Toimitus	217
5.1 Johdanto	217
5.2 Yleiset tavoitteet	217
5.3 Maankuivatus- ja kastelumenetelmät	221
5.4 Maankuivatuksen ja kastelun tarve ja kehitys Suomessa	223
5.5 Maankuivatusta ja kastelua koskeva lainsäädäntö	227
5.6 Luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteet Juha Järvelä	230
6 Peruskuivatus Raimo K. Nissinen	241
6.1 Johdanto	241
6.2 Valtaojan mitoitus	241
6.3 Erityisrakenteet	255
6.4 Peruskuivatuksen vesiensuojelu ja ympäristöhoito	273
7 Salaojitus Rauno Peltomaa	283
7.1 Johdanto	283
7.2 Salaojien toimintaperiaate	283
7.3 Kuivatettavissa oleva huokostila	284
7.4 Ojavälin ja ojasyvyyden määrittäminen	287
7.5 Salaojituksen mitoitus	313
7.6 Salaojituksen ympäristövaikutuksia	318
7.7 Salaojitussuunnittelu Suomessa	320
7.8 Salaojituksen toteutus	326
7.9 Kunnossapito	331
8 Säättösalojitus Maija Paasonen-Kivekäs	337
8.1 Johdanto	337
8.2 Säättösalojituksen toimintaperiaate	337
8.3 Säättösalojituksen edellytykset	341
8.4 Säättösalojituksen suunnittelu ja toteutus	342
8.5 Säättösalojituksen käyttö	344
8.6 Säättösalojituksen vaikutukset	347
9 Maatalousmaan kastelu Harry Linnér	351
9.1 Kastelun merkitys	351
9.2 Kastelun tarve	353
9.3 Eri viljelykasvien kastelu	360

9.4 Kasteluveden hankinta	362
9.5 Kastelumenetelmät	364
9.6 Kasteltujen alueiden kuivatus	368
9.7 Kastelun ympäristövaikutukset	368
9.8 Kastelun talous	369
10 Metsäojitus ja vesiensuojelu Juhani Päivänen	373
10.1 Suo metsänkasvupaikkana ja metsäojitus	373
10.2 Puunkasvatukseen soveltuvien soiden valinta	375
10.3 Metsäojitustekniikan kehittyminen	376
10.4 Metsäojitetut suot ja kunnostusojituksen tarve	378
10.5 Kunnostusojitettavien kohteiden valinta	379
10.6 Toimenpiteiden järjestys ja toteutus kunnostusojituksissa	381
10.7 Vesiensuojelu kunnostusojituksessa	382
11 Turvetuotantoalueiden ojitus ja vesiensuojelu	387
Björn Klöve, Heini Postila ja Hannu Marttila	
11.1 Suot turvetuotannossa	387
11.2 Soiden ojitus turvetuotantoon	388
11.3 Turvetuotannon ympäristövaikutukset	390
11.4 Turvetuotantoalueiden vesiensuojelu	394
12 Ojitushankkeiden kustannukset ja hyödyt	401
12.1 Johdanto Raimo K. Nissinen	401
12.2 Peruskuivatuksen kustannukset, hyöty ja kannattavuus Raimo K. Nissinen	401
12.3 Salaojituksen kannattavuus tilatasolla Kaisu Haataja ja Jukka Peltola	412
12.4 Salaojituksen yhteiskunnallinen merkitys ja sen analyysi Jyrki Aakkula ja Jukka Peltola	420
13 Matemaattiset mallit maan vesi- ja ravinnetalouden säädössä	429
Tuomo Karvonen	
13.1 Johdanto	429
13.2 Pellon vesi- ja ravinnetalouden laskentamallien esittely	429
13.3 Miten tietokonemalleja voidaan käyttää apuna vesi- ja ravinnetalouden suunnittelussa	442
13.4 Pellon vesi- ja ravinnetalouden säädön mallintaminen tulevaisuudessa	449
Kirjallisuus	453
Hakemisto	479

Esipuhe

Käsillä olevan kirjan syntysanat lausuttiin Salaojituksen Tukisäätiön hallituksen kokouksessa, jossa puhetta johti Reino Uronen. Kirjan yksityiskohtaista suunnittelua varten perustettiin työryhmä, johon nimettiin Johan Korkman, Rauno Peltomaa, Jussi Saavalainen ja Pertti Vakkilainen. Tavoitteeksi asetettiin oppikirja, joka vastaisi muun muassa kysymykseen, kuinka maatalouden vesirakennuksen toimenpiteet tulee suorittaa, jotta ympäristöön kohdistuvat vaikutukset tulevat huomioiduksi mahdollisimman hyvin.

Maankuivatus- ja kastelutoimenpiteiden menestyksellinen suunnittelu ja toteuttaminen edellyttää perehtyneisyyttä maaperän ominaisuuksiin, vesien liikkeisiin ja laatuun, kasvuston kasvun ja veden välisiin yhteyksiin, konetyöskentelyn edellytyksiin ja lainsäädännön määräyksiin, joten oppikirjahankkeen onnistumiseksi käännyttiin useiden eri alojen asiantuntijoiden puoleen ja toivottiin heidän apuaan. Kaikki mukaan pyydetty tarjosivat auliisti asiantuntemuksensa kirjahankkeen käyttöön. Kirjaan kirjoitti 21 henkilöä. Toimistustyö on ollut allekirjoittaneiden vastuulla.

Aikaansaatu teos on jatkoa lähes sadan vuoden mittaiselle maatalouden vesirakennusta käsittelevälle opetusmateriaalituotannolle. Alan varhaisin suomenkielinen oppikirja on I.A. Hallakorven vuonna 1917 julkaisema ”Maankuivatus”. Hallakorven mukaan hänen kirjansa ”pyrkimyksenä on palvella kehittyneimpiä maanviljelijöitä”, mutta lisäksi ”se soveltuu korkeakoulussa ja yliopistossa opiskelevien käytettäväksi”. Saman toivomuksen esitämme tästä kirjasta. Hallakorven jälkeen kuivatusta ja kastelua käsitteleviä oppikirjoja tai sellaisiksi laskettavia käsikirja-artikkeleita ovat suomenkielellä kirjoittaneet muun muassa Pentti Kaitera, S. Paasilampi, Lauri Keso, Simo Muotiala ja Jussi Saavalainen. Heidän laatimansa julkaisut ovat olleet ahkerassa käytössä toimitustyötä tehdessämme. Hedelmällistä yhteistyötä on tehty Suomen ympäristökeskuksen kanssa, kun siellä on laadittu samanaikaisesti maankuivatuksen ja kastelun suunnittelua käsittelevä raportti.

Kiitämme lämpimästi kirjoittajia ja kaikkia niitä, jotka ovat tukeneet kirjan valmistumista. Osoitamme erityiskiitokset Juha Peltomaaalle, joka on huolehtinut kirjan ulkoasusta, sekä Jyrki Nurmiselle avusta kirjan viimeistelyssä. Kiitämme Salaojituksen Tukisäätiötä ja Sven Hallinin tutkimussäätiötä kirjahankkeen rahoittamisesta.

Helsingissä 20. elokuuta 2009

Maija Paasonen-Kivekäs
Rauno Peltomaa
Pertti Vakkilainen
Helena Äijö

Esipuhe 2. painokseen

Maan vesi- ja ravinnetalous -kirja julkaistiin vuonna 2009. Kirja tuli tarpeeseen, sillä siitä lähtien kirjaa on käytetty opetusmateriaalina monissa yliopistoissa, ammattikorkeakouluissa ja muissa oppilaitoksissa. Kun ensimmäinen painos oli myyty loppuun, päätettiin julkaista kirjasta toinen painos. Toiseen painokseen kirjoittajat ovat tehneet tarpeellisiksi katsomansa muutokset. Lainsäädäntöä käsittelevät kohdat on päivitetty vuonna 2012 voimaan tulleen vesilain mukaisiksi. Lisäksi muutamilta asiantuntijoilta on saatu täydennyksiä lukuihin 2, 3, 5 ja 13. Kirjaan on lisätty myös asiasanasto.

Toivomme, että tämä täydennetty painos palvelee kaikkia maan vesi- ja ravinnetaloudesta kiinnostuneita. Kirja on saatavissa sekä painetussa että sähköisessä muodossa.

Kiitämme lämpimästi kaikkia, jotka ovat osallistuneet kirjan täydennetyn painoksen valmistumiseen. Osoitamme erityiskiitokset Juha Peltomaaalle, joka on vastannut kirjan taitosta, sekä Jyrki Nurmiselle avusta kirjan viimeistelyssä. Kiitämme Salaojituksen Tukisäätiötä hankkeen rahoituksesta.

Helsingissä 25. helmikuuta 2016

Maija Paasonen-Kivekäs
Rauno Peltomaa
Pertti Vakkilainen
Helena Äijö

1 Johdanto

Pertti Vakkilainen

Kastelun ja maankuivatuksen historia on noin 6 000 vuotta vanhaa. Ensimmäiset merkit kastelu- ja kuivatusjärjestelmistä ovat olleet löydettävissä Eufraatin ja Tigriksen, Niilin, Induksen ja Keltaisen joen valuma-alueilta. Suunnitelmallista, tieteelliseen tietoon pohjautuvaa maatalouden vesirakennustoimintaa on harjoitettu vasta 1800-luvulta alkaen.

Maataloustuotannon riittävyys on eräs ihmiskunnan suurimmista haasteista. On ennustettu, että seuraavan 20-25 vuoden aikana ruuantuotannon on kaksinkertaistuttava väestönkasvun seurauksena. Ihmiskunnan käyttämästä vedestä noin 70 prosenttia kuluu maan kasteluun. Kasteltujen peltöjen osuus on vain vajaa viidesosa peltöjen kokonaismäärästä, mutta kastelluilta pelloilta saadaan lähes 40 prosenttia kokonaissadosta. Bioenergian tuotannon lisääntyminen tulee vaatimaan oman osansa käytettävissä olevista vesivaroista. Näyttää siltä, että maapallon mahdollisesti lämmitessä kuivuudesta kärsivien alueiden vesitilanne tulee entisestään vaikeutumaan.

Ravinnontuotannon kasvu on toistaiseksi pystynyt suurin piirtein seuraamaan väestön kasvua, joskin ongelmia on ollut ja on edelleen. Nälänhätä ja aliravitsemus piinavat satoja miljoonia ihmisiä ja tuottavat paljon kärsimystä. Viljelyn tehostamiseksi uusia peltoalueita on saatettu kastelun piiriin ja maatalouskemikaalien käyttöä on lisätty. Maataloutta voidaan tuotantotapojen osalta edelleen kehittää, mutta myös uutta peltoa on saatava lisää. FAO:n arvion mukaan maailmassa on pelloksi sopivaa maata noin 3 200 miljoonaa hehtaaria, josta viljelyyn on otettu parhaimmat 1 500 miljoonaa hehtaaria. Loppuosa sisältää pelloksi huonohkosti sopivia alueita ja alueita, joiden käyttöönottoa vastustetaan ympäristösyistä. Peltoa tarvitaan erityisesti alueilla, joissa maan kastelu on viljelyn edellytyksenä. Kastelun piirissä oleva peltoala on nykyään noin 300 miljoonaa hehtaaria ja siitä on ojitettu noin 20 prosenttia. Kaiken kaikkiaan viljelystä alasta on salaojitettu 200 miljoonaa hehtaaria. On tärkeää huomata, että mikäli kuivatus, joko luonnollinen tai ihmisen toimeenpaneva, toimii puutteellisesti, kastellut pellot suolaantuvat ja käyvät viljelykelvottomiksi.

Maankuivatuksessa ja kastelussa oli aiemmin pelkästään kyse maaperän vesitalouden järjestämisestä viljelyn kannalta mahdollisimman suotuisiksi. Kasvuston tuli kehittyä mahdollisimman hyvin ja maanviljelyskoneiden oli pystyttävä liikkumaan viljelyalueilla. Nykyään toisena, yhtä tärkeänä lähtökohtana on, että pellon ravinnetila saadaan kasvustolle optimaaliseksi ja että eroosio ja ravinnehuuhtoumat voidaan minimoida. Kyseessä ei ole helppo tehtävä, sillä peltoalueella tapahtuva veden ja ravinteiden käyttäytyminen ei ole ilmiönä yksinkertaisimmasta päästä. Oikein suunnitellulla maankuivatuksella ja kastelulla voidaan kuitenkin varmistaa, että sekä maaperän vesi- ja ravinnetalous että koneiden tarvitsema pellon kantavuus tulevat järjestetyksi parhaalla mahdollisella tavalla. Soveltamalla luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteita peruskuivatusratkaisuihin voidaan vähentää eroosiota ja ravinnehuuhtoutumia sekä huolehtia luonnon monimuotoisuudesta.

Suomessa viljelyssä olevan pellon kokonaispinta-ala ei ole merkittävästi muuttunut 1970-luvun alusta. Vuonna 2014 maatalousmaata oli käytössä 2 270 000 ha eli vajaa 8 % koko maan pinta-alasta. Maamme viljelyolosuhteita leimaavat kasvukauden lyhyys, lumen sulamisvesien runsaus, sadannan epäedullinen jakautuminen kasvukaudella, peltomaiden huono vedenläpäisykyky sekä turvemaiden runsaus. Maankuivatuksen toimivuus on vil-

jelyn perusedellytys, mutta myös maan kastelulla on merkitystä erityisesti eteläisessä ja läntisessä Suomessa. Peruskuivatus on Suomessa pääosin tehty, mutta sen toimintakyvyn säilyttäminen vaatii jatkuvaa kunnossapitoa. Salaojitustöille on edelleen tarvetta sekä täydennys-, uusinta- ja korjausojituksissa että salaojitusten kunnossapidossa. Avo-ojissa olevien peltojen salaojituksia tehdään enimmäkseen keskisessä ja pohjoisessa Suomessa.

Maankuivatusongelmat keskittyvät savimaille. Niissä jankko on koneiden painon kasvaessa tiivistynyt lähes vettä läpäisemättömäksi. Salaojitus toimii huonosti, vettä kertyy pellolle, eroosio ja ravinnehuuhtoumat kasvavat, maan rakenne heikkenee ja viljely hankaloituu. Ongelman ratkaisemiseksi tarvitaan keinoja, joilla maan rakenne saadaan korjatuksi ja hyvin vettä johtavaksi. Ilman toimivaa kuivatusta ei ole hyvää maan rakennetta. Lisäksi viljelymenetelmät ovat keskeisiä maan rakenteen ja vesistökuormituksen kannalta.

Metsäsektorin merkitys on Suomessa suuri. Suomen maapinta-alasta 86 % on metsätalouden piirissä. Soiden ja veden vaivaamien kankaiden ojituspinta-ala on noin 6 miljoonaa hehtaaria. Nämä alueet vaativat jatkuvaa kunnossapitoa. Tässä kirjassa keskitytään pääosin peltoalueiden vesi- ja ravinnetalouteen, mutta samaa teoriaa ja samoja menetelmiä voidaan soveltaa myös metsä- ja turvetuotantoalueilla.

Kirja jakautuu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa kuvataan maaperän ominaisuuksia, maavesien hydrologiaa sekä maaperässä tapahtuvia reaktioita ja aineiden kulkeutumista. Toisessa osassa esitetään maan kosteuden säätelyn menetelmät, ojitushankkeiden kustannus-hyötyanalyysin perusteet ja maan vesi- ja ravinnetalouden säädön nykyaikaiset apuvälineet, matemaattiset mallit.

I

Maaperän ominaisuudet ja prosessit

2 Maaperä

2.1 Johdanto

Helinä Hartikainen

Luonnontieteellisesti tarkasteltuna maaperä on keskeinen biosfäärin osa, joka on tiiviissä vuorovaikutuksessa ilman ja veden kanssa. Maaperä on uusiutuvien luonnonvarojen perusta, joka mahdollistaa mm. maa- ja metsätalouden harjoittamisen. Sillä on keskeinen merkitys myös elämän ylläpidossa, yhteiskunnan toiminnassa ja ympäristönsuojelussa. Maaperän koostumus ja siinä tapahtuvat fysikaaliset, kemialliset ja biologiset prosessit säätelevät veden ja muiden aineiden kiertoa ja kulkeutumista pinta- ja pohjavesiin. Maaperän eliöyhteisö, joka on määrältään ja diversiteetiltään huomattavasti suurempi kuin muut biosfäärin osat, on samalla geenireservi. Maahan kertynyttä orgaanista ainesta voidaan pitää valtavan suurena auringon energian varastona; maaperään kertyneen orgaanisen hiilen määrän on arvioitu ylittävän kaikissa muissa biosfäärin osissa olevan hiilen kokonaismäärän. Teknisessä mielessä maaperä on rakentamisalusta ja sen mineraali- ja orgaaninen aines toimivat raaka-aineina erilaisissa käyttötarkoituksissa.

Vaikka maaperä on keskeinen uusiutuvien luonnonvarojen perusta, se itse on käytännöllisesti katsoen uusiutumaton. Maaperä ei kuitenkaan pysy muuttumattomana, vaan erilaiset prosessit muokkaavat jatkuvasti sen ominaisuuksia. Se on puskuroitu erilaisia muutospaineita vastaan erittäin paljon paremmin kuin muut biosfäärin osat, mutta ihmisen toiminnan kuten teollistumisen, kaupungistumisen ja tehomaatalouden aiheuttama maaperän muuttuminen voi olla palautumatonta.

Suomi on maisemamuodoiltaan pienipiirteistä ja maalajimuodostumat eroavat toisistaan eri puolilla maata. Puuntuotantoa, maatalouden harjoittamista ja maaperän raaka-aineiden hyödyntämistä ajatellen edellytykset ja olosuhteet vaihtelevat alueellisesti huomattavasti. Maan lajitekoostumus, orgaanisen aineksen määrä ja maan rakenne vaikuttavat keskeisesti maan viljeltävyyteen, kuivatustarpeeseen, kasvien kasvuun ja maatalouden aiheuttamaan ympäristökuormitukseen.

Tässä luvussa kuvaillaan Suomen maaperän syntyä ja sen erityispiirteitä. Erilaisten maaperämuodostumien lisäksi tarkastellaan maalajeja ja niiden levinneisyyttä sekä kentällä tapahtuvaa aistinvaraista tunnistusta. Maalajien tarkempaa nimeämistä, joka perustuu maa-aineen koostumuksen määrittämiseen, esitellään erilaisten Suomessa ja ulkomailla käytössä olevien luokitusjärjestelmien avulla. Lisäksi kuvataan maannosten muodostumista ja kansainvälisiä maannosluokitusjärjestelmiä, joita muualla maailmassa käytetään yleisesti maaperän ominaisuuksien luonnehtimiseen. Maan ainesosista tarkastellaan lähemmin savimineraaleja, raudan ja alumiinin oksideja ja humusta, jotka vaikuttavat maan fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten veden pidättymiseen ja kuivumiskutistumiseen, ja jotka osallistuvat lukuisiin kemiallisiin reaktioihin. Luvun lopussa esitetään maan rakennetyypit, huokosto ja rakenteen muodostuminen sekä viljelyn ja maan rakenteen välinen vuorovaikutus. Veden virtaus ja aineiden kulkeutuminen etenkin hienorakeisissa maissa on pitkälti riippuvainen maan rakenteesta.

2.2 Maaperän muodostuminen

Helinä Hartikainen

Tieteellisesti määriteltynä *maa* tarkoittaa kiinteää kallioperää peittävää irtonaista kivennäisainesta ja/tai orgaanista ainesta. *Maaperä* on laajempi käsite ja sillä tarkoitetaan kallioperää verhoavaa maapeitettä kaikkine aineosineen, joihin kiinteän aineksen lisäksi kuuluvat liuosfaasi, kaasut, mikrobit ja muu eliöstö. Kallioperä ja maaperä muodostavat yhdessä *maankamaran*. Maaperän kivennäisainesta on kallioperän *rapautumisen* seurauksena syntyntä, joko paikallista alkuperää tai muualta kulkeutunutta. Eloperäinen aines ja eloperäiset maakerrokset ovat syntyneet kasvien ja eläinten jäänteistä sekä niiden hajoamistuotteista syntetisoituneesta aineksesta. Rapautumisessa kallio, kivet tai pienemmät maan kivennäishiukkaset hienonevat mekaanisesti tai muuttuvat kemiallisesti. Fysikaalisten ja kemiallisten tekijöiden lisäksi biologinen toiminta myötävaikuttaa rapautumisen edistymiseen, mutta sekin on perusmekanismeiltaan fysikaalista tai kemiallista.

Maaperä on elävä dynaaminen systeemi. Kemialliset, fysikaaliset ja biologiset tekijät muokkaavat jatkuvasti sen ominaisuuksia. Nämä tekijät johtavat *maannostumiseen*, jossa maaperän pintaosa muuttuu aikojen kuluessa kemialliselta koostumukseltaan ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan toisistaan erottuviksi *horisonteiksi*. Näin syntyy *maannos* eli *mantu*, joka tulee usein näkyviin, kun *maaprofili* paljastuu maaleikkauksissa tai kaivutöiden yhteydessä.

Rapautuminen

Kallioperän muuttuminen maaksi alkaa rapautumisella. Mannerjäätikön työ on hyvä esimerkki *fysikaalisesta* eli *mekaanisesta rapautumisesta*, jossa kiviaines sorautuu tai hienonee kulutusvoimien tai halkeilun seurauksena ilman että alkuperäinen mineraalikoostumus muuttuu. Lämpimässä ja kuivassa ilmastossa, esim. kasvipeitteettömissä autiomaissa, suuri vaihtelu yö- ja päivälämpötilojen välillä johtaa kivien halkeiluun, koska kivien eri mineraaleilla on erilaiset lämpölaajenemiskertoimet. Mitä monimutkaisempi kivilaji on mineraalikoostumukseltaan ja mitä karkearakeisempi se on, sitä tehokkaampana tuntuu lämpötilan vaihtelun vaikutus. Suomessa tämän mekanismin merkitys on melko vähäinen. Pakkashalkeilu aiheutuu kivien raoissa ja huokosissa olevan veden jäätymisestä ja sen aiheuttamasta laajenemisesta. Aridissa ilmastossa tapahtuu ns. suolahalkeilua, kun kuivassa ilmanalassa liukoiset suolat eivät pääse huuhtoutumaan. Veden haihtuessa kivikerroksen pintaosaan jäävä liuos väkevöityy. Lämpötilan laskiessa liuos tulee suolojen suhteen ylikyllästyneeksi, jolloin suolat kiteytyvät. Tällöin syntyy suuria laajenemisvoimia, koska erottuvien kiteiden ja jäljelle jäävän kyllästyneen liuoksen yhteistilavuus on suurempi kuin ylikyllästyneen liuoksen tilavuus. Kasvit voivat myötävaikuttaa kivien fysikaaliseen hajoamiseen tunkemalla juurensa niiden rakoihin ja halkeamiin. Juurten paksuuskasvun voima on niin suuri (ylärajan solun osmoottinen paine), että ne voivat työntää kiviä erilleen toisistaan.

Mekaaninen hienontuminen edistää *kemiallista rapautumista* lisäämällä aineksen ominaispinta-alaa, sillä kemialliset rapautumisreaktiot kohdistuvat aineksen pintaan. Niiden seurauksena mineraaleissa tapahtuu rakenteen tai kemiallisen koostumuksen muutoksia tai mineraaliaines voi jopa kokonaan liueta. Koska lämpötilan nousu edistää kemiallista rapautumista, Suomen viileässä ilmastossa reaktiot ovat edenneet melko hitaasti. Meillä on kuitenkin ollut riittävästi vettä, jonka puute voi kuivassa ja kuumassa ilmastossa hidastaa kemiallista rapautumista. Vesi toimii rapautumisessa 1) liuottimena, 2) reaktiokomponenttina, 3) rapautumistuotteiden poiskuljettajana ja 4) se voi liittyä paikalleen jäävien rapautumistuotteiden rakenteisiin.

Yksinkertaisin kemiallisen rapautumisen mekanismi on *liukeneminen*, joka tulee kyseen helppoliuokoisten alkali- ja maa-alkalimetallisuolojen kuten esim. kloridien muodos-

tamien mineraalien ja kipsin (CaSO_4) kohdalla. Suomessa näitä mineraaleja ei kuitenkaan esiinny. Meillä vesi toimii rapautumisen käynnistäjänä, kun mineraaliaines *hydratoituu* eli imee itseensä vettä. Esimerkiksi veden tunkeutuminen kiilteiden kerrosväleihin saa aikaan kerrosvälin laajenemisen, jolloin kerroksia yhteen sitovaa kaliumia pääsee vapautumaan liuosfaasiin ja kerrosväli alkaa avautua (ks. kohta 2.5 - Savimineraalit - Synty). Mineraali voi myös hajota *hydrolyysissä*, jossa se reagoi kemiallisesti veden H^+ (H_3O^+) tai OH^- -ionien kanssa. Tämä mekanismi koskee mm. silikaatteja, jotka ovat yleisimpiä mineraaleja. Reaktio on kuitenkin hyvin hidas, sillä veden dissosioituminen ioneiksi on vähäistä. *Protolyysi*, jossa H^+ -ionit ovat peräisin muualta kuin vedestä, on huomattavasti nopeampi reaktio. *Hapettumisreaktiot*, esim. mineraalikiteen Fe^{2+} -ionin hapettuminen Fe^{3+} :ksi, tekee mineraalikiteen pysymättömäksi sähkövarauksen muuttuessa. Yksinkertaiset orgaaniset hapot, joita syntyy esim. mikrobien hajotustoiminnassa tai juurten eritteinä, edistävät rapautumista liuottamalla tai muodostamalla mineraaliaineksen metallien kanssa *kompleksiyhdisteitä*, mikä lisää mineraaleissa olevien metallien liukoisuutta.

2.3 Suomen maaperän ominaispiirteet

Helinä Hartikainen

Suomen kallioperä kuuluu pääosaltaan maapallon vanhimpiin muodostumiin ja on syntynyt noin 3 000–1 250 miljoonaa vuotta sitten. Maaperämme puolestaan on hyvin nuorta, se on saanut muotonsa nuorimman geologisen kauden, kvartaarikauden, viimeisinä kymmeninä tuhansina vuosina. Eloperäistä ainesta lukuun ottamatta se on muodostunut mannerjäätikön peruskalliosta rouhimasta aineksesta ja sisältää moneen kertaan uudelleen kerrostuneita *kvartaarisedimenttejä*, mutta myös ennen kvartaarikautta rapautuneita aineksia.

Ennen viimeistä jäätiköitymistä kautta Suomea peitti vuosimiljoonien aikana syntynyt rapautumakerros. Kun mannerjäätikkö liukui maamme yli, se raivasi pois tätä irtonaista ainesta ja kuljetti sitä Keski- ja Itä-Eurooppaan. On arveltu, että ennen kuin viimeinen jäätikkö alkoi 20 000–18 000 vuotta sitten lopullisesti sulaa, sen reuna oli kulkenut maamme yli ainakin kahdesti. Näin ollen mannerjäätikön vaikutus kohdistui viime vaiheessa rapautumattomaan kallioperään, jota sen on arvioitu kuluttaneen keskimäärin seitsemän metriä. Jäätikön kallioperästä rouhimasta sekalajitteisesta kivimurskasta muodostui moreenia, joka on maamme yleisin maalaji. Maaperän synty tapa selittää sen, että suomalaisissa maissa on runsaasti rapautumatonta ainesta. Geologinen historia selittää myös sen, että maa- ja kallioperän raja on hyvin selvä päinvastoin kuin alueilla, joilla maaperä on syntynyt vuosimiljoonien kuluessa paikalla tapahtuneen kallioperän rapautumisen tuloksena.

Maaperän ominaisuuksia ja syntyvaiheita voidaan tarkastella maalajimuodostumien avulla jakamalla ne 1) jääkauden aikaisiin eli *glasiaalisiin* ja 2) myöhemmin (10 000 vuotta ennen ajanlaskumme alkua →) kerrostuneisiin *postglasiaalisiin* muodostumiin. Nämä muodostumat eroavat toisistaan mm. eloperäisen aineksen määrän suhteen. Kylvien olosuhteiden vuoksi jääkauden aikaisissa muodostumissa ei ole juuri lainkaan eloperäistä ainesta. Tällä on huomattava käytännön merkitys. Korkea orgaanisen aineksen pitoisuus postglasiaalisissa savikerrostumisissa estää mm. niiden käytön tiiliteollisuuden raaka-aineena.

Jääkauden aikaiset muodostumat

Kallion pinnan ja mannerjäätikön pohjaosien välissä moreeni kulkeutui vain muutaman kilometrin matkan. Se muodosti *pohjamoreenia*, joka tasoittaa suhteellisen yhtenäisenä ja tiukkaan sulloutuneena verhona kallioperän epätasaisuuksia. Esimerkiksi Savossa ja Kuusamossa pohjamoreenikerrostumat ovat niin paksuja, että niistä muodostui itsenäisiä maalajimuodostumia, *drumliineja*, jäätikön liikkeen suuntaisia pitkänomaisia selänteitä. Osa



Kuva 2.1 Suppamaastoa Itä-Suomessa. (Kuva Helinä Hartikainen)

moreenista joutui jäätikön sisäosiin ja kerrostui jäätikön sulaessa paikalleen pohjamoreenin päälle *pinta-* eli *ablaatiomoreenina*, jonka kerrospaksuus on tavallisesti 0–1 m. Joskus paksut pintamoreenikerrokset muodostavat *kumpumaastoa*. Kun pintamoreenin peittämät jäätikön reunaosat paikoin sulivat hitaammin kuin paljaat jäätikköpinnat, ne kuroutuivat vähitellen irti pääjäätiköstä. Moreeniin hautautuneen jäälohkareen sulaessa maanpinta painui ja siihen muodostui lopulta kuoppa, *suppa* (kuva 2.1).

Mannerjäätikön sulaessa syntyi jäätikköjokia, jotka kuluttivat jäätikköä ja sen alustaa: huuhtelivat kallioita paljaksi ja synnyttivät erilaisia uomia ja kuruja. Virtaava vesi pyöristi ja lajitteli mukanaan kuljettamaansa moreeniainesta jättäen jälkeensä puhtaaksi peseytynyttä hiekkaa ja soraa sekä pyöristyneitä kiviä ja lohcareita. Jäätikköjoet kasasivat lajittelemaansa ainesta mm. yhtenäisiksi selänteiksi, *harjuiksi*, joiden lajittuneella aineksella on huomattavaa teknistä käyttöä. Jäätikköjoen laskiessa mereen jokisuuhun kerrostui ainesta *suistomaaksi* eli *deltaksi*. Korkeilla paikoilla jäätikköjoki saattoi purkautua maalle, jolloin se muodosti ns. *kuivanmaan deltan* eli *sandurin*, tasaisen sora- tai hiekkakankaan.

Jään reunan jäädessä joksikin aikaa paikoilleen sulamisvedet kerrostivat sen eteen *reunamuodostumia*. Niistä mahtavimpia ovat Salpausselät (I, II ja III), joita pidetään kvartäärikauden merkittävimpiin kuuluvina muodostumina. Ensimmäinen Salpausselkä syntyi noin 11 000 vuotta ja Toinen Salpausselkä noin 10 500 vuotta sitten. Niiden synty selite-



Kuva 2.2 Lustosaven raidallinen rakenne kertoo aineksen kerrostumisen vuodenaikaisrytmistä. (Kuva Helinä Hartikainen)

tään ilmaston viilenemisellä, minkä seurauksena jäätikön reunan perääntyminen keskeytyi pariaksi sadaksi vuodeksi. Tällöin jäätikköjoet kasasivat reunan eteen deltoja tai sandureja tai niiden yhdistelmiä. Kolmas Salpausselkä muodostui noin 10 000 vuotta sitten. Salpausselkien suurimmat deltat leviävät nyt laajoina kankaina.

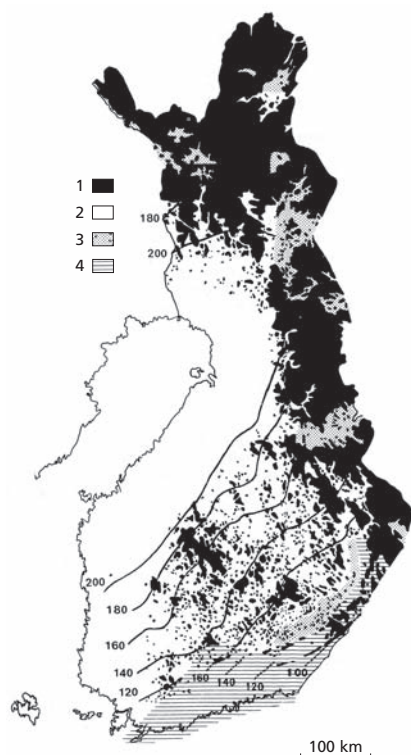
Sulamisveden kuljettama hienorakeinen liete sisälsi ainesta, joka oli lajitekoostumukseltaan savesta, hiesua ja hienoa hietaa. Lietteen karkein osa jäi kerrostumisaltaan reunalle. Hienojakoinen aines kulkeutui veden mukana kauemmaksi ja laskeutui syvään veteen kerrostumisaltaan pohjalle. Tämä materiaali muodosti harjujen ympärille *kerrallista savea* eli *lustosavea*. Näistä kerrostumista käytetään syntymisajankohtansa mukaisesti myös nimitystä *glasiaalisavet*. Lustorakenne syntyi vuodenaikojen vaihtelun myötä. Keväällä ja kesällä jäätikön nopean sulamisen aikaan kauempaan kerrostumisaltaan pohjalle sedimentoituneet kerrokset sisältävät runsaasti hienon lietteen karkeampia lajitteita. Hienojakoisin aines pääsi laskeutumaan karkeamman aineksen päälle vasta syksyllä ja talvella veden virtauksen hiljetessä. Luston tumma raita on runsaasti savesta sisältävä ”talvikeros” (tumma väri johtuu hienosta savesaineksesta) ja vaalea raita karkeammista aineksista koostuva ”kesäkerros” (kuva 2.2).

Jääkauden jälkeiset muodostumat

Kivennäismaamuodostumat

Mannerjäätikkö oli jopa yli kolmen kilometrin paksuinen, minkä vuoksi sen alla oleva maankuori oli painuksissa, satoja metrejä, Pohjanlahden alueella jopa lähes kilometrin, nykyistä alempana. Siksi jäätikön hävitessä laajat alueet jäivät veden peittoon muodostaen ns. *subakvaattisen* alueen (kuva 2.3), jolle leimallisia ovat sedimenttisyntyiset lajittuneet maalajit. Vain verraten pieni osa Pohjois- ja Itä-Suomea sekä eräät korkeimmat kohdat muualla ovat ns. vedenkoskemattonta eli *supra-akvaattista* aluetta, jolle on tyypillistä moreenien huuhtoutumattomuus ja savikoiden puuttuminen ainakin laajoina alueina.

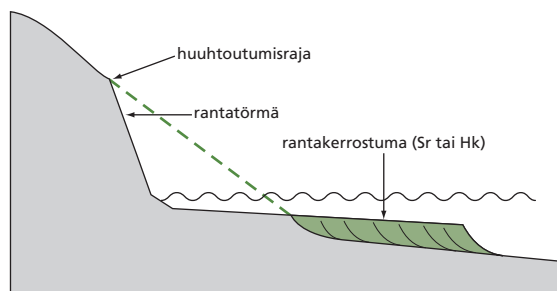
Kun veden pinta näennäisesti aleni maankohoamisen myötä, aallokko ja tyrskyt pääsivät huuhtelemaan jo aikaisemmin lajittuneita muodostumia ja veden äärellä olleita moreenirinteitä. Rantavoimien kuluttama aines kerrostui matalaan veteen aivan rannan edustalle, jolloin syntyi yleensä laakeita hiekka- tai sorakenttiä (kuva 2.4). Rantaviivan muinaisesta sijainnista merkkeinä ovat mm. *ranta-penkereet*, *pallekivikot* ja *rantavallit*. Moreenimaastossa korkein ranta näkyy huuhtoutumisrajana: rajan



Kuva 2.3 Veden peittämän (subakvaattisen) ja vedenkoskemattoman (supra-akvaattisen) maa-alueen jakautuminen Suomessa.

- 1 = supra-akvaattinen alue;
- 2 = subakvaattinen alue;
- 3 = jään patoamia järviä;
- 4 = Baltian jääjärven peittämä alue.

Viivat ovat ylimmän rannan isobaaseja. Kartta on M. Erosen ja H. Hailan laatima Suomen kartaston V laitosta, vihkoa 123-126 varten.



Kuva 2.4 Rantavoimat lajittelivat jään alta paljastuneita moreenirinteitä ja muodostivat niiden juurelle sora- tai hiekakenttiä.

saviksi. Jäätikön reunan perääntyessä kohti pohjoista väheni jäätiköltä tulevien sulamisvesien vaikutus nykyisen Etelä-Suomen rannikkoalueella. Saviin ei enää syntynyt vuodenaikojen vaihtelun rytmiä heijastelevaa lustorakennetta. Merestä kohonneiden savikoiden ainesta saattoi kulkeutua takaisin mereen myös jokien puhkoessa uomia ja kuluttaessa maaperää. Näiden kerrostumien kivennäisaineksen raekoostumus vaihtelee, mutta ne ovat usein etupäässä savea ja hiesua. Kun rannikkovedet mataloituivat ja kasvillisuus alkoi peittää maaperää, savien sekaan rupesi kerrostumaan orgaanista ainesta ja syntyi *liejusavea*. Suomen rannikoilla on melko yhtenäisiä savikoita, joiden kerrostumien paksuus saattaa olla useita kymmeniä metrejä. Sisämaahan mentäessä savikerrokset ohenevat.

Jääkauden jälkeen vallinneiden kuivien ja kylmien olojen vuoksi tuuli pystyi kasvipitteettömillä alueilla saamaan liikkeelle raekooltaan sopivaa (0,06 – 0,6 mm eli karkeaa hietaa ja hienoa hiekkaa) maa-ainesta ja kerrostamaan sitä *lento-hiekkinoksiksi* eli *dyyneiksi*. Niiden aines on siis peräisin jo aiemmin lajittuneesta aineksestä. Tuulikerrostumia syntyi siihen saakka että kasvillisuus sitoi jäätikön perääntyessä paljastuneen maaperän. Myöhemmin tuulen toiminta on jatkunut sellaisilla ranta-alueilla, joilla on paljon tuulen kuljetettavaksi sopivaa ainesta ja jotka sijaitsevat vallitseviin tuulen suuntiin nähden edullisesti. Myös maankohoaminen jatkuu edelleen mutta hidastuneena. Se myötävaikuttaa *tulvakerrostumien* syntyyn varsinkin Pohjanmaalla ja Satakunnassa. Jokien kaltevuuden jatkuvasti pienetessä niiden tulvaherkkyys lisääntyy. Tulvien peittämille maille kerrostuu suhteellisen hienojakoista humuspitoista lietettä ja jokivesien tuomaa orgaanista ainesta.

Eloperäiset kerrostumat

Suomi on maailman soistuneimpia maita; suot ja soistumat peittävät yli 30 % maamme maapinta-alasta. Mannerjään sulamisen jälkeen alkoi sopiviin altaiisiin ja painanteisiin syntyä kahdentyyppisiä eloperäisiä kerrostumia: *biogeenisiä sedimenttejä* ja *turpeita*. Biogeenisistä sedimenteistä huomattava osa on erilaisia *liejuja*, jotka ovat useimmiten kirkasvetisten järvien pohjalle kerrostunutta ainesta. Ne ovat kimmoisia ja väriltään ruskeita tai ruskeanvihreitä. Niiden sisältämä orgaaninen aines on *autoktonista* eli peräisin järven omasta perustuotannosta. Liejakerrostumia on saatu viljelykäyttöön järvenlaskujen yhteydessä. Soistuneilla alueilla ruskeavetisiin järviin syntyy ruskeaa ja rakenteeltaan tiivistä *järvimutaa*. Sen sisältämä eloperäinen aines on *alloktonista* eli muualta kulkeutunutta. Järvimutaa syntyy, kun liuenneet ja suspendoituneet orgaaniset ainekset saostuvat ja painuvat pohjaan. Näitä kerrostumia tavataan umpeenkasvaneissa järvissä sekä järvikuivioissa turpeen ja liejun välissä.

Turpeet koostuvat *autoktonisesta* eli paikalla kasvaneen kasvillisuuden jäänteistä. Niitä syntyy, kun suokasvillisuus pääsee valtaan tavallisesti liian märkyyden takia ja kasviaineksen tuotanto on runsaampaa kuin hajotus. Soiden happamissa oloissa sienet olisivat tehok-

yläpuolella moreeniaines on vedenkoskematonta ja tiivistä, alapuolella pintaosastaan huuhtoutunutta tai eripaksuisten rantakerrostumien peittämää.

Jääkauden jälkeen syntyneet hienorakeiset kerrostumat, *postglasiaalisavet*, ovat yleensä jäykkiä eli lihavia savia. Niiden aines on suureksi osaksi peräisin glasiaalisavista, jotka maankohoamisen vuoksi nousivat rantavyöhykkeeseen ja joutuivat rantavoiimien kuluttamiksi ja kerrostuivat uudelleen syvempään veteen tasakoosteisiksi

kaampia kasviaineksen hajottajia kuin bakteerit, mutta niiden toimintaa rajoittaa märkyydestä johtuva huono happitilanne. Hajotustoimintaa hidastaa osaltaan myös ravinteiden niukkuus ja matala lämpötila. Soiden syntytapoja merenrannan soistumisen lisäksi ovat järvien umpeenkasvu sekä metsä- ja tulvamaan soistuminen. Myös tulvattoman kivennäismaan soistuminen on melko yleistä. Esimerkiksi tiiviissä moreenimaassa saattaa painannepaikkoihin kertyä vettä, mikä mahdollistaa sammalten viihtymisen. Vähitellen alkaa ilmaantua muutakin suokasvillisuutta, joka leviää samalla kun turvekerroksen paksuus kasvaa. Puusto kärsii ja vähitellen paikalle syntyy korpi tai räme.

2.4 Maalajit

Helinä Hartikainen

Maaperän syntyvaiheessa vallinneet olosuhteet heijastuvat usein varsin selvästi maan ominaisuuksissa ja vaikuttavat siten maan soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin. Koska samalaisilla mailla oletetaan olevan samanlaiset ominaisuudet, luonnossa esiintyvät maakerrostumat pyritään luokittelemaan. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna yleinen luokitteluperusta on maannosmuoto (ks. kohta 2.7), mutta Suomessa kiinnitetään päähuomio maalajiin. Maat, joissa orgaanista ainesta on alle 20 %, luokitellaan *kivennäismaiksi*. Poikkeuksen tekevät liejumaat, jotka luetaan kuuluviksi eloperäisiin maihin, jos niiden orgaanisen aineksen pitoisuus on yli 6 %. Geologisesti maalajit ryhmitellään yleensä syntyolosuhteiden mukaan ja kivennäismaalajit jaetaan kahteen ryhmään: lajittumattomiin ja lajittuneisiin. Edelliseen ryhmään kuuluu jäätikön työn tuloksena syntynyt *moreeni*, joka on maalajin nimitys, mutta jota käytetään myös maalajimuodostumista puhuttaessa. Jälkimmäisen ryhmän muodostavat veden tai tuulen kerrostamat *sedimentit*. Kivennäismaiden luokitus perustuu lajitekoostumukseen eli *tekstuuriin* ja eloperäisten maiden luokitus orgaanisen aineksen määrään ja laatuun. Joidenkin maalajien kohdalla luokittelun lähtökohtana on maan synty tapa. Tällainen maalaji on esim. liejusavi.

Kivennäismaat

Maalajitteet ja maan tekstuuri

Maan kivennäisaines jaetaan hiukkasten koon mukaan eri *maalajitteisiin*. Eri lajiteluokkien ominaisuudet eroavat toisistaan. Mitä enemmän maassa on tiettyä raekokoa olevaa ainesta, sitä voimakkaampana sen vaikutus heijastuu maan ominaisuuksissa. Raekokoluokitus vaihtelee eri järjestelmissä. Suomessa maa- ja metsätalouden tarpeita varten sovelletaan Atterbergin vuodelta 1912 peräisin olevaa luokitusta. Se on myös IUSS:n (International Union of Soil Science) suosittelema kansainvälinen järjestelmä. Lisäksi meillä on käytössä GEO-luokitus (geotekninen luokitus), jota käytetään mm. rakennusteknisiin tarkoituksiin.

Taulukossa 2.1 on vertailtu suomalaisissa luokituksissa käytettäviä lajitejaotuksia. Neli-jakoisessa Atterbergin luokituksessa päälajite voidaan jakaa edelleen karkeaan ja hienoon osaan. Kolmijakoisessa GEO-luokituksessa on myös keskikarkea lajite. Siinä yhdistetään hiesu ja hieno hieta siltiksi (Si), hiekka ja karkea hieta hiekaksi. Näiden lajitteiden yhdistäminen on maa- ja metsätalouden näkökulmasta jossain määrin epätarkoituksenmukainen, koska kasvintuotannon kannalta hiesun fysikaaliset ominaisuudet ovat huonot, mutta hiekan erinomaiset. Jakoa hiekkaan ja silttiin voidaan kuitenkin perustella sillä, että 0,06 mm läpimitan paikkeilla muuttuvat lajitteiden kosteusominaisuudet ja siten myös routivuusominaisuudet ratkaisevasti: tätä rajaa karkeammat lajitteet ovat helposti kuivuvia ja veden kapillaarinen nousu on heikkoa. Atterbergin luokituksessa voidaan routivuuden rajana pitää hienoa hietaa; puhdas karkea hieta ei roudi. Yhdysvalloissa käytetään taulukossa 2.1 esitettyä USDA:n (United States Department of Agronomy) lajitejakoa yleisesti maatalou-

Taulukko 2.1 Maalajiteluokitus eri järjestelmissä ja lajitteiden nimitykset.

Rakeiden läpimitta (mm) ja nimitys, lyhenne Atterbergin luokituksessa (engl.kielinen nimi suluissa)				GEO-luokitus		Rakeiden läpimitta (mm) ja nimitys, USDA ¹⁾	
– 0,002	saves	S	(clay)	savi	Sa	– 0,002	clay
0,002 – 0,006	hieno hiesu	HHs	(silt)	hienosiltti	Si	0,002 – 0,05	silt
0,006 – 0,02	karkea hiesu	KHs		keskisiltti			
0,02 – 0,06	hieno hietä	HHt	(fine sand)	karkeasiltti	Hk	0,05 – 0,1	fine
0,06 – 0,2	karkea hietä	KHt		hienohiekka			
0,2 – 0,6	hieno hiekka	HHk	(coarse sand)	keskihiekka	Sr	0,1 – 0,5	medium sand
0,6 – 2	karkea hiekka	KHk		karkeahiekka		0,5 – 1	coarse
2 – 6	hieno sora	HSr	(gravel)	hienosora	Sr	1 –	gravel
6 – 20	karkea sora	KSr		keskisora			
20 – 60	pienet kivet	Ki		karkeasora			

¹⁾ Unites States Department of Agriculture

nessa, mutta käytössä on myös muita lajiteluokituksia. Esimerkiksi tienrakennus- alalla on käytössä järjestelmä, jossa hiekkalajite (engl. *sand*) jaetaan vain hienoon ja karkeaan osaan (raja 0,25 mm). USDA:n luokittelu on laajalti käytetty maatalous- alalla myös muissa maissa.

Lajitteiden lyhenteissä käytetään isoa alkukirjainta (esim. Ht = hietä), pieni alkukirjain viittaa adjektiiviin (ht = hietainen). Atterbergin luokituksessa lajitteen hienon ja karkean osan nimeämisessä sen lyhenteen eteen liitetään H- tai K-kirjain (esim. HHt = hieno hietä). GEO-luokituksessa alalajitteiden lyhenteinä käytetään pieniä kirjaimia: h = hieno, ke = keski, ka = karkea. Maalajin nimeäminen tapahtuu lajitekoostumuksen perusteella, mutta luokitusperusteet vaihtelevat eri maissa. Usein jo samassa maassakin eri ammattikunnat luokittelevat maita eri tavalla, sillä käyttötarkoitus sanelee luokitusperusteita.

Maalajiluokitus ja maalajien nimeäminen

Kivennäismaiden jakoa lajittumattomiin ja lajittuneisiin maalajeihin voidaan pitää nimeä- misen lähtökohtana. Moreenit ovat lajittumattomia tai hyvin huonosti lajittuneita ja niissä tavataan kaikkia tai ainakin hyvin monia lajitteita kivistä ja lohkareista savekseen saakka. Niiden tunnistamisessa tarvitaan aistinvaraisia havaintoja mm. kivien hioutumattomuus- desta. Lajittuneissa maalajeissa on tiettyä raekokoa olevaa ainesta selvästi runsaammin kuin muita lajitteita. Jos maalajista tarvitaan täsmällistä tietoa, kivennäismaista tehdään tavallisesti laboratoriossa ns. *mekaaninen maa-analyysi*, jossa määritetään lajitekoostumus maanäytteestä, joka on esikäsitelty yksittäisiä hiukkasia yhteen sitovien aineosien pois- tamiseksi. Hienon hiedan ja sitä hienojakoisemman aineksen raekokoanalyysissä käyte- tään menetelmiä, jotka perustuvat erikokoisten hiukkasten erilaiseen laskeutumisnopeu- teen vedessä. Karkea hietä (raekoko 0,06-0,2 mm) ja sitä karkeammat lajitteet erotellaan seulomalla.

Moreenimaiden tarkempi nimeäminen tehdään vallitsevan lajitteen mukaan sora-, hiekka-, hietä-, hiesu- ja savimoreeneiksi (SrMr, HkMr, HtMr, HsMr, SMr). Kolmea viimeksi mainit- tua kutsutaan yhteisellä nimellä hienoaineksinen moreeni (HMr) ja niiden osuus maamme moreeneista on noin 15 %. Suomessa käytössä olevien järjestelmien mukaan lajittuneet kivennäismaat luokitellaan savimaiksi, jos saveksen osuus niissä on yli 30 %.

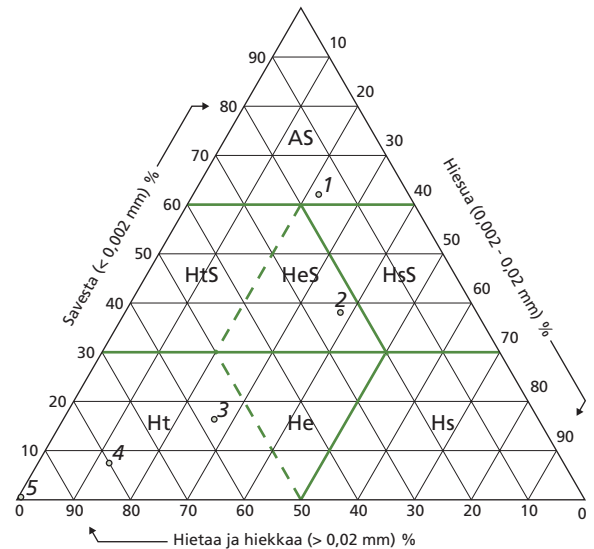
Lajittuneiden maalajien nimeämisessä voidaan käyttää apuna ns. maalajikolmiota. Suo- messa käytössä oleva kolmio (kuva 2.5) on huomattavasti yksinkertaisempi kuin edellä mainitun USDA:n kehittämä kolmio (kuva 2.6). Lajiterajojen erojen vuoksi lajitekoos-

tumukseltaan samanlaiset maanäytteet voivat sijoittua niissä hyvin eri kohtiin. Tästä esimerkkinä on näytteiden 1 ja 2 sijoittuminen kuvissa 2.5 ja 2.6. Määrittäminen aloitetaan aina saveksen (S) pitoisuutta osoittavalta sivulta. Maatalouden käytännön tarpeita varten savet jaetaan Suomessa kolmeen ryhmään seuraavin perustein:

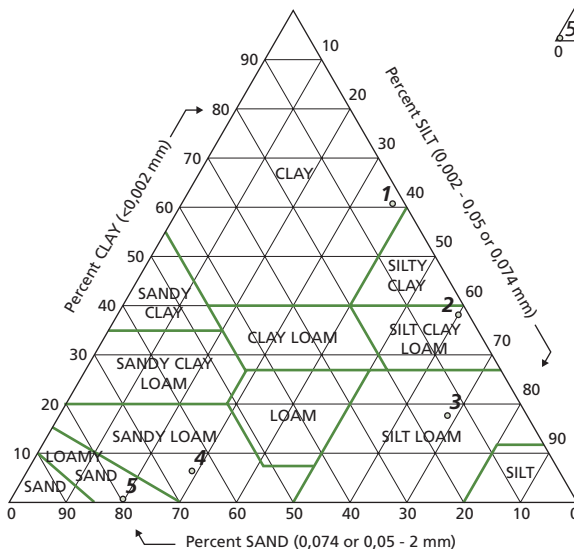
- aitosavi (AS): savesta yli 60 %
- hiesusavi (HsS): savesta 30-60 % hietaa ja hiekkaa alle 20 %
- hietasavi (HtS): savesta 30-60 % hietaa ja hiekkaa yli 20 %.

Muun muassa viljavuustutkimuksen yhteydessä hietasavista erotetaan omaksi maalajikseen hiesusavi, jossa on hiesua 20-50 % ja hietaa 20-50 %. Hiesusavea (HeS) rajaavan kolmion samoin kuin hiuetta (He) rajaavan kolmion vasen kylki on merkitty katkoviivoin kuvassa 2.5. Käytännön kokemus on kuitenkin osoittanut, että hiesusaven alue maalajikolmiossa on liian suuri. Hiesusaven kevein osa muistuttaa ominaisuuksiltaan hiesua ja lihavin osa aitosavea. Hiesuja karkeammat kivennäismaat luokitellaan savesta karkeamman vallitsevan lajitteen mukaan. Mikäli lajitteiden osuuksia kuvaavat suorat leikkaavat kolmion vasemmassa alanurkassa, maalaji nimetään esimerkiksi hienoksi hiedaksi (HHt), jos vallitseva karkea lajite on 0,02–0,06 mm. Maataloudellisessa luokituksessa erotetaan usein hiue omaksi maalajikseen. Raekostumukseltaan se jää hiesun ja hiedan väliin (kuva 2.5). Hiue ei ole kuitenkaan selkeästi vakiinnuttanut asemaansa, koska sen ominaisuudet vaihtelevat erittäin paljon riippuen hiedan ja hiesun keskinäisestä osuudesta. Maapallolla yleinen *eolinen* (tuulen pitkiä matkoja kuljettama) maa eli *löss* on yleisimmin raekostumukseltaan hiuetta.

Geologisissa tutkimuksissa kivennäismaat nimetään d_{50} -menetelmän mukaan, jossa maasta tehdään rakeisuus- eli seulentakäyrä. Lajitteiden



Kuva 2.5 Suomessa nykyisin käytössä oleva maalajikolmio. Maalaji nimetään raekokojakauma-analyysin (%) tulosten avulla. Näyte 1 = aitosavi (62 % savesta, 24 % hiesua), näyte 2 = hiesusavi (39 % savesta, 38 % hiesua, 23 % hietaa ja hiekkaa). Nuolet osoittavat akselien lukusuunnat.



Kuva 2.6 Yhdysvalloissa yleisesti käytössä oleva USDAn (United States Department of Agriculture) maalajikolmio.

prosenttiosuuksista laaditaan hienoimmasta lajitteesta alkaen summakäyrä kuvan 2.7 osoittaman esimerkin mukaan (S; S + HHs; S + HHs + KHs; S + HHs + KHs + HHt; jne). Maalaji saa nimensä sen lajitteen mukaan, jonka kohdalla rakeisuuskäyrä leikkaa läpäisyprosenttia 50 osoittavan alueen. Tässäkin järjestelmässä saveksi nimetään kuitenkin maat, joissa savesta on vähintään 30 %. Jos savesta on 30-50 %, kyseessä on laiha savi. Mikäli savesta on yli 50 %, maa on lihavaa savea. Karkeiden maiden nimeämiseen d_{50} -menetelmä sopii paremmin kuin maalajikolmio.

Orgaanisen aineksen pitoisuus otetaan huomioon kivennäismaiden nimeämisessä käyttämällä maalajin nimen edellä lisämäärettä vähämultainen (orgaanista ainesta alle 3 %), multava (3-6 %), runsasmultainen (6-12 %) tai erittäin runsasmultainen (12-20 %). Liejusavet (LjS) kuuluvat syntytapansa perusteella luokiteltaviin maihin; ne ovat syntyneet meren tai kirkasvetisten sisävesien pohjalle laskeutuneesta kivennäisaineksen sekä kasvi- ja eläinjäänteiden seoksesta. Jos pohjamaa on savea ja sen orgaanisen aineksen pitoisuus on 3-6 %, maa-

Tietoruutu 2.1

Maalajien luokittelu eri järjestelmien mukaan

Ulkomaista kirjallisuutta luettaessa maalajien nimistö tuottaa ongelmia, koska eri maissa lajitekoostumukseen perustuvat maalajien väliset rajat voivat olla erilaisia. Tämän lisäksi luokituksessa käytettävät lajitteiden kokorajat voivat poiketa Suomessa käytössä olevista rajoista. Tässä suhteessa eroja voi olla myös tietyn maan eri tutkimuslaitosten käyttämien järjestelmien välillä. Suomalainen maalajikolmio on varsin yksinkertainen verrattuna esim. Australiassa, Iso-Britanniassa ja Yhdysvalloissa käytössä oleviin. Laajasti käytetyssä amerikkalaisessa USDA:n (United States Department of Agronomy) maalajikolmiossa maalajeille saatavat lajiteosuuksien leikkauspisteet voivat asettua varsin eri paikkoihin kuin suomalaisessa maalajikolmiossa. Suurin eroa selittävä tekijä on, että USDA:n luokituksessa luetaan Suomen järjestelmän mukainen hienon hiedan fraktio yhdessä hiesun kanssa silttilajitteeseen. Eroja on tosin myös lajiterajoissa. Taulukossa T2.1 on esitetty viiden erilaisen maan lajitekoostumustiedot ja taulukossa T2.2 niiden nimet eri luokitusjärjestelmien mukaan. Kuvassa T2.1 maa-rakeiden jakautumaa (massa-%) kuvaavat seulonta- eli summakäyrät (d_{50} -menetelmä). Niitä vastaavien maalajien sijoittuminen suomalaisessa maalajikolmiossa on esitetty kuvassa T2.2 ja USDA:n maalajikolmiossa kuvassa T2.3.

Taulukko T2.1 Maanäytteiden 1-5 lajitekoostumus.

Lajite	Rakeiden läpimitta mm	Osuus massa-%				
		Maa 1	Maa 2	Maa 3	Maa 4	Maa 5
KSr	20–6					
HSr	6–2					
KHk	2–0,6				5	20
HHk	0,6–0,2			2	32	34
KHt	0,2–0,06		2	13	30	26
HHt	0,06–0,02	14	21	42	17	20
KHs	0,02–0,006	14	24	18	6	
HHs	0,006–0,002	10	14	8	6	
S	< 0,002	62	39	17	4	

Maanäytteille saadaan seuraavat nimet eri tavoin määritettynä:

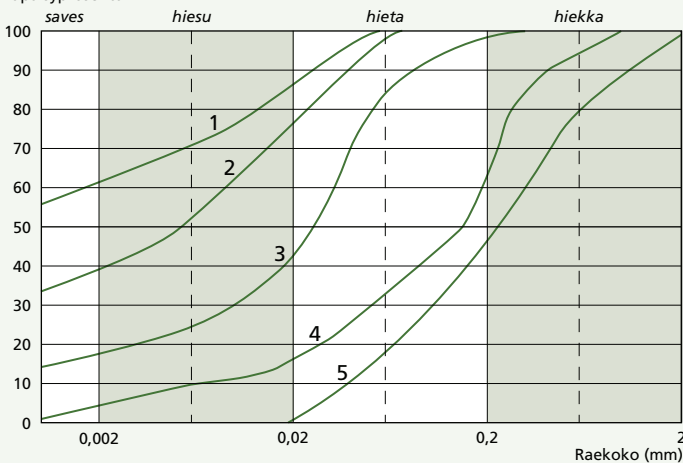


Taulukko T2.2 Maanäytteiden 1-5 nimet eri luokitusjärjestelmissä.

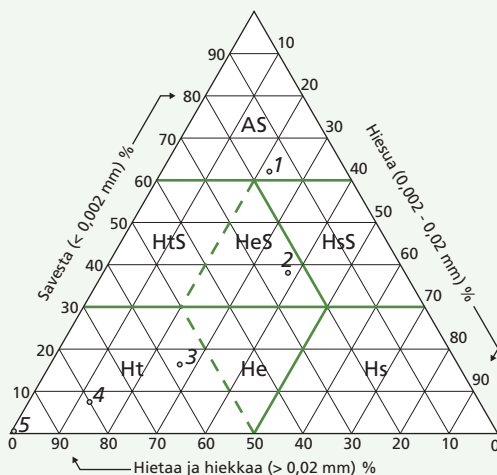
Näyte	d_{50} -menetelmä	Suomalainen maalajikolmio	USDA:n maalajikolmio
1	S lihava savi (LiSa)	Aitosavi (AS)	Clay
2	S laiha savi (LaSa)	Hiuesavi (HeS)	Silt clay loam
3	Hieno hietä (HHt)	Hieno hietä (HHt)	Silt loam
4	Karkea hietä (KHt)	Hieno hiekka (HHk)	Sandy loam
5	Hieno hiekka (HHk)	Hieno hiekka (HHk)	Loamy sand

Jos maanäytteessä on savesta yli 30 %, d_{50} -menetelmässä se luokitellaan saveksi. Jos saveksen osuus on yli 50 %, maa on lihavaa savea, jos alle 50 %, se on laihaa savea. Suomalaisen maalajikolmion osalta on huomattava, että kolmion Ht-kulmaan sijoittuvat hietä ja sitä karkeammat maalajit. Siksi leikkauspisteen osuessa sen alueelle, on katsottava vallitseva lajite ja nimettävä maalaji sen mukaan.

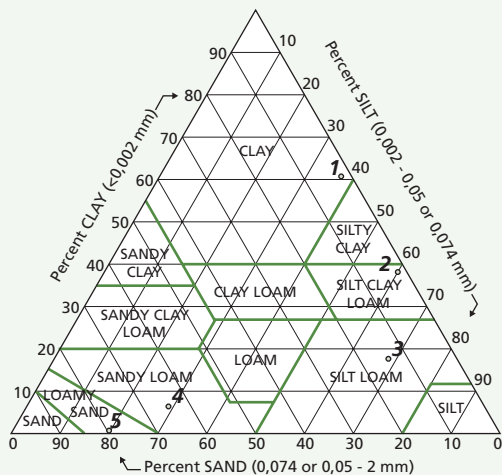
Kumulatiivinen
läpäisyprosentti



Kuva T2.1
Maanäytteiden
1–5 lajitteiden
summakäyrät
suomalaisilla
raekokorajoilla.



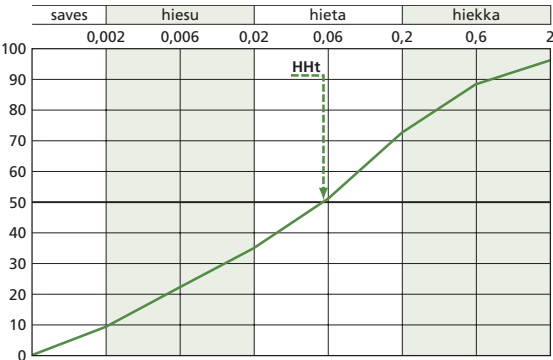
Kuva T2.2 Maanäytteiden 1–5 sijoittuminen suomalaiseseen maalajikolmioon.



Kuva T2.3 Maanäytteiden 1–5 nimeäminen amerikkalaisen USDA:n maalajikolmion avulla.

Kuva 2.7 Esimerkki d_{50} -menetelmän mukaan laaditusta rakeisuuskäyrästä. Summakäyrä leikkaa läpäisyprosentin 50 hienon hiedan raekoon kohdalla, jolloin maalaji saa nimeksi HHT.

Lajite	Hiukkaskoko	%	Σ%
Sr	> 2 mm	4	100
KHk	0,6 - 2 mm	8	96
HHk	0,2 - 0,6 mm	15	88
KHt	0,06 - 0,2 mm	20	78
HHT	0,02 - 0,06 mm	18	53
KHs	0,006 - 0,02 mm	13	35
HHs	0,002 - 0,006 mm	12	22
S	< 0,002 mm	10	10



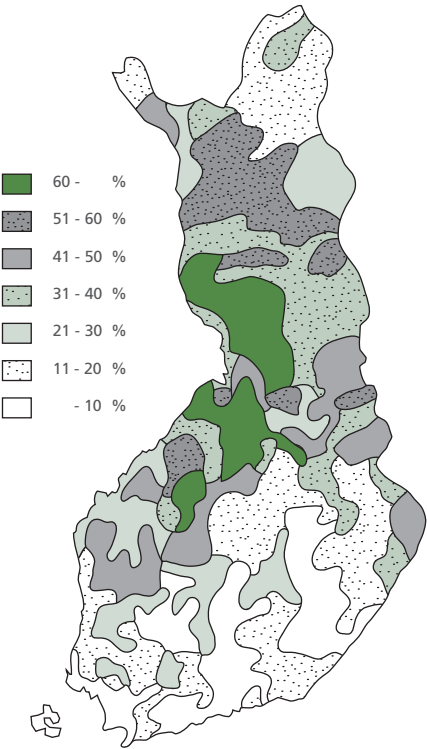
laji luokitellaan liejusaveksi. Tämän maalajin piirteitä, kuten ruosteisia halkeamapintoja, voi kuitenkin esiintyä jo sellaisissakin maissa, joiden hiilipitoisuus on alle 1 %. *Happamat liejusavet* eli *urpasavet* ovat syntyneet Itämeren Litorina-vaiheessa meren pohjalle. Meriveden sulfaatilla on ollut keskeinen merkitys sen synnyssä (ks. kohta 4.2 - Rikki ja happamat sulfaattimaat). Maalajien luokittelu eri järjestelmien mukaan on esitetty Tietoruu­dussa 2.1.

Eri maalajien esiintyminen Suomessa

Maalajimuodostumien levinneisyys kytkeytyy mannerjäätikön vaiheisiin, kerrostumispaikan korkeussuhteisiin ja maankohoamiseen. Levinneisyyden arviointia vaikeuttaa kuitenkin se, että erityyppiset maakerrostumat peittävät toisiaan ikäjärjestyksessä. Esimerkiksi ran-

nikolla vanhat savet sijaitsevat nuorien alla. Sisämaan korkeat alueet ovat nousseet merestä aikaisemmin kuin rannikko, minkä vuoksi siellä esiintyy maan pinnassa vanhempaa savea kuin rannikolla. Lisäksi viljelysmaiden maalajisuhteista voidaan saada erilainen kuva riippuen siitä, tarkastellaanko pinta- vai pohjamaasta otettua näytettä. Savien osuus muokkauskerroksessa on yleensä pienempi kuin pohjamaassa. Vastaavasti eloperäisten maiden osuus muokkauskerroksessa on suurempi kuin pohjamaassa.

Pohjanmaan rannikkoalueella, joka on alavaa ja tasaista sekä vähäjärvistä, on runsaasti matalia soita (kuva 2.8). Maankohoamisen seurauksena rantaviiva on perääntynyt ja rantavoimat ovat huuhdelleet ja lajitelleet aikaisempia merenpohjan sedimenttejä. Tämän vuoksi lajittuneet karkeat maalajit ovat levinneet laajoille alueille. Turvekerrostumien alla tavataan yleisesti savi- ja hiekkakerrostumia. Järvi-Suomi on ollut pääosin melko lyhyen ajan veden peitossa. Hienorakeisia maala-jeja tavataan alavilla mailla ja toisinaan vesien rannoilla. Järvialtaiden pohjalle on saattanut laskeutua savea ja hiesua joskus melko paksuiksikin kerroksiksi. Yleisin maalaji on kuitenkin moreeni, joka peittää ohuena kerroksena kallioperää. Vesivaiheen aikana mäkien lakiosat ovat yleensä huuhtoutuneet



Kuva 2.8 Soiden osuus maapinta-alasta Suomen eri osissa (laadittu Ilvessalo 1960 mukaan).

paljaiksi ja laaksoissa tavattavat maakerrokset ovat vastaavasti paksumpia. Vedenjakajan alue eli Suomenselkä oli myös suurimmaksi osaksi subakvaattista aluetta, mutta siellä on lukuisia korkeita paikkoja, jotka jäivät vedenkoskemattomiksi. Suomenselän alueella on runsaasti soita, vähän järviä ja joet ovat vähävetisiä ja lyhyitä. Moreeni on vallitsevin kivennäismaalaji ja paikka paikoin tavataan karkearakeisia rantakerrostumia.

Raja-Karjalan ja Lapin alue muodostaa suurimman osan supra-akvaattisesta eli vedenkoskemattomasta alueesta. Näillä alueilla tavataan hyvin vähän veteen kerrostuneita ja lajittuneita aineksia, mutta sen sijaan monenlaisia moreenin kasaantumismuotoja: esim. drumliineja ja kumpukuoppamaastoa. Savikoita ja muita selvästi lajittuneita maalajimuodostumia ei esiinny ainakaan laajoina alueina.

Kivennäismaalajien aistinvarainen tunnistus

Kentällä voidaan tehdä alustavia päätelmiä maalajista paikkakunnan (maalajien levinneisyyskartat), alueen topografian ja esiintymän geologisen luonteen perusteella. Kivennäismaiden kohdalla on syytä aluksi arvioida, onko alue ollut jääkauden jälkeen veden peittämää vai ei. Lajittuneita maita voi esiintyä laajoina alueina vain seuduilla, jotka ovat olleet jossain vaiheessa jääkauden jälkeen veden peitossa. Koska moreeniamainen ei ole lajittunutta, rakeet ovat säilyneet särmikkäinä ja kivien pinnat ovat hienon aineksen peitossa. Aistinvaraisessa tarkastelussa aines luokitellaan moreeniksi, jos tämä tunnusmerkitö täyttyy. Moreenimaiden nimeäminen tapahtuu sen perusteella, mikä tai mitkä lajitteet siinä ovat vallitsevia.

Aistinvarainen tunnistus vaatii kokemusta ja eri määrittäjät voivat päätyä varsin erilaiseen lopputulokseen. Tarkastelussa kiinnitetään huomiota mm. maa-aineksen rakeisuuteen, tahraavuuteen, väriin, kasvinjäänteisiin sekä murujen kovuuteen, sitkeyteen ja mahdollisiin ruostepintoihin. Eri lajitteille tyypilliset ominaisuudet vaikuttavat maalajien ominaisuuksiin sitä tuntuvammin mitä suurempi niiden osuus on. Tämä helpottaa erityisesti lajittuneiden maalajien tunnistusta, sillä niissä on yleensä jotain lajitetta runsaammin kuin muita. Lämpimitaltaan alle 0,06 mm olevat yksittäiset hiukkaset (hieno hieta ja sitä hienommat lajitteet) eivät enää erotu paljaalla silmällä. Tällaisista lajitteista koostuva maa vaikuttaa maastossa ”hikevältä” ja ”juoksevalta” ja se on routivaa. Hiesulajitteelle tyypillisiä ominaisuuksia ovat vaalea väri, perunajauhomainen tahraavuus ja juoksevuus.

Saveslajitetta, johon kuuluvat alle 0,002 mm:n hiukkaset, pidetään sitovana aineksena. Mitä enemmän maassa on savesta, sitä muovailtavampaa ja sitkeämpää se on kosteana. Kuivana savipalasta ei saa sormin kokonaan jauhoksi kuten hiesua, vaan se jää muruiksi ja siruiksi. Varsinaisena sitovana aineksena toimii saveksen hienoin osa, jonka hiukkasten läpimitta on alle 0,0002 mm. Tämä aines on väriltään tummaa ja sitä esiintyy esim. lutosavien talviaikana syntyneissä kerroksissa (ks. kuva 2.2). Kuivuudessaan savimaat pyrkivät kutistumaan. Kuivumisen aiheuttama halkeilu on yleensä sitä voimakkaampaa mitä suurempi on saveksen pitoisuus. Aitosavissa voi kuivana aikana esiintyä paljon suuria, melko syvälle ulottuvia halkeamia.

Saveksen määrän arvioimiseksi voidaan tehdä ns. kierityskoe. Pienestä maaerästä (noin teelusikallinen) tehdään homogeeninen taikina, johon lisätään vettä tarvittaessa sopivan muovailtavuuden aikaan saamiseksi. Taikinasta otetaan pieni pala, jota aletaan kierittää tasaisella

Nauhan paksuus (mm)	Savesta %
4–6	0–5
3	5–15
2	15–25
1–1,5	25–40
1	40–60
<1	>60

nopeudella. Ohetessaan nauha alkaa katkeilla. Mitä ohuemmasi nauha saadaan ennen kuin se katkeaa, sitä enemmän maassa on savesta. Eloperäisen aineksen määrän kasvaessa nauhan sitkeys heikkenee, mikä on otettava huomioon arvioitaessa saveksen määrää viereisten nauhapaksuuksien avulla.

Eloperäiset kerrostumat

Orgaanisten maalajien luokittelu perustuu paitsi orgaanisen aineksen määrään myös maalajin syntytapaan. Lähinnä suokasvien jäänneistä muodostuneet turpeet sisältävät orgaanista ainesta yli 40 %. Eri turvelajit luokitellaan kasvinjäännekoostumuksen perusteella. Kahden pääryhmän, *rahkaturpeiden* ja *saraturpeiden* lisäksi voidaan joitakin lajeja luokitella puunjäänneiden määrän ja tiettyjen lehtisammalten osuuden perusteella. Yleisimmät rahkaturvelajit ovat: rahkaturve (S-t) (S = *Sphagnum*), sararahkaturve (CS-t) (C = *Carex*) ja puunjäänneitä sisältävä puurahkaturve (LS-t) (L = *Ligno*). Turpeiden nimeämisessä periaatteena on, että vallitsevan kasvinjäänneen nimi mainitaan jälkimmäisenä. Saraturvelajeja ovat saraturve (C-t), rahkasaraturve (SC-t), puusaraturve (LC-t) ja ruskosammalsaraturve (BC-t) (B = *Bryales*).

Multamaat (Mm) ovat ohutkerroksisia pintamaalajeja, joissa on 20-40 % orgaanista ainesta. Niiden ominaisuudet vaihtelevat paljon orgaanisen aineksen pitoisuuden ja kivennäisaineksen laadun mukaan, mutta yleensä ne ovat viljelyominaisuuksiltaan erinomaisia maalajeja. Eloperäisen aineksen vaikutus maan ominaisuuksiin on niin tärkeä, ettei kivennäisfraktion lajitesuhteita yleensä mainita. Sen sijaan multakerroksen alla olevan tiivistyneen maakerroksen eli jankon lajitekoostumus olisi syytä aina ilmoittaa. *Liejuissa* (Lj) orgaanisen aineksen osuus on 6-20 %. Geologian oppikirjoissa liejunimitystä käytetään aineksesta, jonka orgaanisen aineksen pitoisuus ylittää 30 %. Jos eloperäistä ainesta on 6-30 %, geologiassa puhutaan saviliejusta. *Järvimudassa* (Jm) orgaanisen aineksen pitoisuus on yleensä suurempi kuin liejuissa. Erityisesti liejun ja järvimudan kohdalla syntyhistoria on luokittelun lähtökohtana (ks. kohta 2.3 - Jääkauden jälkeiset muodostumat - Eloperäiset kerrostumat). Kemiallisesti nämä sedimenttilajit erotetaan orgaanisen aineksen hiilen ja typen suhteen perusteella. Jos C/N on < 10, aines on liejua, jos C/N on > 10, kyseessä on muta.

Eloperäisten maiden aistinvarainen tunnistus

Varsinaiset turvemaat ovat huokoisia ja kevyitä. Ne sitovat runsaasti vettä, minkä vuoksi ne ovat kylmiä ja hitaasti lämpeneviä, sillä vedellä on suuri *lämpökapasiteetti*, ts. veden lämmittämiseen ja haihduttamiseen kuluu paljon energiaa. Turvelajien tunnistuksessa huomio kiinnitetään kasvinjäännekoostumukseen, hajuun, väriin ja rakenteeseen. Puujätepitoisuuden kasvaessa turve muuttuu heterogeenisemmaksi ja murenevammaksi. Ruskosammalsaraturpeessa on voimakkaampi ja pistävämpi haju kuin saraturpeessa. Turpeen viljavuus ja kuivatustekniset ominaisuudet määräytyvät turvelajin ja turpeen maatuneisuuden mukaan. Kasvimateriaalin hajotessa sen C/N-suhde pienenee, kun hiiltä poistuu hiilidioksidina ilmaan. Maatumisen edistyessä turve alkaa muuttua homogeeniseksi massaksi, sen väri tummuu, tilavuuspaino nousee ja veden sitoutumislujuus kasvaa.

Maastossa *maatumisaste* eli *huminoiteetti* määritetään usein Hampus von Postin (1922) laatimaa asteikkoa käyttäen (ks. Laine ja Vasander 1990). Turvenäytettä puristetaan kädessä ja tarkkaillaan sormien välistä valuvan puristusnesteen määrää, väriä ja sameutta sekä puristusjätteen rakennetta, kasvinosien tunnistettavuutta, amorfisen massan osuutta, väriä jne. Maatumisastetta merkitään kirjaimella H ja sen alaindeksiksi merkityllä numerolla, joka on 1-10. Täysin maatumattoman turpeen (H₁) puristeneste on kirkasta ja lähes väritöntä, ja puristejätteen kasvinosat ovat sitkeitä ja kimmoisia. Kokonaan maatunutta turvetta (H₁₀) puristettaessa koko turve-erä menee sormien lävitse. Laboratoriomenetelmin maatumisaste voidaan määrittää tarkemminkin. Keskinertaisesti maatuneet turpeet (H₇) sopivat parhaiten viljelyyn.

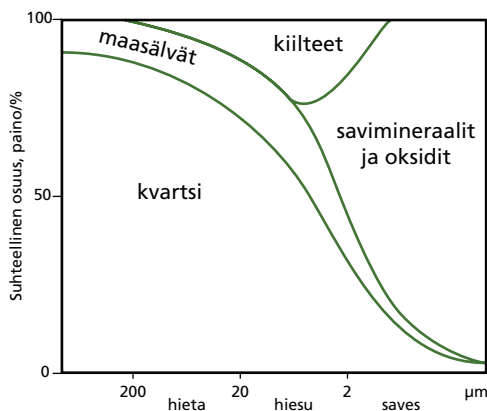
2.5 Maa-aineksen koostumus

Helinä Hartikainen

Fysikaalinen rapautuminen hienontaa kiviainesta mekaanisesti, mutta ei muuta sen kemiallisia ominaisuuksia. Kun hienontuneessa kiviaineksessa tapahtuu kemiallista rapautumista, aineksen koostumus muuttuu ja siitä vapautuu liukoisia ravinteita ja muita ioneja. Samalla maahan syntyy uudenlaisia yhdisteitä, jotka toimivat reaktiokomponentteina. Se, minkälaisiin prosesseihin kiviaineksesta rapautumisessa vapautuneet aineet joutuvat maassa ja missä määrin reaktioita tapahtuu, riippuu aineen omien ominaisuuksien lisäksi maahan syntyneiden reaktioaktiivisten aineiden laadusta ja määrästä. Rapautumistuotteista keskeisiä ovat savimineraalit sekä Al:n ja Fe:n heikosti kiteytyneet oksidit. Niiden pinnoilla tapahtuvat reaktiot säätelevät merkittävästi ionien sitoutumista ja liikkumista maassa.

Maalajitteiden välillä on raekoon lisäksi myös mineralogisia eroja. Yleistäen voidaan sanoa, että mitä karkearakeisemmasta aineksesta on kyse sitä enemmän siinä on vaikeasti rapautuvia primaarisia mineraaleja (kuva 2.9). Hiekka- ja hietafraktioissa vallitsevia mineraaleja ovat kvartsi ja maasälvät, jotka ovat kestäviä rapautumista vastaan. Hiesulajitteissa on myös kiilteitä, joiden osuus kasvaa hiukkaskoon pienetessä. Saveslajitteissa vallitsevat savimineraalit, jotka ovat syntyneet *primaaristen mineraalien* (= kivien mineraalien) rapautumisen tuloksena. Niiden pinnoille sitoutuneina tai pieninä erillisinä hiukkasina esiintyy heikosti kiteytyneitä oksideja. Lajitteiden mineralogiset erot heijastuvat maalaajien reaktioaktiivisuudessa ja ravinteisuudessa. Savimineraalit vaikuttavat voimakkaasti ioninvaihtoreaktioihin ja maiden kutistumis- ja paisumisominaisuuksiin. Eri savimineraalien välillä on kuitenkin suuria eroja esim. reaktioaktiivisen pinta-alan sekä paisumistaipumuksen suhteen, minkä vuoksi savimineraalien syntymekanismin ja perusrakenteiden tunteminen on tärkeää.

Maan pintakerroksissa tärkeä reaktioita säätelevä tekijä on lisäksi *humus*, tumma rakenteeltaan monimutkainen orgaanisten aineiden seos. Se on syntynyt *humifioitumisen* tuloksena mikrobiologisten ja osin kemiallisten reaktioreittien kautta. Tässä prosessissa orgaanisen aineksen hajotuksen välituotteet voivat esim. reagoida keskenään ja muodostaa rakenteeltaan hyvinkin monimutkaisia ja kestäviä yhdisteitä. Koska tällä tavalla syntynyt varsinainen humus on hyvin kestävä mikrobiologista hajotusta vastaan, siitä ei juuri vapaudu ravinteita kasvien käyttöön eikä se siten toimi orgaanisena kasvinravinnevarastona. Sen merkitys maassa perustuu fysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin (ks. kohta 2.5 - Humus). Humuksen suotuista vaikutus maan vesitalouteen ja rakenteeseen perustuu sen kykyyn sitoa moninkertaisesti oman painonsa verran vettä, jolloin veden imeytyminen maahan paranee ja maan veden-



Kuva 2.9 Eri lajitefraktioiden tyypillinen keskimääräinen mineraalikoostumus.

pidätyskyky kasvaa. Samalla myös liettyminen ja eroosioriski pienenevät ja ravinteiden huuhtoutuminen vähenee. Lisäksi humuksella on suuri ominaispinta-ala ja paljon kemiallisesti reaktioaktiivisia ryhmiä, joiden avulla se osallistuu ioninvaihtoihin ja kompleksinmuodostusreaktioihin.

Hajoava orgaaninen aines, kuten juurimassa ja karikkeet, toimii kasvinravinnevarastona ja ylläpitää mikrobiologista aktiivisuutta. Mikrobin suorittamassa *mineralisaatiossa* eloperäinen aines hajoaa pääosin hiilidioksidiksi, vedeksi ja epäorgaanisiksi suoloiksi. Häviävän pieni osa aineksesta käytetään varsinaisen humuksen raaka-aineeksi. Hajottajamikrobien tuottamat lima-aineet vaikuttavat edullisesti maan rakenteeseen ja maan vesitalouteen stabiloimalla maahiukkas-

ten muodostamia aggregaatteja ja siten huokosrakennetta. Varsinaisen humuksen vaikutus on pitkäaikainen hitaan hajoamisen vuoksi, helposti hajoavan eloperäisen aineksen vaikutus on sen sijaan ohimenevä. Maan toiminnan kannalta onkin tärkeää, että hajotuskel-poista orgaanista ainesta tulee maahan jatkuvasti, jotta mikrobitoiminta pysyy aktiivisena ja humussynteesi käynnissä.

Maan eloperäinen aines on saanut viime aikoina huomiota myös ilmastomuutoksen hillinnän näkökulmasta. Koska maahan sitoutunut hiili on suuri hiilen varasto, sen dynamiikalla on iso merkitys ilmakehän hiilipitoisuuden kannalta. Maahan varastoituvan hiilen määrä riippuu kasvintähteiden määrästä suhteessa niiden hajotukseen. Viljelymenetelmillä ja kasvivalinnoilla voidaan jonkin verran vaikuttaa maan hiilivaraston kokoon. Koko Suomen kattavan seuranta-aineiston mukaan viljelymaiden kyntökerroksen keskimääräinen hiilivarasto on pienentynyt Suomessa aikavälillä 1974–2009 (Heikkinen ym. 2013). Tämä kehitys voi johtua muun muassa siitä, että nurmien viljely on vähentynyt ja ilmaston lämpeneminen on vauhdittanut eloperäisen aineksen hajotusta. Toisaalta on myös merkkejä siitä, että suomalaisissa melko nuorissa peltomaissa edelleen hajoaa edellisestä maankäytöstä eli metsästä peräisin oleva hiili. Kivennäismailta hiilen nettopoistuma ilmakehään on tyypillisesti kymmeniä tai satoja kiloja vuodessa hehtaarilta, kun eloperäisiltä mailta hiiltä vapautuu tonneja vuodessa. Tuoreen kasvintähteen lisäksi eloperäisessä maassa hajoaa vuosituhansien aikana kertynyt turve, jonka hajoamistuotteina syntyy hiilidioksidia (CO_2) ja dityppioksidia (N_2O). (Regina 2015)

Savimineraalit

Synty

Erittäin pitkälle rapautuneissa maissa, joita esiintyy esim. tropiikissa, savimineraalit ovat syntyneet siten, että täydellisesti liuosmuotoon hajonneen primaarisen mineraalin ainesosat ovat järjestyneet uudelleen kiderakenteeltaan erilaiseksi mineraaliksi. Suomen nuorissa maissa savimineraaleja on syntynyt kuitenkin pääasiassa siten, että primaarisissa siliikaattimineraaleissa on tapahtunut eriaisteisia muutoksia perusrakenteen säilyessä kuitenkin ennallaan. Lähtöaineina on ollut merkitystä erityisesti verkkosilikaatteihin kuuluvilla kiilleillä (ks. Tietoruutu 2.2), erityisesti biotiitilla, jota esiintyy runsaasti mm. kiilleliuskeissa ja gneisseissä. Hohkasilikaatteihin lukeutuvien maasälpjen sekä nauhasilikaatteihin kuuluvien Fe- ja Mg-mineraalien kuten sarvivälkkeen merkitys savimineraalien lähtöaineena on varsin pieni.

Biotiitti rakentuu *siliikaattikerroksista*, joiden perusyksikköinä on kaksi piitetraedrikerrosta ja niiden välissä oleva alumiinoktaedrikerros. Siliikaattikerroksilla on negatiivinen sähkövaraus (ks. Tietoruutu 2.2), joten ne periaatteessa hylkivät toisiaan. Kerrosten yhteen sitomiseksi niiden väliin on mineraalin syntyvaiheessa rakentunut K^+ -ioneja. Niiden tehtävä on pitää positiivisen varauksensa avulla siliikaattikerrokset yhdessä. Biotiitissa siliikaattikerrosten väli on rakenteen heikoin kohta, ja rapautuminen savimineraaliksi alkaa ainakin siliikaattikerrosten välistä. Käytännössä tämä näkyy siinä, että verkkosiliikaatit lohkeavat kerrosten suuntaisesti. Kun vesi ajan mittaan tunkeutuu reunoilta alkaen siliikaattikerrosten väliin, biotiitin välitilakationina oleva paljas K^+ -ioni *hydratoituu* (saa vesikehän ympärilleen). Tällöin sen koko kasvaa ja samalla vapautuu hydrataatioenergiaa. Vapautuneen energian määrä on niin suuri, että se riittää työntämään siliikaattikerroksia erilleen toisistaan. Kerrosten väli alkaa aueta vähitellen reunoiltaan, jolloin kerroksia yhteen sitovaa K:a pääsee diffundoitumaan välitilasta ulos maaveteen. Tämä reaktio käynnistää rapautumisketjun, jonka eri välivaiheissa syntyviä tuotteita sanotaan savimineraaleiksi.

Kalium-ionien poistuminen kerrosvälistä jättää jälkeensä negatiivista varausylijäämää,

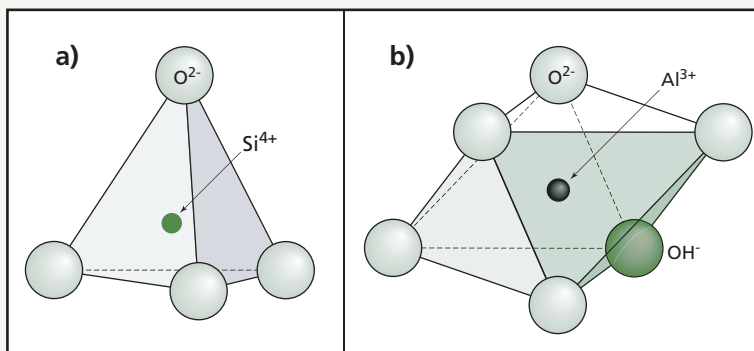
Tietoruutu 2.2

Kiilteiden rakenne

Verkkosilikaatteihin kuuluvien kiilteiden rakenneosia ovat Si-tetraedrit ja Al (tai osittain Mg, Fe) -oktaedrit, jotka ovat asettuneet kidehilassa kerroksittain levymäisesti siten, että kahden tetraedrikerroksen väliin on rakentunut oktaedrikerros. Yhtä tällaista kerrosjaksoa kutsutaan silikaattikerrokseksi. Piitetraedrissa (SiO_4^{-4}) on neljä yhteen sulloutunutta negatiivisesti varattua O-ioni (O^{2-}) ja niiden keskellä positiivisesti varattu Si-ioni (Si^{4+}), joka pyrkii neutraloimaan negatiivista sähkövarausta (kuva T2.4a). Al-oktaedrissa on kuuden happi-ionin muodostaman kimpun keskellä tavallisesti Al^{3+} -kationi (kuva T2.4b).

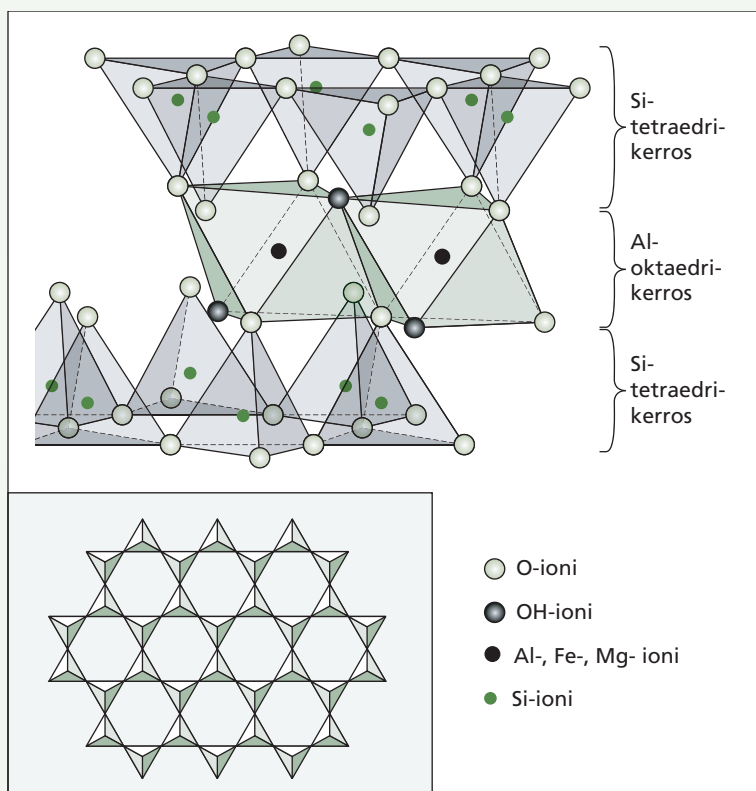
Piillä on käytettävissään neljä positiivista varausta. Kun se sitoo neljä happi-ioniä, joilla kullakin on kaksi negatiivista varausta, jokaisen happiatomin toinen valenssi jää vapaaksi. Jotta rakenteessa saavutettaisiin sähköinen tasapaino, tetraedrin kolme happi-ioniä on yhteisiä naapuritetraedrin kanssa. Tällöin syntyy tetraedrien välille erittäin kestävä Si-O-Si -sidos. Neljäs happi-ioni puolestaan on yhteinen Al-oktaedrin kanssa (kuva T2.5), jolloin syntyy luja Si-O-Al -sidos. Kiilteiden levymäinen verkkokudos syntyy siitä, että Si-tetraedrin kolme happi-ioniä kuuluu samanaikaisesti kahdelle tetraedrille ja muodostaa siten Si-O-Si -siltoja ja neljäs happi-ioni käytetään sidokseen Al (Mg, Fe) -oktaedrikerroksen kanssa. Kerroksellinen kide-rakenne tulee ulkonaisesti esille kiilteiden lehtimäisyytenä.

Mineraalin syntyvaiheessa tapahtuneet "virheet" ovat leimallisia verkkosilikaateille. Jos magmassa on ollut riittämättömästi Si-ioneja, niiden tilalle on tetraedrissa saattanut asettua Al-ioneja. Tätä ilmiötä sanotaan *isomorfiseksi korvautumiseksi*. Samalla tavalla myös alumiini on voinut oktaedrissa korvautua esim. magnesiumilla tai raudalla (Mg^{2+} , Fe^{2+}) tai keskuskationi puuttuu kokonaan. Koska alumiinin valenssi (+3) on pienempi kuin piin (+4) ja esim. magnesiumin (+2) pienempi kuin alumiinin (+3), korvaavat keskuskationit eivät pysty neutraloimaan kaikkia happi- tai OH-ionien (esiintyy oktaedrissa) negatiivisia varauksia ja silikaattikerrokseen syntyy negatiivista varausyliäämää. Se tasoitetaan sitomalla silikaattikerrosten väliin muita positiivisesti varautuneita ioneja. Kiilteissä välitilakationina on K^+ , joka on kooltaan sellainen, että se mahtuu sopivasti "lokeroihin", joita muodostuu kahden vastakkaisen silikaattikerroksen tetraedrien happi-ionien muodostaman kehän "lokeroon" (kuva T2.5 vasemmassa alanurkassa). Kloriitti-mineraalissa välitilan miehittää positiivisesti varautunut Mg-hydroksidisakka (kuva T2.6).



Kuva T2.4 a) Väljennetty kaaviokuva Si-tetraedrasta. Todellisuudessa ionit ovat sulloutuneet tiiviisti yhteen. b) Kaaviokuva Al-oktaedrin perusrakenteesta (ionien väliset mittasuhteet eivät vastaa todellisuutta).



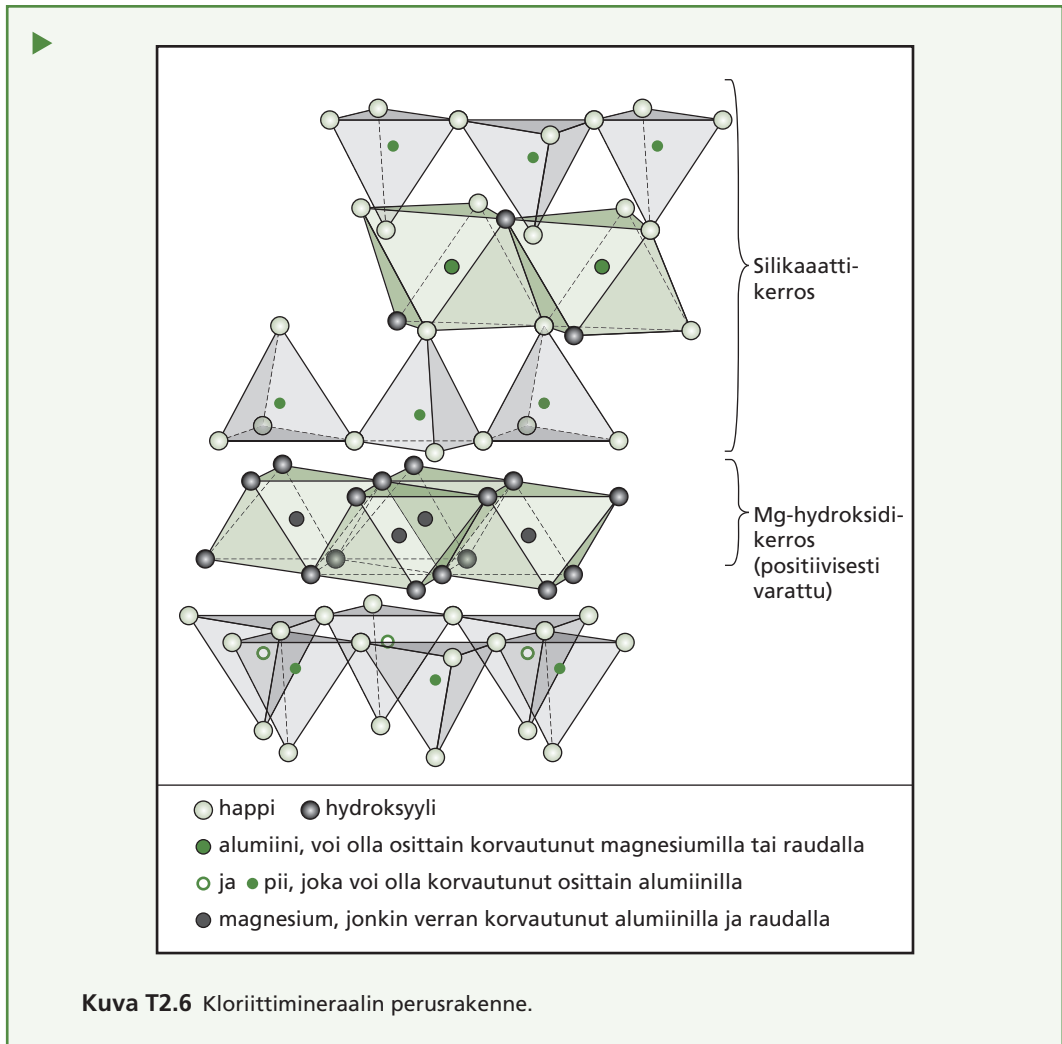


Kuva T2.5 Si-tetraedri- ja Al-oktaedrikerroksen rakentuminen silikaattikerroksessa. Vasemmassa alanurkassa verkkosilikaatin Si-tetraedrikerros ylhäältä päin katsottuna. Huomaa tetraedrien väliin jäävä 6-kulmainen tila.

jota tasoittamaan maavedestä siirtyy vesikehän ympäröimiä suurempia kationeja. Ne työn-
tävät edelleen silikaattikerroksia erilleen toisistaan. Vähitellen kaikki K^+ -ionit poistuvat
kerrosvälistä ja korvautuvat kationeilla, jotka suuremman vesikehänsä avulla kasvattavat
kerrosväliä. Käytännössä K:n vähittäinen vapautuminen kerrosväleistä merkitsee sitä, että
savimailla K^+ -ioneja voi vapautua merkittäviä määriä maaveteen kasvien käyttöön.

Savimineraalityypit

Savimineraalien muodostumisen myötä maahan syntyy negatiivista sähkövarausta ja sen
mukana kationinvaihtokykyä. Negatiivisia varauspaikkoja alkaa muodostua lisää sitä mukaa
kun mineraalin silikaattikerrosten väli aukeaa ja kerroksia yhteen sitovia K^+ -ioneja poistuu.
Näin mineraalin kationinvaihto-ominaisuudet asteittain paranevat rapautumisen edetessä
(ks. kuva 2.11). Biotiitin hienontuessa voi myös kiteen ulkopinnoille syntyä negatiivista
sähkövarausta kiteen murtumisen ja lohkeilun seurauksena (happi-ionien varauksia tasoit-
tavat kationit joutuvat eri hiukkasiin). Näitä varauksia tasoitetaan maavedestä hiukkaspin-
noille siirtyvillä kationeilla. Savimineraalit jaetaan tetraedrikerrosten ja oktaedrikerrosten
(ks. Tietoruutu 2.2) keskinäisen järjestymisen perusteella 1) *kaksikerrosmineraaleihin* eli
1:1-mineraaleihin ja 2) *kolmikerrosmineraaleihin* eli 2:1-mineraaleihin. Näiden päätyyp-

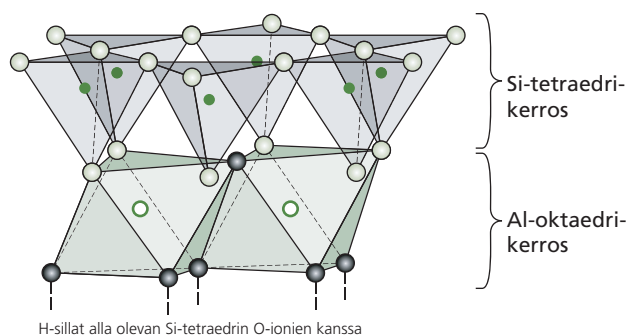


pien välillä on huomattava ero sekä kemiallisissa ominaisuuksissa että paisumisominaisuuksissa. Myös päätyyppien sisällä on eroja eri mineraalien välillä.

Runsaasti savesta sisältävässä maassa savimineraalit saavat aikaan *plastisuuden* eli *muovailtavuuden*. Savimineraalien väliset erot paisumisominaisuuksissa tulevat käytännössä esille savimaiden kuivumiskutistumisessa ja paisumisessa kosteissa oloissa. Savimaissa voi esim. kuivumisen aiheuttama kutistuminen olla varsin erilaista, vaikka maiden savespitoisuudessa erot eivät olisi merkittäviä. Kuivumiskutistumisella on käytännön merkitystä maan rakenteen muodostuksessa. Halkeilu synnyttää syvälle meneviä oikovirtausreittejä. Kasvintuotannon kannalta on silikaattikerroksia yhteen sitovalla kaliumilla ja primaarisen kloriitin (voi olla vermikuliitin ja smektiitin lähtöainesta) Mg-kerroksella merkitystä hitaasti mobilisoituvana ravinnevarastona (ks. Tietoruutu 2.2).

Kaksikerrosmineraalit

Kaksikerrosmineraaleissa toistuu yhdestä tetraedrikerroksesta ja yhdestä oktaedrikerroksesta muodostuva säännöllinen järjestys. Esimerkkinä mainittakoon *kaoliiniitti*, joka on syn-

**Kuva 2.10**

Kaaviokuva kaksikerrosmineraalin, kaoliniitin, rakenteesta.

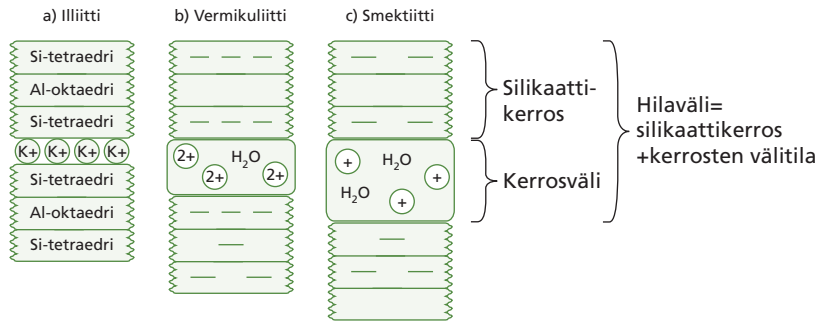
tynyt kiteytymällä uudelleen rapautumisen tuottamista liuenneista lähtöaineksista. Uudelleenkiteytymisen vaiheessa silikaattikerroksissa ei ole tapahtunut isomorfista korvautumista tai sitä on tapahtunut erittäin vähän. Tämän vuoksi kaoliniitissa on yleensä suunnilleen yhtä paljon positiivisia ja negatiivisia varauksia eikä varaustasapainon ylläpitämiseksi tarvita kerrosten välille kationeja. Silikaattikerrokset liittyvät suoraan toisiinsa Al-oktaedrin OH-ryhmien ja alla olevan Si-tetraedrin O-ionien välille muodostuvien H-siltojen avulla. Perusrakenteessa yleisesti vallitsevan sähköisen tasapainon vuoksi kaoliniitin kationinvaihto-ominaisuudet ovat erittäin huonot (kuva 2.10).

Kolmikerrosmineraalit

Kolmikerrosmineraalissa silikaattikerros muodostuu kahdesta piitetraedrikerroksesta ja niiden välissä olevasta alumiinioktaedrikerroksesta. Rapautumisasteesta riippuen silikaattikerrosten välissä on joko alkuperäisiä paljaita (K^+) tai hydratoituneita eli vesikehän ympäröimiä yksittäisiä kationeja (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) tai positiivisesti varattu (Mg, Al, Fe) hydroksidikerros. Näiden positiivisten yksiköiden tehtävänä on sitoa toisiinsa silikaattikerrokset, jotka ovat saaneet negatiivisen nettovarauksen mineraalin syntyvaiheessa tapahtuneen ns. isomorfisen korvautumisen kautta. *Hilavälin*, joka koostuu silikaattikerroksesta ja kerrosten välitilasta, laajeneminen on rapautumisen edistymisen indikaattori. Eri rapautumisvaiheissa olevia mineraaleja on tapana nimittää eri savimineraaleiksi, vaikka asteikko onkin varsin liukuva (kuva 2.11).

Kaliumin irtoaminen verkkosilikaattien reunoilta synnyttää rapautumisen ensimmäisen tuotteen, jota sanotaan *illiitiksi* (kuva 2.11a). Se on yleinen savimineraali suomalaisissa maissa. Silikaattikerrosten perustasojen väli eli hilaväli on noin 1 nm (10 Å). Illiitti ei ole paisuvahilainen mineraali, koska siinä on paljon tiukasti sitoutunutta kaliumia, joka pitää kerrokset yhdessä, eikä välitila siten pääse paisumaan. Kaliumin edelleen poistuessa syntyy kerrosväliin lisää negatiivista varausta ja poistuneen K:n paikalle voi maanesteestä siirtyä suurempia, voimakkaammin hydratoituneita kationeja (esim. Ca, Mg, Na). Tällöin kerrosten väleihin varastoituu vettä, jolloin väli edelleen laajenee.

Kaliumin poistumisen jatkuessa voivat jotkut kerrosvälit aueta kokonaan. Perustasojen välin kasvaessa 1,4 nm:iin, jolloin välitilat ovat Mg:n kyllästämät, puhutaan *vermikuliitista* (kuva 2.11b). Kerrosväli on tällöin niin laaja, että erilaiset ionit voivat osallistua pintareaktioihin mineraalin sisäosissa kerrosten välisillä pinnoilla. Välitilan aukeaminen rapautumisen edetessä lisää siis mineraalin reaktioaktiivista pinta-alaa merkittävästi. Vermikuliitti on ns. *paisuvahilainen savimineraali*, jonka kerrosvälän suuruuteen vaikuttaa välitilassa olevan kationin laatu. Jos se on Na^+ , kerrosväliin varastoituu vettä yhden molekyylikerroksen verran. Jos välitilakationina on Mg^{2+} , vettä varastoituu kahden molekyylikerroksen verran, mikä kasvattaa hilaväliä. Mikäli maanesteen K^+ -pitoisuus kasvaa voimakkaasti esim. lannoituksen seurauksena, K^+ -ioneja siirtyä silikaattikerrosten väleihin.



Kuva 2.11 Kolmikerrosmineraalien perusrakenteet: a) illiitti, b) vermikuliitti, c) smektiitti. Hilavälillä tarkoitetaan silikaattikerrosten perustasojen välistä etäisyyttä. Varsinainen kide muodostuu useasta, tavallisesti 10-40 silikaattikerroksesta.

hin, missä ne hakeutuvat “alkuperäisille” paikoilleen. Koska ne sopivat kokonsa puolesta silikaattikerrosten “lokeroihin”, ne liittävät tehokkaasti kerroksia yhteen, jolloin syntyy uudelleen illiittinen rakenne. Tällöin K^+ -ioni sitoutuu lujasti vaihtumattomaan muotoon. Ilmiöstä käytetään nimitystä *fiksaatio*.

Toinen paisuvahilainen savimineraali on *smektiitti* (kuva 2.11c), jonka synty edellyttää lähtöainesta, jossa silikaattikerrosten negatiivinen varausyliäämä ei ole kovin suuri eikä kerroksia yhteensitovia kationeja näin ollen tarvita paljon. Suomalaisissa maissa smektiittiä on melko vähän. Matalan kerrosvarauksen vuoksi smektiitin kerrosväli pääsee laajenemaan helpommin kuin vermikuliitin. Ilmakuivassa mineraalissa se on noin 1,4 nm ja täysin vedellä kyllästyneissä olosuhteissa 2 nm. Suurimolekyyllisiä orgaanisia yhdisteitä käyttäen on mahdollista kasvattaa perustasojen väli 1,4 nm:stä 1,7-1,8 nm:iin. Kun vesi poistuu vermikuliitin ja smektiitin silikaattikerrosten välistä esim. kuumennettaessa, perustasojen väli kutistuu 1 nm:iin. Hyvin märissä olosuhteissa voivat natriumilla kyllästetyn smektiitin silikaattikerrokset kokonaan irtautua toisistaan. Tämä johtuu Na-ionien voimakkaasta taipumuksesta vetää ympärilleen vettä. Smektiittipitoisissa savissa kuivumiskutistuminen ja paisuminen tulevat erittäin voimakkaasti esille. Vermikuliitissa ei vastaavan suuruista paisumista tapahdu, sillä sen silikaattikerrokset ovat tiukemmin kationien välityksellä kiinni toisissaan. Smektiitti on päämineraali bentoniitissa, jota käytetään mm. maantieojien suojausrakenteissa pohjavesialueilla.

Sekundaarinen kloriitti on savimineraali, jossa negatiivista varausyliäämää tasoittaa silikaattikerrosten välissä oleva positiivisesti varattu Al-hydroksidikeros. Rakenne on hyvin kestävä ja hilaväli pysyy 1,4 nm:ssä kosteusolosuhteista riippumatta, minkä vuoksi sekundaarinen kloriitti ei ole paisuvahilainen. Sitä syntyy happamissa maissa, kun vermikuliitin ja smektiitin kerrosväleihin pidättyy saarekkeina happamoitumisen seurauksena syntynyttä positiivisesti varautunutta Al-hydroksipolymeeriä (ks. Al:n rektioyhtälöt 4.10-4.12 kohdassa 4.2). Mitä enemmän Al-polymeeriä kertyy, sitä huonommin kerrosten välit voivat osallistua maan ioninvaihtoreaktioihin. Näin ollen sekundaarisen kloriitin synty heikentää maan ioninvaihto-ominaisuuksia. Jos saostuma saadaan liukenemaan, mineraali muuttuu paisuvahilaiseksi. Sekundäärinen kloriitin ominaisuudet riippuvat siitä, missä määrin Al-hydroksidipolymeerejä on tullut vaihtuvien kationien ja veden tilalle.

Maan savimineraalikiteet eivät useinkaan koostu vain yhtä tyyppiä olevista kerrosyksiköistä, vaan niissä vaihtelevat eri savimineraaleille luonteenomaiset kerrokset säännöllisesti tai epäsäännöllisesti. Tällaisia suomalaisissakin maissa hyvin yleisiä mineraaleja sanotaan *seoshilamineraaleiksi*. Ne ovat rapautumissarjojen välijäseniä. Seoshilamineraalien ominaisuudet riippuvat luonnollisesti siitä, miten paljon kiteessä on eri rapautumisasteita edustavia kerrosväljejä.

Hydratoituneet oksidit

Vajoava vesi huuhtoo mukanaan osan rapautumistuotteista syvemmälle maaprofilissa joko liuenneena tai kolloidisena liuoksena (hiukkasten läpimitta 1-1000 nm, IUPAC 1972) ja jonkin verran myös suspensiona. Maahan jää kuitenkin rapautumisen synnyttäminä uudistuotteina Al:n, Fe:n ja Mn:n oksideja tai hydratoituneita (vesipitoisia) oksideja (oksihydroksidit). Sama alkuperä on myös osalla Si:n ja Ti:n oksideista. Tropiikin pitkälle rapautuneissa maissa oksidit ovat suurelta osin kiteytyneitä ja muodostavat kiderakenteeltaan tunnistettavia sekundaarisia mineraaleja, esimerkiksi goethiittia, gibbsiittia ja birnessiittia. Suomalaisissa maissa valtaosalla rapautumisen synnyttämistä oksideista ei ole säännöllistä kiderannetta, minkä vuoksi niistä käytettiin aikaisemmin nimeä amorfiset oksidit. Nykyisin suositellaan termiä heikosti kiteytyneet tai huonosti järjestyneet oksidit.

Suuri osa oksidisesta materiaalista on hienojakoisessa savesfraktiossa, jossa sen osuus voi olla jopa 20 %, mutta sitä on myös karkeammissa lajitteissa. Hydratoituneet oksidit ovat erittäin merkityksellisiä anionien sitoutumisen kannalta (ks. kohta 4.2 - Anionien sitoutuminen). Ne tarjoavat paljon reaktiopinta-alaa, koska niillä itsellään on suuri ominaispinta-ala (eli vesimolekyylien saavutettavissa oleva pinta-ala) ja ne ovat usein asettuneet maahiukkasten pinnoille ohuiksi kerroksiksi tai saarekkeiksi. Oksidimateriaali vaikuttaa myös maan fysikaalisiin ominaisuuksiin toimimalla ”kittinä”, joka sitoo pieniä maahiukkasia yhteen. Häiriintymättöminä ”ikääntyessään” oksidit muuttuvat paremmin järjestyneeseen muotoon, ts. saavat selvemmän kiderakenteen, jolloin niiden reaktioaktiivisuus selvästi vähenee. Suomalaisissa maissa on kuitenkin paljon humusaineita, jotka pyrkivät sitoutumaan heikosti kiteytyneiden oksidien pinnoille ja siten estävät tai haittaavat niiden kiteytymistä. Tämän vuoksi oksidit säilyttävät reaktioaktiivisuutensa.

Humus

Maassa oleva orgaaninen aines voidaan luokitella kolmeen pääluokkaan: 1) vielä hajaantumattomana oleva karikeaines 2) eri hajaantumisasteilla oleva aines ja 3) maassa uudelleen syntetisoitunut aines eli varsinainen humus. Yleisnimitystä humus käytetään humusaineista, joita syntyy kun orgaanisen aineksen hajotuksessa syntyvät välituotteet reagoivat keskenään tai mikrobien syntetisoiman aineksen kanssa. Humus on tummaa, amorfista massaa, jolla on hitaan mikrobiologisen hajoamisen vuoksi varsin vähän merkitystä varsinaisena kasvinravinteiden lähteenä. Sen keskeinen merkitys maassa perustuu fysikaalis-kemiallisiin reaktioihin kuten vedensitomiskykyyn, pH-puskurointiin, kompleksinmuodotukseen, toimintaan kationinvaihtopintana ja kilpailijana anionien pidättymisreaktioissa.

Humusaineet eivät ole kemiallisesti yhtenäinen aineryhmä, vaan pikemminkin hyvin erilaisten orgaanisten aineiden seos. Niiden molekyylit ovat erittäin suuria ja monimutkaisia, minkä vuoksi humusaineita ei voida luokitella rakennekemiallisten ominaisuuksien perusteella. Yleisesti luokittelu perustuu molekyylikokoon tai liukoisuuteen erilaisiin liuottimiin. Vesinäytteiden humuksen molekyylikoon määrittämisessä käytetään usein geelisuodatusta. Liukoisuuden mukaan humusaineet jaetaan kolmeen pääfraktioon (taulukko 2.2):

Taulukko 2.2 Humusaineiden luokittelu liukoisuuden perusteella.

	Liukoisuus	
	emäkseen	happoon
Fulvohapot	+	+
Humushapot	+	–
Humiini	–	–
+ = liukenee – = ei liukene		

- *fulvohapot*; humusaineita, jotka ovat vesiliukoisia sekä happamissa että emäksisissä oloissa
- *humushapot*; humusaineita, jotka eivät liukene veteen happamissa olosuhteissa (pH alle 2), mutta liukenevat pH:n noustessa yli 2 (toisin sanoen humushapot saostuvat pH:ssa 2)
- *humiini*; humusaineita, jotka eivät liukene veteen missään olosuhteissa

Vesiliukoisuus sopii luokitteluperusteeksi hyvin, sillä se riippuu monista yhdisteen kemiallista ominaisuuksista kuten happamien funktionaalisten ryhmien määrästä, molekyyli-painosta, aromaattisuudesta jne. Tärkeimpiä humusaineiden funktionaalisia ryhmiä ovat:

- karboksyyli – COOH
- fenoliset ja alkoholiset OH-ryhmät
- ketoryhmät – C=O
- kinoniryhmät – C=O renkaassa
- metoksiryhmät – OCH₃

Fulvohapot (lyhenne FA, engl. *fulvic acids*) ovat verrattain pienimolekyyllisiä humusaineita (molekyyli-paino $\approx 800\text{--}9\,000$), joissa on runsaasti karboksyyli-ryhmiä. Niillä on jos-sain määrin myös pelkistäviä ominaisuuksia. Fulvohappojen vesiliukoisuus koskee myös niiden metallikationien kanssa muodostamia kompleksiyhdisteitä. Tämän vuoksi fulvoha-poilla on huomattava merkitys mm. metallien kuljettajana maassa liikkuvan veden mukana. Alhainen biologinen aktiivisuus suosii fulvohappojen synteesiä, minkä vuoksi niiden osuus happamien metsämaiden humusaineista on suuri. Humushapot (lyhenne HA, engl. *humic acids*) ovat molekyyli-painoltaan suurempia kuin fulvohapot (jopa 1 000 000) ja niissä on vähemmän karboksyyli-ryhmiä, minkä vuoksi ne ovat myös vähemmän vesiliukoisia kuin fulvohapot. Tieteellisessä kirjallisuudessa humushapot luokitellaan vielä erilaisiin alaryh-miin. Humushappoihin sitoutuneet raskasmetallit kertyvät voimakkaasti maan pintakerrok-seen ja liikkuvat vain hyvin hitaasti alempiin maakerrokseen veden mukana. Humiini on vaikealiukoinen humuksen fraktio, johon arvellaan sisältyvän humushappoja, jotka ovat sitoutuneet voimakkaasti mineraalihiukkasten pinoille. Tällainen sitoutuminen vähentää merkittävästi liukoisuutta ja lisää kestävyyttä mikrobiologista hajotusta vastaan.

Ominaispinta-ala

Maapartikkelien ja niitä ympäröivän maanesteen väliset ilmiöt, kuten ionien sitoutumi-nen ja veden adsorptio, ovat pintareaktioita, minkä vuoksi kiinteän aineksen kokonais-pinta-ala vaikuttaa reaktioiden tehokkuuteen. Kokonaispinta-ala ilmoitetaan tavallisesti ominaispinta-alana ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ kuivaa maata), jolla tarkoitetaan kaikkien maan ja neste- tai kaasufaasin rajapintojen alojen summaa. Maan ominaispinta-ala kasvaa lajitteiden hiuk-kaskoon pienetessä sekä paisuvahilaisten savimineraalien osuuden ja humuksen pitoisuu-den kasvaessa (taulukko 2.3 ja 2.4). Yleistäen voidaan sanoa, että hiukkaskoon pienetessä kymmenenteen osaan ominaispinta-ala kymmenkertaistuu. Karkeampien lajitteiden kuten hiedan ja hiesun (0,002–0,2 mm) ominaispinta-ala on pieni eikä karkean saveksenkaan (0,2–2 μm) pinta-ala ole kovin suuri. Vasta kolloidisella alueella ($< 0,2 \mu\text{m}$) se alkaa kas-vaa nopeasti. Humuksen ominaispinta-ala on suuri; mittauksissa sen on todettu olevan $> 600 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$, mikä lisää humuksen merkitystä reaktiokomponenttina.

Kaoliniitti ja illiitti edustavat savimineraaleja, joiden silikaattikerrosten väli ei ole auki. Niiden ominaispinta-alat ovat sen vuoksi selvästi pienempiä kuin paisuvahilaisten vermi-kuliitin ja smektiitin, joissa silikaattikerrosten auki oleva välitila tarjoaa siten aktiivista reaktiopintaa kuten savimineraalityyppien yhteydessä on esitetty.

Taulukko 2.3

Hiukkaskoon laskennallinen vaikutus laitteiden ominaispinta-alaan, jos kiintotiheys on 2,6 kg dm⁻³.

Hiukkasen läpimitta	Pinta-ala m ² g ⁻¹
1 mm	0,00231
0,1 mm	0,0231
0,01 mm	0,231
1 µm	2,31
0.1 µm	23,1

Taulukko 2.4 Eri savimineraaleille mitattuja ominaispinta-aloja.

Savimineraali	Pinta-ala m ² g ⁻¹
Kaoliniitti	5–20
Illiitti	100–120
Vermikuliitti	600–800
Smektiitti	700–800

2.6 Maan biologia

Helinä Hartikainen

Historian varhaisvaiheista tiedetään, että ihmiset yhdistivät maan tumman värin hyvään tuotokkyyn, vaikka asiaan ei osattu selittää. Sanonta ”mätäneminen on kasvillisuuden äiti” juontaa juurensa ikivanhasta havainnosta, että kuolleet kasvit, hajoavat eläinten ruhot ja muu eloperäinen jäteaines lisäsivät maan tuottokykyä. Maaperässä tapahtuvien ilmiöiden tutkimus oli pitkään sidoksissa kemian alalla tapahtuvaan edistykseen, mutta mikrobien keksimisellä 1800-luvun puolivälin tienoilla oli käänteentekevä merkitys maaperäprosessien ja kasvinravitsemuksen tutkimuksen kannalta. Nykytiede tarkastelee maaperää kemiallisista, fysikaalisista ja biologisista tekijöistä muodostuvana reaktiojärjestelmänä. Maaperän laatu ja ympäristötekijät vaikuttavat siihen, millainen eliöstö maassa toimii. Toisaalta maaperäeliöstö on sopeutunut mitä moninaisimpiin ympäristöihin ja osallistuu reaktioihin ja prosesseihin, jotka säätelevät aineiden liikkumista ja kiertoa maaperän, ilmakehän ja vesikehän välillä.

Maaperän eliömaailma eli *biota*, joka koostuu maaeläimistä (*maafaunasta*) sekä mikro-organismeista myötävaikuttaa maassa tapahtuviin kemiallisiin ja fysikaalisiin prosesseihin. Biologiset tekijät ovat mukana jo rapautumisprosesseissa, jotka hitaasti muuttavat kiviainesta maa-ainekseksi. Kivien ja kallioiden rakoihin ja halkeamiin työntyneiden kasvinjuurten kasvupaine työntää kiviainesta erilleen ja paljastaa siten muille rapautumisreaktiolle altista pinta-alaa. Prosessia jatkavat kiviaineksen tai ravinneköyhän maan pinnalla hitaasti kasvavat jäkälät. Ne ovat syanobakteerin (aikaisempi nimi sinilevä) tai mikroskooppisten viherlevien muodostama symbioosi. Siinä sieniosakas huolehtii edellytysten luomisesta yhteyttämiselle kuten veden saannista ja yhteyttämään pystyvä osakas puolestaan muiden kasvuun tarvittavien aineiden kuten hiilen toimittamisesta. Köyhästä kasvualustasta jäkälät saavat ravinteita irti tuottamiensa jäkäläaineiden avulla. Abioottisten tekijöiden (kos-teus, lämpötila, maan lähtöaineksen laatu jne.) lisäksi biologisilla prosesseilla on keskeinen rooli maannostumisessa, jossa maaprofilin pintakerroksissa tapahtuu erilaistumista eli horisonttien muodostumista (ks. kohta 2.7).

Maaperän eliöstö ja sen toiminta

Kemiallisten, fysikaalisten ja biologisten ominaisuuksien välillä vallitsevan voimakkaan vuorovaikutuksen vuoksi eri tekijöiden osuutta tai merkitystä maan viljavuuden, aineiden kierron ja ympäristövaikutusten kannalta on mahdotonta tarkasti erottaa. Kemialliset tekijät (esim. happamuus) heijastuvat peltomaiden fysikaalisissa ominaisuuksissa, sillä ne vaikuttavat mururakennetta ylläpitävän mikrobiston ja maafaunan laatuun ja aktiivisuuteen. Kun maa ei ole hapanta, bakteerit toimivat tehokkaina orgaanisen aineksen hajottajina. Pilkkooessaan orgaanista ainesta ne vapauttavat ravinteita ja tuottavat samalla maahan maamuruja stabiloivia rakenteeltaan pitkäketjuisia lima-aineita (polysakkarideja ja polyuronideja). Happamat olosuhteet suosivat hajottajayhteisössä sieniä, jotka kuitenkin käyt-

tävät suuren osan hajottamastaan orgaanisesta aineksesta oman rihmastonsa kasvattamiseen. Metsämaissa karike on tyypillisesti hitaasti hajoavaa, minkä vuoksi ravintoverkko pohjautuu hajottajasiiniin. Hyvin hoidetussa peltomaassa heinä- ja ruohokasvit tuottavat helposti hajoavaa kariketta, mikä suosii bakteereita ja niitä syöviä eläimiä ja siten nopeuttaa ravinnekiertoa. Maan fysikaaliset ominaisuudet kuten mururakenteen sanelema huokoisuus ja vedenläpäisyominaisuudet vaikuttavat puolestaan maan happitalouteen ja säätelevät sitä kautta mikrobiston lajikoostumusta ja biologista aktiivisuutta sekä kemiallisten reaktioiden (mm. hapetus-pelkistysreaktiot) suuntaa. Taulukossa 2.5 on esitetty maan eliöstön tehtävät ainekierrossa ja maan rakenteen ylläpidossa.

Maaperän mikrobisto

Mikro-organismit ovat lukumäärältään runsain ja toiminnaltaan monipuolisin eliöryhmä. Teelusikallisessa tervettä maata on enemmän mikrobeja kuin maapallolla on ihmisiä. Lisäksi niitä elää mm. maaperäeläinten suolistossa. Maaperän elämän monimuotoisuudesta hyvä esimerkki ovat *arkeonit* (aikaisempi nimitys arkkieeliöt), jotka pystyvät elämään ääriolosuhteissa kuten kuumissa lähteissä ja hapettomissa olosuhteissa. Erikoislaatuisen aineenvaihduntansa vuoksi ne pystyvät tuottamaan esimerkiksi metaania. Maaperässä arkeonien määrä lisääntyy syvyyden kasvaessa ja elinolojen muuttuessa muille mikrobeille epäedullisemmaksi.

Taulukko 2.5. Maan eliöstön tehtävät maaperän ainekierroissa ja maan rakenteen ylläpidossa.*

	Ravinnekierto	Vaikutukset maan rakenteeseen
Mikrobit	Orgaanisen aineksen hajotus Ravinteiden mineralisointi ja immobilisointi omaan biomassaan	Maa-aggregaatteja sitovien orgaanisten yhdisteiden tuottaminen Sienirihmat sitovat maapartikkeleita yhteen
Mikrofauna	Laiduntaa karikkeessa ja ylläpitää siinä ravinnekiertoa Bakteeri- ja sienipopulaatioiden säätely	Karikkeen pilkkoja Vaikuttaa maan mururakenteeseen vuorovaikutuksessa maamikrobien kanssa
Mesofauna	Kasvinjätteiden pilkkominen Sieni- ja mikrofaunan populaatioiden säätely Vauhdittaa ravinnekiertoa	Tuottaa ulostepalloja Synnyttää maahan pieniä muruja ja biohuokosia Edistää humussynteesiä eli humifikaatiota
Makrofauna	Kasvinjätteiden pilkkominen Mikrobiologisen aktiivisuuden stimulointi	Tuottaa ulostepalloja Sekoittaa orgaanista ainesta ja mineraalipartikkeleita Siirtää orgaanista ainesta ja mikro-organismeja paikasta toiseen Synnyttää biohuokosia Edistää humifikaatiota
Megafauna	Kasvi- ja eläinjätteiden pilkkominen Ravinteiden siirtäminen paikasta toiseen	Sekoittaa orgaanista ainesta ja mineraalipartikkeleita Ulosteeet kestäviä muruja Kaivaa maata ja tuottaa suuria huokosia (oikovirtausreittejä) Parantaa maan tuuletusoloja Olkia hautaamalla voi vähentää hometoksiineja pintamaassa

* Laajennettu ja täydennetty lähteestä: Barrett ym. (1990).

Maan ainekiirroissa mikrobeilla on keskeinen rooli. Ne hajottavat kuollutta eloperäistä ainesta, syntetisoivat uusia yhdisteitä, muuttavat aineiden liukoisuutta, tuottavat haihtuvia yhdisteitä tai sitovat ilmakehän kaasuja. Eloperäisen aineksen hajotuksessa ilmakehän vapaan hapen (O_2) avulla vapautuu hiilidioksidia (CO_2), josta osa päätyy takaisin kasviin ns. hiilen pienessä kierrossa. Tätä ns. maahengitystä käytetään yhtenä yleispiirteisenä maan terveyden mittarina samoin kuin toksisten aineiden vaikutusten karkeana arviointimenetelmänä. Kasvin kanssa symbioottisessa suhteessa tai juuren lähellä puolisymbioottisessa suhteessa kasvavat *typensitojaorganismit* pystyvät katkaisemaan ilmakehän typpikaasun (N_2) voimakkaan kolmoissidoksen ja luovuttamaan typen kasvien käyttöön (tarkemmin kohdassa 4.6). Maassa elää myös vapaita typensitojaorganismeja, joiden merkitys maan typpitalouden kannalta on kuitenkin varsin pieni.

Mikrobit voivat olla joko yksisoluisia kuten *bakteerit* ja arkeonit tai tumallisia kuten levät ja sienet. Lajien valtava kirjo ja monipuolinen sopeutumiskyky ovat takeena siitä, että aineiden kierrätystä biosfäärin eri osien välillä tapahtuu mitä erilaisimmissa ympäristöissä. Esimerkiksi bakteereista osa vaatii toimeen tullakseen vapaata happea (*aerobit* lajit) kun taas jotkut eivät siedä vapaan hapen läsnäoloa (*anaerobit* lajit). *Fakultatiivisesti anaerobit* lajit ovat sopeutuneet elämään hapen suhteen vaihtelevissa oloissa. Jos vapaata happea ei ole läsnä, ne pystyvät käyttämään kemiallisissa yhdisteissä olevaa happea elektronien vastaanottajina.

Sädebakteereita eli *aktinobakteereita* kutsuttiin aikaisemmin sädesieniksi, koska monet niistä tuottavat sienirihmastoja muistuttavaa ilmarihmastoa eli *hyyfejä*. Ne ovat ainekierrossa tärkeitä, sillä ne pystyvät hajottamaan heinäkasvien ja havupuiden soluseiniä rakenteeltaan monimutkaista ligniiniä. Siksi niitä esiintyy tyypillisesti myös kosteusvaurioista kärsivissä rakennuksissa. Aktinobakteerien joukossa on myös kasvitautilien aiheuttajia kuten perunan verkko- ja perunarupea aiheuttavat *Streptomyces*-lajit. Toisaalta tämä suku on tullut tieteen historiassa tunnetuksi tuottamastaan antimikrobisesta aineesta streptomysiinistä.

Korkeampien kasvien juuret eivät kuulu varsinaiseen maaeliöstöön. Ne kuitenkin vaikuttavat merkittävästi maan ominaisuuksiin sekä biologisten että fysikaalis-kemiallisten mekanismien kautta. Juuristossa ja sen välittömässä läheisyydessä olevassa maassa eli *ritsosfäärissä* mikrobisto on runsainta ja poikkeaa selvästi muussa maaympäristössä tavattavasta. Kasvit erittävät juurtensa kautta huomattavan paljon yhteyttämistuotteita maahan ja jättävät jälkeensä kuolevia juuria. Tällä tavalla ne tarjoavat monipuolista ravintoa hajottajaorganismeille, jotka vapauttavat eloperäisestä aineksesta ravinteita epäorgaanisessa muodossa takaisin kasvien käyttöön. Monivuotisia kasveja kasvatettaessa maahan syntyy tiheä huovaston tapainen juuristo, joka murustaa ja kuohkeuttaa maata. Kasvinjuuret voivat myös vaikuttaa hienojakaisen maan rakenteeseen, kun niiden vedenoton aiheuttama maan kuivuminen saa aikaan halkeilua. Tunkeutuessaan tiiviiseen maahan paksut juuret voivat parantaa maan vedenläpäisykykyä, kun niiden lahoamistuotteet stabiloivat juuren jättämän reiän seinämät.

Monet kasvilajit pystyvät muodostamaan *mykorritsasienen* kanssa *sienijuuren*, jonka avulla ne voivat hyödyntää ravinteita suuremmasta maatilavuudesta. Molemmat osapuolet hyötyvät toisistaan. *Sienirihmat* pääsevät kasvamaan pienempiin mahuokosiin kuin kasvien juuret. Ne edesauttavat ravinteiden kuten fosforin ja typen vapautumista orgaanisista yhdisteistä erittämällä niitä pilkkovia fosfataasi- ja proteaasientsyymejä, ja voivat samalla jopa tuhata kertaistaa ravinteidenottoon käytettävän pinta-alan. Mykorritsasienet edistävät yhdessä bakteerien kanssa maan mururakenteen ylläpidossa ja siten osaltaan vähentävät eroosioriskiä. Maaperässä elää myös ns. *auttajakakteereja*, jotka edistävät kasvien kasvua tuottamalla kasvihormonin tapaan vaikuttavia yhdisteitä. Näitä esiintyy mm. *Azotobacter*-, *Azotospirillum*-, *Pseudomonas* - suvuissa. Uusimman tiedon mukaan *auttajakakteerit* edistävät myös sienijuuren eli mykorritsan muodostumista mm. pehmentämällä kasvin soluseiniä ja parantamalla sienen kasvua, esimerkiksi tuottamalla sitruunahappoa, joka edistää myös ravinteiden liukenemistä maa-aineksesta sekä sitomalla haitallisia aineita.

Maaperän eläimet

Maaperäeläimet (maafauna) jaetaan karkeasti kokonsa mukaan eri luokkiin. Jotkut tutkijat lukevat *mikrofaunaan* kuuluviksi alle 0,1 mm kokoiset eläimet, jotkut taas pitävät luokan rajana 0,2 mm:ä. Tähän luokkaan kuuluvat mm. sukkulamadot, jotka laiduntavat maassa ja pintakarikkeessa. Neliön alalla niitä voi olla miljoonia. *Mesofaunan* (0,2 - 2 mm) eläimistä tunnetuimpia ovat mikroniveljalkaiset. Kooltaan > 2 mm olevat eläimet luokitellaan usein *makrofaunaan* kuuluviksi. Jotkut tutkijat kuitenkin katsovat, että 20 mm:ä suuremmat eläimet kuten lierot edustavat *megafaunaa*. Samalla tavalla kuin mikrobit myös osa maaeläimistä elää pysyvästi maassa, mutta esimerkiksi hyönteisten toukat vain osan elinkierrostaan. Maaperäeläimet jatkavat ravintoverkossa mikrobien työtä. Ne vaikuttavat ainekiertoihin joko suoraan hajottamalla kuollutta eloperäistä ainesta ja vapauttamalla siitä ravinteita tai syömällä toisia eliöitä tai elävien kasvien juuria. Karikeaineoksen pilkkoutuminen eläimen suolessa hajottajamikrobien toimesta nopeuttaa ravinteiden vapautumista ulosteista kasvillisuuden käyttöön. Mitä monipuolisempi eläimistö maassa elää, sitä tehokkaampaa on aineiden kierrätys.

Lieroja pidetään maaperäeläinten avainryhmänä, koska niitä esiintyy yleensä paljon ja niiden toiminta on monipuolista. Lajikoostumus ja yksilömäärät vaihtelevat kuitenkin peltomaissa maalajin, viljelysysteemin ja mm. maan happamuuden mukaan. Maan pinta-kerroksessa elävät kooltaan pienet tai keskikokoiset lierot elävät pintakariketta syömällä. Maahan kaivautuvista lajeista osa syö pintamaassa olevaa kuollutta kasviainesta ja kaivaa samalla eri suuntiin kulkevia käytäviä. Syvälle maahan pystysuoria käytäviä kaivavat kookkaat kastelierot käyttävät puolestaan ravintonaan maan pinnalla olevaa kasviainesta. Kaivautuessaan ne syövät samalla maa-ainesta. Se sekoittuu suolessa kasviainekseen, jonka hajotustyötä suolen mikrobit jatkavat. Näin lierot kuljettavat kasviainesta tehokkaasti syvempiin maakerroksiin. Uusimpien havaintojen mukaan viljapellolla kastelierot suosivat homesienten infektoimaa olkea. Viemällä sitä maan sisään ne voivat vähentää homesienten toksiinien määrää pintamaassa.

Lierojen ulosteina syntyy maahan biologisesti stabiiloituneita muruja, mikä parantaa maan rakennetta. Kastelierojen kaivamat pystysuorat käytävät muodostavat makrohuokosia, jotka ilmastavat maata ja toimivat myös tehokkaina veden kuljettajina. Käyttäessään omaa käytävänsä kulkureittinään liero samalla pitää käytävän kunnossa. Maan hyvä kalkitustila, nurmiviljely ja karjanlannan käyttö edesauttavat hyvän lierokannan ylläpidossa karikeaineoksen määrän kasvun myötä. Laidunmailla lierokanta on yleensä suurempi kuin viljan viljelyssä olevilla. Usein toistuva kyntö puolestaan vähentää lierojen määrää. Muokkauksen häiritsevä vaikutus saattaa selittää sen, että lierokanta on pientareella yleensä suurempi kuin muussa osassa peltoa.

2.7 Maannokset ja niiden luokittelu

Markku Yli-Halla ja
Tommi Peltovuori

Jääkauden hienontama ja lajittelema kivennäisaines altistui heti jäätikön sulettua olosuhteille, jotka muokkasivat muodostuneen maaperän lähtöaineen ominaisuuksia eri tavoin. Tämä edelleen jatkuva prosessi on tuottanut alun perin jopa täysin homogeeniseen maa-ainekseen kerroksellisuutta: On syntynyt *maannos*, jossa on erilaisia *horisontteja*. Maannostumisen eli *pedogeneesin* lopputulos riippuu lähtöaineen ominaisuuksista ja niistä oloista, joissa maa on ollut. Eri tavoin muodostuneiden maannosprofiilien ominaisuudet poikkeavat toisistaan, ja siksi maannostuminen tarjoaa luontevan perustan maiden luokitteluun. Suomen maaperä on syntynyt vasta viimeisen jääkauden aikana ja sen jälkeen, eivätkä sen ominaisuudet yleisen käsityksen mukaan vielä ratkaisevasti poikkea lähtöai-

neksestä. Tästä syystä meillä maiden luokitteluun on käytännössä riittänyt suoraviivainen orgaanisen aineksen pitoisuuteen ja kivennäisaineksen lajitekoostumukseen perustuva järjestelmä. Ruotsissa tilanne on samankaltainen, mutta Norjassa ja Tanskassa maannostumiseen perustuvalla luokituksella on melko vakiintunut asema.

Kansainvälisissä yhteyksissä Suomen yksinkertainen maalajiluokitusjärjestelmä ei riitä, sillä useissa maissa on käytössä maannoksiin perustuva luokitus, joissa lajitekoostumus ja orgaanisen aineksen pitoisuus ovat vain varsinaista luokittelua täydentäviä tietoja. Monista eri järjestelmistä laajimmassa käytössä ovat amerikkalaisperäinen *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff 2014) ja alun perin FAO:n luokitukseen perustuva *World Reference Base for Soil Resources* (WRB) -järjestelmä (FAO 2014), jota Kansainvälinen Maaperätieteiden Seurojen Liitto (IUSS) ja Euroopan Unioni suosittelevat käytettäväksi (Tietoruutu 2.3). Näissä järjestelmissä annettavia maaprofiilin kehityksestä kertovia maannosnimiä voidaan pitää maaperätieteen yleismaailmallisena kielenä. Vaikka maannosten luokittelua ei ole Suomessa laajemmin harjoitettu, on maannostuminen ilmiönä ollut tunnettu. Vanhoissa oppikirjoissa (esim. Aaltonen 1951) voikin törmätä maassamme tärkeinä pidettyjen maannosten nimiin: esimerkiksi rautapodsoli, humuspodsoli, harmaamaa, pohjavesimaa, ruskomaa, hapan suolamaa, alunamaa tai pikimaa. Kattavaan luokitteluun näitä ei ole käytetty.

Maannoksen muodostuminen

Perinteisen käsityksen mukaan keskeisiä maannostumiseen vaikuttavia tekijöitä on viisi:

- Lähtöaineen laatu
- Organismit
- Ilmasto, erityisesti lämpötila ja sademäärä
- Topografia
- Aika

Nykyisin ihmisen maaperää muokkaava toiminta liitetään usein tähän luetteloon kuudenneksi tekijäksi.

Suomessa kivennäismaat ovat muodostuneet pääasiassa mannerjään hienontamasta ja sulamisvesien lajittelemasta aineksestä. Muualla *lähtöaines* voi olla myös paikalleen rapautunutta kalliota tai esimerkiksi paksuja eolisia eli tuulen muodostamia kerrostumia. *Eliöistä* suurin merkitys on kasveilla, jotka tuottavat profiilin ylimpiin kerroksiin orgaanista ainesta ja vaikuttavat myös syvemmällä maassa juuristonsa välityksellä esimerkiksi kuivattamalla maata. Meillä kasvusto on jääkauden jälkeen ollut puuvaltaista, eikä Suomessa ole kehittynyt paksuja runsaasti orgaanista ainesta sisältäviä mustan mullan kerroksia, kuten ruohomaisen kasvillisuuden hallitsemilla preerioilla. Turvemaidella kasvit ovat tuottaneet käytännössä uuden lähtöaineen. Mikro-organismit vaikuttavat voimakkaasti maan kemiallisiin ominaisuuksiin pääasiassa maan pintakerroksissa, ja maaperäeläimillä on suuri vaikutus maannoksen kehittymiseen esimerkiksi lehtomaisissa kasvupaikoissa. *Ilmasto* vaikuttaa maannostumiseen pääasiassa lämpötilan ja sadannan kautta. Suomessa maa on suurimman osan vuotta kylmää, jopa jäässä, mikä on hidastanut maannosten kehittymistä. Koska sademäärä on meillä suurempi kuin haihdunta, maat ovat myös märkiä lukuun ottamatta joinakin kesinä esiintyviä sateettomia kausia. *Maaston muodot* (*topografia*) vaikuttavat maannostumiseen lähtöaineen spatiaalisen eli alueellisen vaihtelun ja erityisesti hydrologian kautta; maisemassa korkeimmilla kohdilla sijaitsevat maat ovat usein toisenlaisia kuin alavilla paikoilla olevat. Se, kuinka paljon kukin tekijä on ehtinyt vaikuttaa maan ominaisuuksiin, riippuu tietenkin maannoksen iästä. Suomen maat ovat enintään noin 12 000 vuotta vanhoja, kun jotkin trooppiin maat voivat olla miljoonien vuo-

Tietoruutu 2.3

Kansainväliset maannosluokitusjärjestelmät

Maannoksen nimeäminen perustuu maaprofiilista yleensä noin kahden metrin syvyyteen saakka tehtäviin havaintoihin ja niiden pohjalta laadittavaan profiilikuvaukseen (ks. Tietoruutu 2.4). Kentällä tehtävien morfologisten havaintojen (maan värit, rakenne, kovuus, kivien määrä ym.) ja niitä täsmentävien kemiallisten ja fysikaalisten laboratorioanalyysien avulla määritetään, mitä *diagnostisia horisontteja* ja *diagnostisia ominaisuuksia* maassa on. Kaikissa luokitusjärjestelmissä on määrittäyskaavio (engl. Key), jonka avulla päädytään maannoksen nimeen. Globaalissa käytössä on kaksi nimistöltään huomattavan erilaista järjestelmää: amerikkalaisperäinen Soil Taxonomy ja maaperätutkijoiden kansainvälisen yhteisön laatima World Reference Base for Soil Resources –järjestelmä (WRB), joka kehitettiin FAOn ja Unescon laatiman maailman maaperäkarttaselityksen pohjalte. Diagnostiset horisontit ja muut diagnostiset ominaisuudet ovat eri luokittelujärjestelmissä pääpiirteissään samanlaiset, mutta niiden perusteella annettavat nimet ovat erilaisia. Soil Taxonomy ja WRB kehittyvät kaiken aikaa, ja niistä tulee uusia versioita muutaman vuoden välein. Uudistuksissa järjestelmistä pyritään tekemään täsmällisempiä ja yksiselitteisempiä, mutta ne aiheuttavat maannosten luokittelijalle myös ongelmia. Luokittelussa käytettävien kriteerien ja nimistön muutokset saattavat johtaa ainakin osittain erilaisiin maannosnimiin käytettäessä saman luokittelujärjestelmän eri versioita.

FAOn/Unescon järjestelmä

FAOn/Unescon luokitusjärjestelmä on alun perin maailman maaperäkartan selitys (FAO 1974), josta on vuonna 1988 julkaistu uusi versio (FAO 1988, http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils/docs/isricu_i9264_001.pdf). Järjestelmässä on 27 pääluokkaa, joista Suomessa esiintyy todennäköisesti 11. Maan nimi on useimmiten kaksiosainen; päänimeä täydentää yksi attribuutti, joka luonnehtii maannosta tarkemmin. Esimerkiksi suomalaiset savimaat saivat tässä järjestelmässä nimen *Vertic Cambisols*, jossa pääluokka *Cambisols* ilmaisee maannostumista (esim. rakenteen muodostumista, rapautumista) tapahtuneen jonkin verran ja attribuutti *Vertic* kertoo maan olevan suuren savespitoisuuden takia kuivuessaan halkeilevaa. Tämän järjestelmän käyttö uusien kohteiden luokittelussa on loppunut, mutta alan asiantuntijan on syytä osata tulkita sen mukaan annettuja nimiä, joita on käytetty yleisesti, etenkin vanhassa maaperäalan kirjallisuudessa.

World Reference Base for Soil Resources (WRB) –järjestelmä

World Reference Base for Soil Resources (WRB) –järjestelmän (FAO 1998, 2006, 2014) nimistö on samantapaista kuin FAOn/Unescon järjestelmässä mutta luokittelukriteerit ovat siinä määrin erilaiset, että maa voi saada järjestelmissä eri nimen. WRB-järjestelmässä maan nimessä on yleensä monta attribuuttia, jotka sijoittuvat määrittäyskaavan mukaisesti pääluokan nimen eteen tai sen jälkeen. Esimerkiksi melko märän savimaan nimi voi olla *Endogleyic Vertic Eutric Stagnosol (Drainic)*. Pääluokka *Stagnosol* ilmaisee maan olevan heikosti vettä läpäisevä. Attribuuteista *Endogleyic* kertoo sen, että maa on usein veden kyllästämää ja pelkistynyttä 0,5–1 m syvyydessä. *Vertic* ilmaisee korkeaa savespitoisuutta, joka johtaa maan halkeilemiseen kuivissa olosuhteissa. *Eutric* merkitsee korkeaa emäskyllästysastetta, ja pääluokan jälkeen sulkeissa oleva attribuutti *Drainic* osoittaa maan olevan kuivatuksen piirissä. Uusimmassa, vuonna 2014 ilmentyneessä WRB:n versiossa (<http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>) on 32 pääluokkaa, joista ainakin 13 todennäköisesti esiintyy Suomessa.

Suomessa varmuudella esiintyvät pääluokat ja niiden tunnusomaiset piirteet ovat seu-



raavat: *Histosol*-maat ovat turvemaita, joissa turpeen paksuus on vähintään 40–60 cm. Kylmiä *Cryosol*-maita edustavat meillä palsasuot. *Leptosol*-maissa on ohut (<30 cm) irtaimen maan kerros kallion päällä; tähän luokkaan kuuluvat myös kivikot, joissa on hyvin vähän hienoa irtainta maa-ainesta. *Arenosol*-maat ovat karkeaa hietaa tai hiekkaa ainakin metrin syvyyteen saakka ja niissä on kiviä alle 35 % maan tilavuudesta. *Fluvisol*-maat ovat muodostuneet virtaavan veden hiljattain (alle 1000 vuotta sitten) tuomasta aineksestä, niissä on edelleen näkyvissä lähtöaineksen kerrostuneisuus, eikä maissa ole diagnostista B-horisonttia. *Regosol*-maat ovat keskikarkeita (hiesua, hietaa) heikosti kehittyneitä maita. *Cambisol*-maassa on selvää rakenteen kehittymistä ja merkkejä rapautumisesta muokkauskerroksen alla B-horisontissa. Kun maannosluokittelua ryhdyttiin Suomessa tekemään, valtaosa viljelymaistamme sijoitettiin *Cambisol*-luokkaan. Nykyään vallitsevan käsityksen mukaan *Cambisol*-nimi ei ilmaise riittävästi maidemme oleellista piirrettä, märkyyttä, ja sen mukanaan tuomaa kuivatustarvetta, mistä syystä taulukossa 2.6. *Cambisol*-maiksi luetaan vain karkeita kivennäismaita. Savimaamme voidaan sen sijaan osuvasti luokitella *Stagnosol*-maannoksiksi. Niiden vedenläpäisevyys on niin huono, että niiden pintaosat ovat kesäkauden ulkopuolella usein sateen tai sulamisvesien kyllästämiä. Nämä uudet tulkinnot ovat samanlaisia kuin Norjassa, jossa tehdään aktiivisesti maannoskartoituksen kenttätöitä. Myös *Gleysol*-maat ovat märkiä, pohjavesi on lähellä maan pintaa, ja niissä on merkkejä pelkistysreaktioista alle 50 cm:n syvyydessä maan pinnasta. Näissä maissa kokkareet ovat usein varsinkin muokkauskerroksen alapuolella ruskean rautahydroksidisaostuman verhoamia; liejusavet kuuluvat yleensä tähän luokkaan samoin kuin muutkin matalammissa maastonkohdissa sijaitsevat savimaat. Suomen savimaissa on tunnistettu myös *Luvisol*-maannoksia, joissa savespartikkeleita on kulkeutunut vajoveden mukana makrohuokosia pitkin maaprofiilissa alaspäin ja huokosten ja kokkareiden seinämiin on muodostunut yhtenäinen savespartikkelien verho. *Planosol*-maiden pintakerros on karkeaa maata ja sen alla on huonosti vettä läpäisevä savinen jankko tai pohjamaa (Tietoruutu 2.4.). *Umbrisol*-maissa on tumma pintakerros, jonka emäskyllästysaste on alle 50 %; näissä, yleensä karkeissa maissa ei ole diagnostista B-horisonttia. *Podzol*-maat ovat podsoloituneita; tämä on Suomessa metsämailla tyypillisin ja parhaiten tunnettu maannos. *Podzol*-maita on raivattu jonkin verran myös viljelykäyttöön.

Soil Taxonomy -järjestelmä

Soil Taxonomy -järjestelmä on alun perin kehitetty Yhdysvalloissa ja sen käyttö on vähitellen levinnyt maailmanlaajuisesti. Järjestelmässä on kuusi luokittelutasoa, joiden englanninkieliset nimet ovat: *Order*, *Suborder*, *Great group*, *Subgroup*, *Family* ja *Series*. Pääluokkia (engl. soil order) on kaikkiaan 12, joista seuraavia kuutta esiintyy todennäköisesti Suomessa: *Entisol*-maat ovat vähiten kehittyneitä, eikä niissä ole diagnostista B-horisonttia. *Inceptisol*-maassa on muokkauskerroksen alapuolella olevassa B-horisontissa havaittavissa rakenteen muodostumista ja merkkejä rapautumisesta. *Mollisol*-maat ovat mustan mullan maita. Suomen oloissa ne ovat ihmisen aikaansaamia. Kalkitus on nostanut niiden pH:n ja emäskyllästysasteen kyseisen luokan kriteerien tasolle, mutta voidaan olettaa, että ilmasto-oloissamme ne palautuvat vähitellen *Inceptisol*-maiksi; tästä syystä *Mollisol*-nimen käyttö on kyseenalaista, vaikka maa luokitteluhetkellä nimellisesti täyttäisikin kyseisen luokan vaatimukset. *Spodosol* on hyvin kehittynyt podsolimaannos. *Histosol* on tässäkin järjestelmässä turvemaan nimi, ja ikeiroudan maat kuuluvat *Gelisol*-luokkaan. *Great group*-tasoon asti luokittelu ilmaistaan yhdellä kolmiosaisella yhdyssanalla; pääluokan näkee tämän sanan loppuosasta. Muut luokittelutasot ilmaistaan päänimen edessä olevilla attribuuteilla. *Series*-tason luokittelua tehdään lähinnä vain Yhdysvalloissa. Suomalaisen maiden saamat nimet ilmaisevat pääluokan lisäksi usein maan märkyyttä ja kylmyyttä (Taulukko 2.6). Soil Taxonomy-järjestelmän viimeisin versio on luettavissa internet-osoitteessa:

http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs142p2_053580

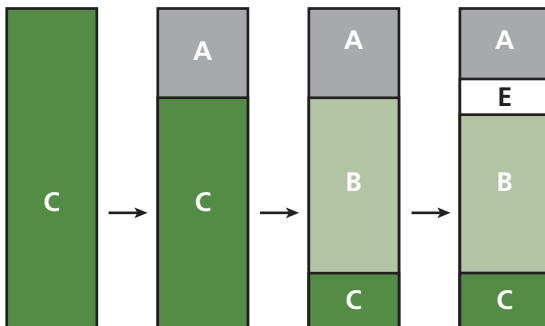
Siirtyminen luokitusjärjestelmästä toiseen

Maannosnimiä ei voi helposti muuntaa luokitusjärjestelmästä toiseen, koska käytettävät luokat eivät ole identtisiä. Monesti tietylle diagnostiselle piirteelle, josta käytetään samaa nimitystä eri järjestelmissä, on hieman erilaiset kriteerit. Periaatteena on, että nimeäminen lähtee aina maan ominaisuuksista. Kun siis halutaan nimetä maa tietyn järjestelmän mukaan, on selvittettävä maan ominaisuuksien perusteella, mitkä kyseisen järjestelmän diagnostiset ominaisuudet maa täyttää.

sien ikäisiä. Nykyään maannostumiseen vaikuttavaksi tekijäksi luettava ihmisen toiminta näkyy erityisesti viljelymailla, joissa maanparannus ja muut viljelytoimet ovat aiheuttaneet peruuttamattomia muutoksia. Tärkeimpiä näistä on ojituksen aikaansaama maan kuivuminen ja siitä varsinkin savimailla seuraava maan halkeilu ja rakenteen muodostuminen luonnontilaista maata syvemmälle.

Mainitut kuusi tekijää määräävät sen, miten erilaiset prosessit ovat lähtöainesta muokanneet. Keskeisimpiä prosesseja maannokselle tunnusomaisten horisonttien muodostumisessa ovat orgaanisen aineksen kertyminen ja humifioituminen pintamaassa, mineraalien rapautuminen, liukoisten aineiden huuhtoutuminen profilissa sekä kolloidien (silikaatit, saves, humus, rauta- ja alumiinioksidit) liikkuminen profilissa alaspäin. Maan kehittyminen lähtöaineksestaan tietynlaiset ominaisuudet omaavaksi järkevästi luokiteltavaksi maannostyyppiksi on lukuisten erillisten prosessien tulos, ja maannosluokittelun taustalla onkin käsitys maasta muuttuvana ympäristöönä reagoivana yksikkönä. Koska maannosta muokkaavia prosesseja on vaikea kvantifioida systemaattisen luokittelun lähtökohdaksi, käytetään luokitusjärjestelmissä mitattaviin maannosprofiilin ominaisuuksiin pohjautuvaa staattista lähestymistapaa. Pelkistetyimmillään maannosten synty ja luokittelu voidaan esittää seuraavasti: Maannostumiseen vaikuttavat tekijät → maannostumisprosessit → diagnostiset horisontit ja ominaisuudet → taksonominen luokittelu.

Luokitusjärjestelmästä riippumatta maaprofiilin horisonttien kuvailemisessa käytetään vakiintuneita lyhenteitä. Kivennäismaan pintakerrosta, jolle on tyypillistä orgaanisen aineksen kertyminen ja viljelyissä maissa muokkaus, kutsutaan A-horisontiksi (Kuva 2.12). Sen alla voi olla vaaleampi E-horisontti, josta on huuhtoutunut savesta, rauta- ja alumiinioksideja sekä muita kolloideja. B-horisontiksi kutsutaan A- tai E-horisontin alapuolella sijaitsevaa kerrosta, jossa tapahtuu ylemmää profilista kulkeutuneiden komponenttien kertymistä, jonkinasteista rapautumista tai selvää rakenteen muodostumista. Tämän alla olevassa C-horisontissa on tapahtunut hyvin vähän muutoksia. Nämä kirjainlyhenteet saavat profilikuvauksissa lisämääreitä horisontteissa ilmenevien ominaisuuksien mukaan (ks. Tietoruutu 2.4).



Kuva 2.12 Horisonttien muodostuminen homogeeniseen lähtöainekseen maannoksen kehittyessä: C-horisontti eli lähtöaines, A-horisontti, B-horisontti ja E-horisontti.

Maan morfologinen kuvaus

Jokioinen 03; Ojaisten hietä: Karkea hietä, pohjamaa savea

Ojaisten peltoaukealla on savialueiden ympäröimänä Loimijoen laakson reunaan ulottuva muutaman hehtaarin alue, jossa muokkauskerros on karkeaa hietää, ja sen alla on savea, metrin syvyydestä alkaen aitosavi. Vaikka maa on lähellä korkeaa jokitäyrystä, pohjaveden pinta oli tutkimushetkellä vain 150 cm:n syvyydellä, mikä johtunee savisen pohjamaan heikosta vedenläpäisykyvystä.

Muokkauskerros on tumma. Sen alla olevassa karkeassa hiedassa on vaaleanruskea hiedan perusväri ja jonkin verran rautasaostumia. Savikerroksen yläosa on niin ikään rautasaostumien kirjavoittama (ks. kuva T2.7). C-horisontin katsotaan alkavan siitä, missä alkaa esiintyä suurehkoja prisman muotoisia kokkareita. Prismojen ulkopinnat ovat harmaita ja prismojen sisäosissa on ruskeita rautasaostumia. Tämä väritys osoittaa prismojen ulkopintojen olevan usein pelkistyneemmässä tilassa kuin sisäosien. Pelkistyneet olot johtuvat ylhäältä tulevista valumavesistä. Tästä värityksestä käytetään nimitystä *stagnic colour pattern*, ja se on savi-maaillemme tyypillinen. Koska maassa on karkea muokkauskerros, ja sen alla hyvin jyrkkärajaisesti alkava savi, maa täyttää WRB-järjestelmän *Planosol*-luokan kriteerit. *Luvic*-attribuutti osoittaa saveksen kulkeutumista makrohuokosia pitkin alaspäin, *Albic* kertoo muokkauskerroksen alla olevan hiedan vaaleasta (pelkistymisreaktioiden aikaansaamasta?) väristä, *Ruptic* hiedan ja saven jyrkästä rajasta, *Eutric* korkeasta emäskyllästysasteesta ja *Clayic* siitä, että maassa on vähintään 30 cm paksuinen savihorisontti. Soil Taxonomy -järjestelmässä maa saa nimen, joka ilmaisee alkuvaiheessa olevaa rapautumista (*Inceptisol*, -*ept* -pääte), märkyyttä (-*aqu*-) ja kylmyyttä (*cry*-) ilman muita silmiinpistäviä ominaisuuksia (*Typic*).

Luokittelu:

Suomalainen nimi	Multava karkea hietä (mKht), pohjamaa savea
WRB	Luvic Planosols (Albic Ruptic Eutric Clayic)
Soil Taxonomy	Typic Cryaquept, coarse-loamy over clayey
Kuvauksen laatinut	Delbert Mokma 5.6.1997 ja Åge Nyborg, Skog og landskap, Norja, 13.6.2012
Pohjaveden syvyys	150 cm maanpinnasta
Värien lyhennekoodit	Munsellin värikarttakirja (Munsell 1994).

Horisontti ja syvyys, cm	Morfologiset ominaisuudet
Ap, 0-30	Hyvin tumma harmaanruskea (10YR 3/2), kuivana harmaanruskea (10YR 5/2) karkea hietä (sandy loam, sl). Heikkoja suuria kulmikkaita kokkareita. Konsistenssi mureneva. Vähän juuria.
Bw1, 30-40	Ruskea (10YR 5/3) karkea hietä. Melko paljon vahvanruskeita (7,5YR 4/6) läiskä. Heikkoja kulmikkaita kokkareita. Konsistenssi mureneva. Vähän juuria.
Bw2, 40-45	Ruskea (10YR 5/3) karkea hietä. Vähän vahvanruskeita (7,5YR 4/6) läiskä. Heikkoja kulmikkaita kokkareita. Konsistenssi mureneva. Ei juuria.
2Bw3, 45-70	Tumma harmaanruskea (10YR 4/2) hietasavi. Paljon vahvanruskeita (7,5YR 5/6) ja harmaanruskeita (10YR 5/2) läiskä. Melko vahvoja kulmikkaita kokkareita, jotka murtuvat pienemmiksi kulmikkaiksi kokkareiksi. Konsistenssi luja. Ei juuria.
BC, 70-100	Tumma harmaanruskea (10YR 4/2) hiuesavi. Paljon vahvanruskeita (7,5YR 5/6) ja harmaita (5Y 5/1) läiskä. Melko vahvoja kulmikkaita kokkareita, jotka murtuvat pienemmiksi kulmikkaiksi kokkareiksi. Konsistenssi luja. Ei juuria.
Cg, 100-150	Tumma harmaanruskea (10YR 4/2) aitosavi. Melko paljon tummia kellanruskeita (10YR 3/4) läiskä kokkareiden sisällä, prismamaisten kokkareiden pinnat yhtenäisen harmaita (2,5Y 5/1). Melko vahvoja suuria prismamaisia kokkareita, jotka murtuvat pienemmiksi kulmikkaiksi kokkareiksi. Konsistenssi luja. Ei juuria.





Kuva T2.7 Ojaisten hietamaan pintaosa on 45 cm:n syvyyteen saakka karkeaa hietaa ja syvemmällä on savimaata. Muokauskerroksen (0–30 cm) hietä on tummaa, koska siinä on eloperäistä ainesta, mutta 30–45 cm:n syvyydessä näkyy hiedan oma vaalea väri. (Kuva Markku Yli-Halla)

Maannostumisen merkit viljelymaissamme

Suomen viljelymaiden maannoksia ei ole dokumentoitu kovin kattavasti. Julkaistu tieto perustuu pääasiassa noin 40:een yksityiskohtaisesti tutkittuun maaprofiiliin (Yli-Halla ym. 2000). Tämän lisäksi kokemusta maannoksiemme tyypillisistä ominaisuuksista on kertynyt muun muassa Suomen maannostietokannan kokoamisen yhteydessä. Vaikka maamme ovat kansainvälisestä näkökulmasta katsoen hyvin nuoria, voidaan niissä havaita merkkejä monenlaisista maannostumisprosesseista. Monilla prosesseilla ja niiden seurauksena syntyvillä maan ominaisuuksilla ei ole vakiintuneita suomenkielisiä termejä, mistä syystä seuraavassa esitetään myös näiden ilmiöiden ja ominaisuuksien englanninkielisiä, kansainvälisessä kirjallisuudessa esiintyviä nimityksiä.

Savimaat

Savimaidemme keskeiset maannostumisprosessit ovat mineraalien rapautuminen, rakenteen muodostuminen sekä raudan hapettumis- ja pelkistymisreaktiot, joihin liittyy rautahydrideiden liukenemista ja saostumista. Luonnontilainen uusi savisedimentti on siniharmaata rakenteetonta massaa, joka alkaa kuivuessaan halkeilla. Tällöin maaprofiiliin pääsee kesän sateettomina kausina ilmaa (happea), ja pelkistyneessä muodossa esiintyessään melko väritön rauta (Fe^{2+}) hapettuu ja saostuu ruskeina läiskinä tai yhtenäisenä kerroksena jankon ja pohjamaan kokkareiden pinnoille ja sisäosiin. Savimaiden harmaa perusväri kertoo pelkistyneistä oloista ja ruosteläiskät siitä, että maanesteeseen liennut rauta on paikoitellen hapettunut ja saostunut. Savimaissamme havaitaan myös alkavaa saveksen kulkeutumista maaprofilissa alaspäin. Tämän seurauksena pohjamaan huokosten ja halkeamien seinämiin kertyy ohut saveskerros.

Harmaa väri, ruostesaostumat, veden vaivaamilla mailla yhtenäisen ruosteen peitossa olevat kokkareet ja vanhoihin juurikanaviin saostuneet rautapillit ovat savimaillemme tyyppillisiä piirteitä. Englanninkieliset termit näille hapettavien ja pelkistävien olojen vuorottelua osoittaville merkeille ovat *redoximorphic features* (Soil Taxonomy) sekä *gleyic properties* ja *stagnic properties* (FAO, WRB). Viileän ja sateisen alueen asukkaille savien harmaus on itsestään selvyys, mutta lämpimässä ja kuivassa ilmastossa savet ovat ruskeita, tropiikissa jopa punaisia. Jokioisilla ja Aurassa savimailla tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että muokkauskerroksen alapuolella maan lohkeamispinnat ovat yhtenäisen harmaat kun taas sisäosat ovat ruskeammat ja rautasaostumien värjäämät (engl. *stagnic color pattern*). Tämä viittaa siihen, että sisäosissa on hapelliset olot, mutta kokkareiden välit ovat kylälästyneestä pintamaasta tulevan valunnan takia hapettomassa tilassa. Sen sijaan liejusailla, joilla pohjaveden pinta on usein korkealla, pohjamaan kokkareet ovat sisältä harmaat (veden kyllästämät ja pelkistyneet) ja ulkopinnoiltaan ruskeat (hapettuneet). Tähän värien kirjoon viittaava englanninkielinen termi on *gleyic color pattern*.

Savimaihimme muodostuu kuivumisen ja kutistumisen takia kestävä prismamainen rakenne yllättävän lyhyessä ajassa. Kyntämättä viljeltäessä maan pintakerros (0-10 cm) säilyy hienorakenteisena vuosittaisen matalan muokkauksen takia, mutta kerroksen alapuolelle eli entisen muokkauskerroksen alaosaan kehittyy jo muutamassa vuodessa prismamainen rakenne. Sama ilmiö on nähtävissä savimailla, joilla on siirrytty aikaisempaa matalampaan kyntöön. Pohjamaahan muodostuu pintamaata karkeampi prisman muotoisista kokkareista koostuva rakenne, koska maa ei kuivu syvältä yhtä paljon kuin pinnasta. Prismat voivat olla halkaisijaltaan parikymmentä senttimetriä ja niiden pituus voi olla jopa puoli metriä. Prismojen väliset kuivumisen ja kutistumisen tuloksena syntyneet ja usein ruostesaostuman stabiloimat halkeamat ovat melko pysyviä, ja ne ovat liero- ja juurikanavien ohella tärkeitä veden kulkureittejä. Pohjamaan suurten prismojen välissä on näitä ohuempia kiillamaisia rakenteita (engl. *wedge-shaped aggregates*). Pohjamaan kokkareiden pinnoilla on myös paljon pieniä kiiltäviä kohtia (engl. *pressure faces*), jotka ovat syntyneet paisuvien savikokkareiden painautuessa toisiaan vasten. Maan nuorta ikää ja/tai pedogeneesin vähäisyyttä osoittaa se, että varsinkin pohjamaassa prismat katkeilevat vaakasuoraan (engl. *platy structure*) myötäillen niitä kerrosrajoja, jotka ovat muodostuneet aikanaan lähtöaineksen sedimentoitua. Syvemmällä nämä kerrokset ovat usein silminkin havaittavissa, mutta jankosta ne ovat pedogeneesin seurauksena enimmäkseen hävinneet. Myös se, että lustosavissa on nähtävissä alkuperäinen sedimentaation tuloksena syntynyt kerroksellisuus, osoittaa maannostumisen olleen vähäistä ja ulottuneen kunnolla vain maan pintakerrokseen.

Hiesumaat

Myös puhtaimmat hiesumaat ovat yleisväriltään vaaleanharmaita. Hiesut ovat tiiviitä, ja on mahdollista, että niissäkin harmaa väri liittyy siihen, että rautaoksidit ovat liuenneet niistä pelkistyneissä oloissa – tai rautasaostumia ei niihin ole koskaan liiemmälti kehittynytäkään. Hiesumaalla voi jopa muokkauskerroksen alaosassa olla pitkäjäisiä pelkistyneitä oloja osoittavia vaaleita soikeita halkaisijaltaan muutaman senttimetrin laikkuja. Muokkauskerroksen alla olevassa maassa ei hiesuilla ole tapahtunut senkään vertaa maannostumista kuin savimailla. Rakenne on usein kehittymätön, koska hiesumaat eivät kuivuesaan juurikaan kutistu, ja alkuperäinen kerrostuneisuus voikin olla nähtävissä heti muokkauskerroksen alla. Rapautumisen merkitkin ovat vähäiset.

Hieta-, hiekka- ja moreenimaat

Karkeimmat kivennäismaat ovat yleisväriltään ruskeita, koska silikaattihiukkasten pinnoille on saostunut rautahydroksidiverho (Kuva 2.13). Märissä maastonkohdissa sijaitsevien karkeidenkin kivennäismaiden pohjamaa voi olla harmaa. Karkeat hietamaat ovat usein voimakkaasti *podsoloituneita*. Näillä mailla voi muokkauskerroksen alta löytää valkean huuhtoutumiskerroksen ja sen alta tummanruskean rikastumiskerroksen, joka on joskus iskostunut rautapalsi (*ortstein*). Hienoilla hiedoilla ei juurikaan havaita podsoloitumista, ja moreeneilakin podsoloituminen on monesti heikkoa. Näillä molemmilla maalajeilla on karkeita maita enemmän helposti rapautuvia mineraaleja hidastamassa podsolimaan morfologian kehittymistä. Karkeilla hietamailla voi usein havaita ruskeita podsoliprofiilin rikastumiskerroksesta peräisin olevia rautahydroksidi-iskostuman kappaleita, joita kyntö on nostanut muokkauskerrokseen. Podsoloituneiden maiden kyntö syvältä, niin että raudan saostumiskerros sekoittuu muokkauskerrokseen, johtaa suureen fosforilannoituksen tarpeeseen ja lannoituksen pieneen jälkivaikutukseen, kun fosfori sitoutuu tiukasti rautahydroksideihin.

Eloperäiset maat

Orgaanisen aineksen kertyminen maahan on eloperäisten maiden keskeisin pedologinen prosessi. Eloperäisiä maita muodostuu tyypillisesti alaviin maastonkohtiin, joihin vesi kerääntyy ja joissa märkyys ja kylmyys rajoittavat kasvien tuottaman orgaanisen aineksen hajotusta. Nämä maat ovat malliesimerkkejä ilmaston ja topografian vaikutuksista maanostosten kehittymiseen. Multamaat ovat yleensä viljelykäyttöön otettuja ohutturpeisia soita, joissa muokkaus on sekoittanut turvekerroksen sen alapuolella olevaan kivennäismaahan, ja maan kuivatusta seurannut happitilan paraneminen johtaa eloperäisen aineksen nopeutuvaan hajoamiseen. Monet suomalaisen maalajiluokituksen multamaat (20–40 % orgaanista ainesta) siirtyvät aikaa myöden kivennäismaiden luokkiin, ja jotkut turvemaat (>40 % orgaanista ainesta) muuttuvat multamaiksi. Samanlainen muutos voi tapahtua silloin, jos eloperäiselle maalle ajetaan maanparannusmielessä runsaasti kivennäismaata. Nämä muutokset ovat pedologisesta näkökulmasta katsoen hyvin nopeita, mikä saattaa joskus aiheuttaa hankaluuksia orgaanisten maidemme sijoittamisessa alun perin luonnontilaisten

maiden luokitteluun kehitettyihin järjestelmiin.

Kuivatuksen jälkeenkin märkyys ja hapetus-pelkistysreaktiot ovat eloperäisille maille tyypillisiä piirteitä. Tästä syystä viljellyissä turvemaissa on usein runsaasti rautasaostumia, kun rautapitoinen pohjavesi joutuu kosketuksiin ilmakehän hapen kanssa. Turvemailla ruostesaostumat haittaavat yleisesti salaojien toimintaa. Ruostetta saostuu usein myös vanhoihin juurikanaviin, joita pitkin ilmakehän happi pääsee maahan. Tällaiset saostumat ovat hyvin yleisiä Pohjanmaan jokilaaksoissa sijaitsevien ohutturpeisten viljelymaiden jankossa. Eloperäisen kerroksen alapuolella oleva kivennäismaa on yleensä valtaosan vuodesta niin märkää, että kovin merkittävää rakenteen muodostumista ei ole päässyt tapahtumaan. Usein rakenteen muodostumista näissä maissa vähentää myös pohjamaan karkea lajitekoostumus.



Kuva 2.13 Maannosprofiili hienossa hietamaassa Reh-tijärvellä, Jokioisilla. Yli 90 cm:n syvyydellä maa on pääasiassa karkeaa hietaa, jossa ohuita aitosavi-kerroksia. (Kuva Markku Yli-Halla)

Suomalaisten viljelymaiden maannosten nimet

Kansainvälisten luokittelujärjestelmien mukaan maillemme annetut nimet ilmaisevat useimmiten maaprofilin vähäistä kehittyneisyyttä. Ainoita poikkeuksia ovat jotkin hyvin kehittyneet podsolimaannokset. Soil Taxonomy -järjestelmän nimistä ilmenee usein myös maidemme kylmyys tai märkyys. Tyypillisiä viljelymaissamme tavattavia maannoksia on esitetty taulukossa 2.6.

Taulukko 2.6 Suomalaisissa viljelymaissa yleiset maannokset Soil Taxonomy- ja WRB-järjestelmän viimeisimpien versioiden mukaan.

	Soil Taxonomy 2014	WRB 2014
Savimaat (ei liejusavet)	Typic Cryaquepts tai Vertic Cryaquepts	Vertic Luvisols tai Stagnic Vertic Luvisols
Liejusavet (ei happamat sulfaattimaat)	Typic Cryaquepts	Dystric Gleysols
Happamat sulfaattimaat	Sulfic Cryaquepts	Thionic Gleysols
Hiesumaat	Aquic Cryorthents	Stagnic Eutric Regosols
Hiuumaat	Aquic Eutrochrypts	Endogleyic Eutric Cambisols
Hieta, syvemällä savi		Endogleyic Luvisols
Hienot hiedat	Oxyaquic Cryorthents	Endogleyic Cambisols tai Endogleyic Regosols
Karkeat hiedat		
- podsoloituneet	Aquic Haplocryods	Gleyic Podzols tai Haplic Podzols
- ei-podsoloituneet	Oxyaquic Cryorthents tai Oxyaquic Cryopsamments (karkeat)	Dystric Regosols tai Dystric Arenosols (karkeat)
Moreenit		
- podsoloituneet	Typic Haplocryods	Haplic Podzols tai Gleyic Podzols
- ei-podsoloituneet	Oxyaquic Cryorthents	Dystric Regosols tai Gleyic Regosols
Multamaat	Histic Cryaquepts	Umbric Dystric Gleysols tai Histic Dystric Gleysols
Turvemaat	Terric Cryosaprists	Sapric Dystric Histosols

2.8 Maan rakenne

Laura Alakukku

Maan rakenne eli struktuuri voidaan määritellä primäärihiukkasten keskinäisiksi sidoksiksi ja ryhmittymiksi sekä niiden muodostamaksi huokostilaksi. Rakenteen rungon muodostaa kiintoaines, joka koostuu kivennäisaineksesta ja eloperäisestä materiaalista. Hiukkasten ja murujen väliin jää huokosto, joka sisältää vettä ja ilmaa. Kivennäisainesta kuvataan sen lajitekoostumuksella eli tekstuurilla (ks. kohta 2.4)

Maan vesi-, kaas- ja lämpötilous, ravinteiden kulkeutuminen ja juurten kasvu riippuvat maan rakenteesta. Viljelyn kannalta hyvän maan rakenteen tuntomerkit ovat nopea veden imeytyminen ja mururakenteen kestävyys. Hyvä maa pystyy toisaalta pidättämään riittävästi vettä kasvien tarpeita varten ja toisaalta se sisältää tarpeeksi isoja huokosia, joita pitkin liiallinen vesi kulkeutuu pois. Hyvärakenteinen maa muokkautuu myös helposti ja se kestää veden liettävää vaikutusta rikkoontumatta. Maan rakenne vaikuttaa merkittävästi viljeltävyyteen, kasvien kasvuun ja maatalouden aiheuttamaan ympäristökuormitukseen.

Maan huokosto

Maan huokosto muodostuu huokosista, joiden koko vaihtelee muutaman nanometrin (10^{-9} m) levyisistä yksittäisten hiukkasten välisistä tiloista useiden senttimetrien levyisiin halkeamiin tai myyrän koloihin.

Maan huokostossa liikkuvat maan ainevirrat. Huokostossa vesi ja kaasut liikkuvat masavirtauksena tai diffundoitumalla. Kun vesi täyttää huokoston, kaasujen vaihto on hyvin hidasta, koska kaasujen diffusio vedessä on 10 000 kertaa hitaampaa kuin ilmassa. Vesi puolestaan liikkuu hyvin hitaasti, kun ilma täyttää suurimman osan huokostossa. Maan huokosto on myös veden varasto, johon vesi pidättyy niin, että painovoima ei enää liikuta sitä, mutta mm. kasvit pystyvät sitä hyödyntämään. Maan vesi on harvoin staattisessa tilassa, sillä maassa on kaiken aikaa käynnissä erilaisia prosesseja, kuten juurten vedenotto ja haihdunta.

Vesi on sitoutunut maahan erilaisin voimin huokosissa olevasta vesimäärästä riippuen. Kuivassa maassa vesi on kiinnittynyt huokosten seinämiin eli maahiukkasten pinnalle vesimolekyylien ja maan välisen adheesion vaikutuksesta. Näin pidättynyttä vettä kutsutaan adsorptiovedeksi. Maan kostuessa vesi pidättyy ensin pieniin huokosiin ja lopuksi suuriin huokosiin. Tuolloin vesi ei ole vapaana huokosissa vaan sen adheesiosta ja pintajännityksestä johtuen sitoutuneena ns. kapillaarivedeksi. Maan veteen on aina liuennut ravinteita ja muita aineita, joten vesi on sitoutunut maassa myös osmoottisesti. Luvussa 3 esitetään tarkemmin maaveden sitoutumisen ja liikkumisen teoria.

Maan kuivuessa huokosiin virtaa veden tilalle ilmaa. Kaikki huokostila, josta vesi poistuu, ei korvaudu ilmalla vaan osa murujen välisestä huokostilasta pienenee ja maa kutistuu. Tämä on seurausta siitä, että hiukkaset pääsevät lähemmäksi toisiaan niiden ympärillä olevan vesivaipan ohentuessa. Myös maan vedessä vaikuttava imu painaa hiukkasia lähemmäksi toisiaan. Maan kutistuminen on selvimmin havaittavissa savi- ja eloperäisissä maissa.

Huokoisuus ja huokosjakauma

Maan huokoisuudella tarkoitetaan huokoston tilavuusosuutta maan kokonaistilavuudesta. Huokosluku kuvaa huokosten tilavuuden suhdetta maa-aineksen tilavuuteen (ks. Tietoruutu 2.5). Huokoisuus ja huokosjakauma vaihtelevat maalajeittain. Maan huokoston osuus kokonaistilavuudesta on suuri, kun siinä on paljon pieniä hiukkasia, joiden ominaispinta-ala on suuri. Tästä johtuen huokostilavuus suurenee maan savespitoisuuden ja multavuuden kasvaessa. Yksinkertaistaen voidaan sanoa, että hienojakoisissa maissa on enemmän huokosia

kuin karkeissa maissa. Maatuneissa eloperäisissä maissa on puolestaan enemmän huokosia kuin maatumattomissa turvemaissa. Maan huokoisuus on sitä pienempi, mitä tiiviimmäksi rakenteeksi kiintoaineksen hiukkaset ovat järjestäytyneet. Taulukossa 2.7 on esitetty eri maalajien huokoisuus, irtotiheys eli kuivatilavuuspaino ja huokosluku. Multamaassa huokoisuus on 65–75 tilavuusprosenttia ja turvemaissa jopa 80–90 tilavuusprosenttia.

Huokosten kokojakauma on merkittävä tekijä maan käyttäytymiselle. Maahuokokset voidaan jakaa kolmeen luokkaan sen mukaan, miten vesi pidättyy niihin. Pieniin (halkaisija < 0,0002 mm) ja keskisuuriin (0,0002–0,03 mm) huokosiin vesi pidättyy kemiallisiin sidoksiin ja kapillaarisesti. Suurimmista huokosista eli makrohuokosista (halkaisija > 0,03 mm) vesi poistuu painovoiman vaikutuksesta mm. ojaan. Maassa olevien erikoisten huokosten määrittämiseen käytetään yleisesti maan vedenpidätyskäyrää eli pF-käyrää (ks. Luku 3). Taulukossa 2.8 on esitetty huokoskokoluokat suomalaisen ja saksalaisen luokituksen mukaan.

Maalajien välillä on eroja huokoskokojakaumassa, mikä vaikuttaa merkittävästi maan vesitalouteen (ks. Luku 3). Karkeissa maissa on luonnostaan paljon makrohuokosia ja hienojakoisissa maissa pieniä huokosia. Eloperäisissä maissa on makrohuokosia sitä vähemmän mitä maatuneempaa maa-aines on. Pienten ja keskisuurten huokosten määrä riippuu pitkälti kivennäisaineksen lajitekoostumuksesta ja eloperäisen aineksen määrästä. Huokosten kokoon vaikuttavat myös ilmaston vaihtelut, biologiset prosessit ja viljelytoimenpiteet. Kuvassa 2.14 on esitetty kivennäismaan huokostilavuuden jakautuminen eri huokoskokoluokkiin.

Taulukko 2.7 Erilaisten kivennäismaiden huokoisuus, kuiva irtotiheys ja huokosluku. Maan orgaanisen hiilen pitoisuus on alle kaksi grammaa sadassa grammassa maata.

Maalaji	Huokoisuus, tilavuus -%	Irtotiheys, g cm ⁻³	Huokosluku
Hiekka, hietä	36–56	1,16–1,70	0,56–1,27
Hiesu	39–56	1,26–1,61	0,64–1,27
Hiue	30–55	1,20–1,85	0,43–1,22
Savi	35–70	0,88–1,72	0,54–2,33

Lähde: (Blume ym. 1976)

Taulukko 2.8 Huokoskokoluokat suomalaisen ja saksalaisen luokituksen mukaan. Vesipatsaan korkeus vastaa paineen yksiköitä: 100 cm vesipatsas ≈ 10 kPa ≈ 0,01 MPa ≈ 0,1 bar

Huokoskokoluokka	Halkaisija, mm	Maan vesipotentiaali, vesipatsaan korkeutta h, cm, vastaava imu	pF*
Suomalainen luokitus			
Makrohuokokset	>0,030	0–100	< 2
Keskikokoiset huokokset	0,030–0,0002	100–15000	2–4,2
Pienet huokokset	< 0,0002	> 15000	> 4,2
Saksalainen luokitus			
Suuret makrohuokokset	> 0,050	0–60	< 1,77
Pienet makrohuokokset	0,050–0,010	60–300	1,77–2,54
Keskikokoiset huokokset	0,010–0,0002	300–15000	2,54–4,2
Pienet huokokset	< 0,0002	> 15000	> 4,2

* pF = lg|h|

Maan kosteuden ollessa kenttäkapasiteetissaan saksalaisen luokituksen mukaan pF on 1,8–2,5 ja suomalaisen luokituksen mukaan pF on 2. Maan kosteuden ollessa lakastumisrajalla pF on 4,2. Lähde: saksalainen luokitus Blume ym. 1976.

Tietoruutu 2.5

Huokostilavuuden laskeminen

Maan huokoisuus (n) eli huokosten tilavuuden osuus maan kokonaistilavuudesta on:

$$n = \frac{V_w + V_g}{V_{tot}} \quad (T2.1)$$

V_w = veden täyttämän huokoston tilavuus (m^3)

V_g = ilman täyttämän huokoston tilavuus (m^3)

V_s = kiintoaineksen tilavuus (m^3)

V_{tot} = maan kokonaistilavuus = $V_s + V_w + V_g$ (m^3)

Huokoisuus voidaan laskea myös, kun tiedetään maan kiintotiheys (ρ_s) ja irtotiheys (ρ_b).

$$n = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} = \frac{V_w + V_g}{V_{tot}} \quad (T2.2)$$

ρ_s = kiintotiheys ($kg\ m^{-3}$)

ρ_b = irtotiheys ($kg\ m^{-3}$)

Kiintotiheys (ρ_s) on kuivan, huokosettoman maa-aineksen massan (m_s) suhde tilavuuteen (V_s).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (T2.3)$$

Kiintotiheys riippuu maan mineraalikoostumuksesta ja eloperäisen aineksen määrästä. Kivennäismaissa kiintotiheys vaihtelee välillä 2 500–2 800 $kg\ m^{-3}$ ollen keskimäärin 2 650–2 700 $kg\ m^{-3}$, joka vastaa kallioperämme ominaispainoa. Eloperäisen aineksen kiintotiheys on 1 250–1 400 $kg\ m^{-3}$.

Irtotiheys (ρ_b) on huokoisen maa-aineksen tiheys. Kuiva irtotiheys on vedettömän maa-aineksen massa (m_s) suhteessa kokonaistilavuuteen (V_{tot}).

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_{tot}} \quad (T2.4)$$

Kivennäismaan kuiva irtotiheys vaihtelee mm. muokkauksen ja eloperäisen aineksen määrän mukaan. Muokkauserroksessa se on yleensä 800–1 200 $kg\ m^{-3}$ ja ruokamultakerroksen alapuolella 1 000–1 800 $kg\ m^{-3}$. Turvemaan irtotiheys on 100–600 $kg\ m^{-3}$.

Märkä irtotiheys on luonnontilaisen näytteen massa ($m_s + m_w$) suhteessa sen tilavuuteen. Tällöin maan kosteus m_w ilmoitetaan tuloksen yhteydessä.

Irtotiheys eli tilavuuspaino vaihtelee maan tiiveyden mukaan. Tiiviissä maassa se on suurempi kuin löyhässä ja muokkauserroksessa yleensä pienempi kuin syvemmillä. Kuivan savi- maan irtotiheys on suurempi kuin märän. Savimaissa irtotiheys on usein pienempi kuin karkeammissa maissa varsinkin, jos karkeassa maassa on paljon erikokoisia hiukkasia, jolloin pienemmät hiukkaset voivat kiilautua isompien väliin.

Huokoisuuden sijasta käytetään myös huokoslukua (e):

$$e = \frac{V_w + V_g}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \quad (T2.5)$$

Maan huokostosta riippuvat ominaisuudet vaihtelevat paljon eri maalajien välillä, saman maalajin sisällä ja myös yksittäisen lohkon sisällä. Ruokamultakerroksen alapuolella muodostuu usein tiivistynyt maakerros. Tämän lisäksi Suomen peltomaat ovat usein kerroksellisia eli pintamaan maalaji voi olla erilainen kuin pohjamaan, mikä vaikuttaa maan viljelyominaisuuksiin merkittävästi. Maan huokosto voi vaihdella myös ajallisesti kuten savimaissa, jotka kuivuessaan halkeilevat, mutta maan olleessa märkää halkeamat paisuvat kiinni.

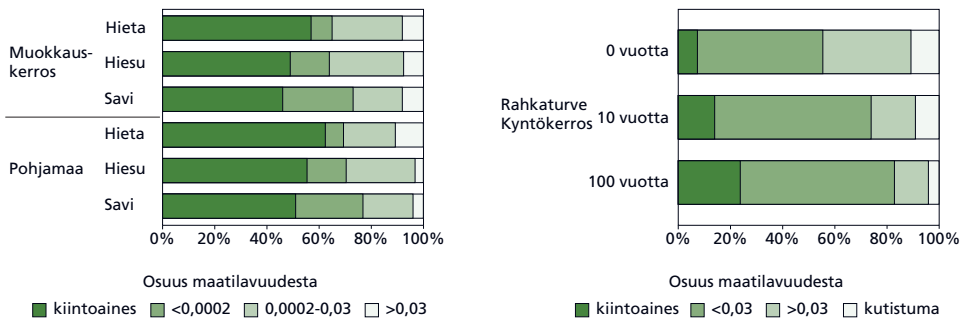
Makrohuokokset

Maahan luonnostaan syntyviä makrohuokosia ovat esimerkiksi halkeamat sekä juurikanavat ja lierokäytävät. Makrohuokosten tilavuuden ohella niiden lukumäärä, syntyminen, jakautuminen maatilavuudessa ja jatkuvuus ovat tärkeitä tekijöitä maan toimintojen kannalta. Makrohuokosten merkitys maassa on suuri, sillä ne vaikuttavat lähes kaikkiin maan fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin ominaisuuksiin ja prosesseihin. Toimivan makrohuokoston ylläpitäminen on keskeinen tavoite maan hoidossa.

Sadevesi imeytyy helposti makrohuokosiin ja veden imeytyessä nopeasti maahan pintavirtauksen ja sen myötä eroosion ja fosforin huuhtoutumisen riski pienenee. Toisaalta sala-ojitetulla pellolla vesi, siihen liuenneet aineet sekä eroosioaines voivat kulkeutua nopeana ”oikovirtauksena” ojaan syvälle ulottuvia, jatkuvia makrohuokosia pitkin olematta juurikaan kosketuksissa vedellä kyllästämättömän maan kiinteän aineksen kanssa. Tällöin veden suotaantumisen maassa voidaan olettaa olevan vähäistä. Oikovirtaus on todennäköistä, kun pohjamaan makrohuokosto on harva. Tällöin kuiva maa imee vettä epätasaisesti sateen aikana ja vesi virtaa muutamissa suurissa huokosissa läpi maaprofilin. Tiheä liero- ja juurikanavien sekä mikrohalkeamien muodostama verkosto jakaa veden tasaisesti maahan vähentäen oikovirtauksen riskiä.

Kosteissa oloissa maan kaasut vaihtuvat makrohuokostoa pitkin. Huono kaasujen vaihto haittaa juurten hapensaantia ja lisää typen kaasumaisia päästöjä. Maan ilmatila on tärkeä tunnusluku, kun arvioidaan maan tiiviysasteen vaikutusta juurten hapen saantiin kosteissa olosuhteissa. Hapensaanti on riittävä, jos ruokamultakerroksen ilmatila kenttäkapasiteettikosteudessa on vähintään 10 % tilavuudesta (Heinonen ym. 1992, s. 131).

Fosforia pidättävien pintojen muodostumisen kannalta on tärkeää, ettei pohjamaassa ole pelkistyneitä tai hapettomia olosuhteita. Makrohuokokset ovat myös juurten kasvureittejä ja lierojen asuinsijoja. Kuivina vuosina kasvi ei pysty hyödyntämään savi- ja hiesumaiden alempien kerrosten vesivarjoja, jos juuristo ei pysty kasvamaan syvälle. Makrohuokosten tilavuusosuus on jankossa ja pohjamaassa pienempi kuin ruokamultakerrok-



Kuva 2.14 Kivennäismaan huokostilavuuden jakautuminen eri huokoskokoluokkiin (Andersson ja Wiklert 1972) ja turvemaan huokoskokojakauman muutos maatumisasteen kasvaessa (Myllys 1992).

sessä. Esimerkiksi suomalaisissa savi- ja hiesumaissa on makrohuokosia kyn- tökerroksessa 10–20 tilavuusprosenttia ja 40 cm syvemmällä yleensä vähem- män kuin 5 tilavuusprosenttia. Jotta maa pystyisi läpäisemään vettä tehokkaasti ja toisaalta kasvi pystyisi käyttämään savi- maahan varastoituneen käyttökelpoisen veden, maassa on oltava vähintään met- rin syvyyteen ulottuva makrohuokosten verkosto. Kuvassa 2.15 on esitetty savi- maan ja kuvassa 2.16 savi- ja hiuemaan makrohuokostoa.

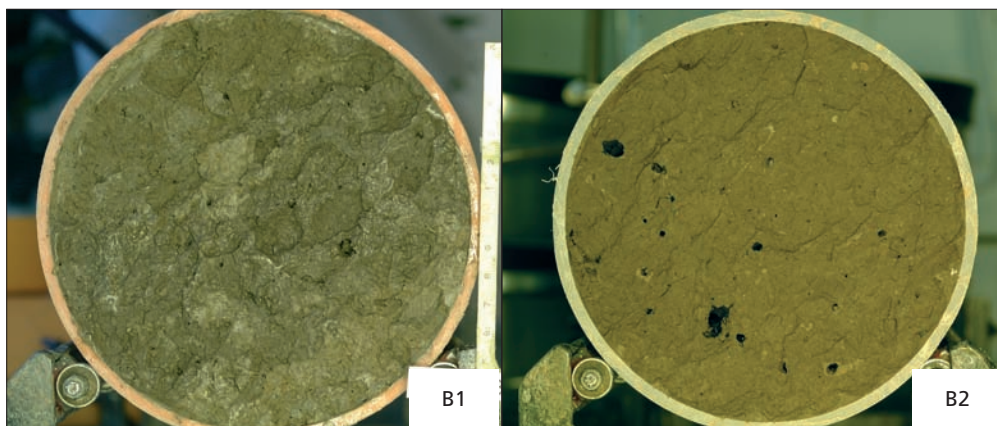
Halkaisijaltaan ≥ 2 mm:n sylinterin- muotoiset huokokset ovat lierokäytäviä ja sitä pienemmät pääosin juurikana- via. Yhdessä ne ovat biohuokosia, jotka ovat tärkeitä veden ja ilman kulkureittejä märässä maassa, vaikka niiden osuus huokostosta on pieni. Ne ovat myös tär- keitä juurten kasvuväyliä, sillä laskel- mien mukaan suomalaisessa savimaassa noin puolet kauran ja erilaisten kesanto- kasvien juurista kasvaa muokkausker- roksen alapuolella biohuokosissa.

Keskikokoiset ja pienet huokokset

Kasvit ottavat vettä makrohuukosista, jos vesi pysyy niissä pitkään ja märässä maassa on riittävästi happea juuren elin- toimintojen ylläpitoon. Hyvärakenteisen



Kuva 2.15 Savimaan makrohuokostoa, joka on verkostoitunut. Maan pinnasta kaadettu värjätty vesi painuu alaspäin halkeamassa. Muokkauskerroksen alaosaan se lähtee valumaan sivuttaissuunnassa. Jankossa ollut lierokäytävä johtaa sen yläpuolelle kertynyttä vettä syvälle maaprofiiliin oikovirtauksena. Lähde: Shipitalo ym. (2004). (Kuva Visa Nuutinen)



Kuva 2.16 Savi- (B1) ja hiuemaan (B2) makrohuokostoa 35–40 cm:n syvyydessä. (Kuvat Marja-Liisa Westerlund)

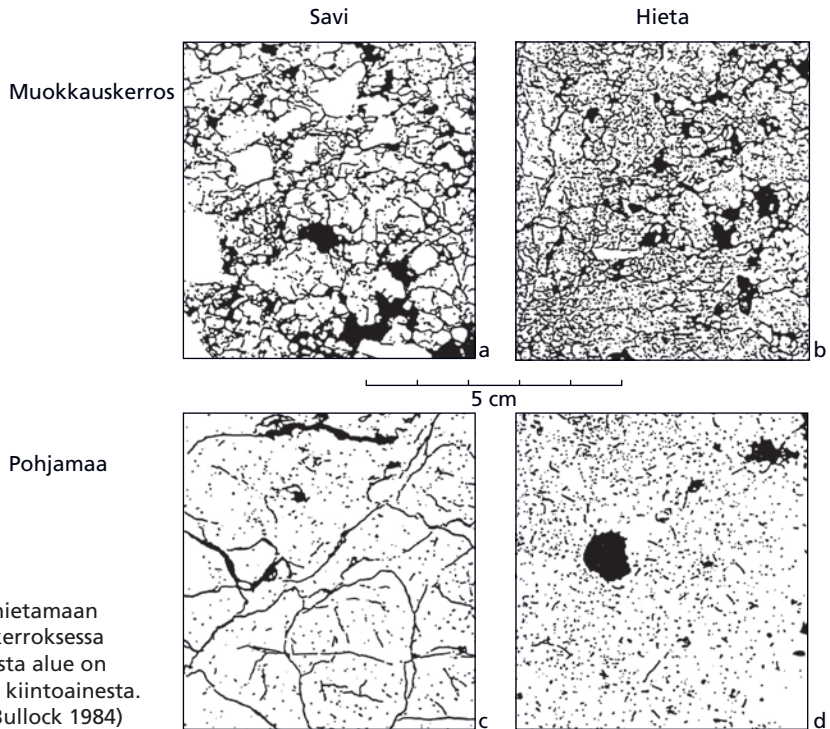
maan makrohuokosissa vesi varastoituu kuitenkin vain muutamia päiviä. Kasvien kannalta on oleellisempaa se, kuinka paljon maan keskikokoisiin huokosiin pidättyy kasveille käyttökelpoista vettä. Veden kulkeutuminen märästä pohjamaasta kuivempaan pintamaahan riippuu huokosten koosta (ks. Luku 3 - Maan vedenpidätyskyky). Suurimmissa huokosissa vesi ei nouse korkealle, koska painovoima voittaa jo pienellä nousukorkeudella huokosveden pintajännityksen. Kasvien vedenottoa on käsitelty luvuissa 3 ja 9.

Pienissä huokosissa vesi on kasvien ulottumattomissa, mutta maassa olevat virukset ja osa bakteereista elävät lakastumisrajaa pienemmissä huokosissa.

Maan rakennetyypit ja rakenteen muodostuminen

Maat voidaan jaotella rakenteen perusteella kolmeen päämuotoon: yksihiukkeinen, massiivinen ja muruinen (kuva 2.17). Karkeiden kivennäismaiden (karkea hietä, hiekka, moreeni) rakenne on yksihiukkeinen, kun kivennäis- ja eloperäiset hiukkaset ovat järjestäytyneet muotonsa ja kokonsa mukaisesti ilman että niiden välillä on sidoksia. Kun maa on kosteaa, hiukkasten kosketuspintojen ympärillä vaikuttava koheesio pitää maan rakennetta koossa parantaen maan kantavuutta (esim. hiekkaranta). Kuivana rakenne voi olla irtonainen. Jos yksihiukkeisessa maassa on paljon erikokoisia lajitteita, pienimmät hiukkaset voivat kulkeutua suurempien väliin ja tiivistää näin huokostilaa pienemmäksi kuin se olisi puhtaiden lajitteiden perusteella. Muokkauskerrosta syvemmällä karkeiden maiden rakenne on usein iskostunut kovaksi. Kivennäishiukkasten kosketuskohtiin on saostunut kovettavaksi sidosaineksi tavallisesti rauta- ja alumiinioksidia tai kolloidista piihappoa.

Hienojakoisten maiden rakenne on massiivinen, kun yksittäiset hiukkaset muodostavat koheesiovoimien ansiosta yhtenäisen massan. Maa on märkänä geelimäinen ja kuivana kova ja murustumaton.



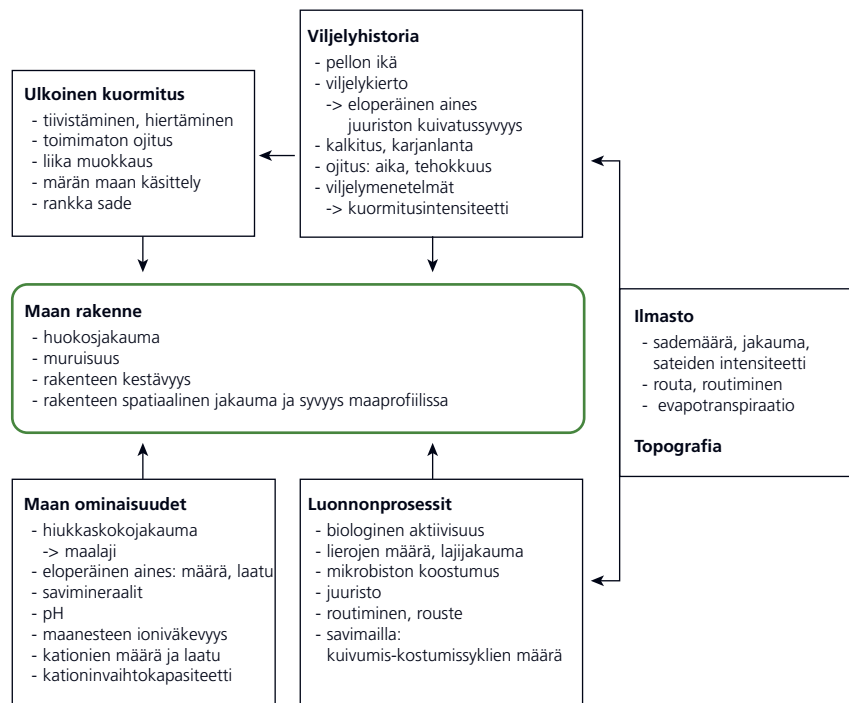
Kuva 2.17 Savi- ja hietamaan rakenne muokkauskerroksessa ja pohjamaassa. Musta alue on huokostoa ja vaalea kiintoainesta. (Ringrose-Voase ja Bullock 1984)

Yleensä maan rakenne on hierarkkinen systeemi, jossa yksittäiset hiukkaset (primääri-rakenne) muodostavat toistensa kanssa ensin pieniä yhteenliittymiä, mikromuruja, joista muodostuu seuraava rakennetaso (sekundäärirakenne), ja erikokoisista muruista (agregaatteista) syntyy lopulta mururakenne. Murujen sisällä huokokset ovat pienempi ja mutkaisempia kuin niiden välissä. Karkeissa ja eloperäisissä maissa murujen muodostus on löyhää, mutta saveksen määrän kasvaessa murujen muodostus voimistuu. Savi- ja hiesumaissa kestävien murujen muodostuminen on välttämätöntä, jotta niitä voidaan viljellä. Savi- ja hietamaan rakenne on esitetty kuvassa 2.17.

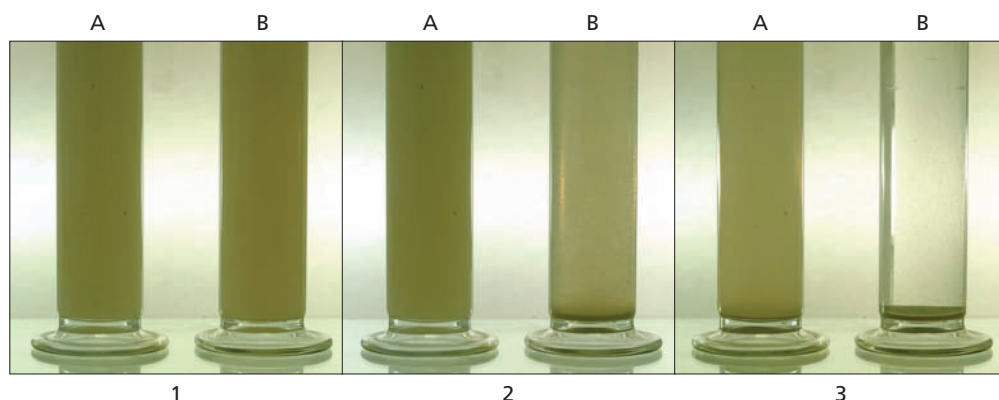
Maan rakenteeseen vaikuttavat sekä maan ominaisuudet että ulkoiset tekijät (kuva 2.18). Maan rakenne ei ole stabiili vaan muuttuu erilaisten luonnonprosessien ja viljelytoimenpiteiden vaikutuksesta. Maaprofilin pintaosassa rakenne on yleensä erilainen kuin syvemmällä, koska rakenteeseen vaikuttavat toiminnot ovat intensiivisempiä pinnassa kuin syvällä profilissa.

Kestävän mururakenteen muodostuminen

Kestävän mururakenteen muodostuminen on monivaiheinen kemiallisista, fysikaalisista ja biologisista ilmiöistä koostuva prosessi. Saves vaikuttaa merkittävästi maan rakenteeseen pienen kokonsa ja suuren ominaispinta-alansa vuoksi. Kivennäishiukkasten taipumus ryhmittyä kestäviksi muruiksi kasvaa, kun maan savespitoisuus ylittää 15 painoprosenttia. Kolloidiset hiukkaset, saves, etenkin hienosaves (hiukkaskoko alle 0,0002 mm), ja osa humusaineista, ovat sidosaineina murujen muodostumisessa. Hiukkaskooltaan savesta suuremmat hiesu- ja hietalajitteet vaikuttavat maan rakenteeseen lähinnä hiukkasten geometrisen järjestäytymisen kautta.



Kuva 2.18 Viljelymaan rakenteeseen vaikuttavat tekijät.



Kuva 2.19 Murujen muodostuminen ajan (1–3) funktiona hiukkasten törmäillessä toisiinsa. Koeputkessa A liuoksen ioniväkevyys on laimea ja koeputken B on lisätty murujen muodostumista edistävää alumiinihydroksipolymeeriä, mikä nopeutti hiukkasten liimaantumista löyhiksi muruiksi eli flokeiksi, jotka painuivat koeputken pohjaan. (Kuva Risto T. Seppälä)

Murujen muodostuminen alkaa, kun vedessä olevat primäärihiukkaset ja mikromurut tarttuvat Brownin lämpöliikkeen vaikutuksesta toisiinsa muodostaen löyhiä yhteenliittymiä eli flokkeja (koagulaatio, flokkulaatio) (kuva 2.19, koeputki A).

Flokkirakenteen lujittuminen edellyttää yhteenliittymien kuivumista, jolloin niiden ympärillä olevan vesikalvon pintajännitys puristaa hiukkaset lähelle toisiaan. Jos maa kuivuu epätasaisesti esim. kasvien vedenotosta tai roudasta johtuen, voi syntyä suoraan muruja. Jos maa kuivuu tasaisesti veden haihtuessa pinnasta, syntyy suuria massiivisia kokkareita. Samanlaisia kokkareita syntyy, kun primäärihiukkaset ja mikromurut sedimentoitumisen jälkeen kuivuvat yhtenäiseksi massaksi. Molemmissa tapauksissa mekaaniset tekijät, kuten muokkaus, kosteusvaihtelut, juuret ja routa, voivat hajottaa massiivisen maan pienemmiksi kokkareiksi ja muruiksi.

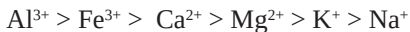
Hyvän rakenteen merkki on kestävät murut, jotka eivät hajoa helposti sateen tai muun ulkoisen kuormituksen vaikutuksesta. Murujen kestävyys on tärkeä ominaisuus maan pinnan liettymisen ja kuorettumisen sekä eroosion torjunnassa. Kestävien flokkien ja murujen syntymiseen vaikuttavat mm. maan kationikoostumus, kuivumis-kostumissyklit sekä mikrobiston ja kasvien toiminta. Yleensä murujen kestävyys paranee, jos murustumisen jälkeen on lepovaihe, jonka aikana niitä ei häiritä. Tällöin muodostunut rakenne saa aikaa hakeutua alemmalle energiatasolle, mikä vahvistaa hiukkasten välisiä sidoksia. Ajan myötä murujen pinnoille kertyy rakennetta lujittavia aineita kuten rauta- ja alumiinioksideja, piihappoa, kalkkisaostumia, humusta, mikrobien ja juurten erittämiä lima-aineita ja niiden muodostamaa rihmastoa. Nämä sementoitjat sitovat myös pienempiä muruja suuremmiksi.

Murut ovat erikokoisia. Mikromurut (halkaisija $< 0,25$ mm) ovat kestäviä ja ne ovat isompien murujen rakenneosia. Hyvärakenteisessa savimaassa on pääosin 1–10 mm:n makromuruja, jolloin maassa on murujen välisiä makrohuokosia. Suurimmat ”murut”, kokkareet, voivat olla kymmeniä senttimetrejä pitkiä pylviä, joita on savien pohjamaassa. Pyöreäkulmaisissa, muhevissa muruissa on paljon eloperäistä ainesta ja niitä syntyy, kun maan biologinen toiminta on vilkasta. Mekaanisesti syntyneet murut, fragmentit, ovat särmikkäitä. Niitä syntyy mm. maan kosteusvaihteluiden vaikutuksesta. Murut voivat olla myös levymäisiä. Pitkään veden vaivaaman saven pohjamaa on usein muodostunut pienistä, litteistä muruista. Hiesun pohjamaassa taas voi olla suuria levymäisiä muruja. Myös muokkaamattoman karkean maan murut voivat olla levymäisiä, jolloin rakenne on tiivis mutta kantava.

Hiukkasten väliset kemialliset sidokset

Saveshiukkaset ovat varautuneet negatiivisesti ja ne vetävät puoleensa positiivisesti varautuneita kationeja, joista järjestäytyy hiukkasten ympärille kaksoiskerros. Kationien ympäröimät saveshiukkaset hylkivät toisiaan, koska niillä on ulospäin samanmerkkinen varaus. Kun hiukkaset joutuvat hyvin lähelle toisiaan, kationikehät voivat yhdistyä, jolloin muodostuu kationisilta kahden negatiivisesti varatun saveshiukkasen välille. Kationi ja hiukkanen sitoutuvat toisiinsa van der Waals-, vety- ja kovalenttisin sidoksin. Jotta kationisiltoja muodostuu, hiukkasten välin tulee olla pienempi kuin 2 nm (10^{-9} m). Flokkien muodostuminen tapahtuu helpommin, jos maahiukkasia ympäröivä kationikehä on tiivis, jolloin hiukkaset pääsevät lähemmäksi toisiaan. Samalla maahiukkasia ympäröivä vesikalvo on ohut, mikä myös lisää niiden mahdollisuutta koskettaa toisiinsa.

Maanesteen korkea suolapitoisuus ohentaa hiukkasten sitomaa vesikehää ja työntää kationeja lähemmäksi hiukkaspintoja, mikä parantaa hiukkasten mahdollisuutta törmätä ja takertua toisiinsa (kuva 2.19, koeputki B). Tähän vaikuttaa myös se, kuinka helposti kationit dissosioituvat hiukkasia ympäröivään veteen. Eri varauksen omaavilla kationeilla on erilainen hydrataatiotaipumus. Hiukkasia ympäröivien kationien varaustiheyden nostaminen vähentää dissosiaatiota. Kationien laatu vaikuttaa flokkiutumiseen sitä enemmän mitä laimeampaa maaneste on. Kationien sitoutumislujuus ja koagulointikyky lisääntyvät varauksen kasvaessa:



Happamissa maissa esiintyvät rauta (Fe^{3+}) ja alumiini (Al^{3+}) ovat tehokkaita mururakenteen muodostajia. Rautahydroksidi kiteytyy helposti ja se lujittaaakin rakennetta pääasiassa muodostamalla murujen ja huokosten pinnoille ruostetta. Esimerkiksi happamien urpasavien halkeamien pinnat ovat usein ruosteesta punaiset. Kalsium (Ca^{2+}), joka on yleisin kationi maissamme, sekä magnesium (Mg^{2+}) pidättyvät kolmiarvoisia kationeja heikommin maahan. Kalsium on kuitenkin hyvä perusta mururakenteen muodostumiselle. Magnesium on kalsiumia pienempi ja hydratoituu sitä voimakkaammin, mutta näiden kationien ero maan rakenteen muodostumisessa tulee esille vain, kun maassa on epätavallisen paljon magnesiumia. Ongelmallisin kationi on natrium (Na^{+}), joka on pienikokoinen ja pidättää ympärilleen paksun vesivaipan. Kun maan natriumpitoisuus kasvaa yli 5 %:n kationinvaihtokapasiteetista, murujen dispergoituminen lisääntyy selvästi. Natrium on suuri ongelma suolamaissa. Suomessa se voi heikentää maan rakennetta, jos maata kastellaan merivedellä.

Kivennäishiukkasten ja humuksen välille syntyy kemiallisia sidoksia, kun humus biologisten prosessien aikana sekoittuu mineraaliainekseen. Osa sidoksista muodostuu kationisiltojen välityksellä. Savespitoisuuden kasvaessa maan eloperäisen aineksen määrä yleensä kasvaa. Tiiviisiin savipaketteihin sitoutuminen suojaa humusta hajoamiselta ja viljelytoimenpiteiden vaikutuksilta.

Maan kuivuminen ja kastuminen

Useimmat maalajit kutistuvat kuivuessaan ja paisuvat kostuessaan. Kun maan kivennäisaineksesta on savesta vähemmän kuin 10–20 painoprosenttia, kosteusvaihtelujen merkitys rakenteen muodostajana on merkityksetön. Toistuvat kuivumis-kostumissyklit muokkaavat savimaan rakennetta vähitellen pitkällä aikavälillä. Eniten kosteusvaihtelut vaikuttavat rakenteen muodostumiseen, kun maassa on paljon eloperäistä liejua tai hienoa savesta. Kestävien murujen synty edellyttää maan kuivumista vähintään lakastumisrajalle, jolloin hiukkasia puristaa toisiinsa 1,5 MPa:n kutistumisaine.

Kun maa kuivuu tasaisesti, siihen syntyy massiivinen rakenne. Kun kuivuminen on epätasaista, maa halkeilee ja siihen muodostuu kulmikkaita muruja, prisma- ja pylväsmäisiä

kokkareita tai levymäisiä rakenteita. Halkeama syntyy, kun savimaa antaa periksi kohdist, joissa sen vetolujuus on heikoin eli missä se on ympäristöönsä kosteampaa. Tästä syystä halkeamat ovat usein kylvörivien välissä tai ajourien kohdalla. Halkeamat ovat yleensä pystysuoria, mutta niiden pinnoilta voi maahan muodostua myös vaakatasoisia halkeamia. Kevätviljaa viljeltäessä savimaan halkeamat ovat pohjoismaisissa kenttäkokeissa ulottuneet 30–70 cm:n ja nurmea viljeltäessä 50–80 cm:n syvyydelle maanpinnasta. Halkeama painuu savimaan kostuessa vähitellen kiinni, mutta sen kohdalle jää ”heikko kohta”, johon muodostuu halkeama aikaisempaa herkemmin maan kuivuessa uudelleen. Liejusavien tilavuus ei palaudu kokonaan maan kostuessa ja niissä halkeamat ovat pysyviä. Avoimet halkeamat johtavat pellon pinnalle kerääntyvän veden nopeasti syvemmälle ja jopa suoraan salaojaan ns. oikovirtauksena. Halkeamat ovat myös tärkeitä juurten kasvureittejä, sillä on laskettu, että monesti noin puolet kasvin juurista kasvaa pohjamaassa halkeamissa.

Kuivan maan hidas, epätasainen kostuminen voi murustaa maan, jossa on piilevä mururakenne. Hyvin nopea kastuminen voi kuitenkin rikkoa murut, kun veden imeytyessä murun pinnalta keskustaan murun sisällä olevan ilman paine nousee niin suureksi, että muru hajoaa. Ne voivat hajota myös, kun sadeepisarat osuvat paljaaseen maan pintaan, kun sade kastelee vasta muokatun maan tuoreet leikkauspinnat, kun vesi liuottaa rakennetta lujittavia iskostumia ja savelhiukkasia muruista tai renkaat hiertävät märkiä muruja. Murujen hajoaminen aiheuttaa liettymistä, joka edistää eroosiota ja tukkii maan pinnan huokosia haitaten veden imeytymistä ja maan ilmanvaihtoa. Kuivuessaan liettynyt maa voi kuorettua, kun siihen syntyy massiivinen, koherentti rakenne. Murujen huono kestävyys kasvat-
taa maan liettymis- ja kuorettumisriskiä. Etenkin hiesumaat liettyvät ja kuorettuvat erittäin herkästi, mutta myös hietamaa voi kuorettua niin, että se haittaa kasvien taimettumista.

Routa ja routiminen

Kaikki maalajit jäätyvät eli routaantuvat Suomessa. Jäätymisen teoria esitetään luvussa 3. Tässä käsitellään roudan maan rakenteeseen aiheuttamia muutoksia, joita syntyy maan routien. Vain osa maalajeista routii, jolloin maa kohoaa tai sen mururakenne muuttuu jäätyamisen seurauksena. Routiminen johtuu maaveden kapillaarisesta noususta routarajalla kehittyvään puhtaaseen jääkerrokseen tai jääkerrokseen. Jään ja veden rajapinnassa on määritetty – 250 kPa:n imu, joka vetää vettä jäätymiskeskukseen. Maalajia pidetään routivana, kun sen veden kapillaarinen nousukorkeus on metri tai enemmän.

Routa ei muuta karkeiden tai multa- ja turvemaiden rakennetta. Hienohieta- ja hiue-
maissa muodostuu paksuja vaakasuoria jääkerroksia, kun nopea kapillaarinen veden nousu kuljettaa jäätymiskerrokseen jatkuvasti vettä. Paksuuntuva jääkerros nostaa yläpuolista maata ylöspäin jopa useita kymmeniä senttimetrejä. Muodostunut rakenne on heikko ja se häviää jään sulaessa, jolloin maahan vapautuu nopeasti suuri määrä vettä. Maan pinnan nousu vaurioittaa nurmien ja syysviljojen juuristoa aiheuttaen talvehtimisvaurioita.

Kun saveksen määrä maassa lisääntyy, veden kapillaarinen liike on hitaampaa ja jääty-
miskerrokset ohuempia kuin karkeissa maissa. Savimaiden rakennetta routa muokkaa myönteisesti rikkomalla kokkareita pienemmiksi muruiksi. Veden siirtyessä jääty-
miskeskukseen, savimaa keskuksen ympärillä kuivuu ja kutistuessaan se halkeilee. Erisuuntaiset jääty-
miskerrokset jakavat pintamaan alapuolisen maan monisärmäisiksi suuriksi muruiksi, kokkareiksi. Roudan rakennevaikutus on suurin pintamaassa, jota useat peräkkäiset jääty-
mis-sulamissyklit murustavat tehokkaasti. Jäykän muokatun, savimaan pinnassa voi talven jäljiltä olla useita senttimetrejä paksu pääosin 1–3 mm:n muruiksi hajonnut kerros. Pohja-
maan rakenteen muodostumisessa roudan merkitys on lyhyellä aikavälillä pieni, koska se jäätyy ja sulaa vain kerran talven aikana. Mururakenne karkeutuu tai häviää herkästi veden vaikutuksesta. Samoin syvemmän kerroksen roudan aikaansaama rakenne häviää, jos maa on sullettuaan pitkään märkänä, jolloin halkeamat umpeutuvat kostuvan maan paisuessa.

Eloperäinen aines ja biologiset muokkaajat

Osa maan eloperäisestä aineksesta toimii sidosaineena maan murujen muodostumisessa, mutta eloperäinen aines myös lujittaa mururakennetta sen muodostumisen jälkeen. Sen merkitys murujen muodostuksessa on suuri karkeissa maissa, joissa on vähän savesta. Etenkin hiesumaissa, jotka eivät muodosta muruja saven tapaan, mutta mururakenne on oleellinen pienen hiukkaskoon vuoksi, eloperäisen aineksen merkitys mururakenteen muodostuksessa on keskeinen. Myös hietamaissa löyhä murujen muodostus perustuu pitkälti eloperäiseen ainekseen. Eloperäinen aines parantaa kivennäismaiden rakenteen kestävyyttä lisäämällä murujen lujuutta ja rakenteen joustavuutta. Se myös suojaaa maan pintarakennetta toimiessaan katteena. Osa eloperäisestä aineksesta lisää murujen hydrofobisuutta eli veden hylkivyyttä, mikä parantaa niiden vedenkestävyyttä.

Eloperäisestä aineksesta peräisin olevat muruja muodostavat ja lujittavat tekijät voidaan ryhmitellä niiden vaikutusajan suhteen. Juurten ja mikrobien lima-aineet, jotka lujittavat mikromuruja, ovat alttiita mikrobien hajotukselle ja ne säilyvät maassa viikoista kuu-kausiin. Juuret ja sienirihmat, jotka sitovat makromuruja, vaikuttavat maassa lima-aineita pidempään. Maatuneella humuksella on pitkäaikaisin vaikutus maan rakenteeseen muodostaessaan mm. kivennäisaineksen ja moniarvoisten kationien kanssa organo-minerologisia -sidoksia. Humus on sekä murujen rakenneosa että rakenteen lujittaja.

Eloperäistä ainesta kertyy maahan kasvien, mikrobien ja eläinten jäänteistä. Myös viljelykäytännöt, kuten muokkaus ja viljelykierto, vaikuttavat maan eloperäiseen ainekseen. Säännöllinen karjanlannan käyttö lisää maan eloperäisen aineksen määrää ja mikrobiaktiivisuutta. Karkeisiin maihin voidaan sekoittaa turvetta eloperäisen aineksen määrän lisäämiseksi. Pitkälle maatunut turve toimii humuksen tavoin, mutta sen maan rakennevaikutus ei ole ollut yhtä tehokas kuin tuoreena lisätyn, maamikrobiston hajottaman aineksen. Rakenteen kannalta paras ratkaisu kasvattaa humusvarantoa on lisätä maahan tuoretta kasvinjätettä tai karjanlantaa, mikä vilkastuttaa maan mikrobitoimintaa.

Kasvusto ja juuristo

Rehevä, syväjuurinen kasvusto muokkaa ja ylläpitää maan rakennetta. Versosta ja juurista jää maahan eloperäistä ainesta, jota maan mikrobit ja eläimet käyttävät ravintonaan. Kasvusto myös suojaaa maan pintarakennetta sateilta. Noin puolet kasvien yhteyttämistuotteista kulkeutuu juuriin. Juuret muokkaavat savimaan rakennetta ottamalla vettä, jolloin maa kuivuessaan halkeilee ja murustuu. Tehokkainta murustuminen on monivuotisten nurmien ruokamultakerroksessa.

Juuret voivat myös tunkeutua maahan kasvupaineen avulla, jolloin niiden hajottua maahan jää sylinterimäisiä juurikanavia (ks. kuva 2.17). Juuri laajentaa halkaisijaansa pienempää huokosta muodostamalla säteen suuntaista kasvupainetta, joka on 0,5–0,9 MPa. Se työntyy maahan alaspäin suuntautuneen kasvupaineen avulla, joka voi olla yli 1 MPa. Juurten kyvyssä tunkeutua maahan on todettu eroja kasvilajien ja jopa eri lajikkeiden välillä. Paksut juuret pystyvät kasvamaan muokkauskerroksen ja jankon rajapinnasta paremmin tiiviiseen maahan kuin ohuet juuret.

Hyvärakenteisessa savimaassa on vähintään 300 juurikanavaa neliödesimetrillä. Suomalaisissa savimaissa on ollut 40 cm:n syvyydessä 600–900 ja 55 cm:ssä 500–600 juurikanavaa neliödesimetrillä. Vaikka juurikanavien lukumäärä on suuri, niiden tilavuusosuus maan huokostosta on pieni. Juurikanavat vaikuttavat kuitenkin merkittävästi määrän savimaan ilmanvaihtoon ja veden liikkumiseen, koska ne eivät umpeudu maan paisuessa.

Juurten erittämät lima-aineet vahvistavat mururakennetta ja vilkastuttavat mikrobitoimintaa. Tiheä juurihuovasto ja juurikarvat myös sitovat pienempiä muruja toisiinsa, jolloin muodostuu makromuruja. Samalla maan rakenne lujittuu mekaanisesti. Nurmen juuriston muodostama tukiverkko parantaa esimerkiksi turvemaiden kantavuutta merkittävästi.

Maan mikrobisto ja eläimet

Maan eloperäisestä aineksesta on noin 5 % eliöitä, josta 80 % on mikrobeita, 12 % lieroja ja 8 % muuta makro-, meso- ja mikroeläimistöä. Mikrobisto ja suurin osa maaperäeläimistä elää maaprofiilin yläosassa noin 0–30 cm:n kerroksessa. Suurimmat maaperäeläimet, kuten lierot, kaivautuvat kuitenkin jopa yli metrin syvyyteen. Eliöstön lukumäärän ja lajiston vaihtelu paikan ja ajan suhteen lohkon sisällä on usein erittäin suuri. Olosuhteet ja viljely säätelevät eliöstön määrää ja lajistoa. Biologinen toiminta on vilkasta, kun maassa on jatkuvasti tarjolla eliöiden ravinnoksi sopivaa eloperäistä ainesta. Rehevä kasvusto, josta jää paljon kasvustojätettä maahan, auttaa vilkkaan eliötoiminnan ylläpitoa maassa. Eliöstö viihtyy kosteassa maassa, mutta märässä maassa niitä uhkaa hapen puute. Maan ollessa kuivaa eliöstö odottaa passiivisena, mikrobisto kestonmuotoina ja eläimet lepotilassa, maan kostumista. Myös maan lämpötila säätelee eliöstön aktiivisuutta. Se on korkeimmillaan lämpötilan ollessa lähellä 20 °C. Eliöstö viihtyy parhaiten maassa, jonka pH on lähellä neutraalia.

Maan mikrobisto on sekä lukumäärältään että lajistoltaan erittäin suuri. Tärkeimmät mikrobiston ryhmät ovat bakteerit, sienet ja alkueläimet, joiden lisäksi maassa on viruksia ja leviä (taulukko 2.9). Maaperän pieneliöstö osallistuu mururakenteen muodostamiseen sitomalla humus- ja kivennäishiukkasia bakteerien ja sienien erittämällä lima-aineilla (pääasiassa polysakkarideja) vetysidoksin ja kationisilloin. Lisäksi sienirihmat sitovat yksittäisiä hiukkasia ja muruja mekaanisesti. Myös mikrobiston hajotustuotteena syntynyt humus on tärkeä aine maan rakenteen muodostumisen ja lujittamisen kannalta. Mikrobiston merkitys on suuri vähän savesta sisältävien kivennäismaiden rakenteen muodostumisessa. Reginan (2015) mukaan maaperän mikrobiprosessien tuotteena syntyy kasvihuonekaasuja, joista viljelymaissa tärkeimmät ovat hiilidioksidi ja dityppioksidia. Hiilidioksidi syntyy kaikessa orgaanisen aineksen hajotuksessa. Dityppioksidia syntyy pääasiassa denitrifikaatiossa, jota tapahtuu maan happipitoisuuden ollessa alhainen.

Myös maaperäeläimiä on moninainen joukko (taulukko 2.9). Niiden merkitys maaperässä vaihtelee. Osa eläimistä syö eläviä kasveja, mikä haittaa kasvuston kasvua. Suurin osa osallistuu kuitenkin maaperän eloperäisen aineksen hajotukseen. Pienimmät eläimet syövät bakteereja ja sieniä säädellen samalla eloperäisen aineksen hajotusta. Myös kuolleita kasvin osia syövät eläimet saavat ilmeisesti merkittävän osan ravinnostaan kasvustojätettä

Taulukko 2.9 Maaperän mikrobistoa ja eläimiä sekä niiden vaikutus maan rakenteen muodostumiseen. Eliöstön hajottaessa eloperäistä ainesta ravinteita vapautuu kasveille käyttökelpoiseen muotoon. (Palojärvi ja Nuutinen 2002)

Ryhmä	Koko, mm	Merkitys
Virukset	0,00002–0,0003	Kasvitauteja aiheuttavat heikentävät kasvien kasvua
Bakteerit	0,0002–0,005	Erittävät mururakennetta ylläpitäviä lima-aineita Hajottavat eloperäistä ainesta
Sienirihmat	0,001–0,020	Erittävät lima-aineita, mykorritsasienet mm. glomaliinia Hajottavat eloperäistä ainesta Sitovat muruja hiukkasia rihmastollaan
Alkueläimet	0,002–0,1	Saalistavat bakteereja rajoittaen niiden määrää
Levät	0,001–0,1	Maan pinnassa, osoitus veden vaivaamasta maasta
Sukkulamadot	< 0,1	Mm. syövät bakteereja, ankeroiset syövät kasveja
Niveljalkaiset, mm. punkit ja hyppyhäntäiset	0,1–2	Syövät sienirihmastoa
Änkyrimadot	10–20	Syövät bakteereja ja kuollutta eloperäistä ainesta
Lierot	> 20	Tekevät lierokäytäviä, muodostavat muruja, hajottavat eloperäistä ainesta

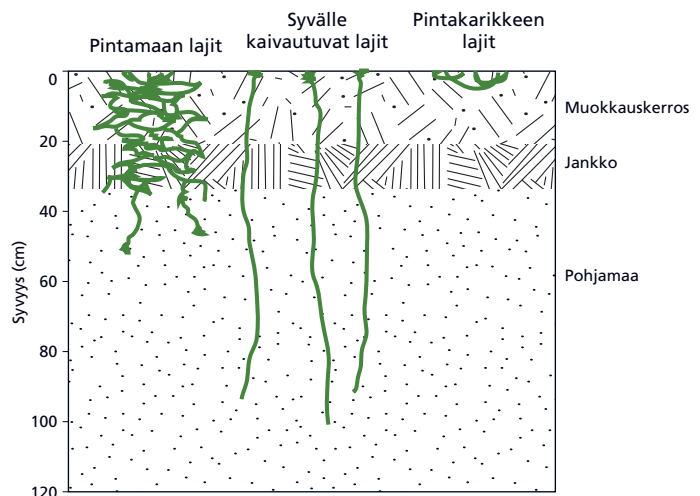
peittävistä mikrobeista. Eloperäisen aineksen hajotusta edistää se, että monet maaperäeläimet työstävät kuollutta kasvimateriaalia pienemmiksi osiksi lisäten hajotukselle altista pinta-alaa. Monet maaperäeläimet, kuten lierot, syövät muun materiaalin ohessa kivennäisainesta, jolloin eloperäinen ja kivennäisaines sekoittuvat niiden ulosteissa tehokkaasti. Ulostee tarjoavat usein myös hyvän paikan eloperäistä ainesta hajottaville mikrobeille.

Lierot ovat maan huokosrakenteen kannalta erittäin tärkeitä eläimiä. Niillä on kyky kaivautua maahan jopa metrin syvyyteen joko työntämällä maa-ainesta tai syömällä sitä. Suomessa on noin 15 lierolajia, joista viisi esiintyy yleisesti viljelyssä maassa. Lajit voidaan jakaa kolmeen ryhmään elintapojensa ja maaperävaikutustensa perusteella (kuva 2.20). Pintakarikkeen lajit, ns. epigeeniset lierot, ovat tummia ja ne eivät kaivaudu syvälle kivennäismaassa vaan elävät aivan maan pintaosissa. Ryhmän yleisin laji on onkiliero (*Lumbricus rubellus*). Pintamaan lajit, ns. endogeeniset lierot, ovat vaaleita ja ne kaivautuvat eri suuntiin maassa jopa yli puolen metrin syvyyteen. Tähän ryhmään kuuluu Suomen peltosten yleisin lierolaji peltoliero (*Aporrectodea caliginosa* Sav.). Syvälle kaivautuvia lierolajeja on Suomessa yksi: kasteliero (*Lumbricus terrestris* L.), joka on kookas ja etupäästään tumma. Se elää pystysuorassa käytävässä, joka voi ulottua yli metrin syvyyteen.

Lierokäytävien halkaisijat vaihtelevat välillä 2–11 mm. Ne ovat jatkuvia ja seinämitään kestäviä, mistä osoituksen on se, että lierokäytävät eivät paisu kiinni maan kostuessa kuten halkeamat. Asumattomat lierokäytävät voivat säilyä toimivina makrohuokosina kymmeniä vuosia, jos niitä ei katkaista esimerkiksi muokkaamalla. Suomalaisissa hyvärakenteisissa savimaissa on ruokamultakerroksen alapuolella vähintään yksi sylinterinmuotoinen lierokäytävä (halkaisijaltaan ≥ 2 mm) neliödesimetrillä. Sekä savisessa että karkeassa pohjamaassa voi olla jopa 6–9 lierokäytävää neliödesimetrillä. Lierokäytävien osuus pohjamaan huokostosta on pieni, yleensä alle $0,003 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Tästä huolimatta niiden merkitys tehokkaina veden kulkureitteinä ja juurten kasvuyälinä on kuitenkin suuri. Joissakin tapauksissa lierokäytävien hyvä vedenjohtavuus voi olla haitallista. Pintaan levitetty torjunta-aineet ja lannoitteet voivat kulkeutua niitä pitkin ns. oikovirtauksena nopeasti salaojiin tai pohjaveteen.

Viljelyn ja maan rakenteen välinen vuorovaikutus

Hyvä maan rakenne on taloudellisesti ja ympäristöllisesti kestävä viljelyn perusta, mutta vastavuoroisesti viljely vaikuttaa rakenteen muodostumiseen ja ylläpitoon (ks. kuvat 2.18 ja 2.21). Rakenne vaikuttaa kaikkiin maan omaisuuksiin, jotka ovat keskeisiä maan vil-



Kuva 2.20

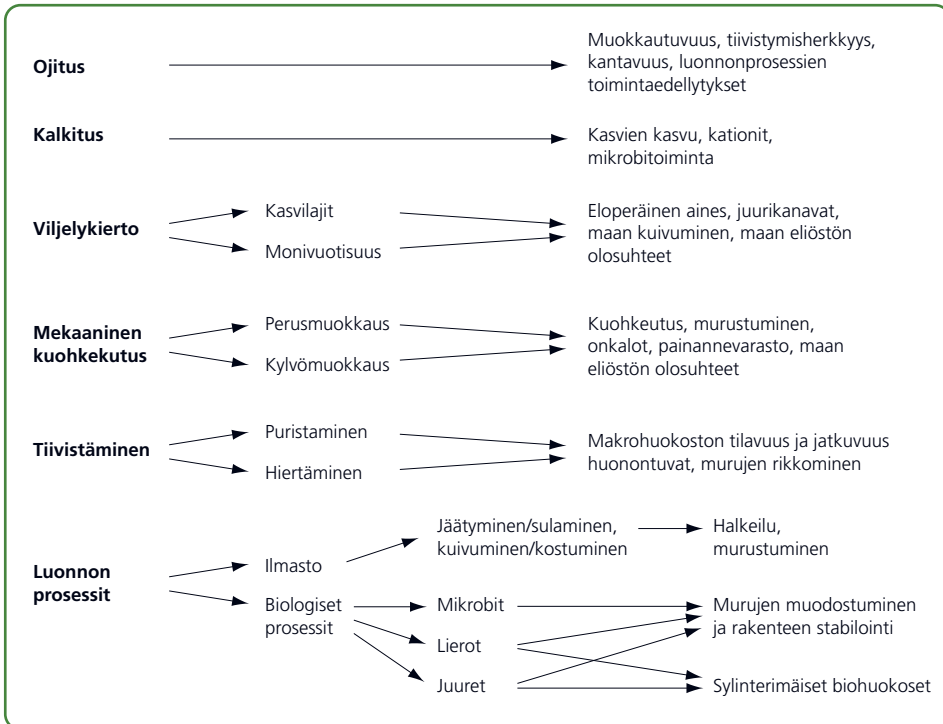
Eri lierolajien vaikutus maan makrohuokostoon (Nuutinen 2000).

jeltävyyden, sadontuoton ja peltoviljelyn ympäristökuormituksen kannalta. Maan rakenne on hyvä, kun vesi imeytyy pinnasta syvemmälle nopeasti, mururakenne on vettä kestävä ja kasvit kasvavat sekä kuivina että sateisina aikoina hyvin.

Viljely voi sekä edistää hyvän rakenteen muodostumista että huonontaa rakennetta. Sen vaikutukset maan rakenteeseen voidaan jakaa välittömiin sekä lyhyt- ja pitkäaikaisiin sen mukaan, kuinka nopeasti eri toimenpiteiden vaikutus maan ominaisuuksissa ilmenee tai kuinka kauan vaikutus kestää. Useiden toimenpiteiden vaikutus muodostuu hitaasti, monen yhdysvaikutuksen summana. Näitä ovat esimerkiksi perustoimenpiteet ojitus ja kalkitus. Myös muokkauksesta luopumisen jälkeen maan rakenne hakeutuu uuteen tilaan vähitellen useita vuosia kestävänsä ns. siirtymäkauden aikana. Peltoliikenteen aiheuttama tiivistyminen on esimerkki nopeasta maan rakenteen muutoksesta. Tiivistymisen vaikutukset maassa voivat kuitenkin olla hyvin pitkäaikaisia. Suomalaisessa savimaassa pohjamaan tiivistymä on säilynyt mitattavana 20 vuotta peltoajon aiheuttaman tiivistymisen jälkeen.

Ojitus

Maan kuivuminen on etenkin savimaissa muru- ja huokosrakenteen muodostumisen perusedellytys. Viljelymaiden maannostumista ja maannoksia tutkittaessa on todettu, että sala-ojitus on vaikuttanut ratkaisevasti suomalaisten savimaiden kehitykseen kuivattaessaan maata syvemmältä kuin se luonnontilaisessa savimaassa olisi todennäköisesti tapahtunut eli noin metrin syvyyteen. Jäykkiin savimaihin on muodostunut prismamainen rakenne kuivumisen ja siitä seuranneen kutistumisen myötä.



Kuva 2.21 Viljelyssä tehtyjen valintojen vaikutus rakenteen muodostumiseen ja ylläpitoon. Kuvassa 2.18 on esitetty muut maan rakenteen muodostumiseen vaikuttavat tekijät.

Ojituksen on todettu myös vaikuttavan kastelierojen esiintymiseen savimaassa. Salaojan päällä ja läheisyydessä kastelieroja on ollut enemmän kuin kahden salaojan puolivälissä. Tarkkaa syytä tähän ei tiedetä, mutta todennäköisesti pohjaveden pinnan pysyminen alhaalla on yksi kastelierojen viihtyvyyttä lisäävä tekijä. Muiden lierolajien esiintymiseen salaojituksella ei ole ollut vastaavaa vaikutusta. Muutamilla savimailla on tutkittu myös maan rakennetta salaojan kohdalla ja etäällä siitä. Makrohuokostossa ei ollut selviä eroja eri etäisyyksillä ojasta mitattuna maan pinnasta puolen metrin syvyyteen.

Kalkitus

Suomen maaperä on luonnostaan hapan. Kalkitus vähentää happamuutta ja muuttaa myös maan kationikoostumusta lisäämällä kaksiarvoisen kalsiumin pitoisuutta (ks. kohta 4.2 - Maan happamuus). Kalkitus auttaa myös välillisesti maan rakenteen ylläpitoa. Kasvien kasvuedellytykset ja maan kannalta hyödyllisten mikrobien ja lierojen elinolot paranevat pH:n noustessa. Kun maata kalkitaan niin, että maanesteessä on ylimäärä kalsiumsuoloja, osa niistä saostuu kalsiumkarbonaattina. Se lujittaa makroaggregaattien rakennetta mm. hiukkasten välisissä kosketuskohdissa.

Hyvin happamissa kivennäismaissa ($\text{pH} < 5$) on alumiinikationeja (Al^{3+}) vaihtuvana, mikä stabiloi tehokkaasti maan rakennetta. Maat eivät kuitenkaan sovi viljelyyn, koska vaihtuva alumiini on kasveille myrkyllistä. Kalkitus voi huonontaa aluksi mm. happamien urpasavien (murusavet) mururakennetta. Yleensä kasvuston hyvä kasvu on kuitenkin tätä tärkeämpi tekijä.

Muokkaus

Maan mekaaninen muokkaus luo makrohuokosia ja rikkoo kokkareita pienemmiksi muruiksi. Samalla se kuitenkin rikkoo maassa ennestään olevia huokosia, sekoittaa kivennäis- ja eloperäistä ainesta ja muuttaa eliöstön elinolosuhteita. Muokattaessa maan pintarakennetta suojaavan kasvipeitteen määrä vähenee ja maa voi myös tiivistyä muokkaussyvyyden alapuolelta (muokkausantura). Voimakas muokkaus voi hetkellisesti tuottaa halutun rakenteen. Se voi olla ratkaisevan tärkeä, kuten kylvömuokkauksessa muodostettu kylvöalusta ja haihtumissuoja. Jäykällä savimailla muokattu rakenne säilyy paremmin kuin keveillä savilla ja hiesumailla. Esimerkiksi syyskynnössä syntynyt makrohuokosto häviää usein kevääseen mennessä hiesumaan lasehtiessa. Tällaisella maalla eloperäisen aineksen merkitys maan mururakenteen ylläpitäjänä on suuri. Muokattu rakenne lujittuu paremmin vettä kestäväksi, kun se ehtii kuivua ennen sadetta.

Liian voimakas muokkaus huonontaa maan rakennetta. Se kiihdyttää helposti hajoavan eloperäisen aineksen mikrobiologista hajotusta, mikä voi huonontaa mururakennetta merkittävästi. Jos mururakenne muokataan liian hienoksi, sade liettää maan pinnan helposti. Liettyntä kerros haittaa maan kaasujen vaihtoa ja lisää haihduntaa. Kuivuessaan liettyntä kovettuu kuorettumaksi, joka haittaa kasvien orastumista ja taimettumista. Savimaan halkeilu vähentää kuorettuman haittoja, mutta joskus kuorettuma joudutaan rikkomaan äestämällä 2–3 cm:n syvyyteen.

Kauan voimakkaasti muokatussa maassa saattaa esiintyä vain peltolieroja, jotka pysyvät syömään maahan sekoitettua kasvustojätettä ja elämään lepotilassa pitkiä kuivia ja kylmiä jaksoja. Kynnöstä luopuminen johtaa yleensä lierokannan ja lajiston kasvuun sekä lajiston muuttumiseen. Kasvustojätettä maan pinnalta syövien lierolajien (ks. kuva 2.20), etenkin onki- ja kastelierojen, osuus lierostosta kasvaa kevennettäessä muokkausta. Kasvu on hidasta, jos lierojen kannalta huonot olosuhteet maassa ovat aiheuttaneet lajin häviämisen ja kanta on alhainen pellon ympäristössä. Tällöin kannankasvun aloittaminen keinoitekoisesti lieroja istuttamalla voi auttaa maan rakenteen muodostumista kevyesti muo-

katussa maassa. Ennen istutusta pellon perusolosuhteiden, kuten ojituksen ja kalkituksen, on oltava kunnossa.

Muokkaus jaotellaan perus- ja kylvömuokkaukseen. Perusmuokkaus on yleensä syvempi kuin kylvömuokkaus (kuva 2.21). Kyntö on meillä yleisin perusmuokkausmenetelmä. Perusmuokkausmenetelmiä kynnön lisäksi ovat kultivointi, lautas- ja lapiorullaäestys. Syyskyntö ja maan routaantuminen palauttavat myös kevättöiden yhteydessä tiivistyneen savimaan rakenteen seuraavaan kevääseen mennessä. Pahasti peltoajon tiivistämän ja hiehtämän savimaan kyntökerroksessa rakenteen palautuminen voi kuitenkin viedä kolmesta viiteen vuotta, vaikka maa muokataan vuosittain.

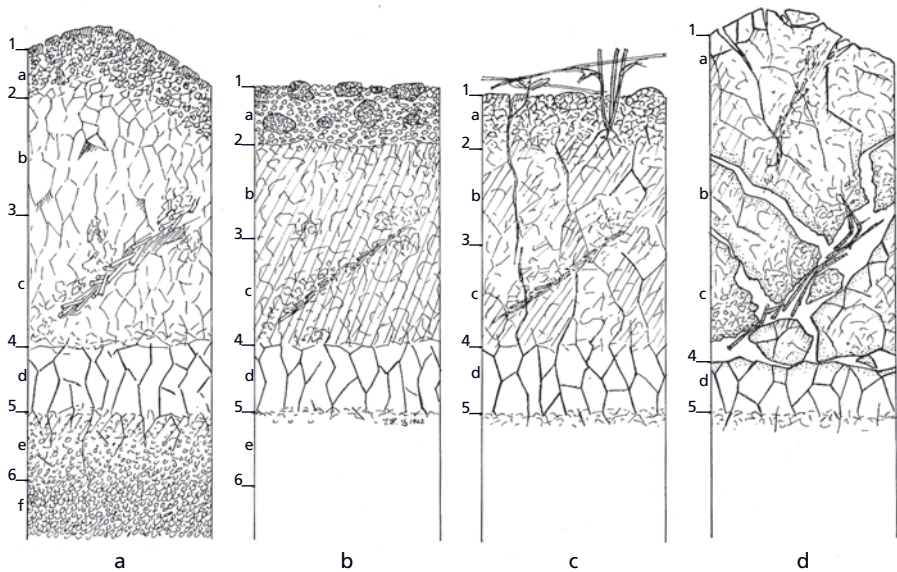
Perusmuokkauserroksen alapuolella oleva tiivistymä voi haitata veden ja kaasujen kulkeutumista sekä juurten kasvua pitkään. Karkeissa maissa syntyy toisinaan myös kyntökerroksen alapuolelle kovia iskostumia. Peltoviljelyssä onkin pitkään kehitetty menetelmiä, jotka muokkaavat tiivistynyttä jankkoa tai pohjamaata. Tavoitteena on huokoistaa tiivistynyt maa nopeasti. Menetelmiä on useita ja ne eroavat toisistaan mm. työsyvyyden ja maakerrosten sekoittumisen suhteen. Syväkyntö ja kynnön yhteydessä tehtävä jankkurointi muokkaavat maata 10–15 cm tavanomaista kyntösyvyyttä syvemmillä. Erillisten jankkurien työsyvyys on jopa metri. Kyntö sekoittaa maakerrokset, mutta muut menetelmät pyrkivät säilyttämään kerrosten järjestyksen. Osa jankkureista kuohkeuttaa vain osan maakerroksesta tehden siihen viiltoja tai kapeita uria. Tämän tarkoituksena on säilyttää maan kantavuus, joka on yleensä huono kuohkeutetussa kerroksessa.

Sekä kotimaiset että ulkomaiset tutkimustulokset syväkuohkeutuksesta ovat olleet vaihtelevia. Muokkauksen jälkivaikutusaika on ollut yleensä korkeintaan muutamia vuosia, mikä on liian lyhyt aika kestävän maan rakenteen hoidon kannalta. Suurimmat ongelmat kuohkeutuksen jälkeen ovat olleet, että maan kantavuus on ollut huono ja että se on tiivistynyt helposti uudelleen. Karkeiden maiden jankon iskostumien mekaaninen rikkominen voi olla ainoa keino parantaa niiden viljeltävyyttä. Toimenpiteistä riippumatta kuohkeutetun maan tiivistämistä tulee varoa. Maa ei kestä tiivistymättä samaa kuormitusta kuin se kesti ennen kuohkeutusta. Maan pitäminen kahdesta kolmeen vuotta viherkesantona antaa rakenteelle aikaa lujittua.

Kyntö ja sänkimuokkaus tekevät maan pinnan epätasaiseksi ja karkeaksi, mikä lisää sen painannevarastoa tasaiseen, sänkenä tai nurmena olevaan maan pintaan verrattuna (kuva 2.22). Tämä myöhentää pintavalunnan alkamista tasaiseen maahan verrattuna. Kyntö lisää pintamaan hetkellistä veden varastointikykyä, kun se muodostaa maahan suuria makrohuokosia vähentäen pintavalunnan riskiä.

Muokkauksen keventäminen muuttaa maan rakennetta etenkin entisessä muokkauserroksessa. Se lisää kasvustojätteen kertymistä pintamaahan, mikä nostaa sen eloperäisen aineksen pitoisuutta. Tämä todennäköisesti parantaa pintamaan murujen veden kestävyyttä, mikä vähentää liettymisen, eroosion ja kuorettumisen riskiä. Pintamaan rakennetta suojaa sateelta myös se, että muokkauksen keventäminen lisää maan pinnan kasvipeitteisyyttä.

Muokkauksen vähentämisellä voidaan saada hiiltä varastoitumaan maahan, jos kasvin-tähteiden hajotus hidastuu. Suorakylvöllä ja kevennetyllä muokkauksella on saatu kivil-
villa ilmastovyöhykkeillä lisättyä maaperän hiilivarastoa huomattavastikin, ainakin pin-
takerroksessa. Usein kuitenkin syvempien maakerrosten hiilipitoisuus pienenee, kun kas-
vintähdet jää pintaan. Pohjoisissa oloissa kuten Kanadassa ja Suomessa nämä menetel-
mät eivät ole osoittautuneet yhtä tehokkaiksi. Ilmeisesti maan jo valmiiksi korkea hiilipi-
toisuus rajoittaa hiilen sitoutumista, suhteellisen suuri maan kosteus edistää eloperäisen
aineksen hajotusta ja talven routa hajottaa maan muruja vapauttaen niihin kesän aikana
sitoutunutta hiiltä. (Regina 2015)



Kuva 2.22 Kynnetyn, jäykän savimaan rakenne muokkauskerroksessa eri vuodenaikoina. a. Syyskynnetty maa keväällä ennen kylvömuokkausta, pinnassa routamuruja (1–2) ja routarakennetta (2–4). b. Kylvömuokkaus (1–2) katkaisee veden kapillaarisen nousun maan pintaan. c. Sadonkorjuun jälkeen, sänkimaa. d. Perusmuokattu maa syyskynnön (1–4) jälkeen ennen talvea. (Andersson ja Håkansson 1966)

Viljelykierto

Maan mururakennetta ja makrohuokosverkostoa voidaan yrittää muuttaa valitsemalla viljelykiertoon kasveja, joilla on hyvin maahan tunkeutuva juuristo ja jotka kuivattavat maata syvältä. Viljelykasvien valinta vaikuttaa myös siihen, kuinka paljon maahan jää kasvusto-jätettä, kuinka pitkään maa on kasvipeitteinen ja kuinka usein maata muokataan.

Monivuotiset kasvit muokkaavat maan rakennetta yksivuotisia kasveja tehokkaammin, koska ne kasvattavat laajan juuriston. Syysviljojen juuristo on myös yleensä laajempi kuin kevätiljojen. Kevätviljoista kaura (*Avena sativa*) kuivattaa maata hyvin. Suomalaisessa kenttäkokeessa nurmi ja syysvehnä (*Triticum aestivum*) kuivattivat maata jo keväällä 60 cm:n syvyydeltä, mutta avokesanto ei kuivunut koko kasvukautena. Eri kasvien kyvystä tunkeutua tiiviiseen maahan ja pohjamaan juuristotiheydestä ei ole käytettävissä kattavaa selvitystä. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että sinimailasen (*Medicago sativa*) juuristo pystyy kasvamaan kovaan maahan ja se ulottuu syvälle. Heinäkasveista ruokonan-dan (*Festuca arundinacea*) paksuhkojen juurten on raportoitu tunkeutuneen hyvin tiiviiseen maahan. Ulkomailla on todettu, että sinimailasen ja lupiinin (*Lupinus* spp.) juuret ovat muodostaneet makrohuokosia läpäistessään hieta- ja hiuamaan kyntöanturan.

Peltoliikenne ja maan tiivistyminen

Maan ominaisuudet, ojitus, käytetyt koneet, töiden ajoitus, koneketjut ja viljelykierto vaikuttavat siihen, miten peltoliikenne tiivistää maata. Tiivistymisen todennäköisyys on suuri, kun märällä maalla ajetaan painavalla koneella, jonka rengaspaine on suuri. Mitä enemmän viljelyjärjestelmä sisältää ajokertoja, sitä suurempi on tiivistymisen riski. Ajokertoja voidaan vähentää yhdistämällä työvaiheita ja mitoittamalla veto- ja työkonet oikein. Kriit-

Tietoruutu 2.6

Maan murtolujuus

Maahan kohdistuva voima voidaan jakaa kahteen komponenttiin. Maan pintaan kohtisuoraan kohdistuva normaalivoima syntyy mm. koneen painosta. Murtumistason suuntainen voima eli leikkausvoima vaikuttaa maahan mm. vetävän pyörän muodostaessa vetovoimaa. Maan omat voimat vastustavat muutosta, mutta murtumista vastustavan voiman saavuttaessa huippuarvonsa maa antaa periksi eli murtuu. Samalla murtumista vastustava maan murtolujuus saavuttaa huippuarvonsa. Riippuen kuormittavan voiman suunnasta käytetään myös nimityksiä leikkauslujuus (leikkausvoima kuormittaa) ja puristuslujuus (normaalivoima kuormittaa). Leikkauslujuuden ja maan ominaisuuksien välinen yhteys esitetään Coulombin yhtälön avulla:

$$\tau = c + \sigma \tan \alpha \quad (T2.6)$$

τ = maan leikkauslujuus (kPa)

c = maan koheesio (kPa)

σ = leikkauspinnassa vaikuttava normaalijännitys (kPa)

α = maan sisäinen kitkakulma

Sisäinen kitka määräytyy toisiinsa tukeutuvien hiukkasten välisestä kitkasta. Se on sitä suurempi, mitä suurempia ja terävävärmäisempiä hiukkaset ovat ja mitä tiiviimmin ne ovat lomitait. Maan koheesioon vaikuttavat sekä molekyylisen väliset sidokset (molekyylinen koheesio) että hiukkasten välisten vesikalvojen pintajännitys (kapillaarinen eli filmikoheesio). Maan vesipitoisuuden suurenessa molekyylinen koheesio pienenee, kun maahiukkaset etääntyvät toisistaan maan paisuessa. Samalla filmikoheesio suurenee noin kieritysrajakosteuteen asti. Filmikoheesio muodostuu, kun maahiukkasten välisten vesikalvojen pintajännitys puristaa hiukkasia pitäen rakennetta koossa. Parhaiten filmikoheesiota havainnollistaa hienon hiekan koossa pysyminen: se on löyhää sekä kuivana että kyllästetyssä tilassa, mutta sopivassa kosteudessa se on kantavaa. Kun savimaa on veden kyllästämää, sen koheesio riippuu paisumisen voimakkuudesta ja hiukkasten välisten sidosten kestävydestä. Tällöin voimakkaasti paisuva aitosavi voi olla hyvinkin pehmeää jopa geelimäistä.

Vetokoneen pyörän ja maan välillä on oltava pito, jotta vetovoima muodostuu muotovalitteisesti. Pito häviää, kun maan murtolujuus ylittyy vedon yhteydessä eli pyörä luistaa niin paljon, että se alkaa kaivautua maahan. Kitka- ja koheesiomaalajit poikkeavat toisistaan siinä, miten pyörän kehällä vaikuttava momentti voidaan muuttaa vetovoimaksi. Kitkamaissa pito suurenee, kun pyörän kuormitusta lisätään. Koheesiomailla taas maan ja pyörän välisen kosketusalan suurentaminen parantaa pitoa. Peltomaat ovat kuitenkin harvoin pelkäs-tään kitka- tai koheesiomaita vaan niiden sekoituksia. Kertomalla Coulombin yhtälö pyörän ja maan välisellä kosketusallalla voidaan laskea teoreettinen maksimivetovoima:

$$F = cA + N \tan \alpha \quad (T2.7)$$

F = maksimivetovoima (N)

A = kosketusala (m²)

N = kosketusallalla vaikuttava normaalivoima (N)

Maan muokkauksen tavoitteena on muodostaa maahan huokostoa ja mururakennetta. Maa ei muokkaannu, jos koneiden aiheuttamat voimat eivät ole suurempia kuin maan murtolujuus. Koheesiomaiden murtuvuutta muokkauksen yhteydessä voidaan tarkastella konsistenss ominaisuuksien perusteella. Maan vesipitoisuus vaikuttaa merkittävästi savimaiden konsis-



tisiä työvaiheita ovat maan muokkaus ja lannan levitys aikaisin keväällä tai myöhään syksyllä ja myöhäinen sadonkorjuu.

Kun pellolla ajetaan koneilla, niistä välittyy maahan jännitys, joka voi rikkoa maan rakenteen. Tällöin maa usein tiivistyy, kun pystysuora jännitys puristaa ja vaakasuorat jännitykset leikkaavat ja hiertävät sitä. Vastaavia voimia välittyy maahan laiduntavien eläinten liikkeessä pellolla. Peltoliikenne ei ole ainoa maata tiivistävä tekijä. Muokattu maa tiivistyy myös sateen ja oman painonsa vaikutuksesta sekä sen kutistuessa kuivuessaan.

Maahan kohdistuva ulkoinen voima aiheuttaa sen rakenteessa muutoksia, kun voima on suurempi kuin sitä vastustava maan sisäinen murtolujuus (ks. tietoruutu 2.6). Maan murtolujuus kuvaa myös maan kantavuutta ja tiivistämisen kestävyyttä. Kun murtovastus on niin suuri, että koneen pyörät eivät painu maahan, maa on kantava.

Maan mekaanisia ominaisuuksia tarkasteltaessa maalajit luokitellaan kahteen luokkaan sen perusteella, mitkä voimat vaikuttavat niiden kuormituksenkestävyyteen. *Kitkamaalajien* lujuus syntyy hiukkasten välisestä kitkasta. Niihin kuuluvat karkeat maalajit, kuten moreenit, hiekka, sora. *Koheesiomaalajien* lujuus syntyy hiukkasten välisestä koheesiosta. Niihin kuuluvat hienojakoiset maalajit savi ja hiesu sekä eloperäiset maat turve ja lieju.

Maa kestää tiivistämistä sitä paremmin mitä lujempi sen rakenne on. Vasta muokattu maa on huokoista ja murut ovat irtonaisia. Se tiivistyy selvästi herkemmin kuin jo valmiiksi tiivis maa. Maan kosteus on ehkä tärkein tiivistymiseen vaikuttava yksittäinen tekijä. Vedellä kyllästämättömän maan lujuus heikkenee nopeasti maan kostuessa ja sama kuormitus ti-



tenssiominaisuuksiin. Vesipitoisuuden vaikutusta kuvataan yleensä raja-arvoilla, joita kutsutaan Atterbergin *konsistenssirajoiksi*. Rajojen määritykset ovat maan rakenteesta riippumattomia maa-aineksen kosteuspitoisuuksia, koska ne tehdään homogenisoidusta maamassasta. Kosteimmasta kuivimpaan määriteltynä rajat ovat:

Juoksuraja: vesipitoisuus, jossa maamassaan tehty vako valuu kiinni, kun astiaa koputetaan standardoidulla tavalla. Tämän ylemmän muovailtavuusrajan yläpuolella maa on juoksevaa eli se ei säilytä muotoaan ja virtaa oman painonsa vaikutuksesta.

Takerrusraja: vesipitoisuus, jossa maamassa takertuu metallipintaan voimakkaasti adheesiovoimin. Tällöin maan ja metallinen välisessä rajapinnassa kitka on suuri. Käytännössä maa tarttuu työkoneluihin haitaten niiden toimintaa.

Kieritysraja: vesipitoisuus, jossa maa muuttuu muovailtavasta murentuvaksi. Tämä alempi muovailtavuusraja määritetään kierittämällä kosteasta maasta käsien välissä 3 mm:n paksuinen nauha. Kierittämistä jatketaan niin kauan, että se alkaa katkeilla.

Kutistumisraja: vesipitoisuus, jossa ilmaa alkaa tunkeutua kuivuvaan maamassaan, jonka pinta vaaleenee samanaikaisesti. Maan kutistuminen ei enää vastaa siitä poistuneen veden tilavuutta, kuten se vastasi maamassan kuivumisen alkuvaiheessa. Maan kutistuessa sen tilavuus pienenee kapillaaripaineen vaikutuksesta. Maan huokosissa olevan veden pintajännitys vetää maahiukkaset toisiaan kohti, kun veden määrä kuivuessa vähenee.

Juoksu- ja kieritysrajan erotus on *plastisuusluku*, joka ilmoittaa vesipitoisuusalueen, jolla maa on muovailtavaa. Plastisuusluku on suuri savilla ja liejuilla, mutta hiesuilla se on pieni. Kun maa on plastista, se muokkautuu huonosti. Maan humuspitoisuuden kasvu vähentää sen plastisuutta. Kieritys- ja kutistumisrajakosteuden välillä maa on murenevaa eli se muokkautuu tällä kosteusalueella helpoiten. Optimaalinen muokkausaste on silloin, kun molekyylisen ja filmikoheesio summa on pienin eli maan kokonaiskoheesio on minimissä tällä kosteusalueella.

vistää kuivaa maata vähemmän kuin märkää. Märässä maassa tietty kuormitus kulkeutuu myös syvemmälle kuin kuivassa maassa.

Tiivistyminen pienentää makrohuokosten tilavuutta ja katkoo myös jatkuvia huokosia. Tämän seurauksena maan kasvutekijät ja viljeltävyys voivat huonontua ja maasta peräisin oleva vesistökuormitus ja kasvihuonekaasujen päästöt kasvavat merkittävästi. Tiivistyminen ei kuitenkaan ole aina haitallista. Karkean maan kohtuullinen tiivistäminen voi lisätä sen vedenpidätyskykyä ja kyllästämättömän maan vedenjohtavuutta, mikä parantaa sen kasvualust ominaisuuksia. Savi- ja hiesumaiden tiivistyminen on usein haitallista, koska niissä on vähemmän makrohuokosia kuin karkeissa maissa (kuva 2.14). Kasvien kannalta kriittinen makrohuokosten (halkaisija $> 0,030$ mm) tilavuus ruokamultakerroksessa on 10 tilavuusprosenttia. Kun makrohuukosto on sitä pienempi, huono maan rakenne haittaa kasvien kasvua merkittävästi.

Tiivistymisen aiheuttamien haittojen kesto aika riippuu siitä, kuinka syvälle maa tiivistyy ja muokataanko sitä tiivistymisen jälkeen. Muokkaus ja luonnonprosessit kuohkeuttavat ruokamultakerrosta. Kun maata ei muokata tiivistymisen jälkeen, perusmuokkauskerroksen tiivistymä haittaa ainakin sen kasvukauden. Esimerkiksi lannan levittäminen aikaisin ennen kylvömuokkausta voi tiivistää savimaan perusmuokkauskerroksen. Koska savimaita ei kynnetä keväällä, tiivistymä voi haitata sekä kylvömuokkausta että kasvuston kasvua ja ravinteiden ottoa. Jankon ja pohjamaan tiivistymä voi haitata pellon viljelyä pitkään. Esimerkiksi suomalaisessa kenttäkokeessa savimaa tiivistettiin 50 cm:n syvyyteen. Tiivistymä oli mitattavissa kyntökerroksen alapuolella 30 vuotta tiivistämisen jälkeen. Koejakson aikana pohjamaan tiivistyminen haittasi kasvien kasvua eniten sateisina kasvukausina. 20 vuoden koejakson keskiarvona se pienensi kevätiljojen satoa 2 % ja siemensadossa korjattua typpisatoa 5 %. Yksittäisen raskaan ajon vaikutusta pohjamaan rakenteeseen on vaikea erottaa muista maan toimintaa vaikuttavista tekijöistä, kuten muokkauskerroksen tiivistymisestä. Sen aiheuttama muutos pohjamaan rakenteessa ei välttämättä haittaa heti maan toimintaa. Pohjamaan tiivistymisien vaikutukset voivat kertaantua vuosien kuluessa, kun edellinen tiivistymä ei häviä ennen seuraavaa. Tästä syystä pohjamaan tiivistymisen haitat voivat ilmetä vuosien kuluttua ensimmäisestä tiivistymisestä.

3 Hydrologian perusteita

Pertti Vakkilainen

3.1 Johdanto

Luonnossa tapahtuu jatkuvaa veden kiertokulkua, joka käsittää joukon veden varastoitumisvaiheita ja niiden välisiä siirtymisvaiheita. Vettä varastoituu vesihöyrynä ilmakehään, nesteenä meriin, mantereiden vesivarastoihin ja maaperään sekä kiinteässä muodossa lumi- ja jääpeitteeseen sekä routana maaperään. Veden siirtymisvaiheita ovat haihdunta, kosteuden kulkeutuminen ilmakehässä, sadanta ja valunta.

Maaperässä voidaan erottaa vedellä kyllästymätön kerros ja vedellä kyllästynyt eli pohjavesikerros. Vedellä kyllästymätön maakerros yhdistää hydrologisessa kierrossa ilmakehän pohjaveteen. Sadannasta osa suotautuu pohjaveteen ja pohjavedestä puolestaan osa palaa maan pintakerrokseen ja haihtuu ilmakehään. Kyllästymättömässä kerroksessa oleva vesi vaikuttaa moniin maan fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin reaktioihin. Niillä on vaikutusta niin kasvien kasvuun kuin maan lämpötilouteen ja roudan muodostumiseen sekä maan kaasutalouteen. Kyllästymättömän kerroksen vesitalous vaikuttaa myös ravinteiden ja muiden aineiden kulkeutumiseen pinta- ja pohjavesiin sekä ilmakehään ja sitä kautta ympäristön tilaan.

Viljelyn kannalta on oleellista, että pellon vesitalous tunnetaan mahdollisimman hyvin. Peltoa pyritään pitämään sopivassa kosteustilassa kasvien kasvun, pellon kantavuuden, tiivistymishaittojen ja ravinnehuuhtoumien kannalta. Kuivatuksen ja kastelun suunnittelussa tarvitaan hydrometeorologisten olosuhteiden ja viljelytietojen lisäksi tietoa maaperän ominaisuuksista sekä veden sitoutumisesta ja veden liikkeistä maassa.

Tässä luvussa tarkastellaan hydrologista kiertoa pääpainon ollessa veden pidättymisessä ja liikkeissä maaperässä. Lisäksi käsitellään lyhyesti maan lämpötiloutta lähinnä roudan näkökulmasta.

3.2 Hydrologian perussuureita

Hydrologinen kierto

Mantereilla ja yksittäisellä valuma-alueella veden kiertokulku tapahtuu pääpiirteissään kuvan 3.1 esittämällä tavalla. Valuma-alueella tarkoitetaan aluetta, jolta pinta- ja pohjavedet laskevat mereen tai järveen tai tiettyyn uoman kohtaan. Sateesta osa pidättyy kasvilisuuteen ja haihtuu siitä suurimmaksi osaksi takaisin ilmakehään. Maanpinnalle tuleva vesi valuu osaksi vesiuumiin, osaksi haihtuu ja osaksi imeytyy maaperään. Osa vedestä voi jäädä lammikoiksi maanpinnalle (painannesäilyntä), josta se myöhemmin imeytyy maaperään tai haihtuu takaisin ilmakehään.

Pohjavesivyöhykkeessä huokoset ovat veden täyttämiä. Pohjavedenpinnan ja maanpinnan välissä olevia vesiä kutsutaan maavesiksi. Maavesivyöhykkeessä huokostilassa oleva vesimäärä vaihtelee ajan ja paikan suhteen. Puhutaan vedellä kyllästymättömästä kerroksesta, sillä yleensä vain osa huokosista on veden täyttämiä. Maavesivarastosta osa valuu pintakerrosvaluntana vesiuumiin, osa siirtyy pohjavesiin ja osa haihtuu suoraan tai kasvien kautta

ilmakehään. Pohjavesivarastosta vedet virtaavat edelleen pohjavesivaluntana vesistöihin ja osaksi kohoavat pohjavedenpinnan yläpuolelle maavedeksi.

Hydrologisen kierron perussuureet ovat sadanta (P), haihdunta (E), valunta (Q) sekä eri muodoissa tapahtuva varastoituminen (S). Perussuureet kuvaavat pinta-alayksikköä kohden tulevia vesimääriä ja niiden yksikkönä käytetään millimetriä (mm). Lisämääreenä tarvitaan tarkasteltavan jakson pituus, joka tavallisimmin on vuorokausi (d), kuukausi (kk) tai vuosi (a). Tietyn pituisen ajanjakson vesitaseyhtälö tietylle alueelle on yksinkertaisimmassa muodossaan esitetty yhtälössä (3.1).

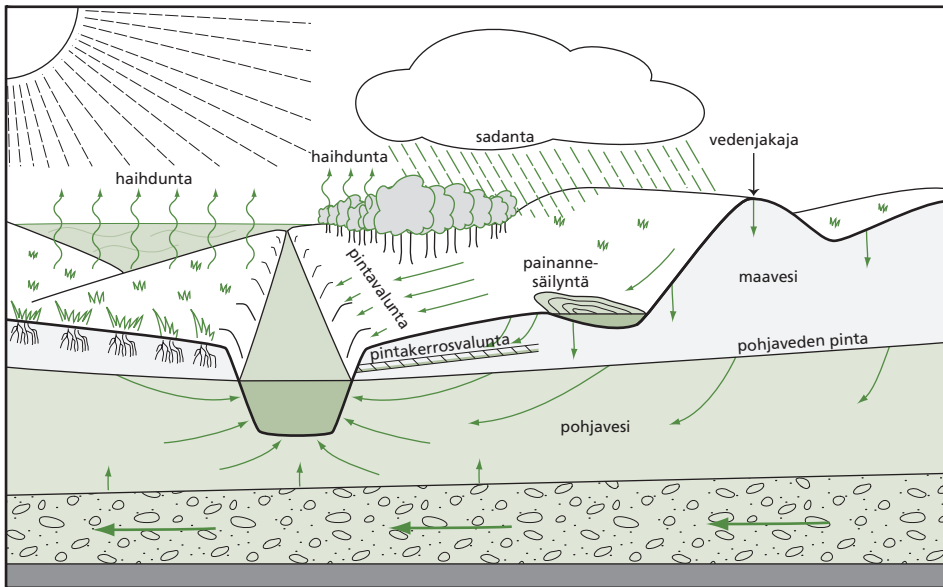
$$P = Q + E \pm \Delta S \quad (3.1)$$

Muuttuja ΔS kuvaa vesivaraston muutosta ko. ajanjaksolla. Vuosijaksoa koskeissa keskimääräistarkasteluissa voidaan vesitaseyhtälöstä (3.1) varastotermi jättää pois ja se yksinkertaistuu muotoon (3.2).

$$P = E + Q \quad (3.2)$$

Vesivarojen hyväksikäyttöä koskeissa suunnittelutehtävissä käytetään yleensä johdettuja suureita valuma ja virtaama sekä valitussa korkeustasossa mitattuja vedenkorkeuksia. Virtaama (Q) on se vesimäärä, joka kulkee aikayksikössä, tavallisesti sekunnissa uoman poikileikkauksen lävitse. Yksikkönä on tavallisesti l s^{-1} ja $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Valuma (q) on alueelta virtaavan veden määrä aika- ja pinta-alayksikköä kohden ja se ilmaistaan tavallisimmin yksiköissä $\text{l s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ja $\text{l s}^{-1} \text{km}^{-2}$. Valuma saadaan jakamalla virtaama valuma-alueen pinta-alalla.

Vedenkorkeus (W) on vedenpinnan vapaa korkeus valittuun perustasoon verrattuna. Sen yksikkönä käytetään metriä. Hydrologisessa suunnittelussa tavallisimmat tunnusomaiset suureet ja kirjainsymbolit on esitetty Tietoruudussa 3.1.



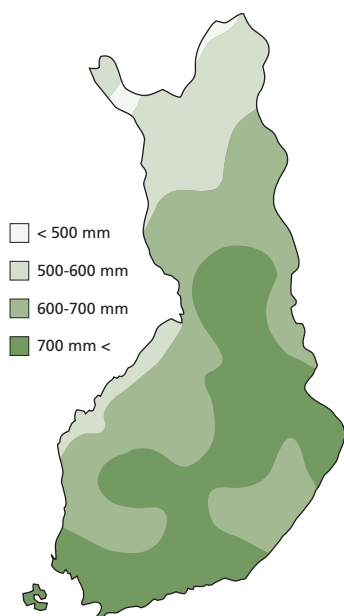
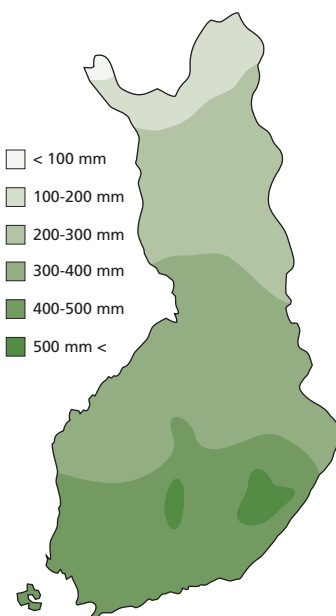
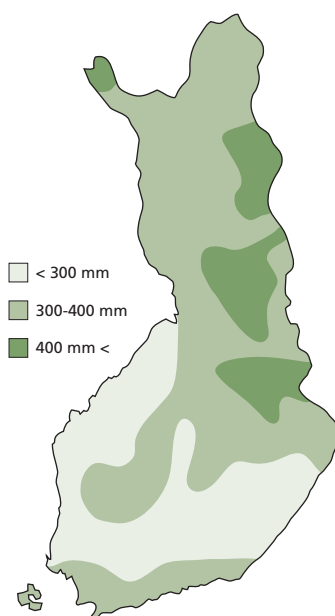
Kuva 3.1 Veden kierto valuma-alueella.

Taulukko 3.1 Hydrologinen kiertä Suomessa.

	min	keskiarvo	max	lumen osuus
Etelä-Suomi				
sadanta, mm a ⁻¹	400	700	1000	30–40 %
haihdunta, mm a ⁻¹	300	400	500	
valunta, mm a ⁻¹	100	300	500	
Pohjois-Suomi				
sadanta, mm a ⁻¹	300	550	800	40–50 %
haihdunta, mm a ⁻¹	150	250	300	
valunta, mm a ⁻¹	150	300	300	

Suomi kuuluu ilmastollisesti alueeseen, jolle ovat tyypillisiä vuodenaikaiset valuntavaihtelut. Lumen kevätsumamisesta aiheutuu yleensä vuoden suurin tulva ja syksyisistä vesisteistä syystulva. Pienillä valuma-alueilla voivat ylivirtaamien hetkelliset arvot olla huomattavasti vuorokautisia keskiarvoja suurempia. Näillä hetkellisillä huipuilla on erityistä merkitystä yhdyskuntien sadevesiviemäröinnissä. Sen sijaan kastelussa veden tarve ja vesistön antoisuus määritetään useamman vuorokauden kestävän kuivakauden keskiarvoina.

Alueellisesti hydrologiset suureet vaihtelevat Suomessa suhteellisen vähän. Taulukossa 3.1 on annettu eräitä hydrologisten suureiden vuotuisia arvoja Etelä- ja Pohjois-Suomessa. Kuvissa 3.2–3.4 on esitetty keskimääräinen sadanta, haihdunta ja valunta vuosina 1961–1990.

**Kuva 3.2** Keskimääräinen sadanta (mm a⁻¹) vuosina 1961–1990.**Kuva 3.3** Keskimääräinen haihdunta (mm a⁻¹) vuosina 1961–1990.**Kuva 3.4** Keskimääräinen valunta (mm a⁻¹) vuosina 1961–1990.

Tietoruutu 3.1

Hydrologisia suunnitteluksuureita

		Virtaama Q	Valuma q	Vedenkorkeus W
yli	H	HQ	Hq	HW
keski yli	MH	MHQ	MHq	MHW
keski	M	MQ	Mq	MW
keski ali	MN	MNQ	MNq	MNW
ali	N	NQ	Nq	NW

HQ = ylin virtaama = vuoden tai havaintojakson suurin virtaama
 MHQ = havaintojakson vuotuisten HQ-arvojen keskiarvo
 MQ = keskivirtaama = koko havaintojakson päiväarvojen keskiarvo
 MNQ = havaintojakson vuotuisten NQ-arvojen keskiarvo
 NQ = alin virtaama = vuoden tai havaintojakson alin virtaama

Suureiden lisämääreeksi annetaan usein havaintojakso.

Tavallisimpia aikamääreitä ovat tietyn vuosijakson tunnusomainen arvo:

$HW_{1976-79}$ = vuosijakson 1976-1979 ylin vedenkorkeus

Tietyn ei kalenteriaikaan sidotun periodin tunnusomainen arvo:

HW_{veg} = kasvukauden ylin vedenkorkeus tarkasteltavana vuosijaksona

Keskimäärin tietyllä toistuvuudella esiintyvä arvo:

$HQ_{1/20}$ = keskimäärin kerran kahdessakymmenessä vuodessa toistuva ylivirtaama

Tietyn vuoden alin arvo:

Nq_{1979} = alin valuma vuonna 1979

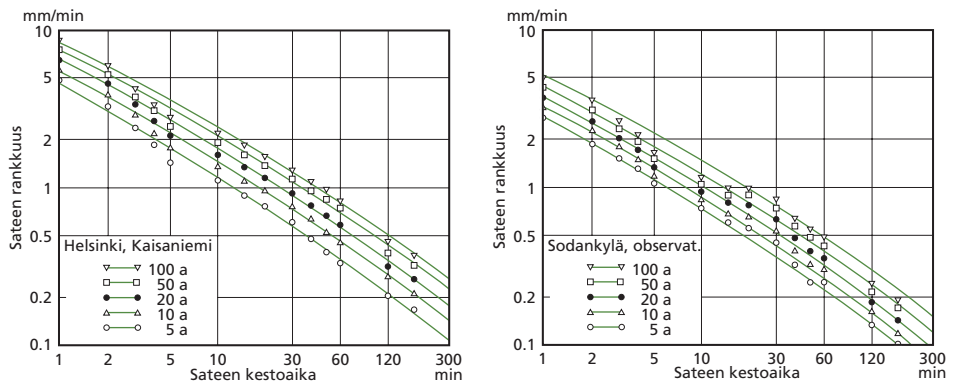
Sadanta ja sulanta

Sadanta eli sateen määrä on maahan sataneen veden määrä pinta-alaa ja aikaa kohden ja yleensä se ilmoitetaan millimetreinä aikayksikköä kohden. Kansainvälisesti katsoen Suomen sadanta on melko pientä. Vuosisadanta Suomessa vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan välillä 500–750 mm. Eri vuosina sadanta vaihtelee tavallisesti vähemmän kuin 30 % keskiarvon molemmiin puolin. Vuosisadanta on suurin maan eteläosassa ja pienin Lapin pohjoisosissa sekä Pohjanmaan rannikkoalueilla. Suomen keskimääräinen vuosisadanta on esitetty kuvassa 3.2.

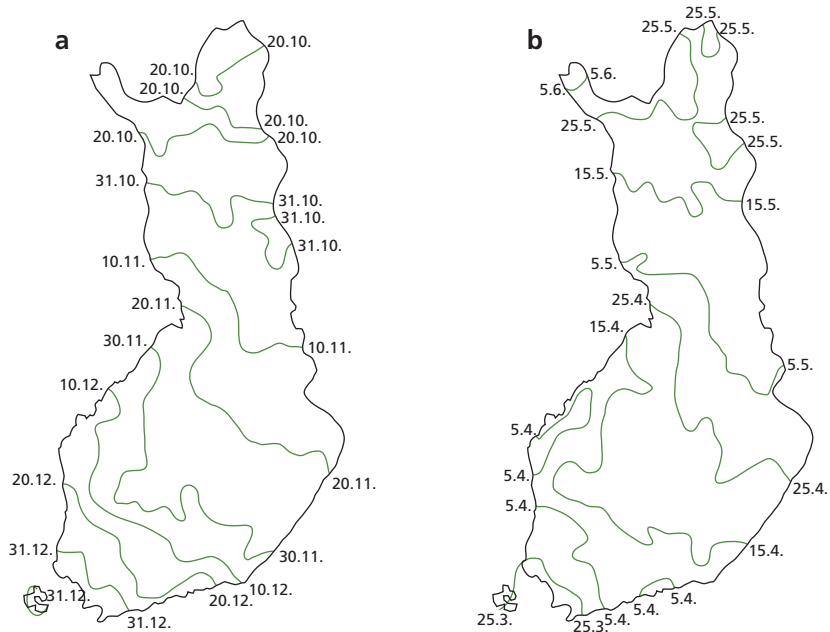
Sadannan vuodenaikaiset vaihtelut ovat jokseenkin samanlaisia koko maassa. Tavallisesti sadanta on pienin maaliskuussa ja suurin elokuussa. Huomattava osa kesäsateista imeytyy maaperään ja haihtuu ilmakehään ja muodostaa vain vähän valuntaa. Sen sijaan runsaista syyssateista voi muodostua poikkeuksellisia syystulvia maaperän ollessa veden kyllästämää ja haihdunnan ollessa vähäistä. Etelä-Suomessa miltei joka kolmas valuman vuosimaksimeista on syyssateiden aiheuttama. Pohjois-Suomessa ylivalumat syntyvät syyssateista harvemmin kuin kerran kahdessakymmenessä vuodessa. Lyhytaikaiset rankkasateet (kuva 3.5) on huomioitava taajama-alueilla esimerkiksi sadevesiviemäreiden mitoituksessa.

Lumen vesiarvolla tarkoitetaan sen vesikerroksen paksuutta, joka lumesta sulattaessa syntyy. Lumen vesiarvo ilmoitetaan yleensä millimetreinä (mm), joka lukuna on sama kuin lumen paino kilogrammoina neliömetrille (kg m^{-2}). Lumena tulevan sateen määrä vaihtelee alueittain. Lounais-Suomessa osuus on keskimäärin alle 30 % ja Pohjois-Suomessa 40–50 %. Lumipeitteen muodostumisessa ja häviämisessä, sen syvyydessä, vesiarvossa ja sulamisnopeudessa on selviä alueellisia eroja (kuvat 3.6–3.9).

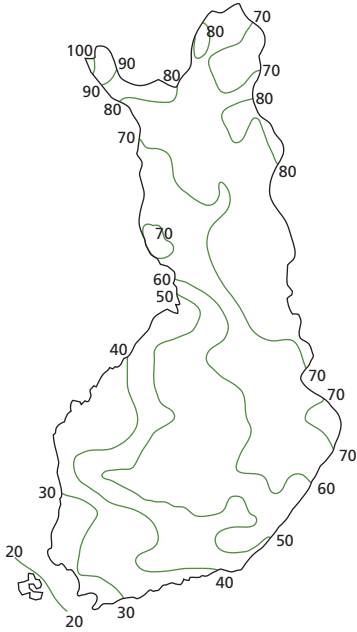
Pysyvä lumipeite muodostuu Lappiin tavallisesti loka-marraskuun vaihteessa ja etelärannikolle joulukuun loppupuolella. Lumipeite sulaa tavallisesti maan etelärannikolta huh-tikuun alussa ja Lapista lähes pari kuukautta myöhemmin. Lumipeitteen keskimääräinen maksimisyvyys on lounaisrannikolla 20 cm ja lumiolosuhteiltaan runsaimmassa Koillismaassa 70 cm. Vastaavasti lumen vesiarvon keskimääräinen maksimi eli lumeen varastoi-



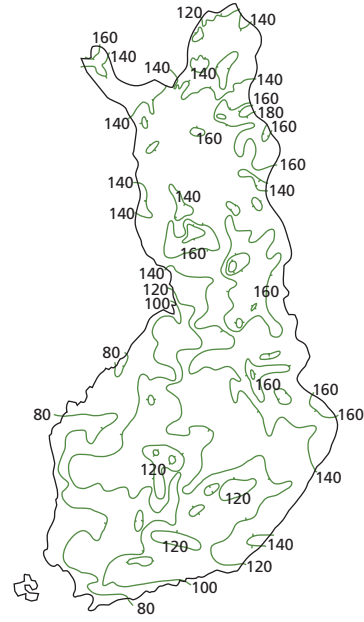
Kuva 3.5 Lyhytaikaisten sateiden rankkuus Helsingissä ja Sodankylässä eri toistumisajoilla (Kuusisto 1984).



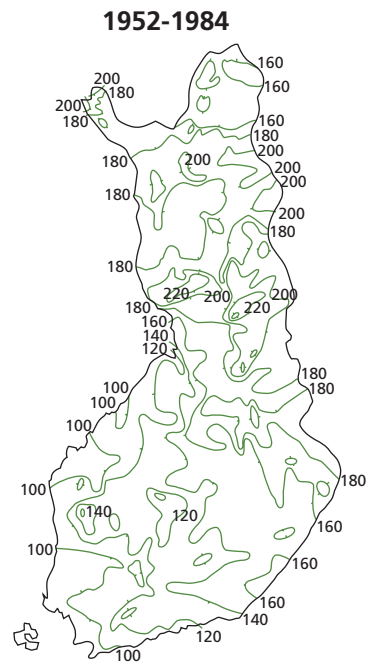
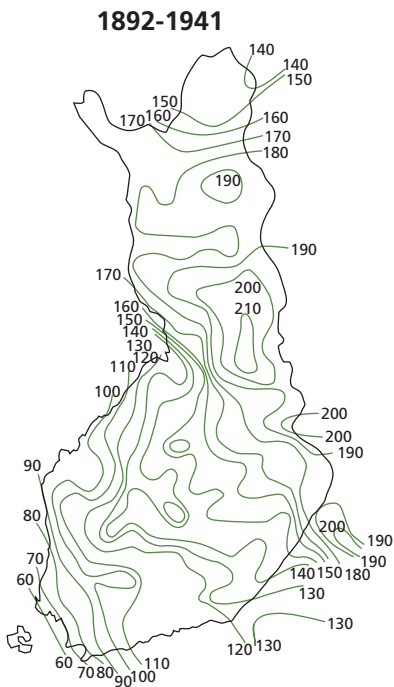
Kuva 3.6 Pysyvän lumipeitteen a) tulon ja b) katoamisen keskimääräinen ajankohta jaksolla 1960–1993 (Ilmatieteen laitos 2004).



Kuva 3.7 Lumipeitteen keskimääräinen syvyys (cm) 15. maaliskuuta vuosina 1961–1990 (Ilmatieteen laitos 2004).



Kuva 3.8 Lumen vesiarvon keskiarvo (mm) 16. maaliskuuta vuosina 1951–1988 (Vesi- ja ympäristöhallitus 1990).



Kuva 3.9 Lumen vesiarvon keskimääräinen vuosimaksimi (mm) Suomessa vuosina 1892–1941 ja 1952–1984 (Vesi- ja ympäristöhallitus 1990).

tuneen veden suurin määrä vaihtelee välillä 60–200 mm. Lumen syvyys ja vesi-arvo saavuttavat maksimi-arvonsa yleensä maaliskuun puolivälissä.

Vaikka lumipeitteen kerääntyminen kestää useita kuukausia, sen sulaminen tapahtuu muutamassa viikossa. Lumen sulaminen on teoreettisesti erittäin monimutkainen ilmiö ja johtuu eri tavoin ympäristöstä lumipeitteeseen siirtyvästä energiasta. Lisäksi alueen topografia ja kasvillisuus vaikuttavat sulamistapahtumaan. Ulkoisen ympäristön vaikutusten ohella sulannan määrään vaikuttavat merkittävästi itse lumipeitteen ominaisuudet, kuten tiheys, lämpötila ja lumen heijastusominaisuudet.

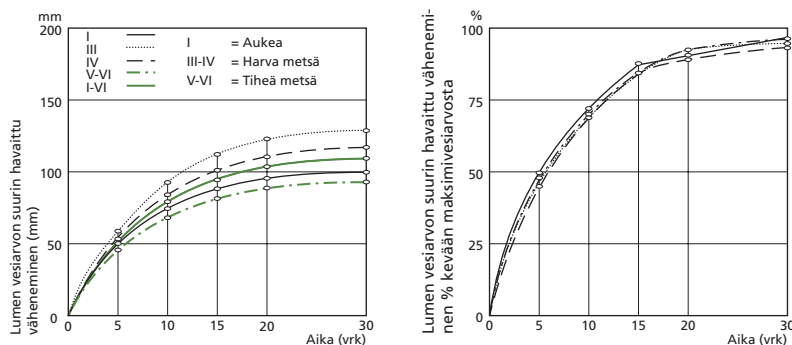
Vesirakenteiden mitoituksen perustana ovat yleensä ylivalumat, jotka Suomessa useimmiten aiheutuvat lumen sulannasta. Sulannan suuruutta voidaan tilastollisesti tarkastella lumen vesi-arvon maksimivähennemisen perusteella. Suurimmat havaitut lumen vesi-arvon maksimivähennämät ensimmäisen viiden vuorokauden aikana ovat koko maassa 40–50 % lumen maksimivesi-arvosta (kuva 3.10). Absoluuttiset arvot vaihtelevat alueellisesti ja ovat suurimpia runsaslumisilla alueilla Pohjois-Suomessa. Myös eri maastotyyppien välillä on havaittavissa eroja. Lumipeitteen sulannan ja samanaikaisesti tapahtuvaan sadannan summaa nimitetään vedentuotoksi. Kuvassa 3.11 on esitetty kolmelta paikkakunnalta keskimääräinen lumen vesi-arvon vähennemisen ja sadannan summa.

Varsinaisista sulannan arviointimenetelmistä yleisin on astepäivätekijän käyttö. Astepäivätekijällä (k_m) tarkoitetaan sitä vesimäärää mm:nä, joka sulaa yhtä rajalämpötilan ylittävää lämpöastetta kohden vuorokaudessa. Rajalämpötilana käytetään yleensä 0 °C astetta. Sulanta voidaan laskea kaavalla (3.3).

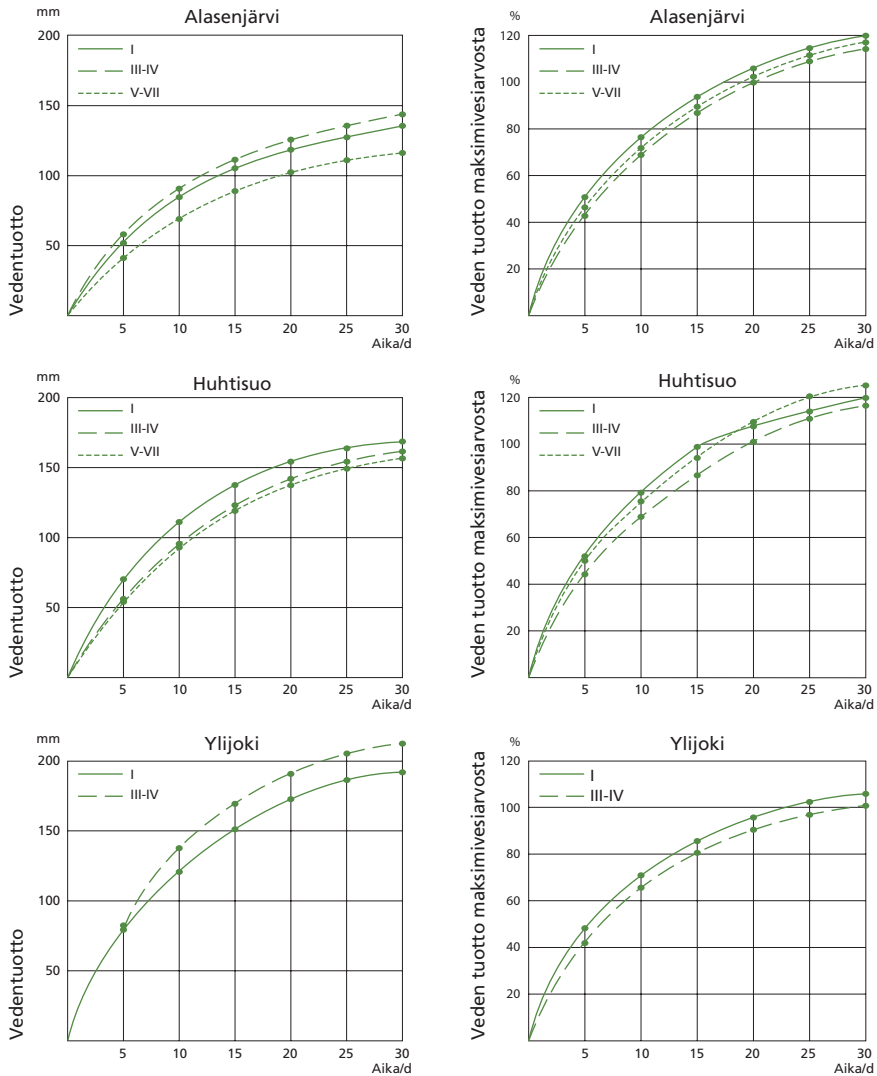
$$M = k_m (T - T_o) \quad (3.3)$$

- M = sulanta mm d⁻¹
 k_m = astepäivätekijä mm °C⁻¹ d⁻¹
 T = vuorokauden keskilämpötila °C
 T_o = sulannan rajalämpötila °C

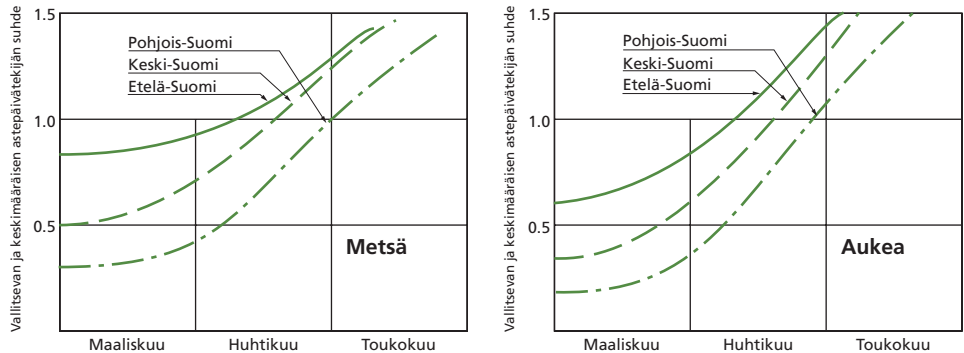
Eri tutkimuksissa saadut keskimääräiset astepäivätekijän arvot vaihtelevat Suomen oloissa aukealla 3,0–3,5 mm °C⁻¹ d⁻¹ ja metsässä 2,0–2,5 mm °C⁻¹ d⁻¹ välillä. Sulamisen edistytessä lumen ominaisuudet muuttuvat ja astepäivätekijä kasvaa. Kuvassa 3.12 on esitetty astepäivätekijän kehitys sulamiskauden aikana mäntymetsässä ja aukealla.



Kuva 3.10 Lumen vesi-arvon suurin havaittu väheneminen eri maastotyypeissä ilmaistuna millimetreinä ja prosentteina (Kaitera 1939).



Kuva 3.11 Lumipeitteen suurin havaittu vedentuotto (=sulanta + sadanta) Alasenjärven (Rantasalmi), Huhtisuon (Ruokolahti) ja Ylijoen (Rovaniemi) valuma-alueilta.



Kuva 3.12 Astepäivätekijän kehitys mäntymetsässä ja aukealla maan eri osissa (Kuusisto 1984).

Haihdunta

Haihdunta ilmiönä

Haihtumisella ymmärretään nestemäisessä tai kiinteässä muodossa olevan veden muuttumista vesihöyryksi. Haihdunnan välttämätön ehto on, että vesihöyryn osapaine ilman ja veden rajapinnan yläpuolella on alempi kuin rajapinnassa. Päinvastaisessa tapauksessa tapahtuu vesihöyryn tiivistymistä, jolloin energiaa vastaavasti vapautuu.

Luonnossa haihduntaan tarvittava energia voi tulla auringon säteilynä tai lämmön kulkeutumisena ilmasta, maasta tai vedestä. Vesihöyryn paine-eron ylläpitämiseksi tarvitaan jatkuvan energiavirran ohella vesihöyryn kulkeutumista kauemmas ilmakehään. Tuulen nopeuden lisääntyminen nopeuttaa vesihöyryn kulkeutumista.

Ilmavirtauksen pyörteisyys riippuu tuulen nopeuden ohella myös haihduttavan pinnan karkeudesta. Lisäksi ilmakehän lämpötilakerrostuneisuus vaikuttaa vesihöyryn kulkeutumisnopeuteen. Normaalitylanteessa lämpötila laskee ilmakehässä ylöspäin mentäessä 0,6 °C 100 metriä kohti. Mikäli lämpötilan lasku on tätä nopeampaa, tapahtuu konvektiovirtausta alhaalta ylöspäin ja tämä nopeuttaa vesihöyryn kulkeutumista. Jos taas lämpötila laskee em. arvoa vähemmän, syntyy tilanne, jossa vesihöyryn kulkeutuminen tapahtuu normaalitilannetta hitaammin. Haihduntailmiö on esitetty Tietoruudussa 3.2.

Luonnossa haihtumista tapahtuu veden, lumen ja jään pinnasta, maasta ja kasvustosta. Näiden erottamiseksi toisistaan on otettu käyttöön seuraavat käsitteet:

- Evaporaatio: haihdunta maan, veden tai lumen pinnalta.
- Transpiraatio: kasvien elintoimintaan liittyvä haihdunta. Haihtuva vesi kulkee juuri-varsi-lehti-systeemin lävitse.
- Evapotranspiraatio: maa-alueilta tapahtuva kokonaishaihdunta.
- Potentiaalinen evapotranspiraatio: laajalta alueelta tapahtuva haihdunta, kun maa on lyhyen kasvillisuuden täysin peittämä, eikä veden puute rajoita haihduntaa.
- Potentiaalinen evaporaatio: puhtaasta, vapaasta vedenpinnasta tapahtuva haihdunta.
- Todellinen haihdunta: haihdunta, joka todellisuudessa tapahtuu tietyltä alueelta.
- Interseptiohaihdunta: kasvien pinnoille pidättyneen veden haihdunta.

Veden pinnasta tapahtuva haihdunta riippuu pelkästään energia- ja ilmastotekijöistä, sillä vettä on tällaisissa tapauksissa haihduntaan aina saatavilla.

Paljaasta maasta tapahtuvaa haihtumista säätelevät sateen jälkeen samat tekijät kuin veden pinnasta tapahtuvaa haihduntaa. Kun maanpinnan ylin osa kuivuu, jatkuu haihdunta samalla tasolla vain, mikäli veden virtaus alemmaa maasta pystyy tuomaan vettä riittävästi maan pintaan. Jos veden nousu on ilmakehän haihduntavaatimusta vähäisempää, kuivuu maanpinta edelleen ja muodostaa haihduntaa pienentävän kuivan kerroksen.

Transpiraatio ja interseptiohaihdunta estävät kasvuston lämpötilan kohoamisen haitallisen korkeaksi. Kasvun kannalta vesi on välttämätön mm. siksi, että se tuo kasville tarpeellisia aineita maaperästä ja pitää kasvia pystyssä. Vesi on lisäksi protoplasman tärkeä aineosa ja fotosynteesissä se on yhtä oleellinen kuin hiilidioksidi.

Käytännöllisesti katsoen kaikki transpiraatio tapahtuu lehtien alapinnoilla olevien ilmarakojen kautta. Ilmarakojen avautumista ja sulkeutumista säätelevät valon intensiteetti, lehden lämpötila ja kasvin solujen välisen tilan CO₂-pitoisuus tavalla, jota ei tarkasti tunneta. Mikäli transpiraatio on niin suurta, ettei vettä pääse kasviin maasta riittävästi, kas-

vin sisäinen paine, ns. turgoripaine, laskee ja ilmaaot sulkeutuvat. Transpiraatio lakkaa, kunnes vettä on päässyt maasta kasviin jälleen riittävästi.

Maan pinnalta tapahtuvan haihdunnan ja transpiraatiohaihdunnan merkittävä ero on, että ensin mainitussa tapahtumassa vesi poistuu maasta ainoastaan yhdeltä tasolta, kun taas transpiraatiossa kasvit ottavat vettä koko juuristokerroksen syvyydeltä.

Veden virtaus maa-kasvi-ilmakehä-systeemissä aiheutuu energiaeroista. Vesi virtaa siihen suuntaan, jossa energiatila on pienempi. Transpiraatiolle voidaan kirjoittaa maan ja lehden potentiaalien sekä maassa ja kasvustossa vallitsevien vastusten perusteella yhtälö (3.4).

$$T_r = \frac{h_s - h_l}{R_s + R_p} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} T_r &= \text{transpiraatio (md}^{-1}\text{)} & h_s &= \text{potentiaali maassa (m)} \\ h_l &= \text{potentiaali lehdessä (m)} & R_s &= \text{virtausvastus maassa (d)} \\ R_p &= \text{virtausvastus kasvissa (d)} \end{aligned}$$

Tietoruutu 3.2

Haihduntailmiö

Haihdunnan tarvitsemaa energiaa nimitetään latentiksi energiaksi ja sen suuruus on $2,47 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ lämpötilan ollessa $+10^\circ \text{C}$. Tarvittavan energian määrä vaihtelee vain vähän, 0,1 % lämpöastetta kohti. Vesimolekyyleja siirtyy sekä vedestä ilmaan että ilmasta veteen. Siirtyvien vesimäärien erotukselle eli nettohaihdunnalle voidaan kirjoittaa lauseke (T3.1).

$$E = c_1 \exp\left(-\frac{L/n}{k_B T_s}\right) - c_2 (1-r) e \quad (T3.1)$$

E = haihdunta (mm)

c_1, c_2 = vakioita

L = latentti energia (J kg^{-1})

n = vesimolekyylien lukumäärä veden tilavuusyksikköä kohti

k_B = Boltzmannin vakio

T_s = pintalämpötila ($^\circ \text{C}$)

r = veden pinnasta takaisin ilmaan kimpoavien vesimolekyylien osuus

e = vesihöyryn paine (mbar)

Mikäli vesimolekyylien lukumäärä ilmassa pysyy vähäisenä eli vesihöyryn paine pysyy pienenä, haihduntaa tapahtuu jatkuvasti, jos energiaa on riittävästi saatavilla. Jos taas vesihöyryn poiskulkeutuminen pinnan yläpuolelta estyy, saavutetaan ennen pitkää tilanne, jossa nettohaihdunta lakkaa. Pinnan yläpuolella vallitsee tällöin kyllästetyn vesihöyryn paine e_s . Sijoittamalla $E = 0$ yhtälöön (T3.2) saadaan kyllästetyn vesihöyryn paineelle ilmaus:

$$e_s = \frac{c_1}{c_2 (1-r)} \exp\left(-\frac{L/n}{k_B T_s}\right) \quad (T3.2)$$

Toisin sanoen e_s on lämpötilan yksikäsitteinen funktio. Jos tarvittava energia tulee vedestä, veden lämpötila laskee ja haihdunta alkaa pienentyä. Ennen pitkää joudutaan tilanteeseen, jossa haihdunta kokonaan lakkaa.

Kuva 3.13

Esimerkki veden energiatilojen ja virtausvastusten suuruudesta maa-kasvi-ilmakehä-systeemin eri osissa.

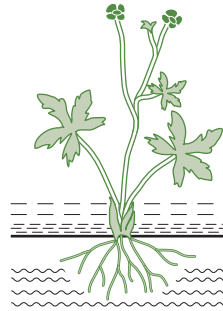
Potentiaali

Kuiva ilma -1000 bar

Kostea ilma -100 bar

Kuiva maa -25 bar

Kostea maa 0 bar

**Vastukset**
 $\frac{1000}{10}$ Vastus kasvusta ilmaan

Pieni kasvissa

Suuri kuivassa maassa

 $\frac{5}{0}$ Vastus kosteasta maasta kasviin

Veden virtausta maasta kasvin kautta ilmakehään ei siis säätele maan vesipitoisuus, vaan maaveden ja kasvin lehdessä olevan veden välinen energiaero sekä ilmakehän kyky vastaanottaa haihtuvaa vettä. Esimerkki potentiaalien suuruudesta maa-kasvi-ilmakehä-systeemin eri osissa on esitetty kuvassa 3.13.

Juuristokerroksen kylmyys on tekijä, joka voi Suomen olosuhteissa vaikuttaa transpiraatiota pienentävästi kasvukauden alkuvaiheessa. Matala lämpötila hidastaa juurten kasvua, nostaa veden viskositeettia ja kasvattaa soluseinämien virtausvastusta. Esimerkkinä lämpötilan vaikutuksesta on kuvassa 3.14 esitetty laboratorio-oloissa saatu tutkimustulos.

Osa sateesta pidättyy kasvuston pinnalle ja haihtuu siitä suoraan ilmaan, joten sen ei tarvitse transpiraatioveden lailla voittaa maan ja kasvuston aiheuttamaa virtausvastusta. Interseptiohaihdunta tapahtuu tästä syystä nopeammin kuin transpiraatio. Sadannan lisääntyminen merkitsee yleensä suurempaa interseptiohaihduntaa ja suurempaa kokonaishaihduntaa. Kasvien vedenotto on esitetty Tietoruu-dussa 3.3.

Maanpinnan hyväksi tuleva nettosäteily jakautuu haihduntaan kuluvaan eli latenttiin energiaan, lämmön virtaukseen eli konvektiiviseen lämpöön ja veteen tai maahan siirtyvään energiaan ja fotosynteesiin yms. kuluvaan energiaan:

$$R_n = LE + C + G + M \quad (3.5)$$

R_n = nettosäteily (Wm^{-2})

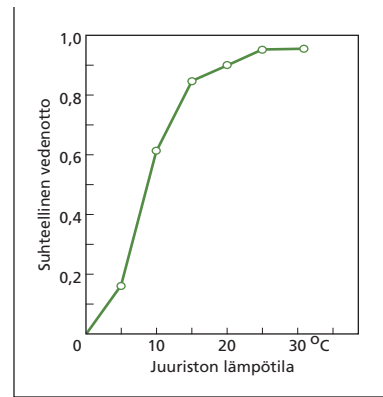
LE = haihduntaan kuluva energia (Wm^{-2})

C = konvektiivinen lämpö (Wm^{-2})

G = maahan tai veteen siirtyvä energia (Wm^{-2})

M = fotosynteesiin yms. kuuluva energia (Wm^{-2})

Haihduttavien pintojen säteilytaseet poikkeavat toisistaan. Veden albedo, joka on heijastuneen ja tulevan säteilyn suhde, on noin 0,08. vihreän ruohon noin 0,25, metsän noin 0,15 ja lumen jopa 0,85.

**Kuva 3.14**

Transpiraation riippuvuus juuristokerroksen lämpötilasta.

Tietoruutu 3.3

Kasvien vedenotto

Kasvien kasvun kannalta ympäristö voidaan jakaa kolmeen alueeseen: a) ilmakehään, b) maaperän vedellä kyllästymättömään alueeseen ja c) maaperän vedellä kyllästettyyn alueeseen.

Näistä kaksi ensimmäistä ovat kasvien kannalta ensiarvoisen tärkeitä. Useat meteorologiset tekijät kuten auringonsäteily, ilman lämpötila, ilman suhteellinen kosteus, tuulen nopeus ja ilman hiilidioksidipitoisuus määrittävät tapahtumia maaperän yläpuolella olevassa ilmassa. Maaperän kyllästymättömällä alueella prosessit ovat yhteydessä maaperän tiheyteen, vesipitoisuuteen ja lämpötilaan, hapen ja hiilidioksidin määrään maaperässä, sekä ravinnonsaantimahdollisuuksiin ja maaperän suolapitoisuuteen.

Yleisesti kasvien kehitys voidaan jakaa kahteen vaiheeseen: 1. itämisestä orastumiseen, 2. orastumisesta kypsytyteen. Ensimmäisen vaiheen tärkein toiminto on respiraatio eli hengitys, jossa syntyvän energian avulla muutetaan siemenissä oleva kiinteä energia liukenevaan muotoon, jollaista se hyödynnetään alkeissilmujen ja sirkkajuurien solujen jakautumiseen, kasvuun ja erikoistumiseen. Veden absorptio on tapahtuman välttämätön edellytys. Tässä kasvuvaiheessa ei käytännössä ilmene veden haihduntaa.

Toisessa kasvuvaiheessa orastumisesta kypsytyteen kasvin lehtipinta-ala kasvaa vähitellen. Tästä johtuen myös haihdunta ja fotosynteesi vilkastuvat ja haihdunta säätelee käytännössä kasvin vedenottoa. Tämän vaiheen aikana kasvu ei riipu yksin maaperän kosteudesta ja lämpötilasta, vaan myös ilman ja etupäässä lehden ympärillä olevan ilmakerroksen kyllästysvauksesta ja nettosäteilystä.

Kasvun määrä on todettu riippuvan varsin suoraviivaisesti transpiraation määrästä. De Wit (1958) on esittänyt sadon kuiva-ainepainon määrittämiseksi seuraavaa

$$Y = AT_{\text{tot}} \quad (T3.3)$$

Y = kuiva-ainepaino (kg m^{-2})

A = ilmasto-oloista ja leveysasteesta riippuva kerroin (kg m^{-3})

T_{tot} = kumuloituva transpiraatio (m)

Jos jokin muu kuin vedenpuute on kasvua rajoittava tekijä, jää sato tietyllä tasolle, vaikka transpiraatiomäärät lisääntyisivätkin. Kun matrikpotentiaali on välillä -500 cm v.p. ja -1000 cm v.p. oletetaan transpiraation tapahtuvan potentiaalisella tasolla. Liian mässä tai liian kuivassa kuivassa maassa haihdunta on tätä pienempää. (ks. kohta 3.3)

Haihdunnan arviointi

Haihdunnan arviointia varten on kehitetty runsaasti erityyppisiä menetelmiä. Yleisesti käytetty arviointimenetelmä on vesitasemittaukset. Valuma-alueelta tapahtuva haihdunta voidaan määrittää vesitaseen avulla:

$$E = P - Q \pm \Delta S \quad (3.6)$$

E = haihdunta (mm)

P = sadanta (mm)

Q = valunta (mm)

S = varastoituminen (mm)

Vuosihaihduntaa määritettäessä vesitase on käyttökelpoisimmillaan. Jos käytettävissä on useiden vuosien sadanta- ja valuntasarjat, voidaan varastoituminen jättää huomioonottamatta ja haihdunta saadaan sadanta- ja valunta-arvojen erotuksena. Lyhytaikaisen haihdunnan määrittämisessä on runsaasti ongelmia. Ensinnäkin sadannan luotettava määrittäminen on käytännössä sitä vaikeampaa mitä lyhyemmästä jaksosta on kysymys. Valuma-alueelle varastoituneen vesimäärän vaihtelun selvittäminen on vielä sadannan määrittämistäkin hankalampi tehtävä.

Lysimetrit ovat maahan upotettuja ja maalla täytettyjä astioita, joista haihdunta määritetään joko punnitsemalla tai vesitaseyhtälön jäännösterminä. Punnitsevilla lysimetreissä sadannasta ja haihdunnasta aiheutuvat maan painon muutokset rekisteröidään. Ei-punnitsevilla lysimetreissä sadanta, lysimetrin läpi virtaava vesimäärä ja maan vesipitoisuus täytyy erikseen mitata ja haihdunta saadaan näiden avulla lasketuksi.

Yleisimmin haihdunnan mittaaminen tapahtuu erityyppisiä haihtumisastioita käyttäen. Haihtumisastiat voidaan sijoittaa maanpinnan yläpuolelle tai upottaa maahan sekä järvi-haihduntaa mitattaessa vedessä kelluville lautoille. Maailman Ilmatieteen järjestö (WMO) suosittaa käytettäväksi amerikkalaista Class A -astiaa tai venäläistä GGI-3000 -astiaa.

Haihtumisastioista tapahtunut haihdunta saadaan lasketuksi astian vedenpinnan muutoksen ja sadannan avulla. Astiasta tapahtuva haihdunta edustaa tarkasti ottaen vain itseään, sillä astia eroaa ympäristöstään mm. värin, lämpötilan ja aerodynaamisten ominaisuuksien puolesta.

Astiahaihdunnat muunnetaan potentiaaliseksi haihdunnaksi tai järvihaihdunnaksi kertomalla saadut mittaustulokset kokeellisesti määritetyillä kertoimilla.

Potentiaalisen haihdunnan empiirisiä ja puoliempiirisiä määrittämismenetelmiä, jotka perustuvat ilmatieteellisiin mittauksiin, on kehitetty lukuisia. Näitä sovellettaessa on muistettava, että ne on kehitetty tiettyjä olosuhteita silmälläpitäen eivätkä ne sellaisinaan yleensä suoraan sovellu toisenlaisissa oloissa käytettäväksi. Yksinkertaisimmat menetelmät perustuvat kuukausilämpötilojen käyttöön. Esimerkki fysikaalisessa mielessä varsin hyvin perus-

Tietoruutu 3.4

Penman-Monteith menetelmä

Monteith ja Rijtema kehittivät Penmanin menetelmän muotoon, joka mahdollistaa todellisen haihdunnan laskennan:

$$LE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (T3.4)$$

ρ_a = ilman tiheys, kg m⁻³

c_p = ilman ominaislämpö, J kg⁻¹ K⁻¹

r_s = pintavastus, s m⁻¹

r_a = aerodynaaminen vastus, s m⁻¹

LE = haihduntaan kuluva energia, W m⁻²

Δ = vesihöyrypaineikäyrän kaltevuus, mbar°C⁻¹

G = maahan siirtyvä energia, W m⁻²

γ = psykrometrivakio, mbar°C⁻¹

Pintavastuksella r_s tarkoitetaan vastusta, jonka kasvusto aiheuttaa maasta ilmaan pyrkivälle vedelle. Interseptioilanteessa pintavastuksen arvo on $r_s = 0$. Potentiaalisen haihdunnan salivissa oloissa sen on todettu olevan peltokasveilla $r_s = 40\text{--}60$ s m⁻¹ (Monteith 1981) ja havumetsillä $r_s = 100\text{--}200$ s m⁻¹ (Gash ja Stewart 1975). Otaniemen lysimetrikentällä suoritettujen mittausten mukaan toukokuussa keskimääräinen pintavastuksen arvo oli ruohikoille niinkin korkea kuin $r_s = 200$ s m⁻¹, kesä-elokuussa $r_s < 50$ s m⁻¹ ja syyskuussa $r_s \approx 150$ s m⁻¹ (Vakkilainen 1982). r_s :n arvo riippuu mm. kasvuston pituudesta ja tuulen nopeudesta.

tellusta haihdunnan arviointimenetelmästä on Penmanin yhtälö, jossa muuttujina ovat tuulen nopeus, nettosäteily, maahan menevä energia, vesihöyrynpaine ja ilman kyllästysvastus. Monteith (1965) kehitti Penmanin menetelmän muotoon, joka mahdollistaa myös todellisen haihdunnan laskennan (Tietoruutu 3.4).

Haihdunta Suomessa

Vuosisadannasta haihtuu Etelä-Suomessa runsaat puolet eli keskimäärin 400–500 mm. Sen sijaan Lapissa haihdunta on 30–40 % sadannasta eli keskimäärin 200–250 mm. Haihdunnan vuosivaihtelut ovat suurehkot johtuen kesäkauden ilmastollisten olosuhteiden suurista eroista. Vastaavasti haihdunta voi olla hyvin erisuuruista erilaisilta haihduttavilta pinnoilta. Suurinta haihtuminen on veden pinnalta ja pienintä lumen ja jään pinnalta. Kuva 3.3 esittää vuosihaihduntaa Suomessa.

Haihdunnan jakautumista eri kuukausien osalle on Suomessa selvitetty niukahkosti. Taulukossa 3.2 on koottu tuloksia selvityksistä, jotka kattavat vuoden kaikki kuukaudet. Niinivaara (1955) laski aluehaihdunta-arvot vesitasetta käyttäen pienille noin 5 km² suuruisille Kaakkois-Suomessa sijaitseville valuma-alueille. Näitä tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon, että niitä laskettaessa ei sadanta-arvoja ole korjattu. Otaniemen arvot perustuvat lysimetrikentällä tehtyihin mittauksiin (Kaitera ja Teräsvirta 1972, Järvinen 1978, Vakkilainen 1982).

Lumen pinnasta tapahtuva haihdunta on vähäistä. Kaiteran ja Teräsvirran (1972) suorittamien mittausten mukaan (taulukko 3.3) haihdunnan kuukausiarvot olivat keskital-

Taulukko 3.2 Haihdunnan jakautuminen eri kuukausille.

Kuukausihaihdunta (mm)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Koko vuosi
Latosuo ¹⁾													
mm	3	6	12	21	39	58	66	54	29	15	9	6	318
%	1	2	4	6	12	18	21	17	9	5	3	2	
Huhtisuo ¹⁾													
mm	6	8	12	24	45	65	73	61	33	19	12	9	367
%	2	2	3	7	12	18	20	17	9	5	3	2	
Otaniemi ²⁾													
mm	-2	-2	6	21	60	104	108	83	48	20	10	5	461
%	0	0	1	5	13	23	23	18	10	4	2	1	

Lähteet: ¹⁾ Niinivaara (1955), ²⁾ Kaitera ja Teräsvirta (1972), Järvinen (1978), Vakkilainen (1982)

Taulukko 3.3 Joulu-toukokuun kokonaishaihdunnat (mm) keskimääräisten mitattujen vuorokausiarvojen perusteella laskettuna (Kaitera ja Teräsvirta 1972).

1969/-70	Kuukausihaihdunta (mm)						
	XII	I	II	III	IV	V	Yhteensä
Otaniemi 1.1...15.4.		-1,55	-1,96	5,58	7,95		10,1
Sodankylä, aukea 1.1...15.5.		-1,55	-1,96	2,48	8,37	7,20	14,5
Sodankylä, metsä 1.1...23.5.		-1,55	-1,68	0,90	6,60	8,74	13,0
1970/-71	XII	I	II	III	IV	V	Yhteensä
Otaniemi 1.3...31.3.				4,34			
Sodankylä, aukea 1.12..10.5.	-3,10	-1,55	-1,40	0,62	15,30	7,10	17,0
Sodankylä, metsä 1.12..20.5.	-3,10	-1,86	-1,40	0,00	10,50	10,80	14,9

vella negatiivisia, ts. lumen pintaan tiivistyi enemmän vesihöyryä kuin siitä haihtui. Talven aikana tapahtunut kokonaishaihdunta jäi sekä Otaniemessä että Sodankylässä pienemmäksi kuin 20 mm.

Valunta

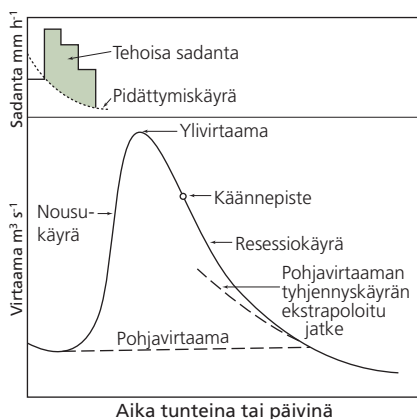
Valuntailmiön voidaan ajatella koostuvan kolmesta valunnan muodosta (ks. kuva 3.1):

- pintavalunnasta: se osa sadannasta tai sulannasta, joka ei haihdu eikä imeydy maaperään, vaan kulkeutuu painovoiman vaikutuksesta pintave-
tenä vesistöön,
- pintakerrosvalunnasta: se osa sadannasta tai sulannasta, joka imeytyy maa-
perään ja kulkeutuu maan pintakerroksissa vesiuumiin,
- pohjavesivalunnasta: se osa sadannasta tai sulannasta, joka imeytyy maa-
perään ja poistuu pohjavesien kautta vesistöön.

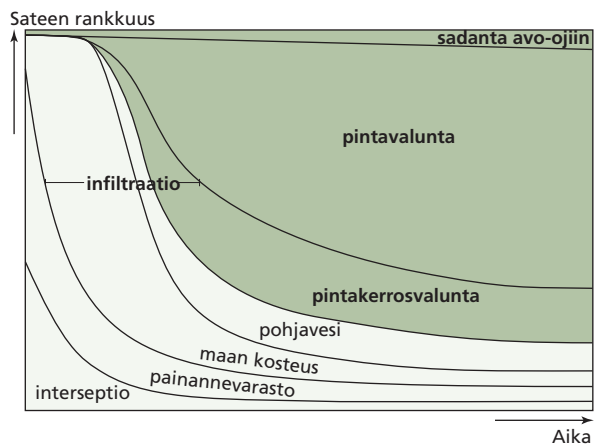
Valunnan eri osien suhteellinen suuruus riippuu sadannan tai sulannan ominaisuuksista ja alueen pinnan muodosta ja maaperästä. Maanpäällisen valunnan osuus muodostuu suu-
reksi, jos maanpinta läpäisee huonosti vettä. Tämä voi johtua maalajin hienorakeisuu-
desta, roudasta sekä luonnollisesta tai ihmisen aiheuttamasta maanpinnan tiivistymisestä.
Imeyntä on vähäistä silloinkin, kun maan huokostila on aikaisempien voimakkaiden satei-
den tai sulannan vuoksi veden kyllästämää.

Pintakerrosvalunta on suurta, jos maanpinta läpäisee hyvin, mutta pinnan alapuolella on läpäisemätön kerros, joka estää veden suotautumisen syvemmälle. Esimerkiksi pelto-
mailla muokkauskerroksen alle voi muodostua tiivis kyntöantura (jankko). Samoin luon-
nontilaisilla moreenimailla löyhän pintamoreenin alla on tiivistä pohjamoreenia. Pohja-
vesivalunnan osuus on suurin karkearakeisilla mailla, joilla pinnan imeyntäkapasiteetti on
suuri ja myös alla olevat kerrokset ovat hyvin vettä johtavia.

Pinta- ja pintakerrosvaluntaa, joista vesiuomien välitön valunta muodostuu, esiintyy
yleensä vain keväällä sulamisvesien aikaan ja syksyllä runsaiden sateiden kyllästettyä
maan. Sen sijaan kesällä ja talvella valunta on pääasiassa pohjavesivaluntaa. Tyypillinen
valuntakäyrä on esitetty kuvassa 3.15.



Kuva 3.15 Valuntakäyrä.



Kuva 3.16 Valunnan jakautuminen sateen rankkuuden ja keston mukaan.

Tietyn suuruisesta sulannasta tai sadannasta aiheutuva valunta vaihtelee samallakin valuma-alueella eri aikoina. Periaate-esitys valunnan jakautumisesta sateen rankkuuden ja keston mukaan on esitetty kuvassa 3.16. Valuntaan vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: ilmastollisiin, aluetekijöihin ja ihmistoiminnoista aiheutuviin. Valunnan vuotuinen vaihtelu noudattaa ilmastollisten tekijöiden rytmiiä.

Valuma-alueen ominaispiirteet vaikuttavat merkittävästi sekä valunnan määrään että sen ajalliseen jakautumiseen. Tällaisia piirteitä ovat valuma-alueen koko, muoto, järvisyys, topografia, maaperä, kasvillisuus ja maastotyyppi sekä uomien määrä ja kaltevuus. Alueen koko ja muoto vaikuttavat valunnan kerääntymisnopeuteen. Suurilla ja pitkänomaisilla valuma-alueilla valunnan kerääntyminen on hitaampaa kuin pienillä ja pyöreämuotoisilla alueilla ja tästä syystä valuntahuiput ovat loivemmat.

Järvet pienentävät oleellisesti ylivalumia ja tasoittavat alivalumia varastotilansa avulla. Veden pidättäytyminen on tehokkainta järvien sijaitessa valuma-alueen alaosissa.

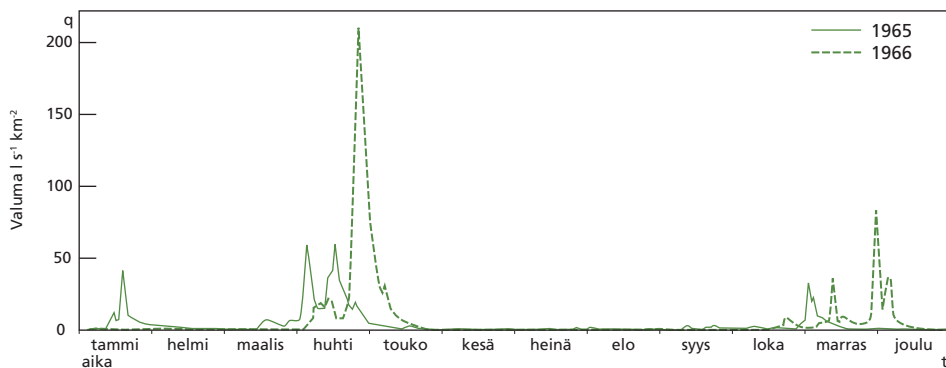
Valuma-alueen suuri kaltevuus lyhentää valuman kerääntymisaikaa ja kasvattaa ylivalumia. Tosin lumen sulamisesta aiheutuvaan ylivalumaan kaltevuudella ei ole niinkään merkitystä, sillä eri suuntiin kaltevilla rinteillä sulanta tapahtuu eri aikoina. Etelään viettäville rinteillä lumi saattaa olla täysin sulanut, kun varjoisilla pohjoisrinteillä on vielä tasainen lumipeite. Korkeussuhteilla on myös välillinen vaikutus valuntaan, sillä korkeusaseman kasvu merkitsee sadannan lisääntymistä, lämpötilan alenemista ja haihdunnan pienene- mistä ja näin valunnan kasvua.

Maa- ja kallioperän laatu vaikuttavat imeytyvän veden määrään, suotautumiseen sekä maa- ja pohjavesivarastojen suuruuteen. Karkeisiin maalajeihin vesi imeytyy hyvin alentaen näin ylivalumia. Samalla valuma-alueelle varastoituu runsaasti vettä, mikä kasvattaa alivalumia. Koska maanalaisista vesivarastoista ei haihdu merkittävästi kuivinakaan vuosina, ne ovat tässä suhteessa järviäkin tehokkaampia valuman tasaajia.

Runsas ja tiheä kasvillisuus alentaa sateesta aiheutuvaa valunnan huippua, sillä kasvipeite hidastaa pintavaluntaa ja edistää veden imeytymistä kuohkean juuristovyöhykkeen avulla.

Keväällä lumen sulaminen metsässä tapahtuu myöhemmin ja hitaammin kuin aukealla, mikä pienentää koko valuma-alueen ylivalumia. Peltoaukeilla ylivalumat ovat noin 1,5–2,0 kertaa suurempia kuin maaston suhteen muutoin samanlaisilla metsäalueilla. Myös luon- nontilaiset suot pienentävät ylivalumia, koska veden purkautuminen niiltä on hidasta. Avo- suot pienentävät myös keski- ja alivalumia runsaan haihdunnan vuoksi.

Kuvassa 3.17 on esitetty Lounais-Suomessa sijaitsevan pienen järveltömän Löytäneen- nojan valuma-alueen valumat kahdelta vuodelta. Alue on kooltaan 5,64 km² ja siitä on noin 2/3 viljelysmaata. Järveltömyydestä ja pellon suuresta määrästä johtuen alueella on havaittavissa voimakkaat ylivalumat ja selvät alivalumakaudet.



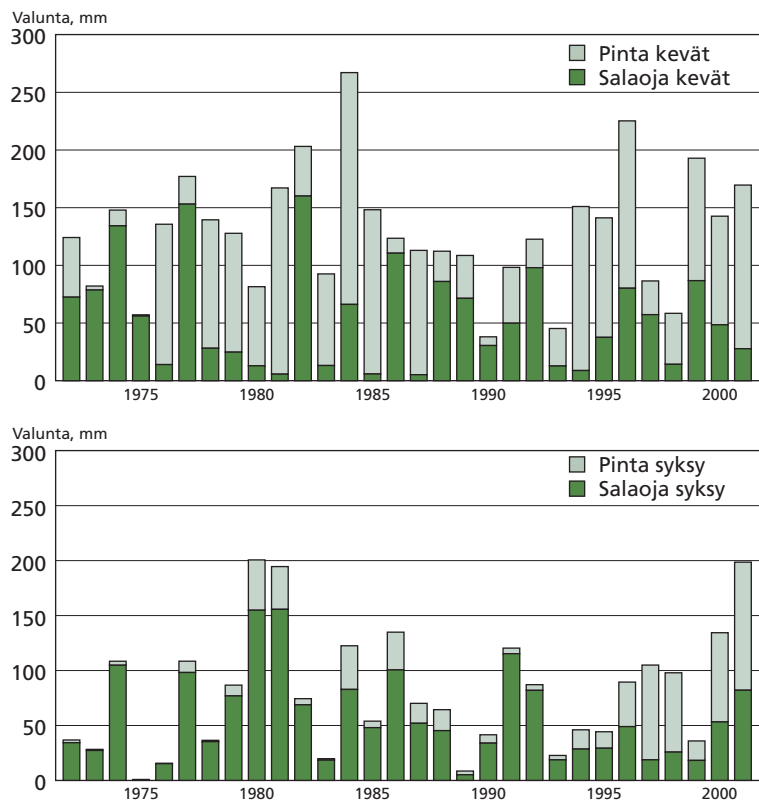
Kuva 3.17 Löytäneenojan valuma-alueen valuma (l s⁻¹ km²) vuonna 1965 ja 1966.

Ihmistoimintojen vaikutus näkyy valunnassa. Välittömiä vaikutuksia ovat esimerkiksi säännöstely, tulvapengerrykset ja vedenotto. Merkittävin välillinen vaikutus on taajama-rakentamisella. Se lisää kokonaisvaluntaa, kasvattaa ylivalumia ja pienentää alivalumia. Metsäojitus lisää valuntaa varsinkin ojitusta seuraavina vuosina. Turvetuotanto muuttaa myös valuntaolosuhteita. Käytännössä kaikki maanviljelykseen ja metsätalouteen liittyvät toimenpiteet vaikuttavat jossain määrin valuntaan. Peltosalaojitus kasvattaa jonkin verran kokonaisvaluntaa. Se muuttaa eri osavaluntojen suhteita vähentäen pintavaluntaa. Kuvassa 3.18 on esitetty Vihdissä sijaitsevan Hovin peltoalueen valunnan jakaantuminen pinta- ja salaojavaluntaan.

Vesirakenteiden mitoituksen perustana ovat yleensä ylivalumat, jotka Suomessa useimmiten aiheutuvat lumen sulannasta. Alivalumat ovat tärkeitä erityisesti vedenhankinnan kannalta, mutta niillä on merkitystä myös kastelun suunnittelussa ja luonnonmukaisessa vesirakentamisessa.

Vuoden keskimääräinen valunta Suomessa on esitetty kuvassa 3.4. Vuosivalunnan suuruus vaihtelee välillä 150–450 mm. Pienintä se on Lounais-Suomessa ja suurinta runsaslumisessa Koillismaassa. Keskivaluman arvot ovat 8–12 l km⁻² d⁻¹.

Sulamiskauden aikainen kevätvalunta on keskimäärin 100–200 mm eli noin 80 % lumen vesiaron maksimista ja 30–50 % vuosivalunnasta. Kesävalunnan osuus on keskimäärin 100 mm. Syyskuusta lumipeitteen tuloon saakka tapahtuva syysvalunta vaihtelee huomattavasti vuosittain vaihtelevien ilmasto-olosuhteiden vuoksi. Etelä-Suomessa syysvalunta



Kuva 3.18 Valunnan jakautuminen pinta ja salaojavaluntaan Hovin valuma-alueella vuosina 1972–2000 (Suomen ympäristökeskus 2004).

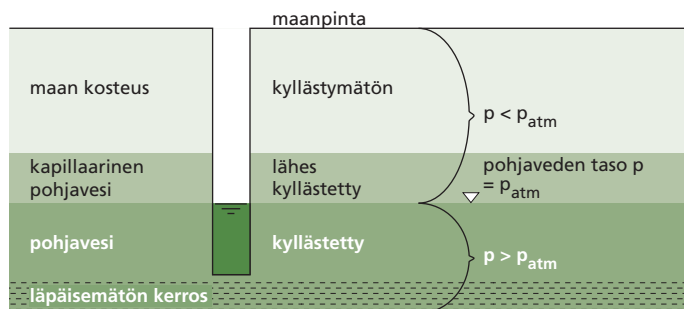
on keskimäärin 50–100 mm, mutta saattaa poikkeuksellisinä vuosina ylittää 100 mm tai jäädä alle 10 mm. Maan pohjois- ja keskiosissa syysvalunta jää pienemmäksi pysyvän lumipeitteen tullessa aikaisemmin. Talvivalunnan suuruus on keskimäärin 50 mm. Eteläisellä ja lounaisella rannikkoalueella suojasäät saattavat aiheuttaa toisinaan huomattavasti runsaampaakin valuntaa.

3.3 Maaperässä olevat vedet

Maaperässä pohjaveden pinnan yläpuolella kyllästymättömässä kerroksessa olevia vesiä nimitetään yleensä maavesiksi. Veden pidättymiseen ja liikkeisiin maan huokosissa vaikuttavat ennen kaikkea maaperän tekstuuri eli lajitekoostumus ja struktuuri eli maan rakenne.

Maassa olevan veden määrä ja sen pidättymisen voimakkuus riippuvat maan ominaisuuksien lisäksi pohjaveden korkeudesta. Pohjaveden korkeus määrittelee suureksi osaksi, millainen kosteusprofiili maaperään syntyy syvyysuunnassa. Välttämättä pohjaveden yläpuolelle muodostuu kapillaarivyöhyke, jonka paksuus riippuu maan ominaisuuksista. Maaprofiilissa olevat vesivyöhykkeet on esitetty kuvassa 3.19.

Maan kosteus ilmaistaan yleensä tilavuusprosentteina samoin kuin huokoisuus. Maan vedenpidätysominaisuuksia kuvataan puolestaan vedenpidätys- eli ns. pF-käyrän avulla. Käyrä kuvaa maan vesipitoisuuden ja painepotentiaalin suhdetta. Maan kosteustila vaikuttaa oleellisesti siihen, miten hyvin vesi liikkuu maassa. Hydraulisen johtavuuden suuruus muuttuu painepotentiaalin muuttuessa.



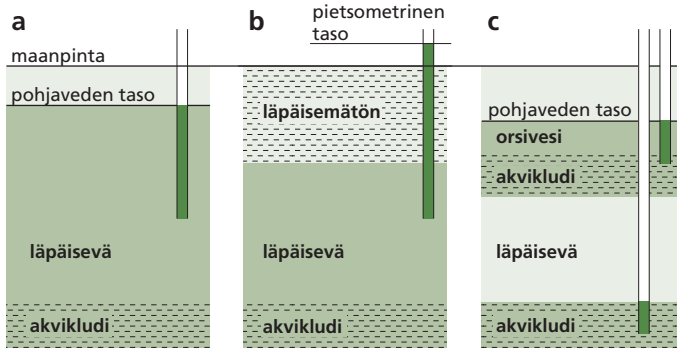
Kuva 3.19
Maaprofiilissa olevat vesivyöhykkeet.

Pohjavesi

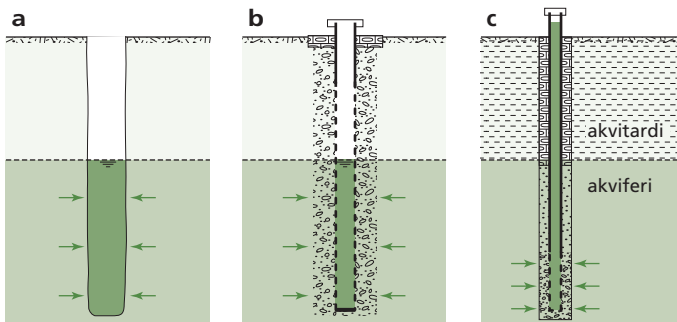
Pohjaveden pinnan taso on se korkeustaso, jossa veden paine on yhtä suuri kuin ilmakehän paine samalla tasolla. Jos maaperä on niin karkearakeista, ettei vesi nouse kapillaarisesti, on pohjaveden pinta käytännöllisesti katsoen sama kuin vedellä kyllästyneen ja kyllästymättömän vyöhykkeen rajapinta. Jos taas maaperä on hienorakenteista, on vedellä kyllästyneen vyöhykkeen raja ylempänä kuin varsinainen pohjavedenpinnan taso.

Suomessa pohjavedenpinta on yleensä lähellä maanpintaa ja myötäilee sen muotoja. Olosuhteissamme voidaan tavallisesti erottaa kaksi pohjavedenpinnan merkittävää nousuvaihetta. Ne aiheutuvat kevätulannan ja syyssateiden vaikutuksesta. Näiden välisinä aikoina pohjavedenpinta yleensä laskee.

Akviferi eli pohjavesijohdin on veden kyllästämä ja vettä hyvin johtava maa- tai kallioperän muodostuma. Akvikludi on vettä sisältävä, mutta lähes vettä läpäisemätön kerros.

**Kuva 3.20**

a) Vapaa pohjavesi
b) Paineellinen pohjavesi
c) Orsivesi.

**Kuva 3.21**

Pohjavedenkorkeuden
mittaaminen
a) suoraan
kairanreistä
b) putkella tuetusta
kairanreistä ja
c) pietsometrillä.

Akvitardi on vettä sisältävä, mutta johtaa sitä huonosti. Pohjavesimuodostumia on kolmea eri tyyppiä (kuva 3.20). Yleisin on vapaa pohjavesi. Paineellinen pohjavesi saattaa syntyä tiiviin maakerroksen alapuolelle. Mikäli maaperässä esiintyy vedenjohtavuudeltaan erilaisia kerroksia, voi samalla kohdalla esiintyä päällekkäin useita veden kyllästämiä osia. Jää-tikköjokimuodostumissa tavataan varsin yleisesti vettä johtamattomia kerrostumia, joiden päälle on muodostunut vedellä kyllästyneitä kerroksia varsinaisen pohjaveden yläpuolelle. Tällaisia vesiesiintymiä kutsutaan orsivesiksi.

Pohjaveden korkeus voidaan mitata kairanreistä, jota tuetaan tarvittaessa putkella. Pietsometri on pohjavesiputki, johon vesi pääsee vain rei'itetystä kohdasta, ja jolla vedenpaine voidaan mitata halutusta korkeudesta (kuva 3.21).

Maan vedenpidätyskyky

Sidosvoimat

Vesi sitoutuu maarakeen pinnalle sähkömagneettisten voimien vaikutuksesta. Vesivaippa, jonka paksuus on suuruusluokkaa 0,0005 mm, kiinnittyy maarakeen pinnalle voimalla, joka on noin 70 000 kertaa painovoiman suuruinen. Sidosvoiman suuruus pienenee, kun etäisyys rakeesta kasvaa (kuva 3.22).

Kapillaarivyöhyke on pohjaveden pinnan yläpuolella oleva kerros, johon kapillaarivoimat nostavat vettä. Voidaan olettaa, että maan huokostila muodostuu kapillaariputkista, joissa pintajännitysvoima aiheuttaa tunnetun kapillaari-ilmiön (kuva 3.23). Mitä ohuem-masta huokosputkesta on kyse, sitä korkeammalle vesi siinä nousee.

Nousukorkeudet voidaan laskea kaavasta (3.7). Eräiden maalajien kapillaariset nousu-korkeudet on esitetty taulukossa 3.4.

$$h = \frac{0,15}{r}$$

h

=

nousukorkeus (cm)

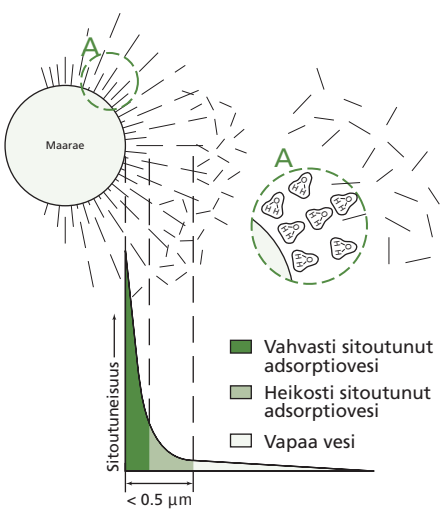
r

=

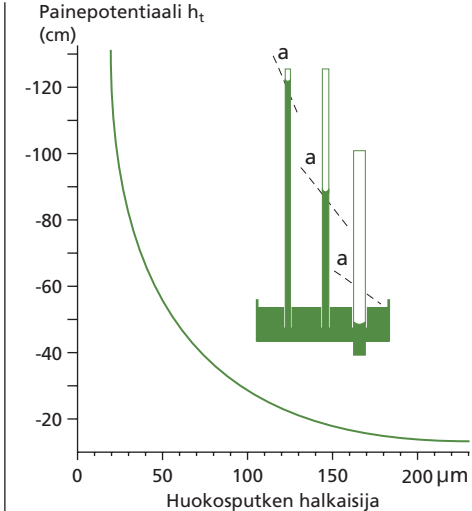
huokosputken säde (μm)

(3.7)

Kyllästämättömässä vyöhykkeessä kapillaarisuuden aikaansaama virtaus on käytännössä varsin työläs määrittää. Yleisimmin käytetyt menetelmät ovat erilaiset lysimetrit ja imukuppimenetelmät. Kapillaarisen nousun ansiosta voivat kasvit kuivina kausina saada tarvitsemansa veden pohjavesivyöhykkeestä. Kapillaarisen nousun korkeus ei tosin tällöin ole yksinomaan ratkaiseva tekijä, vaan merkitystä on nimenomaan nousevilla vesimäärillä (ks. Tietoruutu 3.5).



Kuva 3.22 Vesivaipan muodostuminen maahiukkasten ympärille.

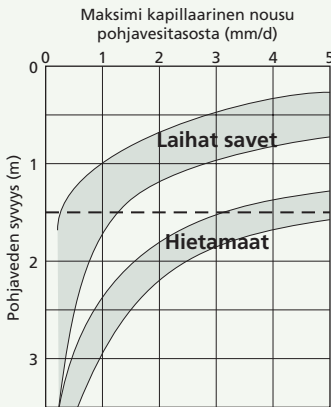


Kuva 3.23 Nousukorkeuden ja huokoskoon välinen riippuvuus (Bouma 1977).

Taulukko 3.4 Kapillaarinen nousu eräillä maalajeilla.

Maalaji	Partikkelikoko, mm	Kapillaarinen nousu, cm
Karkea sora	20,0 - 6,0	0,3 - 1,0
Hieno sora	6,0 - 2,0	1,0 - 3,0
Karkea hiekka	2,0 - 0,6	3,0 - 10,0
Hieno hiekka	0,6 - 0,2	10,0 - 30,0
Karkea hieta	0,2 - 0,06	30,0 - 100,0
Hieno hieta	0,06 - 0,02	100,0 - 300,0
Karkea hiesu	0,02 - 0,006	300,0 - 1000,0
Hieno hiesu	0,006 - 0,002	1000,0 - 3000,0
Savi	0,002 - 0,0002	3000,0 - 30000,0
Savi	< 0,0002	> 300,0 (m)

Tietoruutu 3.5



Kuva T3.1 Kapillaarinen nousu pohjaveden syvyyden funktiona eri maalajeissa.

Kapillaarinen nousu

Kapillaarisen nousun määrällisistä arvoista ei juurikaan löydy aineistoa lauhkean vyöhykkeen alueelta. Sen sijaan aridisilla alueilla, joilla juuristokerroksen suolaantumisen estäminen on kuivatuksen keskeisin tavoite, kapillaarisen nousun suuruudesta on arvioita. Kuvassa T3.1 on esitetty laihojen savien ja hietojen kapillaarisen nousun määriä. Maalajin merkitystä kuvastaa esimerkiksi 1,5 metrin pohjaveden syvyydestä pintaa kohti nousevat määrät, jotka savilla ovat keskimäärin 1 mm d⁻¹ ja hiedoilla 4-5 mm d⁻¹.

Kuvasta voidaan niin ikään todeta, että hiedat pysyvät vielä kahden metrin syvyydeltäkin antamaan kahden millimetrin verran vettä, kun savimailla kapillaarisen nousun merkitys kasvien tarpeeseen nähden voi olla jo merkityksetöntä, vaikka taulukon 3.4 mukaan nousukorkeus hyvinkin riittää. Viljelyssä tunnetaan hietamaat hiekkavuudesta ja hyvästä kuivuuden kestävydestä.

Kuvan arvot esittävät tilannetta, jossa pintamaan kosteus on kasvien lakastumisrajalla. Kuivan kauden seurauksena pohjaveden lasku pienentää kapillaarisen nousun nopeutta, koska vedenjohtavuus pienenee.

Maaveden potentiaalit

Kappaleella oleva kokonaisenergia jaetaan klassisessa fysiikassa kineettiseen energiaan ja potentiaalienergiaan. Maaveden liike on yleensä siksi hidasta, että virtausnopeuden neliöön suoraan verrannollinen kineettinen energia jää merkityksettömän pieneksi. Maavedellä on näin ollen energiaa, potentiaalia, käytännöllisesti katsoen sen verran, kuin sillä on potentiaalienergiaa.

Maaveden potentiaalilla tarkoitetaan sitä työtä, joka tarvitaan massayksikön suuruisen vesimäärän siirtämiseen perustasolta tarkasteltavaan kohtaan. Kokonaispotentiaali muodostuu useista komponenteista, mutta merkitystä on yleensä vain seuraavilla:

$$h_{\text{kok}} = h_g + h_t + h_{\text{osm}} \quad (3.8)$$

- h_{kok} = kokonaispotentiaali, cm v.p.
- h_g = painovoimapotentiaali, cm v.p.
- h_t = paine- eli matrikpotentiaali, cm v.p.
- h_{osm} = osmoottinen potentiaali, cm v.p.

SI-järjestelmän mukainen paineen yksikkö on pascal (1 Pa = 1 N/m²). Pascalin ja tässä käytetyn yksikön, metriä vesipatsasta (m v.p.), välillä on yhteys, 1 m v.p. = 9810 Pa.

Painovoimapotentiaali h_g

Jokaista maapallon pinnalla olevaa kappaletta vetää kohti maapallon keskustaa voima, jonka suuruus on kappaleen massan ja painovoiman kiihtyvyyden tulo. Jos kappaletta

nostetaan ylemmäs, joudutaan tekemään työtä. Tehty työ varastoituu kappaleeseen painovoimapotentiaaliksi. Tämän määrä riippuu kappaleen sijainnista painovoimakentässä.

Maavedellä oleva painovoimapotentiaali määritellään ao. kohdan etäisyydeksi jostakin vertailutasosta. Jos merkitään tarkasteltavan pisteen ja vertailutason etäisyyttä z , vedellä olevaa massaa m ja tiheyttä ρ sekä painovoiman kiihtyvyyttä g , on painovoimapotentiaali:

- massayksikköä kohti gz
- tilavuusyksikköä kohti ρgz
- painoyksikköä kohti z

Painovoimapotentiaalin suuruus riippuu siis ainoastaan tarkasteltavan kohdan suhteellisesta korkeustasosta.

Painepotentiaali h_t

Pohjaveden pinnan alapuolella vallitsee hydrostaattisen paineen suuruinen ylipaine, kun taas pohjavedenpinnan yläpuolella maan imua aiheuttavat voimat aikaansaavat veteen alipaineen. Pohjaveden pinnassa paine on ilmanpaineen suuruinen. Kun ilmanpaine yleensä otetaan vertailutasoksi, on painepotentiaali pohjavedenpinnan alapuolella positiivinen, yläpuolella negatiivinen. Viimemainittua kutsutaan usein matrikpotentiaaliksi.

Painepotentiaalin suuruus on mukavinta ilmaista painoyksikköä kohti, koska tällöin päästään laatuun cm vesipatsasta (cm v.p.). Maan vedenpidätyskäyrä kuvaa matrikpotentiaalin ja maan kosteuden välisen yhteyden.

Osmoottinen potentiaali, h_{osm}

Maavedessä liuenneena olevat aineet alentavat yleisesti ottaen veden potentiaalia. Osmoottinen potentiaali tarvitsee kuitenkin kehittyäkseen puoliläpäisevän kalvon, joka erottaa eri väkevyiset liuokset toisistaan. Näin ollen sillä on merkitystä lähinnä juurten vedenotto-tapahtumassa.

Hydraulinen korkeus, H

Painovoima- ja painepotentiaali määräävät käytännössä maaveden energiatilan. Näiden summaa nimitetään hydrauliseksi korkeudeksi H :

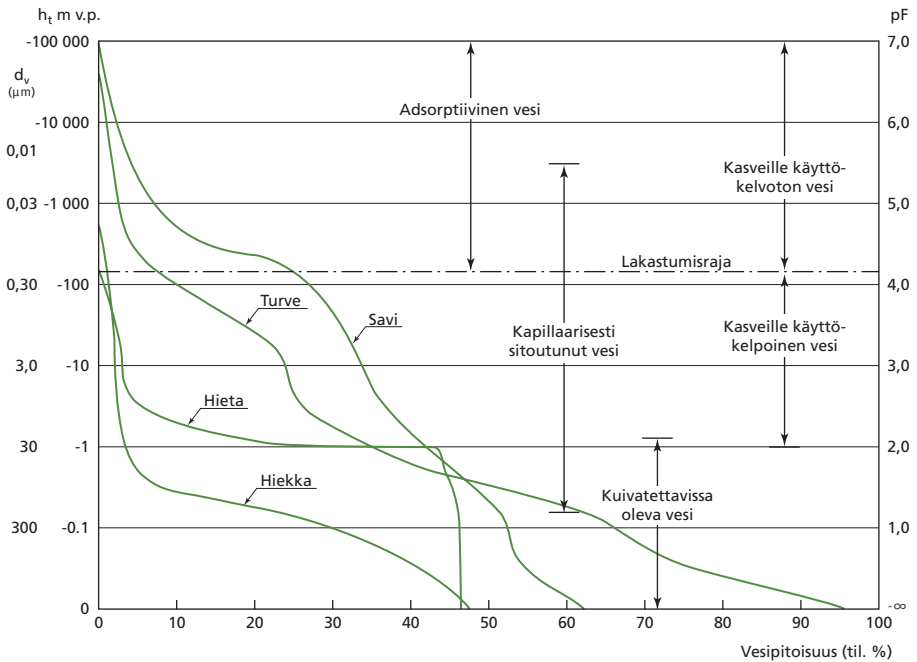
$$H = h_g + h_t \quad (3.9)$$

Vedenpidätyskäyrä

Maan kyvystä sitoa vettä saadaan parhaiten käsitys vedenpidätyskäyrän avulla (kuva 3.24). Vedenpidätyskäyrän saamiseksi kohdistetaan kyllästettyyn maanäytteeseen alipaine, imu. Imun ollessa pieni maa ei luovuta vettä lainkaan, mutta kun imua kasvatetaan ns. ilman sisään tulopisteeseen, suurimmat huokokset tyhjenevät. Imua edelleen lisättäessä yhä pienemmät huokokset luovuttavat vetensä. Vedenpidätyskäyrä kuvaa imun ja maan vesipitoisuuden välistä vuorosuhdetta. Samalla se kuvaa maaprofiilin kuivatustasapainotilannetta eli tilannetta, jossa maaprofiilissa ei tapahdu veden virtausta.

Vedenpidätyskäyrä piirretään koordinaatistoon, jossa toisena akselina on vesipitoisuus tilavuusprosenttina ja toisena imu (h_t), joka usein ilmaistaan vesipatsaan korkeutena.

Kuvassa 3.24 on h_t -asteikon vieressä toinen asteikkojaotus, d_v -asteikko. d_v on huokosputken halkaisija, jossa kapillaarivoimat ovat tasapainossa imuvoiman kanssa. Vedenpidätyskäyrä kuvaa näin ollen myös maan huokoskokojakamaa. Diagrammin oikeassa reunassa on kolmas jaotus, ns. pF -asteikko. pF -luvulla tarkoitetaan imun kymmenlogaritmia, kun imu on ilmaistu yksikössä cm vesipatsasta.



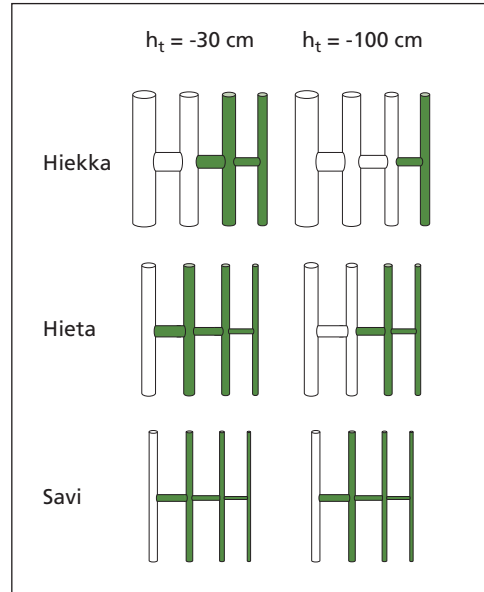
Kuva 3.24 Eräiden maalajien vedenpidätyskäyriä (Andersson 1971).

Maaveden sitoutumisen voimakkuus vaihtelee valtavalla välillä $h_t = 0$ – $-100\,000$ m v.p. Huokokset ovat täynnä vettä, kun $h_t = 0$, ja täysin kuivat, kun $h_t = -100\,000$ m v.p. Kuvaan 3.24 on merkitty eräitä keskeisiä kosteusrajoja. Kuivatustoimenpiteillä pohjavedenpinta pidetään yleensä tason 1,0–1,2 m alapuolella. Tällöin 30 μm kokoluokkaa suuremmat huokokset tyhjenevät maan pintakerroksissa ja ilma korvaa poistuneen veden. Poistunutta vettä nimitetään kuivatettavissa olevaksi vedeksi ja maan sanotaan olevan kenttäkapasiteettitilassa.

Kasvit kykenevät kehittämään imun, jonka suuruus on noin 150 m v.p. Tätä imua nimitetään lakastumisrajaksi. Lakastumisrajaa pienemmällä imulla sitoutuneet vedet ovat siis kasvien käytettävissä.

Diagrammin keskiosassa on kapillaarisesti sidotun veden vyöhyke, joka karkeasti ulottuu alhaalla 15–20 m v.p. imuun ja ylhäällä 2000–3000 m:n imuun. Tämän vyöhykkeen yläpuolella on alue, jossa vesi on adsorptiivisesti sidottua. Adsorptiivisesti sidottu vesi on kasvien saavuttamattomissa.

Lakastumisrajan ja kenttäkapasiteetin vesipitoisuuden erotusta kutsutaan hyötykapasiteetiksi, jota vastaavan vesimäärän ajatellaan olevan kasvin käytettävissä. Kuitenkin maan



Kuva 3.25 Veden pidättyminen kolmessa eri tyyppisessä maalajissa imun arvoilla -30 cm ja -100 cm.

kuivuessa kasvien vedenotto vaikeutuu jo ennen lakastumisrajaa. Ylimalkaan voidaan sanoa parhaimman hyötykapasiteetin olevan hiesulla ja sen vähenevän maalajin raekoon suurentuessa tai pienentyessä. Orgaanisen aineen lisääminen parantaa usein maan rakennetta ja hyötykapasiteettia.

Mitä suurempi on maan hyötykapasiteetti, sitä paremmin maa pystyy varastoimaan vettä ja sitä paremmin kasvit kestävät poutakausia ja haihtuminen on sitä vähemmän riippuvainen sateiden tasaisuudesta.

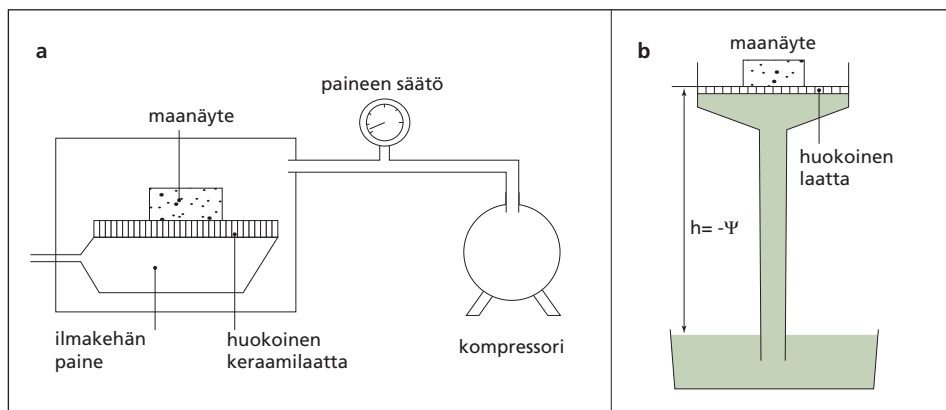
Maassa voidaan erottaa kahdenlaista huokoisuutta: tekstuurin eli raekoostumuksen määräämä huokoisuus ja struktuurin eli rakenteen määräämä huokoisuus. Ensin mainitussa tapauksessa huokokset sijaitsevat partikkelien välissä, kun taas struktuurin määräämät huokokset ovat huokosia murujen, halkeamien yms. välissä. Huokosten koossa on merkittävä ero: tekstuurihuokokset ovat pieniä, struktuurihuokokset suuria.

Kuvassa 3.24 on esitetty hiekan, hiedan, saven ja maatumattoman turpeen vedenpidätyskäyrät. Eri materiaalien välillä on suuria eroja. Maan ollessa täysin kyllästyneessä tilassa on vesipitoisuus yhtä suuri kuin kokonaishuokoisuus. Hiekalla huokoisuus on 46,6, hiedalla 45,9, savella 61,5 ja turpeella 95,0 tilavuusprosenttia.

Kun vettä imetään 10 cm:n v.p. alipaineella niin havaitaan, että hietaa lukuun ottamatta materiaalit luovuttavat merkittäviä määriä vettä. Vastaavat huokokset täyttyvät ilmalla. Kun $h_t = 0.1$ m v.p. poistuu hiekasta vettä 18 tilavuusprosenttia, hiedasta ei juuri mitään, savesta 10 tilavuusprosenttia ja turpeesta 30 tilavuusprosenttia. Kun imua lisätään normaaliin kuivatussyvyyteen eli 1,0 metriin ja oletetaan, että pohjavedenpinta on tällä syvyydellä, niin pintakerrokseen aiheutuu imu $h_t = 1,0$ v.p. Diagrammin mukaan maanpintaan jää vettä maalajista riippuen seuraavasti: hiekka 3,6 hieta 41,5, savi 41,4 ja turve 34,0 tilavuusprosenttia. Pohjaveden pinnan alentamisella maanpinnasta 1,0 metrin syvyyteen saadaan näin ollen pintakerroksesta poistumaan vettä hiekasta 43, hiedasta 4, savesta 20 ja turpeesta 61 tilavuusprosenttia.

Lakastumisrajalla vesipitoisuudet ovat seuraavat: hiekka 1,0, hieta 0,2, savi 24,1 ja turve 6,8 tilavuusprosenttia. Kasvien käytettävissä on näin ollen vettä hiekassa 2,6, hiedassa 41,3, savessa 17,3 ja turpeessa 27,2 tilavuusprosenttia.

Vedenpidätys- eli pF-käyrän määrittämiseksi on kehitetty sekä suoria että epäsuoria menetelmiä. Tässä yhteydessä esitetään vaikeimmalla laboratoriosta käytetyn menetelmän periaate. Määrittäminen tehdään yleensä kahdessa osassa.

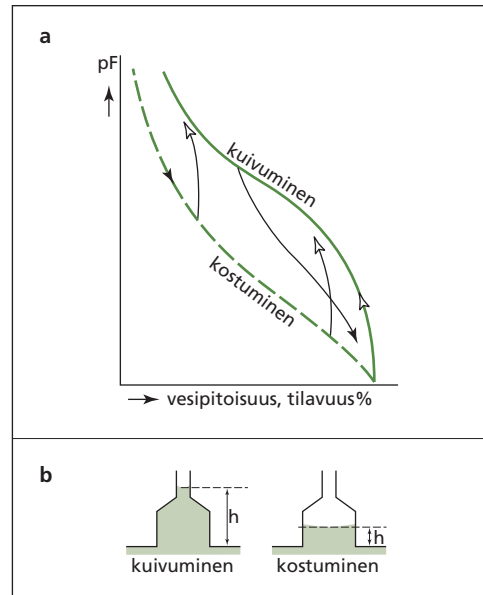


Kuva 3.26 Vedenpidätyskäyrä määritetään suurilla potentiaalilla kuvan a mukaan ja pienillä kuvan b mukaan.

Suurilla painepotentiaaleilla käytetään painekammio menetelmää. Tällöin maanäyte asennetaan painekammioon, jossa siihen kohdistetaan ylipaine ilmakompressorilla. Tämän menetelmän periaate on esitetty kuvassa 3.26a.

Pienillä potentiaaleilla käytetään vesipatsasta, jonka korkeutta voidaan muuttaa. Häiriintymätön maanäyte, jonka tilavuus tunnetaan, asetetaan huokoiselle levyille, josta on yhteys vesipatsaaseen. Menetelmää kutsutaan ”riippuva vesipatsas” -menetelmäksi. Sen periaate on esitetty kuvassa 3.26b. Kummassakin menetelmässä mitataan poistuvan veden määrä tietyssä alipaineessa.

Maan vesipitoisuus on erilainen riippuen siitä, onko kyseessä kosteuden muutos pienempään suuntaan eli kuivatuksesta vai kuivan maan kostumisesta. Ilmiöstä käytetään nimitystä hysterees (ks. kuva 3.27). Maan kuivuessa maan vesipitoisuus on suurempi kuin maan kostuessa tietyn suuruisen painepotentiaalin arvolla.



Kuva 3.27 Maaveden potentiaalin ja maan kosteuden yhteys maan kuivuessa ja sen kostuessa, ns. hysterees-ilmio.

Saviaineksen ja humuksen merkitys

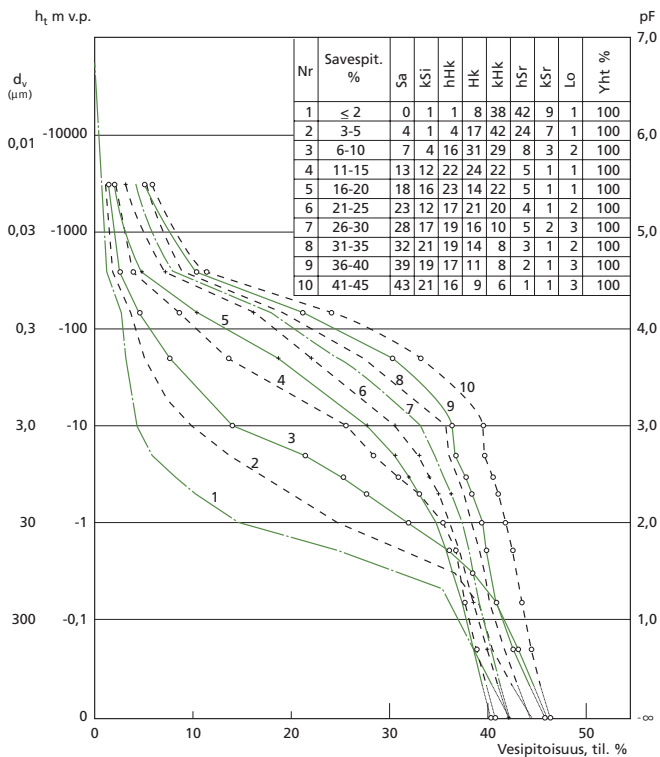
Vedenpidätkäyrä kuvaa maan huokoskoon jakautumaa. Karkeissa maalajeissa huokokset ovat suuria ja jo pieni imu saa ne tyhjenemään vedestä. Sen sijaan suuri savespitoisuus merkitsee pieniä huokosia, joihin vesi on lujasti sitoutunut.

Savespitoisuuden ohella humuksen määrä vaikuttaa merkittävästi maan vedenpidätkäkykyyn. Humuspitoisuuden kasvu lisää maan ominaispinta-alaa ja edesauttaa mururakenteen syntymistä ja luo maahan kasvien vedensaannin kannalta suotuisan huokoskoon.

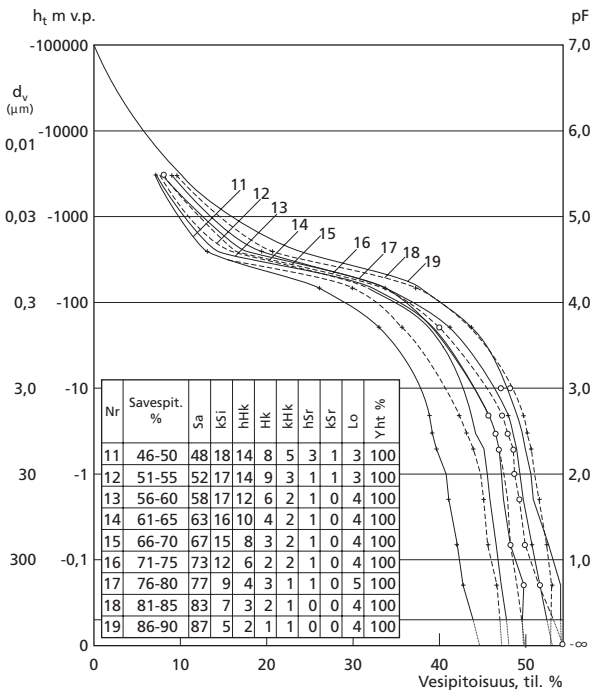
Ruotsissa on suoritettu laajoja kokeellisia tutkimuksia erilaisten maiden vedensitomiskyvystä. Näiden tutkimuksen päätuloksia on esitetty kuvissa 3.28, 3.29, 3.30 ja 3.31. Maan savespitoisuuden ja humuksen määrän vaikutus vedenpidätkäkykyyn on näissä selvästi todettavissa.

Maankosteuden mittaaminen

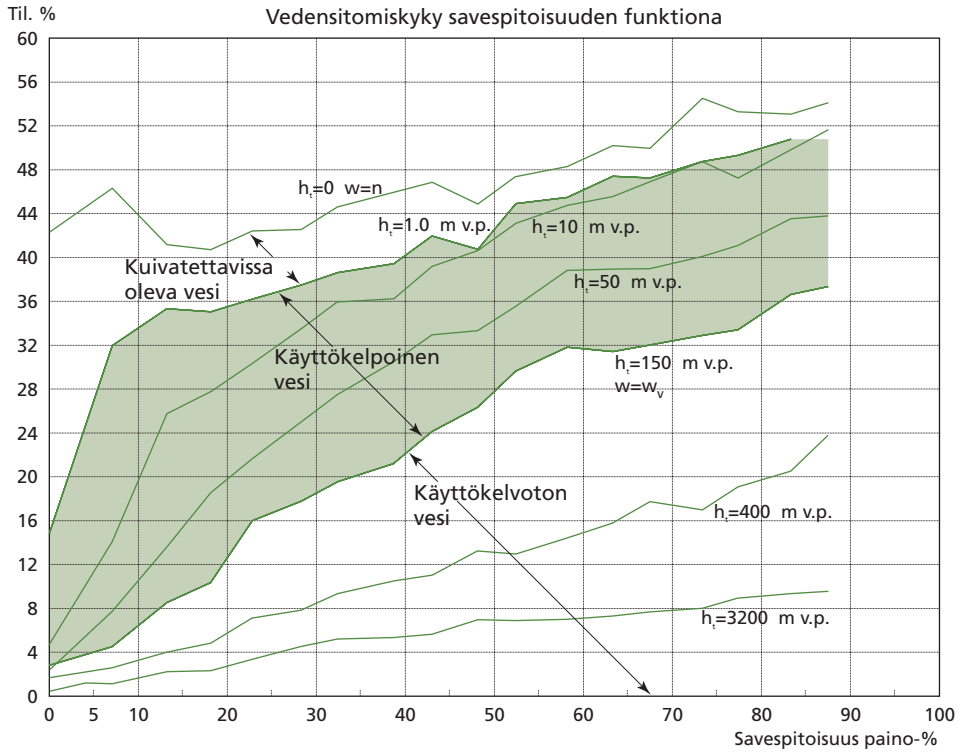
Maankosteuden mittaamenetelmät voidaan jakaa välittömiin (suora) ja välillisiin (epäsuora) menetelmiin. Välittömissä menetelmissä määritetään suoraan maan vesipitoisuus maaperästä otetusta näytteestä. Vesi poistetaan näytteestä joko fysikaalisesti tai kemiallisesti, ja poistuvan veden määrä mitataan. Yleisimmässä ns. gravimetrisessä menetelmässä tilavuudeltaan tunnettu näyte punnitaan luonnontilassa ja 105°C lämpötilassa kuivatettuna joko perinteisessä uunissa tai mikroaaltouunissa. Kosteuspitoisuus ilmoitetaan yleensä ilman dimensioita joko suhdelukuna tai prosentteina. Suhdeluku on joko veden ja kuivan maan massojen välinen suhde tai veden ja koko maanäytteen tilavuuksien välinen suhde. Gravimetrisen menetelmä on yksinkertainen mutta varsin hidas ja työläs eikä määrittystä voi tehdä samasta pisteestä uudestaan.



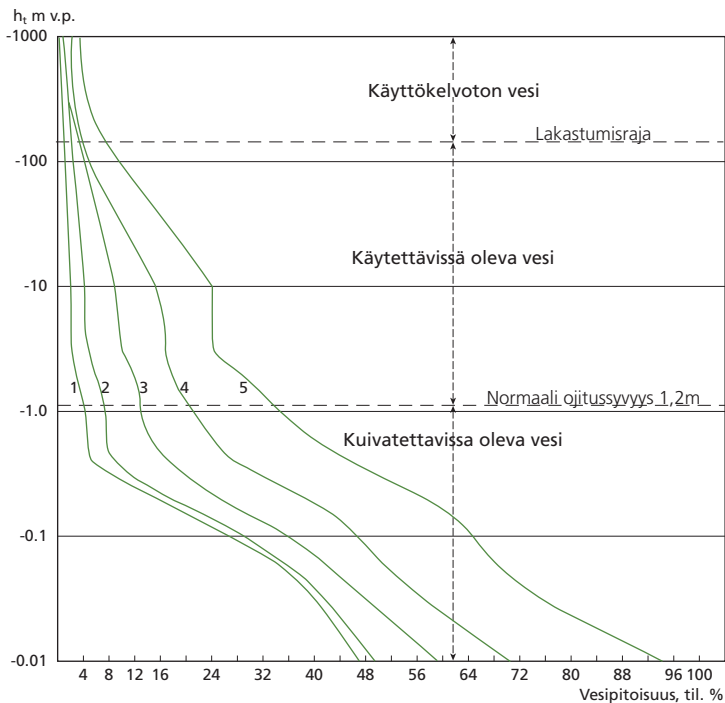
Kuva 3.28 Vedensitoutumiskäyriä eri maalajeille. Käyrät ovat keskiarvokäyriä savespitoisuusluokille <2, 3–5, 6–10, 11–15...41–45 % saviainesta. Vedensitominaisuudet muuttuvat säännönmukaisesti savipitoisuuden kasvaessa. (Andersson ja Wiklert 1972)



Kuva 3.29 Vedensitoutumiskäyriä eri maalajeille. Käyrät ovat keskiarvokäyriä savespitoisuusluokille 46–50, 51–55...86–90 % saviainesta. (Andersson ja Wiklert 1972)



Kuva 3.30 Maan savespitoisuuden ja vedenpidätyskyvyn yhteys (Andersson ja Wiklert 1972).



Kuva 3.31

Vedenpidätyskyvyn riippuvuus humuksen määrästä. Hiekkaan on sekoitettu vaihtelevia määriä humusta.

Käyrä 1 vastaa puhdasta hiekkaa, 2 hiekkaa, johon on sekoitettu 0,7 painoprosenttia humusta, 3 tilannetta, jossa humusta on 2,1 %, ja 4 tilannetta, jossa humusta on 6,0 %. Käyrä 5 esittää turpeen vedenpidätyskykyä.

Kuivatussyvyydellä 1 m lisääntyä hyödyllisen vesivaraston määrä 20 cm:n muokauskerroksessa 25 mm, jos hiekkaan sekoitetaan 6 % humusta. (Anderson 1968)

Välillisissä menetelmissä ei mitata suoraan vesipitoisuutta, vaan jotain muuta maan kosteussuhteita ilmentävää ominaisuutta. Käytännössä maan vesipitoisuus saadaan empiirisen kalibroinnin avulla. Välillisiä menetelmiä ovat muun muassa:

Tensiometrit

Maasta voidaan mitata painepotentiaali tensiometrin avulla. Tensiometri koostuu keraamisesta kupista ja siihen yhdistetystä putkesta ja painemittarista. Kun putki on täytetty vedellä ja suljettu, huokoinen kuppi upotetaan maahan ja painemittarista saadaan luettua alipaine, joka syntyy veden imeytyessä maahan. Tyypillisesti tensiometrejä käytetään viljelmillä kastelutarpeen määrittämiseen ja ne soveltuvat vain kosteahkon maan (<100 kPa) mittauksiin. Tensiometrin antama lukema saadaan muunnettua maankosteudeksi vedenpidätyskäyrän avulla

Kipsiblokit/maan resistiivisyys

Menetelmä on yksi vanhimmista maankosteuden määrittämistavoista. Siinä maahan upotetaan kipsipala, jonka sisälle on upotettu verkkomaiset elektrodit. Mitä kosteampaa kipsi on, sitä helpommin sähkö kulkee elektrodien välillä. Sähkönjohtavuus ilmaisee kipsissä olevan veden määrää ja kalibrointikäyrän perusteella voidaan määrittää maan kosteus. Usein kipsiblokkianturien tuloksilla pyritään kuvaamaan maassa kasveille käyttökelpoisen veden määrää. Kipsiblokkien yleisenä ongelmana on kipsin liukeneminen maahan, resistiivisyyksmittauksen herkkyys maan ionipitoisuuden muutoksille ja anturien rajoitettu herkkyys kosteustilan vaihtelulle. Uusimmissa mittareissa käytetään muitakin huokoisia materiaaleja kuin kipsiä.

Kapasitiiviset menetelmät

Näissä menetelmissä maahan asennetaan elektrodit, joiden välillä kulkevien elektromagneettisten aaltojen resonanssin taajuus mitataan. Resonanssin taajuudesta voidaan määrittellä maan dielektrisyysvakio ja siitä laskea maan tilavuuskosteus. Nykyisissä laitteissa käytetään yleisesti 30–100 MHz aallonpituuksia. Menetelmä on monikäyttöinen, kapasitiivisten anturien koko ja muoto helposti muokattavissa ja mittaus helposti automatisoitavissa. Kapasitiiviset anturit ovat yleistyneet kohtalaisen luotettavuuden ja huokeahkon hinnan ansiosta. Kaupallisista laitteista yleisimmät perustuvat FDR-tekniikkaan (Frequency Domain Reflectometer), missä käytetty mittaustaajuus riippuu maan kosteudesta.

Elektromagneettiset menetelmät

Näistä yleisin on TDR-menetelmä (Time Domain Reflectometry). Anturi koostuu kahdesta tai useammasta metallipiikistä, jotka upotetaan maahan. Anturin päästä lähetetään sähkömagneettinen aaltoliikepulssi, joka etenee tasomaisena metallielektrodien läheisyydessä ja heijastuu piikkien päistä takaisin lähetyspään vastaanottimeen. Elektrodien pituuden ollessa tunnettu saadaan mitattua heijastuman viive suhteessa pulssin kulkunopeuteen metallissa. Aaltoliikkeen etenemisnopeus on kääntäen verrannollinen piikkien välissä olevan aineen dielektrisyysvakion neliöjuureen. Koska maa-aineksen dielektrisyys on suuruusluokkaa 2–6, ilman nolla ja veden noin 80 riippuen olosuhteista, niin käytännössä veden tilavuusosuus maassa kontrolloi pulssin kulkunopeutta. TDR menetelmällä voidaan mitata maan kosteutta joko laboratorionäytteestä tai suoraan maaperässä.

Elektronimagneettisiin menetelmiin kuuluvat myös maatutkaan, GPR:aan (Ground Penetrating Radar) perustuvat määrittämenetelmät, joissa signaalina käytetään radiosignaalien taajuuksia. GPR menetelmillä voidaan mitata maan kosteutta, kun käytetään kahta antennia, joista toinen toimii lähettimenä ja toinen vastaanottimena.

Maan kosteutta voidaan määrittää myös ns. passiivisilla mittauksilla, jolloin maan pinta toimii elektromagneettisen säteilyn lähettäjänä.

Elektromagneettinen induktio

Menetelmä perustuu matalan frekvenssin signaaleihin (yleensä <15 kHz), joilla voidaan määrittää maan sähkönjohtavuutta ja siitä maan kosteutta. Käytettäessä maan sähkönjohtavuutta maan vesipitoisuuden määrittämiseen on kuitenkin huomioitava, että maan näennäinen sähkönjohtavuus riippuu sekä vesipitoisuudesta että maaveden ionipitoisuudesta, joka myös vaikuttaa maaveden johtavuuteen.

Neutronimittaus

Menetelmä perustuu korkeaenergisten neutronien nopeuden hidastumiseen maaperässä. Veden vetyatomi pienentää tehokkaasti neutronin energiaa, ja tämän perusteella voidaan määrittää maan kosteus. Neutronimittarin sondi lasketaan maahan lyötyyn suojusputkeen halutulle syvyydelle. Sondissa on radioaktiivinen säteilijä, joka lähettää ympäristöönsä neutroneja. Mitä kosteampaa maa on, sitä suurempi osa neutroneista menettää nopeuttaan. Hidastuneiden neutronien määrä voidaan mitata ja näin saadaan selville maan kosteuspiitoisuus. Menetelmä on käyttökelpoinen maankosteuden ajallisen vaihtelun mittaamiseen, mutta se on työläs ja vaikeasti automatisoitavissa.

Gammasädemenetelmä

Menetelmä perustuu radioaktiivisen gammasäteen voimakkuuden vähenemiseen maaperässä. Säteen heikkenemisestä voidaan määritellä maan tiheys ja sen perusteella kosteuspitoisuus. Maan kosteuden mittaaminen on edelleen haastava tehtävä. Näyte- tai pistekohtaiseen mittaukseen liittyy yhtenä ongelmana se, miten hyvin se edustaa alueen kuten esimerkiksi pellon vesitaloutta kokonaisuudessaan. Viime vuosina kehitystyötä on tehty maan pinnalta tehtävien maaprofilin kosteusolojen mittaamenetelmien kehittämiseksi. Välillisten menetelmien käyttö edellyttää yleensä, että havaitun ominaisuuden ja maankosteuden välinen yhteys on pistekohtaisesti määrätty suorittamalla riittävä määrä välittömiä mittauksia maalajikohtaisen kalibroinnin varmistamiseksi.

3.4 Veden liikkeet maaperässä

Luonnossa energiaerot pyrkivät tasoittumaan. Maassa olevien vesien osalta tämä tarkoittaa sitä, että vesi virtaa pienenevän potentiaalin suuntaan.

Maaperässä vesi liikkuu maarakeiden väliin jäävissä huokosissa, joiden muoto ja koko riippuu maalajin ominaisuuksista ja tiiviysasteesta. Varsinkin tiiviiden maalajien kohdalla maan vedenläpäisevyyteen vaikuttavat ratkaisevasti kasvien juurien ja matojen tekemät reiät. Savimaissa myös kuivumishalkeamat voivat muodostaa suoria virtausreittejä maanpinnalta syvemmälle maaperään.

Taulukossa 3.5 esitetyt hydraulisen johtavuuden arvot ovat maan raekoostumuksen mukaiset. Mikäli savipelto todella kauttaaltaan toimisi hydraulisen johtavuuden arvolla $K = 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$, ei maanviljelijällä olisi pellolleen juuri asiaa, sillä siksi hitaasti sade- ja sulamisvesien imeytyminen maahan tapahtuisi. Makrohuokosia pitkin vesi pääsee liikkumaan maassa nopeammin. Makrohuokosia synnyttävistä fysikaalisista tapahtumista on ennen muuta mainittava routa ja maan halkeilu, biologisista tapahtumista taas kasvien juurien ja matojen tekemät reiät.

Makrohuokosten merkityksestä veden läpäisevyyteen saadaan käsitys kun todetaan, että putkessa hitaasti virtaavan veden nopeus on suoraan verrannollinen putken säteen neljänteen potenssiin. Tämän toteamuksen merkitystä voidaan valaista eri tavoin. Se tarkoittaa esimerkiksi sitä, että yksi tietyn suuruinen reikä johtaa vettä yhtä paljon kuin 10 000 reikää, jotka ovat vain 10 kerta pienempiä. Niinpä savessa olevalle halkaisijaltaan 0,1 mm madon-

reiälle saadaan teoreettista tietä laskien hydrauliseksi johtavuudeksi $K = 1,4 \text{ cm h}^{-1}$, kun taas savipartikkelien välinen $0,001 \text{ mm:n}$ suuruinen huokosputki voi johtaa vain $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ cm h}^{-1}$.

Tämänlaatuiset laskelmat osoittavat varsin selvästi, että hiesu ja savimaissa makrohuokokset eli juurikanavat, madonreiät ja halkeamat määräävät maan hydraulisen johtavuuden. Makrohuokosia on käsitelty maan rakenteen yhteydessä luvussa 2.

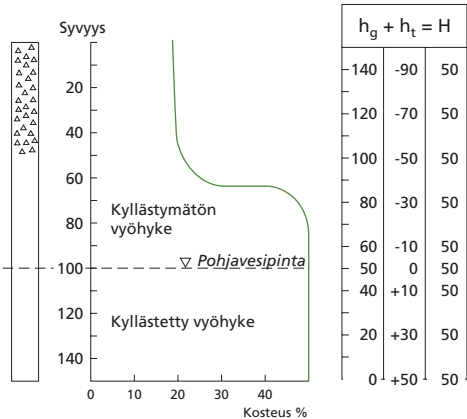
Veden imeytyminen maahan

Veden virtausta ei maassa tapahdu, ellei potentiaalieroja esiinny. Tällainen tilanne on esitetty kuvassa 3.32, jossa pohjavedenpinta on 100 cm maanpinnan alapuolella ja vertailutaso on asetettu 150 cm:n syvyydelle. Hydraulinen korkeus on painepotentiaalin ja painovoimapotentialin summa (kaava 3.9). Pohjavedenpinnan tasolla painepotentiaali $h_t = 0$ ja painovoimapotentialiaali $h_g = -50 \text{ cm}$, jolloin hydraulinen korkeus $H = + 50$. 30 cm pohjavedenpinnan alapuolella $h_t = 30 \text{ cm}$ ja $h_g = 20 \text{ cm}$, jolloin $H = 20 + 30 = 50 \text{ cm}$. 30 cm pohjavedenpinnan yläpuolella painovoimapotentialiaali on 80 cm. Tässä painepotentiaalin on oltava -30 cm, jotta hydraulinen korkeus olisi 50 cm. Taulukossa 3.5 on esitetty maaveden imun yksiköitä.

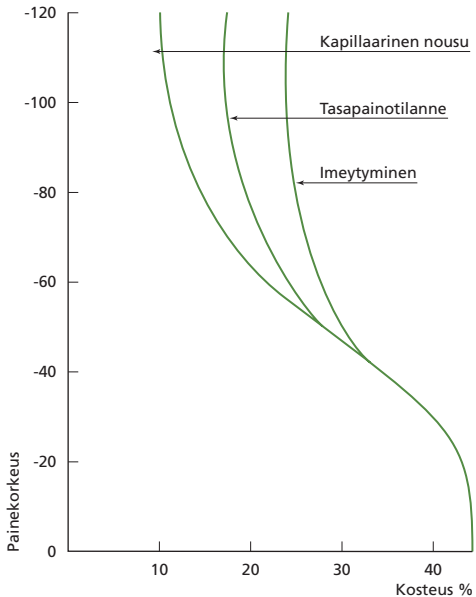
Kun tällaiseen kuivatustasapainossa olevan maan pintakerrokseen tulee vettä, niin painepotentiaali kasvaa. Niin muodoin myös hydraulinen korkeus kasvaa ja vesi alkaa virrata alaspäin eli vettä imeytyy maahan. Haihdunta aiheuttaa päinvastaisen tilanteen, sillä sen ansiosta painepotentiaali ja hydraulinen korkeus pienenevät ja vesi liikkuu maaprofilissa ylöspäin (kuva 3.33).

Maan imeytyskyvylle on luonteenomaista, että se sadetapahtuman alussa on suhteellisen suuri. Sateen jatkuessa imeyntä kuitenkin laskee vakiotasolle, jota nimitetään lopulliseksi imeytyskyvyksi. Imeytyskyky riippuu maan rakeisuudesta, rakenteesta, kosteusolosuhteista, kaltevuudesta ja kasvipeitteestä. Niinpä sora- tai hiekkamaassa sadevesi imeytyy helposti, kun taas savimaan pinnalle voi jo pienilläkin sateilla muodostua lammikoita.

Kasvusto suojaa maanpintaa kovettumiselta ja tällä tavoin lisää imeytymiskykyä. Merkittävää on myös, että kasvien pinnalle pidättyvä vesi, interseptio, pienentää maanpinnalle sateesta tulevan



Kuva 3.32 Esimerkki kuivatustasapainotilanteesta (Feddes 1979).



Kuva 3.33 Periaatekuva maankosteusprofiilista tasapainotilanteesta, imeytymistilanteesta ja haihduntatilanteesta.

Taulukko 3.5

Maaveden imun yksikköjä

cm H ₂ O	pF	kPa	bar
1	0,0	0,1	0,001
10	1,0	1,0	0,010
50	1,7	4,9	0,049
100	2,0	9,8	0,098
500	2,7	49,1	0,491
1000	3,0	98,1	0,981

veden määrää. Kasvuston vaikutus määräytyy luonnollisesti vuodenaikojen mukaan. Imeytymisen kannalta parhain tilanne on yleensä heinäkasveja kasvavalla alueella, joilla se on 3,5–7 -kertainen verrattuna vastaavanlaiseseen paljaaseen maa-alueeseen.

Sateen ominaisuuksista tärkeä on sateen rankkuus. Mikäli rankkuus ylittää maan imeytymiskyvyn, alkaa syntyä lammikoita ja ns. pintavaluntaa. Sade voi rikkoa pintakerroksen struktuuria sillä tavoin, että partikkelit joutuvat lähemmäksi toisiaan muodostaen vaikeasti läpäisevän pintakerroksen. Yleisesti ottaen ongelma on meillä kuitenkin

vähäinen, sillä sateiden intensiteetti Suomessa on pieni. Paikka paikoin kuivan kuoren muodostuminen voi tosin myös Suomessa olla ongelma. Pahimmillaan kuiva pintakerros saattaa muodostua niin kovaksi, etteivät oraat pääse tunkeutumaan sen lävitse.

Maan hydraulinen johtavuus

Maan hydraulinen johtavuus K on yksi keskeisimpiä suureita, joita tarvitaan maan vesitalouden kuvaamisessa.

Pohjaveden virtausnopeuden kuvaamiseen käytetään yleisesti ns. Darcyn yhtälöä vuodelta 1856 (kuva 3.34).

$$q = K \frac{H}{L} \quad (3.10)$$

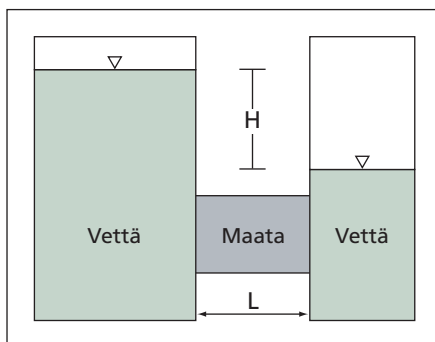
q = virtausnopeus (cm s^{-1})

K = hydraulisen johtavuuden kerroin (cm s^{-1})

H/L = paineviivan kaltevuus

Hydraulinen johtavuus K riippuu maaperän ja veden ominaisuuksista. Maan ominaisuuksista vaikuttavat mm. huokosten muoto, koko ja lukumäärä, veden ominaisuuksista etenkin viskositeetti, joka riippuu voimakkaasti lämpötilasta. Eräitä laboratorioissa mitattuja arvoja on esitetty taulukossa 3.6.

Darcyn yhtälöä sovellettaessa tulee pitää mielessä sen reunaehdot. Tärkein näistä on, että virtauksen tulee olla laminaarista eli virtausta, jossa vierekkäin virtaavat kerrokset eivät sekoitu keskenään. Darcyn peruskaava ilmaisee niin ikään maan vedenjohtavuutta

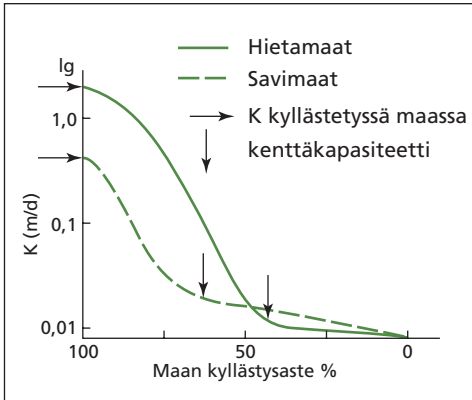


Kuva 3.34 Darcyn lain periaate.

Taulukko 3.6

Eräiden maalajien hydrauliset johtavuudet.

Maalaji	K (m s^{-1})
Sora	0,1...0,001
Karkea hiekka	0,01...0,0001
Hiekka	0,001...0,00001
Karkea hieta	0,0001...0,000001
Hieno hieta	0,00001...0,0000001
Hiesu	0,000001...0,00000001
Savi	<0,000000001



Kuva 3.35 Esimerkkejä hydraulisen johtavuuden ja maan vesipitoisuuden välisestä riippuvuudesta hietä- ja savimaassa.

neen tilanteen arvosta $K = 0,2 \text{ mm d}^{-1}$ arvoon $K = 0,01 \text{ mm d}^{-1}$. Kyllästymättömän maan vedenjohtavuutta voidaan kuvata ns. Richardsin yhtälöllä (ks. Tietoriutu 3.6).

Hydraulisen johtavuuden määrittäminen

Hydraulinen johtavuus voidaan määrittää joko välillisesti tai mittaamalla se laboratoriossa tai maastossa. Maaperän rakeisuuden perusteella sen K -arvo voidaan arvioida nopeasti ja yksinkertaisesti, mutta epätarkasti. Hydraulisen johtavuuden määrittämisessä on syytä huomioida, onko kyse horisontaalisesta vai vertikaalisesta johtavuudesta. Laboratoriossa tehdyt määritykset edustavat pientä mittakaavaa. Maastossa on mahdollista määrittää myös K -arvoja, jotka voivat edustaa suhteellisen isoja alueita.

Kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus

Laboratoriomittaukset vedellä kyllästyneen maan hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi suoritetaan periaatteessa kuvan 3.36 mukaisesti. Karkearakeisten maalajien tapauksessa painekorkeus pidetään vakiona (kuva 3.36a) Hienorakeisille maalajeille käytetään yleensä muuttuvaa painekorkeutta (kuva 3.36b). Näytteiden pieni koko luonnollisesti rajoittaa mitaustulosten edustavuutta, joten luotettavien tulosten saamiseksi on suoritettava mittauksia lukuisia näytteitä käyttäen. Hydraulisen johtavuuden määrittäminen on tällä tavoin varsin työlästä ja aikaa vievää.

Kenttämittausmenetelmänä yleisin on ns. auger-hole menetelmä, jossa seurataan vedenpinnan nousua kairanreiässä (ks. Tietoriutu 3.7). Jos pohjavedenpinta on syvällä, voidaan hydraulinen johtavuus määrittää ns. käänteisellä auger-hole menetelmällä. Siinä porattu reikä täytetään vedellä ja vedenpinnan ajan mukana tapahtuva alenema mitataan.

Infiltrimetrit tarjoavat toisen mahdollisuuden hydraulisen johtavuuden määrittämiseen kentällä. Infiltrometri on yksinkertaisimmillaan rengas, joka asetetaan halutulle syvyydelle ja täytetään vedellä. Vedenpinnan laskeutumisnopeus mitataan ja tällä tavoin saadaan arvio hydraulisen johtavuuden suuruudelle.

Maan hydraulinen johtavuus saadaan lasketuksi myös sekä pohjaveden koepumppaus- tulosten perusteella että salaojavalunnan ja pohjaveden syvyysmittausten perusteella. Viimeksi mainitussa etuna on se, että mittauksista saadaan määritettyä ns. tehokas hydraulinen johtavuus maakerroksille, joista salaojavaluntaa tapahtuu. Menetelmiä ovat esitelleet mm. Smedema ym. (2004) sekä Skaggs ja Schilfsgaarde (1999).

anisotrooppisissa olosuhteissa, joissa hydrauliset ominaisuudet eivät ole samoja kaikkiin suuntiin.

1930-luvulta lähtien Darcyn lakia on sovellettu myös kuvattaessa veden virtausta kyllästämättömässä vyöhykkeessä. Hydraulinen johtavuus luonnollisesti pienenee maan kuivuessa. Mitä kuivempaa maa on, sitä pienemmät huokokset ovat enää veden täyttämiä ja toimivat veden kuljettimina. Hydraulisen johtavuuden riippuvuus kyllästysasteesta hietä- ja savimaassa on esitetty kuvassa 3.35. Karkeilla maalajeilla hydraulinen johtavuus pienenee voimakkaasti jo pienillä painepotentiaalin arvoilla ja savellakin painepotentiaalin arvo $h_t = -100 \text{ cm}$ saa aikaan hydraulisen johtavuuden pienentymisen kyllästy-

Tietoruutu 3.6

Maaveden virtausyhtälö

Darcyn lain mukaan veden virtaukselle maaperässä voidaan kirjoittaa:

$$q = K(\theta) \nabla H \quad \text{tai} \quad q = K(h_t) \nabla H \quad (T3.5) \quad (T3.6)$$

Tarkastellaan tilannetta lähemmin vertikaalisuuntaisen virtauksen tapauksessa. Lausutaan hydraulinen johtavuus h_t :n funktiona. Virtaus noudattaa yhtälöä T3.7

$$q = K(h_t) \frac{\partial H}{\partial z} \quad (T3.7)$$

Jos koordinaatio asetetaan siten, että syvyys z kasvaa maanpinnalta alaspäin, saadaan yhtälö

$$H = h_t - z \quad (T3.8)$$

Kun H sijoitetaan yhtälöön (T3.7), päästään muotoon

$$q = K(h_t) \left(\frac{\partial h_t}{\partial z} - 1 \right) \quad (T3.9)$$

Jotta veden virtaukselle saataisiin täydellinen matemaattinen kuvaus, sovelletaan jatkuvuusyhtälöä (T3.10)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} - S \quad (T3.10)$$

jossa

θ = vesipitoisuus, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

t = aika, d

S = systeemiin tuleva tai siitä lähtevä vesimäärä, cm^3

Ketjusaännön perusteella voidaan merkitä

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dh_t} \frac{\partial h_t}{\partial t} = C(h_t) \frac{\partial h_t}{\partial t} \quad (T3.11)$$

$C(h_t)$ on vedenpidätyskyvyn derivaatta. Sijoittamalla yhtälö (T3.11) jatkuvuusyhtälöön saadaan yhtälö (T3.12)

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} = \frac{1}{C(h_t)} \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{S}{C(h_t)} \quad (T3.12)$$

Kun edelleen sijoitetaan yhtälö (T3.9) yhtälöön (T3.12), päädytään lopulliseen ns. Richardsin yhtälöön, (T3.13)

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} = \frac{1}{C(h_t)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_t) \left(\frac{\partial h_t}{\partial z} - 1 \right) \right] - \frac{S(h_t)}{C(h_t)} \quad (T3.13)$$

Tällöin on oletettu, että nielutermi $S(h_t)$ on painepotentiaalin funktio. Yhtälö (T3.13) voidaan nykytietämyksellä ratkaista vain numeerisia menetelmiä käyttäen.

Tietoruutu 3.7

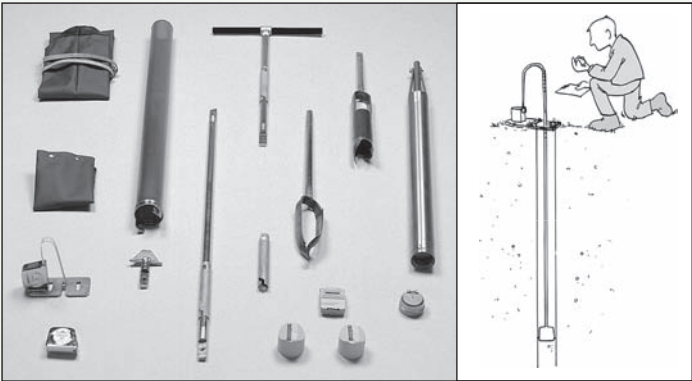
Hydraulisen johtavuuden määrittäminen kairanreikämenetelmällä

Yksi yleisimmistä hydraulisen johtavuuden kenttämittausmenetelmistä on kairanreikä-menetelmä ns. Auger-hole menetelmä. Menetelmä on kehitetty sekä pohjaveden alapuolella että sen yläpuolella tapahtuvaan mittaukseen. Tässä yhteydessä selostetaan vain pohjaveden alapuolista mittausta, jota yleisimmin käytetään

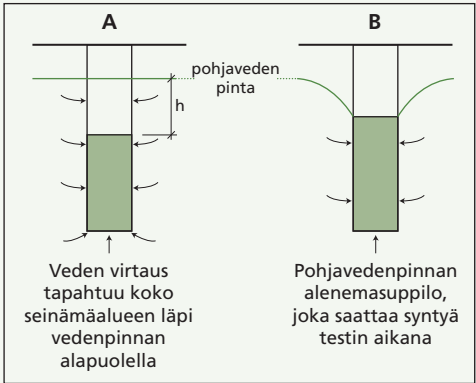
Menetelmä perustuu nimensä mukaisesti maahan tehtävään reikään, josta poistetaan vesi ja seurataan sen palautumista alkuperäiseen korkeuteen ajan suhteen. Menetelmää varten on saatavissa työvälineitä (kuva T3.2). Menetelmällä mitataan keskimääräistä hydraulista johtavuutta noin 30 senttimetrin säteellä reiästä ja syvyys suunnassa pohjaveden tasosta noin 20 cm reiän pohjan alapuolelle. Veden liikkeen pääpiirteet on esitetty kuvassa T3.3.

Mittaukseen tarvittava aika riippuu maan vedenläpäisevyydestä ja yhden mittauksen aika voi vaihdella 10–15 minuutista useisiin päiviin. Läpäisevillä mailla mittauskertoja tarvitaan yleensä viisi mittauskertaa mittauspistettä kohti hyvän keskiarvon saamiseksi. Hydraulinen johtavuus lasketaan veden pinnan nousunopeudesta. Teorian lähtökohtana on kuvassa T3.3 a esitetty tilanne, jossa vesi liikkuu koko seinämän matkalta reikään. Pohjaveden alenemasuppilon syntyminen, kuva T3.3 b, pienentää alkuperäistä sisääntulon pinta-alaa ja aiheuttaa virhettä lähtöolettamukseen. Virheen suuruus ei ole merkittävä, jos mittaus lopetetaan, kun vähintään 25 % on vielä täyttymättä, toisin sanoen mittaus lopetetaan ennen kuin $h \leq 3/4h_0$, kuva T3.4.

K-arvon laskenta tapahtuu Kirkhamin ja van Bavelin sekä Ernstin testaamalla kaavalla.

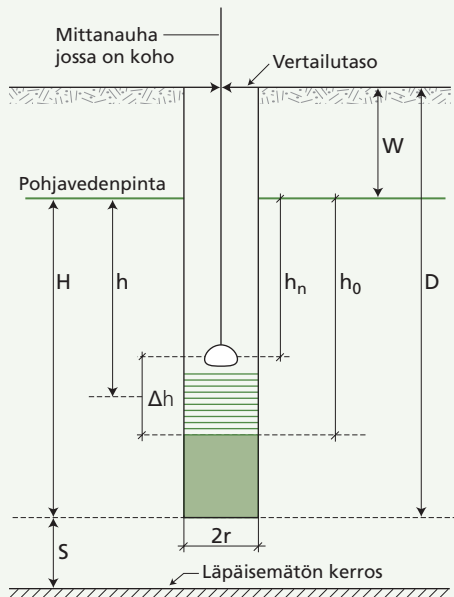


Kuva T3.2
Kairanreikä-
menetelmän
työkalut
(Eijkelkamp).



Kuva T3.3
Kaavio veden liikkeistä
mittaustilanteessa. Kuvan a
tilanne edustaa laskennan
lähtöolettamusta, kuvan b
tilanne mittauksen aikana
muodostuvaa vedenpinnan
alenemasuppiloa.
(Smedema ym. 2004)





Mittauksessa käytettävät suureet ovat seuraavat (kts kuva T3.4).

H = veden syvyys kairanreiässä, cm

S = Etäisyys läpäisemättömään kerrokseen, cm

r = Reiän säde, cm

W = Vedenpinnan syvyys maanpinnasta, cm

h_0 = pohjavedenpinnan ja kairanreiän vesipinnan korkeusero, cm

h = vastaava mittaushetken korkeusero, cm

h_n = vastaava korkeusero mittauksen päätyttyä, cm

Δh = korkeusero mittauksen aikana, cm

Kuva T3.4 Mittauksessa käytetyt suureet.

Taulukko T3.1 Geometrisen kertoimen C arvoja, Boast ja Kirkham 1971.

H/r	$\bar{h}/H \cdot S/H$									
		0	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	∞
1	1	447	423	404	375	323	286	264	255	254
	0,75	469	450	434	408	360	324	303	292	291
	0,5	555	537	522	497	449	411	386	380	379
2	1	186	176	167	154	134	123	119	116	115
	0,75	196	187	180	168	149	138	133	131	131
	0,5	234	225	218	207	198	175	169	167	167
5	1	51,9	48,6	46,2	42,8	38,7	36,9	36,1		35,8
	0,75	54,8	52,0	49,9	46,8	42,8	41,0	40,2		40,0
	0,5	66,1	63,4	61,3	58,1	53,9	51,9	51,0		50,7
10	1	18,1	16,9	16,1	15,1	14,1	13,6	13,4		13,4
	0,75	19,1	18,1	17,4	16,5	15,5	15,0	14,8		14,8
	0,5	23,3	22,3	21,5	20,6	19,5	19,0	18,8		18,7
20	1	5,91	5,53	5,30	5,06	4,81	4,70	4,66		4,64
	0,75	6,27	5,94	5,73	5,50	5,25	5,15	5,10		5,08
	0,5	7,67	7,34	7,12	6,88	6,60	6,48	6,43		6,41
50	1	1,25	1,18	1,14	1,11	1,07	1,05			1,04
	0,75	1,33	1,27	1,23	1,20	1,16	1,14			1,13
	0,5	1,64	1,57	1,54	1,50	1,46	1,44			1,43
100	1	0,37	0,35	0,34	0,34	0,33	0,32			0,32
	0,75	0,40	0,38	0,37	0,36	0,35	0,35			0,35
	0,5	0,49	0,47	0,46	0,45	0,44	0,44			0,44

* $\bar{h}$ vedenpinnan tason muutos keskimäärin mittauksen aikana

$$K = C \Delta h / \Delta t$$

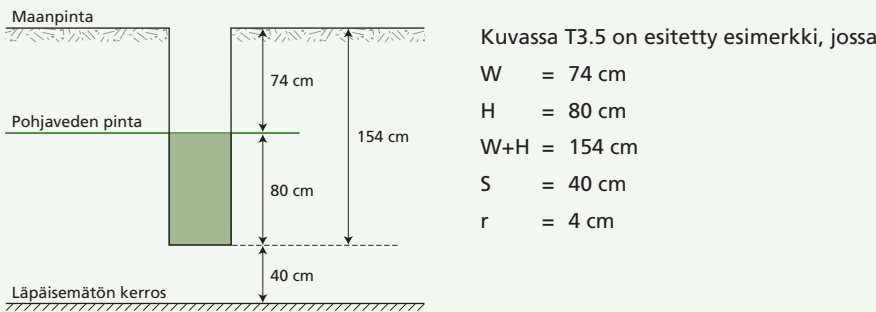
(T3.14)

- K = hydraulinen johtavuus, m/d

$\Delta h / \Delta t$ = vedenpinnan nousunopeus, m/s

C = geometrinen kerroin, dimensioton. Kertoimen arvo riippuu reiän halkaisijasta, vedenpinnan syvyydestä ja etäisyydestä läpäisemättömään kerrokseen.

Taulukossa T3.1 on esitetty C:lle arvoja, jotka Kirkham ja van Bavel ovat laskeneet alkuperäisen differentiaali virtausyhtälön eli Laplacen yhtälön avulla.



Kuva T3.5 Laskentaesimerkin kuvaus.

Taulukko T3.2 Esimerkin mittaustulokset.

Aika	Vedenpinnan taso	Korkeusero h (cm)	Korkeuseron muutos Δh (cm)	Aikaväli Δt (s)
0	116,8	42,8	-	-
20	115,6	41,6	1,2	20
40	114,4	40,4	1,2	20
60	113,3	39,3	1,1	20
80	112,2	38,2	1,1	20
100	111,2	37,2	1,0	20

- Esimerkin arvoilla saadaan:
- $\Delta h = 42,8 - 37,2 = 5,6 \text{ cm}$

$\Delta t = 100 - 0 = 100 \text{ s}$

$\bar{h} = (42,8 + 37,2) / 2 = 40 \text{ cm (muutos keskimäärin)}$

$H = 154 - 74 = 80$

$H/r = 80/4 = 20$

$S/H = 40/80 = 0,5$

$\bar{h}/H = 40/80 = 0,5$

$C = 6,60 \text{ (Taulukko T3.1)}$

$K = C \Delta h / \Delta t = 6,60 \times 5,6 / 100 = 0,37 \text{ m/d}$

Kyllästymättömän maan hydraulinen johtavuus

Laboratorio-olosuhteissa käytettävät menetelmät jaetaan yleensä pitkän maanäytteen ja lyhyen maanäytteen menetelmiin. Näistä ensin mainitussa 50–200 cm pitkän maanäytteen yläpäähän imeytetään vettä vakionopeudella. Maanäytteen alapää pidetään jatkuvasti vedellä kyllästyneenä. Painepotentiaalin arvot eri tasoilla mitataan tensiometrejä käyttäen. Lyhyen maanäytteen menetelmässä lyhyt maanäyte (1–5 cm) asetetaan painekammioon. Maanäytteestä eri paineilla irtoavat vesimäärät mitataan. Näihin tietoihin perustuen hydraulisen johtavuuden arvot voidaan laskea.

Vedenpidätyskäyrä tarjoaa helpoimman mahdollisuuden kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi. Näitä menetelmiä on lukuisia, mutta nykyään van Genuchtenin menetelmä on yleisimmin käytetty (Tietoruutu 3.8).

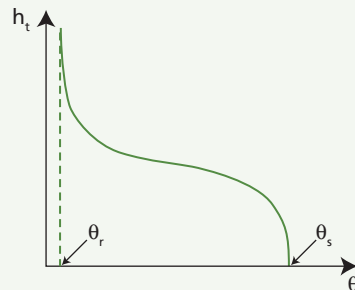
Tietoruutu 3.8

Kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden määrittäminen vedenpidätyskäyrään perustuen

Vedenpidätyskäyrä on van Genuchtenin (1980) mukaan

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (T3.15)$$

- θ = maan kosteus $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- θ_r = jäännöskosteus $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- θ_s = kyllästyskosteus $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- α = muotoparametri m^{-1}
- n = muotoparametri
- m = $1-1/n$



Muotoparametri α on likimain sama kuin ilman sisääntulopisteen käänteisarvo. Kyllästymättömän maan hydrauliselle johtavuudelle on johdettu seuraava kaava:

$$k(h) = k_s \frac{\left[\left(1 + |\alpha h|^n \right)^m - |\alpha h|^{n-1} \right]^2}{\left(1 + |\alpha h|^n \right)^{m(\lambda+2)}} \quad (T3.16)$$

- $k(h)$ = kyllästymättömän maan hydraulinen johtavuus m d^{-1}
- k_s = kyllästetyn maan hydraulinen johtavuus m d^{-1}
- λ = muotoparametri joka riippuu tekijästä $\frac{dk}{dh}$

Jäännösvesipitoisuus määritellään siksi vesipitoisuudeksi, jossa kosteuden muutos imun suhteen lähenee nollaa. Tässä kosteudessa hydraulinen johtavuus on nolla.

Vedenpidätyskäyrän ja kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden esittäminen funktioina on tärkeää muun muassa laskettaessa maavesivirtausta matemaattisilla malleilla. Parametrit saadaan määritettyä sovittamalla käyrä (T3.16) mittausaineistoon tai käyttämällä kullekin maalajille tyypillisiä taulukkoarvoja.

Roudan muodostuminen ja sulaminen

Roudalla tarkoitetaan maahuokosissa olevan veden jäätyminen aiheuttamaa maan jäykistymistä ja kovettunutta pintakerrosta. Tämän kerroksen paksuutta sanotaan roudan syvyydeksi ja kerroksen alarajaa routarajaksi. Roudan syntyä eli maaveden jäätymistä sanotaan maan routaantumiseksi. Jos maan routaantumisen tai roudan sulamisen yhteydessä tapahtuu maan pinnan liikkumista tai maan fysikaalisten ominaisuuksien muuttumista, puhutaan routimisesta. Maamme kaikki maalajit routaantuvat talvisin, mutta kaikki eivät roudi.

Routa tunkeutuu eri maalajeihin eri tavoin riippuen mm. maan huokoisuudesta ja kosteuspitoisuudesta. Hiekka ja karkea hietamaa routaantuvat tasaisesti. Hienorakeisissa maalajeissa taas syntyy jääkerroksia, joiden välinen massa ei jäädy kovaksi, vaan jää plastiseksi.

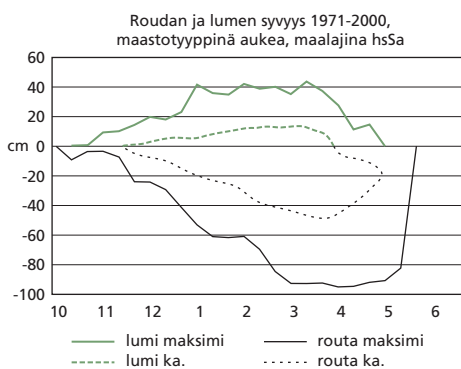
Vedellä osittain tai kokonaan kyllästyneen maan jäätyminen alkaa jonkin verran 0 °C:een alapuolella. Karkean hiekan jäätymisspiste vaihtelee rajoissa 0 – -0,15 °C ja laihan saven jäätymisspiste on noin 0,5 °C. Mitä hienorakeisempaa maalaji on, sitä voimakkaammin adsorptio- ja kapillaarivesi ovat sitoutuneet, mikä alentaa jäätymisspistettä.

Maan suuri lämpökapasiteetti hidastaa routaantumista. Hyvä lämmönjohtavuus puolestaan nopeuttaa maan pintakerroksen jäähtymistä ja lisää näin myös roudan paksuutta.

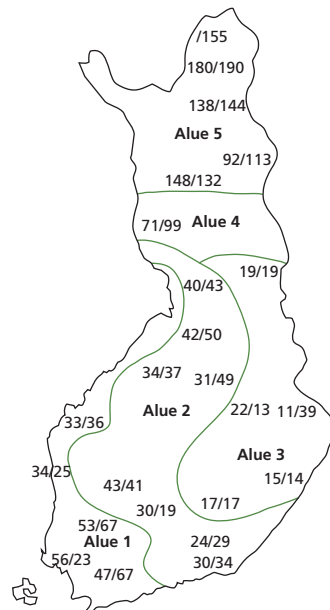
Maaperässä oleva vesi samoin kuin maan karkearakeisuus lisäävät lämmönjohtavuutta. Routaantuminen ja roudan sulaminen tapahtuu nopeammin karkeissa ja kosteissa kuin hienorakeisissa ja kuivissa maalajeissa. Luonnon olosuhteissa hienorakeiset maalajit sisältävät enemmän vettä kuin karkearakeiset maalajit, jolloin karkearakeisuus ja vesipitoisuus vaikuttavat vastakkaisesti ja tasapainottavat eri maalajien routaantumista.

Maan jäätymiseen vaikuttavista ilmastotekijöistä tärkeimpiä ovat lämpötila ja lumipeite. Lumipeitteen lisäksi myös kasvipeite toimii lämpöeristeenä. Kuvassa 3.37 on esitetty roudan ja lumen syvyyden maksimi- ja keskiarvoja Lounais-Suomessa.

Roudan syvyyden vuotuiset vaihtelut ovat huomattavia. Kohtalaisen ankarina talvina roudan syvyys on 1,5–2,0 kertaa niin syvä kuin keskimääräisinä talvina. Kuvassa 3.38 on esitetty roudan keskimääräiset maksimisyvyydet (cm) jaksolle 1968–1985 aukealla/metsässä.



Kuva 3.37 Roudan ja lumen syvyyden maksimi- ja keskiarvot vuosina 1971–2000. Mietoisissa Lounais-Suomessa aukealla paikalla, kun maalaji on hiesusavi. (Suomen ympäristökeskus 2009)



Kuva 3.38 Roudan keskimääräiset maksimisyvyydet (cm) jaksolle 1968–1985 aukealla/metsässä (Soveri 1986).

Routaantumisen alkaessa maassa oleva vesimäärä aiheuttaa yleensä vain vähäistä tilavuuden kasvua. Maan kohoaminen jäätyneenä johtuu siitä, että alhaalta nousee kapillaarisesti vettä jäätyneeseen kerrokseen. Kapillaarinen nousunopeus ja routarajan etäisyys pohjavedestä määräävät, miten paljon vettä pääsee imeytymään routakerrokseen.

Maalajit jaetaan rakeisuutensa perusteella routiviin ja routimattomiin. Routivia maalajeja ovat lieju, savi, hiesu, hieno hieta sekä yleensä sellaiset maalajit, joissa on hiesua ja sitä hienompia lajitteita enemmän kuin kolme painoprosenttia laskettuna pienimpien rakeiden määrästä. Routimattomia maalajeja ovat yleensä sora, hiekka ja sellainen karkea hieta ja moreeni, jossa hiesua ja sitä hienompia lajitteita on em. määrää vähemmän.

Varsinainen roudan sulaminen alkaa keväällä, kun ilman lämpötila on kohonnut 0 °C asteen yläpuolelle, mutta yleensä vasta, kun lumipeite on kadonnut. Lumipeite toimii eristeenä ja hidastaa roudan sulamista vastaavalla tavalla kuin syksyllä sen muodostumista. Sulaminen tapahtuu etupäässä yläpinnalta käsin, ja sulamisnopeus riippuu oleellisesti roudan vesipitoisuudesta ja maan lämmönjohtokyvystä.

Roudan sulaessa vapautuvat vesimäärät aiheuttavat monia haittoja. Varsinkin hiesua ja hienoa hietaa sisältävät maalajit muuttuvat kerrosroudan sulaessa juokseviksi ja aiheuttavat vaikeuksia liikuttaessa pelloilla raskailla koneilla.

Routalajit

Routaa tavataan maassa useassa eri muodossa. Tavallisesti erotetaan erikseen pintarouta eli rouste ja varsinainen maarouta. Viimeksi mainittu jaotellaan: onkaloroudaksi, massiiviseksi roudaksi ja kerrosroudaksi.

Paljaalle maalle, kuten ojien varsille ja pelloille muodostuu syksyllä lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle roustetta eli pintaroutaa. Rouste muodostuu pystysuorista jääneulasista, joiden yläpinnassa on 1–2 mm paksu maakerros. Rousteen syntymisen edellytyksenä on, että maassa on runsaasti vettä. Jääneulaset kasvavat alapäästään pituutta sitä nopeammin, mitä helpommin ne saavat kapillaarisesti vettä. Rousteen muodostuminen lakkaa heti, kun varsinaista maaroutaa alkaa syntyä. Rouste on kasvinviljelylle haitallinen routamuoto, sillä syysvilja- ja ensiheinäpelloilla se voi nostaa taimet maasta ja katkoa niiden juuria, vaikeuttaen talvehtimistä ja keväällä vedenottoa.

Onkaloroutaa muodostuu usein mururakenteiseen maaperään. Onkalorouta on veden jäätymistä maassa olevien onkaloiden seinämiin roustetta muistuttaviksi neulasrakenteiksi. Kosteassa maassa voi onkaloihin muodostua lisäksi paksuja jääkerroksia. Onkalorouta ei aiheuta tilavuuden muutoksia maassa ja kasvinviljelyn kannalta siitä on hyötyä, koska se katkaisee rousteen muodostumisen ja murentaa maata.

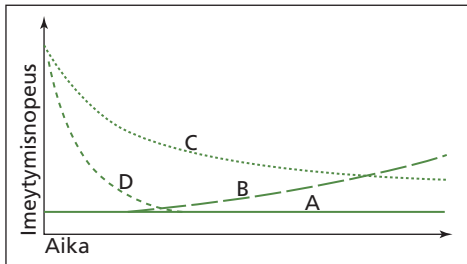
Massiivista routaa esiintyy pääasiassa karkearakeisissa maissa. Se ei aiheuta sanottavaa maan kohoamista, sillä veden jäätyessä tapahtuvan laajenemisen yhteydessä huokosvesiä pääsee siirtymään muualle. Hienorakeisissa maissa laajenemista tapahtuu, mutta se on huomattavasti vähäisempää kuin kerrosroudassa.

Kerrosrouta on tyypillistä hienorakeisissa maalajeissa, joissa kapillaariteetin ansiosta routaantuvaan kerrokseen pääsee nousemaan huomattavia määriä vettä. Jos lämpötila laskee nopeasti, syntyy yleensä useita ohuita jääkerroksia. Jos taas lämpötila laskee hitaasti ja pysyy kauan samana, muodostuu paksuja linssejä. Jääkerrosten välinen maa on aluksi sulaa ja voi leutoina talvina pysyä sulana. Pakkastalvina kerrosten väliin muodostuu massiivista routaa.

Roudan vaikutus maan mururakenteeseen on yleisesti ottaen positiivinen. Routa kuohkeuttaa maaperää ja eliminoi näin tiivistymisen aiheuttamia haittoja. Vaikutuksen suuruus riippuu lähinnä maalajista ja maan kosteuspitoisuudesta. (ks. kohta 2.8 Maan rakenne)

Roudan vaikutus veden imeytymiseen

Tärkeimpiä imeyntää hallitsevia tekijöitä ovat maassa olevat jäättömät huokokset, niiden koko ja lukumäärä. Maaperän kosteustilalla jäätymishetkellä on merkittävä vaikutus imeyntään (kuva 3.39).



Kuva 3.39 Periaatteellinen kuva imeynnästä jäätyneeseen maahan.

Kuvassa:

Käyrä A kuvaa imeyntää maahan, joka on jäätynyt kyllästyneessä tilassa tai, jossa pintaan on kehittynyt sulamisvaiheessa lähes läpäisemätön jääkerros.

Käyrä B on esimerkki tilanteesta, jossa maa on jäätynyt korkeahkossa vesipitoisuudessa (70–80 % kenttäkapasiteetista). Tässä tapauksessa sulamisvesi pääsee osaksi tunkeutumaan maahan vieden mukanaan lämpöä, joka sulattaa huokosissa jäätä. Jään sulaessa imeyntä suurenee.

Käyrä C kuvaa imeyntää, kun maan jäätyessä vesipitoisuus on ollut pieni. Tässä tapauksessa vain pienet huokokset ovat täynnä jäätä, joka sulaa nopeasti sulamisvesien tunkeutuessa maahan. Imeyntä on siis lähes samanlainen kuin jäättömän maan.

Käyrä D edustaa imeyntää maahan, joka on jäätynyt vesipitoisuuden ollessa pieni. Sulamisvaiheessa maan lämpötila on alhainen ja maahan imeytyvä sulamisvesi jäätyy ja alkaa samalla ehkäistä imeyntää.

3.6 Mitoitusvirtaamat

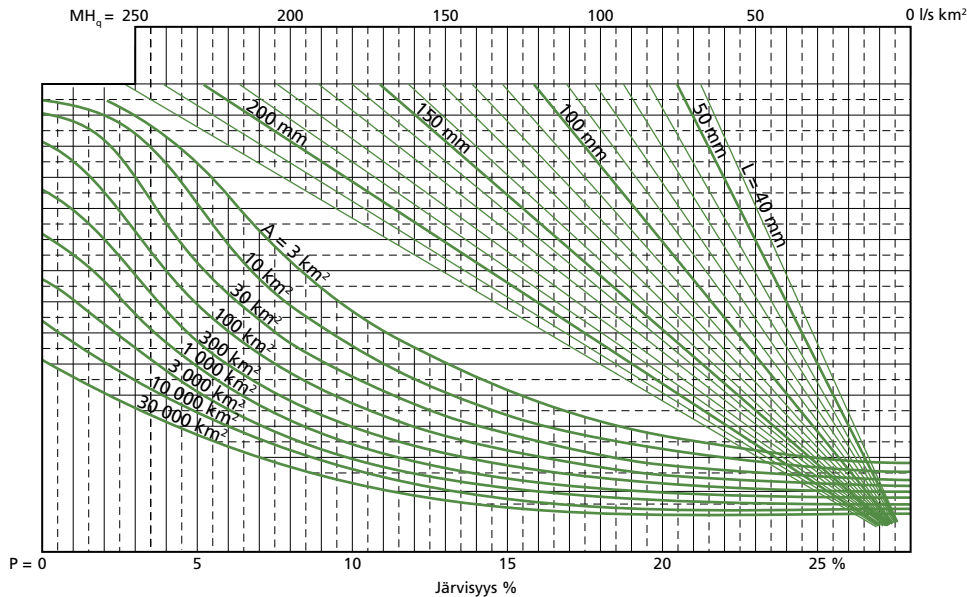
Hanne Laine-Kaulio ja Pertti Vakkilainen

Avouomien mitoitusvirtaamat voidaan määrittää yksinkertaisimmillaan mitoitusyötä var-
ten laadittujen nomogrammien avulla. Mikäli suunnittelukohteesta on käytettävissä pit-
käaikaisia virtaamahavaintoja, voidaan suorittaa myös toistuvuusanalyysi. Jos suunnitte-
lukohteesta ei ole saatavilla riittäviä virtaama-aikasarjoja toistuvuusanalyysin pohjaksi,
käyttökelpoisen menetelmän voi tarjota myös ns. vertailuvesistön käyttö. Vertailuvesistö-
menetelmässä kohdealueen ja vertailuvesistön tulisi olla lähelle samankokoisia ja luon-
nonolosuhteiltaan samankaltaisia, jolloin kohdealueen virtaamat saadaan vertailuvesis-
tön mitoitusvirtaamista valuma-alueiden suhteella kertomalla. Tarkastellaan seuraavassa
ensin ylivirtaamien arviointia nomogrammien avulla, ja sitten ylivirtaamien ja alivirtaa-
mien määrittämistä toistuvuusanalyysin avulla. Tietoruu-
dussa 3.9 on yhteenvedo pienten
valuma-alueiden verkostosta Suomessa.

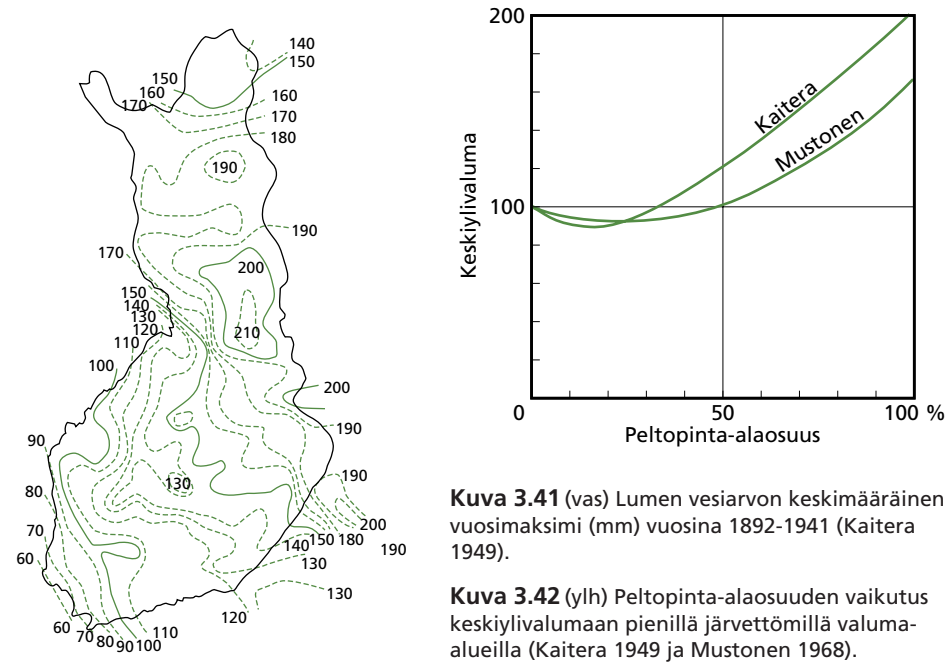
Ylivirtaamien arviointi nomogrammien avulla

Suurimmat virtaamat aiheutuvat Suomessa taajama-alueita lukuun ottamatta lumen kevät-
aikaisesta sulamisesta. Kaiteran (1949) laatiman nomogrammin (kuva 3.40) avulla saa-
daan nopeasti määritetyksi keskiylivaluma lumen keskimääräisen maksimiviesiarvon (kuva
3.41), valuma-alueen pinta-alan ja järviprosentin perusteella. On kuitenkin huomattava,
että mikäli valuma-alueella on järviä ja ne sijaitsevat alueen latvaosissa, ovat keskiyliva-
lumet oletettavasti nomogrammin antamia arvoja suurempia; vastaavasti jos alajuoksulla

on suuri järvi, keskiylivaluma pienenee sen prosenttiosuuden verran, jonka järvi muodostaa valuma-alueen pinta-alasta. Mikäli vesistö on voimakkaasti säännöstelty, voivat arvot myös tästä syystä muuttua. Lisäksi jos alueella on runsaasti karkeita, läpäiseviä maalajeja, ylivalumat pienenevät. Pellon vaikutus valumaan on puolestaan monitahoinen ja riippuu muun muassa peltöjen sijainnista ja määrästä (kuva 3.42).



Kuva 3.40 Kaiteran (1949) nomogrammi keskiylivaluman (MHq) arvioimiseksi valuma-alueen järvisyysprosentin, pinta-alan (A) ja keskimääräisen vuotuisen lumen maksimivesiarvon (L) perusteella.



Kuva 3.41 (vas) Lumen vesi-arvon keskimääräinen vuosimaksimi (mm) vuosina 1892-1941 (Kaitera 1949).

Kuva 3.42 (ylh) Peltopinta-alaosuuden vaikutus keskiylivalumaan pienillä järvettömillä valuma-alueilla (Kaitera 1949 ja Mustonen 1968).

Tietoruutu 3.9

Vertailuvesistöpankit

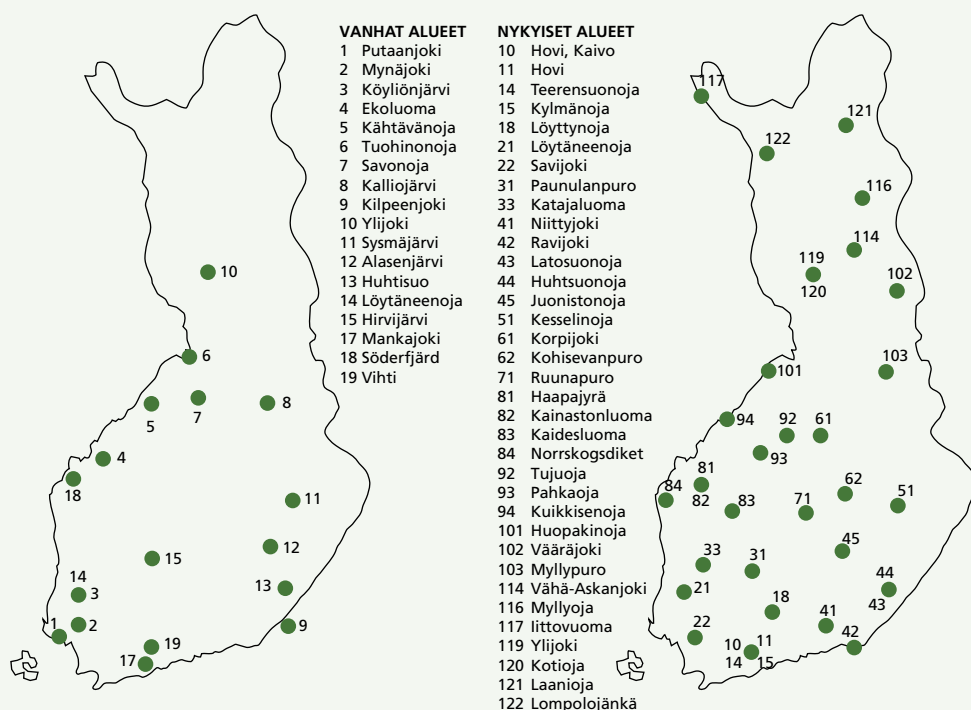
Maataloushallituksen toimesta perustetut pienten valuma-alueiden verkostot tarjoavat havaintotietoja, joita voidaan käyttää hyväksi vesiteknisiä toimenpiteitä suunniteltaessa sellaisille alueille, joilta hydrologisia havaintoja ei ole käytettävissä.

Havaintotoiminta, joka oli aloitettu vuonna 1929, järjestettiin 1930-luvun alkupuolella 17 alueen verkostoksi, joilla oli yhteensä 50 virtaama-asteikkoa. Verkostoon otettiin mukaan valuma-alueita, jotka olivat pienempiä kuin 200 km². Verkoston luonnonolosuhteiden, kuten järvisyyden, maaperän, topografian, kasvipeitteen ja viljelytilan piti vastata mahdollisimman hyvin maassamme esiintyviä olosuhteita.

Luotettaviksi todettuja virtaamasarjoja tallennettiin Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratorion toimesta sähköiseen muotoon ja toimitettiin Suomen ympäristökeskuksen tietojärjestelmiin.

Havaintoverkosto uusittiin 1950-luvun lopulta alkaen. Ainoastaan neljä vanhan verkoston alueista hyväksyttiin mukaan uuteen verkostoon. Alueet valittiin eri puolilta maata siten, että ne edustivat paikkakunnan hydrologisia oloja mahdollisimman hyvin. Alueet ovat järvettömiä. Verkostoon kuului enimmillään yli 90 virtaama-asemaa, joista nykyään toiminnassa on vajaa puolet.

Pienten valuma-alueiden havainnot ovat saatavissa Suomen ympäristökeskuksesta.

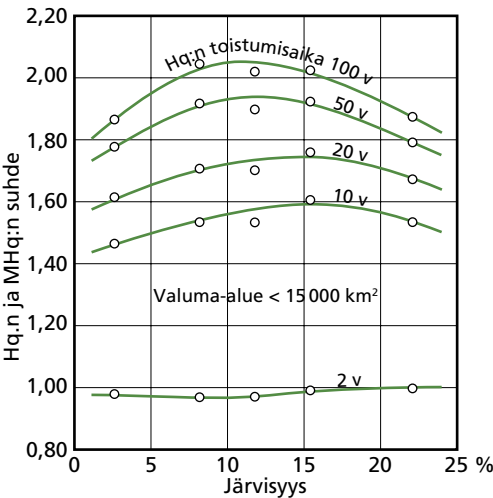


Kuva T3.6 Pienten valuma-alueiden sijainti

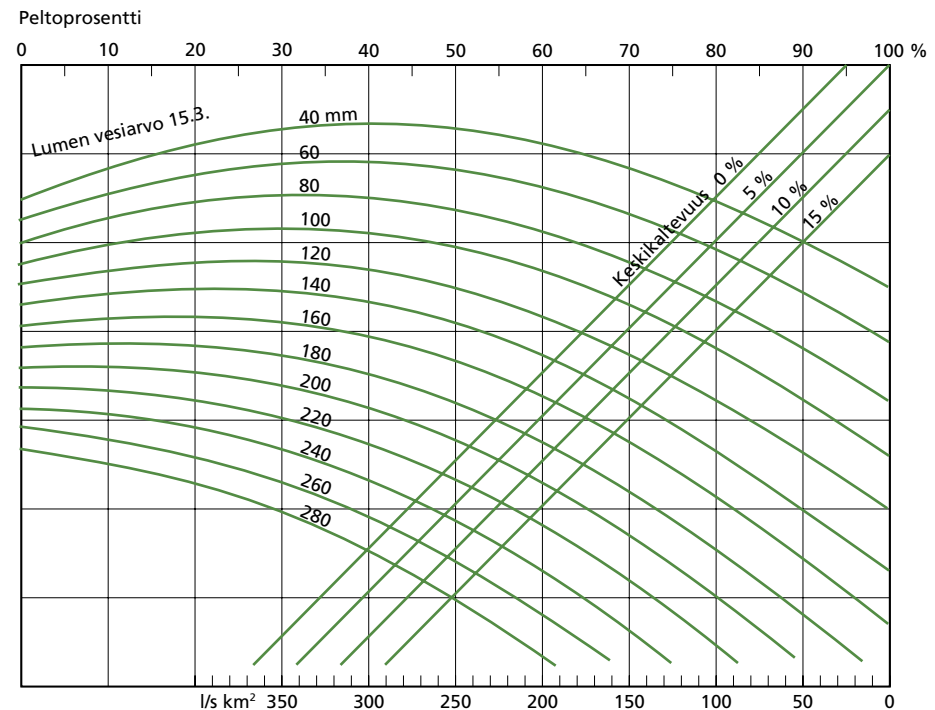
Lähde: vanhat alueet, Stenberg ja Vakkilainen 2009.

Keskiylivalumaa harvemmin tapahtuvat ylivalumat voidaan arvioida kertomalla keskiylivaluma-arvot Niinivaaran (1961) nomogrammista saatavilla kertoimilla (kuva 3.43). Pienten, järvettömien valuma-alueiden ylivalumien määrittämiseen on puolestaan käytettävissä Mustosen (1968) esittämä menetelmä (kuva 3.44), jossa ylivaluma määritetään valuma-alueen keskikaltevuuden ja peltoprosentin sekä maaliskuun 15. päivän mukaisen lumen vesiaron perusteella.

Eräitä muita mitoitusvirtaamien määrittämiseen laadittuja nomogrammeja esitetään luvussa 6.



Kuva 3.43 Ylivaluman (Hq) suhde keskiylivalumaan (MHq) alle 15 000 km²:n suuruisilla valuma-alueilla (Niinivaara 1961).



Kuva 3.44 Lumen kevätaikaisesta sulamisesta aiheutuvien ylivalumien arviointi pienillä järvettömillä valuma-alueilla maaliskuun 15. päivän mukaisen lumen vesiaron, valuma-alueen keskikaltevuuden ja peltoprosentin avulla (Mustonen 1968).

Ylivirtaamien toistuvuusanalyysi

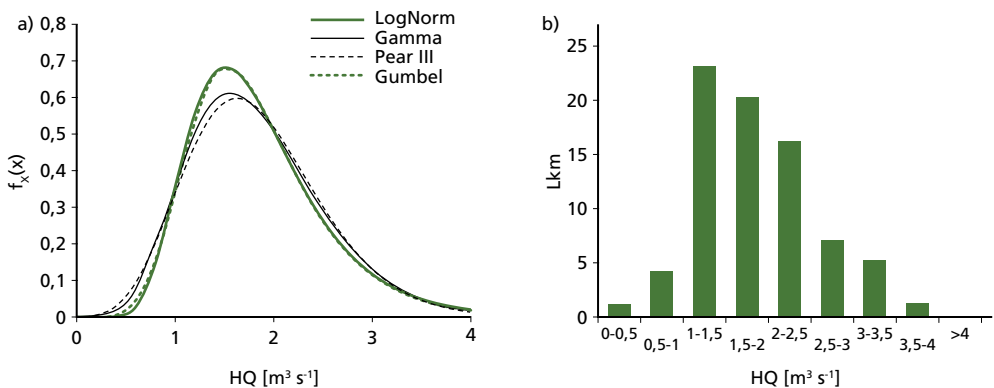
Tulvan suuruutta ja harvinaisuutta kuvataan usein toistumisajan avulla. Ylivirtaaman toistumisaika T tarkoittaa, että kyseinen ylivirtaama saavutetaan tai ylitetään keskimäärin kerran T vuodessa tarkastelun kohteena olevalla alueella. T on riippumaton edellisistä tapahtumista, ja sen käänteisluku p on todennäköisyys, jolla ylivirtaama saavutetaan tai ylitetään minä tahansa vuonna. Esimerkiksi keskimäärin 20 vuodessa tapahtuva tulva saavutetaan minä tahansa vuonna 5 %:n todennäköisyydellä ja kerran 100 vuodessa tapahtuva tulva 1 %:n todennäköisyydellä. Erisuuruisia ylivirtaamia vastaavat toistumisajat – tai toisinpäin, eri toistumisaikoja vastaavat ylivirtaamat – voidaan määrittää todennäköisyysjakaumien avulla.

Kevätaikaisten ylivirtaamahavaintojen oletetaan usein noudattavan Gumbelin jakaumaa, mutta myös Gamma-jakaumat sekä logaritminen normaalijakauma sopivat useimmiten hyvin ylivirtaama-aineistoihin. Yleisesti käytetyt todennäköisyysjakaumat on esitetty Tietoruudussa 3.10. Todennäköisyysjakaumien tiheysfunktioiden kuvaajat on lisäksi esitetty kuvassa 3.45, käyttäen pohja-aineistona Itä-Suomessa sijaitsevan Kesselinpuron valuma-alueen kevätaikaisia ylivirtaamahavaintoja vuosilta 1934–2010. Kesselinpuron verrattain pitkää havaintohistoriaa hyödynnetään yleisesti esimerkkiaineistona tästä eteenpäin toistuvuusanalyysin esittelyssä.

Ylivirtaamahavaintojen ja todennäköisyysjakaumien yhteensopivuutta on perinteisesti arvioitu erityisten jakaumakohtaisten todennäköisyyspapereiden avulla: mitä lähempänä paperille merkityt havainnot ovat lineaarista suoraa, sitä paremmin havaintoaineisto noudattaa kyseisen todennäköisyyspaperin taustalla olevaa todennäköisyysjakaumaa. Todennäköisyyspaperin käyttöä varten havainnot järjestetään ensin suuruusjärjestykseen. Kullekkin havainnolle X_i annetaan järjestysnumero i siten, että suurimman havainnon järjestysnumero on 1 ja pienimmän n ::nneksi suurimman havainnon X_i kertymätodennäköisyys U_i saadaan kaavasta:

$$U_i = 1 - F_x(X_i) \quad (3.12)$$

Jos havainnot $\{X_i\}$ noudattavat oletetun todennäköisyysjakauman kertymäfunktia $G(x)$, arvon $X_i = G^{-1}(1 - U_i)$ tulee olla likimain $X_i = G^{-1}(1 - p_i)$, kun todennäköisyyspaperin piste p_i on estimaatti U_i :lle. Toisin sanoen, pisteiden $[G^{-1}(1 - p_i), X_i]$ tulisi sijaita origosta alkavalla suoralla. Kertymätodennäköisyys p_i saadaan puolestaan kaavasta:



Kuva 3.45 Logaritmisen normaalijakauman, Gamma-jakauman, Pearson III –tyypin ja Gumbelin jakauman tiheysfunktioiden $f_x(x)$ kuvaajat (a) sekä ylivirtaamahistogrammi (b) Kesselinpuron valuma-alueen kevätaikaisten ylivirtaamahavaintojen (HQ) perusteella; havaintoaineisto on vuosilta 1934–2010.

Tietoruutu 3.10

Virtaamien toistuvuusanalyysi

Virtaamien toistuvuusanalyysissa käytettyjen todennäköisyysjakaumien tiheysfunktiot $f_X(x)$, kertymäfunktiot $F_X(x)$, tunnusluvut μ_X , σ_X ja γ_X sekä L-momentit λ_1 ja λ_2 (vrt. Stedinger et al. 1992).

Logaritminen normaalijakauma:

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right], x > 0, Y = \ln(X) \quad (T3.17)$$

$$F_X(x) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - \mu_Y}{\sigma_Y\sqrt{2}}\right) \right] \quad (T3.18)$$

$$\mu_Y = \ln(\mu_X) - \frac{1}{2}\sigma_Y^2 \text{ ja } \sigma_Y = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2}\right)} \quad (T3.19, T3.20)$$

$$\lambda_1 = \exp\left(\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right) \text{ ja } \lambda_2 = \exp\left(\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_Y}{2}\right) \quad (T3.21, T3.22)$$

Gamma-jakauma:

$$f_X(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0; \alpha, \beta > 0, \text{ jossa} \quad (T3.23)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt, \alpha > 0 \quad (T3.24)$$

$$F_X(x) = G\left(\frac{x}{\beta}, \alpha\right) \text{ ja } G(x, \alpha) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (T3.25, T3.26)$$

$$\mu_X = \alpha\beta \text{ ja } \sigma_X^2 = \alpha\beta^2 \quad (T3.27, T3.28)$$

$$\lambda_1 = \frac{\alpha}{\beta} \text{ ja } \lambda_2 = \frac{\Gamma(\alpha + 0.5)}{\sqrt{\pi}\beta\Gamma(\alpha)} \quad (T3.29, T3.30)$$

Pearsonin III-tyypin jakauma:

$$f_X(x) = |\beta| \left[\beta(x - \xi) \right]^{\alpha-1} \frac{\exp[-\beta(x - \xi)]}{x\Gamma(\alpha)} \quad (T3.31)$$

$$F_X(x) = G\left[\left(x - \mu + \frac{2\sigma}{\gamma}\right) / |0.5\sigma\gamma|, \frac{4}{\gamma^2}\right], \gamma > 0 \quad (T3.32)$$

$$\mu_x = \xi - \alpha / \beta, \quad \sigma_x^2 = \alpha / \beta^2, \quad \gamma_x = 2 / \sqrt{\alpha} \quad (T3.33, T3.34, T3.35)$$

$$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{\beta}, \quad \lambda_2 = \frac{\Gamma(\alpha + 0.5)}{\sqrt{\pi} \beta \Gamma(\alpha)} \quad (T3.36, T3.37)$$

Gumbelin jakauma:

$$f_x(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-\xi}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \quad (T3.38)$$

$$F_x(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \quad (T3.39)$$

$$\mu_x = \xi + 0.5772\alpha, \quad \sigma_x^2 = \pi^2 \alpha^2 / 6 \quad (3.40, T3.41)$$

$$\lambda_1 = \xi + 0.5772\alpha, \quad \lambda_2 = \alpha \ln 2 \quad (T3.42, T3.43)$$

Weibullin jakauma:

$$f_x(x) = \left(\frac{k}{\alpha} \right) \left(\frac{x}{\alpha} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^k \right] \quad (T3.44)$$

$$F_x(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{\alpha} \right)^k \right] \quad (T3.45)$$

$$\mu_x = \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (T3.46)$$

$$\sigma_x^2 = \alpha^2 \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^2 \right\} \quad (T3.47)$$

$$p_i = \frac{i - a}{n + 1 - 2a} \quad (3.13)$$

p_i :n kaavaa kutsutaan eri nimillä käytettäessä eri arvoja kaavan parametrille a . Esimerkiksi kun $a = 0$, kaavaa kutsutaan Weibullin kaavaksi, kun $a = 0.40$, Cunnanan kaavaksi, ja kun $a = 0.44$, Gringortenin kaavaksi. Weibullin kaava on yleisimmin käytetty, kun taas Cunnanan kaavaa pidetään kvanttiliharhattomana vaihtoehtona, ja Gringortenin kaava on Gumbelin jakaumalle optimoitu (Stedinger et al. 1992).

Kuvassa 3.46 on esitetty Kesselinpuron valuma-alueen ylivirtaamat todennäköisyyspaperilla Gumbelin jakauman tapauksessa; todennäköisyyspaperi on kuva suuruusjärjestykseen asetetuista havainnoista X_i verrattuna niiden odotusarvoon $G^{-1}(1 - p_i)$. Parametrin a arvo ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Havaintojen ja todennäköisyysjakaumien yhteensopivuutta voidaan arvioida numeerisesti vertailemalla havaintoarvojen ja todennäköisyysjakaumista saatavien arvojen välisiä hyvyyslukuja, kuten Nash-Sutcliffen (Nash ja Sutcliffe 1970) hyvyyslukua R_{NS} :

$$R_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2}{X_i - \bar{X}} \quad (3.14)$$

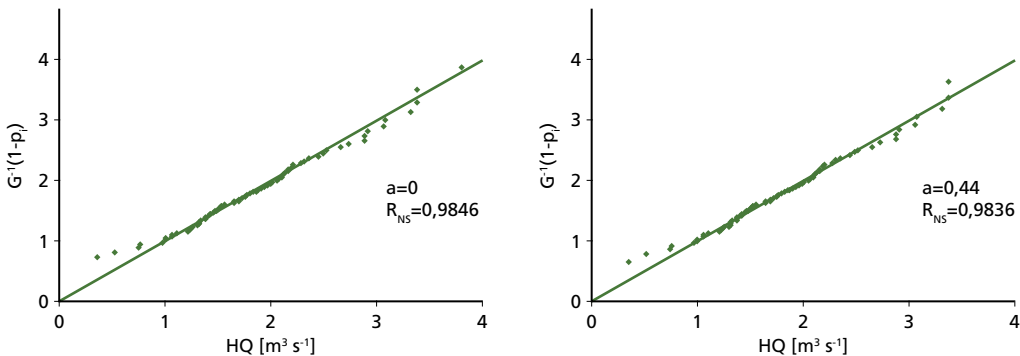
X_i = havainto

$\hat{X}_i$ = jakaumasta saatava arvo

$\bar{X}$ = havaintojen keskiarvo

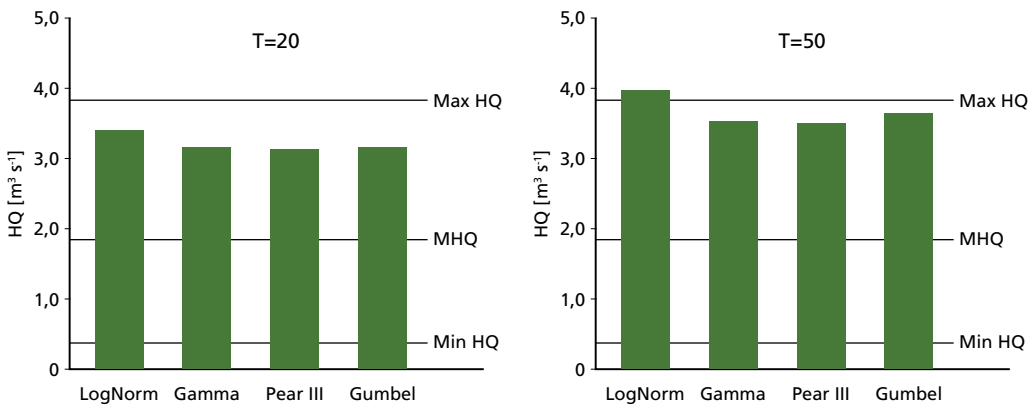
Kesselinpuron valuma-alueella ylivirtaama-aineiston ja eri todennäköisyysjakaumien väliset R_{NS} arvot ovat 0.99 Pearson III -tyypin ja Gamma-jakauman kohdalla, ja 0.98 Gumbelin ja logaritmisen normaalijakauman kohdalla, kun jakaumien mukaisten ylivirtaamien laskennassa käytetään Weibullin kaavalla laskettuja kertymätodennäköisyyksiä. Havaintoaineisto noudattaa siten kaikkia neljää jakaumaa lähes yhtä hyvin. Eri jakaumista saatavat, 20 ja 50 vuoden toistumisaikaa vastaavat ylivirtaamat Kesselinpuron valuma-alueella on esitetty kuvassa 3.47.

Suurimman ylivirtaamaestimaatin tuottaa toistumisajasta riippumatta logaritminen normaalijakauma, toiseksi suurimman Gumbelin jakauma, toiseksi pienimmän Gamma-

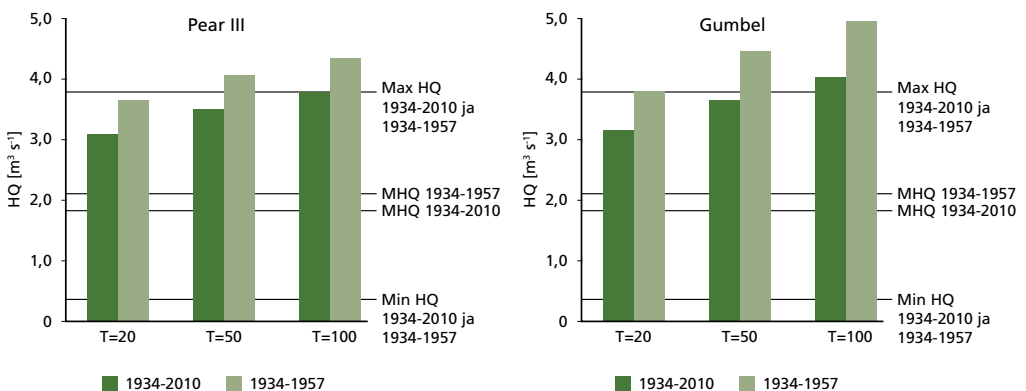


Kuva 3.46 Kesselinpuron valuma-alueella Gumbelin jakaumalla lasketut todennäköisyyspaperin pisteet ja poikkeama oletusjakaumasta, kun $a=0$ ja $a=0.44$; ylivirtaama-arvot (HQ) ovat vuosilta 1934–2010.

jakauma ja pienimmän Pearson III-tyypin jakauma (kuva 3.47). Kesselinpuron havainto-aineiston tapauksessa esimerkiksi ero pienimmän, eli Pearson III –tyypin jakaumasta saadun, ja suurimman, eli logaritmisesta normaalijakaumasta saadun, 50 vuoden toistumisaikaa vastaavan ylivirtaaman välillä on 1.14-kertainen. Suuremmat erot ylivirtaamaestimaatteihin aiheutuvat yleensä käytettävissä olevien havaintojaksojen pituudesta. Kuva 3.48 havainnollistaa eri pituisten havaintojaksojen vaikutusta todennäköisyysjakaumien tunnuslukuihin ja siten jakaumista saataviin ylivirtaamaestimaatteihin. Kuvassa on esitetty tulokset Pearson III –tyypin ja Gumbelin jakauman osalta. Pearson III –tyypin jakauman kohdalla ensimmäisten 24 vuoden (1934-1957) aineistoon pohjautuva, sadan vuoden toistumisaikaa vastaava ylivirtaama on 1.15 kertaa suurempi kuin pitkään, 77 vuoden (1934-2010) aineistoon pohjautuva lukema; Gumbelin jakauman kohdalla ero on 1.23-kertainen.



Kuva 3.47 Eri todennäköisyysjakaumien tuottamat, 20 ja 50 vuoden toistumisaikaa (T) vastaavat ylivirtaamat (HQ) Kesselinpuron valuma-alueella vuosien 1934-2010 havaintoaineiston perusteella; kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös ylivirtaama-aineiston korkein (Max), keskimääräinen (M) ja matalin (Min) HQ-arvo.



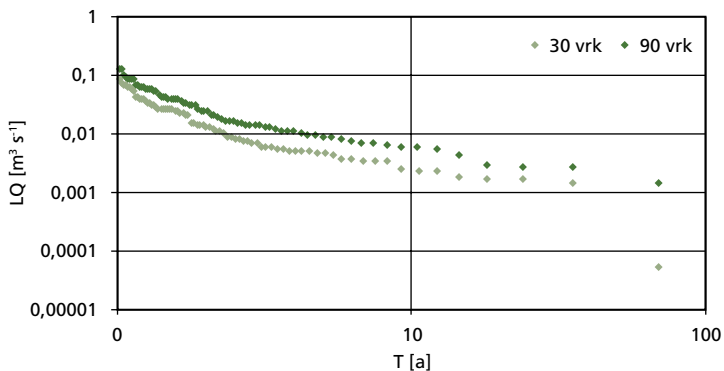
Kuva 3.48 Pearson III –tyypin sekä Gumbelin jakaumasta saatavat 20, 50 ja 100 vuoden toistumisaikaa (T) vastaavat ylivirtaamat (HQ) Kesselinpuron valuma-alueella 24 (1934-1957) ja 77 (1934-2010) vuoden ylivirtaamahavaintojen perusteella; kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös ylivirtaama-aineistojen korkeimmat (Max), keskimääräiset (M) ja matalimmat (Min) HQ-arvot.

Kesselinpuron valuma-alueella sekä suurin että pienin koskaan mitattu ylivirtaama sisältyy ensimmäisten 24 vuoden havaintoaineistoon (kuva 3.48). Vaikka ääriarvot voivatkin sisältyä lyhyisiin aikasarjoihin, on vähäisistä havaintopisteistä koostuva jakauma usein muodoltaan epäedustava ja antaa tarkasteltaville ylivirtaamille joko liian suuria tai pieniä todennäköisyyksiä. Esimerkiksi Kesselinpuron valuma-alueen tapauksessa todennäköisyysjakaumasta saatava, 100 vuoden toistumisaikaa vastaava ylivirtaama on saman suuruinen kuin suurin koskaan havaittu kevätaikainen ylivirtaama Pearsonin III -tyypin jakauman kohdalla, ja vain hieman kyseistä havaittua arvoa suurempi Gumbelin jakauman kohdalla, kun analyysi perustuu pitkään havaintoaineistoon. Lyhyeen havaintoaineistoon pohjautuvat jakaumat tuottavat sen sijaan havaittuja maksimi-arvoja suurempia, sekä 50 että 100 vuoden toistumisaikaa vastaavia ylivirtaamia poikkeuksetta.

Toistuvuusanalyysi tarjoaa käyttökelpoisen tavan ylivirtaaman määrittämiseen avouomien mitoituksessa. On kuitenkin syytä korostaa, ettei ole olemassa hydrologista syytä, miksi jokin käytettävissä olevista todennäköisyysjakaumista sopisi toista paremmin ylivirtaamien kuvaamiseen, tai miksi ylipäättään jokin teoreettisista todennäköisyysjakautumista kuvaisi ylivirtaamien todellista jakautumaa. Yleensä havaintosarjassa on enemmän pieniä kuin suuria tulvia, joten pienet ylivirtaama-arvot tulevat määrääviksi, kun todennäköisyysjakauman parametreja määritetään.

Alivirtaamien toistuvuusanalyysi

Alivirtaamatietoja tarvitaan erityisesti suunniteltaessa pintavesistä tapahtuvaa vedenhankintaa ja jätevesien johtamista vesistöihin. Viime aikoina esille on noussut keskeisesti myös *ympäristövirtaaman* käsite, jolla tarkoitetaan virtaamaa, joka mahdollistaa vesissä olevan elämän. Alivirtaamien toistuvuuden tarkastelussa on käytetty tavallisesti Weibullin todennäköisyysjakaumaa (Tietoruutu 3.10). Kuvassa 3.49 on esitetty esimerkkinä talviaikaisen, 30 ja 90 vuorokauden pituisen alivirtaamakauden keskivirtaamien toistuvuusanalyysi Kesselinpuron valuma-alueella Weibullin todennäköisyysjakauman tapauksessa. Havaittujen ja Weibullin jakauman mukaisten alivirtaama-arvojen välinen hyvyysluku R_{NS} on 0.97, kun tarkastellaan 30 vuorokauden keskimääräisiä alivirtaamia ja 0.93, kun tarkastellaan 90 vuorokauden keskimääräisiä alivirtaamia. Havaittujen ja todennäköisyysjakauman mukaisten alivirtaamien väliset hyvyysluvut ovat yleisesti hieman matalampia kuin ylivirtaamien tapauksessa.



Kuva 3.49 Talviaikainen, 30 ja 90 vuorokauden keskimääräinen alivirtaama (LQ) Weibullin jakauman mukaisen toistumisaajan (T) suhteen Kesselinpuron valuma-alueella; havaintoaineisto on vuosilta 1934–2010.

3.7 Avouomavirtaus

Avouomavirtaukselle luonteenomaista on vapaa vedenpinta, johon vaikuttaa ainoastaan ilmakehän paine. Vapaan vedenpinnan olemassaolo aiheuttaa, että virtauksen käsittely on merkittävästi hankalampaa kuin putkivirtauksen tapauksessa. On vaikeaa luoda yleispäteviä malleja, koska poikkileikkauksen muoto ja karkeusominaisuudet alinomaa vaihtuvat. Näistä syistä avouomavirtausta joudutaan käsittelemään vielä enemmän kokeellisesta pohjalta kuin putkivirtauksen kyseessä ollen.

Käsitteitä

Virtaustyytit

- stationäärinen eli pysyvä virtaus: virtaus ei muutu ajan funktiona
- epästationäärinen eli muuttuva virtaus: virtaus muuttuu ajan funktiona (esim. paineisku)
- tasainen virtaus: virtaustekijät (paine, nopeus, tiheys) eivät muutu paikan mukaan
- epätasainen virtaus: virtaus muuttuu paikan mukaan

Virtaustila

- Laminaarinen virtaus. Nestepartikkelin keskimääräinen nopeus on sama kuin virtauksen keskimääräinen nopeus. Partikkelien liikettä voidaan kuvata virtaviivoilla. Nestekerrosten välillä ei tapahdu sekoittumista.
- Turbulenttinen virtaus. Sisäisen kitkan ansiosta ja nesteen ja kiinteän pinnan välisen kitkan ansiosta syntyvä virtaustila, jossa partikkelin nopeus ja suunta poikkeavat sattumanvaraisesti keskimääräisistä arvoista.

Nesteen nopeutta lisättäessä muuttuu virtaustila laminaarisesta turbulenttiseksi. Tietyn kriittisen nopeuden alapuolella virtaus on aina laminaarista (alempi kriittinen nopeus). Tämän jälkeen siirrytään välivyöhykkeeseen, jossa esiintyy joko laminaarista tai turbulenttista virtausta. Ylemmän kriittisen nopeuden yläpuolella virtaus on aina turbulenttista.

Virtaustilaa voidaan luonnehtia Reynoldsin luvun avulla:

$$Re = \frac{u \cdot 4R}{\nu} \quad (3.15)$$

Re = Reynoldsin luku

R = hydraulinen säde = A/p, m

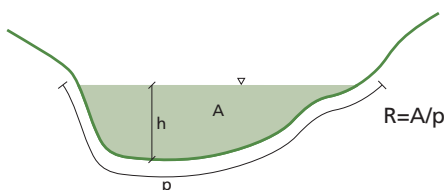
p = ns. märkäpiiri, m

u = virtausnopeus, m s⁻¹

A = uoman poikkipinta-ala, m²

ν = kinemaattinen viskositeetti, m s⁻¹

Avouomavirtaus on jokseenkin poikkeuksetta turbulenttista. Esimerkkipoikkileikkaus on esitetty kuvassa 3.50.



Kuva 3.50 Märkäpiiri p, poikkileikkauksen ala A ja hydraulinen säde R.

Avouoman mitoitus

Tavanomainen menetelmä tasaisen virtauksen laskentaan perustuu Chezyn yhtälöön

$$u = C\sqrt{RI} \quad (3.16)$$

u = virtausnopeus, m/s C = kerroin, jonka arvio riippuu uoman karkeudesta
 I = uoman pituuskaltevuus R = hydraulinen säde, m

Kertoimen C ratkaisemiseksi on tehty runsaasti kokeellista työtä. Suosituimman kaavan aseman on saavuttanut irlantilaisen Manningin kehittämä yhtälö, joka on muotoa:

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3.17)$$

$$u = MR^{2/3} I^{1/2} \quad (3.18)$$

M = Manningin kerroin n = karkeuskerroin

Kun Manningin yhtälöä verrataan Chezyn yhtälöön, havaitaan seuraavan yhteyden olevan voimassa:

$$C = M \cdot R^{1/6} \quad (3.19)$$

Kitkahäviön suuruus riippuu mm. seuraavista uoman ominaisuuksista:

• pohjan karkeus	• kasvillisuus
• poikkileikkauksen vaihtelut	• uoman mutkaisuus
• uoman liettyminen ja syöpyminen	• uomassa olevat esteet
• uoman koko ja muoto	• syvyys ja virtaama

Karkeuskertoimen n arvo vaihtelee luonnonuomissa välillä 0,025–0,150. Cowan (1956) esittää n -arvon määrittämiseksi seuraavan tavan:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

jossa

- n_0 = perusarvo
- n_1 = pohjan karkeuden aiheuttama arvo
- n_2 = poikkileikkausten vaihtelun aiheuttama arvo
- n_3 = uomassa olevien esteiden aiheuttama arvo
- n_4 = kasvillisuuden aiheuttama arvo
- m_5 = uoman mutkaisuudesta riippuva arvo

Taulukossa 3.7 on esitetty yllä mainituille tekijöille ohjearvoja. Tietoruudussa 3.11 on esimerkki avouoman mitoituksesta.

Epätasaisen virtauksen käsittely

Vapaan vedenpinnan olemassaolo tarkoittaa sitä, että avouomassa syvyys yleensä vaihtelee. Tämä aiheuttaa epätasaisen virtauksen, jossa hidastumiset ja kiihtymiset seuraavat toisiaan. Mikäli rakennetaan pato, vedenpinta kohoaa, vesisyvyys kasvaa ja jos virtaama Q pysyy vakiona, liike muuttuu epätasaiseksi - syntyy padotus (kuva 3.51). Mikäli uoman pohjaan tehdään kynnyks, vedenpinta laskee ja syntyy alennus (kuva 3.52).

Epätasaisen liikkeen laskennan päätehtävänä on padotus- ja alennuskäyrien muodon

Taulukko 3.7 Arvoja karkeuskertoimen laskemista varten (Cowan 1956).

Uoman ominaisuus			Arvot
Uomamateriaali	Maa	n_0	0,020
	Kallioleikkaus		0,025
	Hieno sora		0,024
	Karkea sora		0,028
Epätasaisuus	Sileä	n_1	0,000
	Vähäinen		0,005
	Kohtuullinen		0,010
	Suuri		0,020
Uoman poikkileikkauksen vaihtelut	Hidasta muutosta	n_2	0,000
	Vähän vaihteluja		0,005
	Tiheitä vaihteluja		0,010–0,015
Uomassa olevien esteiden vaikutus (pilarit, puomit, ym.)	Mitätön	n_3	0,000
	Vähäinen		0,010–0,015
	Huomattava		0,020–0,030
	Suuri		0,040–0,060
Kasvillisuus	Alhainen	n_4	0,005–0,010
	Keskinkertainen		0,010–0,025
	Suuri		0,025–0,050
	Hyvin suuri		0,050–0,100
Mutkaisuus	Vähäinen	m_5	1,000
	Huomattava		1,150
	Suuri		1,300

Tietoruutu 3.11**Avouoman mitoitusesimerkki**

Tehtävä: Kuinka suureksi tulee vesisyvyys x pienessä uomassa, jonka pohjan leveys on 0,3 m, luiskien kaltevuus 1:1,5 ja pohjan kaltevuus $l = 0,001$, mikäli virtaama $Q=0,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Mannin kertoimeksi oletetaan $M = 35$

Ratkaisu:

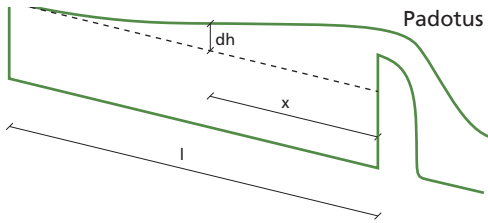
Uoman poikkipinta-ala A : $A = x(0,3+1,5x)$

$$\text{Märkäpiiri } p: p = 0,3 + 2x\sqrt{3,25} \quad (T3.48)$$

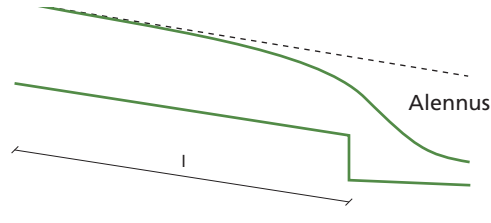
$$\text{Hydraulinen säde } R: R = \frac{A}{p} = \frac{x(0,3+1,5x)}{0,3+2x\sqrt{3,25}} \quad (T3.49)$$

$$\text{Näin ollen: } 0,2 = x(0,3+1,5x) \cdot 35 \cdot \left(\frac{x(0,3+1,5x)}{0,3+2x\sqrt{3,25}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{0,001} \quad (T3.50)$$

Ratkaisu haetaan arvaamalla syvyydelle arvo, suorittamalla laskelma, tekemällä uusi arvaus jne., kunnes yhtälön oikea ja vasen puoli ovat yhtä suuret. Vesisyvyydeksi saadaan 47 cm.



Kuva 3.51 Padotus.



Kuva 3.52 Alennus.

ja pituuden määrittäminen. Toisin sanoen selvitetään, kuinka dh muuttuu x :n muuttuessa (ks. kuva 3.51).

Vesistöön rakentaminen ja uoman perkaaminen saattavat aiheuttaa varsin tuntuvia muutoksia vedenkorkeuksiin, joten näiden vaikutusten suuruus on pystyttävä ennakolta määrittämään.

Laskelmia varten on oltava mahdollisimman täydelliset tiedot kyseisestä uomasta:

- pituusleikkaus
- poikkileikkaus
- vedenkorkeuksien ja virtaamien vuorosuhdetiedot

Laskelmat suoritetaan jakamalla luonnonuoma osiin pituussuunnassa siten, että kullakin uoman osalla hydrauliset tekijät pysyvät samoina tai sellaisina, että niiden muutos on jollakin tavoin säännönmukainen (kuva 3.53). Nämä hydrauliset tekijät ovat:

- veden syvyys
- vedenpinnan leveys
- vedenpinnan kaltevuus
- karkeus
- vesimäärä

Kitkan aiheuttama energiahäviö lasketaan kullekin jaksolle samoin kuin tasaisessa liikkeessä. Mikäli käytetään Manningin yhtälöä, on kitkahäviö

$$h_f = \frac{LQ^2}{M \cdot A_m^2 \cdot R_m^{4/3}} \quad (3.20)$$

jossa A_m ja R_m ovat jakson keskimääräiset arvot. Vedenkorkeus uoman toisessa päässä ratkaistaan iteroiden Bernoullin energiayhtälön avulla (kuva 3.54):

Bernoulli:

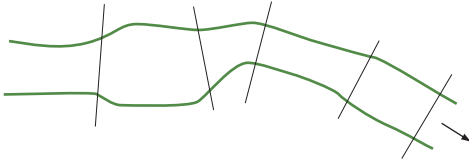
$$y_2 + z_2 + \alpha_2 \cdot \frac{u_2^2}{2g} = y_1 + \alpha_1 \cdot \frac{u_1^2}{2g} + h_f \quad (3.21)$$

$$z_2 = I_p L \quad (3.22)$$

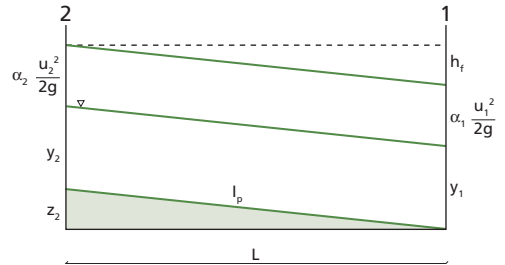
joten:

$$y_2 = y_1 - I_p \cdot L + \alpha \left(\frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} \right) + h_f \quad (3.23)$$

α = nopeuden epätasaisesta jakautumisesta johtuva kerroin (1,1–1,2)

**Kuva 3.53**

Uomajakson jakaminen osiin laskentaa varten.

**Kuva 3.54**

Uomajakson oletetaan tasainen virtaus.

Mikäli virtaus hidastuu, käy yhtälö (3.23) epätarkaksi. Parempaan tulokseen päästään tällöin yleensä yhtälöllä:

$$y_2 = y_1 - I_p \cdot L + h_f \quad (3.24)$$

Laskenta suoritetaan osa osalta seuraavasti:

Esimerkki. Poikkileikkauksena suorakaide

$$\begin{aligned} \alpha &= 1,2 & y &= 2,50 \text{ m} \\ Q &= 30 \text{ m}^3/\text{s} & b &= 10 \text{ m} \\ M &= 25 & z_2 &= 0,70 \text{ m} \\ L &= 700 \text{ m} \end{aligned}$$

$$A_m = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \quad R_m = \frac{A}{P} \quad \frac{\Delta v^2}{2g} = \alpha \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Laskelmat vedenkorkeuden y_2 määrittämiseksi iteroimalla suoritetaan taulukkomuodossa (taulukko 3.8).

Onnistuneen iteraation jälkeen siirrytään seuraavaan uoman osaan, ratkaistaan se ja siirrytään seuraavan jakson laskemiseen, kunnes saavutetaan nykyinen vedenpinnan korkeus. Verkasvirtauksessa laskelmat suoritetaan alhaalta ylöspäin, kiitovirtauksessa puolestaan ylhäältä alaspäin. Uoman osien pituuksien tulisi olla $< 500 \text{ m}$.

Taulukko 3.8 Laskentatuloksia

PL	y	L	A	$u^2/2g$	$\Delta u^2/2g$	A_m	P_m	R_m	M	h_f	y_z
n:o	m	m	m ²	2g	2g	m ²	m	m			
1	2,5	700	25	0,073							
2	2,5	700	25	0,073	0	25	15	1,67	25	0,81	2,61
2	2,61		26,1	0,067	0,008	25,6	15,2	1,68		0,77	2,58
2	2,58		25,8	0,069	0,004	25,4	15,2	1,67		0,78	2,59

4 Aineiden käyttäytyminen maaperässä

4.1 Johdanto

Vesivarojen laadun muodostumisen lähtökohtana voidaan pitää itse veden kiertokulkua. Hydrologisen kierron eri vaiheissa vesi ja siinä olevat aineet liikkuvat ilmakehän, maa- ja kallioperän, vesistöjen ja erilaisten eliöiden muodostamassa systeemissä.

Veden haihtuessa maa-alueilta ja vesistöistä se tislautuu ja siten puhdistuu. Ilmakehässä olevaan vesihöyryyn liukenee erilaisia aineita ja sitoutuu partikkeleita, jotka tulevat sadeveden mukana maanpinnalle ja suoraan vesistöihin. Aineita joutuu ilmakehään vähäisiä määriä veden haihtumisen yhteydessä, pääasiallisesti ilmakehän epäpuhtaudet ovat joko tuulen maaperästä irrottamia (tuulieroosio) tai elinkeino- ja yhdyskuntatoiminnoista ja liikenteestä suoraan ilmaan laskettuja aineita.

Vesistöt saavat vain pienen osan sadevedestä suorana sadantana niiden pinnalle. Suurin osa vedestä tulee ympäröivältä valuma-alueelta pinta-, pintakerros- tai pohjavesivaluntana. Suomessa suuri osa sadevedestä imeytyy maaperään, jossa se joutuu mukaan erilaisiin kemiallisiin, biologisiin ja fysikaalisiin prosesseihin joko reaktiokomponenttina, liuottimena tai aineiden kuljettajana. Veden kulkiessa maakerrosten läpi sen koostumus muuttuu jatkuvasti. Mitä hitaammin vesi suotautuu maan läpi, sitä voimakkaammin erilaiset reaktiot vaikuttavat vajoavan veden laatuun. Maaperän mineralogiset, kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat reaktioiden kulkuun ja sitä kautta valumavesien laatuun.

Luonnontilaisilta alueilta valunnan mukana tuleva ainekuorma pinta- ja pohjavesiin eli huuhtouma riippuu ennen kaikkea maa- ja kallioperän ominaisuuksista, topografiasta, hydrologisista olosuhteista ja kasvillisuudesta. Luonnontilaisilla alueilla vesien alkuainekoostumus määräytyy pitkälti kallioperän laadun mukaan. Alkuaineiden pitoisuudet puolestaan määräytyvät valuma-alueen maaperän laadun mukaan, sillä maa-aines vaikuttaa mm. veden kulkeutumiseen ja sitä kautta aineiden kuljetukseen ja huuhtoutumiseen. Suomen kallioperä koostuu pääasiassa happamista kivilajeista, minkä vuoksi siitä syntynyt maaperä on luontaisesti hapanta. Maamme erityispiirteisiin kuuluu myös eloperäisten maa-lajien yleisyys. Vesistöjemme tyypilliset ominaisuudet, kuten happamoitumisherkkyys ja korkea humuspitoisuus, heijastelevat maaperän laatua. Pohjavesissä voi olla luonnostaan poikkeuksellisen korkeita raudan, mangaanin, arseenin, fluoridin ja radonin pitoisuuksia. Usein kohonneet ainepitoisuudet johtuvat kuitenkin ihmisen toiminnasta, joka aiheuttaa luonnonolosuhteista poikkeavia ainevirtoja maa-alueilta ja ilmasta vesivaroihin.

Tässä luvussa käsitellään tärkeimpiä maaperässä tapahtuvia reaktioita sekä veteen liuenneiden aineiden kulkeutumista maaperässä. Eroosion osalta käsitellään maa-alueelta tapahtuvaa vesieroosiota ja uomaeroosiota. Luvussa esitetään kasvintuotannon ja pinta-vesien rehevöitymisen kannalta tärkeimpien ravinteiden, fosforin ja typen, sekä torjunta-aineiden käyttäytyminen maaperässä ja niiden huuhtoutumiseen vaikuttavia tekijöitä.

4.2 Maaperän reaktiot

Helinä Hartikainen

Maan reaktiokomponentit

Se, minkälaisiin prosesseihin aineet maassa joutuvat, riippuu paitsi niiden omista ominaisuuksista myös maassa olevien reaktiokomponenttien laadusta. Reaktiokomponenttien määrä puolestaan säätelee prosessien tehokkuutta. Ionien sitoutumiseen ja liikkumiseen vaikuttavista epäorgaanisista aineosista keskeisimpiä ovat savimineraalit sekä Al:n ja Fe:n heikosti kiteytyneet oksidit. Maan pintakerroksissa tärkeä reaktioita säätelevä tekijä on humus, jonka merkitys perustuu sen monipuolisiin fysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin. Hyvän vedensitomiskyvyn vuoksi se pystyy vaikuttamaan maaveden liikkeisiin. Lisäksi sillä on suuri ominaispinta-ala ja paljon reaktioaktiivisia ryhmiä, joiden avulla se osallistuu ioninvaihto- ja kompleksinmuodostusreaktioihin. Savimineraalien ja humuksen ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 2.

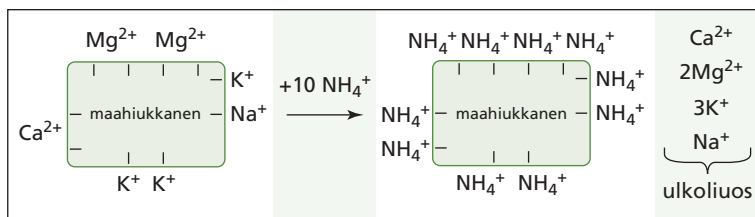
Aineiden sitoutuminen maa-ainekseen

Maan tärkeimpiä kemiallisia ominaisuuksia on sen kyky pidättää ioneja ja molekyylejä maavedestä sekä vaihtaa ioneja kiintoaineksen pinnan ja maaveden välillä. Hiukkaspinnan ja sen kanssa kosketuksessa olevan maaveden välillä on pyrkimys tasapainoon. Toisin sanoen, kun maaveden koostumuksessa tapahtuu jokin muutos, se aiheuttaa muutoksen myös hiukkaspinnalla ja päinvastoin. Näin maa-aines vaikuttaa maaveden laatuun ja säätelee aineiden liukoisuutta ja biologista käyttökelpoisuutta sekä kulkeutumista pohja- ja pintavesiin. Keskeisimpiä reaktiomekanismeja ovat ioninvaihto, ligandinvaihto, spesifinen adsorptio ja kompleksinmuodostus.

Kationinvaihto

Maahiukkaset ovat yleensä negatiivisesti varattuja. Sähkövarausten synty ja niiden luonne on selitetty Tietoruudussa 4.1. Sähköisen tasapainon ylläpitämiseksi maahiukkasten pinoille on pidähtynyt *elektrostaattisin* eli *sähköisin vetovoimin* ekvivalenttimäärä kationeja ns. vastaioneiksi (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ jne.). Toisin sanoen pidähtyneiden kationien positiivisten varausten summa on yhtä suuri kuin pinnan negatiivinen kokonaisvaraus (kuva 4.1). Elektrostaattinen sitoutuminen on *epäspesifistä*, sillä pidähtyvä kationi ei muodosta kemiallista sidosta pinnan kanssa. Pidähtyneet vastaionit ovat tämän vuoksi liikkuvia ja voivat vaihtua takaisin maanesteessä oleviin positiivisesti varattuihin ioneihin. Tämän vuoksi sähköisin vetovoimin pidähtyneitä kationeja kutsutaan *vaihtuviksi kationeiksi*. Keskeistä vaihtoreaktiossa on, että se on erittäin nopea ja että ulos ja sisään vaihtuvien ionien varausten määrä on sama. Toisin sanoen esim. 2-arvoinen kationi voi vaihtaa ulos toisen 2-arvoisen tai kaksi 1-arvoista kationia. Kationinvaihtopintoina toimivat negatiivisesti varautuneet hiukkaset: savimineraalit ja humus. Hyvin vähäisessä määrin reaktioihin voivat osallistua piihappo ja Fe:n ja Al:n hydratoituneet oksidit, jotka voivat olla jossain määrin negatiivisesti varattuja, tosin vasta varsin korkeassa pH:ssa.

Hiukkaspinnoilla vaihtuvassa muodossa olevat kationit ovat melko hyvin suojassa huuhtoutumiselta mutta silti kasvien käytettävissä. Siksi maan kationikoostumuksella on huomattava merkitys ravinnetalouden ja kasvien mineraaliaineen saannin kannalta. Tämän lisäksi vaihtuvat kationit vaikuttavat muihinkin tärkeisiin maan ominaisuuksiin kuten rakenteeseen ja biologiseen aktiivisuuteen. Koska kiinteän aineksen ja maanesteen välillä vallitsee pyrkimys tasapainoon, veden kulkiessa maakerrosten läpi sen koostumus muuttuu sitä enemmän mitä parempi on veden ja maa-aineksen välinen kontakti.

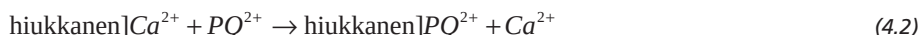


Kuva 4.1 Kationinvaihdon periaate. Todellisuudessa kationinvaihto on tasapainoreaktio ja tarvitaan useita käsittelykertoja vaihtoliuksella, jotta kaikki hiukkaspinnoilla vaihtuvina olevat kationit saadaan vaihdetuiksi ulos.

Sähköisesti neutraalit yhdisteet voivat maahan joutuessaan saada positiivisen varauksen ja sen jälkeen osallistua kationinvaihtoreaktioihin. Esimerkiksi ammoniakkikaasu (NH_3) sitoo happamassa maassa protonin ja muuttuu ammonium-ioniksi (NH_4^+):



Myös jotkut positiivisesti varatut orgaaniset molekyylit, kuten kationiset rikkakasvien torjunta-aineet eli herbisidit (esim. parakvatti PQ^{2+} ja dikvatti), voivat sitoutua kationinvaihtomekanismin avulla:



Vaikka tällaiset orgaaniset kationit sitoutuvat syrjäyttämällä vaihtopaikalta kationeja, ne eivät kuitenkaan itse sitoudu helposti vaihtuvaan muotoon vaan ovat melko vaikeasti maa-nesteen kationien syrjäytettävissä. Myös orgaaniset emäkset, mm. herbisideinä tunnetut atratsiini ja simatsiini, saavat happamassa maassa positiivisen varauksen ja käyttäytyvät orgaanisten kationien tavoin:



Maan kationikoostumus ja kationinvaihtokapasiteetti

Hiukkaspinnoille sitoutuneet vaihtuvat kationit muodostavat maan kationikoostumuksen ja niiden kokonaismäärä yhdessä dissosioitumiskykyisen vedyn kanssa muodostaa *kationinvaihtokapasiteetin* (KVK). Dissosioitumiskykyisellä vedyllä tarkoitetaan H^+ -ioneja, jotka saadaan irtomaan yhdisteestään maan pH:ta nostamalla (ks. Tietoruutu 4.1 ja Maan happamuuden luonne). Tavallisessa viljelysmaassa vaihtuvassa muodossa on eniten Ca^{2+} :a, seuraavaksi eniten Mg^{2+} :a, mutta K^+ :a ja Na^+ :a on selvästi vähemmän ja niiden määrissä keskinäiset erot ovat usein melko pienet. Vaihtuvan H^+ :n ja Al^{3+} :n osuus on tavallisesti hyvin pieni, merkittävässä määrin niitä on vain hyvin happamissa maissa. Myös muita kationeja, esim. Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , voi olla vaihtuvassa muodossa, mutta yleensä niin vähän, ettei niitä oteta huomioon määrittäyksissä. Vaihtuvaa NH_4^+ :a maassa on harvoin merkittäviä määriä, koska se yleensä nitrifioituu nopeasti nitraatti-anioniksi (NO_3^-) (ks. Reaktioyhtälöt, kohta 4.6).

Kationinvaihtokapasiteetti on *maa-aineksen ominaisuus*, joka riippuu vaihtopaikkoja tarjoavien komponenttien määrästä, reaktiokykyisen pinnan alasta sekä varausten laadusta ja määrästä. Savimineraaleilla, joita on eniten hienojakoisessa saveslajitteessa, on pääasiassa pysyvä pH:sta riippumaton negatiivinen sähkövaraus, johon ei voida vaikuttaa ulkoisia olosuhteita muuttamalla. Vain niiden reunojen murtopinnoilla voi olla jonkin verran pH:sta riippuvaa varausta. Humuksen varaus sen sijaan riippuu ulkoisista olosuhteista, erityisesti pH:sta. Mitä korkeampi maan pH on, sitä enemmän humuksen funktionaalista ryh-

mistä irtoaa H^+ -ioneja, jolloin humuksen pinnalle syntyy negatiivista varausta (ks. Tietoruutu 4.1). Näin muodostuneille varauspaikoille voidaan sitoa maanesteen kationeja. Toisin sanoen KVK ilmoittaa maa-aineksen negatiivisten varauspaikkojen kokonaismäärän.

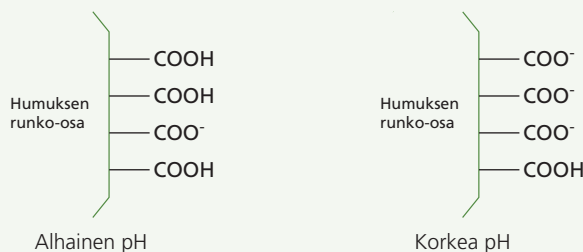
Kationinvaihtokapasiteetti voidaan määrittää vaihtamalla hiukkaspinnoille sähköisin vetovoimin sitoutuneet kationit pois liuokseen, mittaamalla ulosvaihtuneiden kationien pitoisuudet liuoksessa ja laskemalla niiden perusteella positiivisen varauksen summa. Määrittystulos riippuu kuitenkin vaihtuvien kationien uuttoon käytetyn liuoksen pH:sta (ks. Tietoruutu 4.2). KVK:n dimensio on senttimoolleja positiivisia varauksia kg maata kohti ($cmol (+) kg^{-1}$). Jos maan KVK on esim. $12 cmol (+) kg^{-1}$, se tarkoittaa, että 1 kg maata pystyy adsorboimaan esim. $12 cmol H^+$ -ioneja tai $12 cmol$ jotain muuta 1-arvoista kationia tai $6 cmol$ jotain 2-arvoista kationia jne. Tietoruudussa 4.3 on esitetty, miten maan KVK voidaan laskea uuttotulosten perusteella.

On kuitenkin huomattava, että KVK on maa-aineksen potentiaalinen ominaisuus ja vain hyvin harvoin kaikki vaihtopaikat osallistuvat todellisuudessa ioninvaihtoreaktioi-

Tietoruutu 4.1

Maapartikkelien sähköiset ominaisuudet

Maahiukkasen varauksen laatu riippuu sen lähteestä. Savimineraalin negatiivinen nettovaraus on seurausta lähtömineraalin syntyvaiheesta tapahtuneesta isomorfisesta korvautumisesta (ks. Tietoruutu 2.2). Tällaista kidehilan rakenteesta johtuvaa negatiivista varausta sanotaan pysyväksi eli permanentiksi varaukseksi. Siihen ei voida vaikuttaa ulkoisia olosuhteita muuttamalla. Maassa on myös kationinvaihtopintoja, joiden varaus vaihtelee olosuhteiden, ennen kaikkea ympäröivän liuoksen pH:n mukaan. Tällöin puhutaan pH:sta riippuvasta varauksesta. Tärkein komponentti, jolla on pH:sta riippuva sähkövaraus, on humus. Humusaineet ovat luonteeltaan heikkoja happoja, ts. ne luovuttavat suurimman osan protoneistaan vasta kun pH on riittävän korkea (kuva T4.1). Niiden sisältämien funktionaalisten ryhmien happovoimakkuus vaihtelee kuitenkin laajasti: pKa-arvo eli pH, jossa puolet funktionaalisten ryhmien protoneista on dissosioitunut, asettuu välille 3–8.



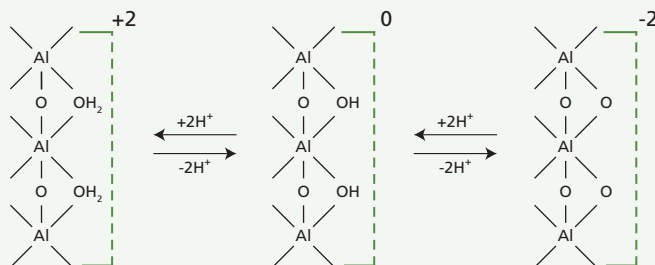
Kuva T4.1 Happamuuden vaikutus humuksen sähkövaraukseen.

Epäorgaanisilla vaihtopinnoilla (esim. Al- ja Fe-oksidi ja -hydroksidi) ja savimineraalien murtopinnat pH:sta riippuvat varaukset ovat seurausta funktionaalisten ryhmien amfoteerisista ominaisuuksista: H^+ dissosioituu H_2O - (tai OH⁻)-ryhmistä, kun ulkoliuoksen pH nousee. Al- (ja Fe-) oksidien pinnan sähkövarauksen pH-riippuvuus on esitetty kaavamaisesti kuvassa T4.2 ja savimineraalien murtopintojen pH-riippuvuus kuvassa T4.3.

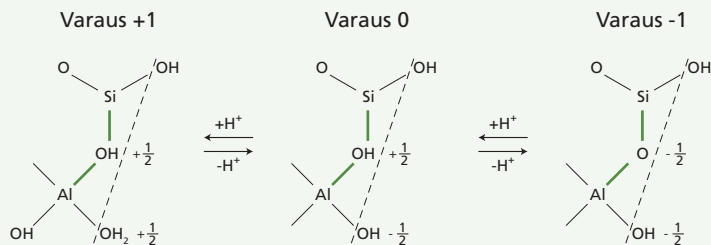


hin. Mururakenteisessa maassa vesi liikkuu suuria huokosia pitkin ja on kontaktissa vain varsin pienen maatilavuuden kanssa. Aggregaattien sisällä on vaihtopaikkoja, jotka eivät pysty tällaisessa tilanteessa osallistumaan kationinvaihtoon. Käytännössä KVK tulee siis varsin harvoin täysimittaisesti hyödynnetyksi. Voidaan olettaa, että ainoastaan yksihiukkeisissa maissa, joissa vesi vajoaa ideaalisena tasaisena rintamana alaspäin, vaihtoreaktiot tulevat miltei täysin hyödynnetyiksi.

Vaihtuvaa Ca:a, Mg:a, K:a ja Na:a on kutsuttu maaperäkemiassa perinteisesti vaihtuviksi emäksiksi tai emäskationeiksi. Nimitys ei ole nykyisen kemian terminologian mukainen, koska kaikki kationit voidaan luokitella hapoiksi (ks. yhtälöt 4.4 ja 4.5 sekä 4.9 ja 4.11). Vanhentuneen ja helposti väärinkäsityksiin johtavan termin sijasta suositellaan käytettäväksi nimitystä vaihtuvat alkali- ja maa-alkalikationit. Emäskationi-termin käyttöä on perusteltu sillä, että näiden kationien kyllästämät maat ovat emäksisiä. Emäskationien prosenttiosuuden KVK:sta katsotaan kuvaavan maan ns. *emäskyllästysastetta*. Mikäli täl-



Kuva T4.2 Al- (ja Fe-)oksidiin pinnan sähkövarauksen riippuvuus pH:sta.



Kuva T4.3 Esimerkki savimineraalin murtopinnan sähkövarauksen pH-riippuvuudesta.

Protonin irtoaminen (dissosioituminen) muuttaa reaktiokomponentin pinnan sähkövarausta negatiivisempaan suuntaan. Dissosioituminen riippuu ryhmän happovoimakkuudesta; mitä vahvempi happoluonne ryhmällä on, sitä matalammassa pH:ssa se luovuttaa protonin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että vahvan happoluonteen omaavat ryhmät toimivat todennäköisimmin kationien pidätympaikkoina. Esimerkiksi SiOH-ryhmistä protoni irtoaa vasta selvästi emäksisellä alueella, eikä näillä ryhmillä ole juuri merkitystä kationinvaihdon kannalta suomalaisissa maissa. Sen sijaan AlOH-ryhmillä saattaa olla jonkin verran merkitystä, sillä niiden happovoimakkuus on suurempi. Toisaalta happamissa olosuhteissa OH-ryhmä voi protonoitua, jolloin muodostuu OH_2^+ -ryhmä. Näin savimineraalien murtopinnoille ja oksidipinnoille voi syntyä positiivisia varauspaikkoja, kun pH on riittävän matala.

laista käsitettä käytetään, on tärkeää ilmoittaa, mitä KVK:n arvoa, efektiivistä vai potentiaalista (ks. Tietoruutu 4.2), emäskyllästysasteen laskemisessa on käytetty. Emäskyllästysaste kuvaa käänteisesti maan happamuutta, joka tavallisesti määritetään kuitenkin erikseen.

Suomalaisissa jäykissä savimaissa KVK-arvojen vaihtelu on tavallisesti 20–40 cmol (+) kg⁻¹, kevyemmissä savissa 10–20 cmol (+) kg⁻¹ ja karkeissa maissa yleensä alle 10 cmol (+) kg⁻¹. Eloperäisillä mailla KVK-arvot voivat olla huomattavan korkeita, usein yli 100 cmol (+) kg⁻¹. Jos KVK ilmoitettaisiin tilavuusyksikköä kohti, ero kivennäismaiden ja eloperäisten maiden välillä kuitenkin selvästi pienenesi.

Kationien välinen kilpailu ja spesifinen sitoutuminen

Maavedessä on hyvin paljon erityyppisiä aineita, liuenneita ioneja ja molekyyliä sekä kolloidikokoisia hiukkasia. Monet tekijät kuten kasvien juurten sekä mikrobien toiminta, veden liikkeet, kastelu, kuivuminen ja lannoitus aiheuttavat muutoksia maaveden koostumuksessa. Ne puolestaan heijastuvat muutoksina hiukkaspinnoilla, sillä maa ylläpitää tiettyä tasapainotilaa kiinteän aineksen ja maanesteen välillä. Lisäksi erilaiset aineet ja ionit kilpailevat keskenään kiintoaineksen pidättymispaikoista. Vaihtuvien kationien keskinäinen kilpailukyky vaihtelee paljon (Tietoruutu 4.4) ja riippuu sekä kationin että vaihtopaikan laadusta. Kationinvaihtajat voivat olla selektiivisiä joidenkin kationien suhteen eli ne suosivat joitakin kationeja toisten kustannuksella. Jos sitoutuminen tapahtuu vaikeasti vaihtuvaan muotoon, puhutaan *spesifisestä sitoutumisesta*.

Tietoruutu 4.2

Efektiivinen ja potentiaalinen KVK

Kationinvaihtokapasiteetti voidaan määrittää uuttamalla maata sellaisella suolaliuoksella, jonka kationia esiintyy maassa vähän, esim. NH₄⁺- tai Ba-suolaliuoksella. Uuttoliuoksen anioni ei saa aiheuttaa sivureaktioita, joita voivat olla esim. sitoutuminen maahiukkasten pinnoille tai pH:n nousu. Kloridisuoloja käytetään yleisesti, sillä negatiivisesti varatut Cl⁻-ionit eivät pidäty maahan vaan pysyvät liuoksessa. Uuttoliuoksen kationit NH₄⁺ tai Ba²⁺ miehittävät vaihtopaikat. KVK voidaan laskea ulosvaihtuneiden kationien varausten perusteella (Tietoruutu 4.3). Toinen tapa on pestä maa uuttojen jälkeen ylimääräisestä suolasta ja vaihtaa sitoutuneet NH₄⁺- tai Ba-ionit takaisin liuokseen toisella kationilla esim. K⁺:lla, mitata niiden pitoisuudet ja laskea KVK uuttutuloksen perusteella.

Koska kationinvaihdossa on kysymys tasapainoreaktioista, ionien vaihtuminen pysähtyy tasapainotilan syntyessä. Näin ollen tarvitaan useita peräkkäisiä uuttoja, jotta kaikki maahiukkasten pinnalla alun perin olleet kationit saadaan asteittain vaihdetuiksi liuosfaasiin. Uuttoliuksesta maahan pidättyneiden kationien määrä riippuu myös määritysliuoksen ominaisuuksista. Jos määritys tehdään puskuroimattomalla suolaliuoksella (esim. NH₄Cl:lla), vaihtuminen tapahtuu maan omassa pH:ssa. Tällöin tulokseksi saadaan ns. efektiivinen KVK (KVK_{ef}), joka kuvaa maan omassa pH:ssa käytettävissä olevien kationinvaihtopaikkojen määrää. Jos määrittämisessä käytetään puskuriliuosta, jonka pH on säädetty 7:ksi tai 8,2:ksi (vastaa kalkkikivimaiden maksimi-pH:ta), vetyionien dissosioituminen pH:sta riippuvilta varauspaikoilta lisääntyy. Tällöin saadaan ns. potentiaalinen KVK (KVK_{pot}), joka on suurempi kuin efektiivinen KVK ja kuvaa, kuinka paljon maassa olisi kationinvaihtokapasiteettia, jos maan pH vastaisi määritysliuoksen pH:ta. Koska määritysliuoksen pH vaikuttaa lopputulokseen, KVK:n arvoa ilmoitettaessa on aina mainittava määrittystapa.

Joillakin savimineraaleilla on voimakas selektiivinen taipumus sitoa K^+ - tai NH_4^+ -ioneja vaihtumattomaan muotoon. Kun esim. vermikuliitti sitoo K^+ :a silikaattikerrosten väliin, kerrosväli menee kiinni ja rakenne muuttuu illiittiseksi (ks. luku 2 - Kolmikerrosmineraalit). Ilmiö perustuu siihen, että ioneilla on käytössään aikaisemmin kerrosvälistä poistuneen K^+ :n tyhjäksi jättämä sopivan kokoinen kolo. NH_4^+ -ioni on vain hieman suurempi kuin K^+ -ioni ja mahtuu melko täsmällisesti samaan paikkaan. Kun maaveden K-pitoisuus vermikuliittia sisältävässä maassa kasvaa voimakkaasti esim. lannoituksen seurauksena, osa ioneista voi sitoutua silikaattikerrosten väleihin näille *stereospesifisille* paikoille vaikeasti vaihtuvaan muotoon (*fiksaatio*). Myös Cs^+ pystyy sitoutumaan vaikeasti vaihtuvaan muotoon silikaattikerrosten väleihin, mikä vähentää radioaktiivisten Cs-päästöjen aiheuttamaa pohjavesien saastumisriskiä hienojakoisilla mailla.

Myös kationien sitoutumisessa humukseen on piirteitä, jotka viittaavat spesifiisiin reaktioihin tai voimakkaaseen selektiivisyyteen. Esimerkiksi H^+ -ioni sitoutuu heikkojen happoryhmien muodostamille kationinvaihtopaikoille huomattavasti voimakkaammin kuin

Tietoruutu 4.3

Vaihtuvien kationien määrittäminen

Laskuesimerkki. Vaihtuvien kationien uutossa NH_4Cl :llä saatiin Hts-maalle (pH 5,7) seuraavat mittaustulokset: Ca 2300 mg/kg, Mg 328 mg/kg, K 234 mg/kg, Na 23 mg/kg ja Al 9 mg/kg. Laske näiden tulosten perusteella maan KVK.

Ensin voidaan laskea moolimassojen perusteella mitattujen alkuaineiden pitoisuudet milimooleina ja muuttaa luvut sitten senttimooliksi. (Moolimassat annettu suluissa).

Ca (40) = $2300/40 = 57,5$ mmol/kg eli 5,75 cmol/kg.

Ca on 2-arvoinen, joten sen positiivisten varausten määräksi saadaan $5,75 \times 2 = 11,5$ cmol(+)/kg.

Mg (24,3) = $328/24,3 = 13,5$ mmol/ eli 1,35 cmol/kg.

Mg on 2-arvoinen, joten sen positiivisten varausten määräksi saadaan $1,35 \times 2 = 2,7$ cmol(+)/kg

K (39,1) = $234/39,1 = 6,2$ mmol/kg eli 0,62 cmol/kg.

K on 1-arvoinen, joten sen positiivisten varausten määräksi saadaan $0,62 \times 1 = 0,62$ cmol(+)/kg

Na (23) = $23/23 = 1$ mmol/kg eli 0,1 cmol/kg.

Na on 1-arvoinen, joten sen positiivisten varausten määräksi saadaan $0,1 \times 1 = 0,1$ cmol(+)/kg.

Al (27) = $9/27 = 0,33$ mmol/kg eli 0,033 cmol/kg.

Al on 3-arvoinen, joten sen positiivisten varausten määräksi saadaan $0,033 \times 3 = 0,1$ cmol(+)/kg.

Kationinvaihtokapasiteetti on kaikkien positiivisten varausten summa eli $11,5 + 2,7 + 0,62 + 0,1 + 0,1 = 15,02$ cmol(+)/kg eli 15 cmol(+)/kg. Koska uutto oli tehty puskuroimattomalla suolaliuoksella, tulos vastaa maan *efektiivistä KVK:ta pH:ssa 5,7*.

alkali- tai maa-alkalikationit. Sitoutuminen humuksen funktionaalisiin ryhmiin on sitä lujuempaa, mitä heikomman hapon muodostamasta ryhmästä on kysymys. Kemiallisesti tämä selittyy sillä, että heikkojen happojen anionit (kationinvaihtopaikkojen voidaan katsoa edustavan happojen anioneja) ovat vahvoja emäksiä ja halukkaita sitomaan H^+ -ioneja itseensä. Tällä tavalla sitoutunut H^+ ei ole vaihtuvassa muodossa, vaan sen irrottamiseksi on nostettava maan pH:ta (ks. Tietoruutu 4.1).

Alkalimetallit (Na^+ , K^+ jne.) sitoutuvat selvästi heikommin humukseen kuin maa-alkalimetallit (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+}), joiden sitoutumisessa on jonkin verran kovalenttisen sitoutumisen luonnetta ja jotka muodostavat heikon kompleksiyhdisteen. Erityisesti Al- ja raskasmetallikationeilla on etusija pidättymisessä, sillä ne voivat muodostaa kovalenttisin

Tietoruutu 4.4

Kationien sitoutumisvoimakkuus

Vain mineraalirakenteissa esiintyessään ionit ovat paljaita, muuten niiden ympärillä on aina vesikehä, jonka paksuus määräytyy ionin ominaisuuksien perusteella. Vesikehän paksuus vaikuttaa kationin sitoutumistaipumukseen, sillä vaihtopinnalle sitoutuessaan ionit pyrkivät luovuttamaan osan vesikehästään. Mitä enemmän ionin ympärillä on vettä, sitä enemmän tarvitaan energiaa vesikehän poistamiseen ionin lähestyessä vaihtopintaa. Kationi pystyy sitoutumaan sitä lujemmin mitä lähemmäksi vaihtopintaa se pääsee. Kaikkein eniten kationin sisäänvaihtumisvoimakkuuteen vaikuttaa kuitenkin valenssi; mitä korkeampi kationin valenssi on, sitä voimakkaampi on sen ja negatiivisen pinnan välinen vetovoima. Sisäänvaihtuminen tehostuu siis valenssin mukaan järjestyksessä:

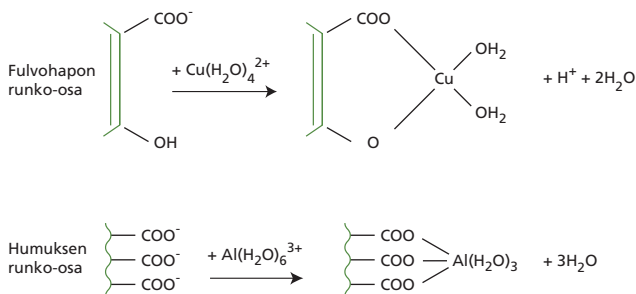
$$+1 < +2 < +3 < +4 \quad (T4.1)$$

Valenssiltaan samanarvoisten kationien kilpailukyky puolestaan määräytyy ionisäteen mukaan: mitä suurempi on paljaan kationin ionisäde, sitä voimakkaampi on sitoutumistaipumus. Tähän vaikuttaa se, että kationin positiivinen varaus vetää puoleensa vesidipolin negatiivisen osittaisvarauksen omaavaa päätä. Kun ionin säde eli koko kasvaa, sen ionipotentiaali (valenssi/säde) pienenee. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ionin varaus jakautuu laajemmalle pinta-alalle, jolloin sähkövaraus tavallaan "laimenee". Tällöin ionin taipumus sitoa vesidipoleja ympärilleen pienenee, vesikehä ohenee ja ioni pääsee lähemmäksi vaihtopintaa. Tämän reaktiotaipumuksen perusteella esim. alkalimetallien sisäänvaihtumiskyky kasvaa järjestyksessä:

$$Li^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+ \quad (T4.2)$$

Toisin sanoen, kun jaksollisen järjestelmän ryhmässä siirrytään alaspäin ja alkuaineen ionisäde kasvaa, kationin sitoutumistaipumus kasvaa. Voimakkaasti hydratoituva Na^+ -ioni siis sitoutuu hiukkaspinnoille heikosti ja huuhtoutuu suhteellisen helposti, sen sijaan Cs^+ -ioni sitoutuu huomattavasti lujuemmin.

Kationien ulosvaihtumisherkyyteen vaikuttaa myös ns. *komplementtikationin* laatu. Maanesteen kationin vaihtaessa ulos tiettyä kationia hiukkaspinnalta, jolla on läsnä myös jokin toinen kationilaji (komplementtikationi), ulosvaihtaminen on sitä helpompaa, mitä suurempi on komplementtikationin sitoutumislujuus. Esimerkiksi NH_4^+ syrjäyttää helpommin Ca^{2+} :n vaihtopinnalta, jossa komplementtikationina on Al^{3+} , kuin pinnalta, jossa se on Na^+ . Koska NH_4^+ pystyy syrjäyttämään Al^{3+} :a paljon vähemmän kuin Na^+ :a, Al^{3+} :n ollessa komplementtikationi liuokseen jää enemmän NH_4^+ -ioneja Ca^{2+} :n vaihtamiseksi.

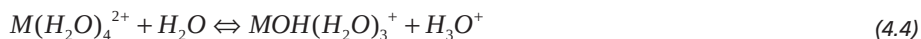


Kuva 4.2 Esimerkki Cu:n ja Al:n muodostamista humuskomplekseista. Kupari on reagoinut fulvohapon karboksyyli- ja fenolisen hydroksyyli-ryhmän kanssa, Al kolmen karboksyyli-ryhmän kanssa.

sidoksin erittäin pysyviä kompleksiyhdisteitä (kuva 4.2). Tämän vuoksi raskasmetallipitoisuudet kuormittuneissa maissa ovat korkeimmillaan maan humuspitoisessa pintakerroksessa. Tehokas sitoutuminen humukseen vähentää niiden kulkeutumista pohjavesiin alapäin vajoavan veden mukana. Huuhtoutumista voi kuitenkin tapahtua silloin, kun metalli sitoutuu humuksen liukoiseen fraktioon eli fulvohappoihin. Näiden syntyä edistävät happamat olosuhteet, minkä vuoksi fulvohappojen osuus metsämaiden humusaineksestä on suurempi kuin peltomaiden humuksesta.

H⁺-ionit ovat erittäin pieniä, minkä vuoksi ne ovat voimakkaasti hydratoituneita eli vesikehä ionien ympärillä on hyvin suuri (ks. Tietoruutu 4.4). Tämän vuoksi niiden sitoutuminen savimineraalien pysyville varauspaikoille on heikkoa eivätkä ne pysty kilpailemaan tehokkaasti savimineraalien vaihtopaikoista. Ne voivat kuitenkin liuottaa mm. mineraalipinnoilla olevia Al-oksiedeja ja vapauttaa Al³⁺-kationeja liuokseen. Al³⁺-kationeilla on suuri sähkövaraus ja ne pystyvät sen avulla tehokkaasti pidättymään mineraaliaineksen kationinvaihtopaikoille. Tämän reaktiosarjan käytännön seuraus on, että happamassakaan maassa ei yleensä esiinny vaihtuvia H⁺-ioneja. Sen sijaan savimineraalien vaihtopaikoilla esiintyy Al³⁺-ioneja, joita siis H⁺-ionit ovat liuottaneet Al:n oksideista.

Jos maassa ei ole humusaineita, voivat raskasmetallikationit sitoutua kuormittuneessa maassa spesifisesti myös oksidipinnoille, mikäli maan pH on riittävän korkea. Monet raskasmetallikationit hydrolysoituvat maassa esiintyvällä pH-alueella. Reaktiossa H⁺ irttoa metalli-iona ympäröivästä hydrataatiovedestä (reaktioyhtälöt 4.4 ja 4.5). Näin ollen metallit voivat esiintyä paitsi vapaina kationeina, esim. M²⁺-ioneina (M = metalli), myös hydroksikomplekseina MOH⁺-muodossa, joka pystyy sitoutumaan spesifisesti oksidipinnoille. MOH⁺-ionien osuus kasvaa pH:n noustessa, ts. sanoen sitä mukaa kun reaktiossa syntyvät oksonium-ionit (H₃O⁺) neutraloidaan:



lyhyessä muodossa:



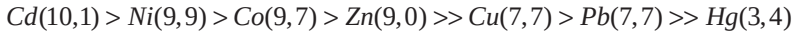
Reaktio oksidipinnoilla kaavamaisesti:



Metallioksidien pinnoille tapahtuvaa pidättymistä voidaan arvioida metallikationien hydrolyysivakion¹ eli pK_I-arvojen avulla. Mitä korkeampi arvo on, sitä korkeampi pH tarvitaan

¹ pK_I-arvo tarkoittaa käytännössä pH:ta, jossa puolet k.o kationista esiintyy hydroksikompleksina.

vedyn irrottamiseksi metallikationin koordinaatiovedestä. Esimerkiksi alla olevat metallit voidaan panna pK_1 -arvojen (suluissa) perusteella seuraavaan järjestykseen:



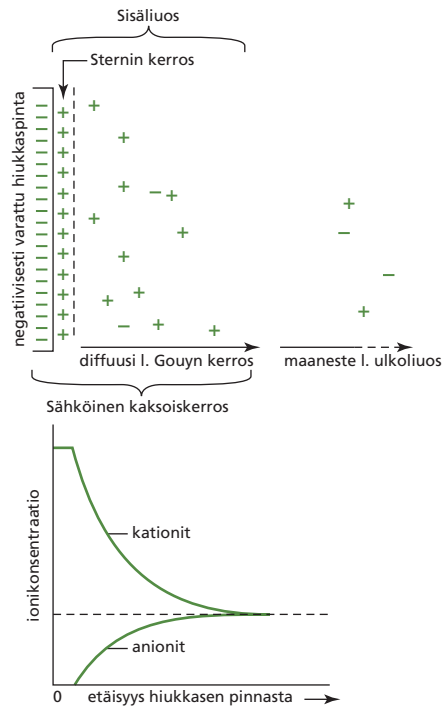
Sarjasta voidaan päätellä, että mm. kadmiumin spesifinen sitoutuminen oksidipinnoille on varsin epätodennäköistä maan normaalilla pH-alueella. Kadmium esiintyykin useimmiten vaihtuvassa muodossa Cd^{2+} :na. Elohopea sen sijaan pystyy sitoutumaan hyvinkin happamissa maissa spesifisesti oksidien pinnoille. Tällainen sitoutuminen on kuitenkin todennäköistä vain silloin kun maassa on hyvin vähän orgaanista ainesta, sillä elohopea muodostaa herkästi kompleksiyhdisteitä orgaanisen aineksen kanssa.

Maanesteen ja hiukkaspintojen kationikoostumus

Negatiivisesti varattu maahiukkasan pinta ja varausta tasoittava kationikerros muodostavat ns. *sähköisen kaksoiskerroksen* (kuva 4.3). Aivan hiukkasan pinnalla kationitiheys on suuri ja se pienenee, kun etäisyys pinnalta kasvaa. Kun saavutetaan kohta, jossa liuosfaasissa on yhtä paljon kationien positiivisia varauksia kuin anionien negatiivisia varauksia, alkaa ns. *maaneste*. Kationien jakautumista kuvaavien teoreettisten mallien yhteydessä kationien leimaamasta kerroksesta käytetään nimitystä *sisäliuos* ja maanesteestä *ulkoliuos*. Hiukkaspinnoille pidettyneiden eri kationien väliset suhteet riippuvat niiden pitoisuudesta ympäröivässä liuoksessa. Jos maanesteen kationisuhteita muutetaan, tapahtuu muutoksia myös maahiukkasten pintojen kationikoostumuksessa. Täsmällisesti ottaen pitäisi kuitenkin puhua ionien aktiivisuuksista², sillä konsentraation noustessa ionit alkavat häiritä toisiaan, ts. niiden kemiallinen aktiivisuus pienenee.

Kationinvaihtomallit

Vaihtopintojen kationikoostumuksella on paljon käytännön merkitystä. Tämän vuoksi on kehitelty lukuisia yhtälöitä, joiden avulla pyritään arvioimaan esimerkiksi lannoituksen, kalkituksen ja vesitalouden muutosten vaikutuksia vaihtopintojen kationikoostumukseen. Vaikka yhtälöiden pohjana oleviin oletuksiin liittyy epävarmuustekijöitä, yhtälöiden avulla voidaan kuitenkin saada ainakin kohtalaisen hyviä arvioita kationikoostumuksen muutoksista. Maa-aineksen pidättämien eri kationien suhteet riippuvat suuressa määrin niiden konsentraatioista (tarkemmin sanottuna niiden aktiivisuuksista = efektiivisestä konsentraatiosta) ympäröivässä liuoksessa. Karkeasti yksinkertaistaen voidaan sanoa, että kun maanesteessä on kahta valenssiltaan samanarvoista ioni-



Kuva 4.3 (a) Kaaviokuva kationinvaihtopinnan sähköisestä kaksoiskerroksesta ja ionien jakautumisesta sekä (b) anioni- ja kationikonsentraatiosta negatiivisesti varatun hiukkaspinnan lähellä.

² Ionikonsentraation yltiässä arvon 0,001 – 0,01 M konsentraation sijasta käytetään aktiivisuutta. Väkevässä liuoksessa ionien keskinäinen vuorovaikutus pienentää niiden aktiivista konsentraatiota.

lajia, esimerkiksi natriumia ja kaliumia tai magnesiumia ja kalsiumia, niiden suhteet vaihtopinnoilla riippuvat ensi sijassa aktiivisuuksien suhteesta liuosfaasissa, esimerkiksi:

$$(Na^+ / K^+)_{maa} = k_{Na/K} (Na^+ / K^+)_{liuos} \quad (4.7)$$

Kerroin k on reaktion tasapainovakio, jonka arvo riippuu maan ominaisuuksista kuten taipumuksesta suosia K^+ -ionien sitoutumista jne. Tasapainovakion $k_{Na/K}$ ollessa < 1 , reaktiossa suositetaan K^+ -ionien pidättymistä.

Jos liuosessa on 1- ja 2-arvoisia kationeja, vaihtopinnan kationikoostumus riippuu liuosfaasin 1-arvoisen kationin aktiivisuuden suhteesta 2-arvoisen kationin aktiivisuuden neliöjuureen:

$$(Na^+ / Ca^{2+})_{maa} = k(Na^+ / \sqrt{Ca^{2+}})_{liuos} \quad (4.8)$$

Edelleen, jos toinen liuosfaasin ioneista on 1-arvoinen ja toinen 3-arvoinen, suhde hiukkaspinnalla riippuu 1-arvoisen kationin aktiivisuuden suhteesta 3-arvoisen kationin aktiivisuuden kuutiojuureen. Tämä riippuvuus (engl. *Ratio Law*) on voimassa kohtuullisen hyvin varsin monenlaisissa oloissa. Siitä voidaan päätellä, että esim. maanesteen väkevöityminen lannoituksen ja kuivumisen seurauksena siirtää vaihtotasapainoa siihen suuntaan, että 1-arvoisten kationien osuus hiukkaspinnalla kasvaa 2-arvoisten pyrkiessä siirtymään liuosfaasiin. Maanesteen laimeneminen sateen, kastelun ja kasvien ravinteiden oton seurauksena saa aikaan päinvastaisen muutoksen vaihtopinnalla.

Kationikoostumuksen käytännön merkitys

Maanesteen suolaväkevyyden vaikuttaa sähköisen kaksoiskerroksen paksuuteen. Mitä laimeampaa maaneste on, sitä suuremmaksi muodostuu ulkoliuoksen ja konsentroidun sisäliuoksen osmoottisen paineen ero. Tämän vuoksi sisäliuos pyrkii imemään itseensä vettä, kun siinä olevat kationit pyrkivät kasvattamaan vesikehäänsä. Tästä on seurauksena kaksoiskerroksen laajeneminen ja yksittäisten maahiukkasten välisen välimatkan kasvaminen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että maan liettymistäipumus ja eroosioriski kasvavat.

Korkeasta Na-pitoisuudesta seuraa savimailla rakenteen huononemista, sillä Na:lla on voimakas hydratoitumistaipumus. Natriumin taipumus sitoa vettä merkitsee sitä, että savespartikkelien ympärille muodostuu paksu vesikehä, joka pitää maahiukkasia kaukana toisistaan; maa dispergoituu eli liettyy. Mitä heikommin kationi on hydratoitunut ja mitä isompi on sen valenssi, sitä edullisempi se on maan rakenteen kannalta. Korkea natriumpitoisuus kasteluvedessä on suuri riski, mutta jos vedessä on samanaikaisesti runsaasti magnesiumia ja kalsiumia, riski pienenee. Tämä johtuu siitä, että 2-arvoiset kationit kilpailevat tehokkaammin kationinvaihtopaikoista, mikä vähentää natriumin sitoutumista. Kasteluveden natriumpitoisuudesta aiheutuvaa riskiä ei nykyisin enää arvioida veden sisältämän Na:n prosenttiosuuden perusteella, vaan ns. *SAR-arvon* (*Sodium Adsorption Ratio*) avulla:

$$SAR = Na / ((Ca + Mg) / 2)^{1/2} \quad (4.9)$$

SAR-arvon määrittäminen perustuu pitkälti edellisessä luvussa kuvattuihin kationinvaihdon periaatteisiin. Yhtälön avulla voidaan arvioida kuinka paljon kasteluveden sisältämästä Na:sta sitoutuu vaihtopaikoille. Mitä pienemmäksi sitoutuneen Na:n osuus hiukkaspinnalla jää, sitä pienempi on siitä aiheutuva liettymisriski.

Korkea Ca-tyllästysaste parantaa tunnetusti maamurujen eli aggregaattien kestävyyttä. Natriumpitoisuuden pitäisi maassa nousta erittäin korkeaksi (kasveille myrkylliselle tasolle), jotta se pystyisi pitämään suolavaikutuksen kautta hiukkasia yhdessä. Kivennäismailla Al-tyllästysaste nousee nopeasti happamuuden lisääntyessä. Koska Al^{3+} -ionit ovat tehokkaita murujen stabiloijia, on hyvin happamilla urpasavimailla yleensä vieläkin kestävämpi mururakenne

kuin maissa, joiden Ca-kyllästysaste on korkea. Alumiinin hiukkasia sitovaa vaikutusta ei voida kuitenkaan käytännössä hyödyntää, sillä vaihtuvalla Al^{3+} :lla on haitallinen vaikutus kasveihin ja maan mikro-organismeihin.

Anionien sitoutuminen

Anionien sitoutuminen maahan on paljon vähäisempää kuin kationien. Tämä johtuu siitä, että maapartikkelit ovat yleensä negatiivisesti varattuja ja pyrkivät sen vuoksi hylkimään samanmerkkisiä anioneja. Repulsiosta eli hylkimisestä huolimatta muutamat anionit pysyvät kuitenkin pidättymään maahiukkasten pinnoille muodostamalla niiden kanssa kemiallisen sidoksen. Anionit jaetaankin kemiallisen luonteensa perusteella kahteen ryhmään: epäspesifisesti ja spesifisesti pidättyviin. Molemmat pidättymismekanismit ovat ulkoisista olosuhteista riippuvaisia. Orgaaniset anionit, sekä luonnonaineet että synteettisesti tuotetut, voivat pidättyä maassa samoilla mekanismeilla kuin epäorgaaniset anionit.

Epäspesifinen pidättyminen

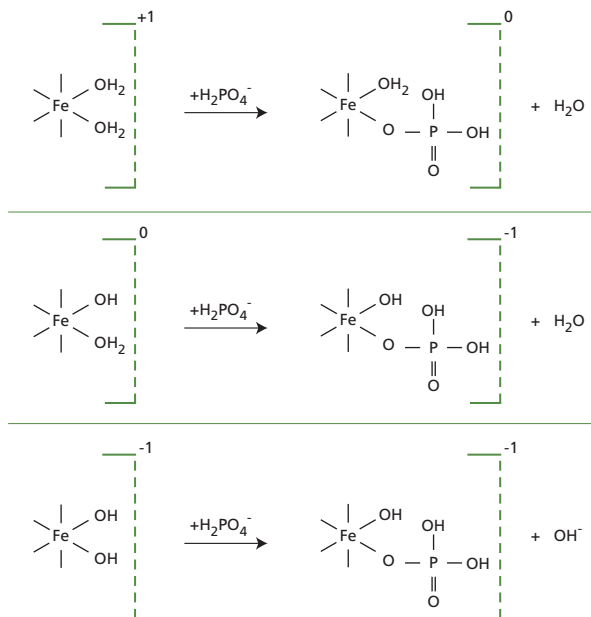
Anionien pidättymistä puhtaasti elektrostaattisin vetovoimin (anioni ei silloin muodosta kemiallista sidosta pinnan kanssa) *positiivisesti* varatuille pinnoille sanotaan *epäspesifiseksi* sitoutumiseksi. Suomalaisissa maissa positiivisesti varattuja pintoja esiintyy kuitenkin vain hyvin happamissa oloissa. Tällaisia varauspaikkoja syntyy, kun maassa esiintyvät Fe:n ja Al:n hydratoituneet oksidit sitovat H^+ -ionin (ks. Tietoruutu 4.1). Myös savimineraalien murtopinnoilla on pH:sta riippuvaa varausta: OH-ryhmät voivat happamissa oloissa muuttua akvo- eli OH_2^+ -ryhmiksi. Anionien epäspesifinen pidättyminen siis teoriassa tehostuu happamuuden lisääntyessä, päinvastoin kuin kationien, mutta on suomalaisissa maissa erittäin epätodennäköistä. Kalkittaessa oksidipintojen varaus muuttuu negatiivisempaan suuntaan, kun H^+ -ioni irtaoo OH_2^+ - tai OH-ryhmästä. Tällöin epäspesifisesti pidättyvien anionien sitoutumismahdollisuudet olennaisesti heikkenevät.

Epäspesifisesti pidättyneet anionit ovat samalla tavalla vaihtuvia kuin elektrostaattisesti pidättyneet kationitkin. Käytännössä suomalaisissa maissa ei kuitenkaan tapahdu epäspesifistä anionien sitoutumista eikä siten varsinaista *anioninvaihtoa*. *Spesifisesti* sitoutuvat anionilajit valloittavat käytännössä aina mahdollisesti maassa esiintyvät positiiviset varauspaikat (ks. kuva T4.2 ja T4.3 (Tietoruutu 4.1)). Kloridi ja nitraatti pystyvät pidättymään ainoastaan epäspesifisesti, minkä vuoksi niiden sitoutuminen on hyvin epätodennäköistä. Ne liikkuvat maaveden mukana ja huuhtoutuvat helposti, elleivät sitoudu biomassaan. Huuhtoutumisriski on suurin karkeissa, hyvin vettä läpäisevissä maissa. Toisaalta nämä anionit voivat nousta ylöspäin syvemmistä maakerroksista maissa, joissa kapillaarinen vedennousu on voimakasta.

Spesifinen pidättyminen

Jotkut anionit, esim. fosfaatti, molybdaatti, silikaatti ja arseniitti, pidättyvät hydratoituneiden Fe- ja Al-oksidiin pinnoille *spesifisesti ligandinvaihtomekanismilla*. Tällöin sitoutuminen tapahtuu vaihtumattomaan muotoon. Tällä tavalla sitoutuville anioneille on luonteenomaista voimakas taipumus reagoida oksidiin keskuskationien (Fe tai Al) kanssa, ts. spesifisessä sitoutumisessa on kysymys kemiallisesta reaktiosta pidättävän pinnan ja pidättyvän anionin välillä. Sitoutuessaan anioni syrjäyttää Fe- tai Al-atomien koordinaatiokehän H_2O - tai OH-ligandin ja liittyy itse happensa välityksellä keskuskationiin (kuva 4.4). Fluoridin sitoutuminen oksideihin perustuu sen taipumukseen muodostaa kompleksi Al:n tai Fe:n kanssa.

Spesifisesti pidättyvät anionit pystyvät sitoutumaan myös negatiivisesti varatulle oksidipinnalle, minkä vuoksi ne pidättyvät varsin tehokkaasti maan normaalilla pH-alueella. Maan happamuuden lisääntyminen kuitenkin edistää sitoutumista. Ligandinvaihdossa oksidipinnan H_2O -ryhmät syrjäytyvät helpommin kuin OH-ryhmät. Näiden ligandien



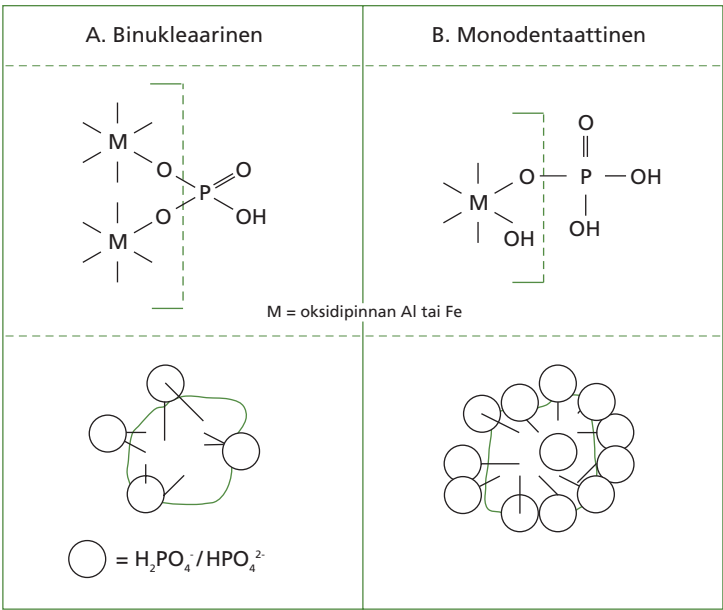
Kuva 4.4 Fosfaatti-anionin (H_2PO_4^-) spesifinen sitoutuminen oksidipinnalle. Huomaa reaktion vaikutus pidätyspinnan sähkövaraukseen.

keskinäinen suhde (ja samalla myös oksidin pinnan sähkövaraus) riippuu pH:sta (ks. Tietoruutu 4.1): H_2O -ligandien osuus kasvaa pH:n aletessa. Tämän vuoksi spesifisesti pidättyvien anionien sitoutuminen tehostuu maan happamuuden lisääntyessä. Koska spesifisesti pidättyvät anionit reagoivat kemiallisesti pidättävän pinnan kanssa, ne sitoutuvat lujasti maa-ainekseen eivätkä huuhtoudu helposti. Toisaalta luja sitoutuminen heikentää niiden käyttökelpoisuutta kasveille.

Spesifisessä sitoutumisessa anioni liittyy osaksi pidättävää pintaa ja syntyy ns. *sisäkompleksi*. Pidättynyt anioni vie pinnalle oman varauksensa, minkä vuoksi pidättävän pinnan varaus voi muuttua negatiivisempaan suuntaan. Pintavarauksen muutos riippuu kuitenkin syrjäytettävän ryhmän varauksesta (kuva 4.4). Jos anionien pidättyminen muuttaa oksidipinnan sähkövarausta negatiivisemmaksi, uusien anionien sitoutuminen pidätyspinnoille vähitellen vaikeutuu samanmerkkisten varausten aiheuttaman hylkimisen lisääntyessä. Kun pidättyminen tapahtuu melko tyhjälle pinnalle, voi esim. fosfaatti kiinnittyä oksidipinnalla yhtä aikaa kahteen keskuskationiin kahden happensa välityksellä, jolloin syntyy luja ns. *binukleaarinen* (kaksitytiminen) kompleksi (kuva 4.5). Pinnan täyttyessä sitoutuminen muuttuu *yksihampaiseksi* (*monodentaattiseksi*), jolloin sitoutumislujuus pienenee.

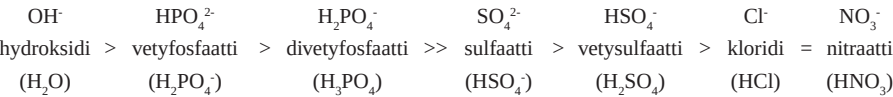
Anionien pidättymistäipumus

Eri anionien välisiä eroja sitoutumismekanismeissa voidaan selittää niiden taipumuksella sitoutua Fe^{3+} - ja Al^{3+} -kationeihin, jotka ovat rinnastettavissa H^+ -ioniin. Kaikki nämä kationit ovat ns. Lewisin happoja, jotka ottavat anionilta vastaan elektroniparin (ks. Tietoruutu 4.5). Anionien sitoutuminen riippuu niitä vastaavan konjugoituneen hapon voimakkuudesta: mitä vahvemman hapon anionista on kysymys, sitä heikommin se pidättyy maahan. Kemiallisesti vahvan hapon (= voimakas pyrkimys luovuttaa H^+) anioni on heikko emäs, joka ei mielellään ota vastaan H^+ -ionia. Näin ollen se ei myöskään liity herkästi Fe- tai Al-kationiin. Tällainen anioni voi periaatteessa sitoutua vain epäspesifisesti sähköisillä



Kuva 4.5 Oksidipinnan fosforinkyllästysaste vaikuttaa fosfaatin (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) sitoutumistapaan. Kaaviokuva pinnan täyttymisen aiheuttamasta binukleaarisen sidoksen muuttumisesta vähitellen heikommaksi monodentaattiseksi sidokseksi.

vetovoimilla ts. sitoutuminen on käytännössä olematonta. Heikoille hapoille on puolestaan tyypillistä, että ne pyrkivät pitämään H^+ :n itsellään. Käänteisesti tämä tarkoittaa sitä, että niiden anionit ovat luonteeltaan vahvoja emäksiä ja sitoutuvat siksi mielellään oksidien keskuskationeihin. Anionien sitoutumistaipumus pienenee seuraavassa happovoimakkuuden lisääntymistä seuraavassa järjestyksessä (anionia vastaava konjugoitu happo on annettu suluissa, ks. Tietoruutu 4.5):



Spesifisesti sitoutuvien anionien joukossa on tärkeitä kasvinravinteita kuten fosfaatti ja molybdaatti, joiden luja sitoutuminen suomalaisissa happamissa maissa vähentää niiden biologista saatavuutta. Edellä esitetystä sitoutumisjärjestyksestä voidaan kuitenkin päätellä, että spesifisesti sitoutuvien anionien käyttökelpoisuutta kasveille voidaan parantaa kalkituksella. Kun pH:n nousee ja OH^- -ionien konsentraatio kasvaa, esimerkiksi fosforihapon anionit luovuttavat protoneita ja muuttuvat heikommiksi pidätyvään muotoon. Samalla kun OH^- -ionien konsentraatio kasvaa, ne pystyvät tavallaan syrjäyttämään anioneja pidätymispaikoilta. Myös muiden samasta pidätyispinnasta kilpailevien anionien läsnäolo pienentää pidätyneiden ravinneanionien sitoutumisvoimakkuutta ja edistää niiden saatavuutta. Suomalaisissa maissa on yleensä pintakerroksissa runsaasti humusta, jonka happojen anionit heikentävät kilpailullaan mm. fosfaatin sitoutumisvoimakkuutta. Orgaanisten anionien sitoutuminen oksidipinnoille vaikeuttaa niiden mikrobiologista hajotusta. Sen vuoksi hienojakoisissa maissa humuksen pitoisuus on yleensä korkeampi kuin karkeajakoisissa ja vähän oksidimateriaalia sisältävissä maissa. Toisaalta on huomattava, että jotkut hapot (esim. boorihappo

H_4BO_4 , arseenihapoke (H_3AsO_3) ovat niin heikkoja, etteivät ne käytännöllisesti katsoen pysty dissosioitumaan anioineiksi maan normaalilla pH-alueella. Koska ne esiintyvät dissosioitumattomina molekyyleinä, ne eivät sitoudu maahan vaan liikkuvat maaveden mukana ja ovat alttiina huuhtoutumiselle.

Anionien pidättymistä säätelevät lainalaisuudet ovat sovellettavissa myös orgaanisina happoina esiintyvien herbisidien (esim. dinoseb, pikloram ja 2,4-D) sitoutumiseen. Heikkoina happoina esiintyvien herbisidien dissosioitumisessa ($HA \rightleftharpoons H^+ + A^-$) syntyvät anionit sitoutuvat eloperäisissä maissa yleensä heikosti (sitovia komponentteja vähän) ja ne liikkuvat helposti maaprofilissa alaspäin. Dissosioitumattomassa muodossa (HA) esiintyessään tällaiset kemikaalit voivat teoriassa sitoutua heikoin fysikaalisin voimin humukseen. Ilmiön käytännön merkitys on kuitenkin vähäinen. Happamat olosuhteet voivat siis edistää happomuotoisen kemikaalin pidättymistä humukseen estämällä H^+ :n dissosioitumisen happomolekyylistä. Toisaalta jos maassa on oksidipintoja, anionimuodossa oleva

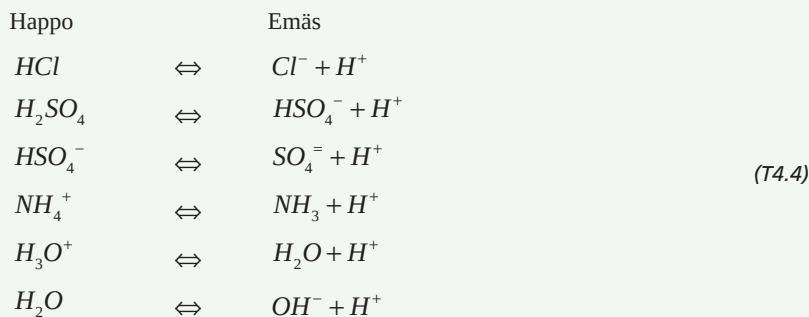
Tietoruutu 4.5

Happo-emäsmääritelmät

Kemiassa on useita happojen ja emästen määritelmiä, jotka ovat rinnakkaisia ja toisiaan täydentäviä. Tässä oppikirjassa sovelletaan Brönstedtin ja Lowryn happo-emäsmääritelmää, jonka mukaan aine toimii happona, kun se luovuttaa vetyionin eli protonin ja emäksenä, kun se ottaa vastaan vetyionin. Yhtälön muodossa esitettyä happo-emäsreaktio on:



Happo ja siitä syntynyt emäs muodostavat konjugoituneen happo-emäsparin. A ja B ovat toisiaan vastaava happo ja emäs, ts. A on B:n konjugoitu happo ja B on A:n konjugoitu emäs. Esimerkkeinä happo-emäspareista ovat seuraavat tapaukset:



Reaktioyhtälöt osoittavat, että eräät aineet (esim. H_2O) voivat toimia sekä happoina että emäksinä. Maassakin esiintyy tällaisia ns. *amfoteerisia aineita* l. amfolyyttejä. Niistä muutammat ovat keskeisiä reaktiokomponentteja (ks. esim. oksidien pintavaraus, Tietoruutu 4.1).

Edellä esiteltyä yleisemmän happo-emästeorian on esittänyt Lewis (1916). Sen mukaan ioni tai molekyyli on happo, jos se voi ottaa vastaan elektroniparin, ja emäs, jos se voi luovuttaa elektroniparin. Lewisin teoria luokittelee hapoiksi myös sellaisia aineita, jotka eivät sisällä vetyä. Yleisesti ottaen Lewisin happoina voivat toimia mm. metallikationit ja positiivisesti varatut molekyylit, ja emäksinä puolestaan voivat toimia negatiiviset ionit ja molekyylit.

herbisidi voi pidäytyä niiden pinnoille spesifisesti. Happamissa oloissa reaktion etenemiseen oksidipinnoilla vaikuttaa kaksi vastakkaisiin suuntiin vaikuttavaa tekijää:

- 1) happamat olosuhteet parantavat oksidipinnan sitomiskykyä, kun pinnan OH-ryhmät protonoituvat, jolloin niiden varaus muuttuu positiivisempaan suuntaan (-OH_2^+ -ryhmien syntyminen)
- 2) toisaalta happamissa olosuhteissa kemikaalin (HA) muuttuminen anionimuotoon (A^-) vaikeutuu, mikä vähentää kemikaalin sitoutumista oksidipinnalle ligandin-vaihdon avulla

Adsorption kannalta optimaaliset olosuhteet ovat lähellä kemikaalin pK_a -arvoa³, jolloin puolet siitä on dissosioituneessa ja puolet dissosioitumattomassa muodossa. Korkeassa pH:ssa sitoutuminen heikkenee, kun OH-ionien pitoisuus kasvaa ja niiden kilpailu pidentymispaikoista lisääntyy.

Maan happamuus

Happamuusaste säätelee voimakkaasti maassa tapahtuvia kemiallisia ja biologisia reaktioita ja vaikuttaa välillisesti myös maan fysikaalisiin ominaisuuksiin. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna happamuus on yleinen ongelma, joka rajoittaa kasvien kasvua. Se heikentää monien ravinteiden saantia joko lisäämällä niiden sitoutumislujuutta (esim. fosfori) tai edistämällä niiden huuhtoutumista (esim. vaihtuvat kationit). Se myös lisää useiden haitallisten aineiden, esim. Al^{3+} :n, liukoisuutta ja vähentää siten mm. biologista aktiivisuutta. Toisaalta myös liian korkea pH on haitallista kasvien kannalta, sillä se heikentää monien tärkeiden hivenravinteiden saantia aiheuttamalla saostumista tai edistämällä niiden sitoutumista vaikeasti vaihtuvaan muotoon.

Maan happamuuden määrittäminen

Yleensä liuoksista puhuttaessa pH:lla tarkoitetaan vety-ionien (H^+) eli protonien aktiivisuuden negatiivista logaritmia, laimeissa liuoksissa protonien konsentraation negatiivista logaritmia ($-\log = \text{p}$). Toisin sanoen, jos vety-ionien aktiivisuus on 0,00001 M eli 10^{-5} M, pH on 5. Vesiliuoksissa ei kuitenkaan esiinny paljaita H^+ -ioneja, vaan hydratoituneita H_3O^+ (oksonium)-ioneja. Lyhyiden vuoksi tässä esityksessä käytetään kuitenkin oksonium-ioneista merkintää H^+ . Maan pH:lle ei voida antaa edellä esitetyn kaltaista selkeää määritelmää. Maan happamuus riippuu dissosioitumiskykyisen H^+ :n määrästä ja happamien Al^{3+} -ionien (ja mahdollisesti myös Fe^{3+} -ionien) osuudesta kationinvaihtopinnoilla. Koska vaihtopinnoilla olevat kationit ovat tasapainossa maanesteen kationien kanssa, happamien kationien osuuden kasvaessa myös maanesteen happamuus lisääntyy.

Hiukkaspinnoille pidäytyneiden vety-ionien aktiivisuutta ei pystytä mittaamaan, vaan mitaustulos kertoo paremminkin maanesteen vetyioniaktiivisuudesta. Maan pH on empiirinen suure, jonka lukuarvo riippuu määritystavasta. pH:ta mitattaessa maanäyte lietetään nesteeseen ja suspension pH määritetään. Jos liettämiseneste on vettä, maaneste laimenee eikä mitattu pH täsmällisesti vastaa protoni- eli vetyioniaktiivisuutta alkuperäisessä maanesteessä eikä myöskään maahiukkasten pinnalla. Jos maa taas lietetään suolaliuokseen, mitaustulos riippuu liuoksen ja maahiukkasten välillä tapahtuvista kationinvaihtoreaktioista. Suola- tai vesilietoksen pH kuvaa maan happamuuden *intensiteettiä*, ts. sillä hetkellä vaikuttavaa tai toimivaa aktiivista happamuutta. Se ei kuvaa *kapasiteettia*, joka tarkoittaa happamuuden kokonaismäärää. Maassa on vaihtelevia määriä esim. orgaanisen aineksen funktionaaliin ryhmiin tai muihin aineisiin sitoutuneita H^+ -ioneja, jotka irtoavat yhdisteistään vasta kun liuosfaasin OH-pitoisuus kasvaa. Näiden H^+ -ionien määrä saadaan sel-

³ pK_a -arvo eli hapon happovakion K_a negatiivinen logaritmi tarkoittaa pH:ta, jossa happo esiintyy puoliksi dissosioituneena.

ville emäksen kulutuksena titrattaessa maata ennalta sovittuun pH-arvoon (yleensä pH 7). Titraustulokseen saadaan siis mukaan myös H^+ -ionit, jotka eivät irtoa, kun pH mitataan käyttämällä puskuroimattomia suolaliuoksia.

Teoreettisesti parhaiten maan happamuuden intensiteettiä kuvaavat sellaiset mittaustulokset, jotka on saatu mahdollisimman hyvin maan olosuhteita vastaavissa olosuhteissa. Tällöin maanäyte lietetään suolaliuokseen, jonka suolakonsentraatio ei poikkea paljon maanesteen suolaväkevyydestä. Usein mittaukset tehdään 0,01 M $CaCl_2$ -liuoksessa, jonka kanssa vastaavan maanesteen olosuhteita: maassa Ca^{2+} on vallitseva kationi ja 0,01 M liuoksen suolaväkevyyden katsotaan vastaavan maanesteen keskimääräistä suolaväkevyyttä. Myös eriväkevyyisiä KCl-liuoksia käytetään yleisesti. Mitä väkevämpää liuosta käytetään, sitä alhaisempia pH-arvoja saadaan. Kun maata uutetaan useilla peräkkäisillä neutraali-suolaerillä (tavallisesti 1 M KCl tai NH_4Cl), vaihtuvat maahiukkasten pinnalle sitoutuneet Al^{3+} -ionit asteittain ulos. Vaihtuvan Al:n määrää kutsutaan usein *vaihtohappamuudeksi*.

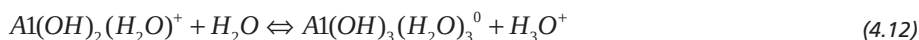
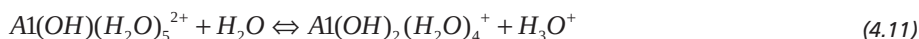
Suomessa rutiinitutkimuksissa pH-mittaukset tehdään vesilietoksista, jolloin saadaan yleensä 0,5–1 pH-yksikköä korkeampia arvoja kuin $CaCl_2$:a käytettäessä. Tämä johtuu siitä, että Ca^{2+} -ionit pystyvät syrjäyttämään hiukkaspinnoilta happamia kationeja (Al^{3+}) liuosfaasiin, jolloin niiden aktiivisuus tulee mittaukseen mukaan (Al^{3+} luovuttaa protonin joutuaan vesifaasiin, ks. reaktioyhtälöt 4.10–4.12). Kasvukauden aikaiset maan suolapitoisuuden vaihtelut, jotka johtuvat mm. lannoituksesta ja kasvien ravinteiden otosta, vaikuttavat vesilietoksesta mitattuun pH-arvoon huomattavasti enemmän kuin $CaCl_2$ -lietoksesta mitattuun. Lannoituksen jälkeen maavedessä on paljon liuenneita suoloja, jotka edistävät pinnoille mahdollisesti sitoutuneiden Al^{3+} -kationien vaihtumista lietosliuoksena käytettyyn veteen. Tällöin saadaan alhaisempi pH kuin kasvukauden lopulla, jolloin ravinteita on poistunut ja maaneste laimentunut. Jos liettämiseen käytetään $CaCl_2$:a, lietosliuoksen suolaväkevyyks peittää alleen osan lannoituksen aikaansaamasta suolapitoisuuden noususta ja lannoitesuolujen vaikutus kationinvaihtoreaktioihin jää suhteellisesti pienemmäksi. Tämän vuoksi on tärkeää, että pH-arvoja ilmoitettaessa mainitaan myös mittaustapa, jolla tulokset on saatu.

Maan happamuuden luonne

Maan kokonaishappamuus eli happamuuden kapasiteettitekijä saadaan selville titraamalla maa emäksellä ennakolta sovittuun pH-arvoon, tavallisesti pH 7:ään. Emästä lisättäessä maanesteen pH nousee, mikä helpottaa kiintoaineksessa sitoutuneena olevien H^+ -ionien dissosioitumista funktionaalisista ryhmistä. Titrauksen jatkuessa hiukkaspinnoilta pääsee irtoamaan vetyioneja yhä heikommin happamista ryhmistä. Titrauksessa saadaan mitatuksi ns. dissosioitumiskykyisten H^+ -ionien määrä, jotka ovat sitoutuneina pH:sta riippuviin varauspaikkoihin. Niistä tärkeimpiä ovat humuksen karboksyyli-ryhmät ($-COOH$), fenoliset, enoliset ja muut alkoholiset OH-ryhmät sekä aminoryhmät ($-NH_2$). Savimineraalien murtopinnoilta ja oksidien pinnoilta voi H^+ -ioneja irrota $(Al,Fe)OH$ - ja $(Al,Fe)OH_2$ -ryhmistä. Myös sekundaarisen kloriitin kerrosväleissä (ks. kuva 2.11) olevasta Al-hydroksipolymeerista voi dissosioitua H^+ -ioneja.

Maan happoryhmistä dissosioituu H^+ -ioneja sitä helpommin, mitä voimakkaammin happamia ryhmät ovat. Humuksen happojen pK_a -arvojen vaihtelu on hyvin suurta, tavallisesti välillä 3–8. Käytännössä tämä tarkoittaa, että jo pH:ssa 3 esiintyy humuksen happoja, jotka ovat luovuttaneet huomattavan osan vetyioneistaan. Fenoliset ryhmät sekä savimineraalien Al-OH- ja Si-OH-ryhmät sen sijaan ovat heikosti tai erittäin heikosti happamia, joten vetyionit irtoavat niistä vasta hyvin korkeassa pH:ssa. Vaihtuvassa muodossa olevat Al^{3+} -ionit ovat happamissa maissa tärkeitä dissosioituvan H^+ :n lähteitä. Niitä syntyy Al-oksidiin liuotessa happamoitumisen seurauksena (Tietoruutu 4.6). Kationinvaihtoreaktioiden kautta hiukkaspinnoilla olevia Al^{3+} -ioneja joutuu maanesteeseen. Siellä niiden ympärillä olevasta vesikehästä alkaa dissosioitua H^+ :a, joka vapautuu veteen aiheut-

taen happamuutta (H_3O^+). Samalla Al^{3+} eli $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ -muuttuu Al-hydroksikompleksiksi (ensimmäisessä vaiheessa $\text{AlOH}(\text{H}_2\text{O})_5^{2+}$, lyhyt esitystapa AlOH^{2+}):



Al^{3+} -ioni on melko heikko happo, sillä sen pK_a -arvo on 4,9 (etikkahapon luokkaa). Kun maan pH on < 4,7, maaveden Al esiintyy suurelta osin 3-arvoisena vapaana kationina. Rauta sen sijaan esiintyy maavedessä vapaana Fe^{3+} -kationina vain erittäin happamissa maissa. Se on noin sata kertaa happamampi kationi (pK_a -arvo 2,2) kuin Al^{3+} ja sen vuoksi Fe esiintyy maan normaalilla pH-alueella lähinnä saostuneena hydroksidina reaktiota 4.12 vastaavalla tavalla.

Maan happamoituminen

Maan happamoitumisella tarkoitetaan sen *haponneutralointikyvyn* vähenemistä. Kalkkipitoiset maat ovat hyvin puskuroituja ja niiden haponneutralointikyky on suuri. Suomen kallioperä ja siitä syntynyt maaperä sisältävät kuitenkin niukasti kalkkikiveä ja emäksisiä (= vähän piihappoa sisältäviä) mineraaleja. Maaperämme on siten luontaisesti hapanta ja pystyy sen vuoksi huonosti vastustamaan H^+ -ionien vaikutusta. Niitä syntyy maan omissa prosesseissa tai joutuu maahan ulkopuolelta tulevana kuormituksena mm. happamana laskeumana. On huomattava, että laskeumana tuleva sulfaatti tai nitraatti eivät maata happamoita (ovat kemiallisessa mielessä emäksiä), vaan happamoittavana tekijänä on aina H^+ -ioni.

Maan omista H^+ -ioneja tuottavista prosesseista tärkeimpiä on hiilihapon muodostuminen CO_2 :sta, jota syntyy mikrobiologisessa hajotuksessa tai juurten hengityksessä:



Sateen mukana maahan joutuvan hiilihapon merkitystä pidetään yleisesti vähäisenä, koska CO_2 :n osapaine ilmakehässä on tavattoman pieni. Lisäksi on huomattava, että syntyvä hiilihappo hajoo happamissa olosuhteissa takaisin lähtöaineiksi (ks. reaktio 4.19). Hiilihappo on pysyvä vain pH 5:n yläpuolella, minkä vuoksi esim. suomalaisissa metsämaissa sillä ei ole merkitystä happamoittavana tekijänä. Sen sijaan karbonaattipitoisten maiden pH-arvo määräytyy normaalioloissa CaCO_3 :a liuottavan hiilihapon pitoisuuden mukaan⁴.

Mikrobiologisen hajotuksen välituotteena syntyvät yksinkertaiset orgaaniset hapot, kuten sitruunahappo ja oksaalihappo, voivat jossain määrin happamoittaa maata. Edellytyksenä kuitenkin on, että maan pH on alun perin korkeampi kuin syntyneen hapon pK_a -arvo. Tällöin H^+ -ionien dissosioituminen haposta edistyy ja ne pystyvät ”vapaina” happamoittamaan maata. Toisaalta jos hapon pK_a -arvo on korkeampi kuin maan pH, vetyionien dissosioitumista haposta ei pääse merkittävässä määrin tapahtumaan. Orgaanisten hapon merkitystä happamoittavana tekijänä kuitenkin vähentää niiden lyhytikäisyys, sillä mikrobit hajottavat ne nopeasti CO_2 :ksi, H_2O :ksi ja mahdollisesti muiksi lähtöaineiksi.

Biologiin happamoittaviin tekijöihin kuuluu myös kasvien juurten kationinotto. Ottaessaan kationeja juuret erittävät H^+ -ioneja sähköisen tasapainon ylläpitämiseksi. Tällainen tilanne tulee kyseeseen ennen kaikkea silloin, kun kasvit käyttävät typen lähteenä NH_4^+ :a

⁴ Empiirisesti kalkkipitoisten maiden pH:n on todettu määräytyvän hiilidioksidin osapaineen pCO_2 mukaan: $\text{pH} = -0,67 \log \text{pCO}_2 + 7,23$

Tietoruutu 4.6

Puskurointireaktiot

Schwertmann ym. (1987) ovat luokitelleet puskurointireaktiot protonin vastaanottajan mukaan. Tämän perusteella voidaan helposti päätellä, miten eri vaiheissa etenevä happamoituminen vaikuttaa maan ja maaveden ominaisuuksiin.

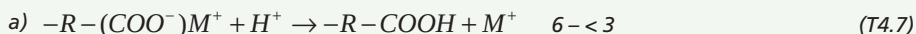
1) Maa-alkalikarbonaattien puskurointi pH-alue, jolla reaktio toimii


Reaktio ei ole palautuva, koska CO_2 poistuu systeemistä. Niin kauan kun maassa on jäljellä CaCO_3 :a, pH ei laske alle 7.

2) Variaabeleilla varauspinnoilla tapahtuva puskurointi

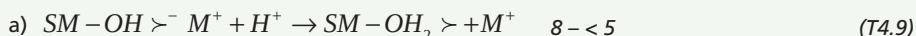
Reaktiossa protonien sitoutuminen tapahtuu kationien miehittämiin heikosti happamiin ryhmiin, joiden varaus riippuu pH:sta. Sitoutuminen tapahtuu aina ensimmäisenä systeemin heikoimman hapon ryhmään (=vahvin emäs). Tämän reaktion kannalta merkitystä on erityisesti humusaineilla, mutta vähäisessä määrin myös savimineraalien silanol- ($-\text{SiOH}$) ryhmillä. Ryhmien, joilla on pH:sta riippuva (variaabeli) varaus, happovoimakkuudet tunnetaan kuitenkin toistaiseksi huonosti, minkä vuoksi reaktioille ei voida esittää tarkkoja pH-alueita.

Humusaineet: pH-alue, jolla reaktio toimii



Reaktion a) seurauksena kationi siirtyy liuosfaasiin ja altistuu huuhtoutumiselle, reaktiossa b) syntyy positiivinen varauspaikka ja humusaineen sitoutuminen esim. savimineraalipinnoille helpottuu.

Savimineraalien (SM) pH:sta riippuvat varauspaikat: pH-alue, jolla reaktio toimii



Reaktion a) seurauksena voi vaihtuvia kationeja huuhtoutua, reaktiossa b) syntyy mahdollinen anionin sitoutumispaikka.

Savimineraalien pysyvää (permanenttia) varausta voidaan verrata vahvan hapon anioniin; se ei sido mielellään H^+ -ionia, joka joutuu näin ollen kilpailemaan pidätympaikoista muiden kationien kanssa. Pistemäisen pieni H^+ on voimakkaasti hydratoitunut, mikä heikentää sen sitoutumiskykyä. Protoni pystyy toisaalta, tosin hyvin hitaasti, liuottamaan mineraalista Al^{3+} -ioneja, jotka kilpailevat tehokkaasti vaihtopaikoilla olevien kationien kanssa. Tällöin on itse asiassa kyse silikaattipuskurin toiminnasta:





Reaktion käytännön merkitystä vähentää se, että silikaattipuskuri toimii hyvin hitaasti ja tulee kyseeseen vain hyvin happamissa olosuhteissa ($\text{pH} < 5$).

3) Silikaattipuskurointi

Silikaattien toimiessa puskuroivina yhdisteinä H^+ -ionit rikkovat hilarakennetta, jolloin hila-kationi vapautuu:

pH-arvo, jolla reaktio toimii

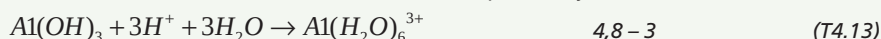


Reaktio ei ole palautuva, koska siinä tapahtuu mineraalin liukenemista.

4) Oksidien, hydroksidien ja hydroksisuolojen puskurointi

Oksidien ja hydroksidien OH-ryhmien protonoituessa ne alkavat liueta ja kationeja vapautuu:

pH-arvo, jolla reaktio toimii

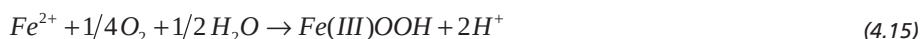


Reaktion seurauksena toksista Al^{3+} :a alkaa esiintyä vaihtuvana kationina ja vähitellen reaktion edetessä sitä alkaa ilmestyä myös maaveteen. Toisaalta Al-hydoksipolymeerien liukeneminen sekundaarisen kloriitin kerrosvälistä avaa kerrosvälin kationinvaihdolle (ks. Tietoruutu 2.1). Raudan oksihydroksidin liukenemisellä protonoitumisen seurauksena on merkitystä vasta hyvin happamissa olosuhteissa ($\text{pH} < 3$):



Vaihtuvaa Fe^{3+} voi siis esiintyä vain äärimmäisen happamissa maissa.

ja kationien otto on suurempaa kuin anionien otto. *Ritsosfäärissä* (= juurten välittömässä läheisyydessä oleva maa) pH voi olla hyvinkin paljon alhaisempi kuin muussa osassa maata. NH_4^+ -typpi voi happamoittaa maata myös mikrobiologisen hapettumisen kautta: NH_4^+ nitrifioidaan nitraatiksi, jolloin reaktion sivutuotteena syntyy H^+ -ioneja (ks. kohta 4.6). Myös esim. Fe^{2+} :n, Mn^{2+} :n, S^{2-} :n hapettumisreaktioilla on merkitystä protonintuottajina. Alla on esitetty erityyppisiä näille alkuaineille annettuja yleisiä reaktioyhtälöitä:



Reaktiossa (4.17) rikin hapetusaste muuttuu -2:sta +6:een.

Happamoitumisen eteneminen ja puskurointireaktiot

Maalla on kyky vastustaa siinä tapahtuvia muutoksia eli sillä on puskuriominaisuuksia. Happamoituminen voi edetä piilevästi, sillä puskurointireaktioiden vuoksi haponneutralointikyvyyn aleneminen ei välttämättä näy pH-arvossa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että puskuroinnissa maahan tulevat H^+ -ionit sidotaan vaikeasti dissosioituvaan muotoon. Tällöin ne eivät ole ”vapaita” eli eivät näy pH-arvossa, joka mittaa H^+ -ionien aktiivisuutta. Kun H^+ -ionit kuormittavat maata, puskurointireaktioiden seurauksena maan ominaisuuk-

sisä tapahtuu kuitenkin aina muutoksia (tietoruutu 4.6). Happamoitumisen etenemisestä ei tämän vuoksi saada riittävää käsitystä pH-mittausten avulla, vaan tarkemman kuvan saamiseksi pitäisi seurata jäljellä olevan haponneutralointikyvyn vähenemistä vastaavalla tavalla kuin vesistötutkimuksissakin tehdään.

Riippuen siitä miten pitkälle happamoituminen on edennyt, muutokset ovat *palautuvia* (*reversiibeilejä*) tai *palautumattomia* (*irreversiibeilejä*). Puskuroitumisessa on olennaista, että systeemiin tullut H^+ sidotaan sellaiseen muotoon, josta se pääsee irtoamaan vain pH:ta nostettaessa. Näin ollen H^+ -ionien mahdollinen sitoutuminen *vaihtuvaan muotoon* kationinvaihdossa pysyville varauspaikoille ei ole varsinainen puskurointireaktio. Puskurointireaktioihin osallistuu sekä liuenneita että kiinteitä aineita. On lisäksi huomattava, että jos maan pH on alun perin suhteellisen korkea, voi maahan sataneen happaman veden pH aluksi jopa nousta, kun se reagoi maakomponenttien kanssa. Tämä johtuu siitä, että sadeveden H^+ -ionit sitoutuvat vaihtumattomaan muotoon humuksen kationinvaihtopaikoille ja syrjäyttävät niiltä samalla ravinnekationeja, jotka joutuvat maaveteen H^+ :n tilalle. Happamoitumisen alkuvaiheessa voi siis tapahtua ns. maaveden *alkalinisoitumista* samalla kun kiinteän aineksen happamuus lisääntyy (ks. Tietoruutu 4.6, reaktioyhtälö T4.5).

Maan happamoitumisen seurauksena kasvaa maaveden kationikoostumuksessa erityisesti maa-alkalimetallien (Mg^{2+} , Ca^{2+}) osuus. Tämä johtuu siitä, että H^+ pyrkii sitoutumaan ensimmäiseksi humuksen funktionaalisiin ryhmiin eli systeemin heikoimman hapon anioniin (ks. Tietoruutu 4.6), jotka ovat etupäässä maa-alkalimetallien miehittämiä. Alkalimetallien (Na^+ , K^+) sitoutuminen humukseen on sitä vastoin varsin heikkoa, minkä vuoksi niiden pitoisuudet maavedessä eivät juuri kasva happamoitumisen seurauksena. Magnesium lähtee liikkeelle helpommin kuin kalsium, sillä se hydratoituu voimakkaammin ja sen muodostama sidos humuksen kanssa on siten heikompi kuin kalsiumin muodostama.

Savimineraalien vaihtopaikoilta H^+ ei pysty suoraan tehokkaasti vaihtamaan kationeja. Se on kooltaan tavattoman pieni ja siksi voimakkaasti hydratoitunut, minkä vuoksi sen elektrostaattisin voimin tapahtuva sitoutuminen mineraalipintojen vaihtopaikoille on heikkoa. Happamoitumisen aiheuttamat vaihtoreaktiot savimineraalien permanenteilta vaihtopaikoilta tapahtuvatkin sekundaarireaktioiden seurauksena: H^+ -ionit vapauttavat ensin mineraaliaineksesta Al^{3+} -ioneja, jotka sitten osallistuvat varsinaiseen vaihtoreaktioon (ks. Al-oksidiin liukeneminen, Tietoruutu 4.6). Kun Al^{3+} :n osuus mineraalien vaihtopaikoilla kasvaa riittävän korkeaksi, vapaita Al^{3+} -ioneja ilmestyy myös maaveteen ja niitä alkaa liikkua kohti pohjavettä ja vesistöjä. Tässä happamoitumisen vaiheessa maaveden pH laskee jyrkästi. Reaktioketjun etenemistä hillitsee kuitenkin humuksen läsnäolo, sillä humus pysyy sitomaan oksideista liuenneita Al^{3+} -ioneja kompleksiyhdisteiksi. Alumiini syrjäyttää humuksesta esim. maa-alkalimetalleja ja mangaania, joiden muodostamat kompleksit ovat varsin heikkoja. Humuksen Al-kompleksit ovat sen sijaan pysyviä ja purkautuvat vasta, kun happamoituminen etenee pitkälle. Tällöin H^+ -ioneja sitoutuu Al^{3+} :n tilalle orgaanisen ainekseen. Happamoitumisen edetessä pitkälle alkaa oksideista vähitellen liueta myös Fe^{3+} :a. Samalla kasvaa Fe^{3+} :n muodostamien humuskompleksien osuus.

Happamoitumisen seuraukset

Suuri H^+ -ionikonsentraatio ei sinänsä merkittävästi häiritse kasvien kasvua, vaan matalan pH:n vahingollisuus johtuu sen seurausvaikutuksista. Näitä ovat mm. kationimuotoisten kasvinravinteiden lisääntynyt huuhtoutuminen KVK:n aletessa, joidenkin kasvinravinteiden (esim. P:n ja Mo:n) tehostunut sitoutuminen ja sen aiheuttama käyttökelpoisuuden heikkeneminen, Al^{3+} :n ja joidenkin hivenmetallien pitoisuuden liiallinen nousu maavedessä, mikrobiologisen aktiivisuuden väheneminen ja kasvitautien lisääntyminen. Turvemaissa pH saa olla huomattavasti matalampi kuin kivennäismaissa ilman että siitä on haittaa kasveille. Tämä johtuu siitä, että turvemaissa ei yleensä ole paljon liukoista alumiinia matalassakaan

pH:ssa. Turpeet ovat syntyneet paikalla kasvaneiden kasvien jätteistä, joissa alumiinia ei juuri ole. Jos alumiinia kulkeutuu turvekerrokseen esim. alla olevasta kivennäismaasta, se sitoutuu orgaaniseen ainekseen kompleksiyhdisteeksi, jolloin se ei ole yhtä myrkyllistä kasveille kuin vapaa Al^{3+} . Myös kivennäismailla alumiinin myrkyllisyysriski vähenee humuksen pitoisuuden kasvaessa.

Matala pH yleensä heikentää maan tuottokyvyn kannalta hyödyllisten mikrobien kilpailukykyä ja suosii näin ollen epäsuorasti vahingollisia mikrobeja. Se lisää myös sienien osuutta hajottajayhteisössä bakteerien osuuden vähetessä. Sienet käyttävät hajottamastaan materiaalista suuremman osan omien solujensa rakentamiseen kuin bakteerit. Tästä seuraa, että orgaanista aineksesta tapahtuva ravinteiden vapautuminen ja ravinnekierto hidastuvat sieniä suosivissa olosuhteissa. Kun bakteerien lima-aineiden tuotanto vähenee, maan murujen stabiilisuus heikkenee ja maan rakenne voi huonontua. Tätä kautta voi syntyä häiriöitä myös maan vesitaloudessa. Tosin myös sienirihmat voivat osallistua maapartikkelien yhteen sitomiseen.

Kalkitus

Happaman maan pH:ta voidaan nostaa lisäämällä maahan emäksisesti vaikuttavaa kalkitusainetta. Reaktiossa on keskeistä, että kalkitusaineen kationi vaihtaa ”happamia” kationeja vaihtopaikoilta ulos liuokseen ja että sen anioni (OH^- , HCO_3^- tai CO_3^{2-}) sitoo H^+ -ionit haitattomaan (vaikeasti dissosioituvaan) muotoon. Olennaista on, että anioni pystyy lopullisesti poistamaan happamuuden. Perusreaktioita ovat:



Neutraloituminen tapahtuu maan eri komponenttien happovoimakkuuden mukaan määrytyvässä järjestyksessä. Ensimmäisinä neutraloituvat vahvat hapot, joille on ominaista pyrkimys luovuttaa protoninsa helposti. Mitä heikommasta haposta on kysymys, sitä vaikeammin se luovuttaa protoninsa emäsanionin neutraloitavaksi. Käytännössä kalkitusainetta tarvitaan siis sitä enemmän, mitä heikompia happoja on maassa neutraloitava. Hyvin heikot hapot eivät kuitenkaan vaikuta maan pH-arvoa alentavasti, koska H^+ -ionit pysyvät niissä sitoutuneessa muodossa.

Maassa esiintyvistä epäorgaanisista hapoista protonin jälkeen vahvin on Fe^{3+} -ioni ja sen jälkeen Al^{3+} -ioni. Happamia sulfaattimaita lukuun ottamatta vaihtuvaa Fe^{3+} :a ei maassa juuri tavata. Sen sijaan vaihtuvaa Al^{3+} :a kivennäismaissa saattaa olla runsaastikin. Kalkittaessa vaihtuvan Al^{3+} :n neutraloituminen etenee reaktioyhtälöiden 4.10–4.12 osoittamalla tavalla sitä mukaa kun yhtälön oikealla puolella olevat protonit neutraloidaan. Täydellisen neutraloinnin tuloksena maahan syntyy niukkaliukoista $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3$:a eli $\text{Al}(\text{OH})_3$:a (lyhyt esitystapa). Neutraloitumisen seurauksena vaihtuva Al^{3+} menettää varauksensa eikä voi enää kilpailla kationinvaihtopaikoista, jotka pääsevät näin ollen täyttymään kalkitusaineen kationeilla. Tällä tavalla kalkitus tasapainottaa maan kationikoostumusta ja muuttaa maaveden koostumusta kasveille ja mikrobistolle suotuisemmaksi. Samalla myös maan vedenläpäisyominaisuudet paranevat, sillä mikrobitoiminnan vilkastuminen sekä Ca-pitoisuuden nousu vaikuttavat maan rakennetta parantavasti.

Humuksessa on suuri joukko happovoimakkuudeltaan erilaisia komponentteja, jotka osallistuvat asteittain neutraloitumisreaktioihin. Humusaineet ovat kuitenkin yleensä luonteeltaan heikkoja happoja ja luovuttavat happoryhmistään H^+ :a emäksen neutraloitavaksi vasta

pH:n ollessa riittävän korkea. Reaktion seurauksena syntyy negatiivisia varauspaikkoja, mikä puolestaan nostaa maan efektiivistä kationinvaihtokapasiteettia (ks. Tietoruutu 4.3).

Hapetus-pelkitysreaktiot

Elektronien ja protonien käyttökelpoisuus määrää usein joko yksinään tai yhdessä orgaanisten ja epäorgaanisten reaktioiden suunnan, nopeuden ja reaktiotuotteiden laadun. Miltei kaikki biokemialliset ja maaperässä tapahtuvat reaktiot liittyvät hapettumiseen ja pelkistymiseen, ts. elektronien siirtymiseen ionilta tai molekyyliä toiselle. Kemiallisesti määriteltynä *hapettuminen* on ilmiö, jossa aine, atomi, ioni tai molekyyli luovuttaa elektroneja, ja *pelkistyminen* sen vastakkainen ilmiö. Elektroneja sitovaa ainetta eli *elektroniaakseptoria* sanotaan *hapettimeksi* ja elektroneja luovuttavaa ainetta eli *elektronidonoria* sanotaan *pelkistimeksi*. Toisaalta, kun hapetin ottaa vastaan elektroneja, se muuttuu aineeksi, joka voi käänteisessä reaktiossa luovuttaa elektroneja (e^-) eli siitä syntyy pelkistin. Aineen pelkistynyt ja hapettunut muoto muodostavat konjugoidun parin, jota sanotaan *hapetus-pelkistyspariksi* eli *redoxpariksi*:



missä n on pelkistimen luovuttamien elektronien (e^-) lukumäärä. Vastaavasti hapettimen pelkistyessä syntyy sen konjugoitu pelkistin:



Hapettumisessa ja pelkistymisessä siirtyvät elektronit eivät kuitenkaan voi esiintyä vapaina. Koska kyseessä on elektronien siirtoreaktio, hapettumiseen liittyy aina toisen aineen pelkistyminen ja päinvastoin. Tämä tarkoittaa sitä, että esim. pelkistin luovuttaa elektroneja vain sillä edellytyksellä, että systeemissä on läsnä aine, joka sitoo vapautuneet elektronit, ts. hapetin. *Hapetus-pelkistys-* eli *redox-*reaktio koostuu siis kahdesta osareaktiosta:



Koska hapettimen sitomien ja pelkistimen luovuttamien elektronien lukumäärän on oltava yhtä suuri, hapettumis-pelkistymisreaktiota kokonaisuudessaan voidaan kuvata yhtälöllä:



Maan happitalous ja sen merkitys

Hapetus-pelkistysreaktiot ovat mukana monenlaisissa kemiallisissa ja biologisissa tapahtumissa maassa ja maavedessä. Ne vaikuttavat useiden ravinteiden kuten hiilen, typen, rikin, raudan ja mangaanin sekä monien haitallisten alkuaineiden esim. arseenin ja kromin käyttäytymiseen. Orgaanisen aineksen hapetusreaktioilla on keskeinen merkitys, sillä niiden seurauksena vapautuu fotosynteesissä sitoutunutta energiaa mikro-organismien käyttöön, samalla kun orgaaniseen ainekseen sitoutunutta hiiltä vapautuu hiilidioksidina. Autotrofia eli yhteyttämiskykyisiä mikrobeja lukuun ottamatta mikrobit käyttävät maan eloperäistä ainesta energian lähteenä. *Kemoautotrofiset* mikrobit saavat energiansa epäorgaanisten yhdisteiden hapetusreaktioista (esim. nitrifikaatiobakteerit, ks. kohta 4.6). Myös kasvien juuret käyttävät orgaanisia yhdisteitä energian lähteenä, mutta niiden käyttämät yhdisteet on syntetisoitu lehdissä ja kuljetettu sieltä juuriin, missä ne hapetetaan CO_2 :ksi. Prosessissa vapautuva energia käytetään juurten kasvuun ja ravinteiden ottoon. Molemmilla tapauksilla siis kulutetaan happea ja tuotetaan hiilidioksidia. Juuriston ja mikrobin hapen saanti edellyttää riittävän nopeaa kaasunvaihtoa maaperän ja ilmakehän välillä.

Kaasut liikkuvat diffundoitumalla osapaineen laskun suuntaan, ja kaasunvaihto on nopeinta ilman täyttämien huokosten kautta. Tämän vuoksi maassa pitää olla tarpeeksi suuria huokosia, jotka tyhjentyvät sateen tai kastelun jälkeen vuorokauden tai parin sisällä. Maan kosteussuhteilla on erittäin suuri vaikutus kaasunvaihdon nopeuteen: mitä märempi maa, sitä suurempi osa kaasunvaihdosta tapahtuu vesifaasin kautta. Hapen saannin vaikeutumista kuvaa hyvin se, että ilmassa O_2 kulkeutuu 10 000 kertaa nopeammin kuin vedessä. Hiilidioksidin liikkumista märkyys haittaa vähemmän, sillä sitä liukenee veteen 30 kertaa enemmän kuin happea. Mikäli maassa on riittävästi ilman täyttämiä huokosia, CO_2 poistuu maasta varsin nopeasti. Maan ilmassa on kuitenkin selvästi suurempi CO_2 -pitoisuus kuin ilmakehän ilmassa (maassa yleensä 0,2 - 0,7 %, ilmakehässä 0,03 %) ja happea puolestaan jonkin verran vähemmän (maan muokkauskerroksessa tavallisesti 17–20 %, ilmakehässä 21 %). Hiilidioksidia alkaa kertyä maan ilmaan ja veteen heti, kun kaasunvaihto ilmakehän kanssa tyrehtyy. Pelkistyneissä oloissa maan pH pyrkii nousemaan (ks. Tietoruutu 4.7), mutta hiilidioksidin kertyminen vastustaa jossain määrin pH:n nousua liukenemalla veteen ja muodostamalla hiilihappoa.

Hapen saannin keskeytyminen aktiivisesti hengittävässä vyöhykkeessä voi vaikuttaa hyvinkin tuntuvasti maan mikrobistoon, eläimiin ja kasveihin sekä maan kemiallisiin ominaisuuksiin. Aerobit mikrobit kuolevat tai menevät lepotilaan samalla kun fakultatiiviset anaerobit lajit tai ehdottoman anaerobit lajit alkavat nopeasti lisääntyä. Hapettomuus ajaa eläimet pois maasta, minkä vuoksi veden vaivaamissa maissa eläinpopulaatiot ovat pieniä. Kasvien juuret kärsivät helposti hapen puutteesta, sillä glukoosin hapetus voi olla epätodellista ja tuottaa kasvin kannalta haitallisia yhdisteitä. Myös bakteerien anaerobinen hengitys voi tuottaa kasvin juurille myrkyllisiä yhdisteitä.

Hapettomuus saa aikaan muutoksia myös maan epäorgaanisissa aineosissa, sillä anaerobit mikrobit käyttävät tällöin elektronin vastaanottajina vapaan hapen (O_2) sijasta muita aineita kuten NO_3^- :a, Mn^{4+} :a, Fe^{3+} :a, ja SO_4^{2-} :a, joiden pelkistymisen käynnistymistä on kuvattu taulukossa 4.1. Sen lisäksi että toissijaisten elektronin vastaanottajien reaktioissa vapautuu vähemmän energiaa kuin hapen toimiessa vastaanottajana, niissä syntyvät reaktiotuotteet voivat olla haitallisia. Esimerkiksi nitriitti (NO_2^-) on myrkyllisempi kuin nitraatti (NO_3^-) ja H_2S myrkyllisempi kuin sulfaatti (SO_4^{2-}). Lisäksi Fe^{3+} :n ja Mn^{4+} :n liukoisuus on merkittävästi pienempi kuin pelkistyneen Fe^{2+} :n ja Mn^{2+} :n, joiden pitoisuudet voivat veden vaivaamissa maissa nousta haitallisen korkeiksi. Mangaanin pelkistysreaktion redoxpotentiaalin arvo on korkeampi kuin raudan, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että happitilanteen huonotessa liukoisien Mn^{2+} :n pitoisuus maavedessä alkaa nousta aikaisemmin kuin liukoisien Fe^{2+} :n. Vastaavasti hapen saannin parantuessa Mn^{2+} pysyy pitempään

Taulukko 4.1 Kokeellisesti mitattuja eri hapetus-pelkistysreaktioiden redoxpotentiaaleja (Scheffer ja Shachtschnabel 1998).

Redoxreaktio	E_r (V) (arvo pH:ssa 7)
NO_3^- :n pelkistys alkaa	+0,45.... +0,55
Mn^{2+} :n muodostus alkaa	+0,35....+0,45
O_2 :a ei enää osoitettavissa	+0,33
NO_3^- :a ei enää osoitettavissa	+0,22
Fe^{2+} :n muodostus alkaa	+0,15
SO_4^{2-} :n pelkistys ja S^{2-} :n muodostus alkaa	-0,05
CH_4 :n muodostus alkaa	-0,12
SO_4^{2-} :n ei enää osoitettavissa	-0,18

Tietoruutu 4.7

Elektroniaktiivisuus

Elektroniaktiivisuus kuvaa maan redox-tilaa vastaavalla tavalla kuin vetyioniaktiivisuus kuvaa maan happo-emästilaa. Käsite eroaa kuitenkin ratkaisevasti ionien aktiivisuudesta siinä, ettei se kuvaa vapaiden elektronien pitoisuutta. Vapaiden elektronien pitoisuus liuoksessa on käytännössä nimittäin häviävän pieni. Elektroniaktiivisuuden negatiivinen logaritmi $pe = -\log(e^-)$ ilmaisee elektronien käyttökelpoisuuden. Jos systeemin pe on matala, siinä on ylimäärin elektroneja, minkä vuoksi sillä on suuri taipumus *luovuttaa* niitä ja hapettua eli systeemi on pelkistynyt. pe on siis ilmaisuna vastaavanlainen kuin pH, jonka matala lukuarvo tarkoittaa suurta vapaiden aktiivisten H^+ -ionien pitoisuutta. Mikäli systeemin pe -arvo on korkea, sillä on voimakas *taipumus sitoa* elektroneja ja siten pelkistyy eli systeemi on hapettunut.

Useimpiin redox-reaktioihin liittyy myös H^+ -ionien siirtyminen. Yleisessä muodossa esitettyssä osareaktiossa, jossa hapettuneiden ja pelkistyneiden aineiden aktiivisuudet ovat yhtä suuret, summa $pe + pH$ vastaa osareaktion tasapainovakiota:



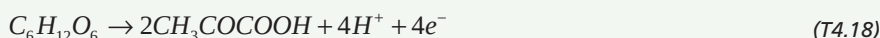
$$\log K = \log Red - \log Ox - \log e^- - \log H^+ \quad (T4.16)$$

Koska tasapainotilassa $Red = Ox$,

$$\log K = pe + pH \quad (T4.17)$$

Mikäli summa $pe + pH$ on vakio, tarkoittaa se käytännössä sitä, että pe :n laskiessa pH nousee ja päinvastoin. Toisin sanoen pelkistyminen pyrkii nostamaan ja hapettuminen laskemaan maan pH:ta.

Glukoosia voidaan käyttää esimerkkiaineena maan orgaanisen aineksen hapetusreaktiosta. Se hapetetaan mikrobien toimesta palorypälehapoksi:



Jos mikrobi hengittää aerobisesti, elektronin lopullinen vastaanottaja on vapaa O_2 :



Jos happea ei ole läsnä, elektronin vastaanottaja on esimerkiksi NO_3^- :



Reaktioyhtälöt osoittavat hapetuksen tuottavan H^+ -ioneja ja pelkistykseen kuluttavan niitä. Maa on kuitenkin monimutkainen systeemi. Siinä ei koskaan vallitse täydellinen tasapainotila, eikä myöskään summa $pe + pH$ pysy täysin vakiona. Edellä esitetyistä yhtälöistä voidaan kuitenkin päätellä, että maan hapetus-pelkistystilaa määritettäessä, on mitattava myös maan pH. Summasta $pe + pH$ on käytetty myös nimitystä maan *redoxparametri*, koska se edustaa kaikkien redoxreaktioiden tasapainovakioiden summaa.

pelkistyneenä ja liukoisena vesifaasissa. Pelkistymisherkkyiden eron perusteella esim. Mn indikoi vesistön tilan muutoksia herkemmin kuin Fe.

Jos sekä happi että sekundaariset elektronin vastaanottajat on kulutettu loppuun, maassa elävät mikrobit voivat vielä saada energiaa orgaanisista yhdisteistä *fermentaation* eli käymisen avulla. Energian kannalta tarkasteltuna kysymys on orgaanisen molekyylin uudelleen järjestäytymisestä niin, että osa sidosenergiasta vapautuu. Käytännön esimerkki fermentaatiosta on soilla, riisipelloilla ja kosteikoissa tapahtuva metaanin (CH₄) tuotto kuolleesta kasvimateriaalista (yleistetty kaava {CH₂O}):



Käytännössä maan hapetus-pelkistystilan eli *redoxpotentiaalin* mittauksella saadaan lähinnä kvalitatiivinen käsitys maassa vallitsevista olosuhteista. Redoxpotentiaali on kuten pH, intensiteetin mitta. Teoriassa mittaustulos kertoo pikemminkin elektronien käyttökelpoisuudesta kuin niiden määrästä. Asian ymmärtämistä helpottaa määritelmä, jonka mukaan vahvalla hapettimella tarkoitetaan ainetta, joka vastaanottaa elektroneja nopeasti.

Rikki ja happamat sulfaattimaat

Sedimenteissä ja pitkään veden vaivaamissa maissa sulfaatti (SO₄²⁻) voi pelkistyä sulfidiksi (S²⁻). Tämä reaktion seurauksena voi tapahtua monien raskasmetallien, kuten Fe:n, Cu:n ja Hg:n, saostumista vaikealiukoisina sulfideina. Rannikkoalueiden ns. happamilla sulfaattimailla rikin mikrobiologiset reaktiot ovat merkittävästi muokanneet ja jatkuvasti muokkaavat maakerrosten ominaisuuksia. Nämä maat ovat syntyneet Itämeren Litorinamerivaiheessa noin 7000 vuotta siten, jolloin merivesi oli lämmintä ja nykyistä suolaisempaa. Vedessä oli runsaasti elämää ja meren pohjalle kertyi paljon kuollutta eloperäistä ainesta. Mikrobit hajottivat sitä takaisin ravintuesuoloiksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi. Samalla ne kuitenkin kuluttivat veteen liuenutta happea. Kun aktiivinen *aerobinen* hajotustoiminta kulutti vapaan liuenneen hapen vedestä, hajotustyötä jatkoivat ns. fakultatiiviset anaerobit mikrobit, jotka pystyvät käyttämään tarvitsemansa hapen lähteenä (elektronien vastaanottajina) kemiallisesti sidottua happea. Sitä oli runsaasti tarjolla sulfaattina (SO₄²⁻), sillä merivedessä sulfaatti on kloridin jälkeen yleisin anioni. Tässä reaktiossa sulfaatti pelkistyi sulfidiksi (S²⁻), joka saostui etupäässä raudan kanssa muodostaen niukkaliukoista ferrosulfidia eli *pyriittiä* (FeS₂), jossa FeS on liittyneenä alkuainerikkiin S⁰. Hapettomissa oloissa myös rauta oli pelkistynyt Fe³⁺:sta Fe²⁺:ksi. Merenpohjalle kertynyt pyriitti FeS₂ säilyy niukkaliukoisuutensa vuoksi sedimenteissä tavattoman pitkiä aikoja, ellei se joudu kosketuksiin vapaan hapen kanssa. Litorinamailla sulfidit ovat säilyneet pohjaveden pinnan alapuolella olevissa maakerroksissa vuosituhansia. Niissä pH on lähellä neutraalia, joskus jopa selvästi emäksinen, ja maa voi olla hyvin tummaa.

Jääkauden jälkeen tapahtuneen maankohoamisen seurauksena hapettomat maakerrokset joutuivat kosketuksiin hapen kanssa ja niissä olevat sulfidit alkoivat hapettua takaisin sulfaatiksi. Happamien sulfaattimaiden synty perustuu tähän takaisin hapettumiseen. Reaktio on voimakkaasti maata happamoittava, sillä siinä vapautuu vety-ioneja ja syntyy rikkihappoa. Sen arvellaan etenevän kahdessa vaiheessa:



Ensimmäinen reaktiovaihe, sulfidin hapettuminen alkuainerikiksi, tapahtuu todennäköisesti puhtaasti kemiallisesti. Toisessa vaiheessa alkuainerikki hapettuu useiden välivaiheiden kautta ainakin osittain mikrobiologisesti sulfaatiksi. Mikrobin läsnäolo nopeut-

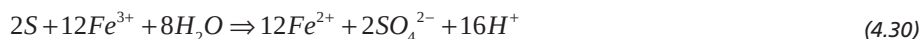
taa hapetusreaktioita. Tehokkaimpia rikkiyhdisteiden hapettajia ovat *Thiobacillus*-suvun bakteerit, joista tunnetuimpia lajeja ovat *T. thiooxidans*, *T. thioparus* ja *T. ferrooxidans*.

Maankohoamista on tapahtunut pitkän ajan kuluessa. Kaukana rannikosta olevilla Litorinomailla ei enää esiinny samanlaisia liiasta suolapitoisuudesta ja voimakkaasta happamuudesta johtuvia ongelmia kuin rannikon läheisillä alueilla. Happamoitumisen seurauksena maa-aineksesta liuenneet suolat ovat ehtineet huuhtoutua pois. Nykyisin maankohoaminen on hyvin hidasta, joten sen aiheuttamat happamuusongelmat ovat vähäisiä. Hapettuneiden maakerrosten paksuus kasvaa ja samalla happamuushaittoja syntyy lähinnä ojitus-, tulvasuojelu- ja muiden maanrakennustöiden seurauksena. Happamuushaittoja voi syntyä erityisesti silloin, kun syvältä kaivetut maakerrokset pääsevät kontaktiin ilmakehän hapen kanssa. Happamilta sulfaattimailta tulevista valumavesissä on liuotusreaktioiden tuloksena yleensä korkeita raskasmetalli- ja Al-pitoisuuksia. Tämän vuoksi ne vaikuttavat haitallisesti vastaanottavien vesistöjen veden laatuun.

Liejusavimurujen pinnoilla ja rakojen seinämillä näkyy usein ohut ruskea tai punertavanruskea rautasaostumakerros. Se stabiloi mureja ja vaikuttaa edullisesti maakerrosten vedenläpäisyominaisuuksiin. Rautasaostuma on syntynyt pääasiassa mikrobiologisesti, kun 2-arvoinen ferrorauta on päässyt hapettumaan 3-arvoiseksi ferriraudaksi pohjaveden pinnan laskiessa (Appelo & Postma 1994, s. 270):



Ferrirauta (Fe^{3+}) pysyy liukoisena vain hyvin happamissa olosuhteissa ($\text{pH} < 3.5$). Hapetomissa olosuhteissa se pelkistyy helposti takaisin ferroraudaksi (Fe^{2+}), jolloin raudan liukoisuus ratkaisevasti lisääntyy. Hyvin happamissa olosuhteissa liukoinen ferrirauta voi katalysoida rikin hapettumista:



Mikrobien hapettama ferrirauta pelkistyy reaktiossa kemiallisesti ferroraudaksi samalla kun syntyy sulfaattia. Muodostunut ferrorauta on taas mikrobien hapetettavissa uudelleen ferriraudaksi ja reaktio voi jatkua.

4.3 Veteen liuenneiden aineiden kulkeutuminen maaperässä

Tuomo Karvonen

Aineiden kulkeutumisella tässä yhteydessä tarkoitetaan ionien, molekyylien tai muiden kiinteiden hiukkasten liikettä maa- ja pohjavedessä. Tarkkaan ottaen käsittelyyn pitäisi ottaa vain veteen liuenneiden aineiden kulkeutumisprosessit, eli advektio, diffuusio ja dispersio. Kun mielenkiinnon kohteena kuitenkin on maaperän ravinnetalous, on mahdotonta olla tarkastelematta myös sen tyyppisiä tilanteita, joissa veteen liuenneet aineet osallistuvat erilaisiin reaktioihin. Tyypillisiä prosesseja ovat mm. pidäytyminen maahiukkasten pinnoille tai pinnoille adsorboituneiden aineiden vapautuminen liukoiseen muotoon, sekä erityyppiset hajoamisreaktiot. Tässä luvussa ei tarkastella soprtioreaktioiden fysikaalisia tai kemiallisia perusteita eikä hajoamisen biologisia prosesseja, vaan ainoastaan sitä, miten sorptio ja hajoaminen vaikuttavat veteen liuenneiden aineiden kulkeutumisnopeuteen ja miten kulkeutumisnopeuteen vaikuttavat prosessit voidaan kuvata matemaattisesti. Pidätymisprosessien kemiallista taustaa on kuvattu kohdissa 4.2, 4.5, 4.6 ja 4.7.

Peltoalueiden ravinnehuuhtoumien vähentäminen tulee lähimpien vuosien aikana olemaan yksi tärkeimmistä tavoitteista, kun halutaan pienentää pintavesiemme rehevöitymisongelmia. Peltoviljelyssä typen ja fosforin huuhtoutumiseen vaikuttaa oleellisesti se,

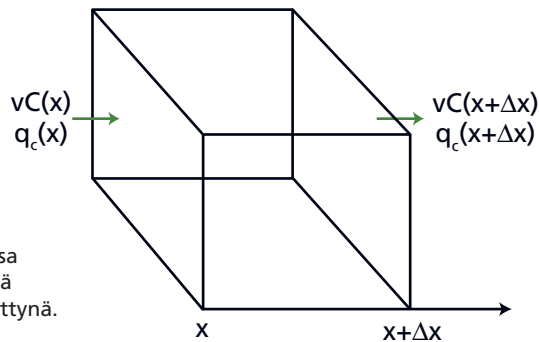
mikä on veden ja aineiden todellinen reitti sadannasta valunnaksi. Useissa tutkimuksissa (mm. Trojan ja Linden 1992; Pitkänen ja Nuutinen 1998; Villholth ym. 1998; Paasonen-Kivekäs ym. 2000; Jarvis ja Larsson 2001; Uusitalo ym. 2001; Jauhiainen 2004; Kukkonen ym. 2004; Warsta 2007) on joko suoraan tai epäsuorasti todettu, että makrohuokosten rooli vesien virtauksissa ja aineiden kulkeutumisessa on erityisesti savimailla hyvin oleellinen. Ravinteiden huuhtoutumista on kuvattu muissa tämän kirjan kohdissa (4.5–4.6), mutta makrohuokosten vaikutusta aineiden kulkeutumiseen maaprofilissa on syytä tarkastella lähemmin tässä yhteydessä.

Advektio

Advektiolla tarkoitetaan aineen passiivista kulkeutumista veden mukana; virtauksen nopeus ja suunta määräävät veteen liuenneen aineen liikkeen. Jos virtausnopeus on nolla, niin advektiota ei tapahdu. Tarkastellaan kuvassa 4.6 esitetyn kappaleen massatasetta aikavälillä, jonka pituus on Δt (d). Otetaan tässä huomioon vain x-akselin suunnassa tapahtuva advektio. Kappaleen sivun pituus virtauksen suunnassa on Δx (m) ja kappaleen poikkipinta-ala virtausta vastaan kohtisuorassa suunnassa on A (m²). Kappaleen tilavuus V on siis $\Delta x \cdot A$ (m³). Virtausnopeus x-suunnassa on v (m d⁻¹). Massatasetta laskettaessa on otettava huomioon kappaleeseen tuleva ainemäärä, siitä poistuva ainemäärä ja kappaleen sisään varastoituneen ainemäärän muutos ajan suhteen.

Advektion kuljettama ainemäärä voidaan laskea seuraavasti. Tarkastellaan poikkileikkausta A , jonka läpi virtaa vettä nopeudella v ja veteen liuenneen aineen konsentraatio on $C(x)$ (g m⁻³). Poikkileikkauksen läpi aikayksikössä virtaava ainemäärä saadaan kertomalla virtausnopeuden ja pitoisuuden tulo (sen yksikkö on g m⁻² d⁻¹) poikkileikkauksalalla, jolloin saadaan ainemäärä grammoina sekunnissa. Vasemman sivun kautta kappaleeseen tuleva ainemäärä aikavälin Δt aikana saadaan esitettyä symbolien avulla muodossa $vC(x)A \cdot \Delta t$ (yksiköksi tulee g). Kappaleesta x-akselin suunnassa poistuva ainemäärä on $vC(x+\Delta x)A \cdot \Delta t$. Poistuvan veden pitoisuutta merkitään $C(x+\Delta x)$:llä, joka tulkitaan niin, että kappaleen sisällä pitoisuus muuttuu jonkin verran eli poistuvan veden pitoisuus ei yleensä ole sama kuin tulevan veden pitoisuus $C(x)$. Tässä vaiheessa ei tarvitse tietää kuinka paljon pitoisuus muuttuu vaan ainoastaan se, että muutos tapahtuu.

Massan säilyvyyden laki tarkoittaa sitä, että kappaleeseen tulevan ja siitä poistuvan ainemäärän erotuksen täytyy varastoitua kappaleen sisään. Ainemäärän ja pitoisuuden välinen yhteys on seuraava: ainemäärä M (g) on tilavuus V (m³) kertaa pitoisuus C (g m⁻³). Jos tuleva ainemäärä on suurempi kuin poistuva, niin kappaleen sisältämä ainemäärä muuttuu ja samalla pitoisuus muuttuu. Taaskaan ei ole tässä vaiheessa tarpeen tietää mihin suuntaan



Kuva 4.6.

Advektio- ja diffuusioyhtälöiden johtamisessa tarkasteltava kappale ja siihen tulevat ja siitä poistuvat ainemäärät symbolien avulla esitettynä.

muutos tapahtuu. Nyt tarkastellaan kappaleen sisältämän ainemäärän muutosta ajan suhteen, eli aikavälillä Δt . Olkoon pitoisuus kappaleen sisällä aikavälin alussa $C(t)$, ja aikavälin lopussa $C(t+\Delta t)$. Kappaleen ainemäärä on alkuhetkellä $M(t)=\Delta x \cdot A \cdot C(t)$ ja aikavälin Δt kuluttua $M(t+\Delta t)=\Delta x A C(t+\Delta t)$. Tietoruudussa 4.8 on johdettu advektion laskennassa tarvittava osittaisdifferentiaaliyhtälö, joka voidaan esittää muodossa (4.31)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4.31)$$

Diffuusio ja dispersio

Liuoksessa molekyylien kineettinen lämpöenergia näkyy niiden satunnaisena liikkeenä, joka pyrkii tasoittamaan liuoksen pitoisuuseroja. Tätä ilmiötä kutsutaan molekuläärisiksi diffuusioksi tai lyhyemmin pelkästään *diffuusioksi*. Diffuusion suunta ei riipu ainetta kuljettavan nesteen virtauksesta, vaan ainoastaan pitoisuuseroista ja molekuläärisestä diffuusiokertoimesta D_M . Diffuusion vaikutuksesta veteen liuennut aine leviää yhtä paljon joka suuntaan. Diffuusion aiheuttama vuo q_C (=kulkeutuva ainemäärä aikayksikköä kohden) lasketaan Fickin laiksi kutsutulla kaavalla:

Tietoruutu 4.8

Advektioyhtälön johtaminen

Ainemäärän muutos = Tuleva ainemäärä - Poistuva ainemäärä

$$\Delta x A C(t + \Delta t) - \Delta x A C(t) = v C(x) A \Delta t - v C(x + \Delta x) A \Delta t \quad (T4.22)$$

Jaetaan edellä olevan lausekkeen molemmat puolet $A \Delta t \Delta x$:llä, jolloin saadaan

$$\frac{C(t + \Delta t) - C(t)}{\Delta t} = v \frac{C(x) - C(x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (T4.23)$$

Perusmatematiikan määritelmien mukaan osittaisderivaatta määritellään ajan ja paikan suhteen raja-arvoina

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{C(t + \Delta t) - C(t)}{\Delta t} \quad \text{ja} \quad \frac{\partial C}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(x + \Delta x) - C(x)}{\Delta x} \quad (T4.24)$$

Kun yllä olevat määritelmät otetaan huomioon, voidaan advektioyhtälö kirjoittaa muotoon

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (T4.25)$$

jolloin on ajateltu, että aikaväli Δt ja Δx lähestyvät määritelmän mukaan nollaa. Kuten myöhemmin osoitetaan, käytännön laskelmissa Δt ja Δx saavat selkeästi nollaa suuremmat arvot, eli yhtälö ratkaistaan likimääräisesti.

$$q_c = -D_M \frac{\Delta C}{\Delta L} \quad (4.32)$$

D_M = molekyläärinen diffuusiokerroin ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$)

ΔC = pitoisuusero kahden pisteen välillä (g m^{-3})

ΔL = on pisteiden välinen matka (m)

q_c = ainevuo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Diffuusio on prosessi, jossa maaperässä olevat pitoisuuserot pyrkivät tasaantumaan. On tärkeää huomata, että Fickin laki on täysin analoginen luvussa 3 esitetyn Darcyn lain kanssa; vain termien tulkinta on erilainen. Lämmön johtumista kuvaava Fourierin laki on myös esitettävissä vastaavassa muodossa: diffuusiokertoimen paikalla on lämmönjohtavuuskerroin ja pitoisuuseron korvaa lämpötilaero.

Molekyläärinen diffuusio on hyvin hidas prosessi ja luonnossa sen vaikutus on useimmiten hyvin pieni ns. *dispersioon* verrattuna. Dispersiota syntyy kun huokoisessa väliaineessa kulkeva virtaus vaihtelee nopeudeltaan ja suunnaltaan paikallisesti. Dispersiota tapahtuu, kun vesi ja siihen liuenneet aineet joutuvat kiertelemään maahiukkasia (kuva 4.7). Seu-

Tietoruutu 4.9

Diffuusioyhtälön johtaminen

Ainemäärän muutos = Tuleva ainemäärä - Poistuva ainemäärä

$$\Delta x AC(t + \Delta t) - \Delta x AC(t) = q_c(x) A \Delta t - q_c(x + \Delta x) A \Delta t \quad (T4.26)$$

Jaetaan edellä olevan lausekkeen molemmat puolet $A \Delta t \Delta x$:llä, jolloin saadaan

$$\frac{C(t + \Delta t) - C(t)}{\Delta t} = \frac{q_c(x) - q_c(x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (T4.27)$$

Kun otetaan huomioon tietoruudussa 4.8 määritelty osittaisderivaatan käsite, voidaan yllä oleva yhtälö kirjoittaa muotoon

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial q_c}{\partial x} \quad (T4.28)$$

Kun huomioidaan Fickin laki

$$q_c = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (T4.29)$$

voidaan diffuusioyhtälö kirjoittaa muotoon

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (T4.30)$$

**Kuva 4.7**

Dispersion vaikutus aineen leviämiseen maaperässä (aine liikkuu vasemmalta oikealle).

raus on se, että aine leviää sekä pituus- että poikittaissuunnassa kulkureittiinsä nähden ja sekoittuu samalla yhä suurempaan vesitilavuuteen.

Käytännössä dispersio ja diffuusio tarkastellaan yhtenä prosessina, sillä em. prosessien vaikutusta on mahdotonta erottaa toisistaan. Yhteisvaikutusta kutsutaan usein *hydrodynaamiseksi dispersioksi*.

Advektio-dispersioyhtälö

Samankaltaisuutensa vuoksi molekuläärinen diffuusio ja dispersio voidaan yhdistää käyttämällä Fickin laissa dispersiokerrointa D ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$):

$$D = D_d + D' \quad (4.33)$$

jossa D_d on molekyylärisen diffuusion kerroin ja D' on hydrodynaamisen dispersio kerroin ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$). Advektio-dispersioyhtälö voidaan esittää osittaisdifferentiaalimuodossa

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4.34)$$

jossa oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa hydrodynaamisen dispersio aiheuttamaa aineen kulkeutumista ja toinen termi advektion aiheuttamaa aineen kulkeutumista. Advektio-dispersioyhtälö on käytännössä kaikkien aineiden kulkeutumismallien ydin (esim. Domenico ja Schwartz 1990).

Sorptio

Erilaiset kemialliset reaktiot veteen liuenneen aineen ja maahiukkasten pinnan välillä ovat tärkeä maa- ja pohjaveden laatuun vaikuttava tekijä. Nämä reaktiot voivat vaikuttaa aineiden kulkeutumiseen hidastaen tai jopa pysäyttäen ne. Sorptiolla tarkoitetaan sekä adsorptiota eli aineen pidättymistä hiukkasen pinnalle että sen vastakohtaa desorptiota eli aineen vapautumista pinnalta liuosfaasiin. Adsorptiossa liukoissa muodossa oleva haitallinen aine ja maamatriisiin (maahiukkasten pinnoille ja humukseen) pidättynyt aine reagoivat keskenään. Adsorption seuraus on se, että haitallisen aineen liukoinen pitoisuus alenee ja aineen kulkeutumisnopeus veteen verrattuna hidastuu. Adsorptio ja absorptio käsitellään yleensä samana prosessina: adsorptiossa aine on maahiukkasten pinnoille pidättyneessä, kun taas absorptiossa haitallinen aine on maahiukkasten sisällä.

Adsorptio on palautuva reaktio; tietyssä pitoisuudessa osa haitallisesta aineesta siirtyy maahiukkasten pinnoille ja osa vapautuu pinnoilta liukoiseen muotoon (desorptio). Kun liukoinen pitoisuus muuttuu, adsorption ja desorption suhteelliset osuudet muuttuvat. Jos esimerkiksi liukoinen pitoisuus alenee laimenemisen, dispersion ja kulkeutumisen takia, niin desorption osuus kasvaa. Adsorptio ei poista haitallista ainetta pohjavesistä, mutta hidastaa aineen etenemistä (Karvonen 2003).

Kaksi tärkeintä sorptioprosessin muotoa ovat tasapainotilan adsorptio/desorptio ja kineettinen adsorptio/desorptio. Tasapainotilan adsorptiossa oletetaan, että liukoisin pitoisuuden C muuttuessa pidättyneen aineen määrä S muuttuu heti, eli reaktion oletetaan ole-

Tietoruutu 4.10

Adsorptioisotermit

Lineaarinen isotermi

$$S = K_d C \quad (T4.31)$$

missä S on maahiukkasten pinnoille pidättyneen aineen määrä (mg kg^{-1}), K_d on ns. jakaantumiskerroin (l kg^{-1}) ja C on maaveteen liuenneen aineen pitoisuus (mg l^{-1}).

Freundlichin isotermi

$$S = K_F C^N \quad (T4.32)$$

missä K_F on Freundlichin mallin mukainen jakaantumiskerroin ja N on kokeellinen parametri. N :n arvo vaihtelee yleensä välillä 0,4–1,0. Monille orgaanisille yhdisteille N :n optimiarvo on lähellä ykköstä, mutta esimerkiksi raskasmetalleille ja fosforille N vaihtelee yleensä välillä 0,4–0,6. Jos $N=1$, niin kyseessä on lineaarinen isotermi.

Langmuirin isotermi

$$S = \frac{K_L b C}{1 + K_L C} \quad (T4.33)$$

missä K_L on tasapainotilan adsorptiokerroin (isotermin kulmakerroin pienillä C :n arvoilla), b on adsorptiopaikkojen maksimimäärä eli käytännössä pidättyneen aineen maksimipitoisuus (mg kg^{-1}).

Kineettinen adsorptio

$$\frac{\partial S_K}{\partial t} = \alpha [(1-F)K_d C - S_K] \quad (T4.34)$$

missä S_K on maahiukkasten pinnoille kineettisesti pidättyneen aineen määrä (mg kg^{-1}), K_d on jakaantumiskerroin (l kg^{-1}), F on tasapainotilan adsorption osuus (0–1) ja α (d^{-1}) on kineettisen adsorption nopeusvakio.

van erittäin nopea. Kineettisessä sorptiossa pidättymis- tai vapautumisprosessi vie aikaa ja reaktionopeus muuttuu ajan suhteen, eli prosessi on kineettinen.

Tasapainotilan sorptio

Liukoisten aineiden adsorptio on erittäin monimutkainen ilmiö, jonka aiheuttavat monet mekanismit kuten London-van der Waalsin voimat, Coulombin voimat, vetysidokset, ligandin vaihto, kemiallinen adsorptio, dipoli-dipoli voimat ja hydrofobiset voimat (ks. kohta 4.2). Olipa adsorption mekanismi mikä tahansa, niin on mahdollista määrittää kokeellisesti adsorboituvan aineen määrä, kun liukoisessa muodossa oleva haitallinen aine reagoi maamatriisin kanssa. Pidätyskäyrät tehdään sekoittamalla eri ainespitoisuuden omaavaa vettä maa-aineksen kanssa. Maata ja vettä sisältävät liuokset sinetöidään ja odotetaan kunnes tasapainotila adsorboituneen ja liukoisen pitoisuuden välillä on saavutettu. Sen jälkeen mitataan liukoinen pitoisuus ja lasketaan adsorption määrä kun tunnetaan sekoitukseen käytetyn haitta-aineen määrä. Tulokset esitetään ns. adsorptioisoterminä eli kuvana, jossa vaaka-akselilla on liukoinen pitoisuus C ($\text{mg}^{-1} \text{ l}$) ja pystyakselilla adsorboituneen aineen määrä S ($\text{mg}^{-1} \text{ kg}$). Adsorptioisotermien muoto noudattaa yleensä jotakin kolmesta tyypillisestä käyrästä: lineaarinen, Freundlichin tai Langmuirin isotermi (Karvonen 2003). Tietoruudussa 4.10 on esitetty kolmen edellä mainitun isotermin matemaattinen kuvaus.

Yksinkertaisin vaihtoehto on lineaarinen isotermi, jonka oletetaan yleensä olevan voimassa, jos liukoisen haitta-aineen määrä maanesteessä on pieni mahdollisiin pidättymispaikkoihin verrattuna. Langmuirin isotermin mukaisessa reaktiossa adsorptio kasvaa pienillä C :n arvoilla lähes lineaarisesti ja adsorboituneen aineen määrä lähestyy maksimiarvoa, kun liukoiset pitoisuudet ovat korkeita. Fysikaalinen perusta Langmuirin isotermille on se, että pidättymispaikkoja on yleensä äärellinen määrä ja jos C kasvaa suureksi, niin kaikki pidättymispaikat ovat käytössä, eikä S :n määrä enää kasva vaikka C kasvaisikin. Freundlichin isotermiä puolestaan on mahdollista käyttää silloin, kun pidättymispaikkojen määrä on suuri pidättyvien aineiden määrään verrattuna.

Kineettinen sorptio

Useissa tapauksissa ei voida olettaa, että adsorptio/desorptio tapahtuu välittömästi, kun liukoinen pitoisuus C muuttuu. Tämäntyyppinen tilanne on esimerkiksi silloin, kun haitallinen yhdiste tai ravinne kulkeutuu nopeasti joko paremmin vettä johtavissa kerroksissa tai makrohuokosissa. Huonommin vettä johtavissa kerroksissa, esim. savilinsseissä, advektion vaikutus on pieni, mutta diffuusion myötä paremmin johtavista kerroksista kulkeutuu haitallista ainetta myös huonommin vettä johtaviin kerroksiin. Tämä prosessi on hidas ja muuttuu ajan suhteen, eli prosessi on kineettinen. Kun yhdisteen pääosa on kulkeutunut tietyn paikan ohi, liukoinen pitoisuus ko. kohdalla alkaa laskea, jolloin tapahtuu diffuusiota huonommin johtavista kerroksista paremmin vettä johtaviin kerroksiin. Tämän hitaan desorption seurauksena on mm. se, että haitallisen yhdisteen pitoisuus ei laske heti kuormituksen loppumisen jälkeen: vaikka tarkasteltavan kerroksen vesi vaihtuu useita kertoja, niin huonommin vettä johtavista kerroksista tapahtuva hidas desorptio vapauttaa haitta-ainetta maaveteen.

Fosfaattifosforin, ammoniumtypen ja monien torjunta-aineiden pidättyminen kuvataan usein kineettisenä pidättymisprosessina. Kineettisen sorption matemaattinen kuvaus on esitetty Tietoruudussa 4.10.

Advektion, dispersion, sorption ja biohajoamisen yhteisvaikutus

Advektio-dispersioyhtälö, jossa on huomioitu advektion ja dispersion lisäksi myös aineen pidättymisen ja biohajoamisen vaikutus on johdettu tietoruudussa 4.11:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - k_b C \quad (4.35)$$

R = ns. hidastuvuuskerroin (retardaatiokerroin)

D = dispersiokerroin ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$)

v = huokosveden virtausnopeus, $v = q_w / \theta$ (m d^{-1})

q_w = Darcyn lailla (luku 3) laskettu veden virtausnopeus (m d^{-1})

θ = maan kosteuspitoisuus ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

k = biohajoamisen nopeuskerroin (d^{-1})

Tietoruutu 4.11

Aineiden kulkeutumisen, pidättymisen ja biohajoamisen yhteisvaikutus

Advektion ja dispersion lisäksi mukaan otetaan aineen pidättymisen (kolmas termi oikealla puolella) ja biohajoamisen vaikutus (oikean puolen viimeinen termi):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho_d}{\varepsilon} \frac{\partial S}{\partial t} - kC \quad (T4.35)$$

missä ρ_d on maan kuivatilavuuspaino (kg dm^{-3}) ja ε maan huokoisuus (kosteuspitoisuus, jos kyseessä kyllästymätön maaprofiili) ja k on biohajoamisen nopeuskerroin (d^{-1}). Useimmiten ratkaisu yksinkertaistetaan yhdistämällä yhtälö (T4.35) ja joku Tietoruudussa 4.10 esitetyistä adsorptioisotermeistä

$$S = K_F C^N; \quad \frac{\partial S}{\partial t} = K_F N C^{N-1} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (T4.36)$$

Korvataan yhtälön (T4.32) oikean puolen kolmas termi kaavalla (T4.36) ja saadaan

$$\left(1 + \frac{\rho_d}{\varepsilon} K_F N C^{N-1}\right) \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - kC \quad (T4.37)$$

Otetaan käyttöön retardaatiokerroin R , joka on yhtälön (T4.37) vasemman puolen pitoisuusmuutosta kuvaavan termin kerroin:

$$R = \left(1 + \frac{\rho_d}{\varepsilon} K_F N C^{N-1}\right) \quad (T4.38)$$

kulkeutumisen, adsorption ja biohajoamisen yhteisvaikutus voidaan laskea yhtälöllä:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - k_b C \quad (T4.39)$$

Yhtälön (4.35) viimeisen termin avulla voidaan ottaa huomioon torjunta-aineiden hajoamisen lisäksi mm. denitrifikaation (ks. kohta 4.6) vaikutus maaveden nitraattipitoisuuksiin tai fosfaattifosforin saostuminen niukkaliukoiseen muotoon. Kaava (4.35) on perusyhtälö, jolla voidaan laskea useimmat käytännössä vastaan tulevat aineiden kulkeutumiset. Yhtälö voidaan tarvittaessa laajentaa useampaan dimensioon. Yhtälön ratkaiseminen onnistuu käytännössä vain tietokoneohjelmien avulla (luku 13).

Pidättyminen aiheuttaa sen, että haitallinen aine kulkeutuu hitaammin kuin vesi. Pidättyvän aineen kulkeutumisnopeus v_c (m d^{-1}) voidaan laskea seuraavasti:

$$v_c = \frac{v_w}{R} \quad (4.36)$$

missä v_w on huokosveden virtausnopeus (m d^{-1}) ja R on hidastuvuuskerroin, joka lasketaan tietoruuudessa 4.11 esitetyllä kaavalla.

Advektion, diffuusion ja dispersion suhteellinen osuus kokonaiskulkeutumisesta

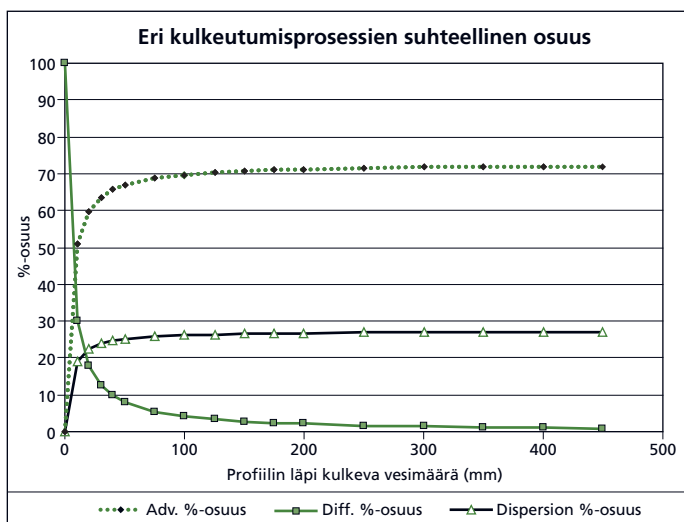
Kuvassa 4.8 on esitetty advektion, diffuusion ja dispersion osuus kokonaiskulkeutumisesta aineelle, joka ei pidäty maaperään. Tulokset on esitetty maaprofiilin läpi virtaavan vesimäärän (mm a^{-1}) funktiona. Kuvan mukaan diffuusiolla on merkitystä vain silloin, jos koko vuoden virtaus maaprofiilin läpi on alle 20 mm a^{-1} . Suuremmilla virtausmäärillä advektio kuljettaa aineesta noin 70 % ja dispersion vaikutus jää hieman alle 30 %:n.

Nitraatin, ammoniumin ja fosfaattifosforin kulkeutumisominaisuuksien testaus

Maatalouden ravinnehuuhtoumista ympäristön kannalta haitallisimmat ovat leville käyttökelpoiset vesiliukoiset muodot eli nitraatti (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) ja fosfaattifosfori (PO_4^{2-}). Kuvissa 4.9 ja 4.10 on esitetty esimerkkilaskelmat vesiliukoisten ravinteiden kulkeutumisesta tilanteessa, jossa maaprofiilin yläpinnalle syötetään vettä nopeudella $0,001 \text{ m d}^{-1}$ (1 mm d^{-1} , joka vastaa salaojavaluntana arvoa 365 mm a^{-1}). Maaprofiiliin syötettävän veden pitoisuudeksi annettiin kaikille yhdisteille sama suhteellinen pitoisuus (100 yksikköä/l), jolloin on mahdollista vertailla sitä, kuinka nopeasti nitraattityppi, ammoniumtyppi ja fosfaattifosfori kulkeutuvat metrin paksuisen maaprofiilin läpi. Laskenta tehtiin ratkaisemalla yhtälö (4.35).

Kuva 4.8

Advektion, diffuusion ja dispersion suhteellinen osuus kokonaiskulkeutumisesta profiilin läpi virtaavan vesimäärän funktiona.

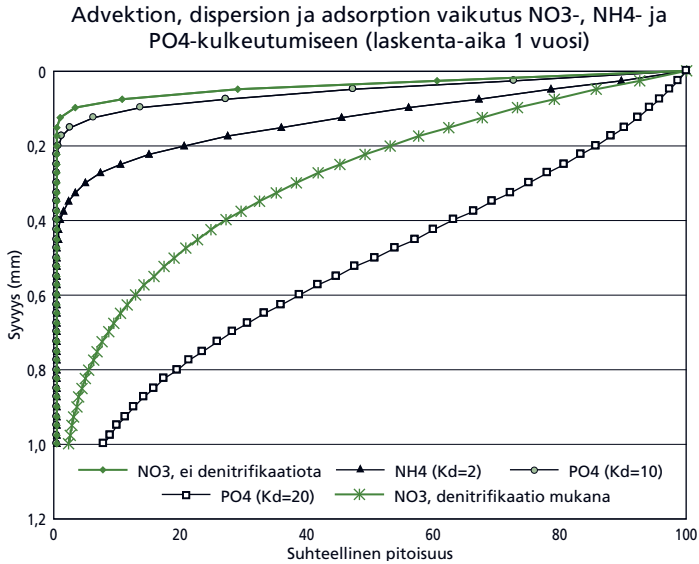


Nitraatti ei pidäty maa-ainekseen, joten sen jakaantumiskerroin $K_d=0$. Ammonium-ioni pidättyy maaperän negatiivisesti varautuneisiin kationinvaihtopaikkoihin (ks. kohta 4.2). Ammoniumin jakaantumiskerroin vaihtelee useimmin välillä $2,0\text{--}4,0\text{ l kg}^{-1}$. Kuvien 4.9 ja 4.10 laskelmissa oletettiin, että NH_4 -ionin jakaantumiskerroin $K_d=2$. Fosfaattifosfori pidättyy maaperään selvästi voimakkaammin kuin ammonium. Fosforin pidättymisprosesseja on esitelty kohdassa 4.5. Laskelmissa käytettiin kahta eri jakaantumiskertoimen arvoa PO_4 -ionille: $K_d=10$ ja $K_d=20$, jotka ovat melko tyypillisiä arvoja pidättymisvoimakkuudella. Selvästi suurempiakin K_d -arvoja voidaan käyttää, jos pidättymispaikkoja on tarjolla runsaasti. Jakaantumiskertoimen valinta käytännön tilanteissa voidaan tehdä joko uuttokokeen tai lieriökokeen avulla, jossa lieriöön syötetään fosforipitoista vettä ja mitataan läpi menneen veden fosforipitoisuutta ajan funktiona.

Kuvassa 4.9 on esitetty nitraatin, ammoniumin ja fosfaattifosforin pitoisuusprofiilit yhden vuoden laskennan jälkeen. Nitraatin pitoisuus metrin syvyydellä on noin 10 % syötetyn veden pitoisuudesta. Ammonium etenee selvästi hitaammin kuin nitraatti ja ammoniumin pitoisuusrintama on edennyt vuoden aikana vain noin $0,3\text{--}0,4\text{ m}$ syvyyteen. Fosfaattifosfori pidättyy vielä voimakkaammin ja pitoisuusrintama on edennyt vain noin $0,1\text{ m:n}$

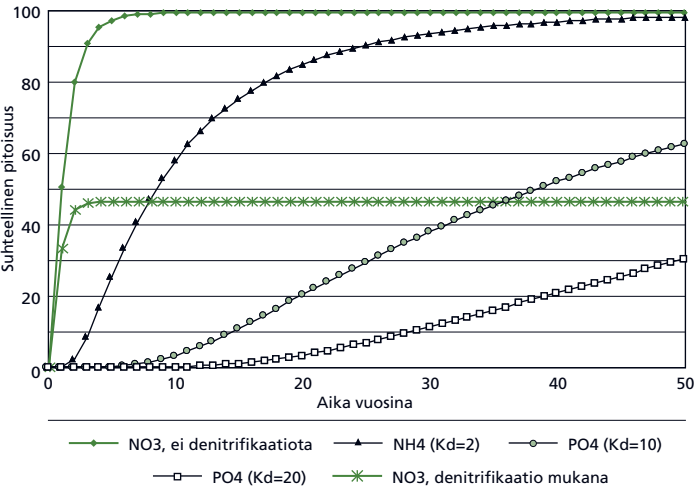
Kuva 4.9

Advektion, dispersion ja adsorption vaikutus nitraattitypen, ammoniumtypen ja fosfaattifosforin kulkeutumiseen yhden vuoden aikana. Profiilin yläpinnalla kaikkien yhdisteiden pitoisuus pidettiin tasolla 100. Huokosveden virtausnopeus $v=0,001\text{ m d}^{-1}$.



Kuva 4.10

Advektion, dispersion ja adsorption vaikutus nitraatin, ammoniumin ja fosfaattifosforin kulkeutumiseen. Nitraatille on esitetty myös denitrifikaation vaikutus.



syvyyteen. Nitraatti voi haihtua ilmaan kaasuna (denitrifikaatio), jota mallissa kuvattiin hajoamisprosessin avulla. Denitrifikaation vaikutus näkyy profiilissa pienempinä pitoisuuksina verrattuna tilanteeseen, jossa haihtumista kaasuna ei oteta huomioon.

Kuvassa 4.10 on esitetty nitraatin, ammoniumin ja fosfaattifosforin pitoisuudet ajan funktiona 0,5 m:n syvyydellä. Nitraatin pitoisuus 0,5 m:n syvyydellä nousee lähelle syötettävän veden pitoisuutta jo muutamassa vuodessa. Ammoniumin pitoisuus kasvaa selvästi hitaammin kuin nitraatin pitoisuus ja 0,5 m:n syvyydellä saavutetaan 90 % syötettävän veden pitoisuudesta vasta noin 25 vuoden kuluttua siinä tapauksessa että NH_4 -ionin jakaantumiskerroin $K_d=2$. Fosfaattifosforin kulkeutuminen on hyvin hidasta ja puolen metrin syvyydellä pitoisuus on 50 vuoden laskentajakson jälkeen 60 % syötetyn veden pitoisuudesta, jos $K_d=10$ ja vain 30 %, jos $K_d=20$.

Nämä laskentaesimerkit kuvaavat hyvin selkeästi kaksi fosforilannoitukseen liittyvää keskeistä ongelmaa. Liukoisessa muodossa annettu fosfaatti pidättyy tehokkaasti maahiukkasten pinnoille, mikä hidastaa fosfaatin kulkeutumista, mutta pienentää samalla kasvien fosforin oton tehokkuutta. Toisaalta pidättyneen fosforin suuri osuus on johtanut useiden vuosikymmenten aikana siihen, että fosforilannoituksen taso on ollut suurempi kuin kasvien ottama fosfori ja ylijäämä on varastoitunut maaperään ja kulkeutuu hiljalleen profiilissa alaspäin. Osa 1960-luvulla annetuista lannoitteista on edellä esitettyjen laskelmien mukaan ehtinyt jo kulkeutua arviolta 0,4–0,8 m:n syvyyteen ja muutaman vuosikymmenen kuluttua salaojien kautta tapahtuva liukoisen fosforin huuhtouma saattaa kasvaa merkittävästi.

Denitrifikaation vaikutus nitraatin kulkeutumiseen on laskentatulosten mukaan merkittävä. Kuvassa 4.10 on esitetty nitraattipitoisuuden kehitys ajan funktiona 0,5 m:n syvyydellä olettaen, että denitrifikaatio olisi jatkuva. Kaasuna ilmaan poistuvan typen vaikutus näkyy niin, että maksimipitoisuus jää selvästi alle syötetyn veden pitoisuuden.

Makrohuokosten vaikutus

Edellisessä kohdassa laskentamallissa oletetaan, että veden virtaus maaperässä tapahtuu siten, että profiilissa etenevä virtaus aiheuttaa tasaisesti kostuvia tai kuivuvia vyöhykkeitä. Todellisuudessa virtaus on aina epätasaista ja suurissa huokosissa – madonreiät, juurikanavat, halkeamat - vesi ja siihen liuenneet aineet liikkuvat selvästi nopeammin. Tätä epätasaista veden liikettä kutsutaan oikovirtaukseksi. Mittaustekniikan kehityksen myötä peltoalueilta saatavan informaation määrä on kasvanut. Useissa tutkimuksissa on huomattu, ettei aiemmin vallassa ollut maamatriisissa tapahtuvan virtauksen käsite tärkeimpänä pinnan alaisena veden kulkutapana sovellukaan kaikkiin tapauksiin, vaan tietyissä olosuhteissa oikovirtausreittien kautta kulkee merkittävä osa vedestä, liukoisista ravinteista ja myös maapartikkeleihin sitoutuneesta fosforista.

Oikovirtaus-käsitteen käyttö ei riipu epätasaisen virtauksen syistä, tai erottele erityyppisiä epätasaisen virtauksen muotoja. Termillä tarkoitetaan siis kaikkia sellaisia ilmiöitä, joissa vesi ja siihen liuenneet aineet kulkevat maassa tiettyjä kulkureittejä pitkin ohittaen osia maamatriisista. Epätasaisen virtauksen syyt ovat moninaiset. Osaa tunnistetuista syntymekanismeista kuvataan omilla termeillään. Makrohuokosissa kulkeva virtaus on oikovirtausta juurien kanavia, lierojen käytäviä, rakoja ja kutistumishalkeamia pitkin. Makrohuokosvirtausta esiintyy yleisimmin hienorakeisissa maissa. Vesi kulkee makrohuokosissa tiheämpien ja heikosti läpäisevien maamatriisin alueiden ohitse käyttäen virtaukselle edullisinta reittiä. Suppilovirtaus tarkoittaa maaprofiilin kerrosten välisten erojen aiheuttamaa vaakasuuntaista veden ohjautumista ja kanavoitumista. Myös tässä tapauksessa vesi kulkee vähiten vastustavaa reittiä pitkin ja saattaa ohjautua maaprofiilin heikommin läpäisevien kerroksien lävitse. Kunkin oikovirtaustyyppin synnyttävät fyysiset mekanismit ovat erilaiset ja usein toimivat yhtäaikaan synnyttäen suuren määrän erityyppisiä virtausmuotoja (Hendrickx ja Flury 2001).

Makrohuokosten olemassaolo on tiedetty jo pitkään; ensimmäiset maininnat löytyvät 1800-luvulta (Beven ja Germann 1982). Makrohuokokset voidaan määritellä koon, syntyvän tai niissä kulkevan virtauksen mukaan. Makrohuokostutkimusta suorittaneet Beven ja Germann (1982) korostavat että pelkästään huokosen halkaisija ei riitä määrittelemään perusteeksi. He luokittelevat makrohuukosiksi sellaiset rakenteet, jotka mahdollistavat nopean virtauksen maamatriisin ohi. Hendrickx ja Flury (2001) kutsuvat makrohuukosiksi sellaisia maassa tai kalliassa sijaitsevia huukosia tai halkeamia, jotka ovat läpimitaltaan huomattavasti keskimääräisiä huukosia suurempia. Yleensä makrohuukosiksi tulkitaan läpimitaltaan 30–1000 µm olevat huukokset.

Makrohuukosvalunnan syntyyn vaikuttavat alkutilan maankosteus, sadannan tai kastelun intensiteetti ja määrä, maan hydraulinen johtavuus, maanpinnan kaltevuus sekä makrohuukosten esiintymistiheys (kpl m⁻²) (Weiler 2001; Trojan ja Linden 1992). Makrohuukosvaluntaa muodostuu useimmin joko maanpinnalla tai jankon ja pohjamaan rajapinnassa. Jos pintakerros on jo lähes kyllästynyt sateen alkaessa, voi makrohuukosvaluntaa muodostua hitaan infiltraation vuoksi hyvinkin nopeasti.

Makrohuukosten vaikutus aineiden kulkeutumiseen

Makrohuukosten vaikutusta arvioitaessa on oleellista tietää niiden kautta kulkeva osuus sekä infiltraatiosta että salaojavalunnasta. Makrohuukosten kautta virtaava vesi kulkeutuu savimaassa salaojiin oikovirtauksina eikä ehdi reagoi pohjamaan kanssa. Erityisen haitallisia ovat heti lannoituksen jälkeen tapahtuvat suuret sateet, jotka pystyvät kuljettamaan merkittäviä määriä muokkauskerroksessa olevia ravinteita suoraan vesistöihin.

Makrohuukosten vaikutuksen mallintaminen on esitetty luvussa 13 ja tässä yhteydessä tarkastellaan laskentaesimerkkien avulla makrohuukosten merkitystä sekä veden että ravinteiden kuljettajana. Kuvissa 4.11–4.13 on esitetty CROPWATNP-mallilla (ks. luku 13) laskettuja tuloksia makrohuukosten merkityksestä sekä veden että siihen liuenneiden aineiden kulkeutumiseen tyypillisellä suomalaisella savimaalla, jonka pohjamaan vedenläpäisevyys on suuruusluokkaa 0,01 m d⁻¹. Laskelmissa makrohuukosten vedenläpäisevyys oli 20 m d⁻¹. Laskentaesimerkissä salaojien väliseksi etäisyydeksi valittiin 12 m, salaojien syvyydeksi 1,0 m, viljakasvina oli kevätvehnä, typpilannoitus oli 80 kg N ha⁻¹ a⁻¹ ja fosforilannoitus oli 16 kg P ha⁻¹ a⁻¹. Maan fosforivaroja kuvaava P-luku oli laskennan alussa 8,0 mg l⁻¹ ja vuotuinen typen mineralisaatio oli noin 50 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Laskentajakson pituus oli seitsemän vuotta ja kuvien tulokset ovat vuotuisia keskiarvoja. Pellon oletettiin olevan tasainen, ja mallin tulosten mukaan eroosio oli noin 1,8 tn ha⁻¹ a⁻¹ kun makrohuukosten osuus oli 0 % ja noin 0,7 tn ha⁻¹ a⁻¹ kun makrohuukosten tilavuusosuus pintamaassa oli 5 %. Makrohuukosten tilavuusosuuden oletettiin pienevän syvyyssuunnassa noin viidesosaan maksimiarvostaan salaojien syvyyteen tultaessa.

Kuvan 4.11 mukaan makrohuukosten tilavuusosuuden lisääminen muuttaa merkittävästi salaoja- ja pintavalunnan suhteita. Salaojavalunnan määrä oli alle 100 mm a⁻¹ silloin, kun makrohuukosia ei ole ollenkaan ja yli 250 mm a⁻¹ kun makrohuukosten tilavuusosuus pintamaassa oli 5 %. Tulosten mukaan salaojavalunnasta noin 70 % tuli makrohuukosten kautta, kun makrohuukosten tilavuusosuus ylitti 4 %.

Kuvassa 4.12 on esitetty mallin laskema typen kokonaishuuhtouma (kg N ha⁻¹ a⁻¹) ja liukoisien typen huuhtouma (nitraatti- ja ammoniumtypen summa). Kokonaishuuhtoumassa on mukana myös eroosioainekseen pidähtynyt tyyppi. Valituilla laskenta-arvoilla kokonaistypen huuhtouma pysyi melko vakaalla tasolla (noin 5 kg N ha⁻¹ a⁻¹) niin, että makrohuukosten tilavuusosuuden kasvaessa liukoisien typen huuhtouma kasvoi ja pintavalunnan mukana tapahtunut typen huuhtouma pieneni. Liukoisien typen huuhtouma oli noin 1,2 kg N ha⁻¹ a⁻¹ jos makrohuukosia ei ollut, ja noin 3,3 kg N ha⁻¹ a⁻¹, kun makrohuukosten osuus kasvoi 5 %:iin kokonaistilavuudesta. Suurilla makrohuukostilavuuksilla niiden osuus liukoisien typen kokonaishuuhtoumasta oli noin 70 %.

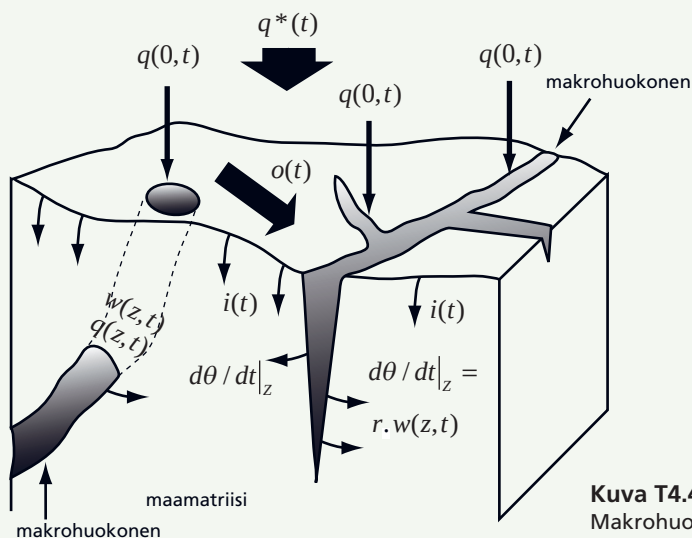
Fosforin kulkeutumisessa makrohuokosten vaikutus on vielä merkittävämpi kuin typen kulkeutumisessa (kuva 4.13). Salaojien kautta tapahtuvasta fosforihuuhtoumasta jopa 90 % kulkee savimaassa makrohuokosten kautta, kun niiden tilavuusosuus on suurempi kuin 3 % kokonaistilavuudesta ja makrohuukosilla on jatkuvuus salaojasyvyyteen saakka. Salaojien kautta tapahtuvassa kulkeutumisessa on mukana sekä vesiliukoinen fosfaattifosfori että kiintoainekseen pidähtynyt partikkelifosfori. Laskentatapauksessa partikkeleihin sitoutuneen fosforin osuus koko salaojien kautta tapahtuvasta huuhtoumasta oli suurimmillaan noin kolmasosa (kuvan 4.13 käyrien P-tot/salaoja ja PO₄/salaoja välinen erotus). Salaojien

Tietoruutu 4.12

Makrohuukosvalunnan synty

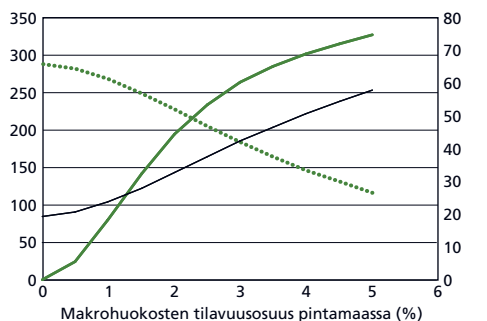
Alun perin Bevenin ja Germannin (1982) käyttämää kuvaa makrohuukosvirtauksen synnystä (kuva T4.4) ja siihen liittyvistä virtauksista ovat myöhemmin muunnelleet Hendrickx ja Flury (2001) ja Salomaa (2005). Kun sadannan tai kastelun vaikutuksesta systeemiin tulevan veden vuo $q^*(t)$ ylittää pintakerroksen infiltraatiokapasiteetin $i(t)$, syntyy maanpinnalle virtaus $o(t)$, joka aiheuttaa makrohuukosiin veden virtauksen $q(0,t)$. Vuo $q(0,t)$ kasvattaa maankosteutta $w(z,t)$ makrohuukosten sisäpinnalla. Termi $r.w(z,t)$ kuvaa tietyllä syvyydellä z tapahtuvaa veden imeytymistä makrohuukosesta maamatriisiin. Jäljellä jäävä osuus $q(z,t)$ jatkaa makrohuukosta pitkin syvemmmälle maahan (Hendrickx ja Flury 2001).

Vuorovaikutus tarkoittaa veden siirtymistä makrohuukosesta ympäröivään maamatriisiin. Kuvassa T4.4 vuorovaikutusta edustaa termi $r.w(z,t)$. Vuorovaikutus riippuu maaperän ominaisuuksien ja maankosteuden lisäksi makrohuukosten geometriasta, esiintymistiheydestä ja seinämien koostumuksesta. Vuorovaikutusta selittävät tekijät voidaan jakaa maamatriisin ominaisuuksiin ja makrohuukosten ominaisuuksiin. Sivuttaissuuntaiset virtaukset kyllästymättömässä maamatriisissa riippuvat maan hydraulisesta johtavuudesta ja maankosteudesta. Makrohuukosten geometria ja esiintymistiheys määrittävät matriisin ja makrohuukosten välisen vaikutuspinnan alan. Makrohuukosten seinämien koostumus yleensä pienentää hydraulista johtavuutta vuorovaikutuspinnassa ja siten hidastaa interaktiota. (Weiler 2001).



Kuva T4.4
Makrohuukosvirtauksen synty.

kautta tapahtunut liukoisen fosfaatin lisäys oli mallin mukaan peräisin kyntökerroksesta: veden virtaus makrohuokosissa on niin nopeaa, että fosfaatti ei pidäty vastaavalla tavalla kuin maamatriisiin (vrt. kuvat 4.9 ja 4.10). Pidättymispaikkoja on makrohuokosissa myös suhteessa selvästi vähemmän kuin maamatriisissa eli makrohuokosten K_d -arvo on selvästi pienempi kuin maamatriisin K_d -arvo.

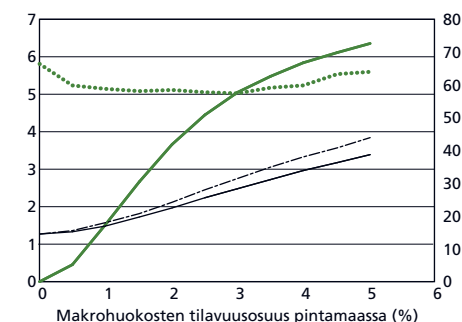


..... Pintavalunta — Salaojavalunta

Kuva 4.11

Makrohuokosten tilavuusosuuden (%) vaikutus tyypillisen savimaan vuotuisen salaoja- ja pintavaluntaan. Valunnan määrä (mm a^{-1}) on esitetty vasemmanpuoleisella pystyakselilla ja makrohuokosten kuljettaman veden osuus (% salaojavalunnasta) on esitetty oikeanpuoleisella pystyakselilla.

— Makrohuokosten kuljettaman veden osuus (% salaojavalunnasta)

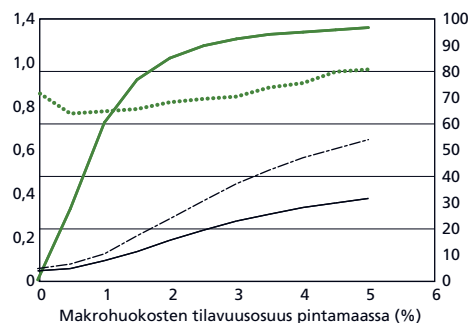


..... N-tot./salaoja+pintavalunta - - - - - N-tot./salaoja

— $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ /salaoja — Makrohuokosten osuus liukoisen typen huuhtoumasta (%)

Kuva 4.12

Makrohuokosten tilavuusosuuden (%) vaikutus tyypillisen savimaan vuotuisen kokonaistypen ja liukoisten fraktioiden huuhtoumaan. Kokonaistypen huuhtoumassa on mukana myös kiintoaineeseen sitoutunut tyyppi. Huuhtouma ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) on esitetty vasemmanpuoleisella pystyakselilla ja makrohuokosten kuljettaman typen osuus (% liukoisen typen huuhtoumasta) on esitetty oikeanpuoleisella pystyakselilla.



..... P-tot./salaoja+pintavalunta - - - - - P-tot./salaoja

— PO_4 /salaoja — Makrohuokosten osuus fosforin salaoja-huuhtoumasta (%)

Kuva 4.13

Makrohuokosten tilavuusosuuden (%) vaikutus tyypillisen savimaan vuotuisen kokonaisfosforin ja liukoisen fosforin huuhtoumaan. Kokonaisfosforin huuhtoumassa on mukana myös kiintoaineeseen sitoutunut fosfori. Huuhtouma ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) on esitetty vasemmanpuoleisella pystyakselilla ja makrohuokosten kuljettaman fosforin osuus (% salaojien kautta tapahtuvasta fosforin huuhtoumasta) on esitetty oikeanpuoleisella pystyakselilla.

4.4 Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen

Thomas Franti

Eroosion esiintyminen ja merkitys

Eroosio on maa-aineksen irtautumista veden, tuulen tai jään aiheuttamien voimien vuoksi, ja irtautuneen aineksen kulkeutumista veden tai tuulen mukana. Aineksen irtautumista maa- ja kallioperästä tapahtuu myös pelkästään painovoiman vaikutuksesta esimerkiksi maanvyöryminä. Eroosiomuotoina erotetaan syntyvän perusteella vesieroosio, tuulieroosio, jääeroosio ja painovoimaeroosio. Vesieroosio jaetaan tavallisesti maa-alueilla tapahtuvaan eroosioon ja uomaeroosioon. Vesieroosio on merkittävin eroosion muoto humidisessa ilmastossa, kun taas aridisilla alueilla tuulen aiheuttama eroosio on yleisintä. Jääeroosiolla on ollut ratkaiseva vaikutus maan pinnanmuotoihin jääkausien yhteydessä, mutta nykyään sitä tapahtuu enää jäätiköityneillä alueilla suppeassa muodossa.

Eroosio on luonnollinen prosessi, joka on muovannut ja muovaa maaperää ja maisemaa jatkuvasti. Eroosion esiintymiseen on vaikuttanut ja vaikuttaa suuresti myös ihmisen toiminta. *Luonnolliseksi* tai *geologiseksi eroosioksi* nimitetään eroosiota, jonka aiheuttama kallioperän rapautuminen on synnyttänyt maaperän mineraaliaineksen, joka yhdessä orgaanisen aineksen kanssa muodostaa ravinteikkaan pintamaakerroksen. Veden ja tuulen mukana kulkeutuva maa-aineksen määrä on luonnontilaisilla kasvipeitteisillä alueilla tavanomaisissa sääolosuhteissa yleensä samaa suuruusluokkaa kuin rapautumisessa muodostuva uusi maa-aines. Metsän muuttaminen viljelymaaksi, avohakkuut, turvetuotanto, ylilaiduntaminen, avokaivokset, rakennustyömaat, maan muokkaus ja kasvipeitteisyyden poistaminen ovat aiheuttaneet eroosion kiihtymistä laajoilla alueilla maapallolla. Näistä toiminnoista maatalouden osuus on merkittävin, vaikka esimerkiksi avohakkuut ja rakentaminen voivat lyhyellä aikavälillä aiheuttaa moninkertaisia eroosiomääriä verrattuna maatalousmaahan. On arvioitu, että 25 mm:n paksuisen pintamaakerroksen muodostuminen kestää 30 vuotta, mutta epäsuotuisissa olosuhteissa tämä määrä voi eroduitua moninkertaisesti yhden vuoden aikana.

Eroosion aiheuttamat haitat sekä maaperälle että vesistöille ovat yksi suurimpia maailmanlaajuisia ympäristöongelmia. Runsaasti ravinteita sisältävän eroosioaineksen kulkeutuminen köyhdyttää maaperää, mikä voi johtaa aikaa myöten pienentyneisiin satoihin ja lisääntyneeseen lannoitteiden käyttöön. Pintavesiin kulkeutuu eroosioainekseen kiinnittyneenä ravinteita, torjunta-aineita ja raskasmetalleja, jotka heikentävät veden laatua ja vesiekosysteemien tilaa. Eroosioaineksen sedimentoituminen jokiin, järviin, varastoaltaisiin ja rannikkoalueille haittaa paikoitellen suuresti vesiliikennettä. Altaiden pohjalle kertyvä maa-aines pienentää niiden varastotilavuutta ja siten käytettävissä olevia vesivaroja mm. kasteluun. Toisaalta tulva-alueille laskeutunut maa-aines on luonut viljavia peltoalueita ja taannut alueiden viljelyn niitä köyhdyttämättä, esimerkiksi Niilin laaksossa. Eroosion torjunta, kuten uudelleenmetsitys, ja eroosion aiheuttamien välittömien haittojen korjaus, kuten vesiväylien ruoppaus, vaativat huomattavia taloudellisia panoksia laajoilla alueilla.

Eroosion määrään vaikuttavat mm. ilmasto- ja sääolot, erityisesti sateiden rankkuus, maan pinnan kaltevuus ja kasvipeitteisyys, maalajit ja viljelykäytäntö. Euroopassa havaitut keskimääräiset eroosiomäärät (pinta- ja noroeroosio) ovat paljaalta maalta $23\,000\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$, kevätiljalla $11\,000\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$, viljakasveilla $2\,000\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$, nurmella $300\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ ja metsäalueilta $100\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ (Cerdan ym. 2006).

Eroosio Suomessa

Peltoalueilla tapahtuva vesieroosio on merkittävin eroosion muoto Suomessa, mutta eroosiota tapahtuu myös metsätalous-, turvetuotanto- ja rakentamisalueilla. Eroosion määrä

Suomessa on selvästi pienempi kuin useissa muissa maissa johtuen sateiden pienestä rankkuudesta ja maaston suhteellisen pienistä korkeuseroista. Eroosion aiheuttamat ongelmat liittyvät ensisijaisesti maahiukkasiin sitoutuneen fosforin kulkeutumiseen pintavesiin, pintavesien sameutumiseen ja purojen pohjien liettymiseen. Vesistöjen pohjalle laskeutuneet maahiukkaset muodostavat fosforivaraston, josta hapettomissa oloissa tai tuulen vaikutuksesta (resuspensio) vapautuu liukoista fosfaattifosforia vesifaasiin levien käyttöön, mikä aikaa myöten johtaa rehevöitymiseen (ks. kohta 4.5). Maa-ainekseen sitoutuneena kulkeutuu pintavesiin myös muita ravinteita, torjunta-aineita ja raskasmetalleja.

Suomessa eroosio aiheutuu vesisateista, lumen sulannasta ja niiden aiheuttamasta pintavalunnasta sekä uomissa tapahtuvasta virtauksesta (kuva 4.14). Eroosioherkimmät alueet ovat Etelä- ja Lounais-Suomen viettävät savipellot, mitä osoittaa alueiden jokien ja järvien savisameus. Näillä alueilla yleisiä viljelykasveja ovat kevät- ja syysviljat, joilla vuosittainen muokkaus on yleistä. Muokattu kasvipeitteetön maa on herkkä eroosiolle ja pintavalunta on suurimmillaan juuri syksyisin ja keväisin. Muualla maassa esiintyy karkearakeisempia maalajeja, jotka ovat vähemmän eroosioherkkiä kuin savimaat.

Savipelloilta poikkeuksellisen sateisena vuonna pintavesiin kulkeutuva kiintoainemäärä saattaa olla jopa $6\,000\text{ kg ha}^{-1}$. Keskimääräiset vuosittaiset eroosiomäärät vaihtelevat muun muassa viljelytoimenpiteiden mukaan, mutta ovat tyypillisesti noin $100\text{--}1\,200\text{ kg ha}^{-1}$. (Tattari ja Rekolainen 2006; Puustinen ym. 2007; Turtola ym. 2007). Savipelloilta eroosioainesta kulkeutuu myös salaojavesien mukana. Salaojien kautta kulkeutuva kiintoainekuorma saattaa olla yhtä suuri tai jopa suurempi kuin pintavalunnan mukana tuleva kuorma (esim. Turtola ym. 2007, Paasonen-Kivekäs ym. 2008, Äijö ym. 2014).

Metsäalueilla mitatut eroosiomäärät ovat olleet $20\text{--}200\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ (Tattari ja Rekolainen 2006). Kiintoainehuuhtoumat ovat lisääntyneet hakkuiden jälkeen nousten jopa $1\,200\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ (Ahtiainen ja Huttunen 1999, Kenttämies ja Mattsson 2006). Metsätaloustaloudessa olevien soiden kunnostusojituksissa on välittömästi ojitusalueelta lähtevien kiintoainemäärien arvioitu olevan keskimäärin $600\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ toimenpiteen jälkeisen ensimmäisen vuoden aikana (Koivusalo ym. 2008, Finér ym. 2010). Turvetuotantoalueiden vuotuisiksi kiintoainekuormiksi on mitattu $40\text{--}100\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ (Vapo 2009). Raken-



Kuva 4.14 Pintaeroosiota eteläsuomalaisella savipellolla (kuva Maija Paasonen-Kivekäs) ja hallitsematonta eroosiota valtaojassa Varsinais-Suomesta kaksi vuotta perkauksen jälkeen. (kuva Juha Järvelä)

netuilta alueilta kulkeutuvat maa-ainesmäärät ovat olleet 100–1 000 kg ha⁻¹ a⁻¹ (Kotola ja Nurminen 2003, Sillanpää 2013).

Tutkimusten mukaan valtaosa vuotuisesta kiintoainekuormasta saattaa syntyä muutamien päivien aikana, jolloin sääolosuhteet, viljelytoimenpiteet ja maan rakenne muodostavat eroosiota edesauttavan yhdistelmän (Warsta ym. 2013). Suurimmat eroosiomäärät on mitattu kevään sulantakaudella ja syksyllä runsaiden sateiden aikana. Keväällä sulavan maan lujuus ja rakenne ovat heikkoja ja maahiukkaset lähtevät herkästi liikkeelle pintavalunnan mukana. Toisaalta roudan on havaittu voivan vähentää maaperän eroosioherkkyyttä (Rekolainen ym. 1989). Syksyllä peltojen muokkaus heikentää maan mururakennetta ja lisää samalla sen eroosioherkkyyttä. Lisäksi rakenteellisen maaperän eroosioherkkyys voi vaihdella vuodenajoin ja lyhemmälläkin aikavälillä, esimerkiksi maan kosteuspitoisuuden muutosten seurauksena (Bryan 2000). Peltoalueilla sateisinakin kesinä pintavalunta ja siten eroosio jäävät yleensä vähäiseksi kasvipeitteestä ja suuresta haihdunnasta johtuen.

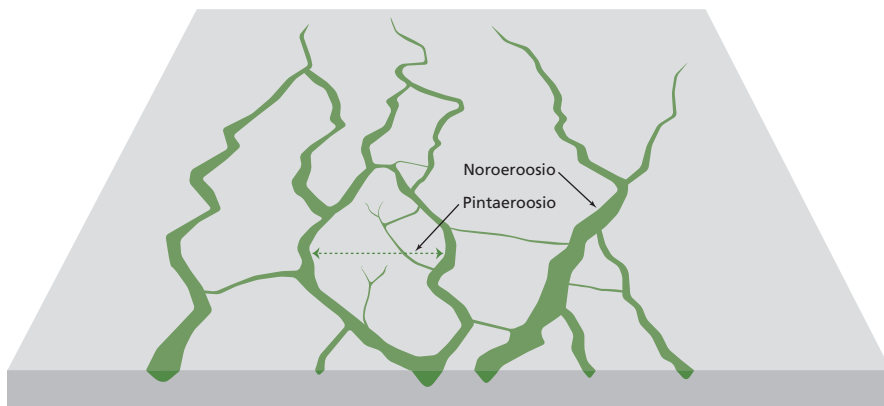
Maa-alueelta tapahtuva vesieroosio

Pintaeroosio muodostuu vesipisaroiden aiheuttamasta pisaraeroosiosta ja laminaarierosiosta. *Pisaraeroosio* syntyy kun sadepisarat iskeytyvät maahan tai sen pinnalla olevaan ohueen vesikerrokseen irrottaen ja lajitellen maapartikkeleita. Tasaisella maalla maahiukkaset sinkoutuvat satunnaisesti eri suuntiin, mutta kaltevassa maastossa tapahtuu siirtymistä rinnettä alaspäin. Kun sadepisarat osuvat ohuena mattona virtaavaan veteen, ne voivat lisätä virtauksen turbulenssia, joka lisää veden kiintoaineeseen kohdistamaa kuljetuskapasiteettia. Sadepisaroiden kineettisen energian lisäksi pisarat voivat aiheuttaa rakenteellisissa maissa eroosiota myös muiden maaperän rakennetta rikkovien prosessien vaikutuksesta (Bissonnais ja Singer 1992). *Laminaarierosioksi* kutsutaan ilmiötä, kun kaltevalla pinnalla ohuena kerroksena virtaava vesi irrottaa maahiukkasia mukaansa. Sateen intensiteetin ylittäessä infiltraationopeuden syntyy pintavaluntaa, joka kuljettaa pisaroiden irrottamia maapartikkeleita. Tämä tapahtuu myös lumen sulamisen vaikutuksesta. Pellon painaumat keräävät sadevettä, joka veden pinnan noustessa lopulta virtaa reunan yli seuraavaan painaumaan. Näin muodostuu painaumien välille pieniä, vaikeasti havaittavia puroja, joissa tapahtuu *mikrokanavaeroosiota*.

Pintaeroosioon vaikuttavat mm. sateen rankkuus ja kesto, maalaji ja sen erodoituvuus, kasvipeitteen ja kasvinjäänteiden esiintyminen maanpinnalla ja topografia. Suurinta pintaeroosio on silloin, kun rankkasade iskeytyy muokattuun maahan tai maahan, josta kasvillisuus on poistettu esimerkiksi hakkuiden tai rakennustöiden vuoksi. Myös suhteellisen vähäinen pitkäkestoinen sade voi saada aikaan merkittävää eroosiota, kun esimerkiksi savimaan rakenne heikkenee.

Pintavalunnan kasvaessa mikrokanavat laajenevat helpommin havaittaviksi noroiksi. Maa-aineksen irtautumista ja kulkeutumista virtaavaan veden vaikutuksesta noroissa kutsutaan *noroeroosioksi*. Virtauksen noroutuessa sen eroosiovoima ja kuljetuskapasiteetti lisääntyvät oleellisesti pintaeroosioon verrattuna (kuva 4.15). Noroja voi nähdä etenkin viettävillä ja kasvipeitteettömillä pelloilla runsaiden syys- ja kevätvaluntojen aikana. Norot voidaan helposti täyttää tai katkaista muokkaamalla maata. Seuduilla, joilla esiintyy rankkoja sateita ja maasto on jyrkkää, noroista voi muodostua syviä uomamaisia väyliä, joita ei pystytä poistamaan muokkaamalla.

Sisäisellä eroosiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa painovoiman vaikutuksesta nopeasti maahan suotautuva vesi kuljettaa pintakerroksista tai syvemmältä maasta irronneita partikkeleita mukanaan. Savimailla eroosiota tapahtuu myös diffuusion vaikutuksesta, jolloin savishiukkaset sekoittuvat veteen lämpöliikkeestä johtuen (Aura ym. 2006). Ilmiötä kutsutaan diffuusioeroosioksi.



Kuva 4.15 Pinta- ja noroeroosion periaatekuva.

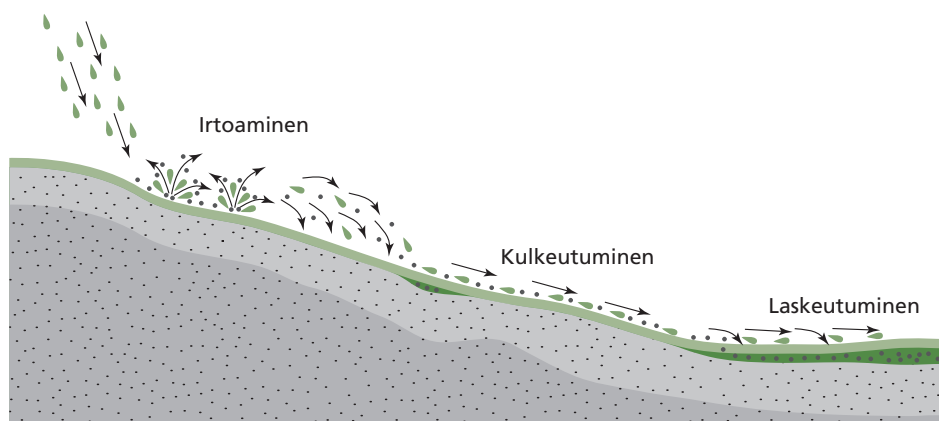
Pintaeroosiolla käsitetään monesti kaikkea maa-alueelta tapahtuvaa vesieroosiota sisältäen varsinaisen pintaeroosion ja noroeroosion. Tässä luvussa pintaeroosiolla tarkoitetaan kuitenkin vain sadepisaroiden ja pintavalunnan aiheuttamaa pintamaan tasaista syöpmistä.

Maa-alueilla vesieroosio tapahtuu sateen, lumen sulannan ja niiden aiheuttaman veden virtauksen johdosta. Vesieroosiota kuvataan yleensä prosessina, jossa on seuraavat vaiheet: 1) maapartikkeleiden irtoaminen, 2) kulkeutuminen ja 3) laskeutuminen (kuva 4.16). Irtoamisella tarkoitetaan partikkeleiden siirtymistä pois tavanomaiselta paikaltaan maamassasta ympäröivien partikkeleiden sidosvoimien vaikutuspiiristä. Maahiukkasten kulkeutumista tapahtuu, kun veden energia on riittävän suuri siirtämään maapartikkeleita. Laskeutumista tapahtuu, kun kuljetettava maa-aineksen määrä on suurempi kuin veden kyky kuljettaa partikkeleita. Maa-aineksen irtoaminen, kulkeutuminen ja laskeutuminen ovat riippuvaisia toisistaan.

Erodoituva maa-aines koostuu kivennäishiukkasista ja orgaanisesta aineksesta. Maapartikkelit liikkuvat virtaavan veden mukana joko maa-vesisuspensionä, kolloidisessa muodossa tai maanpintaa pitkin liukumalla. Suspensiossa oleva maa-aines koostuu hienoista hiesu- ja savihiukkasista ja orgaanisesta aineksesta. Pohjakulkeuma koostuu suuremmista maahiukkasista ja muruista, jotka liikkuvat veden mukana mutta ovat edelleen kontaktissa maanpinnan kanssa. Nämä partikkelit voivat kulkeutua ajoittain suspendoituneena, mutta niiden suhteellisen suuresta koosta ja tiheydestä johtuen ne laskeutuvat nopeasti uudelleen maanpinnalle.

Maahiukkasten ja -murujen irtautuminen, kulkeutuminen ja laskeutuminen vaihtelevat partikkeleiden koon ja tiheyden mukaan aiheuttaen eroosioaineksen lajittumista. Kun eroosioaines poistuu valumavesien mukana esimerkiksi peltoalueelta, suurimmat hiukkaset laskeutuvat siellä, missä virtaus ensinnä hidastuu. Tämä laskeutuva maa-aines sisältää vähemmän hienoa maa-ainesta ja todennäköisesti vähemmän orgaanista ainesta ja ravinteita kuin pidemmälle kulkeutuva hienompi aines. Hienommat maahiukkaset laskeutuvat myöhemmin muualle tai säilyvät hyvinkin pitkään suspendoituneena vedessä. Tämä aines sisältää enemmän saveshiukkasia kuin alkuperäinen erodoitunut aines. Ilmiötä nimitetään saveksen rikastumiseksi. Kun rikastunut maa-aines lopulta sedimentoituu altaan, järven tai kosteikon pohjalle, siinä on enemmän savesta, ravinteita ja orgaanista ainesta kuin alkuperäisessä eroosioaineksessa.

Noroissa virtaava vesi kuljettaa pintaeroosion tuottamaa maa-ainesta ja voi myös itse irrottaa ja kuljettaa lisää maata. Virtaus irrottaa maahiukkasia, kun maanpintaan vaikut-



Kuva 4.16 Eroosioprosessit: maapartikkeleiden irtoaminen, kulkeutuminen ja laskeutuminen.

tavan veden voima on irtoamista vastustavaa voimaa suurempi. Erooituneen maa-aineksen määrä riippuu virtauksen kuljetuskapasiteetista, johon vaikuttavat maanpinnan kaltevuus, maalaji ja veden virtausominaisuudet. Kun noroja muodostuu rinteeseen, virtauksen energia sedimentin kuljettamiseen kasvaa ja irronnut maa-aines kulkeutuu nopeammin pois. Kun maanpinnan kaltevuus pienenee, veden virtausnopeus ja sen kyky kuljettaa maa-ainesta pienenevät, jolloin maa-aines alkaa sedimentoitua.

Syvämmällä maaperässä tapahtuvaa niin sanottua sisäistä eroosiota esiintyy mm. savi- mailla, jotka halkeilevat herkästi ja joilla veden virtaus syvämmälle maaperään tapahtuu pääasiassa nopeina oikovirtauksina makrohuokosten kautta. Maa-ainesta voi tällöin kulkeutua salaoja- tai pohjavesivalunnan mukana vesistöihin. Kulkeutumista tapahtuu helposti myös salaojakaivannon täyttömaan ja erillisten sorasilmäkkeiden kautta. Kulkeutuva maa-aines voi olla peräisin pintamaasta tai syvämmältä pohjamaasta virtauskanavien seinämistä. Suomessa salaojien kautta kulkeutuvan maa-aineksen on todettu olevan pääasiassa peräisin muokauskerroksesta (Uusitalo ym. 2001).

Suomessa kiintoainepitoisuudet ja -kuormat peltoalueiden valumavesissä vaihtelevat huomattavasti lähinnä vuodenajan ja viljelytoimenpiteiden mukaan. Eroosiomäärät vaihtelevat paljon myös samalla peltoalueella eri vuosina, lähinnä säätekijöiden vaihtelun vuoksi. Suurimmat pitoisuudet on havaittu savimailla tilanteessa, jossa syysmuokkauksen jälkeen sattuu runsaita sateita. Muokkauksen jälkeen savimaan rakenne on epästabiili ja herkkä eroosiolle, jos maa ei ehdi kuivua tai jäätymä ennen sateiden tuloa.

Maa-alueella tapahtuvaan eroosioon vaikuttavat tekijät

Eroosion vaikuttavat päätekijät ovat ilmasto, topografia, maaperä sekä maanpinnan ominaisuudet, joihin vaikuttaa keskeisesti maankäyttö.

Sadanta, sulanta ja pintavalunta

Vesiteet ja lumen sulanta ovat eroosion liikkeelle paneva voima. Sadepisaroiden iskeytyessä maahan ne rikkovat maamuruja ja sinkoavat maapartikkeleita ilmaan. Sateen eroosiovoimaa kuvataan yleisesti indeksillä, joka perustuu sateen kineettiseen energiaan. Eroosiovoima lasketaan funktiolla, jonka muuttujina ovat sateen rankkuus ja kesto sekä sadepisaroiden massa, halkaisija ja nopeus. Sadepisaroiden eroosiota aiheuttava voima on voimakkainta suurilla sateen rankkuuksilla, mutta se voi olla huomattavaa pienen rankkuuden omaavilla sateilla niiden kestäessä pitkään. Myös sadepisaroiden koko vaikuttaa sateen eroosiovoimoi-

maan. Kun sateen rankkuus kasvaa, niin myös sadepisaroiden halkaisija suurenee ja maan pinnalle siirtyvä kokonaisenergia kasvaa. Sateen energia kasvaa rankkuuden logaritmin suhteessa (kuva 4.17). Mitä kauemmin sade kestää, sitä enemmän maa-ainesta erodoituu. Suurinta eroosio on silloin, kun intensiteetiltään suuri sade iskeytyy paljaaseen maahan. Elävä tai hajoava kasvipeite tai sänki maan pinnalla on hyvä suoja sateen eroosiovoimia vastaan.

Keskimääräisen vuosisadannan suuruuden, sadannan ajallisen jakautumisen ja sateen intensiteetin perusteella arvioituna eroosio jää Suomen oloissa pieneksi. Yksittäisillä sadetapahtumilla saattaa kuitenkin olla hetkellisesti merkittävä vaikutus eroosioon.

Pintavaluntaa syntyy, kun sateen rankkuus ylittää maan kyvyn johtaa vettä ja varastoida sitä maan pinnalle. Kun veden imeyntä maahan on vähäistä ja sadanta suurta, pintavaluntaa esiintyy runsaasti. Suuri pintavalunta voi itsessään irrottaa ja kuljettaa suuria määriä maa-ainesta.

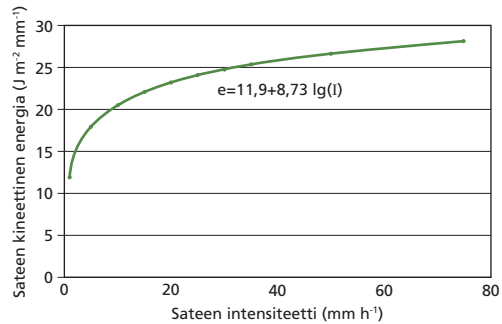
Lumen sulannan aikana tapahtuu maa-aineksen irtautumista, kulkeutumista ja sedimentoitumista kuten vesisateenkin aiheuttamassa eroosiossa. Sulannan yhteydessä mahdollisesti esiintyvät vesisateet sulattavat tehokkaasti lumipeitettä ja routaa. Sadepisaroiden eroosiovoimaa pienentää se, että maa on sulannan alussa kokonaan lumen ja jopa jään peitossa. Lumen sulamisen alkuvaiheessa eroosio onkin yleensä vähäistä. Kun sulava maa paljastuu kokonaan, pinta- ja noroeroosio lisääntyvät selvästi. Keväällä maan vesipitoisuus on sulannan, sadannan ja vähäisen haihdunnan yhteisvaikutuksen vuoksi yleensä hyvin suuri. Sääolosuhteista ja maalajista riippuen routa voi ajoittain estää veden tehokkaan imeytymisen syvemmälle maaperään aiheuttaen pintavaluntaa. Toisaalta savimailla on havaittu syntyvän sulannan aikaan suhteellisen suuria määriä salaojavaluntaa, mikä osoittaa veden voivan imeytyä maaperään routautumisesta huolimatta (Turunen ym. 2015a; 2015b). Leutoina talvina peltoalueilta on mitattu suurempia eroosiomääriä ja kiintoainepitoisuuksia kuin sellaisina talvina, jolloin lumipeite on pysynyt läpi talven ja sulanut kerralla pois (Puustinen ym. 2007). Maan jäätymis-sulamissyklit näyttävät vähentävän maan lujuutta ja murujen stabiilisuutta tehden sen alttiimmaksi eroosiovoimille.

Maan erodoituvuus

Maan erodoituvuus eli eroosioherkkyys kuvaa maa-aineksen suhteellista kykyä vastustaa sadepisaroiden ja virtaavan veden eroosiovoimia. Alhainen eroosioherkkyys merkitsee pienempää potentiaalista eroosiota. Erooituvuus on useiden maaperää kuvaavien ominaisuuksien funktio. Tärkeimmät ominaisuudet ovat maan lajitekoostumus, orgaanisen aineksen määrä, maan rakenne ja kemialliset ominaisuudet, ennen kaikkea mineraalikoostumus.

Hienorakeisissa koheesiomaissa, kuten savessa, primääripartikkeleita sitovat toisiinsa fysikaaliset ja kemialliset voimat. Raekooltaan suuremmissa koheesiottomissa maissa partikkeleihin vaikuttavat vain painovoima ja kitka. Esimerkiksi löyhässä hiekassa partikkelit ovat jo valmiiksi irtonaaisia ja siirtyvät veden kuljetettaviksi helpommin kuin koheesiomaan partikkelit. Toisaalta suurempien maahiukkasten kulkeutuminen veden mukana on vähäisempää, sillä ne laskeutuvat nopeasti takaisin maanpinnalle.

Yleensä runsaasti hiesua sisältävät maat ovat eroosioherkempiä kuin maat, joissa on enemmän savesta ja hiekkaa. Suuri saveksen määrä aiheuttaa sen, että maapartikkeiden



Kuva 4.17 Sateen eroosiovoiman riippuvuus sateen rankkuudesta (Foster 1982).

välillä on enemmän koheesiota ja ne muodostavat muruja, joilla on suurempi voima vastustaa vesipisaroiden ja virtaavan veden eroosiovoimia kuin yksittäisillä maahiukkasilla. Hyvä mururakenne lisää myös veden imeyntäkapasiteettia, mikä vähentää pintavaluntaa ja eroosiota. Maaperän rakenne ja eroosioherkkyys vaihtelevat myös ajan suhteen viljelytoimenpiteiden ja vesipitoisuuden sekä muiden tekijöiden, kuten routautumisen seurauksena (Bryan 2000). Maan kostuessa mururakenne heikkenee etenkin, jos kostuminen tapahtuu nopeasti. Murujen pysyvyys riippuu myös saven mineraalikoostumuksesta. Kun orgaanisen aineksen määrä kasvaa pintamaassa, maan eroosioherkkyys vähenee, sillä orgaaninen aines parantaa maan mururakennetta. Maa on alttiimpaa eroosiolle mururakennetta rikkovan kynnön tai muun muokkauksen jälkeen.

Topografia, kasvipeitteisyys ja muokkaus

Maanpinnan kaltevuus lisää eroosiota siten, että lisäksi on suoraan verrannollinen kaltevuuteen sen kasvaessa nollasta 20 asteeseen (Linsey ym. 1949). Maksimieroosio saavutetaan noin 40 asteen kaltevuudella ja sen jälkeen eroosio yleensä pienenee, mikä käytännössä johtuu siitä, että erodoituvan maan osuus alkaa vähetä tätä jyrkemmällä rinteillä.

Kasvillisuuden maanpäällinen osa vaimentaa esiintymiskohdissaan tehokkaasti sekä sadepisaroiden iskujen energian että norossa ja uomassa virtauksen aiheuttaman leikkausvoiman vaikutuksen maa-ainekseen. Uomassa oleva kasvillisuus pienentää myös virtausnopeutta eli itse leikkausvoimaa. Juuristo sitoo hienot maapartikkelit eroosiovoimaa tehokkaasti vastustavaksi matoksi.

Maan mekaaninen muokkaus luo makrohuokosia ja rikkoo maakokkareita pienemmiksi muruiksi. Perusmuokkaus on yleensä syvempi kuin kylvömuokkaus. Perusmuokkausmenetelmät ovat kyntö, kultivointi, lautasäestys ja lapiorullaäestys, joista kyntö on Suomessa yleisin. Muokkauksen keventäminen muuttaa maan rakennetta lisäämällä kasvustojäätteen kertymistä pintamaahan, mikä nostaa maan eloperäisen aineksen pitoisuutta. Tämä todennäköisesti parantaa pintamaan murujen pysyvyyttä, mikä vähentää liettymisen, eroosion ja kuorettumisen riskiä (ks. kohta 2.8 Maan rakenne).

Uomaeroosio

Uomaeroosion aiheuttaa veden virtausenergia uomassa. Uomaeroosion suuruus riippuu uoman pohjaan ja luiskiin kohdistuvasta leikkausjännityksestä/turbulenssista, veden virtausnopeudesta ja virtaamasta sekä uoman eroosioherkyydestä eli erodoituvuudesta. Uoman poikkileikkauksen keskimääräinen virtausnopeus voi olla hyvinkin suuri, mutta eroosiota ei tapahdu, jos uoman luiskissa on kasvillisuutta, joka vaimentaa leikkausjännitystä ja turbulenssia uoman pohjalla.

Suomessa uomaeroosio on luontaisesti voimakasta lähinnä hiekka- ja hiesumaastossa kulkevilla jokiuomissa. Selvimpiä esimerkkejä tästä ovat Lounais-Suomen syvät joenuomat sekä jokien ja purojen meanderoituminen (uomien mutkien jyrkentyminen), joka aiheutuu uoman ulkokaarten sisäkaarta suuremmasta veden virtausnopeudesta. Merkittävää uomaeroosiota voi tapahtua myös juuri kaivetuissa tai peratuissa ojissa, jos virtausnopeus ylittää uoman maalajille soveltuvan kriittisen rajan.

Maaperä vaikuttaa suuresti uomissa tapahtuvaan eroosion määrään. Raekoon suureneneminen vähentää eroosiota. Helpoimmin erodoituva aines on raekooltaan noin 0,2 mm:n suuruisia. Kaikkein hienoin aines, esimerkiksi saves, ei kuitenkaan hiukkasten välisten koheesiovoimien takia eroidu yhtä helposti kuin karkeammat maalajit.

Uoman pohja-aineksen liikkeellelähtö riippuu pääasiassa virtauksen pohjaan kohdistaman leikkausjännityksen suuruudesta. Kriittinen tila, jossa yksittäinen hiukkanen lähtee liikkeelle, saavutetaan, kun virtauksen aiheuttaman, partikkelia eteenpäin siirtävän voiman

(analoginen ilmanvastukselle) ja painovoiman suhde ylittää tietyn raja-arvon. Kiintoaine kulkeutuu vesistössä joko suspensiona vedessä tai pohjaa pitkin pohjakulkeumana. Prosessit eivät ole toisistaan riippumattomia, sillä yhdessä uoman poikkileikkauksessa suspensiona oleva materiaali saattaa toisessa poikkileikkauksessa liikkua pohjakulkeumana tai kasaantua pitemmäksi aikaa. Kiintoainekulkeuma voidaan jakaa myös toisin. Puhutaan pohja-aineksesta ja huuhtoutuvasta aineksesta. Edellisellä tarkoitetaan partikkelikooltaan sellaista ainesta, jota on tavallisesti uoman pohjalla. Jälkimmäinen materiaali on tätä hienompaa ja kulkee yleensä jokisysteemin läpi laskeutumatta välillä pohjaan.

Seisovassa vedessä tai laminaarisessa virtauksessa maahiukkasten laskeutuminen tapahtuu likimain noudattaen Stokesin lakia. Turbulenttisessa virtauksessa tapahtuu partikkelin liikkumista sekä alas- että ylöspäin. Virtaukseen noussut hiukkanen etenee turbulenttien pyörteiden kannattamana alavirtaan, kunnes se jälleen sopivassa paikassa laskeutuu pohjalle. Pohjasedimentin ja suspendoituneen kiintoaineksen välillä vallitsee näin jatkuva vaihto. Suspendoituneet kiintoainehiukkaset laskeutuvat nopeudella, joka on ominainen tietyn kokoluokan hiukkasille. Laskeutumisnopeuden ja konsentraation tulo kuvaa alaspäin kulkeutuvaa kiintoainemäärää pinta-alayksikköä kohden. Kiintoaineen ylöspäin suuntautuvan kulkeutumisen suuruus riippuu turbulenttisuuden voimakkuudesta. Nousevan kiintoainemäärän suuruuteen vaikuttavat myös pitoisuuserot eri kerrosten välillä; kiintoainehiukkasten konsentraatio kasvaa pohjaa kohti (kuva 4.18). Uomaeroosion laskentaa ovat esittäneet esim. Seuna ja Vehviläinen (1986).

Luonnontilainen uoma pyrkii tilaan, jossa uoman luontainen dynamiikka eli aineksen syöpyminen ja kasautuminen ovat tasapainossa. Eroosio syövyttää maa-ainesta etenkin uoman mutkien ulkokaarteista ja pohjasta. Irtautunut kiintoaine etenee virtaavan veden kuljettamana uomassa suspendoituneena ja pohjaa pitkin pohjakulkeumana. Virtausnopeuden laskeutumisessa veden mukana kulkeva kiintoaine alkaa laskeutua. Hitaan virtauksen aikana uoman mutkien suojasivuille ja suvantoihin saattaa kasautua laajojakin särkkiä, jotka tulvien aikana voivat lähteä liikkeelle. Uomaeroosio aikaansaa myös koskikynnysten kulumista sekä jokitorvien sortumista. Jokien mukanaan kuljettaman kiintoaineen kasautuminen ja maankohoaminen aiheuttavat esimerkiksi Pohjanlahden rannikolla jokisuiden jatkuvaa ruoppaustarvetta.

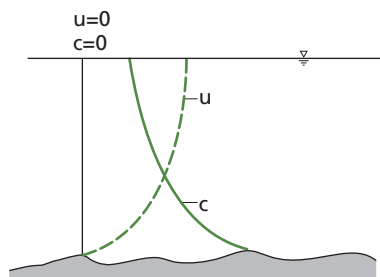
Kuivatustoiminta, kuten uomien kaivaminen, perkaaminen ja suoristaminen, ovat lisänneet uomien syöpymistä. Kaltevassa maastossa nopeasti virtaava vesi syövyttää suoristetun uoman pohjaa ja poikkileikkaukset saattavat paikoin syöpyä jopa moninkertaisiksi alkuperäiseen poikkileikkaukseen verrattuna. Suvantomaisilla osuuksilla ja jokien laskukohdissa yläjuoksulta syöpynyt kiintoaine alkaa laskeutua ja aiheuttaa pohjan liettymistä, jolloin vesisyvyys vähenee. Sekä lisääntynyt uomaeroosio että uomien liettyminen aikaansaavat veden samentumista ja heikentävät maatalousalueiden uomien veden laatua sekä eliöiden elinympäristöjä.

Lounais-Suomessa tehdyn tutkimuksen (Pietiläinen ja Ekholm 1992) mukaan uomassa kulkevasta kiintoaineesta keskimäärin 90 % (vaihteluväli 66 – 100 %) oli peräisin peltojen pintamaasta. Uomaeroosion osuus vesistön kiintoainekuormittajana jäi siis vähäiseksi. Samansuuntaisia tutkimustuloksia on saatu myös Etelä-Englannista, jossa 95 % jokivesistön kiintoaineesta oli joutunut vesistöön peltoalueilla tapahtuneen eroosion vuoksi (Peart ja Walling 1986). Toisaalta Etelä-Suomessa toteutetussa kaksitasouomassa noin puolet suspendoituneesta kiintoaineesta oli peräisin ympäröiviltä pelloilta, jotka peittivät 13 % valuma-alueen pinta-alasta, ja toinen puoli pääosin valuma-alueen metsäisistä osista uomaeroosion ollessa vähäistä (Västilä ja Järvelä 2011). Paikoittain esimerkiksi Tanskassa suurimman osan valuma-alueiden kiintoainekuormasta on havaittu olevan peräisin joen töyräiltä (Kronvang ym. 2013).

Maa- ja metsätalouden kuivatushankkeiden lisäksi myös vesistöjen rakentaminen esimerkiksi tulvasuojelua varten ja vesistöjen säännöstely ovat lisänneet eroosiota. Konkreettisim-

pana uhkana ovat jokitörmien sortumat, joiden mukana jokeen sortuu viljelysmaata ja teitä, pahimmassa tapauksessa rakennuksia. Sortumia tapahtuu yleensä voimakkaiden sateiden tai runsasvetisen kevään jälkeen, kun joen vedenpinta on nopeasti laskenut samalla kun maaperään on jäänyt vielä runsaasti kosteutta. Maaperän kosteus lisää jokitörmään kohdistuvaa kuormitusta ja aiheuttaa sortuman. Jokien perkaus ja pengerrys ovat lisänneet jokirantojen sortumisriskiä. Sortumat ovat tyypillisiä erityisesti hiekka- ja hiesumaastossa kulkevissa joissa, joita on esimerkiksi Lounais-Suomessa ja Pohjanmaalla (Siren 1985).

Eroosio kuuluu tärkeänä osana virtavesien luontaiseen dynamiikkaan. Joskus rantojen suojaaminen eroosiolta on kuitenkin välttämätöntä, sillä voimakas, esimerkiksi vesistöjen säännöstelystä johtuva eroosio voi aiheuttaa huomattavia haittoja asutukselle ja muille rantojen käyttömuodoille (Muotka ym. 2003). Ojien ja purojen epäedulliset virtaus- ja maaperäolosuhteet voivat edellyttää uoman pohjan ja luiskien suojaamista. Teknisiä ja insinööriologisia uomien suojausmenetelmiä on esitelty kohdassa 6.3. Luonnonmukaisessa vesirakentamisessa eroosion muodostumiseen ja torjuntaan on kiinnitetty erityistä huomiota (ks. kohta 5.6).



Kuva 4.18

Joen virtausnopeuden u ja pitoisuuden c teoreettiset jakaumat vertikaalisuunnassa (Nordin ja Mc Quivey 1971).

Maa-alueelta tapahtuvan eroosion laskenta

Peltoalueilla tapahtuvan vesieroosion ja niiltä tulevan kiintoainekuorman arvioimiseksi on käytettävissä erilaisia laskentamenetelmiä mittaussaineistoon perustuvista empiirisistä yhtälöistä monimutkaisiin matemaattisiin malleihin. Mallit pyrkivät kuvaamaan eroosioon liittyviä prosesseja, minkä vuoksi niissä on lukuisia muuttujia ja parametreja ja siten myös suuri lähtötietojen tarve. Mallien avulla voidaan arvioida esim. eroosion määrää eri maalajien peittämällä alueilla, eri kaltevuuksilla ja viljelytoimenpiteillä. Tuloksia hyödynnetään mm. eroosion torjunnan toimenpiteitä valittaessa ja kohdennettaessa. Mallista riippuen sillä voidaan laskea peltolohkolta tulevan vuotuisen tai lyhytaikaisemman eroosion määrä tai kiintoaineksen kulkeutuminen uomaverkossa kokonaisella valuma-alueella.

Eroosion arvioinnissa usein käytetty menetelmä on USLE-yhtälö (*the Universal Soil Loss Equation*), joka kuvaa keskimääräistä vuotuista kiintoaineen kulkeutumista peltoalueelta (Wischmeier ja Smith 1978). Se sisältää vain pinta- ja noroeroosion kuvauksen eikä peltoalueella tapahtuvaa sedimentoitumista. USLE:ssa vuotuinen eroosio tietyissä olosuhteissa lasketaan viiden muuttujan tulona (tietoruutu 4.13).

USLE:n etuja ovat sen yksinkertaisuus ja muuttujien tilastolliset yhteydet, jotka on määritetty laajan Yhdysvalloissa mitatun aineiston perusteella. Yhtälö on käyttökelpoinen vastaavantyyppisissä olosuhteissa, joissa mittaussaineisto on kerätty. USLE ei ole kuitenkaan suoraviivaisesti sovellettavissa esimerkiksi Suomeen, sillä Suomen ilmasto- ja sääolot poikkeavat mittaussuhteista. Yhtälön rajoituksena on myös se, ettei se ota huomioon vaihtelevia kaltevuuksia eikä sillä voida laskea yksittäisten sadantatapahtumien, vuodenaikojen tai vuosien aikana tapahtuvaa eroosiota. USLE:sta kehitetty RUSLE (*the Revised Universal Soil Loss Equation*) sisältää parannettuja kuvauksia, jotka perustuvat laajennettuun mittaussaineistoon (Renard ym. 1997). Yhtälöön pätee kuitenkin pitkälti samat rajoitukset kuin USLE-yhtälöön. RUSLE-mallia on käytetty mm. Suomen peltojen eroosioriskikarttojen laatimiseen (Lilja ym. 2014).

Tietoruutu 4.13

Eroosion arviointi USLE - yhtälöllä

Peltoalueelta tulevan eroosion arviointiin voidaan käyttää empiirisesti johdettua USLE- yhtälöä (The Universal Soil Loss Equation). Se on kehitetty yli 40 vuoden aikana kerättyjen lukuisien koetulosten perusteella. Käytettyjen koelohkojen pituus oli 22 m ja niiden kaltevuus oli 9 %. USLE-yhtälössä eroosion arviointiin vaikuttavat tekijät ovat alueellinen ilmasto, maalaji, pellon pituus ja kaltevuus, viljelytoimenpiteet ja eroosiota estävät toimenpiteet. Yhtälö laskee peltoalueelta tapahtuvan kokonaiseroosion eikä ota huomioon mahdollista sedimentaatiota.

Vuosittain erodoituvan maa-aineksen määrä pinta-alaa kohden voidaan arvioida USLE-yhtälöä käyttämällä:

$$A = R K L S C P \quad (T4.40)$$

A = keskimääräinen erodoitunut maa-aines (t ha⁻¹)

R = sateen eroosiokerroin

K = maaperän eroosioherkkyys (t ha⁻¹)

L = pituuskerroin

S = kaltevuuskerroin

C = viljelytoimenpiteiden vaikutusta kuvaava kerroin

P = eroosiota estäviä toimenpiteitä kuvaava kerroin

Sateen eroosiokerrointa (R) kutsutaan myös EI-arvoksi. Se lasketaan summaamalla vuoden kaikkien rankkasateiden (E) ja kunkin 30 minuutin sateen maksimi-intensiteetin (I) tulot yhteen. Kerroin vaihtelee eri vuodenaikoina ja eri vuosina. R-kerroin ei ota huomioon tilanetta, jossa huomattava osuus eroosiosta tapahtuu sulannan yhteydessä. Tässä tilanteessa R voidaan arvioida kertomalla se lukuarvolla 1,5.

Maaperän eroosioherkkyys (K) kuvaa maan kykyä vastustaa vesipisaroiden ja laminaari-eroosion aiheuttamaa eroosiota.

Pituuskerroin (L) ja kaltevuuskerroin (S) voidaan yhdistää topografiseksi kertoimeksi LS, joka arvioidaan seuraavasti:

$$L = (l / 22)^x \quad (T4.41)$$

l = rinteen pituus, m

x = 0,5, kun rinteen kaltevuus on > 4 %

x = 0,4, kun rinteen kaltevuus on 3–4 %

x = 0,3, kun rinteen kaltevuus on < 3 %

$$S = \frac{0,43 + 0,30s + 0,043s^2}{6,574} \quad (T4.42)$$

s = rinteen kaltevuus, %

Näiden yhtälöiden muunnoksia on käytetty RUSLE yhtälössä. Yhtälöt ottavat huomioon kaltevuuden muutoksen ja sulavassa maassa tapahtuvan valunnan vaikutuksen.

Viljelytoimenpiteiden vaikutusta kuvaava kerroin (C) on tietyn toimenpiteen aiheuttaman eroosiomäärän suhde muokatun monivuotisen kesannon aiheuttamaan eroosiomäärään. Kertoimessa huomioidaan erilaisia tekijöitä kuten muokkausmenetelmä, kasvityyppi, kylvön ajankohta, kasvuvaihe, viljelykierto, sateen eroosiovoimakkuus ja kasvinjäänteet.

Eroosiota estäviä toimenpiteitä kuvaavan kertoimen (P) arviointi on vaikeaa. Sen arvioimiseksi on kehitetty useita menetelmiä.

Tietoruutu 4.14

Pinta- ja noroeroosiota kuvaavia yhtälöitä

Pintaeroosioon vaikuttavat sateen intensiteetti ja energia, maa-aineksen erodoituvuus sekä kasvinjäänteiden ja kasvuston esiintyminen maanpinnalla. Maahiukkasten irtoaminen on suhteessa maan erodoituvuuteen, sateen intensiteetin neliöön ja maan pinnan kaltevuuteen yhtälön (T4.43) mukaisesti.

$$D_i = K_i I^2 S_f \quad (T4.43)$$

D_i = maa-aineksen irtoaminen pintaeroosiossa ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

K_i = maan erodoituvuus pintaeroosiossa (kg s m^{-4})

I = sateen intensiteetti (m s^{-1})

S_f = maanpinnan kaltevuuskerroin $1,05 - 0,85 e^{-4 \sin(\theta)}$

θ = maanpinnan kaltevuuskulma

$S_f = 0,20$ tasaiselle maalle

$S_f = 1,00$ kaltevuudelle 45 astetta

$S_f = 1,05$ kaltevuudelle 90 astetta

Noroeroosiossa noroissa virtaava vesi kuljettaa pintaeroosion tuottamaa maa-ainesta ja voi myös itse irrottaa ja kuljettaa lisää maata. Ennen kuin virtaus voi irrottaa maahiukkasia, maan pintaan vaikuttavan veden eroosiota aiheuttavan voiman on oltava suurempi kuin voima, jolla maa vastustaa irrottamista. Kun maahiukkanen on irronnut ympäröivästä maa-aineksesta, noroihin erodoituneen maa-aineksen määrä riippuu virtauksen kuljetuskapasiteetista, joka puolestaan on maan pinnan kaltevuuden ja maalajin funktio (ks. yhtälö T4.44).

Noroeroosion määrä riippuu siitä, mitä kohtaa rinteessä tai norossa tarkastellaan. Sen arvo on positiivinen, kun norossa tapahtuu maa-aineksen irtautumista, ja negatiivinen, kun maapartikkelit sedimentoituvat noron pohjalle.

Noroeroosion määrää voidaan arvioida yhtälöllä:

$$D_r(x) = D_c(x) \left(1 - \frac{Q_s(x)}{T_c(x)}\right) \quad (T4.44)$$

$D_r(x)$ = norovirtauksen irrotusnopeus kohdassa x ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$D_c(x)$ = puhtaan veden irrotuskapasiteetti kohdassa x ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$Q_s(x)$ = kiintoainekuorma kohdassa x ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$T_c(x)$ = norovirtauksen suurin kuljetuskapasiteetti kohdassa x ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Norovirtauksen maa-aineksen irrotuskapasiteettia D_c kuvaa yhtälö:

$$D_c(x) = K_r (t(x) - t_c(x)) \quad (T4.45)$$

$D_c(x)$ = puhtaan veden irrotuskapasiteetti ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

K_r = maan erodoituvuus norovirtauksessa (s m^{-1})

$$t(x) = y r_h s \quad (T4.46)$$

$t(x)$ = virtaavan veden hydraulinen leikkausluku (Pa)

y = veden ominaispaino (N m^{-3})

r_h = noron hydraulinen säde (m)

s = hydraulinen gradientti ~ noron pohjan kaltevuus

$t_c(x)$ = (kriittinen) leikkausluku, kun irtoamista ei tapahdu (Pa)



Sekä maa-aineksen erodoituvuus noroeroosiossa K_r että kriittinen leikkauslujuus t_c riippuvat maan ominaisuuksista ja ne määritetään kokeellisesti.

Yhtälössä T4.47 norovirtauksen suurin kuljetuskapasiteetti edustaa puhtaan veden kykyä kuljettaa maahiukkasia. Sen suuruus riippuu erityisesti veden virtausnopeudesta, maahiukkasen koosta ja norossa vallitsevasta turbulenssista. Maaperän eroosiota käsittelevässä teoriassa kuljetuskapasiteettia kuvataan yksinkertaistetulla yhtälöllä esimerkiksi seuraavasti:

$$T_c(x) = B_t(t(x))^{1,5} \quad (T4.47)$$

$T_c(x)$ = kuljetuskapasiteetti virtauksen leveysyksikköä kohden ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

B_t = kuljetuskerroin, joka riippuu maan ja veden ominaisuuksista

$t(x)$ = norovirtauksen hydraulinen leikkauslujuus (Pa)

Hydraulinen leikkauslujuus $t(x)$ on sama kuin yhtälössä T4.43. Kuten useimmat sedimentin kulkeutumista kuvaavat yhtälöt T4.44 soveltuu olosuhteisiin, joissa sen parametriarvot on määritetty (Foster ja Meyer 1972).

Sedimenttikuoormaa pitkin rinnettä tai noroa kuvataan pinta- ja noroeroosion summana jatkuvuusyhtälöllä, joka on tasapainotilanteessa muotoa:

$$\frac{dQ_s(x)}{dx} = D_r(x) + D_i \quad (T4.48)$$

$Q_s(x)$ = kiintoainekuorma ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$)

$D_r(x)$ = noroeroosion nopeus ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)

D_i = pintavesieroosion nopeus ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)

x = etäisyys rinnettä alaspäin (m)

Monimutkaisemmilla matemaattisilla malleilla pyritään kuvaamaan eroosioon vaikuttavia fysikaalisia hydrologian ja virtaushydrauliikan lainalaisuuksia. Fysikaalisesti perustelluissa malleissa tarvitaan huomattavasti enemmän lähtötietoja kuin tilastollisissa malleissa, ja niillä voidaan laskea eri eroosioprosessien ajallista vaihtelua joko yksittäisen sadantavaluntatapahtuman aikana tai pidemmällä aikavälillä joko peltoalueen tai valuma-alueen mittakaavassa. Valuma-aluemallit sisältävät yleensä kuvaukset maa-aineksen irrottamis-, kulkeutumis- ja sedimentoitumisprosesseista sekä veden virtauksesta uomaverkossa ja altaissa. Laskenta perustuu sekä tilastollisiin että fysikaalisesti perusteltuihin yhtälöihin. Useiden tämäntyyppisten mallien lähtökohtana on ollut Yhdysvalloissa kehitetty CREAMS-malli (Knisel 1980). Nykyisin yleisesti käytettyjä malleja ovat muun muassa GLEAMS (*the Groundwater Loading and Erosion from Agricultural Management Systems*) ja WEPP (*the Water Erosion Prediction Project*) (Leonard ym. 1987, Nearing ym. 1989). Molemmat mallit soveltuvat peltoalueella tapahtuvan eroosion laskentaan, ja WEPP-mallia voidaan käyttää myös pienillä valuma-alueilla ja hilamallina, jossa laskettava alue kuvataan osissa laskentaverkon avulla. GLEAMS:n pohjalta on Suomessa kehitetty ICECREAM-malli, jonka hydrologiaosa on muutettu pohjoisia ilmasto- ja sääoloja vastaavaksi (Rekolainen ja Posch 1993, Tattari ym. 2001, Bärlund ym. 2009). Suomessa kehitetyllä kolmiulotteisesti hajautetulla FLUSH-mallilla (ks. Tietoruutu 13.3) voidaan simuloida eroosion alueellista vaihtelua pelto-alueella sekä pinta- ja salaajavalunnan kiintoainekuormia (Warsta ym. 2013).

Eroosion laskennassa kiintoaineen kulkeutumista kuvaavan yhtälön kehittäminen on hankalaa veden virtausolosuhteiden monimutkaisesta luonteesta, hiukkaskoon epätasaisesta jakaumasta ja huonosti tunnetuista fysikaalisista parametreista johtuen. Koheesiomaalajien, kuten hienon hiesun ja saven, kulkeutuminen voi erota huomattavasti kitkamaa-

lajien, kuten hiekan ja soran, kulkeutumisesta. Maa-aineksen kulkeutumiselle on kehitetty lukuisia yhtälöitä, jotka perustuvat tutkimuksissa määritettyihin empiirisiin riippuvuuksiin. Näissä yhtälöissä on yleensä parametreja, joiden arvot perustuvat koeolosuhteisiin ja ovat paikkaan sidottuja. Tämän vuoksi niitä on arveluttavaa käyttää kokeista poikkeavissa olosuhteissa. Yhtään yleisesti käyttökelpoista yhtälöä, joka soveltuisi kiintoaineen kulkeutumisen kuvaamiseen kaikissa olosuhteissa, ei ole kehitetty.

Tietoruuuissa 4.14 on esitetty usein noroeroosion mallinnuksessa käytettyjä yhtälöitä, jotka kuvaavat pintaeroosiota (yhtälö T4.43), noron irrotuskapasiteettia (yhtälöt T4.44–T4.46) ja maa-aineksen kuljetuskapasiteettia (yhtälöt T4.47–T4.48).

Eroosion torjunta peltoalueilla

Eroosion torjunnalla pyritään vähentämään sadepisaroiden irrottavaa vaikutusta maa-ainekseen, parantamaan maan rakenteen pysyvyyttä sekä vähentämään pintavaluntaa ja hidastamaan sen virtausnopeutta. Eroosion torjuntamenetelmät vaikuttavat joko kaikkiin näihin tekijöihin tai osaan niistä. Tietyllä alueella käytettävien menetelmien valintaan vaikuttavat ilmasto, viljelykasvi, maalaji, pellon kaltevuus sekä muokkaus- ja muut viljelymenetelmät, kuten viljelykierto.

Maanpinnan eroosioalttiutta vähennetään ennen kaikkea viljelymenetelmillä ja maanpinnan muotoilulla. Kasvipeitteisyyttä voidaan lisätä jättämällä sadonkorjuun jälkeen peltoon elävää kasvillisuutta tai kasvinjäänteitä. Kevennetyjen muokkausmenetelmien käyttö säilyttää maan rakennetta ja lisää veden imeytymistä maaperään. Veden virtausnopeutta voidaan pienentää mm. jakamalla viettävä peltoalue terasseihin.

Suomessa eroosion torjuntaan käytetään pääasiassa viljelytekniisiä toimenpiteitä ja pelloille perustettavia erillisiä suojakaistoja ja suojavyöhykkeitä. Pintamaan stabiloinnilla pyritään vähentämään maapartikkeleiden irtautumista ja kulkeutumista veden mukana. Pintamaan rakennetta vahvistetaan mm. vähentämällä maan muokkausta. Maan mururakennetta voidaan parantaa myös käyttämällä kemiallisia aineita, kuten kalkkia, polymeerejä tai teollisuuden jätkeuituja. Myös pellon vesitalouden järjestely on tärkeää eroosion torjunnassa. Salaojituksella voidaan vähentää pintavaluntaa ja siten eroosiota.

Kasvukauden ulkopuolinen kasvipeitteisyys ja kevennetyt muokkausmenetelmät tai maan jättäminen kokonaan muokkaamatta, varsinkin syksyllä, ovat tärkeimpiä viljelytekniisiä toimenpiteitä, joilla vähennetään pintamaan eroosiota peltoalueilla. Sadonkorjuun yhteydessä pellolle jätettävät kasvinjäänteet suojaavat tehokkaasti maanpintaa ja vähentävät pinta- ja noroeroosiota. Suorakylvössä maata ei muokata ollenkaan.

Kasvinjäänteet vähentävät sateen ja tuulen eroosiota aiheuttavan energian kohdistumista maa-ainekseen ja pienentävät pintavalunnan määrää ja virtausnopeutta. Ne muodostavat esteitä noroeroosiolle ja vähentävät maan pintakerroksen kuorettumista ja lisäävät maan imeytäntäkapasiteettia. Kasvinjäänteiden eroosiota vähentävä vaikutus on tehokkaimmillaan, kun ne jätetään maan pinnalle, mutta ne voidaan osittain muokata myös maan sisään. Säilytettäessä kasvinjäänteiden peitto niinkin alhaisena kuin 30 %:ssa pinta-alasta eroosiota voi vähentää jopa 50 % (Wischmeier ja Smith 1978). Kasvipeite ja kasvavien kasvien juuristo pienentävät maan eroosiota pidättämällä sadantaa, vähentämällä sadepisaroiden ja pintavalunnan eroosioenergiaa sekä kiinnittämällä maata juuristollaan. Aluskasveja voidaan käyttää suojaamaan maan pintaa sen jälkeen, kun varsinaisen viljelykasvin sato on korjattu. Monivuotiset kasvit, nurmet ja palkokasvit ovat tehokkaimpia eroosion torjunnassa, maan rakenteen parantamisessa ja imeyntäkyvyn lisäämisessä.

Eroosion vähentämiseen on käytetty myös rinnettä vastaan kohtisuorasti tapahtuvaa kyntöä, jolloin pintavalunta ei pääse esteettömästi virtaamaan alas rinnettä pitkin kuten rinteiden suuntaisessa kynnössä. Rinteiden poikki tapahtuvassa kynnössä voimakas pintava-

lunta voi kuitenkin syövyttää noroja kyntöviilujen harjan yli, jolloin eroosio saattaa näillä kohdilla lisääntyä huomattavasti.

Suojakaistat ja suojavyöhykkeet ovat valtaojien ja purojen varsille perustettavia kasvillisuusvyöhykkeitä. Niiden tarkoituksena on estää pellolta irronneen maa-aineksen kulkeutuminen uomiin hidastamalla pintavalunnan virtausnopeutta ja edistämällä maapartikkeleiden laskeutumista suojakaistalle tai sen läheisyyteen. Suojavyöhykkeeksi lasketaan myös täysin kasvillisuuden peittämät jyrkät rinnepellot ja tulva-alueet. Suojavyöhykkeiden tehokas toiminta edellyttää, että virtaus on tasaista koko suojavyöhykkeen yli eikä maata syövyttäviä oikovirtauksia muodostu. Kasvillisuus voi olla joko luonnontilaisia kasveja, puita ja pensaita tai monivuotista nurmea. Suoja-alueet pysäyttävät parhaiten suhteellisen suurten maapartikkeleiden ja murujen kulkeutumisen, mutta niiden teho on selvästi heikompi suspendoituneiden ja erityisesti kolloidimuodossa olevien saveshiukkasten suhteen. Suojakaistojen teho riippuu niiden leveydestä ja kasvillisuudesta sekä eroosion määrästä. Suojakaistan ylläpito vaatii kasvuston leikkaamista ja korjaamista pois suojakaistoilta, jotta ravinteita ei vapaudu kasviaineksen hajotessa. Lisäksi tarkasteltaessa pelloilta syntyvää kiintoainekuormaa kokonaisuudessaan on huomioitava, että suuri osa kuormituksesta voi savimailla kulkeutua salaojien kautta (esim. Turtola ym. 2007, Äijö 2014), jolloin suojavyöhykkeiden vaikutus kokonaiskuormitukseen jää suhteellisen vähäiseksi.

Pelloilta jo kulkeutuneen maa-aineksen kulkeutumista vesistöön on estetty rakentamalla pohjapatoja ja laskeutusaltaita peruskuivatusuomiin tai lasketusaltaiden ja kosteikkojen yhdistelmiä, joihin kiintoainesta sedimentoituu (ks. Luku 6).

Eroosioherkillä alueilla Etelä-Euroopassa ja muualla maailmassa käytetään eroosion pienentämiseen yleisesti pengerrerettyjä ja maan korkeuskäyriä noudattavia terasseja, maanpinnan muotoilua, kasvillisuuden peittämiä uomia ja korkeuskäyrien mukaista muokkausta ja istutuksia. Terasseilla eroosion vähentäminen perustuu pintavalunnan virtausnopeuden hidastumiseen tai lakkaamiseen kokonaan. Virtausnopeuden hidastumisen myötä sedimentaatio lisääntyy ja jo erodoitunut maa-aines jää pellolle. Pintavalunta johdetaan pois pellolta ruohoa kasvavan uoman tai salaojan kautta niin pienellä virtausnopeudella, ettei se aiheuta eroosiota. Kasvillisuuden peittämät omat vähentävät erityisesti uomavirtauksen nopeutta ja siten sen eroosiota aiheuttavaa energiaa. Uomien kasvuston tulee olla sellaista tiheää ja monivuotista nurmea, joka sopii alueen luontoon. Kasvustoa on lannoitettava ja leikattava säännöllisesti, ja myös itse uomaa on pidettävä kunnossa mm. poistamalla sinne kertynyt maa-aines.

4.5 Fosfori

Helinä Hartikainen

Maan fosforivarat

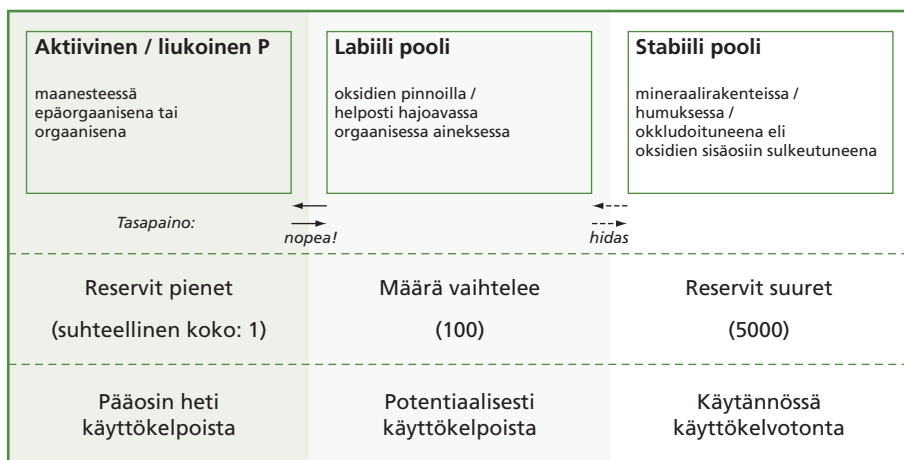
Tärkein luonnossa esiintyvä fosforimineraali on apatiitti, josta lähes kaikki luonnossa kiertävä fosfori on peräisin. Se on erittäin huonosti liukenevaa ja siten kestävää rapautumista vastaan. Koska suomalaiset maat ovat nuoria ja heikosti rapautuneita, apatiittisessa muodossa olevan fosforin osuus kokonaisvaroista on luonnontilaisissa maissa suuri. Fosforivarat vaihtelevat kuitenkin määrällisesti hyvin paljon lähtöaineksena olevan kallioperän laadun sekä maan tekstuurin, kehitysasteen ja viljelyhistorian mukaan. Maalajien välisiä eroja selittää se, että mineralogisista tekijöistä johtuen fosforipitoisuus yleensä nousee siirryttäessä karkeista lajitteista hienompiin. Paitsi eri maalajien myös maaprofilin eri kerrosten välillä fosforireservien määrälliset ja laadulliset erot voivat olla hyvin suuria. Luonnontilaisilla alueilla pitoisuudet ovat pieniä karkeissa ja podsoloituneissa maissa. Orgaanisen fosforin osuus on luonnollisesti suhteellisesti suurempi pintakerroksissa kuin syvemmissä horisonteissa.

Fosforivarojen luokittelu

Kaikki maassa tapahtuvat prosessit vaikuttavat fosforin biologiseen käyttökelpoisuuteen, joka määräytyy viime kädessä sitoutumislujuuden tai orgaanisten yhdisteiden liukoisuuden ja hajoamisherkkyuden mukaan. Biosaatavuuden perusteella reservit voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan: 1) aktiivinen eli liukoinen, 2) labiili eli helposti mobilisoituva ja 3) stabiili eli erittäin huonosti käytettävissä oleva fosfori (kuva 4.19). On kuitenkin huomattava, että eri pooleissa olevan fosforin käyttökelpoisuudessa voi olla sisäistä vaihtelua, fosfori voi siirtyä poolista toiseen ja että eri poolien välisten reaktioiden nopeus voi vaihdella melkoisesti. Pidätyimisreaktiot ovat nopeita, mutta lämpötilan aletessa reaktionopeus hidastuu.

Stabiilissa poolissa oleva fosfori on käytännöllisesti katsoen biologisesti käyttökeltvotonta. Suurimman osan siitä muodostaa apatiitti, josta kasvit pystyvät jossain määrin liuottamaan fosforia juurten mykorritsasienien avulla. Reaktiolla voidaan katsoa kuitenkin olevan merkitystä vain luonnontilaisissa maissa. Viljelykasvien fosforin tarpeen tyydyttämiseksi rapautumisreaktiot ovat aivan liian hitaita. Apatiittisen fosforin suhteellisen suuri osuus Suomen maaperässä kertoo siitä, että 10 000 vuotta on ollut lyhyt aika näiden reservien kiertoon saattamiseksi. Lisäksi on huomattava, että rapautumisessa vapautuva fosfori pyrkii sitoutumaan maassa nopeasti Al- ja Fe-oksidihydroksidien pinnoille (ks. kohta 4.2 - Anioinien sitoutuminen - Spesifinen pidätyminen). Vain hyvin pieni osa jää liukoiseksi maanesteeseen. Viljelymailla mykorritsasienet mobilisoivat todennäköisesti etupäässä näitä hiukkaspinnoille pidätyneitä fosforivaroja. Myös humusainekseen rakentuneen fosforin voidaan katsoa kuuluvan huonosti käyttökeltvaiseen stabiiliin pooliin, koska varsinainen humus on erittäin hitaasti hajoavaa.

Koska kasvit ottavat ravinteensa maavedestä, liukoisena olevan fosforin on yleisesti katsottu olevan käyttökeltvasta. Tarkkaan ottaen vain maaveden epäorgaaninen fosfori on välittömästi kasvien saatavissa, orgaaninen fosfori tulee käyttöön jonkin verran hitaammin entsyymaattisten pilkkoutumisreaktioiden jälkeen. Maavedessä liukoista epäorgaanista fosforia on kuitenkin niin vähän, että se pystyy vain hetkellisesti tyydyttämään kasvien fosforin tarpeen. Kun kasvit ottavat fosforia maavedestä, liukoisia varoja on jatkuvasti täydennettävä ns. labiileista eli helposti vapautuvista varoista. Hiukkaspinnoille pidätyneen



Kuva 4.19 Maan fosforivarojen yleispiirteinen luokittelu biologisen käyttökeltvaisuuden mukaan, fosforin suhteellinen määrä eri pooleissa sekä poolien välisten reaktioiden nopeudet.

ja maavedessä liukoisena olevan fosforin välillä vallitsee pyrkimys tasapainoon: maaveden fosforipitoisuuden pienetessä oksidien pinnoille pidättyneet reservit pyrkivät vastustamaan pitoisuuden alenemista luovuttamalla eli desorboimalla osan sitoutuneesta fosforista liuosfaasiin. Kun maaveden fosforipitoisuus kasvaa esimerkiksi lannoituksen seurauksena, osa liukoisesta fosforista siirtyy pidätyspinnalle, mikä vastustaa liukoisen fosforin pitoisuuden nousua. Hiukkaspinnoilla olevasta labiilista fosforista voi fosforia siirtyä ajan mittaan oksidien huokosiin sisäosiin (=okkludoituminen), jolloin se poistuu aktiivisesta kierrosta stabiiliin pooliin. Tämä reaktio voi vuosien mittaan heikentää käyttämättä jääneen lannoitefosforin jäännösvaikutusta. Toisin sanoen rapautumisen, lannoituksen ja mikrobiologisten hajotusreaktioiden tuottamat fosfaatti-ionit kasvattavat labiilia poolia, mutta ionien vähittäinen diffuusio oksidien sisäosiin pienentää sitä.

Kansainvälisen kirjallisuuden mukaan orgaanisen fosforin osuus maan kokonaisfosforista on yleensä 25–65 %. Turvemailla osuus on luonnollisesti kaikkein suurin. Maassa olevan orgaanisen aineksen fosforipitoisuus vaihtelee kuitenkin paljon karikemateriaalin laadun mukaan. Suurin osa on inositoliheksafosforihapon suoloja, fytaatteja, mutta maasta voidaan tunnistaa myös nukleiinihappoja, fosfolipidejä, sokereihin liittyntä fosfaattia jne. Ne voivat olla peräisin sekä kasveista että mikrobeista. Myös varsinainen humus voi sisältää huomattaviakin määriä esteröityneitä fosforimuotoja sekä fosfonaatteja, joissa fosfori on sitoutunut suoraan hiileen. Epäorgaanisen fosforin tavoin useat orgaaniset fosforiyhdisteet pystyvät sitoutumaan Fe- ja Al-oksihydroksidien pinnoille, mutta tällöin niiden mikrobiologinen hajoaminen merkittävästi hidastuu ja ne voivat muuttua osaksi stabiilia poolia ja säilyä kauan maassa. On kuitenkin huomattava, että vain hyvin pieni osa biologisiin kiertoihin osallistuvasta fosforista akkumuloituu maahan orgaanisessa muodossa. Orgaaninen fosfori on selvästi vähemmän yhteydessä orgaaniseen hiileen kuin tyyppi ja rikki. Tämä näkyy mm. siinä, että C/P-suhde on tavallisesti kirjallisuudessa esitettyjen tietojen mukaan 100 - 1000, mikä on noin 10 -100 kertaa suurempi kuin C/N-suhteen vaihteluväli.

Maaperän ominaisuudet ja fosforin hyväksikäyttöaste

Kasvin fosforin tarve on suurimmillaan kehityksen alkuvaiheessa, minkä vuoksi fosforia pitäisi olla riittävästi käytettävissä kasvukauden alussa. Myöhään annettu lannoitefosfori ei juuri hyödytä kasvia. Kylvön yhteydessä tapahtuvan fosforilannoituksen ongelma on, että kasvi joutuu jo siemenenä kilpailemaan fosforista nopeiden kemiallisten pidättymisreaktioiden kanssa. Esiintymismuoto ja varastojen suuruus ovat tärkeitä fosforin saatavuuteen ja liikkumiseen vaikuttavia tekijöitä, mutta kasvien fosforinsaannin turvaamisessa merkitystä on myös reservien saavutettavuudella. Kemiallisessa testissä todettu hyvä maan fosforitila ei välttämättä takaa sitä, että kasvit saisivat fosforia riittävästi. Koska fosfori liikkuu maassa huonosti, juurten kasvuedellytyksillä on tärkeä merkitys kasvien fosfortaloudessa. Laajan ja syvälle ulottuvan juuriston avulla kasvi pystyy hyödyntämään fosforia suuresta maatilavuudesta. Juurten kasvuun puolestaan vaikuttaa maan fysikaalinen rakenne ja veden saatavuus. Hyvä rakenteisessa maassa vedenläpäisy toimii, mutta siihen on myös varastoitunut kasvien hyödynnettävissä olevaa vettä, hapen saanti on turvattu ja juuriston kasvu helppoa.

Toimivan ojituksen merkitys korostuu maan rakenteen ylläpidossa, jossa tärkeä rooli on aktiivisella lierokannalla ja mikrobiotoiminnalla. Hajottajamikrobit toimivat tehokkaasti hapellisissa olosuhteissa ja niiden tuottamat lima-aineet stabiloivat mureja ja vähentävät maan liettymis- ja eroosiotaipumusta ja siten myös ravinteiden kulkeutumista pois pelloilta. Maaperäolosuhteita säätelemällä on siis mahdollista vaikuttaa ainakin jossain määrin maan fosforireservien hyödynnettävyyteen. Märissä ja hapen puutteesta kärsivissä maissa fosforia voi liueta maaveteen Fe-oksidien pinnoilta, kun Fe^{3+} pelkistyy Fe^{2+} -ksi. Kahden-

arvoinen ferrorauta ei pysty sitomaan fosforia. Koska kasvien elintoiminnot ja ravinteiden otto kärsivät hapen puutteesta, kasvit eivät pysty hyödyntämään pelkistysreaktiossa mahdollisesti vapautunutta fosforia. Osa Fe-oksidoista vapautuneesta fosforista sitoutuu Al-oksidiin pinnoille, sillä Al säilyttää fosforinsitomiskykensä huonoissakin happioloissa. Maaveteen jäänyt osa voi liikkua muihin maakerroksiin tai pois pellolta veden mukana.

Hiukkaspinnoille pidättyneen fosforin vapautumista maaveteen säätelee ensisijaisesti sitoutumislujuus, joka määräytyy sen mukaan miten täynnä oksidipinnat ovat. Pintojen täyttyessä fosforin sitoutumislujuus pienenee. Spesifisesti pidättyvä fosfaatti-anioni liittyy osaksi pidättävää pintaa ja vie mukanaan oman negatiivisen sähkövarauksensa (ks. kuva 4.4), mikä vähitellen vaikeuttaa uusien anionien pidättymistä (kasvattaa repulsiota). Pidätyspintojen täyttyminen muuttaa myös fosforin sitoutumistapaa ja heikentää sitä kautta sitoutumislujuutta (ks. kuva 4.5). Tämän vuoksi lannoituksella aikaansaatu fosforireservien kasvu voi edistää myöhemmin lisättävän lannoitefosforin hyväksikäyttöä.

Fosfaatin kanssa samasta pidätyspinnasta kilpailevat anionit, esimerkiksi humuksen orgaaniset anionit, heikentävät fosforin sitoutumismahdollisuuksia. Runsaasti eloperäistä ainesta sisältävässä maassa fosfori on helpommin käytettävissä kuin vastaavanlaisessa mutta vähän eloperäistä ainesta sisältävässä maassa. Tosin runsaasti humusta sisältävässä maassa fosforin saantia helpottavat myös fysikaaliset tekijät, erityisesti juurten helppo kasvu.

Koska fosforin sitoutuminen on erityisen tehokasta happamissa maissa, kalkituksella voidaan jonkin verran parantaa fosforin saatavuutta. Kalkituksen edullinen vaikutus voidaan selittää monen biologisen ja kemiallisen mekanismin kautta. Yhtenä vaikuttavana tekijänä on pH:n nousun aiheuttama pidätyspinnan negatiivisen varauksen kasvu (tai OH-ionien aiheuttama kilpailu). Toisaalta mikrobiologinen aktiivisuus lisääntyy ja sitä kautta orgaanisen fosforin mobilisoituminen voi parantua. Kuonakalkkeja käytettäessä maahan saadaan lisäksi liukoisia silikaatti-anioneja, jotka pyrkivät sitoutumaan oksidipinnoille ja kilpailullaan edistävät fosfaatin saatavuutta. Urean (virtsan) joutuminen maahan nostaa paikallisesti maan pH:n erittäin korkeaksi, minkä on havaittu aiheuttavan maan orgaanisen aineksen liikkeellelähtöä ja samalla maan fosforin liukoisuuden on havaittu jyrkästi nousevan. Urea lisää fosforin liukoisuutta selvästi enemmän kuin kalkituksella aikaan saatu vastaavansuuruinen pH:n nousu. Vaikutus on kuitenkin lyhytaikainen, koska ureatypen nitrifikaatio happamoittaa maata vähitellen uudelleen.

Myös maaveden suolapitoisuus voi vaikuttaa potentiaalisesti käyttökelpoisten fosforivarojen hyödynnettävyyteen. Suolapitoisuuden nousu edistää pidättymistä tai ainakin hidastaa fosforivarojen vapautumista maaveteen. Toistaiseksi on kuitenkin varsin vähän selvitetty maanesteen koostumuksen käytännön merkitystä fosforin saatavuuden kannalta, vaikka teoreettisten tutkimusten mukaan sillä on vaikutusta liukoisen ja labiilin poolin väliseen tasapainoon. On mahdollista, että keväällä lannoiterivien läheisyydessä korkea suolapitoisuus heikentää fosforin saatavuutta ainakin ohimenevästi. Lisäksi tiedetään, että suuri 2-arvoisten kationien pitoisuus maavedessä hidastaa fosforin mobilisointumista hiukkaspinnoilta.

Fosforikuormitus ja fosforin kulkeutuminen pintavesiin

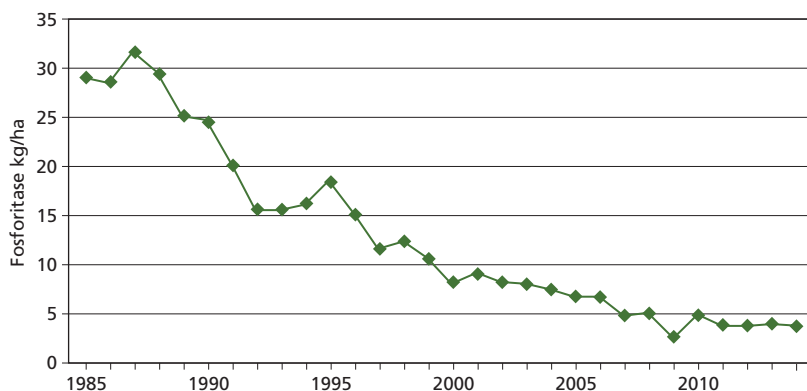
Fosfori pidättyy tehokkaasti valuma-alueiden maaperään, minkä vuoksi sen puute rajoittaa luontaisesti perustuotantoa vesistöissä. Kun fosforia joutuu eri päästölähteistä vesistöihin, se sidotaan nopeasti biomassaan eikä liukoisen fosforin pitoisuus vesimassassa välttämättä nouse. Tuotettua levämassaa laskeutuu alusveteen, missä se alkaa hajota ja vapauttaa fosforia takaisin veteen. Pohjasedimentti voi kuitenkin sitoa liuennutta fosforia aivan samalla tavalla kuin maa-aineskin. Toisin sanoen pidättymisen tehokkuus riippuu pohjasedimen-

tin ominaisuuksista. Kun alusveden happitilanne on hyvä ja kuormitus on pientä, vesistön niin sanottu itsepuhdistumiskyky toimii ja fosfori varastoituu kivennäisainesta sisältävään sedimenttiin. Tämän vuoksi rehevöityminen etenee aluksi hitaasti ja piilevästi, mutta se kiihtyy kuormituksen jatkuessa. Lopulta se johtaa tilanteeseen, jossa kasvavan biomassan hajotus kuluttaa vesistön pohjanläheisen vesikerroksen happivarat loppuun. Tämä on vesistön kannalta kriittinen vaihe. Se käynnistää sisäisen kuormituksen, joka tarkoittaa vesistön pohjasedimenttiin varastoituneen fosforin liikkeelle lähtöä. Tällöin fosforia vapautuu erityisesti rautaoksidien sitomista varoista, sillä Fe^{3+} :n pelkistytessä Fe^{2+} :ksi rautaoksidi alkaa liueta eikä se enää pysty sitomaan fosforia. Tuloksena on veden fosforipitoisuuden äkillinen kasvu ja rehevöitymiskierteen kiihtyminen.

Koska rehevöitymiskierteen katkaiseminen vesistöissä on vaikeaa, vesiensuojelun kannalta on olennaista rajoittaa fosforin pääsyä vesistöihin ja kohdistaa ennalta ehkäisevät toimenpiteet valuma-alueelle. Pistemäisistä kuormituslähteistä tulevien päästöjen saaminen hallintaan on kuitenkin teknisesti helpompaa kuin valuma-alueilta tulevan haja-kuormituksen nopea ja tehokas vähentäminen. Kaikki valuma-alueella toteutettavat toimenpiteet kuten yhdyskuntien ja teiden rakentaminen, kuivatus, metsänhakkuut ja maatalous muuttavat valuma-alueiden luonnontilaa ja siten aiheuttavat väistämättä jonkinasteisia muutoksia valumaveden määrässä ja laadussa. Arvioiden mukaan Suomessa ihmisen aiheuttamasta fosforikuormituksesta pintavesiin maatalouden osuus on nykyisin noin 60 % (Nyroos ym. 2006).

Suomalaisissa maissa kokonaisfosforin pitoisuus vaihtelee suuresti maalajista ja maankäyttöhistoriasta riippuen: muutamasta sadasta yli tuhanteen milligrammaan kiloa kohti keskimääräisen vaihteluvälin ollessa 570–760 mg kg⁻¹ (Peltovuori 2006). Suuri osa kokonaisfosforista on kuitenkin kiviaineksen apatiittista fosforia, joka ei käytännöllisesti katsoen osallistu fosforin kiertoon (ks. kuva 4.19). Luonnontilaisen maan viljelyyn otto muuttaa merkittävästi fosforin jakautumaa maaprofilissa: lannoituksen seurauksena fosforireservejä kertyy pintakerrokseen, mutta syvemmällä muutokset ovat hyvin vähäisiä. Viljelymaille on tyypillistä, että muokkauskerroksen ja sen alapuolella olevan jankon ero fosforipitoisuudessa on hyvin jyrkkä. Pintakerroksen kokonaisvaroista orgaanisen fosforin osuuden on arvioitu olevan kivennäismaissa noin 40 % ja turvemaissa noin 60 %. Satojen ottamat fosforimäärät vaihtelevat kasvilajin ja satotason mukaan yleensä välillä 10–25 kg hehtaarilta. Suurinta otto on perunalla ja sokerijuurikkaalla, mutta niiden ottamista ravinteista huomattava osa palautuu maahan korjuutähteissä. Peltojen fosforitase, joka laskeaan lannoituksessa lisätyn fosforin ja satojen mukana poistuneen fosforin erotuksena, on pysynyt positiivisena vuosikymmeniä viime aikoihin asti (kuva 4.20). Tämä on kasvattanut maan fosforivarantoja, minkä seurauksena myös vesistöjen kuormitusriski on kasvanut.

Luonnontilaisilta metsäalueilta pintavesiin huuhtoutuvaksi fosforimääräksi on arvioitu Suomessa vuosittain 0,02–0,15 kiloa hehtaarilta (Kortelainen ym. 1999, Vuorenmaa ym. 2002). Metsätaloustoimenpiteet, kuten ojitus, hakkuut ja lannoitus, ovat yleensä lisänneet fosforin huuhtoumista luonnontilaan verrattuna. Maatalousalueilta huuhtoutuva fosforimäärä pinta-alayksikköä kohti on keskimäärin moninkertainen metsäalueisiin verrattuna (Vuorenmaa ym. 2002). Myös pelloilta tulevan fosforikuormituksen määrä vaihtelee laajoissa rajoissa sekä ajallisesti että paikallisesti. Siihen vaikuttavat muun muassa maaperätekijät (maalaji, vedenläpäisevyys, lannoitushistoria, topografia), maankäyttö- ja viljelyhistoria (viljelykasvi- ja kierto, muokkaus, ojitus) ja ilmastotekijät (sateen määrä ja rankkuus, haihdunta, kasvukauden pituus, routa, lumipeitteisyys). Eri lähteistä koottujen arvioiden mukaan kuormitusluvut hehtaaria kohti voivat jäädä alle 0,1 kg:aan tai nousta useisiin kiloihin (Uusitalo 2004). Karkeat keskiarvot suomalaisilta pelloilta tulevasta kokonaiskuormituksesta liikkuvat 0,5–2 kilon välillä hehtaarilta. Happamalla sulfaattimailla



Kuva 4.20 Suomen peltomaiden fosforitaseen kehittyminen vuodesta 1985 vuoteen 2014. (OECD Agri-environmental indicators: Nutrient balances). Laskelman on päivittänyt Tapio Salo.

kuormitusta vähentää fosforia sitovien alumiini- ja erityisesti rautaoksidien runsaus sekä maan happamuus. Niiltä tulevan vuosittaisen huuhtouman määräksi on arvioitu 0,2 kiloa hehtaarilta (Vuorenmaa ym. 2002).

Myös vesistöihin kulkeutuvan ravinnekuormituksen laadussa on eroja. Pintavalunta ja salaojavalunta sekä maa-alueille nousevat tulvavedet vievät mukanaan sekä partikkelimaista että liukoista fosforia. Erityisesti savimailla saadut koetulokset osoittavat, että kokonaisfosforin kulkeumat riippuvat eroosion määrästä. Partikkeleihin sitoutuneen fosforin osuus kuormituksessa kasvaa, kun maan rakenne rikotaan muokkaamalla. Erityisen herkästi maapartikkeleita irtoaa kynnön paljastamilta tuoreilta leikkauspinnoilta. Suurimmat fosforihuuhtoumat syntyvät avokesantomaille, joita muokataan kasvukauden aikana esimerkiksi rikkakasvien torjumiseksi. Kasvipeitteisyys vähentää maapartikkeleiden irtamista suojaamalla maata sadepisaroiden iskuja vastaan, hidastamalla maan pinnalla virtailevan veden liikettä ja sitomalla kasvien juurten avulla maa-ainesta. Samalla se kuitenkin lisää liukoisen fosforin osuutta valumavesissä, kun kuolleen kasvimateriaalin hajotuksessa vapautuu fosforia. Myös pitkään jatkunut suorakylvö, joka kerryttää kasvintähteiden mukana orgaanista ainesta ja kasveista tai lannoitteista peräisin olevaa fosforia maan pintaan, voi lisätä huuhtoutumisriskiä (Muukkonen ym. 2007). Jokioisilla Lounais-Suomessa tehdyissä tutkimuksissa havaittiin, että nurmesta huuhtoutuneesta kokonaisfosforista kaksi kolmasosaa oli liukoista, kun liukoisen fosforin osuus ohraan huuhtoumasta oli vain yksi kolmasosa (Turtola ja Jaakkola 1985). Fosforin kokonaishuuhtoumat nurmelta olivat keskimäärin hieman suuremmat kuin ohralla. Lumen sulannan alkaessa routaantuneesta maasta kulkeutuu kiintoainesta ja siihen sitoutunutta fosforia vähän, eikä valumavesien kokonaisfosforipitoisuus riipu juurikaan valunnan määrästä. Liukoisen fosforin suhteellinen osuus on tällöin usein korkeampi kuin myöhemmin roudan sulamisvaiheessa. Tämän on katsottu aiheutuvan talvehtivasta kasvustosta ja kasvinjäänteistä liukenevasta fosforista, jota vapautuu pakkasen rikkomista soluista.

Turvemaat ovat ravinnetaloudeltaan hankalia viljelymaita. Niiden luontainen fosforinpidätyskyky on erittäin heikko, koska niissä ei ole juuri lainkaan Al:n ja Fe:n oksideja. Tämän vuoksi turvemaiden lannoituksessa käytetään hidasliukoisia lannoitteita. Jos turvekerros on ohut ja sen alla on kohtalaisen hienojakoista kivennäismaata, alaspäin liikkuvan veden mukana kulkeutuva fosfori pidättyy siihen. Sen sijaan paksuturpeilla mailla huuhtoutumisriski on hyvin suuri jopa muutamien kilojen luokkaa, vaikka käytetty lan-

noitemäärä olisi suositusten mukainen (Saarela ja Vuorinen 2008). Niiden ravinnetaloutta voidaan parantaa esimerkiksi saveamalla, jolloin turpeeseen saadaan fosforia sitovia komponentteja. Samalla paranee myös kaliumin pidättyminen, koska se sitoutuu varsin huonosti orgaanisen aineksen kationinvaihtopaikoille, jotka ovat pistemäisempiä kuin mineraalipintojen vaihtopaikat. Suuremman varauksen omaavat kaksiarvoiset kationit sitoutuvat humuksen vaihtopaikoille paremmin, sillä ne voivat sitoutua kahteen varauspaikkaan yhtä aikaa.

Turvemaiden viljely edellyttää aina kunnollista ojitusta. Soiden ojituksesta saadun kokemuksen mukaan ojien kaivaminen pelkkään turpeeseen aiheuttaa ohimenevän piikin kokonaisfosforin huuhtoumassa, koska kaivutyö lisää orgaanista kiintoainekuormitusta. Sen sijaan liukoisien epäorgaanisen fosforin pitoisuuden nousu jää verraten vähäiseksi. Turvemaiden maavedessä oleva liukoinen fosfori on pääasiassa orgaanista, joka muuttuu biologisesti käyttökelpoiseen muotoon hajotusreaktioiden kautta. Soisilta valuma-alueilta kerättyjen tietojen perusteella (Ahtiainen ja Huttunen 1995) luonnonkuormitus vaihtelee soiden osuudesta riippuen välillä 0,03–0,15 kg fosforia hehtaarilta vuodessa.

Vesistövaikutusten kannalta olennainen tekijä kuormituksessa on se, missä muodossa fosfori on. Liukoinen epäorgaaninen fosfori on vesistössä välittömästi biologisesti saatavaa. Orgaanisena olevat liukoiset muodot tulevat erilaisten hajotusprosessien kautta kohdallaisen helposti leville käyttökelpoisiksi. Partikkeliaineksen kuormittava vaikutus riippuu paitsi aineksessa olevan fosforin pitoisuudesta myös sen esiintymismuodosta. Kivennäismailta tulevasta fosforikuormituksesta valtaosa, jopa yli 90 %, on partikkeleihin sitoutuneena. Osa siitä voi kuitenkin muuttua vesistössä liukoiseen muotoon eli desorboitua hapellisissa oloissa. Kiintoainekseen sisältää myös sellaista tiukasti raudan sitomaa fosforia, joka vapautuu pelkistyneissä olosuhteissa, Fe^{3+} -oksidit muuttuvat liukoiseen Fe^{2+} -muotoon. Uusitalo (2004) arvioi, että hapellisissa oloissa potentiaalisesti biosaatavaa fosforia voi olla lähes puolet partikkelifosforin määrästä. Hänen tutkimuksessaan liukoisin fosforin määrä savimaiden valumavesissä hehtaaria kohti vaihteli noin 0,030 kg:sta yli 0,500 kg:aan, mutta sen lisäksi niissä oli vähitellen desorboituvaa fosforia, jonka määrä vaihteli yli 0,010 kg:sta lähes 0,300 kg:aan. Pelkistyneet olosuhteet nostivat potentiaalisesti liikkeelle lähtevän fosforin määrän tasolle, joka vaihteli yli 0,090 kg:sta yli 1,3 kg:aan. Hyvin fosforiköyhä eroosioainekseen voi toisaalta toimia myös fosforin sitojana vesistössä. Lisäksi on huomattava, että partikkeliainekseen voi ainakin ohimenevästi vähentää levätuotantoa aiheuttamalla sameutta ja siten heikentämällä yhteysttämistä.

Kuormituksen synty

Typen ja fosforin erilaiset ominaisuudet ja reaktiot maaperässä selittävät sen, miksi vesistökuormitus on fosforin osalta vaikeammin hallittavissa kuin typen osalta. Suotuisissa olosuhteissa kasvit hyödyntävät varsin hyvin maahan annetun lannoitetyypin. Nitraattimuodossa esiintyvällä tyypellä ei ole käytännössä minkäänlaista kemiallista tai fysikaalista sitoutumismekanismia, joten se on hyvin liukoista ja välittömästi kasvien saatavilla. Useimmiten lannoitetyppi annetaan ammonium-muodossa, mutta sekä epäorgaaninen ammoniumtyppi että orgaaniset typpiyhdisteet, pyrkivät kuitenkin päätyämään mikrobiologisten reittien kautta (ks. kohta 4.6 Typpi) nitraattimuotoon. Tässä muodossa typpi on altista huuhtoutumiselle sekä märissä oloissa tapahtuville haihtumistappioille kaasumaisina yhdisteinä. Typen varastoituminen maahan on varsin heikkoa ja hidasta. Tämän vuoksi virhearviot lannoituksessa, eli sadon tarvitsemaan tai ottamaan määrään nähden liian matala tai korkea lannoitustaso, aiheuttavat joko satotappioita tai lisääntynyttä typpikuormitusta ympäristöön. Toisaalta typpilannoituksen vähentäminen näkyy nopeasti alentuneina kuormituslukuina.

Fosfori on joka suhteessa typen vastakohta. Lannoitefosforin tehokas ja nopea sitoutuminen kivennäismaissa oksidipinnoille vähentää tehokkaasti maaveteen liukoiseksi jäävän

fosforin pitoisuutta. Kasvit joutuvat kilpailemaan pidätymisreaktioiden kanssa ja saavat vain pienen osan maahan lisätystä fosforista samana vuonna käyttöönsä. Hyödyntämättä jäänyt fosfori varastoituu maahan, mutta fosforimäärien muutokset tulevat näkyviin vasta suhteellisen pitkän ajan kuluessa.

Tehokas pidätyminen heikentää paitsi fosforin käyttökelpoisuutta kasveille myös sen liikkumista alaspäin maaprofilissa. Kivennäismaissa alaspäin liikkuvan veden mukana huuhtoutuu liukoista fosforia yleensä hyvin pieniä määriä, jos vesi pääsee kontaktiin maa-aineksen kanssa. Pohjaveteen kulkeutumista tapahtuu normaalisti erittäin vähän. Juuri ennen rankkaa sadetta lisätty fosfori saattaa liikkua maassa suuria huokosia pitkin jonkin matkaa joutumatta kontaktiin pidättävien komponenttien kanssa. Se pidättyy kuitenkin muokkauskerroksen alapuolella, jos pohjamaassa on hienojakoista ainesta. Varsinkin savi- maissa liuennutta fosforia voi päästä syvempiin kerroksiin ja salaojiin madonreikien, juuri- kanavien ja halkeamien kautta tapahtuvien oikovirtausten mukana. Kulkeutumista salaojiin edistää myös salaojakaivantojen täyttömaan hyvä vedenläpäisevyys. Koska turvemaissa on tavallisesti hyvin vähän oksidiainesta, helppoliukoiset fosforilannoitteet huuhtoutuvat niistä helposti. Minerotrofisilla soilla voi tosin olla melko paljon pohjaveden mukana kulkeutunutta rautaa, joka voi sitoa fosforia. Huuhtoutumisriskin takia suometsien lannoittamisessa käytetään hitaasti liukenevia lannoitteita.

Vaikka fosfori sitoutuu maaperässä tehokkaasti, pintavalunta ja eroosio aiheuttavat fosforikuormitusta vesistöihin. Tämä näennäinen ristiriita voidaan selittää fysikaalis-kemiallisten mekanismien avulla. Tärkein kuormitusta synnyttävä tekijä on pyrkimys ylläpitää tasapainoa maaveden ja hiukkaspinnalla olevan fosforin välillä (kuva 4.21). Maaperässä on normaalisti varsin vähän vettä verrattuna kiinteään ainekseen. Tällöin maa-aines pystyy tehokkaasti pidättämään liuosfaasissa olevaa liukoista fosforia, ja tietyllä hetkellä liukoisena olevan fosforin määrä pysyy pienenä. Lisäksi maanesteen suolapitoisuus on suhteellisen suuri, etenkin heti lannoituksen jälkeen, mikä on omiaan edistämään fosforin sitoutumista hiukkaspinnoille. Tulva- ja eroosiotilanne muuttaa oleellisesti maassa vallitsevia olosuhteita. Veden määrä kiinteään ainekseen verrattuna kasvaa jyrkästi, ja samalla maa- hiukkasta ympäröivän liuoksen suolapitoisuus laimenee voimakkaasti. Maa-aines pyrkii vastustamaan näitä muutoksia ja alkaa luovuttaa fosforia hiukkaspinnoilta veteen, jotta tasapainotila maahiukkasten pinnan ja liuoksen välillä säilyy. Kun hiukkaset kulkeutuvat valumavesien mukana pellolta pintavesiin, fosforin vapautuminen hiukkaspinnoilta jatkuu ja vapautuneen fosforin kokonaismäärä jatkuvasti kasvaa.

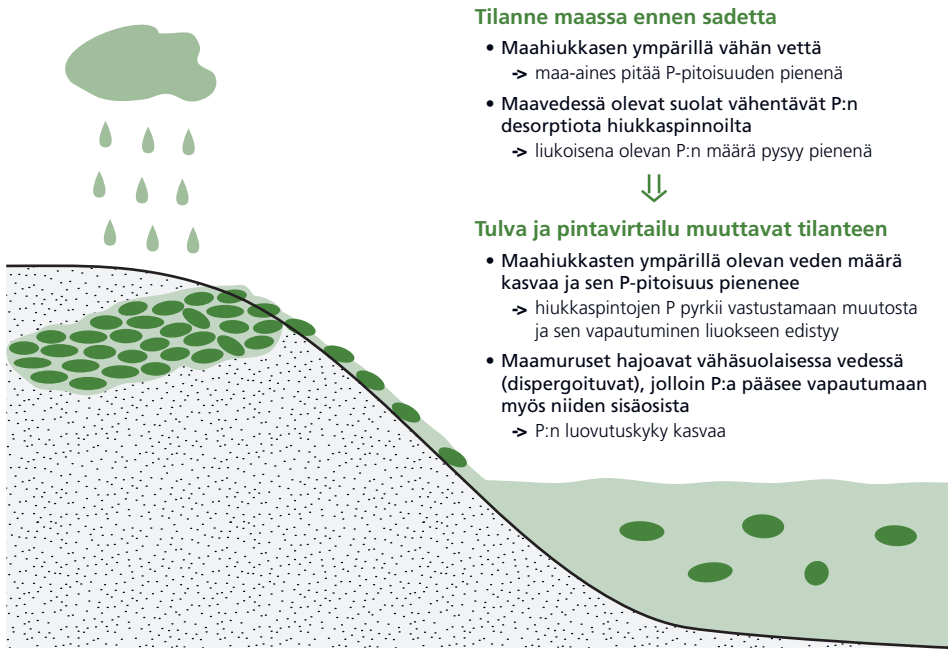
Tulvan ja eroosion vaikutus vastaa siten vaikutuksiltaan jatkuvaa tehokasta uuttoja. Vaikka fosforipitoisuus liuoksessa alkaa vähitellen pienetä sekoitussuhteen kasvaessa, maakiloa kohti vapautuvan fosforin kokonaismäärä nousee melko suoraviivaisesti. Tämä näkyy taulukossa 4.2, josta nähdään myös, että fosforin kertyminen kasvattaa maan kuormitus- potentiaalia. Toisaalta lannoitettu maa pystyy vastaavalla tavalla huolehtimaan pitemmän aikaa myös kasvien ravinnehuollosta. Lisäksi on huomattava, että vaikka pintavalunnan aikana maapartikkelit eivät lähtisikään liikkeelle, ne voivat kuitenkin luovuttaa fosforia pinnoiltaan ohivirtaavaan veteen vastaavalla tavalla kuin veteen joutuneet maahiukkaset.

Pellon vesitaloudella on tärkeä merkitys fosforikuormituksen synnyssä. Kuormituksen vähentämisessä tärkeää on huolehtia pitkäjänteisesti maan rakenteen hoidosta. Toimiva ojitus ja maan hyvä rakenne ovat avaintekijöitä, joiden avulla vesi saadaan liikkumaan maaprofilissa alaspäin ja estetään pintavalunnan syntyä. Ylilannoituksen välttämällä ja korkean kuormitusriskin omaavien alueiden lannoittamatta jättämisellä pienennetään maan kuormituspotentiaalia. Viljelykiertojen suunnittelussa tulisi huolehtia siitä, että maan pysyy mahdollisimman suuren osan vuotta kasvipeitteisenä. Tulville alttiiden peltolohkojen pitäminen nurmivaltaisina vähentää niiden eroosioalttiutta. Vesiväylien varsilla olevien eroo-

sioherkkien peltoalueiden jättäminen suojavyöhykkeiksi vähentää niiltä tulevaa eroosiota, vaikka ei olennaisesti vaikuta niiden takana olevien peltojen liukoisen fosforin kuormitukseen. Kasvillisuus on syytä korjata myös suojavyöhykkeiltä, jotta kuolleista kasveista vapautuvaa fosforia ei pääsisi vesiväyliin. Pelloilla mahdollisesti olevien pistekuormituspaikkojen, kuten laidunmaiden juomapisteidien ja karjan kokoontumispaikkojen, aiheuttamaa kuormitusriskiä voidaan pienentää sekoittamalla maahan fosforin sitoutumista lisääviä aineita. Maan rakenteen hoidossa hyväksi todettua suorakylvöä on syytä edelleen kehittää niin, että fosforin kertyminen aivan maan pintakerrokseen vähenee.

Taulukko 4.2 Kasvavilla uuttosuhteilla vapautuneen fosforin määrä (mg kg⁻¹) peltomaissa, joita lannoitettu nousevilla fosforimäärillä seitsemän vuotta.

Uuttosuhte ml vettä:g maata	Vuotuinen fosforilannoitus kg ha ⁻¹		
	0	30	60
	Vapautunut fosforimäärä mg kg ⁻¹		
2:1	0,13	0,15	0,17
5:1	0,31	0,33	0,35
10:1	0,4	0,6	0,7
50:1	1,8	2,5	3,0
150:1	5,4	6,7	8,8
400:1	8,5	14,0	20,8



Kuva 4.21 Tulvan ja pintavirtailun aiheuttama muutos hiukkaspinoilla ja vesifaasissa olevan fosforin määrissä.

4.6 Typpi

Maija Paasonen-Kivekäs

Typpeä esiintyy ilmakehässä, maaperässä sekä vesistöissä ja niiden sedimenteissä erilaisissa kemiallisissa muodoissa ja useilla eri hapetusasteilla (+5 ... -3): vapaana molekuulaarisena N_2 -kaasuna ja muina kaasumaisina yhdisteinä, orgaanisina yhdisteinä ja epäorgaanisena eli mineraalisena typpinä. Sitä on sitoutunut paljon myös kasvustoon ja muihin eliöihin, sillä typpeä on solurakenteissa mm. aminohappojen ja niistä koostuvien valkuaisaineitten osana.

Luonnossa typen muuttuminen esiintymismuodosta toiseen on pitkälti seurausta mikrobiologisista hapetus-pelkistysreaktioista (ks. kohta 4.2 - Hapetus-pelkistysreaktiot). Tiettyjen bakteerien avulla typensitojakasvit sitovat ilmakehän N_2 -kaasua soluissaan orgaanisiksi yhdisteiksi, hajottajamikrobit puolestaan vapauttavat kasvien ja muiden eliöiden jäänteiden typen kasveille käyttökelpoiseen epäorgaaniseen muotoon ja ns. denitrifikaatiobakteerit pelkistävät epäorgaanista nitraattityppeä takaisin vapaaksi typeksi. Mikrobin aktiivisuus riippuu monista ympäristötekijöistä, kuten happipitoisuudesta, lämpötilasta ja pH:sta. Myös maan kosteus säätelee sekä suoraan että välillisesti happitalouden kautta typen reaktioita ja esiintymistä maaperässä.

Typen käyttäytyminen maaperässä poikkeaa selvästi fosforin käyttäytymisestä, sillä typpi kiertää aktiivisesti luonnossa. Suurimman typpivaraston, 99,8 % globaaleista varoista, muodostaa ilmakehässä oleva N_2 -kaasu, kun taas suurin osa fosforista on sitoutuneena maaperään vaikealiukoiseen muotoon. Epäorgaaninen typpi on altista huuhtoutumaan pinta- ja pohjavesiin. Fosfori puolestaan sitoutuu maapartikkeleihin ja kulkeutuu vesistöihin pääosin eroosioaineksen mukana ja varastoituu järvien ja merten sedimentteihin.

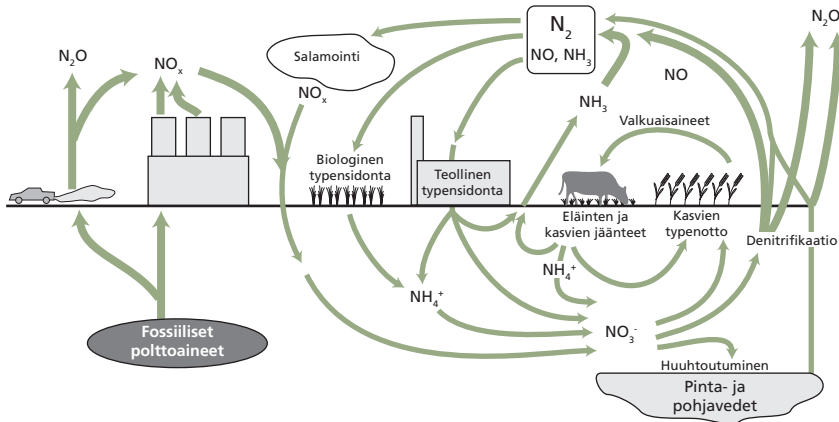
Typellä on kasvintuotannossa ratkaiseva merkitys: sen puute maassa tai kasvin heikentynyt typen saanti alentaa satoa ja huonontaa myös sen laatua. Käytännössä typpi on veden jälkeen useimmiten tärkein viljelykasvien sadon määrää rajoittava kasvutekijä. Maaperässä on luonnostaan vähän kasveille suoraan käyttökelpoista typpeä, minkä vuoksi peltoalueilla käytetään typpilannoitteita, karjanlantaa tai ns. viherlannoitusta hyödyntämällä typensitojakasveja.

Ihmisen toiminta on muuttanut typen luonnollista kiertoa monella tavalla välittömästi ja välillisesti, mikä on lisännyt reaktiivisen typen määrää luonnossa ja johtanut erilaisiin ympäristöongelmiin. Suurimpia muutostekijöitä on ollut väkilannoitteiden teollinen valmistus ilmakehän typpikaasua sitomalla. Typpilannoitteiden liiallinen käyttö on johtanut monissa maissa pintavesien rehevöitymiseen ja pohjavesien pilaantumiseen. Intensiivinen karjatalous on lisännyt vesistökuormitusta ja typpipäästöjä ilmakehään. Myös maan kuivatus, metsien hakkuut ja rakentaminen ovat edistäneet typen mobilisaatiota ja kulkeutumista vesistöihin ja ilmakehään. Fossiilisten polttoaineiden käyttö energian tuotannossa ja liikenteessä tuottaa kaasumaisia typpi yhdisteitä, joiden reaktiot ilmakehässä saavat aikaan ilmakehän lämpenemistä, otsonikatoa ja maaperän happamoitumista.

Typen kierto

Typen kiertoa tapahtuu aktiivisesti ilmakehän, maaperän, vesistöjen, merten sekä kasvien ja muiden eliöiden välillä. Yksinkertaisimmillaan se tarkoittaa ilmakehän N_2 -kaasun sitoutumista maassa tai vedessä orgaanisiksi yhdisteiksi, joiden hajotessa ja muokkautuessa erilaisissa mikrobiologisissa prosesseissa viimeisenä reaktiotuotteena muodostuva typpikaasu palautuu ilmakehään (kuva 4.22).

Ilmakehässä kaasumaisia typpi yhdisteitä ovat N_2 :n lisäksi typen oksidit (dityppioksiidi eli typpioksiidi N_2O , typpioksiidi eli typpimonoksiidi NO ja typpidioksiidi NO_2) ja



Kuva 4.22 Yksinkertaistettu kuvaus globaalista typen kierrosta. (Læg Reid ym. 1999)

ammoniakki NH_3 . Typpikaasu N_2 on kemiallisesti hyvin pysyvä (inerti), muut kaasumaiset yhdisteet osallistuvat erilaisiin reaktioihin. Dityppioksidi (N_2O) on voimakas kasvihuonekaasu alailmakehässä ja osallistuu otsonia tuhoaviin kemiallisiin reaktioihin yläilmakehässä. Typpioksidi (NO) osallistuu alailmakehässä otsonia ja happamia yhdisteitä tuottaviin reaktioihin.

Kasvit eivät voi yleensä hyödyntää ilmakehän N_2 -kaasua, sillä sen kolmoissidoksen purkaminen vaatii erittäin paljon energiaa. Maaperässä vain ns. typensitojakasvit ja vesistöissä syanobakteerit pystyvät entsyymiensä avulla sitomaan N_2 -kaasua suoraan ilmakehästä tai vedestä (biologinen typensidonta) ja pelkistämään sen soluissaan ammonium-muotoon, jonka kasvi käyttää metaboliassaan. Biologisen sidonnan lisäksi molekulaarista typpeä muuttuu kasveille käyttökelpoisiksi yhdisteiksi myös salomoinnin yhteydessä. Tällöin korkeassa paineessa ja lämpötilassa muodostuu typen oksideja, jotka muuntuvat veden kanssa reagoituaan edelleen typen hapoiksi (HNO_2 ja HNO_3) ja tulevat sateen mukana maanpinnalle.

Ilmakehästä kasviin sidottu orgaaninen typpi vapautuu kasvimassan hajotessa (mineralisaatiossa) epäorgaaniseen muotoon ja palautuu erilaisten reaktiovaiheiden kautta lopulta takaisin ilmakehään dityppioksidina tai molekulaarisena typpenä (denitrifikaatio). Myös ammoniumtyppeä haihtuu ilmakehään, jos se muuttuu emäksisissä oloissa ammoniakiksi (NH_3). Tällaisessa kierrossa kasvillisuus voi saada typpeä maaperästä vuosikymmeniä ilman että maaperän typpivarasto ehtyy. Orgaanisten typpiyhdisteiden hajoamisnopeudet vaihtelevat hyvin paljon niin, että maahan muodostuu ennen pitkää suuri orgaanisen typen varasto. Sekä maaperän että pintavesien ekosysteemeissä valtaosa tyypestä kiertää systeemin sisällä ja vain pieni osa on kosketuksissa ilmakehän kanssa.

Typen esiintymismuodot ja reaktiot maaperässä

Valtaosa maan tyypestä on orgaanisessa muodossa, pintamaassa se muodostaa yleensä yli 90 % kokonaistypen varastosta. Orgaanisen typen reservi koostuu sekä erittäin vaikeasti hajoavista yhdisteistä (humus) että helposti hajoavista yhdisteistä (esim. urea, proteiinit ja muut eliöistä peräisin olevat typpiyhdisteet). Vain muutama prosentti maaperän tyypestä on epäorgaanisessa muodossa, ammoniumina ja nitraattina, jotka ovat suoraan käytettävissä biologiseen tuotantoon. Epäorgaanisen typen esiintymistä maassa säätelevät monet mikrobiologiset reaktiot: mineralisaatio, immobilisaatio, nitrifikaatio ja denitrifikaatio. Kuhkan reaktioon osallistuvien mikrobien lajisto vaihtelee ja niiden elinolosuhteet määräävät pitkälti reaktioiden suuntaa ja nopeutta. Tärkeitä ympäristötekijöitä ovat maan happi-

toisuus, kosteus, lämpötila ja pH. Lisäksi maassa on vähäisiä määriä kaasumaisia typpiyhdisteitä, jotka voivat olla maan ilmassa tai liuenneina maavedessä. Dityppioksidi (N_2O) liukenee herkästi veteen, ja sen liukenevuus kasvaa lämpötilan laskiessa.

Ammoniumionit (NH_4^+) voivat pidäytyä maahiukkasten kationinvaihtopinnoille tai kiinnittyä vaikeasti vaihtuvaan muotoon tiettyjen savimineraalien kerrosväleihin. Kasvit ja mikrobit voivat ottaa ammoniumioneja, mutta hapellisissa maassa ne hapettuvat helposti nitraatiksi (nitrifikaatio). Ammoniumia voi poistua maasta huuhtoutumalla veden mukana, mutta jos maan pH on korkea, se muuttuu ammoniakiksi ja haihtuu ilmakehään.

Kasvit ja mikrobit ottavat maasta helposti myös nitraattia (NO_3^-), joka on typen hapestustuotteiden pysyvin muoto. Vahvan hapon anionina se ei juuri sitoudu maa-ainekseen vaan liukenee maaveteen ja huuhtoutuu herkästi pinta- ja pohjavesiin. Jos maan happiolot heikenevät, nitraatti pelkistyy mikrobien toimesta N_2O :ksi tai N_2 :ksi, jotka poistuvat maaperästä ilmakehään.

Maahan tulee typpeä ilmakehästä sadeveden mukana ja kuivalaskeumana, biologisen typen sidonnan välityksellä ja lannoitteissa. Luonnostaan karuilla metsäalueilla runsas typpilaskeuma toimii lannoituksen tavoin, mikä lisää kasvuston rehevyyttä. Se voi myös muuttaa alueen lajistoa ja heikentää kasvien talvehtimistä. Peltoalueilla väkilannoitteiden ja lannan typpimäärä on yleensä moninkertainen laskeumaan verrattuna. Typpeä poistuu maasta kaasumaisina yhdisteinä ilmakehään ja huuhtoutumalla pinta- ja pohjavesiin sekä viljelykasvien sadon ja puun korjuun mukana.

Suomen kivennäismetsämaissa kokonaistypen määrä on keskimäärin 2 000–5 000 kg ha⁻¹. Peltojen typpimäärä on yleensä tätä suurempi intensiivisistä kasvintuotannosta johtuen, mutta pelloiksi otetut alueet ovat monesti jo luonnostaankin runsasravinteisempia. Suomessa tehdyssä kartoituksessa kivennäismaapeltojen kokonaistypen määrä vaihteli välillä 6 300–10 900 kg ha⁻¹ 0–60 cm:n syvyydessä maanpinnalta (Sippola 1981). Suurimmat typpivarat mitattiin aitosavimaissa ja hietasavissa. Keväällä ennen lannoitusta mineraalityypen määräksi on mitattu 7–150 kg ha⁻¹ 0–60 cm:n tai 0–100 cm:n profiilissa (esim. Sippola ja Ylärinta 1985, Leppänen ja Esala 1995). Näitä korkeampia mineraalityypen määriä on esiintynyt pelloilla, joilla käytetään karjanlantaa, viljellään nurmea tai erikoiskasveja, ja laidunalueilla. Happamalla sulfaattimailla on myös pohjamaassa todettu huomattavan suuria kokonais- ja mineraalityypen määriä (Paasonen-Kivekäs ja Yli-Halla 2005, Šimek ym. 2011), jotka selittyvät maaperän syntyhistorialla Itämeren Litorina-vaiheen aikaisista sedimenteistä (ks. kohta 4.2). Näiden maiden syvissä kerroksissa mineraalityppi on lähes täysin ammoniumina, kun taas muissa kivennäismaapelloissa nitraatti on yleensä vallitseva. Savimaissa voi tosin olla hetkellisesti suhteellisen runsaasti ammoniumtyppeä, koska sitä pidättyy kationinvaihtopaikoille. Turvemaihin voi olla varastoituneena hehtaarin alalla useita kymmeniä tuhansia kilogrammoja typpeä metrin paksuisessa kerroksessa.

Typen biologinen sidonta ilmakehästä

Maaperässä typensitojakasvien symbioottiset (juurinystyröissä elävät) tai kasvien kanssa löyhässä vuorovaikutussuhteessa olevat (puolisymbioottiset) tai maassa vapaana elävät bakteerit samoin kuin vesistöissä elävät syanobakteerit pystyvät entsyymiensä avulla sitomaan N_2 -kaasua suoraan ilmakehästä tai vedestä ja pelkistämään sen solujensa sisällä ammoniakiksi, jolloin se on biologisesti käyttökelpoista. Typensidonnan kokonaisreaktiossa kuhunkin typpiatomiin liittyy neljä vetyatomia seuraavan reaktioyhtälön mukaan:



Bakteerien suorittamana reaktiota kutsutaan *biologiseksi typensidonnaksi*. Siihen pystyviä bakteerilajeja on useassa kymmenessä bakteerisuvussa. Kasvien *symbioottisessa typensi-*

donnassa juurinystryöissä elävät bakteerit saavat isäntäkasvilta energiaa yhteyttämistuotteista ja kasvi saa bakteereilta tarvitsemansa typen. Tunnetuin symbioottinen typensidonta tapahtuu palkokasvien juurinystryöissä elävien *Rhizobium*-sukuisten bakteerien toimesta. Lepän, tyrnin sekä suomyrtn juurinystryöissä symbioosissa elävät *Frankia*-aktinomykeetit pystyvät sitomaan typpikaasua myös itsenäisesti. Muutamat syanobakteerit (sinibakteerit), joista käytetään puhekielessä usein nimitystä sinilevät, voivat elää symbioosissa monien sammalten kanssa ja muodostaa symbioosissa sienten kanssa jäkälää.

Osa tyypeä sitovista bakteereista on vihreiden kasvien tavoin omavaraisia eli autotrofeja. Ne eivät tarvitse muiden eliöiden tuottamia aineita energian tarpeensa tyydyttämiseen. Tällaisia vapaana eläviä typensitojia ovat mm. tietyt syanobakteerit. Reaktiota kutsutaan *vapaaksi typensidonnaksi*.

Tiettyjen heinien ja viljojen juurten pinnalla tai läheisyydessä elää bakteereja, jotka pystyvät sitomaan ilmakehän tyypeä, vaikka kasvien juurissa ei ole juurinystryötä. Kyseessä on *assosiatiivinen* eli *puolisymbioottinen typensidonta*. Juurisoluiista erittyä ravintoa maahan, mikä pitää yllä bakteeritoimintaa. Erityisen tehokkaita typensitojia ovat eräiden trooppisten heinäkavien bakteerisymbiootit. Lämpimillä seuduilla tavallisimpia heinien juurten typensitojia ovat *Azospirillum*-sukuiset bakteerit. Meillä heinien typensitojina on tavattu mm. *Klebsiella*-, *Enterobacter*- ja *Pseudomonas*-sukuihin kuuluvia bakteereja. Suomessa kasvavista heinistä erityisen tehokkaita typensitojia on timoteilla ja juolavehnällä.

Palkokasveihin kuuluvat apila ja sinimailanen kykenevät pohjoismaisissa olosuhteissa sitomaan muutamia satoja kilogrammoja tyypeä hehtaaria kohti vuodessa. Heinäkavien puolisymbioottinen typensidonta tuottaa suurimmillaan kymmeniä kilogrammoja hehtaarille vuodessa. Vapaassa typensidonnassa vuotuinen sidonta on muutamasta grammasta muutamaaan kymmeneen kilogrammaan hehtaarille. Symbioottinen typensidonta on keskeinen prosessi luonnonmukaisessa viljelyssä, jossa typensitojakasveja kasvattamalla lisätään tyypeä maaperään ns. viherlannoituksena.

Mineralisaatio, nitrifikaatio ja immobilisaatio

Typen *mineralisaatio* käsittää tyypeä sisältävien orgaanisten yhdisteiden hajoamisen epäorgaaniseksi tyyeksi, kun heterotrofiset (toisenvaraiset) mikrobit käyttävät niitä energialähteenään. Mineralisaatiossa orgaaniseen aineeseen sitoutunut tyyppi vapautuu ammoniakina NH_3 . Hajoamisreaktiota kutsutaan *ammonifikaatioksi*. Alle pH 7:ssä suuri osa vapautuneesta ammoniakista muuttuu ammoniumiksi, NH_4^+ . Hyvin emäksisessä ympäristössä ammoniakki esiintyy suurimmaksi osaksi NH_3 :na.

Ammonium (NH_4^+) hapettuu nitriitiksi (NO_2^-), joka edelleen hapettuu nitraatiksi (NO_3^-). Reaktiota nimitetään *nitrifikaatioksi*. Happitilan heiketessä reaktion sivutuotteena voi esiintyä N_2O :n muodostusta. Seuraavat yhtälöt kuvaavat reaktion eri vaiheita:



Nitrifikaatio on kemoautotrofisten bakteerien ylläpitämä prosessi, jossa bakteerit käyttävät hiililähteenään hiilidioksidia ja bikarbonaatti-ioneja. Nitrifikaatioon kykeneviä bakteereja on vain muutamia lajeja. Yleisimmät niistä ovat ammoniumtyypeä nitriitiksi hapettava *Nitrosomonas* ja nitriittiä nitraatiksi hapettava *Nitrobacter*.

Ammonifikaatiota voi tapahtua sekä aerobisissa että anaerobisissa olosuhteissa, lähes jäätyneessä maassa ja varsin happamissakin oloissa. Nitrifikaatio on mahdollista vain hapel-

lisissa oloissa. Nitrifikaatiobakteerit ovat herkempiä myös maan happamuudelle, lämpötilalle ja muille ympäristötekijöille, kuten raskasmetalleille ja torjunta-aineille. Lannoituksen yhteydessä voidaan tarkoituksellisesti käyttää nitrifikaatiota estäviä aineita huuhtoutumisen ja kaasumaisten päästöjen vähentämiseksi.

Yleensä maan kosteuden kasvu lakastumisrajan ja kenttäkapasiteetin välissä lisää ammonifikaatiota ja nitrifikaatiota, sillä maan mikrobit tarvitsevat vettä elintoimintoihinsa. Sen sijaan nitrifikaatio hidastuu voimakkaasti, kun veden täyttämä huokostilavuus nousee yli 60 %:n, koska tällöin hapen diffuusio maahan vähenee oleellisesti (kuva 4.23). Määrässä maassa ammonifikaatioon osallistuvien anaerobisten bakteerien suhteellisen huono energiatehokkuus hidastaa hajotusta ja siten typen mineralisoitumista.

Hyväkuntoisissa viljelymaissa ammoniumtyppi hapettuu herkästi nitriitiksi. Nitriitti puolestaan hapettuu nopeasti nitraatiksi eikä sitä yleensä kerry maahan, jos happea on vain saatavilla ja maan lämpötila sekä happamuus ovat otollisia reaktiolle. Ammoniumtyyppiä kertyy kylmään ja kosteaan maahan. Sitä esiintyy runsaasti myös happamien sulfaattimaiden pohjamaassa ja metsämaissa.

Immobilisaatiossa maan organismit käyttävät epäorgaanisia yhdisteitä solujensa rakennusaineiksi. Tällöin mineralisaatiossa vapautunut epäorgaaninen tyyppi (NH_4^+ ja NO_3^-) muuttuu takaisin orgaaniseen muotoon. Biologisesta immobilisaatiosta käytetään myös nimitystä *assimilaatio*. Osa mikrobibiomassaan sitoutuneesta tyypestä hajoaa mikrobien kuoltua uudelleen epäorgaaniseksi tyypeksi. Hyvin pieni osa tyyppi-yhdisteistä rakentuu monimutkaisten kemiallisten ja mikrobiologisten reaktiovaiheiden kautta humusyhdisteiksi, jotka ovat kestäviä hajotusta vastaan.

Nettomineralisaatio ilmaisee mikrobiston kyvyn vapauttaa kasveille käyttökelpoista tyyppiä. Sitä ei tapahdu, jos kaikki mineralisaatiossa vapautuva epäorgaaninen tyyppi sitoutuu mikrobeihin eli immobilisaatio on yhtä suurta tai suurempaa kuin kokonaismineralisaatio. Nettomineralisaatiota säätelee hajoavan orgaanisen aineksen hiili-typpisuhde. Jos aineksen hiili-typpisuhde on korkea eli siinä on vähän tyyppiä suhteessa hiilen määrään, vapautuva tyyppi sitoutuu mikrobeihin eli immobilisoituu. Jos taas materiaalin hiili-typpisuhde on alhainen, tyyppiä on yli hajottajien tarpeen, mineraalityyppiä kertyy maaperään eli tapahtuu nettomineralisaatiota. Sitä oletetaan tapahtuvan hiili-typpisuhteen ollessa alle 20.

Mineralisaatiossa on arvioitu vapautuvan vuosittain epäorgaanista tyyppiä 1–3 % orgaanisen tai kokonaistypen määrästä. Mineralisaation määräksi kasvukaudella Suomen olosuhteissa on ohrakasvustolla mitattu 30–50 kg hehtaaria kohti metrin syvyisessä maakerroksessa Sippola (1986). Se vastaa noin puolta keskimääräisen sadon ottamasta typpimäärästä. Ohran sadonkorjuusta seuraavan kevääseen mineralisaation on laskettu vapauttavan 0–30 kg tyyppiä hehtaarin alalla.

Denitrifikaatio

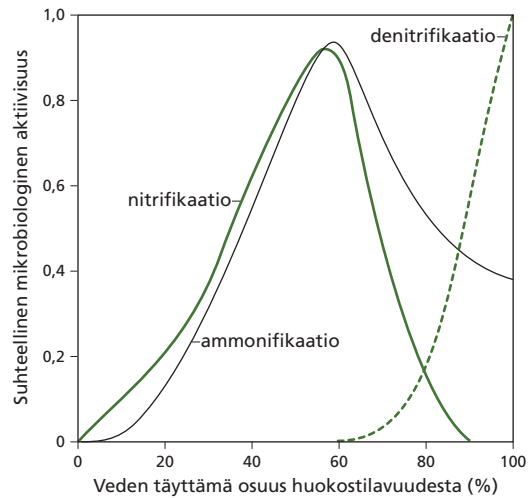
Maassa elää lukuisia bakteerilajeja, joilla on kyky muuttaa nitraattia kaasumaisiksi tyyppi-yhdisteiksi. Reaktiota kutsutaan *denitrifikaatioksi*. Denitrifikaatiobakteerit ovat fakultaatiivisesti anaerobeja eli pystyvät elämään sekä aerobisissa että anaerobisissa oloissa (ks. kohta 4.2 - Maan happitalous ja sen merkitys). Ne ovat useimmiten heterotrofeja (toisenvärisiä) organismeja, jotka hajottavat orgaanista ainesta. Hajotuksen tapahtuessa vähähappisissa oloissa nämä bakteerit voivat siirtyä käyttämään nitraatin happea soluhengityksessään, jolloin nitraatti pelkistyy asteittain typpikaasuksi.

Täydellisessä denitrifikaatiossa tyyppi pelkistyy valenssiluvulta +5 valenssiluvulle 0 seuraavasti:



Kuva 4.23

Ammonifikaation, nitrifikaation ja denitrifikaation riippuvuus maan kosteudesta. Käyrät kuvaavat riippuvuuksien yleistä luonnetta eivätkä ole sovellettavissa suoraan todellisiin maihin.



Luonnossa täydellistä denitrifikaatiota pelkäksi N_2 -kaasuksi ei useinkaan tapahdu, vaan syntyvien kaasujen välinen suhde voi vaihdella huomattavastikin. Yleensä mitä pelkistävämmät olosuhteet, korkeampi lämpötila ja pH ovat, sitä enemmän N_2 :ta muodostuu. Denitrifikaatiossa muodostuva kaasumainen tyyppi säilyy useimmiten liuenneena maavedessä, kunnes vesi purkautuu pintavesiesiintymään ja sen kaasut tasapainottuvat ilmakehän kanssa. Arvioiden mukaan yli puolet ilmakehän typenoksidipäästöistä on peräisin maaperän denitrifikaatio- ja nitrifikaatioprosesseista.

Yleisesti ei ole mitään tiettyä happipitoisuutta, jonka yläpuolella denitrifikaatiota ei enää tapahdu, sillä reaktion esiintyminen riippuu mm. maapartikkelien koosta, hapettomien tai vähähappisten mikroympäristöjen syntymisestä ja hapen diffuusionopeudesta. Hapen määrää säätelee puolestaan maan kosteus. Mitä kosteampaa maa on, sitä enemmän denitrifikaatiota yleensä tapahtuu (ks. kuva 4.23). Maaperän happitilanne voi heikentyä myös mikrobien oman toiminnan vaikutuksesta, kun maahan lisätään tyypipitoista orgaanista ainesta, esimerkiksi lantaa, ja se alkaa hajota.

Denitrifikaatio on suurimmillaan lämpimässä ja märässä maassa, jossa on runsaasti liukoista orgaanista hiiltä ja jonka pH on 6–8. Suurimman denitrifikaatiopotentiaalin oletetaan olevan peltojen muokkauskerroksessa. Myös hapellisen ja hapettoman kerroksen rajapinta, jossa nitraattia on runsaasti saatavilla, luo otolliset olosuhteet reaktiolle. Denitrifikaation on todettu olevan keskimäärin suurempaa savimaissa kuin sitä karkeammissa maissa ja lisääntyvän, kun hapen diffuusio maahan vähenee tiivistymisen seurauksena. Runsaasti dityppioksidia on todettu vapautuvan turvepelloilta. Viljelymaissa tyypillisesti puolet vuotuisista dityppioksidin päästöistä syntyy sadonkorjuun ja kylvön välisenä aikana.

Denitrifikaatiossa biologisesti ja teollisesti sidottua tyypikaasua palautuu takaisin ilmakehään. Syntyvän dityppioksidin (N_2O) ilmakehää lämmittävä vaikutus on lähes 300 kertaa suurempi kuin hiilidioksidin. Yläilmakehässä N_2O :n fotokemiallinen hajoaminen tuhoaa otsonikerrosta, joka suojaa maapalloa haitalliselta ultraviolettisäteilyltä. Tyypiksi (NO) osallistuu alailmakehässä otsonia ja happamia yhdisteitä tuottaviin reaktioihin. Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöistä maaperän dityppioksidipäästöjen osuuden on Suomessa arvioitu olevan noin 5 %. Kasvintuotannon kannalta denitrifikaatio ei ole suotavaa, sillä kasveille käyttökelpoisia nitraattityppeä poistuu maaperästä kaasuna ilmakehään. Toisaalta samalla poistuu myös huuhtoutumisaltista tyyppiä, mitä pinta- ja pohjavesien laadun kan-

nalta pidetään toivottavana. Denitrifikaatioreaktiota hyödynnetäänkin maa- ja metsätalouselualueiden vesiensuojelussa, kuten kosteikoissa ja säättösalaajituksessa.

On myös huomattava, että kaasumaisia typen oksideja syntyy myös nitrifikaation väli- tuotteena. 1990-luvun alussa löydettiin jätevedenpuhdistamoilta uusi mikrobiologinen prosessi, *anammox*, jossa tietyt bakteerit kykenevät hapettomassa vedessä hapettamaan ammonium-ioneja nitriitti-ionien avulla typpikaasuksi. Reaktiota esiintyy myös luonnon olosuhteissa.

Ammoniakin haihtuminen

Typen kaasumaisia päästöjä syntyy myös maassa olevan ammoniakin haihtuessa ilma- kehään. Ammoniakkia muodostuu ammoniumista korkeassa pH:ssa seuraavan reaktion mukaisesti:



Ammoniakkia haihtuu yleensä suhteellisen vähän maaperästä, koska sitä syntyy vain korkean pH:n omaavissa maissa. Runsasta haihtumista tapahtuu kuitenkin urean ja lannan levityksen jälkeen. Urean hydrolyysissä syntyvät bikarbonaatti-ionit aiheuttavat voimakkaan pH:n nousun, jolloin ammonium-ionit muuttuvat ammoniakiksi. Lämmin maa lisää ammoniakin haihtumista. Kaasumaiset päästöt lannan varastoinnin ja levityksen yhteydessä voivat muodostaa huomattavia tappioita kasveille käyttökelpoisen typen määrässä. Haihtumista ehkäistään multaamalla lanta maahan, sillä saves ja humus adsorboivat ammoniakkia. Emäksisissä oloissa, esimerkiksi kalkituksen yhteydessä, ammoniakkia voi haihtua myös ammoniumpitoisista väkilannoitteista tai tuoreesta kasviaineksesta (ruoho, apila), joka jää maahan kasvukauden jälkeen. Jonkin verran haihtumista voi tapahtua myös kasvavista kasveista, kun ne vanhenevat. Ilmaan joutunut ammoniakki palautuu maahan, kun se liukenee ilmassa olevan veden kanssa ja muuttuu ammoniumtypeksi.

Ammoniumin pidättyminen maahiukkasiin

Koska ammonium-ioni (NH_4^+) on positiivisesti varautunut, se pidättyy negatiivisesti varautuneeseen maahiukkaseen sähköisin voimin. Pidättyispintoina toimivat savimineraalit ja humus. Kyseessä on ns. *epäspesifinen pidättyminen* eli adsorptio vaihtuvaan muotoon kationinvaihdon seurauksena (ks. kohta 4.2 - Kationinvaihto).

Ammonium-ioneja voi pidättyä myös vaikeasti vaihtuvaan muotoon joidenkin savimineraalien kerrosväleihin (ks. kohta 4.2 - Kationien välinen kilpailu ja spesifinen sitoutuminen). Pidätymistä eli *fiksaatiota* tapahtuu erityisesti smektiittiin ja vermikuliittiin. Tähän muotoon pidättyneenkään ammonium ei ole täysin suojassa nitrifikaatiobakteereilta, mutta sen hapettuminen on varsin hidasta. Pidättynyttä ammoniumia vapautuu vähitellen kasvien käyttöön saman mekanismin kautta kuin kerrosväleihin sitoutunutta kaliumia.

Viljelykasvien typenotto ja typpitase

Kasvit ottavat pääasiassa maavedessä liuenneena olevaa epäorgaanista typpeä, ammonium- ja nitraatti-ioneja. Ne voivat käyttää hyväkseen myös pieniä määriä kaasumaista ammoniakkia ja kemialliselta rakenteeltaan yksinkertaisia liukoisia orgaanisia molekyyliä, esimerkiksi ureaa. Nitraattityppi on helposti juurten saatavilla, koska se liikkuu helposti veden mukana kasviin. Ammoniumtyppi on sitoutunut osittain maa-ainekseen ja on siten nitraattia huomattavasti hitaampi liikkuva. Kasvissa nitraatin on ensin pelkistytävä ammoniumiksi ennen kuin se voi osallistua fysiologisiin reaktioihin, kun taas ammonium on suoraan käyttökelpoista. Kasvi saattaa suosia joko ammoniumia tai nitraattia ensisijaisena typen lähteenään riippuen lähinnä muiden kationien ja anionien saatavuudesta.

Kasvilajien typenotto vaihtelee jonkin verran kasvukauden eri vaiheissa. Monivuotinen nurmi ja syysviljat alkavat käyttää niille levitettyä typpeä heti, mutta kevätiljojen typenotto tapahtuu pääasiassa orastumisen jälkeen. Typenotto on suurimmillaan vegetatiivisessa vaiheessa muutaman viikon ajan ja hidastuu selvästi kohti tuleentumista.

Kivennäismaiden luontaisten typpivarojen on arvioitu riittävän jatkuvassa viljelyssä noin vajaan tuhannen kilon viljasatoon hehtaarilta, joten lannoituksella voidaan satotaso nostaa moninkertaiseksi. Liiallinen typen saanti ei kuitenkaan ole hyväksi kasveille, sillä se heikentää solujen seinämiä ja lisää siten lakoontumisherkkyttä ja alttiutta sienitaudeille. Liika typpi viivästyttää myös viljojen tuleentumista ja huonontaa esim. vihannesten ja hedelmien laatua.

Väkilannoitteiden typpi on heti kasvien käytettävissä. Sitä vastoin lannan tai viherlannoituksen sisältämien orgaanisten typpiyhdisteiden on hajottava ensin mineraalimuotoon, jotta kasvit saisivat typen käyttöönsä. Hajotusnopeuteen vaikuttavat mm. lannan tai kasvimassan koostumus sekä maan mikrobien lajisto ja elinolosuhteet.

Kasvit ottavat väkilannoitetyypistä keskimäärin 40–70 % viljelyoloista riippuen. Käyttämättä jäänyt osuus pidättyy maa-ainekseen, sitoutuu mikrobeihin, haihtuu ilmakehään tai huuhtoutuu pinta- ja pohjavesiin. Orgaanisina lannoitusaineina annetun typen hyväksikäyttö kasvukauden aikana jää usein kivennäislannoitteita alhaisemmaksi. Kasvuston ottaman typen määrä kasvaa maan kosteuden ollessa suotuisa. Esalan (1991) tutkimuksessa kevätevehnällä kuivina kesinä lannoitetypen hyväksikäyttöaste oli vain 15–25 %, mutta suotuisissa kosteusoloissa 60–70 %. Lammilla tehdyissä kokeissa perunan typen otto lisääntyi myös maan omista typpivaroista, kun kastelulla turvattiin riittävä kosteus koko kasvukauden ajan (Kuisma 2002).

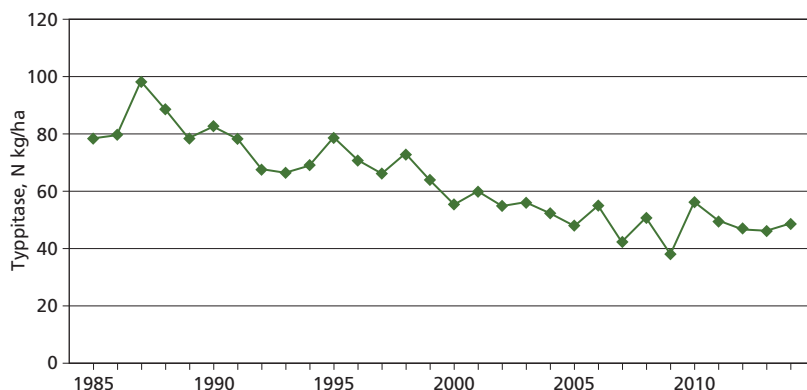
Peltoalueen typpitase kuvaa maahan päätyvien ja maasta poistuvien typpimäärien erotusta. Sen ylijäämä kertoo mahdollisista päästöistä ilmakehään ja vesivaroihin. Yksinkertaisimmillaan tase on väkilannoitteesta ja karjanlannassa annetun ja sadossa poistuvan typpimäärän erotus. Kuvassa 4.24 on esitetty peltojen keskimääräinen typpitase Suomessa vuodesta 1985 vuoteen 2014. Taseen ylijäämä on pienentynyt tarkastelujaksolla lähes 90 kg:sta alle 50 kg:aan hehtaaria kohti.

Monimutkaisemmissa taselaskelmissa otetaan huomioon myös muita typen kierron komponentteja. Niiden määrän arviointi yksittäisillä viljelylohkoilla on kuitenkin hankalaa, koska typen käyttäytymiseen vaikuttavat monet maaperä-, säätila- ja viljelytekijät. Taulukossa 4.3 on esitetty Suomen peltojen keskimääräiset taseen komponentit, jotka on arvioitu tilastotietojen ja eri tutkimusten mukaan.

Taulukko 4.3

Keskimääräiset typpitaseen komponentit suomalaisissa maatalousmaissa vuosina 1990–2005 (Salo ym. 2007).

Taseen komponentti	Määrä, kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Typen lähteet	
+ Lannoitteet (väkilannoitteet ja orgaaninen)	75–115
+ Karjan lanta	42–55
+ Biologinen typen sidonta	3–7
+ Laskeuma	4–6
+ Muut lähteet (siemenet ym.)	2–4
Typen häviöt	
- Korjattu sato	65–80
Typen bruttotase	60–105
- Ammoniakin haihtuminen	
lannoitteista	< 1
karjan lannasta	12–16
Typen nettotase	46–87



Kuva 4.24 Suomen peltomaiden typpitaseen kehittyminen vuosina 1985–2014. (OECD Agri-environmental indicators: Nutrient balances). Laskelman on päivittänyt Tapio Salo.

Typen kulkeutuminen pinta- ja pohjavesiin

Maaperässä olevaa typpeä kulkeutuu veden mukana pinta- ja pohjavesiin aina, kun valunta muodostuu. Valumavesissä typpi on liuenneina orgaanisina ja epäorgaanisina yhdisteinä sekä maapartikkeleihin kiinnittyneenä maa-vesisuspensionä tai kolloidisessa muodossa. Typpikuormituksen määrään vaikuttavat ennen kaikkea valunnan määrä, veden kulkeutumisreitti valuma-alueelta vesistöön, maaperän ominaisuudet, typen reaktiot maaperässä, maan pinnalla oleva kasvillisuus ja maankäyttö. Nämä tekijät vaihtelevat alueelta toiselle ja samallakin alueella eri ajankohtina sekä luonnostaan että ihmisen toiminnan vaikutuksesta, joten kuormituksen määrässä ja koostumuksessa on myös suuria eroja. Maan mobiileista typpivaroista riippuen typen kulkeutuminen valuma-alueelta saattaa olla niin suurta, että pinta- ja pohjavesien laatu heikkenee oleellisesti niiden luontaiseen tilaan verrattuna.

Varsinkin nitraatti- ja ammoniumtypen pitoisuuksien kasvu pinta- ja pohjavesissä ilmentää ihmisen toiminnasta johtuvaa piste- tai hajakuormitusta. Suuret ammoniumtypen pitoisuudet voivat viitata välittömään jätevesikuormitukseen tai lannan huuhtoutumiseen peltoalueilta. Vesivarojen kannalta suurin mielenkiinto luonnossa on kuitenkin kohdistunut nitraattityyppeen, koska se ei juurikaan pidäty maahan vaan huuhtoutuu herkästi veden mukana. Ammoniumtypen huuhtoutumista vähentää sen pidäytyminen maa-ainekseen ja hapettuminen nitraatiksi.

Korkeat nitraattipitoisuudet haittaavat veden käyttöä talousvedeksi. Vesilaitosten jakamassa vedessä nitraattia saa olla korkeintaan 50 mg l^{-1} ($11,3 \text{ mg N l}^{-1}$). Ruoansulamiselmistössä nitraatti pelkistyy nitriitiksi, josta edelleen muodostuu mahdollisesti syöpää aiheuttavia yhdisteitä. Nitriitti saattaa myös aiheuttaa veren punasolujen happiaineenvaihduntaa muuttavan sairauden, *methemoglobinemia*, imeväisikäisille lapsille. Suomessa em. raja-arvon ylittäviä nitraattipitoisuuksia on todettu yksittäisistä maatalousalueilla olevista kaivoista. Korkeat nitraattityypen pitoisuudet pohjavesissä ovat yleinen ongelma monissa Keski-Euroopan maissa, joissa on intensiivistä karjataloutta ja käytetään paljon väkilotteita. Nitraattia voi kulkeutua pohjavesiin myös muista lähteistä, kuten kaatopaikoilta ja turkistarhoilta. Juomaveden ja ravinnon korkeiden nitraattipitoisuuksien haitalliset vaikutukset terveyteen ovat osittain kiistanalaisia (esim. Stevenson ja Cole 1999). Pohja- ja pintavesien suojelua liialliselta typpikuormitukselta pidetään kuitenkin tärkeänä mahdollisten terveysriskien välttämiseksi.

Typpikuormitus pintavesiin aiheuttaa niiden rehevöitymisriskin samoin kuin liiallinen fosforikuormitus (ks. kohta 4.5 – Fosforikuormitus ja fosforin kulkeutuminen pintavesiin). Tärkeä rehevöitymistä säätelevä tekijä on fosforin ja typen suhde, joka vaikuttaa levätuotannon määrän ohella myös levälajiston koostumukseen. Suomen sisävesistöissä perustuotannon minimitekijä on useimmiten fosfori, jonka kuormituksen vähentäminen on siten ensiarvoisen tärkeää. Typen merkitys ei ole yhtä selväpiirteinen, vaan se vaihtelee vesistökohtaisesti ja jopa tuotantokauden eri vaiheissa. Typpikuormituksen pieneminen vähentää tiettyjä levälajeja, mutta saattaa aiheuttaa syanobakteerien (ns. sinilevien) lisääntymistä varsinkin rehevöityneillä vesialueilla. Ne pystyvät ottamaan tarvitsemansa typen suoraan ilmakehästä, jossa sitä on aina riittävästi. Osa näistä bakteereista on myrkyllisiä, mikä haittaa vesilaitosten toimintaa, vesien virkistyskäyttöä sekä muiden vesieläiden elinmahdollisuuksia.

Suomen pintavesiin kulkeutuvaksi typpikuormaksi vuonna 2014 on arvioitu noin 106 000 tonnia vuodessa. Noin 40 % tästä määrästä on peräisin luonnonhuuhtoumasta, jota muodostuu aina ihmisen toiminnasta riippumatta. Ilmakehästä tulee laskeumana suoraan sisävesistöihin noin 12 % typen kokonaiskuormasta. Hajakuormituksen osuudeksi on arvioitu noin 35 %. Siitä maatalouden osuus on 83 % ja metsätalouden 9 %. Yksittäisillä valuma-alueilla eri kuormittajien osuudet vesistöön päätyvästä kuormituksesta vaihtelevat hyvinkin paljon. Esimerkiksi metsätaloudella on todettu olevan selvä vaikutus Itä- ja Pohjois-Suomen vesistöjen latvavaluma-alueilla, joilla maatalouden ja rakennettujen alueiden osuus on vähäinen. Pohjois-Pohjanmaalla ja Keski-Suomessa puolestaan turvetuotanto voi paikoitellen olla merkittävä kuormittaja. Suuria päästöjä saattaa tulla myös jätevedenpuhdistamoilta, turkistarhoilta ja muista pistemäisistä kuormituslähteistä.

Typen huuhtoutuminen metsä- ja suoalueilta

Luonnontilaisissa metsissä typen kierto on lähes suljettua, sillä metsämaassa kasveille käyttökelpoista typpeä on yleensä niukasti tarjolla. Kasvusto ja muut eliöt sitovat tehokkaasti mineralisaatiossa vapautuvaa epäorgaanista typpeä ja liukoista orgaanista typpeä, jolloin maaveden typpipitoisuudet ja siten huuhtoumat jäävät pieniksi. Täysin luonnontilaisia alueita ei tosin enää ole, sillä ilmakehästä tulevan laskeuman kautta ihmisen toiminta vaikuttaa kaikkialla.

Metsäalueilta pintavesiin huuhtoutuvasta tyyppistä valtaosa on liuenneessa orgaanisessa muodossa. Se muodostaa yleensä 80–90 % liukoisen typen kuormasta havupuuvaltaisella valuma-alueella. Liukoinen orgaaninen typpi koostuu pääosin biologisesti melko passiivisista humusaineista, mutta sisältää jonkin verran myös pienimolekyylisiä typpiyhdisteitä kuten aminohappoja, jotka hajoavat helposti ja ovat siten levien käytettävissä. Havupuumetsien valumavesissä epäorgaaninen typpi on pääosin ammonium-muodossa, mutta rehevistä lehtimetsistä huuhtoutuu myös nitraattityppeä. Turvemailta huuhtoutuu pääosin liukoista orgaanista typpeä.

Suomessa mahdollisimman luonnontilaisilta metsäalueilta tulevaksi typpihuutoumaksi on arvioitu keskimäärin $1,3 \text{ kg ha}^{-1}$ vuodessa ja huuhtouman vaihteluväli on mittauksissa ollut $0,3\text{--}2,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (Mattsson ym. 2003, Kortelainen ym. 2006). Metsäojituksen, pätehakkuun ja maan muokkauksen on raportoitu aiheuttavan noin $0,5\text{--}3,5 \text{ kg ha}^{-1}$ lisäyksen vuotuiseseen typpikuormitukseen siten, että kuormituksen lisäys on suurimmillaan heti toimenpidettä seuraavien vuosien aikana. Lisääntyneen kuormituksen on arvioitu palautuvan toimenpidettä edeltävälle tasolle keskimäärin kymmenen vuoden jälkeen (Kenttämies ja Haapanen 2006, Finér ym. 2008). Kuormituksen lisäys johtuu joko valunnan tai valumavesien pitoisuuksien kasvusta tai molemmista. Ne puolestaan ovat seurausta maasta ravinteita ottavan puuston poistamisesta, pintakasvillisuuden häiriintymisestä, ravinteiden

den vapautumisesta hakkuutähteistä ja maaperästä sekä maan kaivamisesta uudisojituksen yhteydessä. Metsien typpilannoituksen kuormittava vaikutus rajoittuu muutamaa lannoituksen jälkeiseen vuoteen. Huuhtouman suuruudeksi on arvioitu noin 10 % käytetystä lannoitemäärästä (Kenttämies ja Haapanen 2006).

Nykyisin suurin osa metsätalouden typpikuormituksesta aiheutuu metsänuudistamisesta, joka käsittää päätehakkuun ja sen yhteydessä tehtävän maanmuokkauksen. Kangasmaiden metsänuudistamisen on arvioitu lisäävän vesistöjen typpikuormitusta kymmenen vuoden aikana yhteensä 5 kg ha⁻¹ (Finér ym. 2008, Laurén ym. 2008). Turvemailla kuormituksen kasvu on selvästi suurempaa, noin 18 kg ha⁻¹. Hakkuun ja maan muokkauksen vaikutus on näkynyt myös pohjaveden kohonneina nitraattipitoisuuksina (Mannerkoski ym. 2005). Metsien ensi(uudis-)ojituksia ei nykyään tehdä, mutta aikoinaan tehdyistä ensiojituksista aiheutunut typen kuormituslisäys on ollut samaa suuruusluokkaa kuin turvemaiden metsänuudistamisesta aiheutuva kuormitus. Kunnostusojitus ei tutkimusten mukaan juurikaan lisää liukoisen kokonaistypen kuormitusta kunnostusojitusta edeltävään tilanteeseen nähden, mutta eroosioainekseen sitoutunutta typpeä voi kulkeutua vesistöön aiempaa enemmän (Finér ym. 2008).

Metsätaloustoimenpiteiden jälkeen nitraatti- ja ammoniumtypen huuhtoutuminen yleensä kasvaa, mutta liukoisen orgaanisen typen huuhtouman on todettu pienentyneen. Hakkuut ja maanmuokkaus lisäävät orgaanisen aineksen mineralisaatiota, joka vapauttaa ammoniumtyppeä ja sen hapettuminen edelleen nitraattityppeä maaperään. Kun samalla kasvuston typenotto pienenee puuston poistamisen ja pintakasvillisuuden lajiston vaihtumisen myötä, kasvavat myös valumavesien pitoisuudet. Heti toimenpiteiden jälkeisinä vuosina partikkelimaisen typen osuus saattaa myös olla merkittävä.

Turvetuotanto lisää typpikuormitusta varsinkin suon peruskuivatusvaiheessa, mutta myös tuotannon aikana (ks. Luku 11). Turvetuotantoalueiden keskimääräiseksi typpi-huuhtoumaksi on arvioitu 10 kg ha⁻¹ vuodessa (Alahuhta 2008). Erityisesti ammoniumin huuhtouma lisääntyy ja liukoisen orgaanisen typen huuhtouma vähenee luonnontilaiseen suohon verrattuna.

Metsätaloustoimenpiteiden aiheuttamaa kiintoaine- ja ravinnekuormitusta pyritään vähentämään erilaisilla vesiensuojelutoimenpiteillä, kuten hakkuualueiden suojavyöhykkeillä, kevennetyllä maanmuokkauksella, laskeutusaltailla ja kosteikoilla. Samoin turvetuotantoalueille on kehitetty vastaavantyyppisiä menetelmiä. Metsäojituksessa käytettäviä vesiensuojelumenetelmiä on esitetty luvussa 10 ja turvetuotannon vesiensuojelumenetelmiä luvussa 11.

Typpikuormitus peltoalueilta pinta- ja pohjavesiin

Maatalousalueilta pintavesiin kulkeutuvan typen määrä hehtaaria kohti on yleensä selvästi suurempi kuin metsätalousmailta tuleva kuormitus, mikä johtuu ennen kaikkea väkilannoitteiden käytöstä, karjanlannan levityksestä, karjan laiduntamisesta, maan muokkauksesta ja talviaikaisesta kasvipeitteettömyydestä. Myös maan voimaperäinen kuivatus lisää typen huuhtoutumista. Kaikki nämä toimenpiteet kasvattavat huuhtoutumisaltiin typen määrää maaperässä, minkä seurauksena valumavesien typpipitoisuudet nousevat ajoittain moninkertaisiksi luonnontilaisiin ja metsätalousmailhin verrattuna.

Yleensä suurin osa vuotuisista ravinnehuuhtoumista Suomessa syntyy lumen sulannan ja syyssateiden aiheuttamien ylivalumiin yhteydessä. Tällöin peltoalueet ovat kasvipeitteettömiä tai kasvit ovat lepotilassa eivätkä ota vettä ja ravinteita maasta. Paljas maanpinta on herkkä eroosiolle, jota lisää maan muokkaus. Eroosioaineksen mukana huuhtoutuu varsinkin fosforia, mutta myös typpeä. Syksyllä pellolle jää sadonkorjuun jälkeen kasvinjätteitä ja korjaamatonta satoa, jotka hajoavat suhteellisen nopeasti ja vapauttavat epäorgaanista liukoista typpeä maahan. Syysmuokkaus vielä edistää mineralisaatiota.

Typen huuhtoutumiseen peltoalueilta syksyllä ja keväällä vaikuttavat myös edeltävän kasvukauden sääolot. Mikäli kasvusto ei kehity kunnolla alkukesän märkyyden tai kuivuuden takia, se ei pysty myöhemmin sitomaa maassa olevaa mineraalityppeä. Poikkeuksellisen kuivan kesän jälkeen huuhtoutumisaltista typpeä voi olla runsaasti maassa. Sääolot vaikuttavat myös savimaiden kuivumiskutistumiseen ja halkeiluun, joka voi synnyttää maahan melko pysyviä oikovirtausreittejä ja vaikuttaa näin typen kulkeutumiseen.

Kasvukaudellakin typpeä huuhtoutuu merkittävästi, jos runsaita sateita tulee heti lannoituksen jälkeen. Tällöin suhteellisen vähäisenkin valunta aiheuttaa kuormitusta suurista pitoisuuksista johtuen. Esimerkiksi eteläsuomalaisella savipellolla havaittiin, että lannoituksen jälkeen nitraattitypen pitoisuudet salaojavesissä nousivat nopeasti 5–10 mg:sta l⁻¹ yli 70 mg:aan l⁻¹. Keski- ja loppukesällä runsaatkaan valunnat eivät välttämättä aiheuta suuria typpihuuhtoumia, jos kasvusto on ehtinyt käyttää ravinteet ja suojaa maata eroosiolta. Kesäaikaisen kuormituksen määrä riippuukin pitkälti siitä, miten valuntaa aiheuttavat sateet ajoittuvat.

Suomessa maatalouden aiheuttama keskimääräinen typpihuuhtouma (ominaiskuormitusarvo) pintavesiin on arvioiden mukaan 15 kg ha⁻¹ vuodessa, vaihteluvälin ollessa 12–20 kg ha⁻¹. Luvut perustuvat Suomen ympäristökeskuksen pienten maatalousvaltaisten valuma-alueiden pitkäaikaisiin havaintoihin Etelä- ja Lounais-Suomessa (Vuorenmaa ym. 2002). Maatalouden kuormituslukuun sisältyy sekä karjatalouden että peltoviljelyn aiheuttama kuormitus, sillä niitä on valuma-alueen mittausaineistoista lähes mahdotonta erottaa toisistaan. Yksittäisiltä peltoalueilta tuleva kuormitus vaihtelee edellä esitettyä laajemmissa rajoissa maalajista, maan rakenteesta, ojituksesta, lannoituksesta (määrä, tyyppi ja ajankohta), muokkausmenetelmästä, viljelykasvista ja sääoloista riippuen. Esimerkiksi pieniin valuma-alueisiin kuuluvalla Hovin peltoalueella vuotuinen typpikuormitus on vaihdellut välillä 5–30 kg ha⁻¹ (Vuorenmaa ym. 2002).

Maatalousvaltaisilta happamilta sulfaattimailta on mitattu korkeampia typpihuuhtoumia kuin muilta kivennäismaata olevilta peltoalueilta (Vuorenmaa ym. 2002). Samoin turvellidoilta kulkeutuu yleensä enemmän typpeä kuin kivennäismailta. Happamien sulfaattimaiden ja turvemaiden pohjamaassa on runsaasti orgaanista typpeä, josta vapautuu vesiliukoista typpeä mikrobien hajottaessa orgaanista ainesta. Näiden maiden ojitus parantaa maan happiloutta ja nostaa maan lämpötilaa nopeuttaen mineralisaatiota.

Typen huuhtoutumisen on todettu olevan suurempaa karkearakeisissa maissa kuin hienorakeisissa maissa. Savimaissa suuret huokokset ja salaojakaivantojen täyttömaan hyvä vedenjohtavuus saattavat kuitenkin aiheuttaa runsasta typen kulkeutumista lannoituksen ja maan muokkauksen jälkeen ns. oikovirtausten mukana (ks. kohta 4.3 - Makrohuokosten vaikutus). Tällöin typpeä kulkeutuu nopeasti muokkauskerroksesta salaojiin. Toisaalta oikovirtaukset voivat vähentää typen kulkeutumista muina ajankohtina, kun nopeasti virtaava vesi ei sekoitu pienemmissä huokosissa olevan mahdollisesti typpipitoisemman veden kanssa.

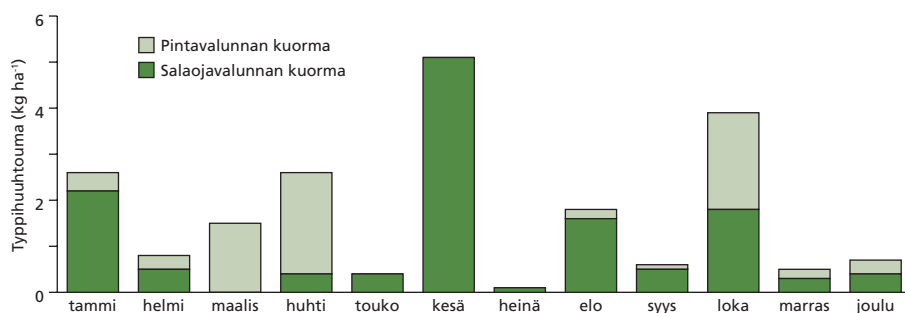
Peltoalueilta tulevan typpikuormituksen koostumus vaihtelee maaperän ominaisuuksien, ojitustavan, viljelykasvin, lannoitusaineen ja muokkauksen mukaan. Hyväkuntoisilla kivennäismailloilla nitraattityppi muodostaa keskimäärin 60–80 % vuotuisesta kokonaistypen kuormituksesta. Ammoniumtyppeä näiltä mailta huuhtoutuu vähän kivennäislannoitteita käytettäessä, mutta lietelannan levityksen jälkeen valumavesissä on todettu korkeita pitoisuuksia. Happamien sulfaattimaiden ja turvemaiden valumavesissä on luonnostaan runsaammin ammoniumtyppeä. Typpeä huuhtoutuu jonkin verran myös eroosioaineksen mukana, mutta yhtä selkeää riippuvuutta kuin fosfori- ja kiintoainepitoisuuksien välillä ei ole havaittavissa. Liukoisen orgaanisen typen osuutta peltoalueiden valumavesissä ja sen biologista käyttökelpoisuutta ei ole juurikaan tutkittu Suomessa.

Viljelykasveista pienin typpihuuhtouma on yleensä monivuotisella nurmella. Kevätviljapelloilta tulevat huuhtoumat ovat pienempiä kuin riviviljelmiltä, kuten peruna- ja soke-rijuurikasmailta tai avomaan vihannesviljelysiltä. Pitkän kasvukauden omaavat kasvit sitovat ravinteita myös myöhään syksyllä ja aikaisin keväällä, jolloin huuhtoutumisaltista tyyppä jää maahan vain vähän. Nurmen kyntö lisää kuitenkin typpihuuhtouman moninkertaiseksi kasvinjäänteiden hajotessa. Myös laidunalueilla typen kuormitusriski on suuri samoin kuin fosforin kohdalla.

Sadonkorjuun jälkeen kasvin jäänteistä vapautuvan typen määrä vaihtelee niiden koostumuksen mukaan. Vähän tyyppä sisältävien olkien hajotessa tapahtuu immobilisaatiota eli tyyppä sitoutuu mikro-organismeihin, kun taas esim. sokerijuurikkaan naattien ja perunan varsien hajotessa tapahtuu nettomineralisaatiota eli epäorgaanista tyyppä vapautuu maahan. Myös peltoon jäävä korjaamaton sadon osa lisää jonkin verran huuhtoutumisalttiin typen määrää.

Lannoitemäärä vaikuttaa typen huuhtoutumiseen melko suoraviivaisesti silloin, kun se ylittää kasvintarpeen. Ruotsissa aitosavimaalla tehdyissä tutkimuksissa typen huuhtoumat kasvoivat selvästi syysvehnällä, kauralla ja ohralla, kun lannoitetta käytettiin yli 100 kg ha^{-1} vuodessa (Bergström ja Brink 1986). Karjanlantaa tai viherlannoitetta käytettäessä huuhtoumat voivat olla suurempia kuin väkilannoituksen yhteydessä riippuen mm. lannan levitysjankohdasta sekä lannan koostumuksesta ja orgaanisen aineksen mineralisaationopeudesta.

Peltoalueilta tulevan typpikuormituksen määrään ja koostumukseen vaikuttaa paljon myös se, purkautuuko vesi vesistöön pinta(kerros)-, salaoja- vai pohjavesivaluntana. Veden virtausreitit riippuvat ennen kaikkea maalajista, maan rakenteesta, maanpinnan topografiasta, sääolosuhteista sekä ojituksesta (ks. Luku 3 - Valunta). Jonkin verran vaikuttaa myös muokkausmenetelmä ja viljelykasvi. Talvella ja keväällä voimakkaasti jäätyneessä maassa valtaosa kuormituksesta voi tulla pintavalunnan mukana, kesällä puolestaan lähes yksinomaan salaojien kautta ja syksyllä molempia reittejä pitkin. Pohjavesivalunnan nitraattityypen pitoisuudet pienenevät oleellisesti, jos vesi virtaa vähähappisessa maassa ja denitrifikaatiota esiintyy. Virtauksen aikana ammoniumtyyppä voi pidäytyä pohjamaahan. Kuvassa



Kuva 4.25 Eteläsuomalaiselta savipelloilta pinta- ja salaojavalunnassa tullut kokonaistypen kuorma kuukausittain vuonna 1998. Vuotuinen sadanta oli 800 mm , salaojavalunta 152 mm ja pintavalunta 171 mm . Typen kokonaiskuorma oli $20,6 \text{ kg ha}^{-1}$, josta salaojien kautta tuli $13,3 \text{ kg ha}^{-1}$ ja pintavalunnan mukana $7,3 \text{ kg ha}^{-1}$. Viljelykasvina oli kevätvehnä ja typpilannoitetta käytettiin 117 kg ha^{-1} . Pellon salaojitus on tehty vuonna 1951.

4.25 on esitetty Kirkkonummella sijaitsevalta savipelloilta tulleita kuormitusmääriä pinta-ja salaojavalunnan mukana keskimääräistä sateisempana vuonna.

Sekä Suomessa että ulkomailla tehdyissä tutkimuksissa salaojituksen on todettu lisänneen typen huuhtoutumista avo-ojitukseen verrattuna varsinkin ojitusta seuraavina vuosina. Eteläsuomalaisella savipellolla Vihdissä (Hovin valuma-alue) kokonaistypen vuosikuormat kasvoivat 52–410 % seuraavien kahdeksan vuoden aikana salaojittamisen jälkeen (Seuna ja Kauppi 1981). Nitraattitypen osalta vastaava lisäys oli 106–840 %. Lounais-Suomessa Jokioisissa sijaitsevalla Kotkanojan koekentällä (savimaa) pintavalunnassa huuhtoutui vuosittain kokonaistyyppiä 0,8–10,7 kg ha⁻¹, josta nitraattityppiä oli 0,4–8,1 kg ha⁻¹ (Turtola ja Paajanen 1995). Salaojavalunnassa vastaavat määrät olivat 0,5–15,9 kg ha⁻¹ ja 0,2–14,2 kg ha⁻¹. Koekentän uusintaojituksen jälkeen typen kokonaishuuhtouma kasvoi noin 70 % ja se tuli lähes kokonaan salaojien kautta. Ennen ojituksen uusimista valtaosa huuhtoumasta tuli pintavalunnan mukana. Typpihuuhtoumien lisääntymistä on todettu myös täydennysojituksen jälkeen. Jokioisten Nummelan koekentällä kasvu johtui ennen kaikkea lisääntyneestä salaojavalunnasta, mutta myös valumavesien typpipitoisuudet kasvoivat jonkin verran (Äijö ym. 2014).

Valunnan muodostumisen lisäksi pellon vesitaloudella on suuri merkitys typen kulkeutumiseen myös välillisesti. Maan kosteus vaikuttaa kasvien ravinteiden ottoon ja lannoitteiden hyväksikäyttöön ja mineraalityypen määrään maassa syysvalunnan alkaessa. Se säätelee erityisesti huuhtoutumisalttiin nitraattitypen muodostumista, sillä nitrifikaatiota tapahtuu vain hapellisessa ympäristössä. Toisaalta jos maa on märkää ja huokosissa on vähän vapaata happea, nitraattityppiä poistuu maasta typpikaasuina ilmakehään denitrifikaation seurauksena.

Lannoituksen säätäminen kasvien tarvetta vastaavaksi ja lannoitteen hyväksikäyttöasteen parantaminen ovat keskeisiä toimia peltoviljelyn typpihuuhtoumien vähentämisessä. Kasvien typenoton on todettu olevan selvästi sidoksissa kasvukauden sadantaan ja kasteeluun. Tämän vuoksi vaihteittain annettu typpilannoitus säätilan ja kasvin tarpeiden mukaan oletettavasti vähentää typen huuhtoutumista kerralla annettuun lannoitemäärään verrattuna. Kastelulla voidaan parantaa kasvien typen ottoa, mutta Suomessa se on nykyisin taloudellisesti kannattavaa lähinnä erikoiskasvien viljelyssä. Karjatiloilta pieni peltopinta-ala suhteessa lannan määrään aiheuttaa suuren kuormitusriskin, jos kaikki lanta käytetään tilalla.

Peltoalueilta purkautuvien valumavesien typpipitoisuuksia ja siten typpikuormitusta voidaan pienentää myös lisäämällä ympärivuotista kasvipeitteisyyttä ja vähentämällä maan muokkausta tai siirtämällä muokkaus syksystä kevääseen. Kerääjäkasvien käyttö joko kasvukaudella viljelykasvin aluskasvina tai kasvukauden jälkeen estää syksyn huuhtoumia, mutta niiden hajotessa keväällä vapautuu kuormitusta muodostavia ravinteita ellei seuraava viljelykasvi pysty hyödyntämään niitä riittävän nopeasti. Suojavyöhykkeellä voidaan mahdollisesti vähentää pintavalunnan mukana tulevaa typpikuormitusta, mutta siitä voi myös vapautua ravinteita valumavesiin riippuen vyöhykkeen kasvillisuustyyppistä ja hoidosta. Se ei kuitenkaan vaikuta salaojien kautta tulevaan kuormitukseen, joka tutkimusten mukaan voi muodostaa merkittävän osan peltoalueelta tulevasta kokonaiskuormituksesta.

Salaojituksen vaikutus typen ja fosforin huuhtoutumiseen on erilainen. Tehokas kuivatus vähentää pintavaluntaa, eroosiota ja siten partikkelimaisen fosforin kulkeutumista, mutta lisää typen huuhtoutumista. Säättösalaojituksella aikaansaatujen valuntareittien muutosten ja valunnan vähenemisen on havaittu vähentävän typpikuormitusta (ks. Luku 8). Pienemmän kuivatustehokkuuden käyttö salaojien mitoituksessa pienentää myös typpihuuhtoumia, mutta tällöin riskinä on pintavalunnan ja fosforikuormituksen kasvu. Teoreettisia laskelmia säättösalaojituksen, ojavälin ja lannoitemäärän vaikutuksesta ravinnehuuhtoumiin ja satotasoon on esitetty luvussa 13.

4.7 Kasvinsuojeluaineet

Katri Siimes, Ilona Bärlund,
Pirkko Laitinen ja Timo Seppälä

Kasvinsuojeluaineiden käyttö

Viljelykasvin sadon määrän ja laadun parantamiseksi intensiivisessä kasvinviljelyssä käytetään kasvinsuojeluaineita eli pestisidejä. Rikkakasvien torjunnassa käytettäviä kemikaaleja kutsutaan herbisideiksi. Tuhohyönteisiä torjutaan insektisideillä, punkkeja akarsideillä ja etanoita molluskisideillä. Kasvitautilien torjuntaan käytetään fungisideja sekä bakterisidejä ja virisidejä. Myös kasvunsäätteet, kuten viljan lakointumista estävät korrenvahvistajat, luetaan kasvinsuojeluaineisiin. Käytetyt aineet sekä käyttömäärät ja -tavat riippuvat paitsi torjuntatarpeesta myös tarjolla olevasta ainevalikoimasta, johon vaikutetaan lainsäädännöllä.

Kasvinsuojeluaineet ovat heterogeeninen ryhmä kemikaaleja. Eri ryhmiin kuuluvien aineiden vaikutusmekanismit eliöissä ja käyttäytyminen ympäristössä poikkeavat toisistaan. Kasvinsuojeluainevalmisteet sisältävät varsinaisten tehoaineiden lisäksi myös muita aineita, jotka vaikuttavat esimerkiksi valmisteiden vesiliukoisuuteen tai happamuuteen. Lisäaineita käytetään helpottamaan valmisteiden levitystä tai eliöön pääsyä, lisäämään valmisteen säilyvyyttä tai parantamaan tehoaineen vaikutusta.

Rikkakasvien, tuholaisten ja kasvitautilien esiintymiseen ja torjuntatarpeeseen vaikuttavat muun muassa ilmasto, maaperä ja viljelykasvi. Viimeisen sadan vuoden aikana viljelykasvien sadot peltotala kohden ovat moninkertaistuneet. Sinä aikana viljelymenetelmät ovat muuttuneet, uusia lajikkeita on otettu käyttöön sekä lannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden käyttö on yleistynyt. Näkemykset siitä, kuinka suuri merkitys kasvinsuojeluaineiden käytöllä on ollut satotason kasvuun, vaihtelevat suuresti. Maailmanlaajuisesti sadosta on arvioitu menetettävän jopa puolet ja Suomessa neljänneksen (Markkula ym. 1990), mikäli kasvinsuojeluaineiden käytöstä luovuttaisiin. Agronomisen hyödyn kääntöpuolena ovat haitat, joita kasvinsuojeluaineet aiheuttavat muille kuin torjuttavalle eliöstölle. Kasvinsuojeluaineita on löydetty maapallolta lähes kaikkialta, mistä niitä on analysoitu. Paikoitellen kasvinsuojeluaineiden pitoisuudet ylittävät hyväksyttävän taustapitoisuuden ja kasvinsuojeluaineet ovat aiheuttaneet selviä ympäristöhaittoja, kuten pohjaveden likaantumista.

Kasvinsuojeluaineiden käytöstä aiheutuvien haittojen minimoimiseksi niiden käyttöönottoa valvotaan lainsäädännöllä. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) ylläpitää kasvinsuojeluainerekisteriä Suomessa hyväksytyistä valmisteista ja niiden käyttöä koskevista ehdoista (www.tukes.fi/Kasvinsuojeluainerekisteri). Vuoden 2015 alussa rekisterissä oli 398 kasvinsuojeluaineeksi luokiteltua valmistetta ja 149 tehoainetta.

Torjuntatarve ja käyttömäärät

Viljelykasvit joutuvat kilpailemaan rikkakasvien kanssa vedestä, ravinteista ja valosta. Eri-tyisen tärkeää rikkakasvien torjuminen on riviviljelyssä, jossa viljelykasvit jäävät helposti alkukesästä rikkakasvien varjoon. Sadon määrän vähenemisen lisäksi rikkakasvit aiheuttavat myös muuta haittaa. Monet rikkakasvit tukkivat peltokoneita ja osa rikkakasveista on myrkyllisiä. Esimerkiksi suokortteen joutuminen rehuun aiheuttaa lehmien huonovointisuutta. Juolavehna puolestaan aiheuttaa viljan epätasaista tuleentumista ja vaikeuttaa viljelytyötä. Rikkakasvien versot ovat puintiaikaan kosteampia kuin vilja, joten ne hidastavat kuivumista, lisäävät kuivatuskustannuksia ja voivat aiheuttaa sadon homehtumista. Valtaosa Suomessa käytetyistä kasvinsuojeluaineista on herbisidejä (taulukko 4.4). Herbisideillä käsiteltiin vuonna 2013 yli 90 % vilja-alasta ja lähes kolmannes nurmialasta (Tike 2014). Erikoiskasvien, kuten sokerijuurikkaan, perunan, avomaan vihannesten, mansikan ja omenan, viljelyssä käyttömäärät peltotala kohden ovat suurimmat (Tike 2014).

Yleisimpiä kasvitauteja Suomessa ovat erilaiset homesienet, kuten mansikan harmaa-home, taimipolte, perunarutto ja erilaiset laikuttaudit. Ne pilaavat sadon. Kasvitauteja vas-

Taulukko 4.4 Esimerkkejä eniten myydyistä kasvinsuojeluaineista vuosina 2005 ja 2013.

	Myynti (tehoainetonnia)		Ryhmän myydyimmät tehoaineet	
	2005	2013	2005	2013
Aineryhmä				
Maatalous- ja puutarhakäyttö	1431	1475		
Herbisidit yhteensä	1077	1133		
Glyfosaatti (valikoimaton)	543	550	Glyfosaatti	Glyfosaatti
Fenoksihapot (mm. viljalle)	348	443	MCPA	MCPA
Sulfonyyliureat (pienannosaineita)	5	10	Tribenuroni-metyyli	Tritosulfuroni
Insektisidit ja akarsidit yhteensä	47	26	Parafiiniöljy, dimetooatti	Dimetooatti, parafiiniöljy
Fungisidit yhteensä	255	217	Mankotsebi, karboksiini	Mankotsebi, triadimenoli
Kasvunsäätteet yhteensä	52	100	Klormekvattikloridi, mepikvatti	Klormekvattikloridi, trineksapakki-etyyli
Metsätalouden torjunta-aineet	429	1799	Urea (lähes 100 % ryhmän myynnistä)	Urea (lähes 100 % ryhmän myynnistä)
Kasvinsuojeluaineet yhteensä	1860	3275		

taan käytetään peitattuja siemeniä tai ruiskutuksia. Fungisidien osuus maataloudessa käytettävistä kasvinsuojeluaineista on noin 15 %, mutta esimerkiksi perunan viljelyssä fungisidit ovat merkittävän kasvinsuojeluineryhmä. Noin kolmannes Suomessa myydyistä fungisideistä on tarkoitettu perunaruton torjuntaan.

Maailmassa tunnetaan noin 5000 hyönteis- tai punkkilajia, jotka aiheuttavat taloudellisia tappioita viljelysmailla. Tropiikissa tuholaiset aiheuttavat suuremman uhan viljelykasveille kuin rikkakasvit ja sen vuoksi insektisidien käyttömäärät ovat siellä suurempia kuin herbisidien. Suomessa tuholaiset uhkaavat sadon laatua tai määrää vain satunnaisesti, koska vain harvat tuholaiset talvehtivat Suomen oloissa. Suomessa myytävistä kasvinsuojeluaineista alle 2 % on insektisidejä tai akarsidejä.

Kemiallisia kasvinsuojeluaineita on käytetty Euroopassa 1800-luvulta asti. Ensimmäiset synteettiset kasvinsuojeluaineet kehitettiin 1940-luvulla. Näitä olivat mm. DDT, lindaani ja fenoksihapot. Laajamittainen kasvinsuojeluaineiden käyttö alkoi Suomessa vasta 1950-luvun lopulla, jolloin traktoriruiskut mahdollistivat suurten alojen käsittelyn. Peltosen lisäksi kasvinsuojeluaineilla hillittiin esimerkiksi rautateiden ja tienvarsien kasvillisuutta. Kasvinsuojeluaineiden myyntimääriä on tilastoitu Suomessa vuodesta 1953. Myyntimäärät kasvoivat 1950-luvun lopulta 1980-luvulle. Pienannosherbisidit, jotka tehoavat jo muutaman gramman hehtaariannostelulla, tulivat markkinoille 1980-luvun loppupuolella ja korvasivat osittain fenoksihappoja. Pienimmillään kasvinsuojeluaineiden myynti tehoainekilogrammoiksi laskettuna oli vuonna 1996. Sen jälkeen myyntimäärät kasvoivat nopeasti, mutta kääntyivät uudelleen laskuun 2010-luvun alussa. Vaikka myydyistä kasvinsuojeluaineista suurin osa käytetään viljapelloilla, pinta-alaa kohden laskettuna kasvinsuojeluaineiden käyttö on suurempaa erikoiskasvien viljelyssä. Esimerkiksi sokerijuurikasvillalle ruiskutetaan herbisidejä kahdesta neljään kertaan alkukesästä. Perunaruttoa torjutaan taas loppukesällä ja tarvittavien ruiskutusten määrä vaihtelee yleensä kolmesta kuuteen kertaan kesässä.

Vuonna 2013 puolet vuotuisesta tehoaineiden kokonaismyyntimäärästä oli metsätaloudessa käytettävää ureaa. Ureaa käytetään juurikäävän torjuntaan kuusen ja männyn kannoilla metsän kaatamisen yhteydessä.

Kansainvälisesti vertaillen kasvinsuojeluaineiden käyttömäärät Suomessa ovat melko alhaisia. Alueiden väliset erot kasvinsuojeluaineiden käytöstä ovat suuria jopa saman viljelykasvin kohdalla ja yksittäisillä pelloilla käyttömäärät voivat olla moninkertaisia alueen keskiarvoon verrattuna. Ilmaston lämpeneminen saattaa johtaa uusien rikkakasvi-, tauti- ja tuholaisriskien ilmenemiseen Suomessa ja siten lisätä kasvinsuojeluaineiden käyttömääriä.

Aineiden vaikutusmekanismit

Kasvinsuojeluaineet kuuluvat hyvin erilaisiin kemiallisiin ryhmiin, mutta suurin osa myynnissä olevista aineista on synteettisiä orgaanisia yhdisteitä. Aineiden vaikutustavat vaihtelevat jopa kemiallisen ryhmän sisällä, samoin sivuvaikutuksena esiintyvä myrkyllisyys muille eliöille. Tietoja kasvinsuojeluaineiden ja niiden hajoamistuotteiden ominaisuuksista on koottu lukuisiin kirjoihin (esim. Paasivirta 1994; Roberts ym. 1998, 1999; Tomlin 2003) ja tietokantoihin (esim. PPDB 2007).

Herbisidit voivat olla kosketusvaikutteisia tai systeemisiä, ja molemmissa ryhmissä on sekä valikoivia että valikoimattomia aineita. Valikoiva herbisidi tuhoaa rikkakasveja, mutta ei vahingoita viljelykasvia. Kosketusvaikutteiset herbisidit ovat lehvästöön ruiskutettavia aineita, jotka polttavat tai syövyttävät lehtiä kuten fenmedifaami. Niiden valikoivuus perustuu kasvilajien päällysketon erilaisuuteen. Systeemiset eli sisävaikutteiset herbisidit kulkeutuvat kasvin sisään lehvästön pinnalta tai juurten kautta maasta. Ne vaikuttavat kasvin elintoimintoihin, kuten solujen jakaantumiseen tai fotosynteesiin. Esimerkiksi MCPA:ta ruiskutetaan viljapelloille yleensä alkukesästä, jolloin yksisirkkaiset kasvit kuten viljat sietävät sitä melko suuriakin annoksia. Glyfosaatti estää kasvin aminohapposynteesin. Koska se ei ole valikoiva, sitä ei yleensä ruiskuteta kasvukauden aikana viljelyksille. Glyfosaattia käytetään kasvuston tuhoamiseen viljelemättömillä mailla, nurmen päättämiseen ja monivuotisten rikkakasvien hävittämiseen syksyllä sadonkorjuun jälkeen. Myös kevätkäyttö viljan viljelyssä on viime vuosina yleistynyt. Geenitekniikan avulla on kuitenkin kehitetty glyfosaattia kestäviä kasvilajikkeita esimerkiksi maissille ja soijapavulle. Näissä kasveissa aminohappojen muodostusta ohjaa sellainen proteiini, jonka toimintaan glyfosaatti ei vaikuta. Glyfosaattia kestävien lajikkeiden viljely on lisännyt glyfosaatin käyttöä merkittävästi maailmanlaajuisesti tarkasteltuna. Suomessa ei viljellä geenimuunneltuja lajikkeita.

Monet insektisidit kuten klooratut hiilivedyt (esim. kielletyt DDT ja lindaani), organofosforiyhdisteet (esim. dimetooatti), karbamaatit (esim. pirimikarbi, joka on poistettu Suomen kasvinsuojeluainerekisteristä vuonna 2009) ja pyretroidit (esim. esfenvaleraatti) vaikuttavat hermostoon. Sekä organofosforiyhdisteet että karbamaatit estävät hermosolujen synapsissa välittäjäaineena toimivan asetyylikoliinin esteroitumisen ja näin palautumisen hermoimulssin jälkeen. Ne saattavat vaikuttaa myös muiden eliöiden (myös ihmisen) hermostoon.

Mikäli samoja tai samalla vaikutusmekanismilla vaikuttavia kasvinsuojeluaineita ruiskutetaan toistuvasti samoille pelloille, voi torjuttaviin eliöihin kehittyä resistenssi eli vastuskyky näitä kemikaaleja vastaan. Resistenssin kehittymisen jälkeen kyseisistä kasvinsuojeluaineista ei ole enää hyötyä. Kasvinsuojeluaineresistenssi on tiedostettu maailmanlaajuisesti kasvavaksi agronomiseksi ongelmaksi. Suomessa metalaksyyli ei enää ole tehokas perunaruttoa vastaan ja vuonna 2004 havaittiin rikkakasvien vastuskyvyn kasvaneen pienannosherbisidijä vastaan. Resistenssin syntyä voidaan ehkäistä esimerkiksi viljelykierron avulla tai käyttämällä eri kasvinsuojeluaineita peräkkäisinä vuosina. Lisäksi kasvinsuojeluaineen kerta-annoksen tulisi olla riittävän suuri toivotun tehon saavuttamiseksi. Integroidussa torjunnassa kasvinsuojeluaineiden lisäksi käytetään elion luonnollisia vihollisia.

Reaktiot ja kulkeutuminen maaperässä

Kasvinsuojeluaineruiskutuksessa osa aineesta kulkeutuu tuulen mukana pois pellolta, osa päätyy lehvästöön ja osa maahan. Lehvästöstä aineet voivat siirtyä kasvin sisään, haihtua ilmaan, huuhtoutua sadeveden mukana maahan tai hajota joko valon vaikutuksesta, kemiallisesti tai biologisesti. Yleensä hajoaminen on nopeampaa lehvästössä kuin maassa. Tärkeimmät prosessit maassa ovat sitoutuminen maahiukkasiin (adsorptio) ja hajoaminen toiseksi aineiksi. Vaikka osa herbisideistä on maavaikutteisia eli ne estävät maaperästä käsin

rikkakasvien kasvua, kasvinsuojeluaineiden siirtymistä maavedestä kasviin ei tunneta kovin hyvin. Maavaikutteisia herbisidejä voidaan levittää joko suoraan maaperään tai niiden jäämät maaperässä voivat olla peräisin aiemmista maa- tai lehvästölevityksistä.

Maan pinnalta kasvinsuojeluaineet voivat kulkeutua pintavesiin tai syvemmälle maaperään ja edelleen pohjaveteen. Kulkeutumisherkkyys riippuu aineen ja maaperän ominaisuuksista. Sellaiset kasvinsuojeluaineet, joiden höyrynpaine on korkea, voivat liikkua maassa myös kaasumaisessa muodossa ja haihtua ilmakehään.

On tärkeää tuntea kasvinsuojeluaineiden käyttäytyminen ja siihen vaikuttavat tekijät ympäristössä, sillä tiedon avulla voidaan arvioida aineiden aiheuttamia vaikutuksia eliöille ja ihmisille. Tätä tietoa tarvitaan mm. hyväksyttäessä kasvinsuojeluaine tiettyyn käyttötarkoitukseen

Sitoutuminen

Kasvinsuojeluaineet sitoutuvat maahiukkasten pinnoille joko fysikaalisesti tai kemiallisten mekanismien avulla. Sitoutuminen vähentää aineen pitoisuutta maavedessä ja siten myös sen huuhtoutumisriskiä pinta- ja pohjavesiin. Toisaalta sitoutuminen hidastaa aineiden hajoamista, sillä vahvasti sitoutuneet aineet ovat vaikeasti mikrobien saatavilla.

Sitoutumiseen vaikuttavat sekä kasvinsuojeluaineen että maan ominaisuudet. Sitoutumistavan perusteella aineet voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin: 1) kationit, 2) emäkset, 3) hapot, 4) ei-ioniset yhdisteet ja 5) kelatoivat yhdisteet (taulukko 4.5). Kationit ja emästen konjugoidut hapot ovat positiivisesti varautuneita ja sitoutuvat kationinvaihdolla savimine-raaleihin ja maan orgaaniseen ainekseen (ks. kohta 4.2, Kationinvaihto). Hapot voivat sitoutua ligandinvaihdon avulla oksidipinnoille (ks. kohta 4.2, Spesifinen pidättäminen). Ei-ioniset yhdisteet sitoutuvat heikommin kuin ioniset yhdisteet. Polaariset aineet voivat sitoutua vetysiltojen ja ioni-dipoli vuorovaikutusten avulla (heikkoja sidoksia). Poolittomat ei-ioniset aineet eivät liukene maaveteen, vaan kulkeutuvat passiivisesti maavedestä rajapintojen lähetyville. Näiden aineiden sitoutuminen orgaanisen aineksen pinnoille riippuu pintojen hydrofobisuudesta. Niiden sitoutumiskerroin voidaan arvioida oktanoli-vesi jakaantumiskertoimen (Kow) avulla. Suuri osa kasvinsuojeluaineista kuuluu tähän ryhmään.

Sitoutumis- eli adsorptiokertoimella kuvataan sitoutuneen ja maavedessä olevan aineen välistä suhdetta tasapainotilassa. Laboratorio-olosuhteissa adsorptiokertoimen tasapainon oletetaan syntyvän useimmilla aineilla 4 - 16 tunnin kuluessa. Jos maaveden kasvinsuojeluainepitoisuus muuttuu hajoamisen, kasvien oton tai huuhtoutumisen johdosta, osa

Taulukko 4.5 Kasvinsuojeluaineiden sitoutuminen maahiukkasiin.

Ryhmä	Sitoutumistapa	Sitoutumiseen vaikuttaa	Esimerkkiaine
Kationit	Kationinvaihto	Saves, orgaaninen aines	Dikvatti (herbisidi vihannesviljelyssä)
Emäkset	Kationinvaihto	pH, saves, orgaaninen aines	Simatsiini (herbisidi marja- ja hedelmätarhoissa; käyttö kielletty 2004)
Hapot	Ligandinvaihto (spesifinen)	pH, oksidipinnat	MCPA (herbisidi viljanviljelyssä)
Ei-ioniset aineet 1) polaariset 2) polaarittomat	1) vetysillat, ioni-dipoli vuorovaikutus 2) siirtyminen hydrofobisille pinnoille	Orgaaninen aines ja aineen vesiliukoisuus	Suurin osa torjunta-aineista 1) etofumesaatti (herbisidi juurikkaan viljelyssä) 2) DDT (insektisidi, kielletty Suomessa)
Kelatoivat aineet	Useita erilaisia	Riippuu aineesta	Glyfosaatti (tot. herbisidi)

sidoksista purkaantuu ja kasvinsuojeluainetta vapautuu takaisin maaveteen (desorptio). Vastaava tilanne syntyy, kun kasvinsuojeluaine kulkeutuu eroosioainekseen sitoutuneena vesistöön. Vesistössä maahiukkasten osuus kokonaistilavuudesta on minimaalinen. Jotta sitoutuneen ja liuoksessa olevien kasvinsuojeluainepitoisuuksien suhde pysyy samana, merkittävä osa sitoutuneesta aineesta desorboituu vesistössä. Sidosten laadusta riippuu, kuinka helposti ne purkautuvat. Ajan myötä sitoutuminen voi vahvistua ja sidosmekanismi muuttua energiataloudellisemmiksi. Yleensä kemialliset sidokset ovat vahvempia kuin fysikaalisiin voimiin perustuvat. Sitoutuminen voi olla myös palautumatonta eli irreversiibeliä, jolloin sidokset eivät purkaannu lainkaan.

Maan orgaanisen aineksen määrä ja laatu, saveksen määrä ja mineraalikoostumus sekä maan happamuus vaikuttavat sitoutumispaikkojen määrään. Mikäli maan happamuus muuttuu, emäksisten ja happamien kasvinsuojeluaineiden varaus saattaa muuttua dissosioitumisen tai yhdisteen protonoitumisen yhteydessä, ja toisaalta maassa olevien sitoutumispaikkojen määrä voi muuttua. Siksi maan tai veden happamuuden muutokset vaikuttavat joidenkin aineiden sitoutumiseen ja hajoamiseen. Kun kasvinsuojeluaineen pitoisuus kasvaa, sitoutumispaikat täyttyvät ja vapaana olevien sitoutumispaikkojen määrä vähenee.

Sitoutumista kuvaavia yhtälöitä on esitetty tietorudussa 4.15 ja sitoutumiskertoimien vaikutusta aineiden kulkeutumisherkyyteen tietorudussa 4.16. Maan lämpötilalla ja kosteudella on myös vaikutusta sitoutumisreaktioihin. Yleisesti lämpötilan kohoaminen nopeuttaa tasapainotilan syntymistä, mutta sitoutumismekanismista riippuu lisääntykö vai vähentykö sitoutuminen lämpötilan kohotessa. Maan kuivuessa maaveden määrä suhteessa kiinteisiin maahiukkasiin vähenee. Samalla kasvinsuojeluaineista suurempi osa päätyy hiukkasten pinnoille ja todennäköisyys aineen kulkeutumiseen pienenee. Sitoutumisesta johtuvaa aineen kulkeutumisen hidastumista kuvataan hidastumis- eli retardaatio-kertoimella (ks. kohta 4.3).

Hajoaminen tai muuntuminen muiksi aineiksi

Kasvinsuojeluaineet hajoavat erilaisten prosessien kautta toisiksi aineiksi. Nämä prosessit voivat olla kemiallisia, biologisia tai valon aiheuttamia hajoamisprosesseja. Hajoamisketjussa on usein monia välivaiheita ja lopputuotteet ovat usein vaarattomia epäorgaanisia ioneja. Jotkut hajoamisketjun välituotteet, metaboliitit, voivat olla myrkyllisempiä kuin alkuperäinen kasvinsuojeluaine. Esimerkiksi dimetooatti (Suomen myydyin insektisidi) hajoaa ometoatiksi, joka on nisäkkäille viisi kertaa emoainetta myrkyllisempää. Lähes kaikkien kasvinsuojeluaineiden hajotuksessa tarvitaan maan mikrobeja, jotka valmistavat hajotuksen mahdollistavia tai sitä kiihdyttäviä entsyymejä. Mikrobit voivat käyttää kasvinsuojeluaineita ravintonaan (metabolinen hajoaminen) tai hajottaa kasvinsuojeluaineita hyötymättä niistä (kometabolinen hajoaminen). Vahvasti sitoutuneet kasvinsuojeluaineet eivät välttämättä ole mikrobien saatavissa.

Kasvinsuojeluaineiden hajoaminen on nopeinta, kun maassa on sopivia mikrobilajeja ja mikrobien elinolot kuten maan pH, lämpötila ja kosteus ovat optimaaliset. Yleensä optimikosteus on lähellä kenttäkapasiteettia ja optimilämpötila noin 25 °C. Optimaaliset olot riippuvat kuitenkin maan mikrobistosta. Hajoamista saattaa esiintyä hyvin äärevissäkin oloissa, joihin tietyt mikrobit ovat sopeutuneet. Mikrobeja on yleensä eniten lähellä maan pintaa, jossa orgaanista ainesta on runsaasti.

Kasvinsuojeluaineiden hajoamista kuvataan usein ensimmäisen asteen kinetiikan avulla (ks. Tietoruutu 4.15). Laboratoriokokeissa määritetty hajoamiskerroin vastaa harvoin kenttäkokeissa saatua arvoa. Useimmissa kasvinsuojeluaineiden hajoamista kuvaavissa mal-leissa huomioidaan hajoamiskertoimen riippuvuus lämpötilasta ja kosteudesta.

Kulkeutuminen

Maan pinnalla olevat kasvinsuojeluaineet kulkeutuvat pinta- ja pohjavesiin sekä veteen liuenneina että maa-vesisuspensiossa eroosioainekseen sitoutuneina. Kolloidisesti kulkeutuva orgaaninen aines saattaa myös olla merkittävä kulkeutumisreitti kasvinsuojeluaineille. Kasvinsuojeluaineita huuhtoutuu pelloilta pintavesiin sekä pinta- että salaojavalunnan mukana. Sellaiset kasvinsuojeluaineet, joiden höyrynpaine on korkea, voivat liikkua maassa myös kaasumaisessa muodossa. Näiden aineiden haihtuminen peltoalueilta ilmaan saattaa olla merkittävää.

Tietoruutu 4.15

Kasvinsuojeluaineiden sitoutumisen ja hajoamisen kuvauksessa käytettyjä yhtälöitä

Lineaarinen adsorptiokerroin K_D kuvaa maahiukkasiin sitoutuneen kasvinsuojeluainepitoisuuden c_s (kg kg^{-1}) suhdetta maaveden kasvinsuojeluainepitoisuuteen c_L ($\mu\text{g l}^{-1}$)

$$K_D = c_s / c_L \quad (\text{T4.49})$$

Koska monet kasvinsuojeluaineet sitoutuvat maan orgaaniseen ainekseen, pyritään adsorptiokertoimen vaihtelua vähentämään suhteuttamalla se joko maan orgaaniseen hiileen (f_{OC}) tai orgaaniseen aineksen osuuteen (f_{OM})

$$K_{OC} = K_D / f_{OC} \quad (\text{T4.50a})$$

$$K_{OM} = K_D / f_{OM} \quad (\text{T4.50b})$$

Lineaarinen adsorptioisotermi sopii vain tietyille pitoisuusalueelle. Sen vuoksi sorptiota kuvataan useammin Freundlichin adsorptiokertoimen K_F ja eksponenttitermin avulla. Yleensä eksponenttitermi (n) saa arvoja 0,7–1,1. Mikäli arvo on yksi, vastaa yhtälö lineaarista sorptiota.

$$c_s = K_F (c_L)^n \quad (\text{T4.51})$$

Kasvinsuojeluaineen hajoamista kuvataan usein ensimmäisen asteen yhtälöllä:

$$c(t) = c_0 e^{-k t} \quad (\text{T4.52})$$

missä $c(t)$ on kasvinsuojeluaineen pitoisuus maassa, c_0 on kasvinsuojeluaineen pitoisuus tarkastelujakson alussa, t on aika ja k on kasvinsuojeluaineen hajoamiskerroin (d^{-1}). Hajoamiskerroin (k) lasketaan usein kullekin aika-askeleelle erikseen niin että maan lämpötila ja kosteus otetaan huomioon.

Puoliintumisaika (DT_{50}) tarkoittaa aikaa, jossa aineen pitoisuus on laskenut puoleen. DT_{90} puolestaan kuvaa aikaa, jonka kuluessa pitoisuudesta 90 % on hävinnyt. Näiden ja hajoamiskertoimen k välinen yhteys on käänteinen.

$$DT_{50} = \ln(2) / k \quad (\text{T4.53a})$$

$$DT_{90} = \ln(10) / k \quad (\text{T4.53b})$$

Tietoruutu 4.16

Kasvinsuojeluaineiden luokittelu ympäristökäyttötymisen mukaan

Kasvinsuojeluaineiden käyttäytymistä ympäristössä kuvataan tiettyjen ominaisuuksien mukaan, joiden perusteella on muodostettu taulukoissa T4.1...T4.5 esitettyjä luokitusjärjestelmiä.

Taulukko T4.1 Aineiden kulkeutuvuus sitoutumisen perusteella. K_{oc} on orgaanisen hiilen määrään suhteutettu adsorptiokerroin ja K_d lineaarinen adsorptiokerroin.

K_{oc} -arvo ($dm^3\ kg^{-1}$)	K_d ($dm^3\ kg^{-1}$)	Ryhmittely
<50	<0.75	Erittäin kulkeutuva
50–150	0.75–2.25	Helposti kulkeutuva
150–500	2.25–7.5	Kohtalaisen kulkeutuva
500–2000	7.5–30	Hieman kulkeutuva
2000–5000	30–75	Heikosti kulkeutuva
>5000	>75	Kulkeutumaton

Taulukko T4.2 Aineiden hajoamisnopeus puoliintumisaajan perusteella.

Puoliintumisaika (DT50)	Ryhmittely
< 1 viikko	Nopeasti hajoava
1 viikko – 1 kuukausi	Kohtalaisen nopeasti hajoava
1–3 kuukautta	Kohtalaisen hitaasti hajoava
3–8 kuukautta	Hitaasti hajoava
> 8 kuukautta	Erittäin hitaasti hajoava

Taulukko T4.3 Aineiden haihtuvuus höyrinpaineen (Henryn lain vakion K_H) perusteella.

Höyrinpaine (Pa, 20–25°C) / K_H (Pa m ³ /mol)	Ryhmittely
>100	Erittäin haihtuva
1–100	Haihtuva
0.01–1	Kohtalaisen haihtuva
0.0001–0.01	Hieman haihtuva
<0.0001	Erittäin vähän haihtuva

Taulukko T4.4 Aineiden biokertyvyys oktanoli-vesi -jakaantumiskertoimen (K_{ow}) perusteella.

Biokertyvyys	log (K_{ow})	Ryhmittely
<100	<3	Hieman kertyvä
100–1000	3–5	Kohtalaisen kertyvä
>1000	>5	Erittäin kertyvä

Taulukko T4.5 Aineiden myrkyllisyys vesieläimille laboratorio-oloissa tehtyjen myrkyllisyys testitulosten perusteella.

Akuutti toksisuus LC50 ¹ / EC50 ² (mg/l)	Krooninen toksisuus NOEC ³ (mg/l)	Ryhmittely
<1	<0.01	Erittäin myrkyllinen
1–10	0.01–0.1	Myrkyllinen
10–100	0.1–1.0	Haitallinen
>100	>1.0	Jonkin verran haitallinen

¹ LC50 on pitoisuus, jossa puolet koe-elioistä kuolee koeajan aikana

² EC50 on pitoisuus, joka aiheuttaa myrkyvaikutuksen puolelle koe-elioistä

³ NOEC on korkein pitoisuus, joka ei aiheuta myrkyvaikutuksia koe-elioissa

Sitoutuminen maahiukkasten pinnalle vähentää maavedessä olevan aineen määrää ja siten kasvinsuojeluainemäärää, joka mahdollisesti voisi kulkeutua veden mukana syvemmälle maaperään. Tähän perustuu sitoutumiskertoimen perusteella tehtävä arvio aineiden kulkeutumisherkkyydestä (ks. Tietoruutu 4.16). Useimmat kasvinsuojeluaineet ehtivät hajota maan pintakerroksissa ja vain pieni osa levitetystä aineesta kulkeutuu muokkauskerroksen alapuolelle.

Dispersiosta ja diffuusiosta huolimatta aineet jakautuvat melko epätasaisesti maahan. Maassa on erilaisia oikovirtausreittejä, makrohuokosia ja halkeamia, joita pitkin aineet voivat kulkeutua nopeasti syvemmälle maahan. Tällöin ne eivät ole juurikaan kosketuksissa maa-aineksen kanssa eivätkä ehdi sitoutua matkalla. Heikosti ja vahvasti sitoutuvien kasvinsuojeluaineiden samanaikainen löytyminen salaojavallunnasta pian kasvinsuojeluainekäsittelyn jälkeen osoittaa, että huuhtoutuminen on tapahtunut oikovirtausreittejä pitkin (Flury 1996; Klodivko ym. 2001). Vaikka eri tavoin sitoutuneita aineita löytyy samaan aikaan salaojavesistä, vahvasti sitoutuneiden aineiden pitoisuudet ovat yleensä pienempiä kuin heikosti sitoutuneiden. Tämä saattaa johtua siitä, että ne ovat ehtineet sitoutua maahan ennen kuin kulkeutuminen makrohuokosessa tai halkeamassa on alkanut tai ne ovat ehtineet sitoutua esimerkiksi makrohuokoksen seinämiin.

Suomalaisissa ja ulkomaisissa huuhtoutumiskenttäkokeissa suurimmat salaojaveden kasvinsuojeluainepitoisuudet on todettu ensimmäisissä kasvinsuojeluaineleivityksen jälkeisissä valunnoissa. Sitten pitoisuudet ovat yleensä laskeneet määritysrajaa alhaisemmiksi, mutta monesti nousseet keväällä hetkellisesti uudestaan (Laitinen 2000; Klodivko ym. 2001; Petersen ym. 2003; Siimes ym. 2006). Kevään kohonneet pitoisuudet ovat liittyneet maan jäätymiseen tai sulamiseen tai muokkaustoimenpiteisiin, joiden vuoksi uutta kasvinsuojeluainetta sisältävää maapintaa on tullut oikovirtausreittien alueelle.

Pintavaluntaan huuhtoutuvan kasvinsuojeluaineen määrä riippuu valunnan kanssa kosketuksissa olevan maakerroksen kasvinsuojeluainepitoisuudesta sekä sateen ja pintavalunnan intensiteetistä. Kasvinsuojeluaineiden pitoisuudet pintavalunnassa ovat sitä korkeampia, mitä pikemmin pintavaluntaa aiheuttava sade sattuu kasvinsuojeluainekäsittelyn jälkeen. Yleensä pitoisuudet pintavalunnassa ovat huomattavasti korkeampia kuin salaojavalunnassa.

Pitoisuudet pintavesissä vaihtelevat sekä ajan että paikan suhteen. Pellon vieressä olevassa ojassa pitoisuudet vaihtelevat enemmän kuin suuressa joessa, jossa koko valuma-alueen pitoisuudet tasoittuvat. Kasvinsuojeluainepäästöt pintavesiin ovat yleensä alle 0,5 % vuotuisista käyttömääristä. Mikäli pintavalunta on alkanut heti käsittelyn jälkeen, päästöt voivat olla jopa 5 % (Burgoa ja Wauchope 1995). Suomalaisessa peltolohkomittakaavan kokeessa yhdentoista kasvinsuojeluaineen päästömäärät pintavalunnan mukana vaihtelivat 0,0005 % ja 1,54 % välillä levitetyistä määristä (Laitinen 2000).

Suomessa pintavesien kasvinsuojeluaineseurannassa havaittiin vähintään yhtä analysoitua ainetta noin 2/3 näytteistä ja noin 5 % havaittiin vähintään kymmentä erilaista ainetta vuosina 2007–2012 (Karjalainen ym. 2014). Vaikka pitoisuudet olivat enimmäkseen pieniä, ylittivät muutamien aineiden pitoisuudet joillakin paikoilla aika ajoin haitattoman pitoisuuden raja-arvona käytetyn ympäristönlautunormin eli EQS-arvon (Environmental Quality Standard, valtioneuvoston asetus 1022/2006 muutoksineen) tai vastaavalla tavalla aineen ekotoksisuuden ja lähtöaineiston kattavuuteen perustuvan turvakertoimen avulla lasketun muun vertailuarvon (Konttiokari ja Mattsoff 2009, Karjalainen ym. 2014). Seurannassa havaittiin useasta eri joesta yksittäisistä näytteistä suuria pitoisuuksia sellaisia tuholaisten torjunta-aineita, joita ei olisi saanut enää käyttää. Näiden havaitut pulssimaiset pitoisuudet viittasivat pistemäiseen kuormitukseen. Käytössä olleista kasvinsuojeluaineista eräiden pien’annosherbisidien pitoisuudet ylittivät vertailuarvonsa. Vesien ekolo-

ginen tila oli määritetty eliösuhteiden avulla osassa näytepaikkoja. Vesien ekologinen tila oli heikentynyt siellä, missä havaittiin eniten erilaisia aineita.

Kasvinsuojeluaineita on löydetty myös suomalaisista pohjavesistä. Vuosina 2002–2005 vesinäytteitä kerättiin 190 pohjavesialueelta, ja EU:n talousveden raja-arvo (0,1 µg/l) ylittyi 15 pohjavesialueella (Vuorimaa ym. 2007). Tämä raja-arvo on määritetty EU:n juomavesidirektiivissä (98/83/EY). Se on poliittinen päätös, eikä perustu pitoisuuden aiheuttamiin terveysvaikutuksiin. Ihmisen terveydelle haitallisia pitoisuuksia ei Suomen pohjavesistä ole havaittu (Rapala ja Gustafsson 2005), mutta raja-arvojen ylitysten takia on jouduttu sulkemaan vedenottamoita.

Riskinarviointi ja ympäristökuormituksen vähentäminen

Kasvinsuojeluaineita on havaittu ympäri maailmaa mm. sadevesistä, jokivesistä, pohjasedimenteistä ja pohjavesistä. Aiemmin turvallisiksi luultujen aineiden käyttöä on jouduttu rajoittamaan, koska niillä on ilmennyt uusia haitallisia vaikutustapoja. Esimerkiksi DDT:n kertyminen ravintoketjussa ymmärrettiin vasta 1970-luvulla, 30 vuotta käytön aloittamisen jälkeen. Nykyisin mahdolliset kasvinsuojeluaineiden haittavaikutukset ihmisten ja eläinten terveyteen, vesivaroihin ja muuhun ympäristöön pyritään estämään tai minimoimaan kasvinsuojeluaineiden ennakotarkastuksella ja käyttöä koskevilla rajoituksilla.

Kasvinsuojeluaineiden tehoaineet tarkastetaan ja hyväksytään ennen käyttöönottoa EU-tasolla (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus EY No 1107/2009). Kasvinsuojeluainevalmisteet arvioidaan erikseen kolmella vyöhykkeellä ja vain sellaiset valmisteet voidaan hyväksyä, joiden tehoaineet on hyväksytty EU:ssa. Suomi kuuluu pohjoiseen vyöhykkeeseen yhdessä Ruotsin, Tanskan, Viron, Latvian ja Liettuan kanssa. Jäsenvaltiot voivat asettaa valmisteen käytölle kansallisia vaatimuksia ja riskinhallintatoimia. Kemikaali- ja turvallisuusvirasto (Tukes) ylläpitää rekisteriä hyväksytyistä kasvinsuojeluainevalmisteista. Rekisteri sisältää tiedot valmisteen sallitusta käytöstä ja käytön rajoituksista

Kasvinsuojeluaineiden rekisteröinnissä termillä PEC (*predicted environmental concentration*) tarkoitetaan arvioitua kasvinsuojeluainepitoisuutta ympäristössä. PEC:n määrittämiseksi on tarkat ohjeet. Euroopan unionin komissio perusti FOCUS-ryhmän (*Forum for the Co-ordination of pesticide fate models and their Use*) yhtenäistämään PEC:n määrittämiseksi käytettäviä malleja ja laskentamenetelmiä. Ryhmän raportit ja uusimmat malliversiot ovat saatavilla Internetistä. PEC arvioidaan taulukkoarvojen, simulointimallien ja olosuhteita kuvaavien skenaarioiden avulla. Skenaariot kuvaavat tyypillisiä ilmasto-oloja, maaperän ominaisuuksia ja yleisimpien viljelykasvien kehitysvaiheita EU:n alueella. Pohjaveden laskettuja pitoisuuksia verrataan EU:n talousveden raja-arvoon 0,01 µg l⁻¹ ja pintavesien laskettuja arvoja ainekohtaisiin raja-arvoihin, jotka riippuvat aineen haitallisuudesta vesieliöille.

Kuormituksen vähentämistoimenpiteitä

Kasvinsuojeluaineiden päästöjä ympäristöön voidaan vähentää kasvinsuojeluaineiden käyttöä vähentämällä. Tällöin kasvinsuojelussa on käytettävä muita torjuntakeinoja. Integroitudessa kasvinsuojelussa kasvinsuojeluaineiden rinnalla käytetään luontaisia torjuntakeinoja kuten tuhoeläimiä syöviä petopunkkeja. Viljelijän päätöstä kemiallisen torjunnan tarpeellisuudesta ja sen ajoituksesta helpottavat ohjeelliset torjuntakynnykset ja tuholaisennustejärjestelmä. Vaihtoehtoiset rikkakasvien hävittämiskeinot, kuten kitkeminen ja liekittäminen, ovat useimmiten kalliimpia kuin herbisidien ruiskuttaminen. Rikkaruohojen määrää voidaan vähentää parantamalla viljelykasvin kilpailukykyä rikkakasveihin verrattuna. Esimerkiksi riisinviljelyssä voidaan vedenpintaa säättämällä vähentää rikkakasvien

määrää, sillä riisi kestää veden alla paremmin kuin useimmat rikkakasvit. Suomessa viljelykasvien kasvuoptimit ovat yleensä kuivemmassa ja korkeammassa pH:ssa kuin rikkakasvien, joten viljelykasvien kilpailukykyä rikkakasveja vastaan voidaan parantaa hyvän peruskuivatuksen ja maan kalkitsemisen avulla. Hyvä viljelykierto vähentää kasvitautien riskiä. Kyntö heikentää monivuotisia rikkakasveja. Suorakylvössä, jossa maata ei muokata vaan siemenet kylvetään suoraan edellisvuotiseen sänkeen, joudutaankin usein käyttämään kasvinsuojeluaineita enemmän kuin perinteisessä viljelyssä.

Maa- ja metsätalousministeriön antama asetus integroidun torjunnan yleisistä periaatteista (07/2012) velvoittaa viljelijää pitämään kirjaa sekä kasvinsuojeluaineiden käytöstä että kasvintuhoojien esiintymisestä. Integroidun viljelyn periaatteiden mukaisesti kemiallista torjuntaa käytetään vain silloin, kun se on välttämätöntä. Laki kasvinsuojeluaineista (1563/2011) edellyttää, että ammattimaisesti kasvinsuojeluaineita käyttävien on suoritettava tutkinto aineiden asianmukaisesta käytöstä, ja että käytettävät ruiskut on tarkastettava määrääjain.

Kasvinsuojeluainevalmisteille on rekisteröinnin yhteydessä määrätty käytön rajoituksia, joilla pyritään suojelemaan ympäristöä. Esimerkiksi kulkeutuvia aineita ei saa käyttää pohjavesialueilla ja hitaasti hajoavia aineita ei saa käyttää toistuvasti samalla pellolla (Mattsoff 2005). Suomessa vesistörajoitukset olivat aiemmin vaaraperusteisia ja aineen myrkyllisyyden perusteella määritettiin metrimääräinen vähimmäisetäisyys ruiskutusalueen ja vesistön välille. Vesistörajoitusten määrittäminen muuttui riskiperusteisiksi vuonna 2013. Sen jälkeen vesistöjen rannoille jätettävän suojakaistan leveyteen on vaikuttanut aineen myrkyllisyyden lisäksi kulkeutumisriski ja aineen käyttömäärä. Viljelijä voi vähentää kulkeutumisriskiä esimerkiksi ruiskun suutintyyppin valinnallaan. Huolellisella aineiden käsittelyllä voidaan vähentää erityisesti pistemäistä kuormitusta. Vertailemalla kenttäkokeiden ja seurantalutkimusten tuloksia eri maissa on todettu, että suuri osa vesistöissä havaituista kasvinsuojeluaineista on peräisin pistemäisistä kuormituslähteistä kuten ruiskujen pesuvesistä.

Kasvinsuojeluaineiden siirtymistä viljelyksiltä vesistöön voidaan estää esimerkiksi suojakaistojen avulla. Kasvinsuojeluainepitoisuuksien on todettu pienentyneen myös kosteikoissa, joiden läpi peltojen valumavedet kulkevat ennen purkautumistaan jokiin tai järviin. Ulkomaisissa tutkimuksissa myös säätösalaajitus on vähentänyt joidenkin kasvinsuojeluaineiden päästöjä pintavesiin.



Maaperän vesitalouden järjestely

5 Maaperän vesitalouden järjestelyn lähtökohdat

5.1 Johdanto

Viljely edellyttää maan vesitaloudesta huolehtimista. Maan kuivatuksella varmistetaan kasvien ja maan kantavuuden edellyttämä kuivavara. Kastelulla turvataan kasvien veden-saanti kuivien kausien aikana.

Peruskuivatuksella, jossa kuivatusvedet johdetaan valtaojien tai perattujen luonnonuomien kautta jokiin ja järviin sekä edelleen mereen, luodaan edellytykset paikalliskuivatuk-selle. Ilman toimivaa peruskuivatusta paikalliskuivatukseen ei toimi. Suomen peltopinta-ala on ainakin kertaalleen peruskuivatettu. Suurin osa on kuivatettu ennen 1970-lukua ja uomien peruskorjaustarve on suuri.

Paikalliskuivatus tehdään nykyään yleensä salaojituksen avulla. Salaojitetun pellon hyötypinta-ala on suurempi kuin avo-ojitetun pellon hyötypinta-ala. Salaojitus vaikuttaa ravinnehuhtoutumien koostumukseen ja ajankohtiin. Salaojituksen kuivatustehokkuutta voidaan säätää käyttämällä säätösalojitusta. Suurin osa salaojituksista on Suomessa tehty 1960–1980-luvuilla ja noin 60 prosenttia pelloista on salaojitettu. Nykyisistä ojitusmää-ristä on merkittävä osuus täydennysojituksia, salaojien kunnossapitotöitä ja tilusjärjeste-lyjen yhteydessä tehtäviä ojituksia. Avo-ojissa olevien peltojen osuus on noin kolmasosa ojitustarpeessa olevasta pinta-alasta.

Metsäojituksella, jolla käsitetään sekä veden vaivaamien kangasmaiden että soiden ojituksia metsätaloutta varten, on Suomessa suuri merkitys. Uudisojituksia ei enää tehdä, mutta kunnostusojitustarve on suuri.

Kastelun merkitys Suomessa on melko pieni ja nykyisin kastellaan lähinnä erikoiskas-veja, mutta tulevaisuudessa kastelun merkitys saattaa lisääntyä myös viljakasveilla ja nur-mella. Kastelulaitteilla oli vuonna 2013 mahdollista kastella noin 102 000 hehtaaria peltoa tai puutarhamaata eli noin 4,5 % käytössä olleesta maatalousmaasta.

Tässä luvussa esitetään maan kosteuden säädön tavoitteet ja menetelmät sekä luodaan katsaus näitä toimenpiteitä käsittelevään lainsäädäntöön ja esitellään luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteita ja soveltamisnäkökohtia.

5.2 Yleiset tavoitteet

Maan kosteuden säädöllä pyritään maata kuivattamalla tai kastelemalla luomaan kasville mahdollisimman edulliset kasvuolosuhteet ja pitämään maan kantavuus ja rakenne hyvinä. Vesitalouden säädöllä voidaan vaikuttaa myös pelloilta vesistöön tulevaan kiintoaine- ja ravinnekuormaan sekä torjunta-aineiden huuhtoutumiseen ja kasvihuonekaasupäästöihin.

Kasvien tarve

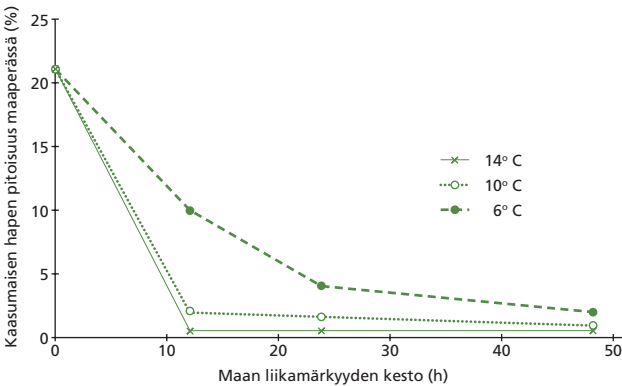
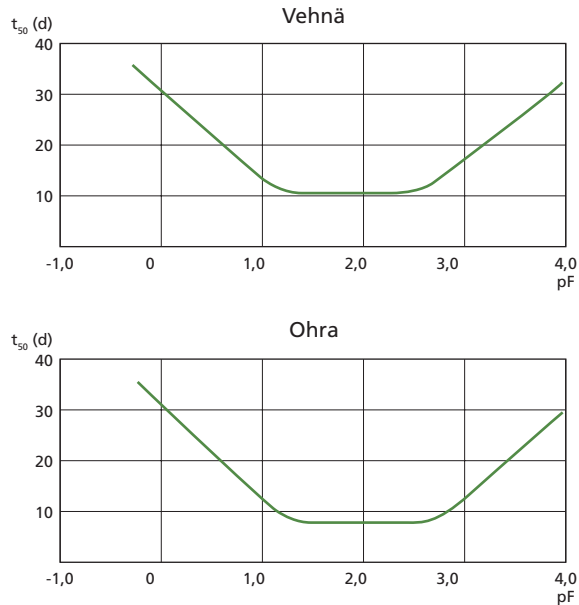
Kasvien kasvun kannalta keskeisiä tekijöitä ovat auringon säteily, maan ja ilman lämpö-tila, maan kosteus, maan rakenne, hapen ja hiilidioksidin määrä maaperässä ja ravinteiden saanti. Maaperän huokosissa olevan veden ja ilman suhde vaihtelee ja parhaimman sadon saamiseksi näiden kasvutekijöiden suhteen pitäisi olla optimissa kussakin kasvin kasvu-vaiheessa. Kasvien itäminen ja orastuminen riippuvat maan ja ilman lämpötilasta ja maan kosteudesta. Maan lämpeneminen tapahtuu maan ilmanvaihdon ja maa-aineksen lämmön-

johtavuuden välityksellä. Koska vedellä on korkeampi lämpökapasiteetti kuin maalla, kuiva maa lämpenee nopeammin kuin märkä maa. Tästä syystä maan kuivuminen keväällä edistää myös maan lämpenemistä ja siten siementen itämistä. Maan kosteuden vaikutus nähdään kuvassa 5.1, jossa esitetään vehnän ja ohran 50 prosentin itävyyteen kulunut aika eri pF-arvoilla lämpötilan ollessa 10 °C (ks. Luku 3, Vedenpidätyskäyrä).

Liian märkä maa johtaa maassa hapen puutteeseen (kuva 5.2), mikä estää useimpien kasvien siementen itämisen. Vaikka joidenkin kasvien siemenet kestävät hapen puutetta pitkäänkin, useimmat kärsivät jo muutaman tunnin hapen puutteesta.

Kasvien kasvu riippuu kasvien läpi virtaavan veden määrästä, johon maankosteus ja haihdunta vaikuttavat. Mitä suurempi haihdunta on sitä parempi on yleensä kasvien kasvu. Todellisen haihdunnan osuus (E_t) kyseessä olevan kasvin suurimmasta mahdollisesta haihdunnasta (E_{pot}) riippuu maaveden painepotentiaalista (h_p), joka riippuu maan kosteudesta. Jos maa on liian märkää tai liian kuivaa, haihdunta pienenee ja kasvuston kehitys hidastuu (ks. Tietoruutu 3.3 Kasvien vedenotto). Pellon vesitalouden säädöllä pyritään kunkin kasvin osalta saavuttamaan maan kosteus, jossa haihdunta on maksimissaan (kuva 5.3). Kuvassa 5.4 on esitetty veden kyllästäjän maan vaikutusta syysvehnän orastumiseen. Liian suuri maankosteus tuhoaa yleensä itävyyden kokonaan eikä ainoastaan siirrä sitä myöhemmäksi.

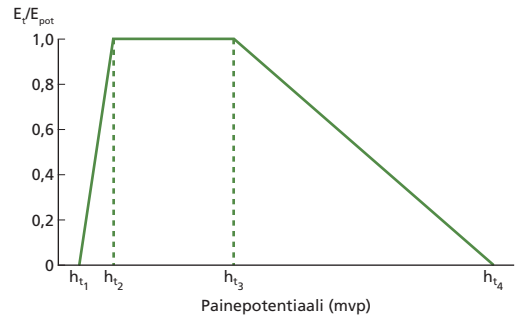
Kuva 5.1
Vehnän ja ohran itämisaika, kun 50 % siemenistä on itänyt maan eri vedenpidätysarvoilla (pF-arvoilla) lämpötilan ollessa 10 °C (Tenhovuori1986).



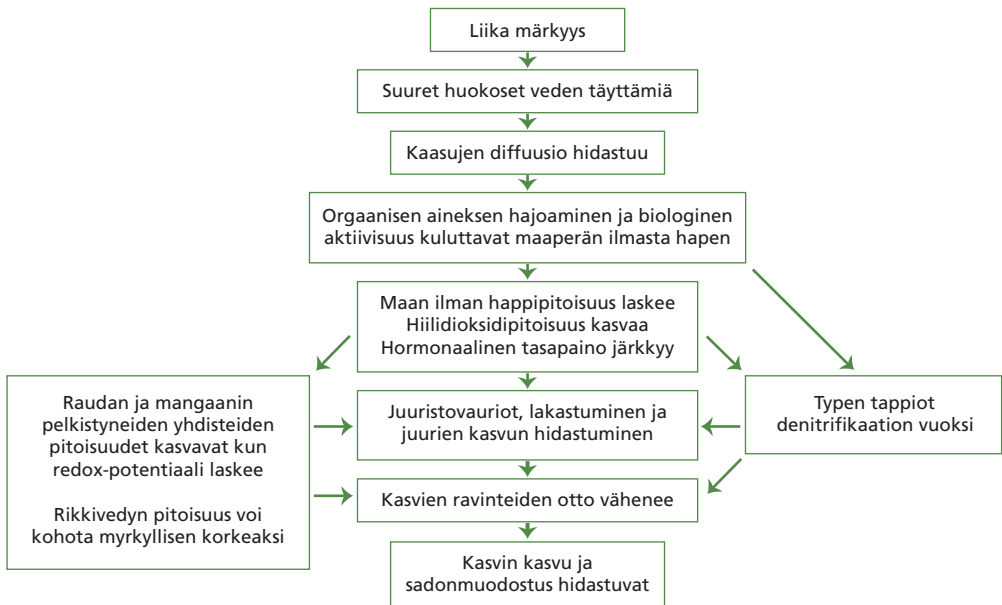
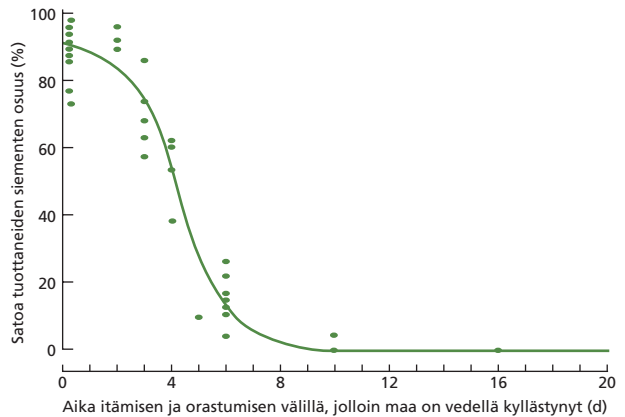
Kuva 5.2
Kaasumaisen hapen pitoisuus maaperässä maan liikamärkyyden keston funktiona eri lämpötiloissa (Skaggs ja van Schilfgaarde 1999).

Kuva 5.3

Todellisen haihdunnan ja potentiaalisen haihdunnan suhteen riippuvuus maaveden painepotentiaalista (Feddes ym. 1978).

**Kuva 5.4**

Itämisen ja orastumisen välillä sattuneen märkyuden vaikutus syysvehnän satoon (Skaggs ja van Schilfgaarde 1999).



Kuva 5.5 Yhteenveto maan liiallisen märkyuden aiheuttamista reaktioista, jotka haittaavat sadonmuodostusta.

Maan ilmanvaihto on yksi keskeisimmistä kasvien kasvuun ja sadonmuodostukseen vaikuttavista tekijöistä (ks. kohta 4.2, Maan happitalous ja sen merkitys). Riittämätön kuivatus rajoittaa maan biologista aktiivisuutta. Sen seurauksena maaperään muodostuu yhdisteitä, jotka haittaavat itämistä ja juurten kasvua. Juurten kasvun pysähtyminen hidastaa kasvua ja saattaa johtaa koko kasvin kuihtumiseen. Kuvassa 5.5 on havainnollistettu keskeisimmät tekijät, joihin kasvualustan märkyys vaikuttaa haitallisesti.

Maan huokosista tulisi olla ilman täyttämiä 4–50 % maalajista ja kasvin kasvuvaiheesta riippuen. Maassa olevan ilman koostumus ei saisi poiketa merkittävästi ilmamekan koostumuksesta, jossa happea on 20 % ja hiilidioksidia 0,03 %. Maan happipitoisuus ei saisi laskea juuristokerroksessa alle kahdeksan prosentin. Mikäli kaikki huokokset ovat veden täyttämiä yli kaksi vuorokautta, happipitoisuus voi laskea tuona aikana alle kahden prosentin. Hapen siirtyminen määssä maassa on noin 10 000 kertaa hitaampaa kuin maassa, jossa ilmanvaihto voi tapahtua ilman täyttämien huokosten kautta.

Kasvin tuottaman energian avulla juurissa säilyy alhainen vastus ja veden siirtyminen lehtiin ei aiheuta lakastumista. Syvä ja hyvin kehittynyt juuristo varmistaa, että ravinteiden otto on mahdollisimman tehokasta. Syvä juuristo varmistaa myös sen, että kasvusto kestää lyhyitä kuivia jaksoja. Sopiva lierokanta varmistaa osaltaan hyvää kuivatusta.

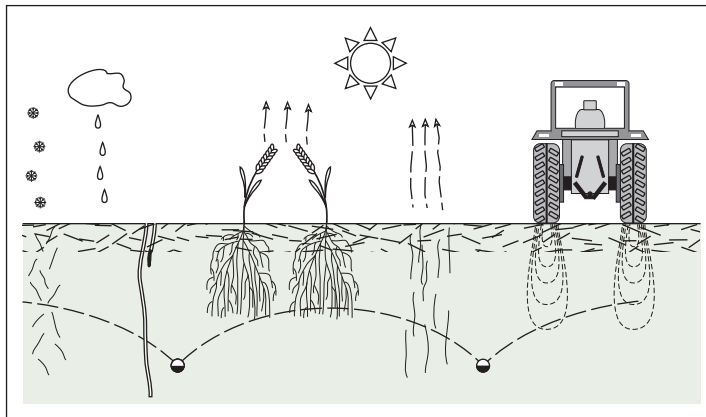
Pellon kantavuus ja maan rakenne

Riittävä pellon kantavuus kevään viljelytoimia ja syksyn sadonkorjuuta varten varmistaa koko kasvukauden mahdollisimman tehokkaan hyödyntämisen. Myöhäisen kylvön aiheuttamaa menetystä ei juuri voi muilla toimenpiteillä korvata. Kasvukauden lämpötilasumma rajoittaa useimpien kasvien kasvua loppukesästä, joten kylvön aikaisuudella on merkittävä vaikutus sadon määrään.

Pellon hyvä kantavuus varmistaa, että viljelytoimet eivät vaurioita maan rakennetta. Maan rakenteen ylläpito ja kuivatus vaikuttavat toisiinsa monella tavalla kuten kuvasta 5.6 ilmenee (ks. kohta 2.8 Maan rakenne). Suomen savipelloilla maan tiivistyminen on ongelma. Raskaat maatalouskoneet, yksipuolinen viljely ja maan puutteellinen kuivatus aiheuttavat maan tiivistymistä. Savipeltojen vedenläpäisevyys riippuu erityisesti makrohuokosista, joita ovat kasvien juurten ja lierojen tekemät reiät sekä roudan ja kuivumisen aiheuttamat halkeamat. Tehtyjen havaintojen mukaan maa jankon yläosassa tiivistyy kuivatuksen kannalta epäsuotuisaksi jo varsin kevyiden koneiden vaikutuksesta, mikäli ne liikkuvat pellolla sen ollessa märkä (Vakkilainen 1980).

Kuva 5.6

Kuivatuksen ja maan rakenteen välinen yhteys. Pellon kuivatus estää maan tiivistymisen, mahdollistaa juurten hyvän kasvun sekä makrohuokosia synnyttävien lierojen esiintymisen.



Ympäristövaikutukset

Ihminen muokkaa toiminnallaan veden luontaista kiertokulkua. Veden virtausreitit ja luontaisesti vesistöihin huuhtoutuvien aineiden pitoisuudet ja määrät muuttuvat. Maan kuivatuksella ja kastelulla vaikutetaan maahan varastoituviin vesimääriin ja veden virtauksiin. Kuivatuksen ja kastelun ajankohtaa ja määrää säättämällä voidaan vaikuttaa vesistöihin kulkeutuvaan kiintoaineen ja ravinteiden kuormitukseen ja sen ajankohtaan.

Pelloilta purkautuvat pinta- ja salaojavalunnat sisältävät ravinteita, erityisesti fosforia ja typpeä, kiintoainetta ja torjunta-aineita (ks. kohta 7.6 Salaojituksen ympäristövaikutuksia). Myös metsäojitus- ja turvetuotantoalueilta tuleva kuormitus voi olla huomattavaa. Varsinkin ravinnekuormitus saattaa aikaa myöten rehevöittää pintavesiä ja heikentää selvästi veden laatua ja vesistön tilaa. Happamilta sulfaattimailta tulee lisäksi pintavesien happamuutta lisäävää kuormitusta. Happamien valumavesien mukana kulkeutuu myös metalliyhdisteitä (ks. kohta 4.2, Rikki ja happamat sulfaattimaat).

Maa- ja metsätalouden vesirakennuksen toimenpiteet on aiemmin usein toteutettu siten, että niiden seurauksena eliöiden elinympäristöt ovat yksipuolistuneet. Nykyinen suuntaus on, että mahdollisimman laajasti tulisi soveltaa luonnonmukaisen vesirakennuksen periaatteita uomien rakentamisessa ja kunnossapidossa. Tavoitteita ovat kasvi- ja eläinlajiston monipuolistaminen ja vesistökuormituksen pienentäminen. Samoihin päämääriin tähdätään rakentamalla kosteikkoja ja perustamalla suojavyöhykkeitä vesistöjen varsille (ks. kohdat 5.6 Luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteet ja 6.4 Peruskuivatuksen viesnsuojelu ja ympäristönhoito).

Reginan (2015) mukaan osa peltomaan ravinteista ja orgaanisesta aineksesta vapautuu ilmakehään mikrobien tuottamina kaasumaisina päästöinä. Toimiva kuivatus saattaa vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä kivennäismailla rajoittamalla maan liiallista kosteutta. Eloperäisten maalajien kaasumaiset päästöt taas ovat sitä suuremmat, mitä tehokkaampi on ojitus. Ojitus mahdollistaa turpeeseen kertyneen eloperäisen aineksen hajotuksen koko vesipinnan yläpuolisessa kerroksessa. Tyypillisesti turvemaan painuminen on 0,5-2 cm vuodessa, ja se jatkuu niin kauan kuin eloperäistä maakerrosta on vedenpinnan yläpuolella.

Peltojen paikalliskuivatuksessa kuivatustehokkuuden säädöllä ns. säätöojitusta käytetään on mahdollista vähentää kuivatusvesien mukana tulevaa ravinnekuormitusta ja lisätä kasveille käyttökelpoisen veden määrää maaperässä (ks. kohta 8.6 Säättösalaojituksen vaikutukset). Happamilla sulfaattimailta säätöojituksella voidaan vähentää happamuuden ja metallien vapautumista potentiaalisesti happamista maakerroksista (ks. kohta 8.6). Säättösalaojituksella voidaan myös hidastaa eloperäisen aineksen hajoamista turve- ja multaissa ja siten vähentää kasvihuonekaasupäästöjen vapautumista ilmakehään.

Kastelun laajamittaiseen käyttöön liittyy monia haitallisia ympäristövaikutuksia, kuten liiallinen vedenkäyttö, pohjaveden pinnan pysyvä lasku, suurten patojen rakentaminen ja veden laadun heikkeneminen. Sopimaton kastelumenetelmä ja kuivatuksen puuttuminen kasteluilla alueilla saattavat aiheuttaa maan ja veden suolaantumisen tai maan soistumisen. Suomen olosuhteissa oikein suoritettulla kastelulla voidaan lisätä kasvien ravinteiden ottoa ja vähentää siten huuhtoutumisalttiiden ravinteiden määrää maaperässä.

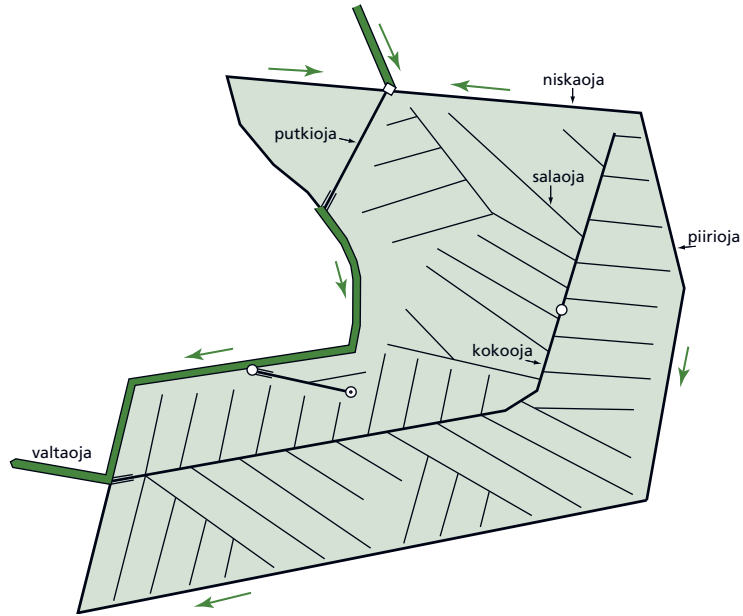
5.3 Maankuivatus- ja kastelumenetelmät

Maankuivatuksella tarkoitetaan vahinkoa ja haittaa tuottavan veden poisjohtamista maa- ja vesialueelta niin, että tätä voidaan käyttää kasvintuotantoon, asutukseen, tiealueena jne. Myös alueen valtaaminen meren ja järvenpohjasta on maankuivatusta. Maatalousalueiden maankuivatus luokitellaan yleisesti peruskuivatukseseen ja paikalliskuivatukseseen, joiden lisäksi on huolehdittava myös tulvasuojelusta. Tulvasuojelulla pyritään tulvien ja nii-

den haittavaikutusten poistamiseen tai vähentämiseen. Tulvasuojelun pääasiallisia keinoja ovat jokien ja purojen perkaukset tai pengerrykset sekä vesistöjen säännöstelyt. Metsäojitus jakaantuu uudis(ensi-)ojitukseen ja kunnostusojitukseen. Kunnostusojituksella tarkoitetaan ennestään ojitettujen alueiden ojien perkaamista ja täydentämistä.

Peruskuivatuksella tarkoitetaan maan kuivattamiseksi suoritettavaa valtaojien rakentamista ja perkaamista, purojen vedenjohtokyvyn parantamista ja pienehköjen pengerrysten rakentamista.

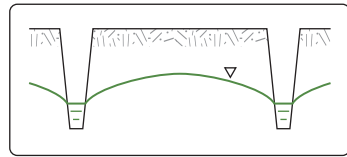
Paikalliskuivatuksella johdetaan ylimääräiset vedet pois viljelylohkolta. Paikalliskuivatuksen muotoja ovat *salaojitus*, *avo-ojitus* ja *pellon pinnan muotoilu*. Paikalliskuivatuksen kuuluvat myös piiri- ja niskaojat sekä tilan omat sisäiset pienet valtaojat, joilla pidetään lohkon ulkopuoliset vedet pois itse lohkolta tai johdetaan kuivatusvesiä peruskuiva-



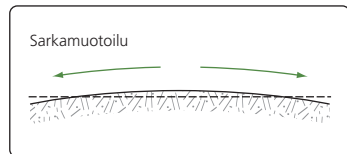
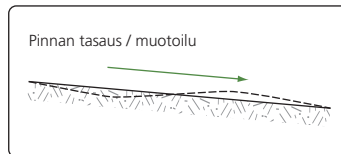
Kuva 5.7
Periaatekuva peltoalueen kuivattamiseksi.

Kuva 5.8
Tyypikkuvat paikalliskuivatuksen eri muodoista.

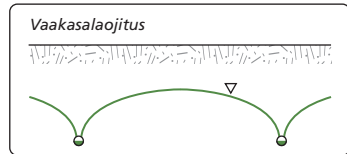
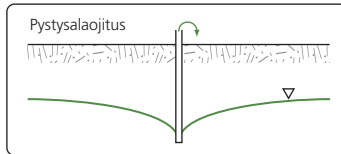
Avo-ojitus

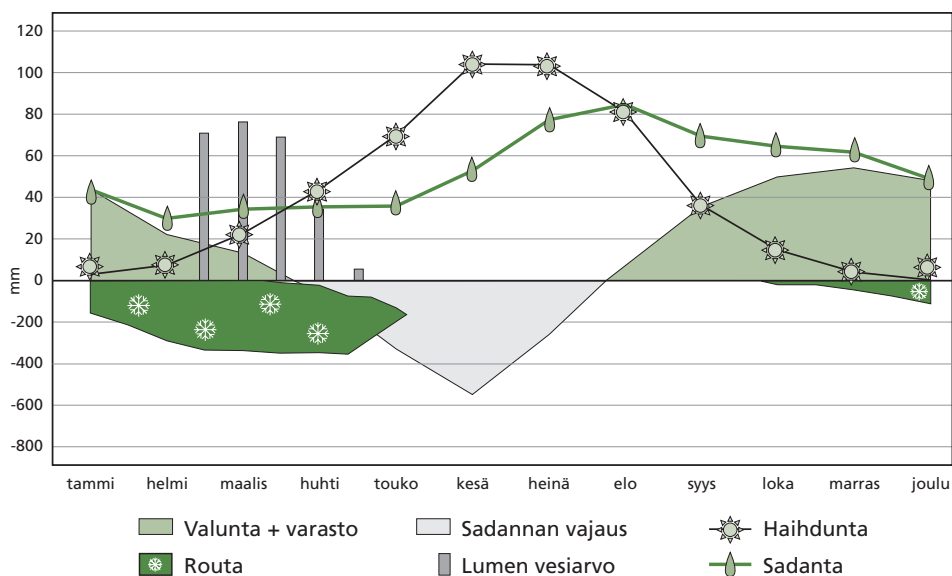


Pintakuivatus



Salaojitus





Kuva 5.9 Kuivaustarve. Sadannan, sulannan ja haihdunnan erilainen jakautuminen vuodenaikojen välillä vaatii viljelysmaiden tehokasta kuivaustusta.

tusjärjestelmään (kuva 5.7). Kun alue ojitetaan ensimmäisen kerran, puhutaan *ensiojituksesta*. *Täydennysojituksessa* kuivaustusta tehostetaan lisäämällä ojia esimerkiksi olemassa olevien ojien väliin. *Uusintojituksessa* ojitus uusitaan kokonaan.

Salaoitusmenetelmiä on kahta päätyyppiä, vaaka- ja pystysalaoitus. Vaakasalaoitus on vallitseva salaoitusmuoto. Pystysalaoitusta käytetään, kun kuivatetaan paineellista pohjavettä tai poistetaan suolaantunutta pohjavettä. Paikalliskuivatusmenetelmiä on havainnollistettu kuvassa 5.8.

Säätöojituksella tarkoitetaan kuivatusvesien padottamista sala- tai avo-ojastoon. Kun säätöojitus toteutetaan säätämällä salaojaston kautta purkautuvaa valuntaa, puhutaan *säätösalojituksesta*. Salaojitusta voidaan käyttää kuivatuksen lisäksi tietyissä olosuhteissa myös kasteluun.

Kastelumenetelmät

Kastelumenetelmät voidaan jakaa maanpinnan yläpuolelta ja maanpinnan alapuolelta tapahtuvaan kasteluun. Maanpinnan yläpuolelta tapahtuvat kastelumenetelmät ovat *valu-*, *sadetus-* ja *tippukastelu*.

Maanpinnan alapuolelta tapahtuvat kastelumenetelmät ovat *altakastelu* ja *tihkukastelu*. Tihkukastelussa maahan upotetun kasteluputkiston kautta tihkutetaan vettä muokauskerrokseen. Altakastelussa (pohjavesikastelu, salaojakastelu) säädetään pohjavedenpinnan korkeutta avo-ojia tai salaojia (säätösaloitus) padottamalla tai johtamalla niiden kautta lisää vettä maaperään.

5.4 Maankuivatuksen ja kastelun tarve ja kehitys Suomessa

Suomessa suuret sademäärät suhteessa haihduntaan syksyisin ja lumen sulaminen keväällä johtavat suuriin valumiin (kuva 5.9). Suomen maaperä on hyvin tiivis, koska se on pääosin syntynyt jääkaudella ja sen jälkeen veden alla. Ilman kuivaustusta tasainen maasto ja huonosti vettä läpäisevä maaperä johtavat vettä pois pellolta viljelyn kannalta usein liian

hitaasti. Riittävän kuivatuksen myönteiset vaikutukset satotasoon perustuvat kylvön aikaisumiseen, kasvuston hyvään itämiseen, orastumiseen ja kasvuun, maan kantavuuteen ja ilmavuuteen sekä kasvualustan terveyteen. Kasvukauden aikana haihdunta on keskimäärin suurempi kuin sadanta, jolloin kastelu voi olla tarpeen. Kastelu on kuitenkin Suomessa nykyisin kannattavaa vain erikoiskasvien osalta.

Puuston kasvuolosuhteita parannetaan metsäojituksella sekä veden vaivaamilla kangasmailla että soilla. Maan vesitaloudellista optimia ei ole puuston kasvun kannalta yleispätevästi pystytty selvittämään. Kasvualustan vesitalouden vaikutus puuston kehitykseen riippuu suuresti puuston kehitysvaiheesta. Käytännössä sarkaojituksella ei ole mahdollista saavuttaa koko saralla samaa kuivatussyvyyttä. Suomessa on yleensä katsottu, että puunkasvatusta varten tulisi saavuttaa keskimääräin 40 cm:n kuivatussyvyys (Päivänen 2007).

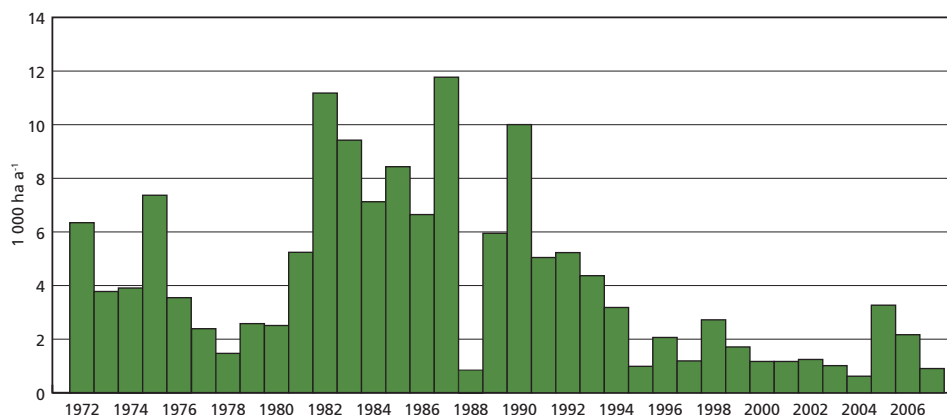
Suon käyttö turvetuotantoon edellyttää sen tehokasta kuivatusta ennen varsinaisen tuotannon käynnistämistä. Nykyään suuri osa turvetuotantoon otettavista uusista soista on aikaisemmin metsäojitettuja, jolloin ojitus sisältää olemassa olevan ojaston kunnostuksen sekä tiheimmän sarkaojaston ja eristysojien kaivun.

Maankuivatuksen kehitys

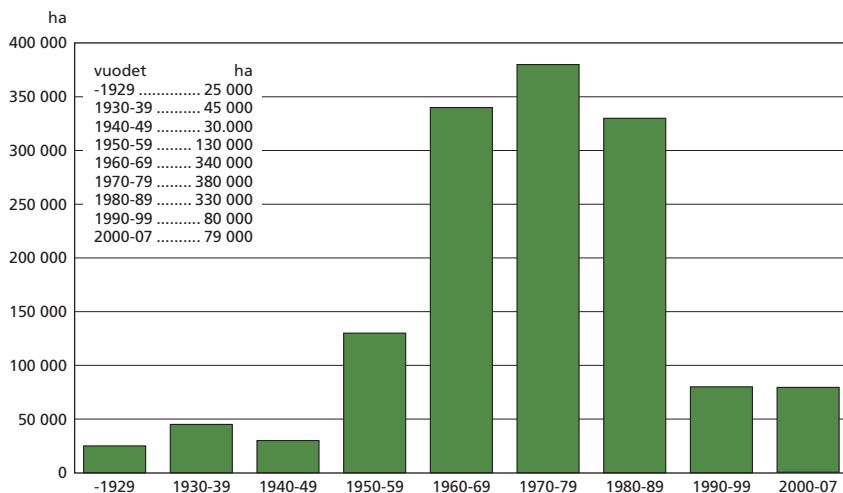
Viljelyn yleistyessä Suomessa otettiin ensin käyttöön kuivat rinnemaat ja ahot, joilla maa kuivuu luonnostaan viljelytoille ja kasveille sopivaksi. Uutta viljelysmaata saatiin kuivatamalla soita ja myös järviä laskemalla. Suot olivat hyviä viljeltäväksi, vaikka vaativatkin kuivatusta. Kuivatustöitä tehtiin kuitenkin melko sattumanvaraisesti 1800-luvun puoliväliin asti, jonka jälkeen valtiovallan toimesta pyrittiin määrätietoiseen maataloustuotantoon (Paavolainen 1989). Suurin osa peruskuivatuksista tehtiin 1940 - 1980 välisenä aikana ja lähes kaikki viljelyalueet on Suomessa ainakin kertaalleen peruskuivatettu. Tänä päivänä uomien peruskorjaustarve on suuri.

Peruskuivatuksen ojitustoimitushakemukset ovat vähentyneet 1990-luvulta lähtien huomattavasti. Kun hakemuksia oli vuonna 1990 noin 800 kpl, oli niitä enää vuonna 2007 noin 120. Vastaavasti ojitustoimituksissa käsiteltyjen hankkeiden yhteinen vuosittainen hyötypinta-ala putosi noin 10 000 hehtaarista noin 1 000 hehtaariin (kuva 5.10).

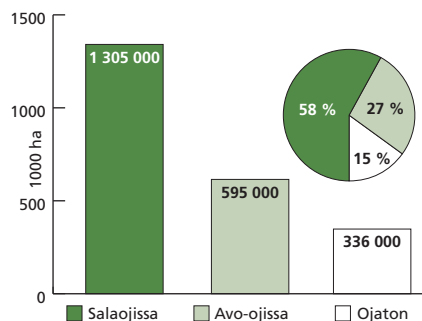
Suunnitelmallisen putkisalaojituksen tiedetään Suomessa alkaneen 1850-luvulla, jolloin maahan tuotiin ensimmäiset koneet tiiliputkien tekoa varten. Määrät kasvoivat merkittävästi vasta, kun siirryttiin lapiokaivusta konekaivuun 1950-luvun alussa. Tiiliputkesta siir-



Kuva 5.10 Ojitustoimituksissa käsiteltyjen peruskuivatushankkeiden yhteinen vuosittainen hyötypinta-ala vuosina 1972–2007.



Kuva 5.11 Salaojitusmäärien kehitys kymmenvuotiskausittain.



Kuva 5.12

Paikalliskuivatuksen jakautuminen vuonna 2007.

ryttiin muoviputkeen 1980-luvulla. Tämän kehityksen taustalla oli korrugointitekniikalla valmistettu muoviputki, jonka valmistustekniikka kehitettiin Saksassa ja putkityyppi tuli markkinoille 1965. Kiepile pakattu putki nopeutti aurasalaojitustekniikan käyttöönottoa. Samaan aikaan kehittyi myös laser-tekniikkaan perustuva salaojakoneiden ojasyvyyden säätö. Peltosalaojitus toimi kyseisen tekniikan uranuurtajana, jota on sittemmin sovellettu laajasti maa- ja vesirakennusosalalla. Salaojitusten suunnittelu alkoi siirtyä atk-ympäristöön 1980-luvun puolivälissä. Ensivaiheessa siirtyminen tapahtui maastotiedon keruussa. Tällöin kohteen tiedot voitiin mitata digitaaliseen muotoon ja hyödyntää tulosteita suunnittelussa. Viimeisimpänä kehitysvaiheena on ollut GPS-sovellusten käyttöönotto niin suunnittelussa kuin salaojakoneiden ohjauksessa.

Pellolta purkautuvien valumavesien ravinnepitoisuuksiin alettiin kiinnittää huomiota 1970-luvulla, kun vesiensuojelu nousi yleisen mielenkiinnon kohteeksi. Peltojen kuivatuksen tavoitteisiin tulivat mukaan vesiensuojelulliset näkökohdat. Myös salaojituksen mahdollisuuksia ravinnehuuhtoumien vähentämiseksi alettiin selvittää. Kehittämistyön tuloksena ilmeni, että pellon kuivatustehokkuuden säädöllä voidaan vaikuttaa valumavesien määrään ja laatuun. Tutkimustoiminnan seurauksena kehittyi käytännön sovellutuksena säätösalojitus. Säätösalojitusta on käytetty 1990-luvusta lähtien vähentämään ravinnehuuhtoutumia.

Valtio tuki salaojitusta aina 1980-luvun lopulle. Tuolloin salaojituksen valtion tukea alettiin vähentää, koska sen arvioitiin lisäävän maatalouden ylituotantoa. Suomen liittyessä Euroopan unioniin 1995 salaojitukselle myönnettiinkin vain korkotukilainaa. 1990-luvun loppupuoli oli salaojituksessa laman aikaa, tuolloin vuosittaiset määrät putosivat

5 000 hehtaariin. EU-tuet ja maatalouden rakennekehitys piristivät salaojituksia uudelleen vuosituuhannen vaihteessa, jonka jälkeen vuosittaiset määrät ovat olleet keskimäärin 10 000 ha. Salaojitusmäärien kehitys kymmenvuosittain on esitetty kuvassa 5.11. Koko peltoalasta on salaojissa lähes 60 % eli 1,4 milj. ha, avo-ojissa on peltoa vielä 0,6 milj. ha (kuva 5.12).

Metsäojituksen historia alkoi varsinaisesti vuonna 1908 valtion mailla. Puutavarayhtiöiden metsissä toteutettiin ensimmäiset laajahkot metsäojitukset 1910-luvulla. Vuonna 1928 tuli voimaan metsänparannuslaki, jolla varattiin valtion budjetissa rahaa soiden kuivatukseen sekä muiden tuottamattomien tai vähätuottoisten metsämaiden saattamiseen tuottavaan kuntoon yksityisillä ja valtion mailla. Ennen toista maailmansotaa Suomessa arvioitiin olevan metsäojitettua pinta-alaa jo runsaat 600 000 hehtaaria. Ojitusmäärä alkoi nousta 1950-luvun alussa ja koneellisen metsäojitustoiminnan alettua 1950-luvun puolivälissä kaivumäärät moninkertaistuivat. Metsäojitustoiminta jatkui vilkkaana 1960-luvun alkupuolella, jolloin useilla metsäohjelmilla pyrittiin lisäämään metsäpinta-alaa ja metsien tuottokykyä.

Valtakunnan metsien inventointien mukaan soiden ja veden vaivaamien kankaiden ojituspinta-ala oli vuonna 2013 noin 6 miljoonaa hehtaaria. Koko Suomen metsätalousmaasta ojitettujen soiden ja veden vaivaamien kankaiden osuus oli noin 23 %.

Suometsiin on ojituksen seurauksena kertynyt huomattava puuvarasto. Metsäojitusalueet tarvitsevat kivennäismaametsiä enemmän huoltoa. Ojat kasvavat umpeen tai olosuhteet muuttuvat turpeen painumisen johdosta siten, että vanha ojitus ei enää toimi. Tällöin ojia on perattava tai tehtävä täydennysojia. Tilannetta parantaa se, että ojitusalueelle kehittynyt puusto haihduttaa merkittävän osan liiasta vedestä. Valtakunnanmetsien inventointien mukaan arvioidaan kunnostusojitustarpeen olevan noin 1,6 miljoonaa hehtaaria.

Kastelun kehitys

Suomessa huomattiin jo varhain, että parhaat luonnonniityt olivat syntyneet sellaisten purojen ja jokien varsille, joiden tulva levisi niitylle. Veden mukana kulkeutunut liete toi uutta ravintoa maalle ja vesi esti sammaleen muodostumisen. Jo 1700-luvulla maassamme on vesitetty niittyjä. Vanhimmat kastelutavat ovat syntyneet pohjoisessa ja ne ovat padotuskastelu ja valutuskastelu.

Padotuskastelu toteutettiin rakentamalla suon tai korven läpi virtaavaan puroon sulku ja annettiin maan olla veden alla muutamia vuosia. Tämän jälkeen jään alla oleva vesi laskettiin kevättalvella pois, jolloin jääkuori tasoitti epätasaisuudet. Tähän alkoi pian kasvaa heinää. Niitty hoidettiin padottamalla vesi niitylle keväällä jäiden sulamisen jälkeen. Vesi laskettiin pois 1-2 viikkoa ennen heinäntekoa. Joissain tapauksissa käytettiin myös talvikastelua lähinnä sammaleen kasvun ehkäisemiseksi.

Valutuskastelua tehtiin siten, että lähellä olevasta purosta kaivettiin johtokanava niityn yläpuolelle ja veden annettiin valua rinnettä pitkin. Valutusvesi koottiin rinteen alla ja johdettiin takaisin puroon. Vesi johdettiin monesti varsin kaukaa, esim. Kuusamossa Torangin vesiniitylle vesi johdettiin kuuden kilometrin päästä. Valutusniittyjä hoidettiin kuten padotusniittyjä sillä erotuksella, että talvikastelua käytettiin harvoin, koska valutuksessa ei voida muodostaa jääpoltetta estävää vesikerrosta.

1700-luvun puolella välissä kasteltiin maata padotus- ja valutuskastelun lisäksi myös ihmisvoimin, tuulimyllyillä ja vetojuhtien avulla. Järvenlaskujen seurauksena syntyi paljon puolikuivia vesijättöniittyjä, joita hoidettiin padotuskastelulla. Vaikka kastelu kohdistui pääosin niittyihin, peltojakin kasteltiin. Tämä tapahtui todennäköisesti pohjavesipadotuksella.

Maiden kastelu oli 1700- ja 1800-luvuilla paljon yleisempää kuin nykyään niittyjen merkityksen vähennettyä. Sadetuskastelu tuli Pohjoismaihin 1920-luvulla, mutta otettiin laajemmin käyttöön vasta 1940-luvulla. Kastelukoneiden kehittyminen 1970-luvulla lisäsi nopeasti kastelun käyttöä.

Nykyisin Suomessa käytetyin kastelumenetelmä on sadetuskastelu. Jonkin verran käytetään myös salaoja- ja tihkukastelua. Käytännön merkitystä kastelulla on lähinnä vihannesten, marjojen, perunan ja muiden erikoiskasvien viljelyssä. Sadetuskastelua käytetään myös hallantorjuntaan erikoiskasvien viljelyssä. Tulevaisuudessa kastelun merkitys saattaa Suomessakin lisääntyä, jos kuivuuskaudet yleistyvät ja maataloustuotteiden hinnat tekevät siitä taloudellisesti kannattavaa.

Koko Suomen vesitasetta tarkastellen kasteluveden riittävyys ei näyttäisi aiheuttavan ongelmia, koska erilaisiin hyötykäyttötarkoituksiin vettä otetaan vain noin 2 % Suomen kokonaisvirtaamasta. Tästäkin valtaosa kuluu yhdyskuntien ja teollisuuden vedentarpeeseen kastelun osuuden ollessa vähäinen. Suomessa ei myöskään lämpimien maiden tapaan ole rakennettu laajoja kastelua palvelevia vedensiirtojärjestelmiä, vaan kastelu perustuu lähes kokonaan paikallisiin pinta- tai pohjavesiä hyödyntäviin ratkaisuihin.

5.5 Maankuivatusta ja kastelua koskeva lainsäädäntö

Yleinen ojitusoikeus

Lainsäädäntöön perustuva ojitusoikeus viljelys- tai metsämaan kuivattamiseksi periytyy kaukaa historiasta. Vuonna 1868 annetussa asetuksessa oli säädetty niistä ojitusta koskevista periaatteista, jotka osaltaan muodostivat vuonna 1902 säädetyn vesioikeuslain. Maanomistajalle suotiin oikeus tehdä oja tietyin ehdoin vaikka toisen maalle, jos se maan kuivattamiseksi oli tarpeellista, ja sama periaate säilyi vuoden 1962 vesilaissa. Nykyisessä, vuoden 2012 alussa voimaan tulleessa vesilaissa ojitusoikeudet ovat pääosin ennallaan.

Vesilaissa ojituksesta ja ojitustoimituksesta on säädetty luvussa viisi. Pienehköstä ojituksesta maanomistajat voivat sopia keskenään, mutta isompi ja sellainen ojitus, josta ei päästä sopimukseen, on käsiteltävä elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselta (ELY-keskus) haettavassa ojitustoimituksessa. Ojitustoimitus on esitetty Tietoruuksessa 5.1.

Ojituksesta ilmoittaminen

Hankkeesta vastaavan on ilmoitettava muusta kuin vähäisestä ojituksesta ELY-keskukselle kirjallisesti vähintään 60 vuorokautta ennen ojitukseen ryhtymistä. Ilmoituksen tulee sisältää tiedot hankkeesta vastaavasta, kuvaus hankkeesta ja sen ympäristövaikutuksista sekä hankkeen vaikutusalueesta (VL 5:6). Ilmoitusta ei tehdä niistä ojituksista, joista on valtion lupaviranomaisen, kunnan ympäristönsuojeluviranomaisen tai ojitustoimituksen päätös. Ilmoitusta ei myöskään tarvitse tehdä, jos ojituksesta on määrätty maantieteellaisissa tarkoitustissa tiesuunnitelmassa tai ratalaissa tarkoitettussa ratasuunnitelmassa. Salaojituksesta ei yleensä tarvitse tehdä ilmoitusta. Kaikista pohjavesialueella tai happamilla sulfaattimailla tehtävistä ojituksista ilmoitus tulee kuitenkin aina tehdä.

Aluehallintoviraston luvan tarve

Joissakin tapauksissa ojitukseen, ojan käyttämiseen ja kunnossapitoon tarvitaan aluehallintoviraston (AVI) lupa. Lupa tarvitaan, jos ojitus voi aiheuttaa

- ympäristönsuojelulain 3 §:n 1 momentin 1 kohdassa tarkoitettua pilaantumista vesialueella (VL 5:3, 1 kohta)
- vesilain 3 luvun 2 §:ssä tarkoitettuja (yleisen luvanvaraisuuden ylittäviä) seurauksia, jollei kysymys ole yksinomaan puron yläpuolisella alueella suoritettavan ojituksen aiheuttamasta puron virtaaman muuttumisesta (VL 5:3, 2 kohta)

Tietoruutu 5.1

Ojitustoimitus

Ojitustoimituksen pitäminen tulee yleensä tarpeelliseksi useita tiloja koskevissa yhteisissä ojitushankkeissa, joihin tarvitaan suunnitelma ja kustannusten osittelu. Toimitusta haetaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksesta (ELY-keskus). Ojitustoimituksen tarpeellisuus on määritelty vesilain 5 luvun 4 §:ssä.

Ojitusta koskeva asia, joka ei edellytä lupaviranomaisen (AVI) lupaa (VL 5:3), on käsiteltävä ojitustoimituksessa, jos

- ojituksella poistetaan tai pienennetään tulva-aluetta,
- ojituksella muutetaan huomattavasti vesien virtaamissuuntaa,
- oja on tehtävä maantien, kaapelin tai eräiden muiden vastaavien rakenteiden alitse eikä rakenteen omistaja tähän suostu,
- hyödynsaajia on vähintään kolme, eivätkä he pysty sopimaan yhteisestä ojituksesta
- ojitustoimituksessa aiemmin päätettyä suunnitelmaa muutetaan,
- kyse on ojitussyhteisön perustamisesta tai purkamisesta, tai
- kyse on ojitussyhteisön jäsenten oikeuksista ja velvollisuuksista.

Ojitussuunnitelma on laadittava, jos ojitus edellyttää viranomaisen lupaa, ojitustoimituksessa annettua päätöstä tai asian laatu tai laajuus sitä muutoin edellyttää (VL 5:15). Ojitussuunnitelman laatimisesta vastaa hakija tai muu hyödynsaaja. Jos ojitussuunnitelma on vesilain mukaan laadittava eikä suunnitelmaa ole esitetty, toimitusmiehen tai lupaviranomaisen on huolehdittava ojitussuunnitelman hankkimisesta.

Ojitustoimituksessa on pidettävä toimituskokous (VL 5:33), jossa käsitellään kaikki ojitustoimitukseen kuuluvat asiat. Toimitusmiehen (ent. toimitusinsinööri) on kutsuttava toimituskokoukseen ne, joiden oikeutta tai etua ojitusasia saattaa koskea. Toimitusmiehen on varattava valtion valvontaviranomaiselle, kalatalousviranomaiselle ja kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselle tilaisuus lausunnon antamiseen ojitushankkeesta. Ojitustoimituksessa on pidettävä toimituskokouksen lisäksi erillinen loppukokous (VL 5:34), jos ojitustoimituksessa on hyväksyttävä ojitussuunnitelma ja toimitusta koskevaan hakemukseen ei sisälly asianmukaista suunnitelmaa tai kyse on ojituksesta pintaveden ottamiseksi ojasta (VL 4:1).

Jos toimitusmies havaitsee, että ojitus tai sen yhteydessä toteutettava toimenpide edellyttää lupaviranomaisen lupaa, toimitusmiehen on kehoitettava toimituksen vireillepanijaa hakemaan mainittua lupaa (VL 5:32). Lupapäätöksessä tai ojitustoimituksen päätöksessä on vahvistettava ojitussuunnitelma, siihen liittyvä kustannusarvio ja osittelun sisältävä jakoluettelo. Ojitus saadaan panna toimeen vahvistetun ojitussuunnitelman mukaisesti. (VL 5:16)

Ojitustoimituksessa annettuun päätökseen voi hakea valittamalla muutosta Vaasan hallinto-oikeudelta. Muutosta voivat asianomaisen ja valtion sekä kunnan valvontaviranomaisen lisäksi hakea muut vesilaissa (VL 15:2) määrätyt tahot. Vaasan hallinto-oikeuden päätökseen haetaan valittamalla muutosta korkeimmalta hallinto-oikeudelta.

Lähteet: Ympäristöministeriö 2012, Järvenpää ja Savolainen 2015.

Käytännössä aluehallintoviraston luvan tarve tavanomaisissa ojitushankkeissa on melko harvinaista. Yleensä lupa on tarpeellinen puroluokan ojitushankkeissa, joissa perkauksesta saattaa aiheutua haittaa kalastukselle tai kalakannoille, tai jos perkaus vaarantaa puron luonnontilan.

Ojitus pohjavesialueella

Ympäristöhallinto on luokitellut pohjavesialueet kolmeen luokkaan käyttökelpoisuuden ja suojelutarpeen mukaan. Luokkaan I kuuluvat vedenhankintaa varten tärkeät pohjavesialueet, luokkaan II vedenhankintaan soveltuvat pohjavesialueet ja luokkaan III muut pohjavesialueet.

Pohjaveden laatuun ja määrään vaikuttava hanke, myös ojitus, on vaikutusten perusteella vesilain 3 luvun 2§:n mukaan luvanvarainen, jos muutos aiheuttaa pohjavesiesiintymän tilan huononemista, aiheuttaa vaaraa terveydelle tai olennaisesti vähentää tärkeän tai muun vedenhankintakäyttöön soveltuvan pohjavesiesiintymän antoisuutta tai muutoin huonontaa sen käyttökelpoisuutta tai muulla tavalla aiheuttaa vahinkoa tai haittaa vedenotolle tai veden käytölle talousvetenä. Pohjaveteen vaikuttavan lupahakemuksen sisältövaatimuksesta määrätään valtioneuvoston asetuksessa vesitalousasioista (4 §).

Ojituksen vaikutusten arviointi on tarpeen tehdä tapauskohtaisesti. Vaikutusten arviointi saattaa edellyttää, että pohjavesialueella mahdollisesti tehtävien ojien osalta tulee tehdä tarkemmat maaperäselvitykset sekä selvittää pohjaveden pinnan taso. Selvitysten tulokset toimitetaan ELY-keskukselle, joka niiden perusteella ottaa kantaa ojituksen toteuttamiseen ja luvan tarpeeseen. (Järvenpää ja Savolainen 2015)

Ympäristönsuojelulaki kieltää pohjaveden pilaamisen ja edellyttää luvan hakemista kaikkeen pilaantumisriskiä aiheuttavaan toimintaan, joka sijaitsee tärkeällä tai muulla vedenhankintakäyttöön soveltuvalla pohjavesialueella (YSL 17, 27 ja 28 §). Myös silloin kun ojituksesta voi aiheutua ainoastaan pilaantumista, lupa-asia ratkaistaan vesilain mukaan.

Ojituksesta aiheutuvien vahinkojen ehkäiseminen ja korvaaminen

Ojitus on toteutettava ja kunnossapidettävä siten, ettei toiselle kuuluvalla alueella aiheudu vahingollista vettymistä tai muuta vahinkoa. Toisen maalle tehtävä oja on sijoitettava niin, että siitä on maan omistajalle mahdollisimman vähän haittaa. Ilman toisen suostumusta avonaista ojaa eikä em. rakenteita saa tehdä toisen tontille, rakennuspaikalle, puutarhaan, varastopaikalle, uimarannalle tai muulle erityiseen käyttöön otetulle alueelle eikä myöskään salaojitetulle alueelle. Kaikki ojituksesta johtuvat vahingot on korvattava.

Kastelua koskevat säädökset

Kasteluveden ottoon vesistöstä tarvitaan aluehallintoviraston lupa, mikäli toiminnasta aiheutuu haittaa tai vahinkoa ottopaikan alapuolella asuville tai muille vettä käyttäville, tai jos yleistä etua loukataan. Veden ottamisesta ja käyttämisestä säädetään vesilain 4 luvussa. Kasteluvedenoton kannalta tärkeimpiä ovat 4 luvun 2-4 §. Vesistön muuttamiskielloista ja pohjaveden muuttamiskiellosta säädetään 3 luvun 2 §:ssä. Vesilain 4 luvun 2 § velvoittaa kunnan ympäristönsuojeluviranomaista antamaan tarvittaessa määräyksiä veden käytön rajoituksesta, jos vesistöstä ei riitä vettä kaikille sitä talousvedeksi tarvitseville.

Vesilain 2 luvun 10 §:ssä rajoitetaan myös pienten, vesistöksi luokittelemattomien uomien vedenkäyttöä, joskin uoman tai sen yläpuolisen altaan omistajan oma käyttötarve sallii jopa veden vapaan juoksun estämisen tai muuttamisen, ellei vettä alapuolella käytetä talousvedeksi. Luvanvaraisen kasteluviesihankkeen ehdoista säädetään vesilain 2 luvun 7

§:ssä ja 3 luvun 4 §:ssä, jossa tarkastellaan myös hankkeen hyödyllisyyttä intressivertailun kautta. Vesilain 4 luvun 5 §:ssä määrätään veden ottamistarpeiden yhteensovittamisesta usean hakiessa lupaa veden käyttämiseen nesteinä, ja mikäli vettä ei riitä kaikille. Lain mukaisessa etusijajärjestyksessä paikallista kastelukäyttöä ennen ovat kiinteistökohdainen käyttö ja paikalliset yhdyskunnan vesihuoltotarpeet. Jos otettava vesimäärä on yli $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, on siitä tehtävä ennakkoilmoitus ELY-keskukselle (VL 2:15).

Pohjaveden ottamisesta säädetään pääosin vesilain 4 luvussa. Pohjavettä saa ottaa kastelutarkoitukseen ilman aluehallintoviraston lupaa (VL 3:3) enintään $250 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, mikäli ei rikota 3 luvun 2 §:n pohjaveden muuttamiskieltoa. Jos pohjavettä otetaan yli $100 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, on siitä ilmoitettava kirjallisesti ELY-keskukselle vähintään 30 vuorokautta ennen toimenpiteen aloittamista (VL 2:15). Pohjavettä otetaan kastelutarkoituksiin harvoin.

Juha Järvelä

5.6 Luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteet

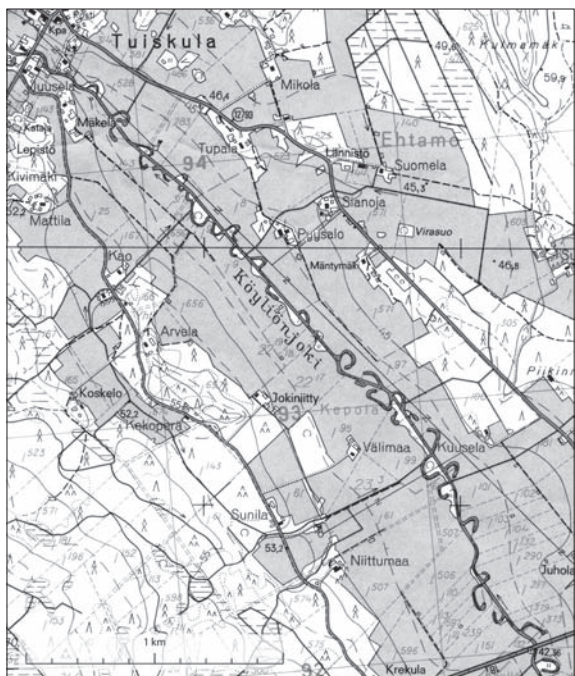
Johdanto

Suomessa maa- ja metsätalous ovat muuttaneet merkittävästi vesistöjen luonnontilaa (kuva 5.13). Laajimmat vaikutukset ovat aiheutuneet uittotoiminnasta, peltojen ja suometsien ojittamisesta, soiden raivaamisesta pelloiksi ja tulvasuojelusta. Huomattava osa Suomen joista ja puroista on jossain vaiheessa perattu. 1700-luvun loppupuolelta lähtien 1950-luvulle saakka laskettiin tuhansien järvien vedenpintaa tai kuivatettiin kokonaisia järviä viljelysmaan hankkimiseksi. Tulvasuojelutöitä on tehty lähes kaikilla rannikkoseudon joilla. Uomien perkaukset ja tulvasuojelu ovat useissa tapauksissa muuttaneet ja yksipuolistaneet virtavesien tilaa ja siten eliöiden elinolosuhteita. Toimenpiteet ovat mahdollisesti vaikuttaneet myös alapuolisen vesistön hydrologiaan, veden laatuun ja ekologiaan. Toisaalta maatalouden myötä on syntynyt kulttuuriympäristöjä ja niihin sopeutuneita eliöyhteisöjä, joiden olemassaolo on maatalouden tuotantotapojen muuttuessa käynyt uhanalaiseksi. Nykyiset ympäristönsuojelutavoitteet voivat siten tilanteesta riippuen tähdätä joko alkuperäisluonnon tai perinteisen kulttuurimaiseman säilyttämiseen.

Intensiivinen maankäyttö on monissa maissa johtanut tulvien ja kuivuuden lisääntymiseen, luonnon monimuotoisuuden vähenemiseen, maiseman turmeltumiseen ja veden laadun heikentymiseen. Monet ympäristöongelmat ovat edellyttäneet uusia vesirakentamisen toteuttamistapoja. Myös luonto- ja ympäristöarvojen korostuminen on mahdollistanut määrätietoisen vesistöjen kunnostamisen ja ennallistamisen sekä ympäristönäkökohdat paremmin huomioonottavan uudisrakentamisen. Suomessa virtavesiin liittyvää hoito- ja kunnostustyötä on tehty laajasti jo 1970-luvulta lähtien. Ensi vaiheessa hankkeet keskittyivät enimmäkseen veden laatuun, säännöstelyhaittojen vähentämiseen, jokien uittosääntöjen kumoamiseen liittyviin kunnostuksiin ja kalataloudellisiin kunnostuksiin. Vasta 1990-luvulta lähtien ekologisista näkökohtia on laajemmin kytketty uudisrakentamiseen.

Suomessa täysin uusia peruskuivatus- ja tulvasuojeluhankkeita maa- ja metsätaloutta varten ei nykyisin juuri tehdä. Tavoitteena on pikemminkin luopua tulvaherkkien alueiden viljelystä ja muuttaa niitä mm. suojavyöhykkeiksi ja kosteikoiksi. Myös asutuksen ja infrastruktuurin turvallisuusnäkökohtien perusteella tehdyt tulvasuojeluhankkeet on pääsääntöisesti loppuun saatettu. Olemassa olevat peruskuivatus- ja tulvasuojelukohdeet vaativat kuitenkin ylläpitoa, joten puroja ja jokia on perattava edelleen. Tässä tehtävässä luonnonmukainen vesirakentaminen on vakiintunut osaksi normaalia vesistöjen suunnittelu- ja rakennuskäytäntöä.

Kuva 5.13 Jokien perkaus ja suoristaminen ovat haitallisesti muuttaneet virtavesiympäristöjen ekologista tilaa. Esimerkiksi Köyliönjoella Eurassa on vuoden 1978 peruskartassa vielä hyvin havaittavissa erot vanhan ja peratun uoman linjauksessa.



Pohjakartta © Maanmittauslaitos luparno 261/MML/09

EU:n vesipolitiikan puitedirektiiviin (2000/60/EY) mukaan vesistöjen hoito ja käyttö on pääsääntöisesti suunniteltava siten, että vesistössä vallitsee 'hyvä ekologinen tila'. Aiemmin vesistöjen tilaa on arvioitu lähinnä vain veden laadun perusteella. Nyt keskeisessä roolissa on biologinen monimuotoisuus. Niin ikään vesistön morfologinen eli rakenteellinen monimuotoisuus ja hydrologisen kierron luonnonmukaisuus ovat tärkeimpiä ekologisia olosuhteita määrittäviä tekijöitä. Vesipolitiikan puitedirektiivi toteutetaan käytännössä lailla Vesienhoidon järjestämisestä (1299/2004), jonka periaatteiden mukaisesti tulee huolehtia vesistöjen ekologisen tilan säilyttämisestä ja parantamisesta tarvittaessa kunnostus- ja ennallistamistoimenpitein.

EU:n direktiivi tulvariskien hallinnasta (2007/60/EY) korostaa myös aiempaa enemmän luonnonmukaisempien tulvanhallintamenetelmien käyttöä. Teknisten toimien kuten penkereiden ja tekoaltaiden sijasta tulee keskittyä enemmän tulvien syihin, esimerkiksi maankäytön aiheuttamien hydrologisten muutosten rajoittamiseen. Tulva ymmärretään nykyisin luonnollisena ilmiönä, johon on sopeuduttava. Tarkastelu on siirtynyt enemmän yksittäisestä riskikohteesta valuma-alueitasolle ja on aiempaa kattavampi pitäen sisällään tulvien ehkäisyn, riskien ehkäisyn, tulvasuojelun ja operatiivisen tulvantorjunnan. Välineinä työssä ovat tulvakartat ja tulvariskien hallinnan suunnitelmat.

Luonnonmukaisen vesirakentamisen toiminta-ajatus

Luonnonmukainen vesirakentaminen pyrkii säilyttämään ja palauttamaan vesistöjen rakenteellisen (morfologisen) ja toiminnallisen (biologisen) monimuotoisuuden (kuva 5.14). Se on järjestelmällinen toimintamalli, joka rakentuu luonnontieteelliseen perustaan pohjautuvista ohjaavista periaatteista. Näiden periaatteiden avulla pyritään löytämään ratkaisu, joka on ekologisesti, teknisesti ja taloudellisesti perusteltu. Suomen ympäristökeskuksen käytännöllislähtöisemmän määritelmän mukaan luonnonmukaisella vesirakentamisella tarkoitetaan kaikkia vesistön rakenteeseen kohdistuvia toimenpiteitä, joilla pyritään vesis-

Vesistön luonne elintilana määräytyy fysikaalisista, kemiallisista ja biologisista tekijöistä. Fysikaalisiin tekijöihin lukeutuvat esimerkiksi veden vaihtuvuus, lämpö- ja säteilyolot ja pohjamateriaali. Kemiallisia tekijöitä ovat esimerkiksi happipitoisuus, happamuus ja erityisesti ravinteet. Keskeinen biologinen tekijä on ravintoverkko. Luonnon tilainen vesistö on sekä rakenteellisesti että toiminnallisesti monimuotoinen.

Rakenteellisen ja toiminnallisen monimuotoisuuden turvaaminen on ensiarvoinen periaate. Peratuissa tasapohjaisissa uomissa on elintiloja vain niukalle määrälle eliölajeja. Rakennetuissa uomissa pienetkin morfologiset parannukset monipuolistavat vesisyvyyden ja virtausnopeuden vaihtelua ja lisäävät vesieliöstölle sopivaa elinympäristöä eli habitaattia. Vyöhykkeisyys ja vaihtelevuus tarjoavat monimuotoisia ja muuttuvia elintiloja. Laajalti on hyväksytty, että monipuolisesta fyysisestä elinympäristöstä seuraa monimuotoinen eliöstö, mutta tämän käsityksen yleinen paikkansapitävyys on nyttemmin kyseenalaistettu esimerkiksi Pohjois-Suomessa tehtyjen virtavesikunnostusten seurantojen perusteella (ks. Louhi ym. 2011).

Tietoruutu 5.2

Luonnonmukaisen vesirakennuksen keskeiset käsitteet

Alle on koottu keskeistä käsitteistöä luonnonmukaisen vesirakennuksen näkökulmasta. Käsitteistön käyttö on epäyteneväistä niin Suomessa kuin ulkomaillakin. Lisäksi on tärkeä huomata, että eri tieteenalojen ja ammattiryhmien keskuudessa sama termi voidaan ymmärtää eri tavoin.

Luonnonmukainen vesirakentaminen on luonnontieteelliseen perustaan pohjautuva järjestelmällinen toimintamalli, joka pyrkii säilyttämään ja palauttamaan vesistöjen rakenteellisen (morfologisen) ja toiminnallisen (biologisen) monimuotoisuuden. Käytännössä luonnonmukaisen vesirakentamisen tavoitteena on vähentää ihmistoiminnan haitallisia vaikutuksia veden luontaiseen kiertokulkuun ja kunnostaa syntyneitä ympäristövaurioita. Luonnonmukaisen vesirakentamisen menetelmät pohjautuvat lähestymistapaan, jossa vesiympäristön rakenteelliset ratkaisut toteutetaan luonnon omia prosesseja hyödyntäen ja kopioiden.

Ekohydrauliikka tutkii fysikaalisten prosessien ja ekologisten vaikutusten välisiä kytköksiä vesiympäristöissä. Ekohydrauliikka yhdistää poikkitieteellisesti veden virtausmekaniikan ympäristösuunnitteluun ja ekologiaan. Ekohydrauliikan tutkimuksen käytännön tavoitteena on sovittaa yhteen vesivarojen hyödyntäminen ja ekologiset näkökohdat. *Habitaattihydrauliikka* keskittyy tarkastelemaan rajatun alueen virtausolosuhteita eliöstön näkökulmasta.

Ennallistamisella tarkoitetaan pyrkimystä palauttaa muutosta edeltänyt tila luonnollisine prosesseineen, mistä luonnon omat voimat jatkavat kehitystä. *Kunnostamisella* tarkoitetaan kulloisenkin tavoitteenasettelun mukaisia rakenteellisia ja toiminnallisia parantamistoimenpiteitä, mutta sitä ei käsitteenä ole sidottu edeltäneen tilan palauttamiseen. Kunnostamisella ei siis tässä ymmärretä perkauksia, raivauksia tms. toimia, jotka pääasiassa pyrkivät teknis-taloudellisen hyödyn saamiseen.

Vesistössä tehtävät kunnostamis- ja ennallistamistoimenpiteet voidaan jakaa kahteen toisistaan periaatteellisesti poikkeavaan ryhmään sen mukaan, ovatko toimet aktiivisia vai passiivisia. Aktiivinen kunnostaminen tai ennallistaminen käsittää toimenpiteet, joilla olennaisesti puututaan vesistön kehitykseen ja rakenteeseen. Esimerkkinä voidaan mainita oikaistun uoman uudelleenmuotoilu kaivamalla tai kosteikkoalueen palauttaminen. Passiivisessa kunnostamisessa pääpaino on luonnon omien prosessien, kuten eroosion ja kiintoaineksen kasaantumisen, hyödyntämisessä (luontainen sukkessio). Suomenkielen käsitteet *elvyttäminen* ja *elpyminen* vastaavat edellä mainittua ajatusta.

Elintilana uomaa ei voi yksinkertaisesti erottaa maa-alueesta, sillä rantavyöhykkeellä ja tulvatasanteella on keskeinen merkitys eliöstölle (kuva 5.15). Edellä mainitut alueet yhtäältä toimivat elintilana, mutta toisaalta vaikuttavat myös elinolosuhteisiin esimerkiksi tasoittamalla lämpö- ja säteilyolosuhteita. Luonnonmukainen rantavyöhyke on edellytys tiettyjen eliöiden esiintymiselle. Toiminnallisesti on tärkeää turvata vesistön poikittainen jatkuvuus (yhteys tulvatasanteeseen) ja pituussuuntainen jatkuvuus (kuva 5.16). Jatkuvuusperiaatteen mukaan vesistö pitää säilyttää läpikulkukelpoisena kaikille vesieliöille; toisin sanoen vesistö voidaan ymmärtää ekologiseksi käytäväksi.

Vesistön kunnostus- ja ennallistamishankkeiden lähtökohtana voidaan käyttää tavoitekuvatarkastelua. *Tavoitekuva* on kuvaus vesistön toivotuista ominaisuuksista pitkällä aikavälillä. Se voi perustua vesiympäristön nykyolosuhteita vastaavaan kartoitukseen tai johonkin historialliseen olotilaan. Kern (1992) on esittänyt kolmitasoisen jaon, joka edelleen perustuu kolmeen elementtiin. Tavoitekuvan perustana olevat elementit ovat:

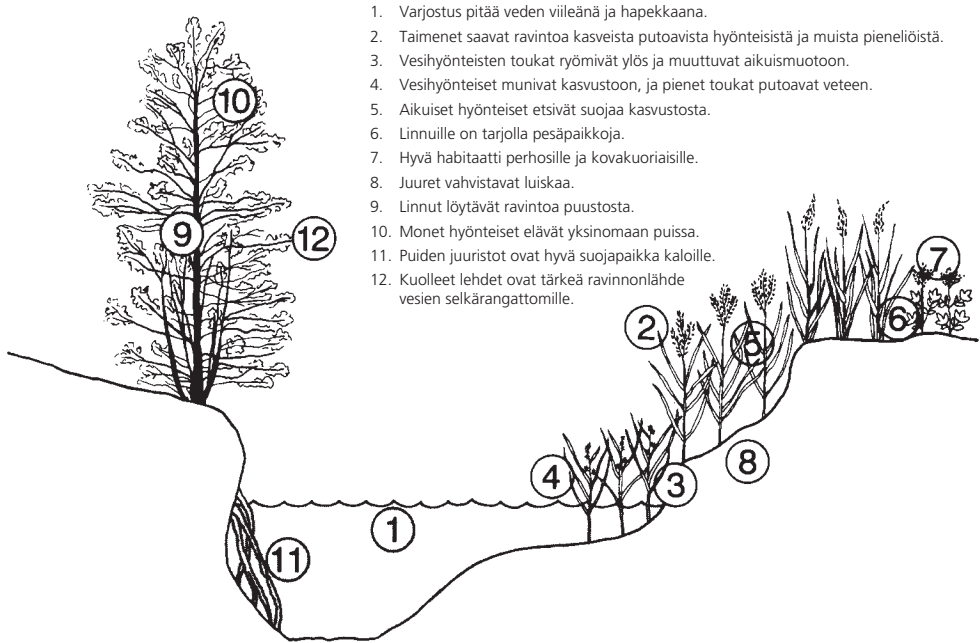
- 1) luonnolliset uomaominaisuudet (uoman muoto, morfodynamiikka, tulvatasanteen morfologia, luonnollinen virtaamadynamikka ja tulviminen, kasvillisuus jne.),
- 2) peruuttamattomat abioottiset tai bioottiset muutokset (valunta, sedimentin kulkeutuminen, alluviaalisten sedimenttikerrostumien poisto, hävinneet eliölajit jne.) ja
- 3) kulttuuriekologiset näkökohdat (lähinnä maatalouden tuotantotapojen muuttumisen aiheuttama eliölajien vaarantuminen).

Kolmiosaisen jaon ylatasona on ideaaliratkaisu, jossa ei tarvitse ottaa huomioon rajoituksia, kuten nykyistä maankäyttöä ja tulvanhallintaa. Tämä ei kuitenkaan ole tavallisesti mahdollista, joten päätettäväksi jää mitkä ekologiset näkökohdat ovat olennaisimpia. Tämä toinen taso edustaa optimiratkaisua nykyoloissa. Kolmannella tasolla käsitellään toteuttamiskelpoiset ratkaisut. Tavoitekuvatarkastelu on suunnittelussa tehokas työkalu, koska sen avulla hankkeita voidaan arvioida systemaattisesti. Asiaa on selostanut tarkemmin mm. Jormola ym. (2003) ja Järvenpää (2004).

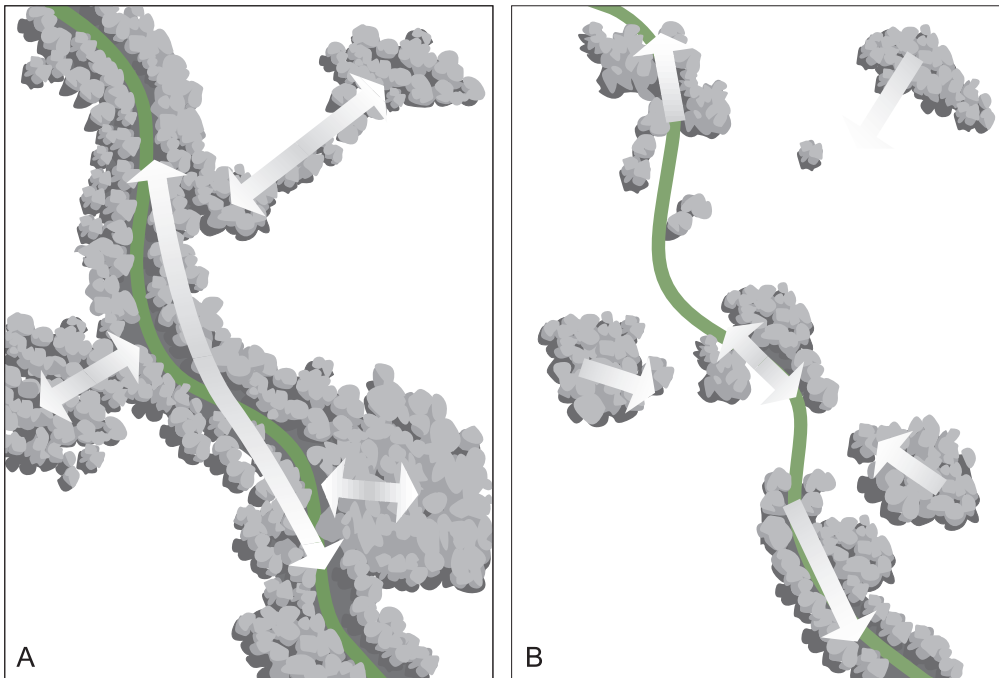
Soveltamisnäkökohtia kuivatus- ja kasteluhankkeissa

Peruskuivatushankkeissa pieniä virtavesiä on voitu muuttaa varsin voimakkaasti riippumatta niiden mahdollisista ekologisista arvoista. Niistä on poistettu luontaiset mutkat, kasvillisuus ja kivet sekä tasattu vaihteleva pohjan muoto uoman vedenjohtokyvyn varmistamiseksi. Uomia on suoritettu myös yhtenäisten ja selkeiden peltokuvioiden saamiseksi. Uomiin on saatettu tehdä erilaisia rakenteita, kuten rumpuja, putkioja ja pohjapatoja, jotka ovat katkaisseet uoman luonnollisen jatkuvuuden eliöiden kannalta. Peruskuivatusuotöiden yhteydessä peltoalueiden lähellä sijaitsevat kosteikot on suurelta osin kuivatettu ja otettu viljelykäyttöön. Luonnon monimuotoisuuden kannalta peratut uomat ovat hyvin yksipuolisia elinympäristöjä. Myöskään muita vesistövaikutuksia, kuten vaikutuksia alapuolisen vesistön hydrologiaan ja veden laatuun, ei aiemmissa ojitushankkeissa ole juurikaan otettu huomioon.

Perinteisellä tavalla toteutettavat ojitukset ja uomien perkaukset lisäävät mahdollisesti tulvimista alapuolisessa vesistössä ja pienentävät alivirtaamia. Peratussa ja suoristatussa uomassa lisääntyvät tyypillisesti eroosio, sedimentin kulkeutuminen ja kasaantuminen. Kun poikkileikkauskokoa kasvatetaan, vesisyvyys ja virtausnopeus alenevat, jolloin uoma alkaa helposti liettyä ja kasvaa umpeen. Aikaa myöten uomaan kertynyt kiintoaine ja kasvillisuus lisäävät tulvahaittoja ja vähentävät kuivatussyvyyttä, mikä aiheuttaa perkauksen tarvetta uudelleen.



Kuva 5.15 Rantavyöhykkeellä ja sen kasvillisuudella on keskeinen merkitys monien eliöiden kannalta (Madsen 1995).



Kuva 5.16 Esimerkki hyvästä (A) ja huonosta (B) jatkuvuudesta maisemassa. Jatkuvassa maisemarakenteessa ekologiset toiminnot ovat yleensä paremmassa tilassa kuin pirstoutuneessa maisemassa. (USDA 2001)

Perkaustoimenpiteiden lisäksi maatalousalueiden uomien veden laatua ja tilaa heikentävät peltoalueilta tulevien valumavesien mukana kulkeutuvat kiintoaine ja ravinteet. Salaojituksella vaikutetaan merkittävästi vesitaseeseen (valunta kasvaa) ja kiintoaineen sekä ravinteiden kulkeutumiseen (esim. Äijö ym. 2014, Turunen ym. 2015). Salaojitus lisää kokonaistyyppikuormaa, mutta sillä kyetään vähentämään pintavaluntaa ja siten eroosiota ja eroosioaineksen mukana kulkeutuvan fosforin ja torjunta-aineiden määrää. Peltojen paikalliskuivatuksessa siirtyminen avo-ojista salaojiin yksipuolistaa eliöiden elinympäristöjä ja vähentää maatalousalueiden monimuotoisuutta. Toisaalta salaojitus tasaa purojen ja valtaojien vesisuhteita ja kasvattaa alivirtaamia, mikä parantaa monien vesieliöiden elinmahdollisuuksia peratuissa uomissa.

Pelto- ja metsäalueiden peruskuivatusuomien perkauksissa ja peruskunnostuksissa voidaan luonnonmukaisen vesirakentamisen menetelmin turvata ja palauttaa vesistön morfologista ja biologista monimuotoisuutta. Menetelmien tavoitteena on myös lisätä uomien itsepuhdistuskykyä ja vähentää niiden kunnossapitotarvetta. Hankkeissa voidaan palauttaa myös kuivatettuja kosteikkoja alkuperäisille paikoilleen tai luoda aivan uutta kosteikkoympäristöä muun muassa tulvanhallintaa varten. Toimenpiteillä voidaan mahdollisesti parantaa myös purojen ja niiden alapuolisten vesistöjen veden laatua sekä purojen maisemallisia ja virkistyskäyttöön liittyviä ominaisuuksia. Maatalousuomissa lähtökohtana luonnontilaa parantaville kunnossapitotoimille on peltoviljelyn edellyttämän kuivatustilan säilyttäminen tai parantaminen.

Luonnonmukaisissa peruskuivatushankkeissa tulvanhallinnan tavoitteena on löytää tulvavesille varastoitumismahdollisuuksia perattavan uoman valuma-alueelta. Valuma-alueen maankäyttöä voidaan suunnitella uudestaan siten, että tulvaherkimpiä ja samalla usein ekologisesti arvokkaita ja taloudellisesti huonotuottoisia alueita siirretään aktiivisen viljelyskäytön ulkopuolelle esimerkiksi kosteikoiksi, suojavyöhykkeiksi tai laitumiksi. Ravinteiden huuhtoutumista tulvanalaisilta pelloilta saadaan siten vähennettyä ja samalla muodostettua alueita, joille huuhtoutumisen sijaan laskeutuu kiintoainetta ja pidättyy ravinteita.

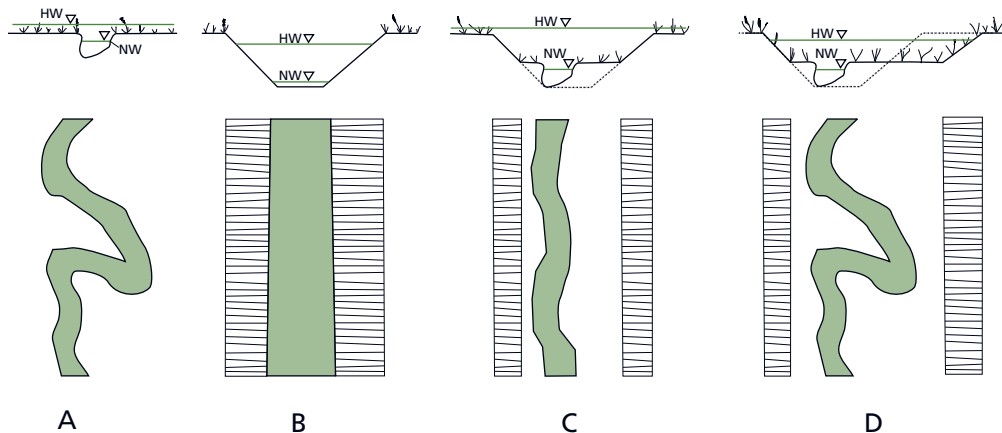
Maa- ja metsätalousalueiden purovesistöjen tilan parantaminen edellyttää yleensä toimenpiteitä paitsi itse vesistössä myös valuma-alueella. Kestävin tapa ongelmien ratkaisemiseksi on puuttua niiden syihin ja ennaltaehkäisyyn. Vähemmän kuormittavien viljelystoimenpiteiden lisäksi maataloudessa käytetään laskeutusaltaita, kosteikkoja, suojakaistoja ja -vyöhykkeitä pienentämään peltoalueilta tulevaa kiintoaine- ja ravinnekuormitusta. Myös metsätalouden vesistökuormituksen vähentämiseen käytetään pitkälti samoja menetelmiä. Niitä voidaan hyödyntää myös peruskuivatusuomien luonnonmukaisissa perkauksissa ja peruskunnostuksissa kuten edellä esitettiin. Valtaojien ja purojen varsien suojakaistoja ja -vyöhykkeitä on mahdollista kehittää aiempaa monimuotoisemmiksi vesi- ja peltoeliöstön kannalta. Suojavyöhykkeitä voidaan hyödyntää myös uomien mutkittelun palauttamisessa. Varsinkin kosteikkojen merkitys on moninainen, sillä ne tarjoavat elin-tilaa, suojaavat vesistöä, ylläpitävät pohjavedenpintaa, pidättävät kulkeutuvaa ainesta ja tasaavat valuntaa. Kosteikot ja uomasyvennykset edesauttavat eliöiden selviämistä myös valtaojaverkostossa kuivien kausien yli.

Peruskuivatusuomien ennen perkausta vallinnutta luonnontilaa on useimmiten mahdollonta saavuttaa mm. maanomistusolojen ja kuivatusvaatimusten vuoksi. Esimerkiksi alkuperäinen mutkitteleva uomalinjaus voi olla hankalasti palautettavissa, jos maanomistusrajat on sovittu edellisen perkaushankkeen yhteydessä suoristetun uoman kohdalle. Suoristetussa uomassa on tapahtunut usein luonnostaan syöpymistä ja mutkittelua, jota uudessa perkaushankkeessa on pyrittävä säilyttämään ja hallitusti edistämään erilaisin toimenpitein (kuva 5.17). Uoman ja rantavyöhykkeen vuotuisella pienimuotoisella hoidolla ja kunnostamisella voidaan jopa välttää massiivisen perkauksen tarve ja palauttaa siten uoma vähitellen lähemmäksi luonnontilaa. Tämän luontaisen elpymiskehityksen täysimääräinen

hyödyntäminen on kuitenkin maatalousalueilla usein mahdotonta, sillä se heikentää liiaksi peltojen kuivatusilaa. Maatalousuomissa luonnontilan elvyttäminen ja ennallistaminen tulevatkin kyseeseen lähinnä tietyillä uoman osuuksilla. Erilaisilla pienehköillä toimenpiteillä ja rakenteilla voidaan monipuolistaa perattavien uomien virtausoloja ja vedenkorkeuksia silloin, kun maankäyttö ei salli laajempaa luonnonmukaistamista.

Yksi keskeisimmistä kunnostusmenetelmistä on kaivutapa, jossa uoma kaivetaan poikkileikkaukseltaan vaihtelevaksi. Perinteinen tapa kuivatusuomien rakentamisessa ja perkaamisessa on ollut säännölliseen trapetsipoikkileikkaukseen perustuva malli. Uudempana ympäristöystävällisempänä ratkaisuna on esitetty pääuomasta ja tulvatasanteesta muodostuvia kaksitasouomia, joiden avulla kuivatus- ja ympäristönäkökohdat saataisiin paremmin yhteen sovitettua. Kaksitasouomien toimintaperiaatteena on, että alivesiuomassa säilyy kohtuullinen vesisyvyys pienemmilläkin virtaamilla, kun taas tulvatilanteissa vesi voi hallitusti nousta joko toiselle tai molemmille puolille kaivetuille tulvatasanteille (kuva 5.18). Kaksitasopoikkileikkauksessa virtausnopeuden pitäisi säilyä alivirtaamilla pääuomassa riittävänä estämään liettymistä, jolloin tällaisten uomien odotetaan tarvitsevan vähemmän ylläpitoa trapetsimaisiin uomiin nähden.

Kaksitasoisten uomien soveltamisesta maatalousympäristössä on kansainvälisestikin vielä verraten vähän ohjeistusta (USDA 2007), sillä suurin osa kokemuksista on peräisin tulvanhallintaa varten rakennetuista kaksitasouomista (esim. DVWK 1991). Yhdysvaltain Keskilännessä on kuitenkin rakennettu koekohteita, joiden perusteella on laadittu suunnitteluohteja maatalouden kuivatuksen näkökulmasta (Powell ym. 2007). Ennen kuin näitä

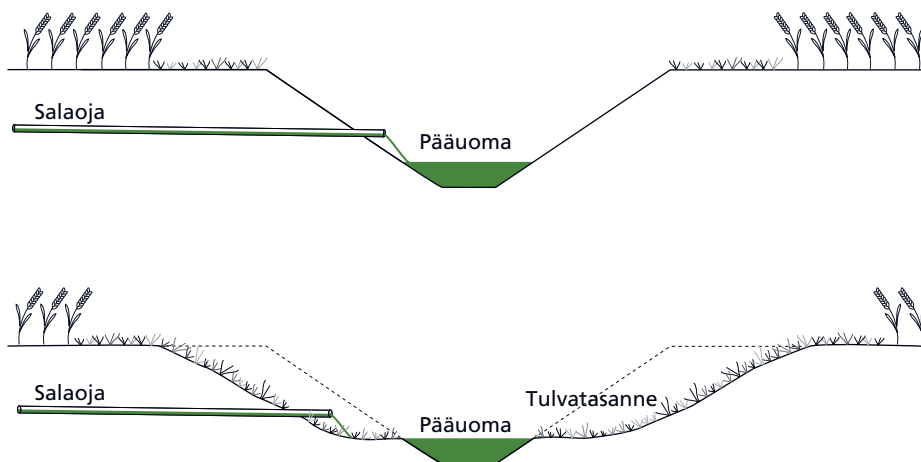


Kuva 5.17 Aikoinaan luonnontilainen pieni mutkitteleva uoma (A) perataan, jolloin sen poikkileikkauspinta-ala kasvaa, keskimääräisen kesäveden aikainen vedenpinta levenee ja vesisyvyys vähenee (B). Kesäaikaiset virtaamat eivät jaksa pitää uomaa avoimena ja uoma alkaa helposti kasvaa umpeen. Luontaisen kehityksen kautta muodostuu usein kesävirtaamaa vastaava pienempi alivirtaamauoma, joka pysyy avoimena (C). Kunnostettaessa umpeenkasvanutta uomaa on suositeltavaa lisätä sen tulvien aikaista vedenjohtokykyä leventämällä uomaa pienen alivirtaamauoman yläpuolelta (D). Alivirtaamauoma voi jatkaa luontaista kehitystä tulva-alueen sisällä, jolloin siitä voi muodostua luontaisen uoman (A) kaltainen uoma. Muodostunut tulvatasanne toimii korvaavana habitaattina alkuperäiselle tulvatasanteelle. Uusi alivirtaamauoma takaa kuivatussyvyvyyden säilymisen ja tulvatasanne riittävän vedenjohtokyvyn tulva-aikoina. (Järvenpää 2004)

uomasuunnitteluperiaatteita voidaan alkaa soveltaa Suomessa, tarvitaan lisää tutkimustietoa hienon sedimentin ominaisuuksista ja vaikutuksista kaksitasouoman kulkeutumis- ja kasautumisprosesseihin (Västilä ym. 2011). Aihepiirin tutkimusta on Suomessa suorittanut Aalto-yliopisto Ritobäckenin koekohteessa Sipoossa (kuva 5.19) (Västilä ja Järvelä 2011, Siitonen ym. 2013). Maastotutkimuksista on saatu näyttöä, että kaksitasouoman geometrialla ja tulvatasanteen kasvillisuuden ominaisuuksien säätelyllä voidaan vaikuttaa hienojakoisen sedimentin kulkeutumiseen ja kasautumiseen. Tulosten perusteella tulvatasanteen sopivasti hoidettu kasvillisuus voi parantaa vedenlaatua etenkin ylivirtaamien aikaan alentamalla hienon koheesiivisen sedimentin pitoisuushuippuja (Västilä ym. 2015). Uomaa mitoitettaessa ja ylläpidettäessä tulvatasannekasvillisuuden vaikutusta virtausvastukseen ja vedenkorkeuksiin voidaan ennustaa esimerkiksi kasvillisuuden peittämän poikkileikkauksen pinta-alan avulla.

Muita uoman kunnostusmenetelmiä ovat pohjakynnysten ja lietekuoppien rakentaminen, uoman mutkittelun lisääminen sekä luonnonmukaisten eroosiosuojausten rakentaminen ja uomien monipuolistaminen kivi- ja puuainesta lisäämällä. Kaikki toimenpiteet, joilla viivytetään veden säilymistä valtaojissa ja purouomissa kuivana aikana, parantavat eliöstön elinolosuhteita ja lisäävät siten kuivatushankkeeseen liittyvien uomien monimuotoisuutta. Erityisesti purojen osalta voi olla tarpeen kuivatuksesta vähän tinkimällä ja tarvittaessa pohjakynnyksin pyrkiä turvaamaan riittävä vesisyvyys uomassa kuivakin aikoina. Tärkeää on myös palauttaa hallitusti uomiin niiden luontaisia eroosio- ja sedimentaatioprosesseja. Yksityiskohtaisemmin luonnonmukaisen vesirakentamisen menetelmiä peruskuivatushankkeissa ovat selostaneet muun muassa Jormola ym. (2003), Näreaho ym. (2006) sekä Järvenpää ja Savolainen (2015).

Kasteluveden hankintaan voidaan yhdistää myös vesiensuojelun tavoitteita. Vedenhankinnassa voidaan hyödyntää uomalaajennuksia, laskeutusaltaita, kosteikoita ja pohjakynnyksiä. Esimerkiksi valtaojiin tehtävillä pohjakynnyksillä voidaan estää kaltevassa maastossa tapahtuvaa liiallista syvenemistä, jolloin uoman vedenpinta ja pohjaveden taso pysyvät korkeammalla. Tämä voi alentaa peltojen kuivumisherkkyyttä. Vesistön läpikul-



Kuva 5.18. Perinteinen trapetsipoikkileikkauksellinen uoma ja kaksitasouoma, johon tulvatasanne voidaan kaivaa toiselle tai molemmille puolin pääuomaa. Kaksitasopoikkileikkauksen etuna on hyvä vedenjohtokyky samalla kun kohtuullinen vesisyvyys pääuomassa turvataan alhaisillakin virtaamilla.

kukelpoisuuden turvaaminen eliöstölle pitää ottaa huomioon säännöstelyrakenteiden kuten patojen ja pohjakynnysten suunnittelussa.

Kaikki ratkaisut ja toimenpiteet tulee suunnitella kokonaisvaltaisesti siten, että ne palvelisivat useampia tavoitteita samanaikaisesti. Erilaisia rakenteita käytettäessä tavoitteet voivat kuitenkin joskus olla ristiriidassa keskenään. Esimerkiksi pohjapatojen rakentaminen voi olla toivottavaa virkistyskäytön, kasteluveden saatavuuden tai luiskasortumien estämisen vuoksi, mutta samalla uoma voi muuttua aliveden aikaan seisovaksi vedeksi ja menettää virtavesiluonteensa ja -eliöstönsä. Lisäksi luonnonmukaisten uomien hydraulisessa mitoituksessa on otettava huomioon, että morfologisesti monimuotoiset uomat poikkeavat virtausteknisiltä ominaisuuksiltaan olennaisesti poikkileikkauksiltaan säännöllisistä, oikaistuiista ja vähäkasvisista uomista (Järvelä ja Helmiö 2003). Luonnonmukaisissa uomissa karkeus useimmiten merkittävästi vaihtelee poikkileikkauksen eri osissa, jolloin virtausvastus voi olennaisesti muuttua vedenkorkeuden mukaan. Niin ikään virtausvastus voi ajallisesti merkittävästi vaihdella, esimerkiksi keskellä kasvukautta olla selvästi suurempi kuin lehdettömään aikaan. Luonnonmukaisia uomia ei tule kuitenkaan mitoittaa ylisuuriksi, sillä siitä aiheutuu turhien kustannusten lisäksi eroosio- ja liettymisongelmia sekä ekologisia haittoja. Uomien mitoittamista selostetaan tarkemmin luvussa 6.



Kuva 5.19. Ritobäckenin koekohteen kaksitasouomassa keskivedenkorkeutta suuremmat virtaamat pääsevät nousemaan toispuoleisesti kaivetulle tulvatasanteelle, joka parantaa tulvanjohtokykyä ja kiintoaineen pidättymistä (Kuva Kaisa Västilä).

6 Peruskuivatus

Raimo K. Nissinen

6.1 Johdanto

Peruskuivatuksella tarkoitetaan maan kuivattamiseksi suoritettavaa valtaojan perkausta ja puron virtausolosuhteiden parantamista sekä kuivatettavan alueen pengerrystä. Peruskuivatuksella mahdollistetaan tarvittava paikallisojitus, ja siihen voi kuulua myös tulvan alentaminen tai poistaminen.

Valtaoja on kaivamalla tehty uoma, jolla vedet kuivatettavalta alueelta johdetaan edelleen. Puro voi olla luontainen tai perattu uoma, joka on jokea vähäisempi virtaavan veden vesistö (kuva 6.1). Valtaoja on pääosan vuotta kuiva, kun taas purossa on suurimman osan vuotta tai aina virtausta.

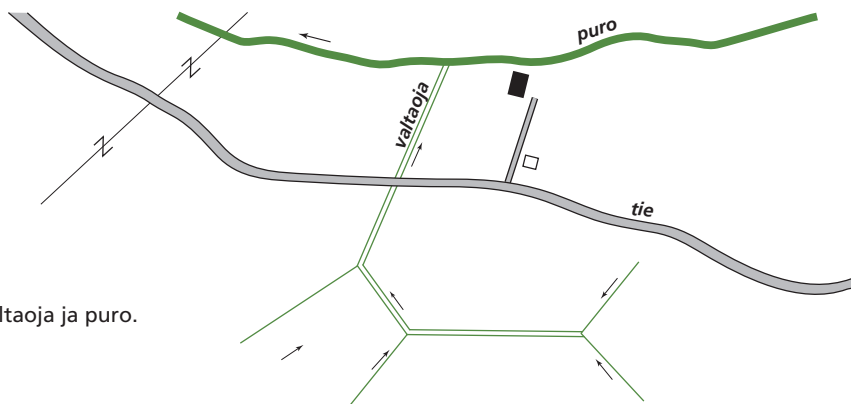
Ojituksesta säädetään vesilain 5 luvussa. Ojan tekeminen tai suurentaminen toisen alueelle voi perustua suostumukseen tai sopimukseen tai kunnan ympäristönsuojeluviranomaisen päätökseen. Vesilain (VL 5:6) mukaan ojituksesta on tehtävä kirjallinen ilmoitus ELY-keskukselle vähintään 60 vuorokautta ennen ojittamiseen ryhtymistä, ellei kyseessä ole vähäinen ojitus (ks. kohta 5.5 Ojituksesta ilmoittaminen). Usean tilan yhteisen ojituksen suunnitelma ja sen oleellinen muuttaminen on yleensä käsiteltävä ojitustoimituksessa (ks. Tietoruutu 5.1), jota haetaan ELY-keskukselta. Eräissä tapauksissa ojitukseen voidaan tarvita aluehallintoviraston lupa.

Vesilain mukaan peruskuivatus on yleensä ojitusta, mutta jos se edellyttää joen tai järven vedenpinnan alentamista, kysymyksessä keskiveden pysyvä alentaminen, josta säädetään vesilain 6 luvussa. Yhteisen hankkeen toteuttamista ja kunnossapitoa varten on yleensä perustettava ojitusyhteisö, kun hyödynsaajia on vähintään kolme ja ojitusta käsitellään aluehallintovirastossa tai ojitustoimituksessa. Ojitusyhteisön osakkaat, hyödynsaajat, voivat perustaa ojitusyhteisön myös sopimusojituksissa.

Uusia ojitushankkeita toteutetaan nykyään harvoin, ja ojitustyöt ovatkin useimmiten vanhan hankkeen kunnossapitoa tai peruskorjausta. Ojitusyhteisön päätöksellä voidaan suunnitelmasta vähäisesti poiketa, mutta jos hanke uusitaan merkittävilta osiltaan tai kokonaan, kysymys on peruskorjauksesta, ja sitä on käsiteltävä kuin uutta hanketta (Järvenpää ja Savolainen 2015).

6.2 Valtaojan mitoitus

Valtaojat voidaan mitoittaa tasaiseen virtaukseen perustuvilla kaavoilla, koska virtausnopeus ja vedenpinnan kaltevuus eivät muutu, jos ojan poikkileikkaus ja pohjan kaltevuus pysyvät riittävän pitkällä matkalla samana. Epätasainen virtaus muuttuu tasaisemmaksi



Kuva 6.1 Valtaoja ja puro.

myös muodoltaan vaihtelevissa uomissa virtaaman kasvaessa. Tasaiseen tulvavirtaukseen perustuvaa mitoittamista voidaan siten soveltaa myös luonnonmukaisiin uomiin tapauskohtaisesti harkiten. Tasaisena virtausta voidaan pitää pituussuunnassa vähäisesti vaihtelevissa luonnonuomissa ylivirtaamien aikana.

Valtaojan ja siihen kuuluvien rakenteiden mitoituksen tulee olla sellainen, että tarkoitettu kuivatus toteutuu niin peruskuivatuksen kuin tulvankin osalta. Näin ollen valtaojan virtauskyky on mitoittettava tulvavirtaamien mukaan huomioon ottaen, että oja on riittävän syvä paikallisojitusta varten. Valtaojien mitoituksessa on otettava huomioon myös maaperästä ja ojan syvyydestä johtuva tekninen minimimitoitus, jonka mukaan oja on tehtävä, vaikka tulvavirtaama olisi pieni. Purouomien osalta on tärkeää tarkistaa mitoitus myös keski- ja alivirtaamilla, jotta voidaan selvittää uoman virtaus ja sopiva muoto pienillä virtaamilla.

Vesilain (VL 5:15) mukaan ojitussuunnitelmassa (niissä hankkeissa, joissa sellainen on tarpeen) on kuivatussyvyyttä määrättäessä otettava huomioon maan laatu, kaltevuussuhteet ja kuivatustarve.

Valtioneuvoston asetuksen vesitalousasioista (24 §) mukaan avo-ojituksen kuivatussyvyys on kuivatuksesta johtuva maan painuminen huomioon ottaen 1,2 m, jollei asiasta toisin sovita. Kuivatussyvyys voidaan määrätä pienemmäksi, jos maan kuivattaminen edellä mainittuun syvyyteen aiheuttaa ojituksella saavutettavaan hyötyyn verrattuna kohtuuttoman suuria kustannuksia. Peltosalaojitus on määrättävä toteutettavaksi avo-ojitusta suurempaan syvyyteen, jos vähintään puolta ojituksesta saatavaa hyötyä edustavat hyödynsaajat sitä vaativat.

Valtaojien mitoituksessa ojan syvyys määräytyy ensisijaisesti salaojituksen vaatimusten mukaan huomioon ottaen tulvanaikainen kuivavara. Ojan pituuskaltevuus määräytyy yleensä maanpinnan luontaisen kaltevuuden ja maaston taitekohtien mukaan. Ojan pohjan korkeus ja pituuskaltevuus osoitetaan ns. tasausviivalla.

Valtaojan poikkileikkaus määräytyy tarvittavan kuivatussyvyyden sekä maan laadun ja ojan virtauskyvyn mukaan. Yleensä valtaojan poikkileikkaus määräytyy ojan syvyyden ja maalajille sopivan luiskakaltevuuden perusteella. Mitoitusvirtaaman ollessa määräävä ojan poikkileikkaus määräytyy myös ojan kaltevuuden ja leveyden perusteella.

Maan peruskuivatuksen tavoitteena on toisaalta luoda maapohjalle sopivat kasvuolosuhteet ja viljelytoimenpiteitä varten riittävä maan kantavuus. Toisaalta peruskuivatuksen tarkoituksena voi olla maan muun käyttömuodon edellytysten parantaminen. Riittävän kuivatuksen ohella ojan mitoituksella on merkitystä myös ojituksen ympäristövaikutuksiin.

Valtaojan perkauksessa ja erityisesti puron kunnostamisessa on tarpeen kiinnittää huomiota myös luonnonmukaisen vesirakentamisen menettelytapoihin, joita selvitetään lähemmin kohdassa 5.6 sekä tämän luvun Tietoruuduissa 6.1 ja 6.3 ja kohdassa 6.4 Peruskuivatuksen vesiensuojelu ja ympäristönhoito. Uomien ja rakenteiden oikealla mitoituksella ja muotoilulla sekä työn suorittamisella on oleellinen merkitys hankkeen vesistövaikutuksiin. Varsinkin purojen kunnostuksissa voidaan hankkeen luonnonmukaisuutta ja myönteisiä ympäristövaikutuksia lisätä erilaisilla vesiensuojelu- ja ympäristönhoitotoimenpiteillä.

Virtausyhtälöt

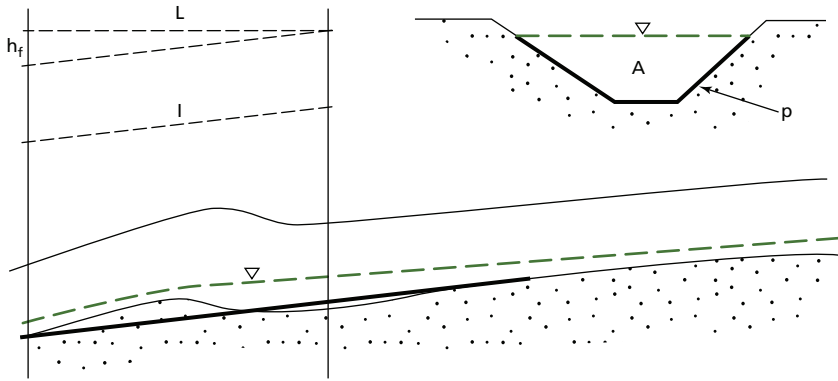
Uoman vedenjohtokyky riippuu uoman poikkileikkauksesta ja pituuskaltevuudesta sekä uoman virtausominaisuuksiin vaikuttavasta pohjan ja luiskien karkeudesta (kuva 6.2).

Valtaojan mitoitukseen käytetään yleisesti Manningin tasaisen virtauksen kaavaa

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (6.1)$$

joka perustuu Chezy'n tasaisen virtauksen kaavaan

$$v = C \cdot R^{1/2} \cdot I^{1/2} \quad (6.2)$$



Kuva 6.2 Uoman pituus- ja poikkileikkaus.

Chezy'n kerrointa C vastaa Manningin kaavassa $R^{1/6}/n$. Vastuskertoimella n , jonka sijasta on yleisesti käytössä myös $M = 1/n$, on siis määräävä vaikutus virtausnopeuteen. Tämä käy erityisesti ilmi matkalla L syntyvän putoushäviön kaavasta

$$h_f = \frac{n^2 \cdot v^2 \cdot L}{R^{4/3}} = \frac{n^2 \cdot Q^2 \cdot L}{A^2 \cdot R^{4/3}} \quad (6.3)$$

v = veden nopeus (m s^{-1})

R = hydraulinen säde (m) = A/p

p = märkäpiiri (m)

h_f = putoushäviö (m)

L = matka (m)

n = uoman vastuskerroin

A = vesipoikkipinta-ala (m^2)

I = uoman pituuskaltevuus

Q = virtaama ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Vastuskertoimen n arvot riippuvat lähinnä pinnan karkeudesta, kasvillisuudesta, poikkileikkauksen epäsäännöllisyydestä ja uoman mutkaisuudesta ja ne vaihtelevat virtaamasta ja vedenkorkeudesta sekä vuodenaikasta riippuen. Esimerkiksi kesän aikana ruohottunut uoma tulvii syksyllä herkemmin kuin keväällä tai purouoman pohja pysyy paljaana koko vuoden, vaikka luiskat ruohottuvatkin keväällä.

Valtaojan mitoituksessa lähdetään yleisesti siitä, että uomassa on vähän kasvillisuutta, jolloin $n = 0,030$ ja että kallioleikkaus on verraten tasainen, jolloin $n = 0,035$. Vastaperatussa uomassa, joka on suora ja vailla kasvillisuutta, vastuskerroin voi olla $n = 0,020$, kun taas uomassa, jossa on mättäitä tai kiviä ja ruohottuneet luiskat, se voi olla $n = 0,040$ – $0,050$. Sen sijaan kunnossapitämättömässä uomassa, jossa on paljon pensaita, vastuskerroin voi olla $n = 0,100$ tai suurempikin. Eri olosuhteita vastaavia vastuskertoimen arvoja on esitetty alan kirjallisuudessa (esim. Maa- ja vesirakennus 1968; Järvelä ja Helmiö 2003). Tietoruuudessa 6.1 on käsitelty vastuskertoimien määrittämistä ja arvoja luonnonmukaisessa vesirakentamisessa.

Valtaojissa virtaus on yleensä verkasvirtausta, mutta putouskohdissa se voi olla kiitovirtausta. Virtaus on verkasvirtausta, jos nopeus on pienempi kuin rajanopeus ja kiitovirtausta, jos nopeus on rajanopeutta suurempi. Rajanopeus voidaan laskea Frouden kaavasta, kun Frouden luku $Fr = 1$,

$$v = \sqrt{gh} \quad (6.4)$$

v = veden nopeus (m s^{-1})

h = veden keskisyyvyys (m)

g = maan vetovoiman kiihtyvyys (m s^{-2})

Rajanopeutta vastaavaa vesisyvyyyttä nimitetään rajasyvyudeksi ja virtaustilaa kriittiseksi. Huomattava on, että kiitovirtauskohdan alapuolella vedenpintaa voi jonkin verran nostaa ilman vaikutusta yläpuoliseen vedenkorkeuteen. Toisaalta kiitovirtauksen alapuolisella perkauksella ei ole mitään vaikutusta yläpuoliseen vedenkorkeuteen.

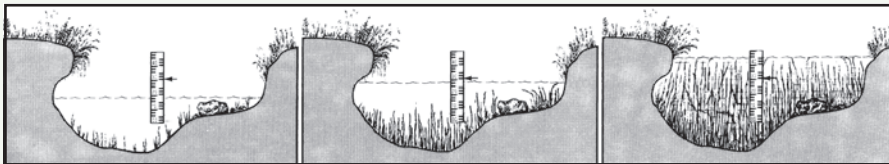
Tasaisen virtauksen mitoittamista voidaan käyttää joissakin tapauksissa myös uoman, esim. oikaistun puron, luonnonmukaiseen kunnostamiseen, erityisesti silloin, kun puron tulvi-

Juha Järvelä

Tietoruutu 6.1

Luonnonmukaisten uomien mitoituksen erityispiirteitä: morfologia ja hydraulikka

Vaihtelevanmuotoiset kasvillisuuden peittämät uomat poikkeavat hydraulisilta ominaisuuksiltaan olennaisesti säännöllisistä uomista. Vedenjohtokyvyn ohella on ratkaistava geomorfologinen mitoitusongelma: minkätyyppinen ja -kokoinen uoma vastaa valuma-alueen hydrologiaa, topografiaa ja maaperää. Uoman mitoituksessa on laskettava epäsäännöllisten poikkileikkausten, mutkien, vaihtelevan pohjan hydraulisen karkeuden, suvanto-virtapaikkavaihtelun ja kasvillisuuden vaikutukset virtaamiin ja vedenkorkeuksiin. Esimerkiksi kasvillisuuden hydraulisten vaikutusten luotettava arviointi yksinkin ilman muita em. tekijöitä on vaikeaa (kuva T6.1).



Kuva T6.1 Kasvillisuuden vaikutus uoman vedenjohtokykyyn voi olla huomattava. Kuivissa on havainnollistettu kasvillisuuden määrän vaikutusta vedenpinnan korkeuteen samalla virtaama-arvolla. (Kuva Madsen 1995)

Uomat pitää pystyä mitoittamaan siten, että ongelmilta vältytään. ”Varman päälle” -ylimitoitusta tulee välttää, koska tällöin aiheutuu tarpeettomia kustannuksia ja ekologista haittoja. Perinteisesti uomien mitoitus on perustunut lähinnä tulvanjohtokykyyn (esim. $HQ_{1/20}$), mutta luonnonmukaisessa vesirakennuksessa on tarkasteltava sen lisäksi ali- ja keskivirtaamia mitoittavina tekijöinä. Eliöstölle on turvattava sopivia vesisyvyys- ja virtausnopeusalueita koko luontaisella virtaamavaihtelualueella. Luonnonmukaisen uoman mittojen (syvyys, leveys, poikkileikkausmuoto, linjaus, kaltevuus) määrittäminen ei ole helppo tehtävä.

Kunnossapitotarpeen minimoimiseksi on syytä pyrkiä ratkaisuun, joka on dynaamisessa tasapainossa. Tällä tarkoitetaan sitä, että uoman muoto ja linjaus voi eroosion seurauksena elää, mutta sama määrä sedimenttiä kulkee uomasta ulos kuin ylävirran puolelta tulee sisään. Tällöin uoman koon suunnittelu on mahdollista perustaa hydraulisen geometrian teoriaan, jonka mukaan uoma ja virtaama (vesi ja sedimentti) pyrkivät tasapainotilaan. Eroosio ja kasautuminen voivat luonnonmukaisessa vesirakennuksessa olla myös toivottavia, kun ne tapahtuvat hallitusti. Odottamattomat luiskasortumat, eroosioauriot tai esimerkiksi sedimentin kasautuminen kutosoraikkoon voivat kuitenkin pilata koko hankkeen. Suomessa luonnonmukaisen vesirakentamisen hydraulisia kysymyksiä ja uomien mitoittamista ovat tutkineet esim. Järvelä (2004), Helmiö (2004), Jalonen (2015) ja Västilä (2015). Luonnonmukaisen vesirakentamisen näkökulmasta tehtyjä hydraulisen mitoituksen ohjeistoja ovat julkaisseet mm. USDA (2001) ja DVWK (1991).

misesta ei aiheudu kohtuutonta haittaa. Tällöin uoman epätasaisuudesta, kasvillisuudesta ja mutkaisuudesta riippuen on käytettävä vastaavia vastuskertoimia, joiden arvioiminen voi olla vaikeaa. Yleisesti voidaan kuitenkin lähteä 1,5–2 -kertaisesta vastuskertoimesta tavalliseen perkausmitoitukseen verrattuna eli $n = 0,045\text{--}0,060$. Kuitenkin, jos uomassa on paljon kasvillisuutta, kuten mättäitä tai pensaita, vastuskerroin voi olla $n = 0,090\text{--}0,120$, jolloin uoma siis tulvii helposti, ellei uomaa kaiveta vastaavasti väljemmäksi. Liian suuren uoman kaivuuta tulee välttää, koska se yksipuolistaa uoman elinolosuhteita merkittävästi.

Vaikka uoman poikkileikkaus vaihtelisi huomattavastikin, mitoitus voi joissakin olosuhteissa, varsinkin ylivirtaamilla, perustua tasaiseen virtaukseen. Tällöin tarvittavat tiedot selvitetään sekä laajempien että ahtaampien kohtien mukaan sopivin välimatkoin uoman kaltevuussuhteet huomioon ottaen. Mikäli kunnostukseen kuuluu pohjakynnyksiä, mitoitus suoritetaan myös niiden kohdalta, jolloin vedenkorkeudet eri virtaamilla voidaan laskea varsin tarkasti. Mitoitus tulee kuitenkin tarvittaessa suorittaa tai tarkistaa Manningin epätasaisen virtauksen kaavalla, jota tässä yhteydessä ei kuitenkaan lähemmin selvitetä.

Rumpujen ja siltojen sekä putkiojen ja pohjakynnysten mitoituskaavat, jotka myös perustuvat yleisiin virtausyhtälöihin, selvitetään erityisrakenteiden yhteydessä.

Mitoitusvirtaama

Valtaoja mitoitetaan yleisesti kerran 20 vuodessa sattuvan ylivirtaaman $HQ_{1/20}$ mukaan. Ylivirtaama määräytyy yleensä lumen sulamisen aikaisen kevätvalun mukaan, mutta se voi vähälumisilla rannikkoalueilla ja pienillä valuma-alueilla määräytyä myös kesän tai syksyn rankkasateiden mukaan. Ylivaluma on ensisijaisesti riippuvainen lumen vesiaron maksimista ja valuma-alueen järvisyydestä sekä valuma-alueen suuruudesta ja pinnanmuodostuksesta.

Ylivalunnan määrittelemiseksi on suoritettujen tutkimusten ja havaintojen mukaan laadittu useita nomogrammeja. Yleisesti käytetty on Kaiteran nomogrammi (1949), jonka mukaan kevään keskiylivaluma voidaan määrittellä lumen vesiaron keskimääräisen vuosisaksimien perusteella huomioon ottaen myös valuma-alueen järvisyys. Myös Kuusisto (1985) on laatinut vastaavan nomogrammin, jota ei kuitenkaan suositella alle 30 km^2 :n valuma-alueille. Lisäksi Seuna (1983) on kehittänyt pienten järveltömien valuma-alueiden (alle 200 km^2) ylivalumien arvioimiseksi nomogrammeja, jotka perustuvat valuma-alueen puustoisuuteen ja purkautumiskohdan korkeuteen merenpinnasta.

Pienillä valuma-alueilla järvisyyden vaikutus ylivalumaan voidaan ottaa karkeasti huomioon siten, että 3 %:n järvisyys pienentää ylivalumaa 10 % ja 10 %:n järvisyys 50 %, kun taas 20 %:n järvisyys pienentää ylivalumaa noin 75 %. Alle 1 %:n järvisyydellä ei ole käytännön merkitystä. Jos järvet sijaitsevat valuma-alueen latvoilla, valuma-alue on tarpeen jakaa järvelliseen ja järveltömään osaan ylivaluman arvioimiseksi. Järven luusuassa eli lasku-uoman suulla järven valumaa pienentävä lisävaikutus voidaan ottaa huomioon kertoimella $(1 - L_j/100)^2$, jossa L_j on järven prosenttiosuus valuma-alueesta.

Nissinen on 1980-luvulla Kaiteran nomogrammin perusteella kehittänyt ojien ja purojen valuma-alueita varten nomogrammin (kuva 6.3), jonka perusteella järveltömän alu-

Taulukko 6.1 Valuma-alueen peltoisuuden ja muotosuhteen vaikutus ylivalumaan.

l = alueen pituus, b = alueen leveys.

Peltoisuus %	Muotosuhde			Esimerkki: Jos valuma-alueen peltoisuus on 80 % ja muotosuhde 2, ylivaluman kerroin on $1,5 \cdot 1,2 = 1,8$
	Kerroin	$1/b$	Kerroin	
0–40	1,0	1	1,3	
60	1,2	3	1,1	
80	1,5	5	1,0	
100	1,8	10	0,9	

Taulukko 6.2 Eri toistumisaikoja vastaavat ylivalumat järveltämöillä ja järvellisillä valuma-alueilla.

Ylivaluma	Järvetön alue	Järvellinen alue
$Hq_{1/5}$	$1,4 \cdot MHq$	$1,2 \cdot MHq$
$Hq_{1/10}$	$1,6 \cdot MHq$	$1,4 \cdot MHq$
$Hq_{1/20}$	$1,9 \cdot MHq$	$1,6 \cdot MHq$
$Hq_{1/50}$	$2,2 \cdot MHq$	$1,8 \cdot MHq$
$Hq_{1/100}$	$2,5 \cdot MHq$	$2,0 \cdot MHq$
$Hq_{1/250}$	$2,9 \cdot MHq$	$2,3 \cdot MHq$

Järvellisen alueen kertoimet soveltuvat tapauksiin, joissa järvisyys on vähintään 5–10 %. Järvisyyden ollessa sitä pienempi voi käyttää väli-arvoja (0,1:n tarkkuudella)

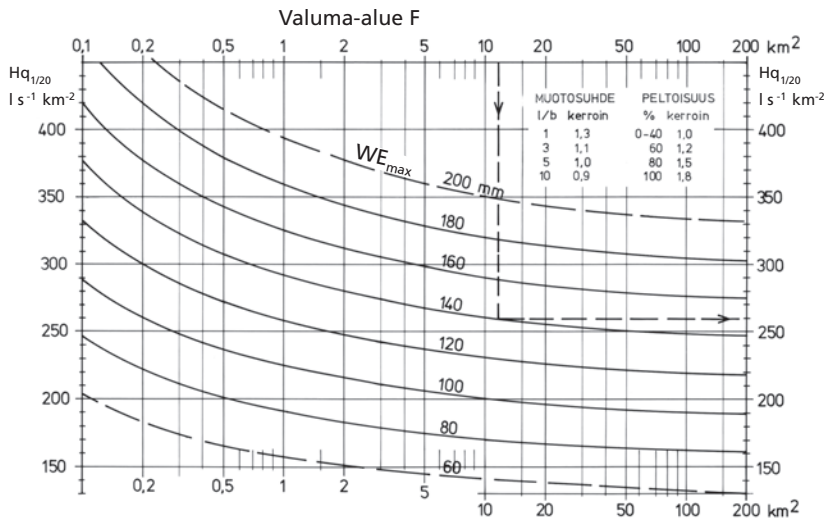
kuutukset ylivalumaan voidaan ottaa huomioon erillisillä kertoimilla (taulukko 6.1). Ylivirtaamaan vaikuttaa myös tulva-alueiden poistaminen. Tulva-alueiden poistamisesta johtuva virtaaman lisäys on kuitenkin yleensä varsin vähäinen (alle 10 %) ja sen katsotaan sisältyvän arvioituun mitoitusvirtaamaan. Tarvittaessa se voidaan kuitenkin erikseen osoittaa, jolloin ylivirtaaman lisäykseksi voidaan yleisesti arvioida $0,5\text{--}1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ tulva-alueen 100 ha kohti tulvan varastoitumisesta ja kestosta riippuen.

Eri toistumisaikoja vastaavat ylivalumat voidaan eri tutkimuksia ja tilastoja yleisesti soveltaen järveltömien ja järvellisien valuma-alueiden osalta arvioida taulukossa 6.2 esitetyillä kertoimilla.

Valtaojan mitoittaminen muutoin kuin kerran 20 vuodessa sattuvan ylivirtaaman mukaan on perusteltua metsäalueiden ja taajamien osalta. Metsäalueiden osalta voidaan käyttää jopa keskiylivirtaamaa MHQ, kun taas taajamien osalta on perusteltua käyttää ylivirtaamaa $HQ_{1/100}$. Myös hankkeeseen kuuluvat rakenteet mitoitetaan eräin poikkeuksin uomien

een ylivaluma $Hq_{1/20}$ voidaan arvioida, sekä toisen nomogrammin (kuva 6.4), jonka mukaan järvisyyden vaikutus voidaan ottaa huomioon. Lumen vesi-arvon keskimääräisenä vuosimaksimina WE_{max} voi käyttää hydrologisten tilastojen mukaisia alueellisia arvoja (ks. kuva 3.9). Alle 120 mm:n arvoa ei kuitenkaan ole syytä käyttää, koska kesän ylivaluma voi vähälumisella alueella olla vastaavasti kevään ylivalumaa suurempi.

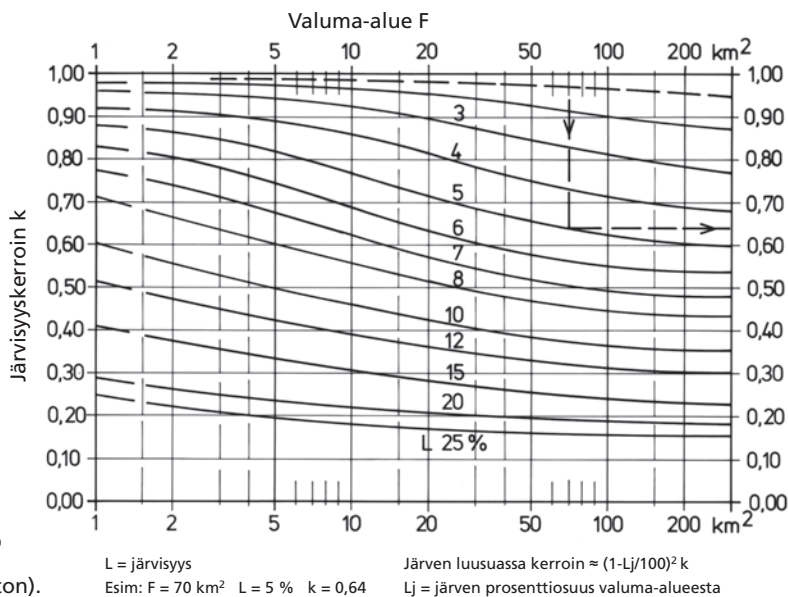
Valuma-alueen peltoisuuden (%) ja muotosuhteen (pituus/leveys) vai-



Kuva 6.3 Järveltömän valuma-alueen ylivaluman $Hq_{1/20}$ nomogrammi (Nissinen 1984, julkaisematon). Lumen maksimivesiarvon (WE_{max}) alueelliset arvot esitetty kuvassa 3.9.

$MHq = 0,55 Hq_{1/20}$
 $Hq_{1/10} = 0,85 Hq_{1/20}$
 $Hq_{1/50} = 1,15 Hq_{1/20}$
 $HQ_{1/20} = F Hq_{1/20}$

Esim.: $F = 12\text{ km}^2$
 $WE_{max} = 140\text{ mm}$
 $Hq_{1/20} = 260\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2}$
 $HQ = 12\text{ km}^2 \times 260\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2} = 3,1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$



Kuva 6.4 Järvisyyden vaikutus ylivalumaan $Hq_{1/250}$ järvisyyssertoimen avulla (Nissinen 1984, julkaisematon).

mitoitusvirtaaman mukaan. Eräissä tapauksissa siltojen ja rumpujen toimivuus on suurten tulvien varalta tarkistettava ylivirtaamalla $HQ_{1/250}$.

Kesätulvat jäävät yleensä 50–80 %:iin kevättulvista, mutta vähälumisilla rannikkoalueilla kesätulvat voivat kuitenkin olla 10–30 % kevättulvia suuremmat. Lisäksi on tarvittava huomioon taajama-alueen ylivalumia korottava vaikutus. Hetkellinen rankasateista johtuva kesäylivaluma voi kuitenkin aivan pienillä valuma-alueilla (alle 1 km²) olla 1,5–2 -kertainen vastaavaan kevätylivalumaan verrattuna. Valtaojan mitoituksessa sillä ei tosin ole yleensä merkitystä, koska ojan minimimitoitus on useimmiten riittävä hetkellisistä kesäylivirtaamiakin varten.

Keskivaluma on alueen sijainnista riippuen yleisesti 8–12 l s⁻¹ km⁻², kun keskimääräinen vuosivalunta on suurimmassa osassa maata 250–400 mm. Keskialivaluma riippuu pääosin valuma-alueen järvisyydestä, mutta pienillä alueilla myös lähteisyydestä. Puron keskialivalumaksi voidaan yleisesti arvioida 1 l s⁻¹ km⁻², kun järvisyys on 5–10 %, ja 2 l s⁻¹ km⁻², kun järvisyys on 15–20 %. Pienillä valuma-alueilla virtaus voi kuitenkin kuivina kausina tyrehtyä täysin, ellei alueella ole lähteitä.

Ojan syvyys ja kaltevuus

Ojan syvyyden tulee olla sellainen, että tarvittava kuivatus toteutuu sekä peruskuivatuksen että tulvien kannalta. Peruskuivatustarve määräytyy ensisijaisesti kesäaikaisen kuivavaran mukaan joko alueen salaojituksen mahdollistamiseksi tai jo toteutetun salaojituksen toiminnan turvaamiseksi. Tulvanaikainen kuivavara on riippuvainen tulvan ajankohdasta ja kestosta sekä maaperän kantavuudesta.

Kuivavaralla tarkoitetaan maanpinnan ja ojassa tai vesistössä vallitsevan vedenpinnan tai jonkin tunnusomaisen tai tietyn ajankohdan määrävän vedenkorkeuden korkeuseroa. Kesän keskiveden tai kuivan ojanpohjan +0,1 m mukainen kuivavara vastaa peruskuivatuksen mukaista kuivatussyvyyttä, mutta tulvanalaisella alueella kuivavaraa ei ole lainkaan. Tarvittavan ja vallitsevan kuivatussyvyyden mukaisen kuivavaran ero osoittaa vajaakuivatuksen eli tarvittavan lisäsyvyyden määrän, jota myös kuivatuslisäksi kutsutaan (kuva 6.5).

Salaojituksen kuivatussyvyys riippuu imuojien ohjesyvyydestä (1,0–1,2 m) ja kokoojajojien kaltevuudesta ja tarvittavasta liettymisvarasta. Yleisesti voidaan salaojituksen kui-

vatussyvyytenä pitää 1,4 m, kun se avo-ojitetun pellon osalta on 1,2 m ja metsäojituksen osalta 0,9 m mitattuna ns. kesävesipinnasta.

Valtaojan syvyys määräytyy kuivavarasta sekä etäisyys-, painumis- ja liettymisvaran tarpeesta (kuva 6.5). Syvyys määräytyy kuivatettavan alueen matalimpien kohtien mukaan lisätyn etäisyyslisällä, joka on salaojituksen osalta 0,2 m/100 m ja avo-ojituksen osalta 0,1–0,2 m/100 m. Toisin sanoen tasaisilla mailla ojan syvyyden tulee olla selvästi kuivatussyvyyttä suurempi. Aina se ei kuitenkaan ole mahdollista vesistön vedenkorkeuden tai maan laadun takia, jolloin on turvauduttava vedenalaiseen salaojitukseen tai tarvittaessa pumppaukseen.

Salaojituksen vaatima liettymisvara on yleensä 0,3 m ojan pohjasta laskuaukon alareunaan. Jos uomassa on jatkuvasti vettä, liettymisvara on 0,1–0,2 m mitattuna keskimääräisestä kesävesipinnasta laskuaukon alareunaan.

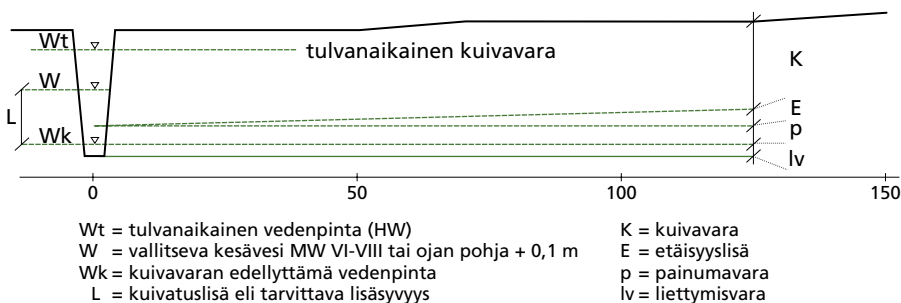
Valtaojan syvyydessä on otettava huomioon myös maan painuminen ja kuluminen. Maan painuminen riippuu ensisijaisesti painuvan maalajin paksuudesta ja pohjavedenpinnan alenemisesta eli kuivatuksen lisäyksestä. Viljelyksessä pitkään olleiden turve- ja liejumaiden osalta voidaan aikaisemman painuman perusteella tulevaisuuteen painumaksi yleensä arvioida 30–50 % vedenpinnan alenemisesta. Maanpinnan kulumiseksi voidaan turve- ja liejumailla olettaa 0,5–1,0 cm vuodessa eli 10–20 cm 20 vuoden aikana.

Valtaojan syvyydessä on vesisyvyyden lisäksi otettava huomioon tulvanaikainen kuivavara. Mitoitusvirtaaman $HQ_{1/20}$ aikaisena kuivavarana riittää yleensä 0,1–0,3 m kevättulvan haitallisuudesta riippuen. Jos alueella esiintyy haitallisia kesätulvia, kuten suurten vesistöjen rannoilla, kuivavaran tulisi olla 0,3–0,5 m. Kuitenkin tulvanaikaisen kuivavaran tulisi olla vähintään 0,5 m keskiylivirtaaman MHQ aikana. Metsäalueiden osalta kuivavara ei ole yleensä tarpeen, vaan tulva voi nousta ojan reunojen yli. Tonttialueiden osalta kuivavaran tulisi puolestaan olla vähintään 0,5 m mitoitusvirtaaman $HQ_{1/100}$ aikana.

Pohjan kaltevuus valitaan yleensä maanpinnan ja uoman luontaisen kaltevuuden ja maanpinnan taitepisteiden perusteella, ellei siitä ole uoman mitoituksessa erityistä tarvetta poiketa. Yleensä riittävä tasausviivan kaltevuus on 10 cm/100 m eikä pienempää kuin 5 cm/100 m tulisi käyttää. Tosin puroissa kaltevuus voi olla pienempikin ja pengerryshankkeissa kuivatusoja voidaan tehdä ilman kaltevuuttakin. Valtaojaan ja puroon voidaan tehdä myös syvennyksiä tai levennyksiä, joiden osuudella pohja voi olla vaakasuora.

Tasaisessa virtauksessa vedenpinta noudattaa ojan pohjan eli tasausviivan kaltevuutta, josta myös veden virtausnopeus osaltaan riippuu. Maaperän ollessa herkkä eroosiolle (siltti, liejusavi, hieno hietä) saattaa olla tarpeen virtauksen hidastamiseksi loiventaa tasausviivaa putousportailta tai loiventaa vedenpinnan kaltevuutta pohjakynnyksien avulla.

Uoma kaivetaan yleisesti hieman suunniteltua syvemmäksi perkausmitoituksen varmistamiseksi huomioon ottaen ojan liettyminen, mikä osaltaan vähentää myös kunnossapitotarvetta. Valtaojan syvyydessä ja kuivavarassa huomioon otettavia asioita tarkastellaan eräiltä osin vielä jäljempänä kohdassa Riittävä kuivatus.



Kuva 6.5 Ojan syvyyden määritys.

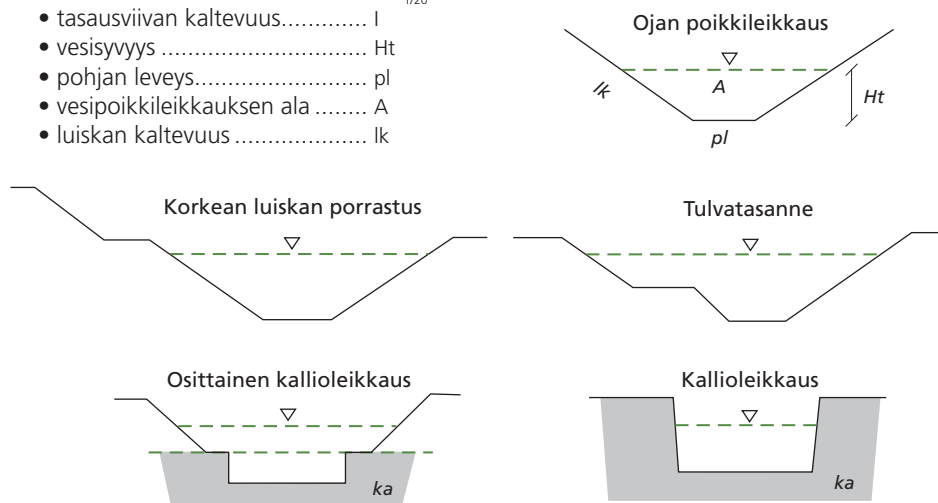
Ojan poikkileikkaus

Hydraulisesti edullisin uoman poikkileikkaus on teoreettisesti (A/p) tarkasteltuna puoliympyrä, jossa vedenpinta yhtyy halkaisijaan. Suoraluiskaisessa uomassa edullisin uoman muoto olisi vastaavasti puoliympyrää sivuava puolisuunnikas, jossa luiskien kaltevuus on 1:0,5. Käytännössä tällaiset poikkileikkaukset eivät kuitenkaan tule kysymykseen, vaan valtaojan poikkileikkaus mitoitetaan suorilla luiskilla ja pohjalla, jonka korkeus on koko leveydellä sama. Tällöin ojan pohjan leveyden tulisi olla vähintään noin $0,6 \cdot$ mitoitusvirtaaman mukainen vesisyvyys. Toisaalta varsinkin leveissä ojissa pohja ja luiskat muodostuvat jossain määrin kaareviksi ja epätasaisiksi, vaikka ne kaivettaisiinkin suoriksi.

Kun ylivirtaama määrää ojan mitoituksen, poikkileikkaukseen vaikuttavat seuraavat tekijät (kuva 6.6):

- mitoitusvirtaama..... $HQ_{1/20}$
- tasausviivan kaltevuus..... l
- vesisyvyys H_t
- pohjan leveys..... pl
- vesipoikkileikkauksen ala A
- luiskan kaltevuus lk

Mitoitus pituuskaltevuuden mukaan



Kuva 6.6 Ojan poikkileikkauksia.

Kalliioleikkaus voidaan käytännössä mitoittaa pystysuorilla luiskilla vesipoikkileikkaukseltaan samansuuruiseksi kuin maaleikkaus.

Tarvittava luiskan kaltevuus riippuu maan geoteknisestä olosuhteista ja ojan syvyydestä. Ojan luiskien tulee olla niin loivat, etteivät ne sorru kaivun aikana eivätkä sen jälkeenkään. Suositeltavina luiskien kaltevuuksina voidaan valtaojissa käyttää taulukon 6.3 mukaisia arvoja, mutta virtaamaltaan suurehkoissa uomissa, varsinkin puroissa, on vesien-suojelullisista syistä suotavaa käyttää jonkin verran loivempia luiskia ainakin silloin, kun maaperä on savea tai silttiä ja hiekkaa. Luiska voi olla myös porrastettu (ks. kuva 6.6 tulvatasanne tai korkea luiska).

Valtaojan pohjan leveys määräytyy minimiojassa kaivukoneen mukaan. Pienellä kaivukoneella kaivettaessa pohjan leveys on 0,5–0,6 m ja suurella koneella kaivettaessa 0,7–0,8 m. Pohjan leveyden tulisi syvissä ojissa olla vähintään 30 % ojan syvyydestä.

Valtaojan mitoitusta varten on vanhastaan laadittu erilaisia taulukoita ja nomogrammeja. Erityisen käytetty on ollut Patt'in mitoitus-*taulukko* (Patt 1911), joka on tehty myös suurten uomien mitoitusta varten. Valtaojien ja purojen perkausmitoitukseen on käytettävissä myös Nissisen laatimat mitoitusnomogrammit, jotka ovat kuvissa 6.7...6.10. Mitoitus voidaan tehdä Manningin kaavaan perustuvia tietokoneohjelmia käyttäen. Esimerkki valtaojan mitoituksesta on esitetty tietorudussa 6.2.

Taulukko 6.3 Valtaojan luiskan kaltevuus.

Maalaji	Luiskan kaltevuus kaivussyvyyden ollessa			
	1,0 m	1,5 m	2,0 m	2,5 m
Maatumaton turve	1:0,75	1:1,00	1:1,50	1:1,50
Maatunut turve	1:1,00	1:1,50	1:2,00	1:2,00
Savi	1:1,50	1:1,75	1:2,00	1:2,00
Siltti ja hiekka	1:1,75	1:2,00	1:2,25	1:2,25

Taulukko 6.4 Erilaatuisten uomien suurimmat sallitut keskimääräiset virtausnopeudet.

Maalaji tai verhoustapa	v _{max}
Siltti, liejusavi	0,30
Hieno hiekkamaa	0,35
Konsolidoitumaton savimaa, maatunut turve	0,40
Karkea hiekkamaa	0,45
Hieno soramaa	0,60
Raaka turvema	0,70
Karkea soramaa	0,80
Konsolidoitunut lihava savimaa	1,15
Tiivis moreenimaa	1,20
Kivikko	1,50
Hyvin juurtunut nurmi	1,80
Betoniverhous	4,00

Uomaerosion välttämiseksi veden virtausnopeus ei saa olla liian suuri. Taulukossa 6.4 on esitetty erilaatuisten uomien suurimmat sallitut keskimääräiset vedennopeudet.

Riittävä kuivatus

Pelto-ojituksen tarkoituksena on ensisijaisesti riittävän teknisen kuivatuksen aikaansaaminen, sillä kasvun edellyttämä kuiva-
vara on yleisesti vain 0,4–0,6 m eli 30–40 % salaojituksen vaatimasta kuivatussyvyydestä. Metsäojituksen osalta tekninen ja luontainen kuivatustarve vastaavat suunnilleen toisiaan.

Ojituksella ei ole kaikissa olosuhteissa taloudellisesti perusteltua pyrkiä täyteen kuivatukseen, mikä on otettu huomioon myös vesilaissa (VL 5:15) ja valtioneuvoston asetuksessa vesitalousasioista (24 §), vaan sen sijaan

kohtuullisin kustannuksin riittävään kuivatukseen. Erityisesti joudutaan tällöin tinkimään alavimpien alueiden kuivatuksesta joko tulvien tai peruskuivatuksen tai molempien osalta.

Aikaiset kevättulvat eivät ole yhtä haitallisia kuin kesätulvat, joten kevättulvan lyhytaikainen nousu alavimmille alueille ei juurikaan rajoita koko alueen viljelyä. Toisaalta myös kesällä voidaan veden sallia lyhytaikaisesti nousta pellolle ilman, että kasveille olisi siitä suurtakaan vahinkoa.

Myös peruskuivatuksesta voidaan eräissä tapauksissa tinkiä, varsinkin salaojituksen edellyttämästä liettymisvarasta, joka yleensä on 0,3 m ojan pohjasta laskuaukon alareunaan. Salaojitus toimii lähes normaalisti, vaikka laskuaukko olisi vain harvoin vedenpinnan yläpuolella. Toisaalta salaojitus voidaan tehdä myös vedenalaisena, mikä tosin jonkin verran nostaa salaojituksen kustannuksia.

Viettäville mailla valtaojan voi tehdä tavallista matalampana ja varustaa salaojat vedenalaisilla laskuaukoilla. Samalla on mahdollista jättää vajaakuivatukseen jäävä ojanvarsi suojakaistaksi tai suojavyöhykkeeksi. Erityisesti purojen osalta voi olla tarpeen kuivatuksesta vähän tinkimällä ja tarvittaessa pohjakynnyksin pyrkiä turvaamaan riittävä vesisyvyys sekä vaihtelevat elinolosuhteet uomassa kuivinaikoina.

Painuvien alueiden tai geoteknisesti hankalien osuuksien ojituksessa voidaan turvautua myös kaksivaiheiseen kuivatukseen, jossa lopullinen kuivatussyvyys toteutetaan vasta myöhemmässä vaiheessa tai ojan kunnossapitoon liittyen.

Riittävän kuivatuksen ylläpitäminen edellyttää hankkeen kunnossapittoa, koska uoma aikaa myöten ruohottuu ja liettyy liian matalaksi. Kunnossapitotarvetta voidaan pienentää hyvällä suunnittelulla koskien uoman lisäksi myös ojitukseen liittyviä erityisrakenteita ja vesiensuojelutoimenpiteitä.

Tietoruutu 6.2

Esimerkki ojan koon ja poikkileikkauksen määrittämiseksi

Esimerkissä mitoitetaan valtaojaa, joka sijaitsee Kymenlaaksossa. Valuma-alueen koko F on 12 km^2 , peltoisuus 80% ja järvisyys $L 5 \%$. Valuma-alueen muotosuhde l/b on 3 . Perkausosuuden maaperä on savea.

Määritetään ensin mitoitusvirtaama. Lumen vesiaron keskimääräinen vuosimaksimi $WE_{\max}$ suunnittelualueella on 140 mm (ks. kuva 3.9). Kuvan 6.3 nomogrammista saadaan ylivaluman $Hq_{1/20}$:n arvoksi $260 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ valuma-alueen koon ja lumen maksimivesiaron perusteella. Ylivaluma kerrotaan järvisyyškertoimella $0,75$ (ks. kuva 6.4) sekä peltoisuuden antamalla kertoimella $1,5$ ja muotokertoimella $1,1$, jolloin $Hq_{1/20}$:n arvoksi saadaan $320 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Mitoitusvirtaama saadaan kertomalla ylivaluma valuma-alueen pinta-alalla eli $HQ_{1/20} = 320 \cdot 12 = 3,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Maaston muoto uoman kohdalla on sellainen, että tulevan uoman pohjan kaltevuudeksi eli tasausviivan kaltevuudeksi valitaan $0,0005$ eli 5 cm 100 metriä kohti. Riittävä kuivatus saavutetaan matalimmalla kohdalla ojasyvyydellä $1,6 \text{ m}$. Keskimääräinen kaivussyvyys on $2,0 \text{ m}$.

Tämän jälkeen selvitetään millaiseen uomaan mitoitusvirtaama mahtuu niin, että se maaston matalimmallakin kohdalla pysyy uomassa. Maalaji määrää luiskan minimikaltevuuden ja ojan pohjan leveys vaikuttaa ojan syvyyteen.

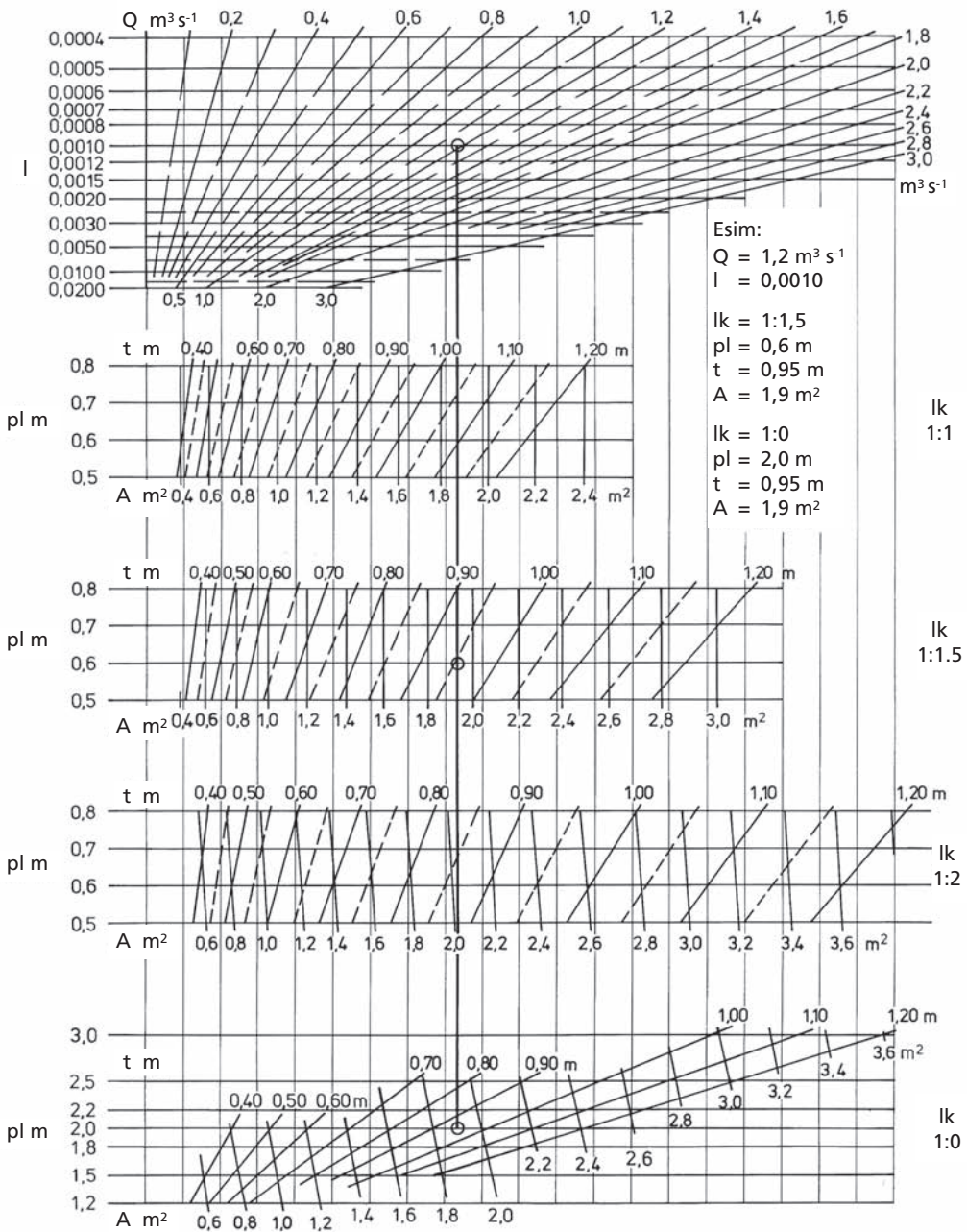
Vesimäärä $HQ_{1/20}$ määrää vesipoikkipinta-alan. Kuvista 6.7–6.9 voidaan valita ojalle sopiva muoto.

Savimaan ollessa kyseessä luiskan kaltevuuden lk on oltava vähintään $1:1,5$. Kuvan 6.8 perusteella voidaan todeta, että:

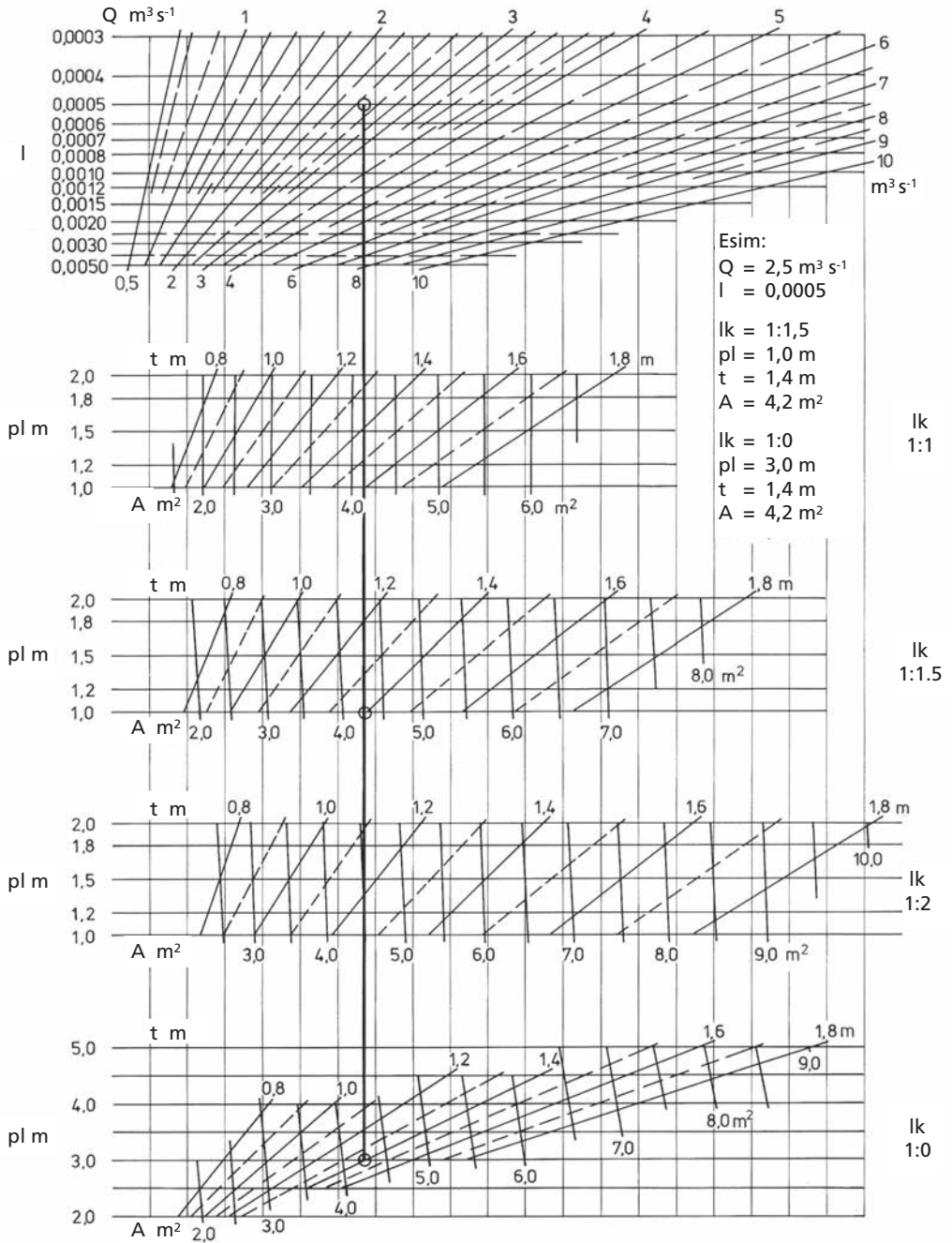
lk	pl m	t m	A m^2
1:1,5	1,0	1,70	5,9
1:1,5	1,5	1,55	6,0
1:1,5	2,0	1,45	6,0
1:2	1,0	1,55	6,3
1:2	1,5	1,45	6,3
1:2	2,0	1,35	6,3

Jos ojaa ei haluta kaivaa alavimmalla kohdalla yli $1,6 \text{ m}$ syväksi, niin valitsemalla lk :n arvoksi $1:2$ ja pohjan leveydeksi $pl 1,5 \text{ m}$ tulee vesisyvyydeksi $t 1,45 \text{ m}$ eli vesi pysyy uomassa.

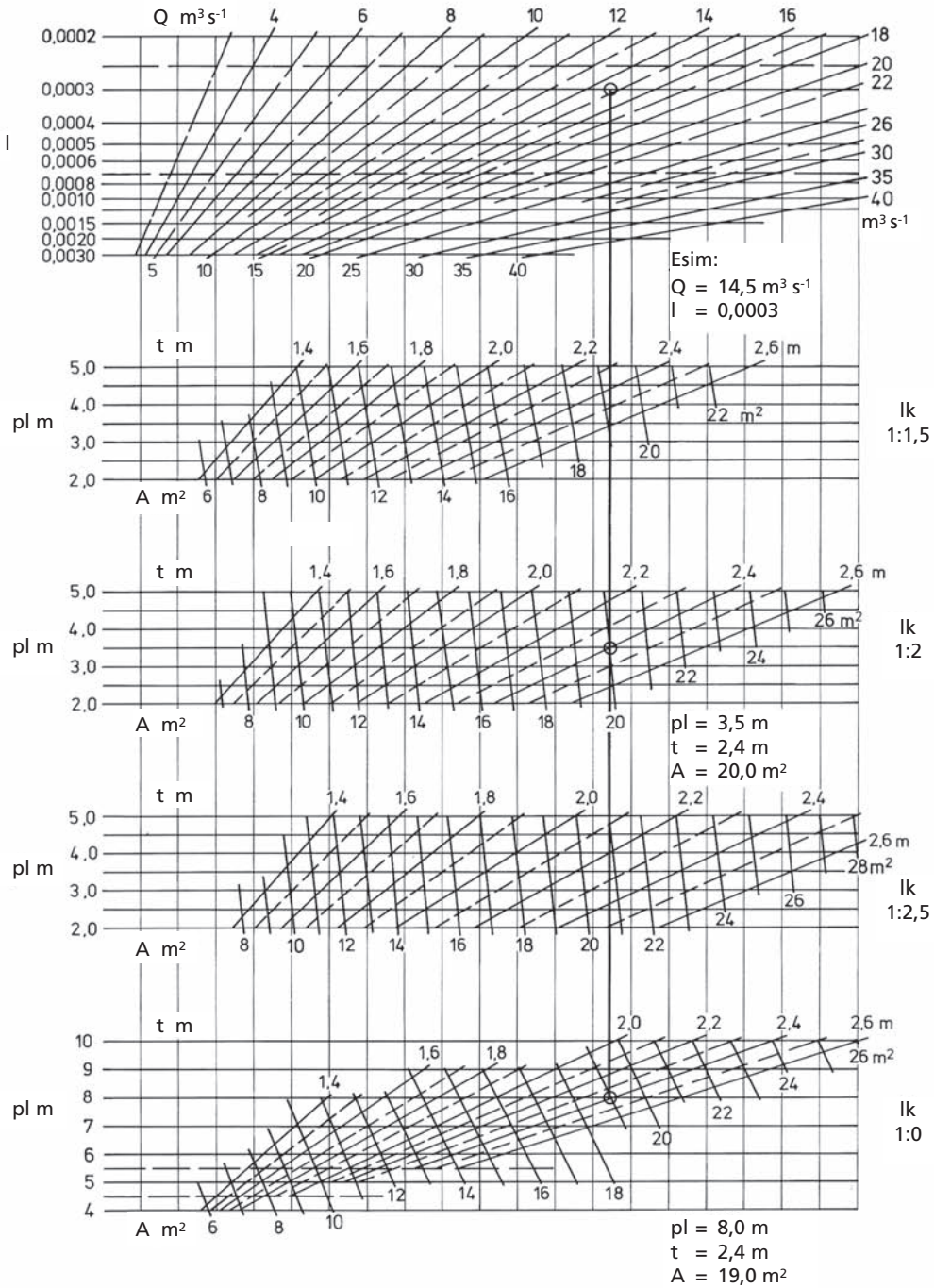
Lopuksi tarkistetaan, ettei virtausnopeus nouse liian suureksi ja aiheuta eroosiota. Kun $HQ_{1/20}$ on $3,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ja A on $6,3 \text{ m}^2$, virtausnopeus on $0,6 \text{ m s}^{-1}$ eli se ei ylitä konsolidoituneen savimaan suurinta sallittua virtausnopeutta.



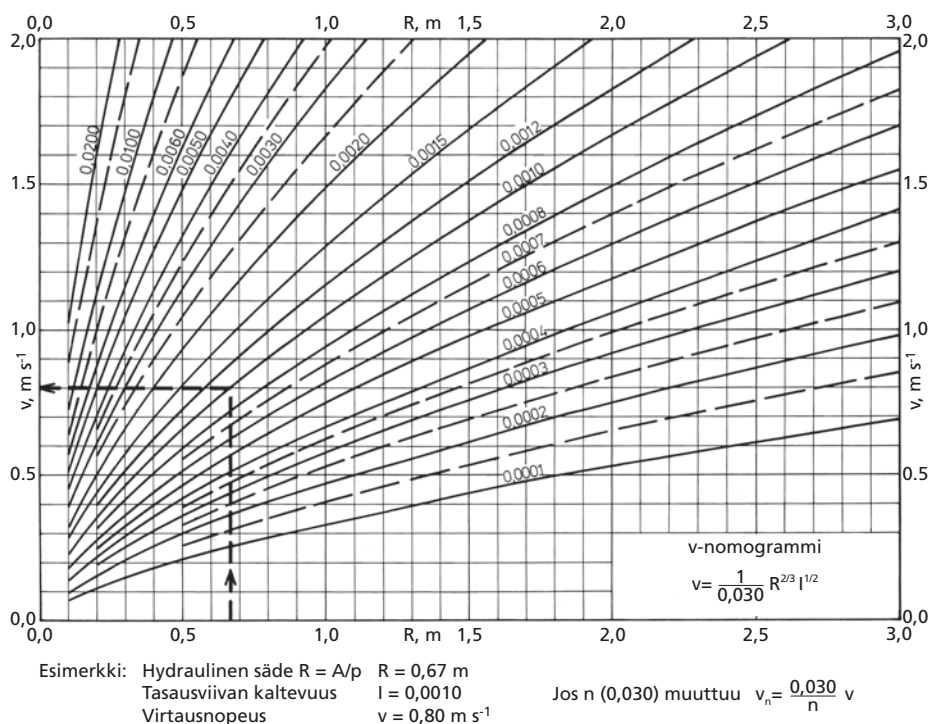
Kuva 6.7 Perkausmitoitus Nissisen nomogrammilla. Uoman pohjanleveys (pl) 0,5–0,8 m.



Kuva 6.8 Perkausmitoitus Nissisen nomogramilla. Uoman pohjanleveys (pl) 1,0–2,0 m.



Kuva 6.9 Perkausmitoitus Nissisen nomogrammilla. Uoman pohjanleveys (pl) 2,0–5,0 m.



Kuva 6.10 Virtausnopeuden määrittäminen uomassa Nissisen nomogramilla.

6.3 Erityisrakenteet

Ojitushankkeessa rummut ja sillat on tarpeen mukaan muutettava tai uudestaan rakennettava siten, että suunniteltu kuivatus voidaan saavuttaa. Vesilain mukaan yleisen tien sillan tai rummun rakennus- tai siirtokustannuksista, samoin kuin ylläpidosta vastaa tienpitäjä (VL 5:13). Jos kustannukset nousevat ojituksen hyötyyn nähden kohtuuttoman suuriksi, tienpitäjä ei ole velvollinen sillan tai rummun tekemiseen. Hänen on kuitenkin korvattava maan kuivattamisen estymisestä aiheutuva edunmenetys. Edellä esitetty koskee myös rautatietä, kaapelia tai kaasuputkea. Yksityisen tien osalta sillan tai rummun muuttamisesta tai uusimisesta vastaa ojitaja ja kunnossapidosta tienpitäjä. Tiehallinnossa pidetään siltaa ja rumpua rumpuna, jos vesiaukon leveys on alle 2,0 m ja siltana, jos vesiaukon leveys on vähintään 2,0 m, riippumatta vesiaukon rakenteesta.

Rumpujen ja siltojen kustannukset saattavat joissakin hankkeissa olla huomattavat. Yleensä valtaojissa riittää rumpu tai kaksoisrumpu. Kaksoisrummun osalta on huomattava, että sen toinen aukko helposti liettyy virtauksen epätasaisen jakautumisen takia. Vanhat rakenteet uusitaan yleensä yhteistyössä siten, että omistaja hankkii tarveaineet ja ojitaja vastaa työstä.

Ojitushankkeessa putkiojan tekeminen voi tulla kysymykseen useastakin syystä. Jos joudutaan johtamaan kuivatusvesiä toisen maa-alueen läpi, niin putkiojasta on vähemmän haittaa kuin avo-ojasta.

Vesilain mukaan (VL 5:10) avonaista ojaa ei saa, ellei se ole kiinteistön rajalla, ilman omistajan suostumusta tehdä toisen erityiseen käyttöön otetulle alueelle eikä myöskään, ellei se ole välttämätöntä, toisen salaojitetulle alueelle.

Myös tiluskuvion parantaminen ja maisemalliset tai geotekniset syyt saattavat edellyttää avo-ojan korvaamista putkiojalla. Pienet valtaojat, joiden valuma-alue on riittävän pieni, voi olla taloudellisesti edullisempaa tehdä putkiojana kuin avo-ojana (minimioja).

Ojituksen yhteydessä voi olla tarpeen rakentaa pohjakynnys matalaksi padoksi. Pohjakynnyksellä turvataan riittävä alivesi, mikä voi estää luiskan sortumia tai vähentää kiintoaineksen kulkeutumista tai olla tarpeen maisemallisista syistä. Koskimaisella pohjakynnyksellä voidaan myös mahdollistaa kalan nousu purossa. Pohjakynnyksiä voidaan käyttää myös tulvavesien viivyttämiseen ja kasteluveden varastointiin sekä happamuuden torjuntaan sulfaattipitoisilla mailla.

Ojitushankkeessa on tarpeen rakentaa pumppaamo penkereineen silloin, kun alue sijaitsee vesistön rannalla eikä sen vedenkorkeuksia voida riittävän kuivatuksen saamiseksi alentaa. Pumppaamo saattaa olla käyttökelpoisin ratkaisu myös silloin, jos alapuolisen uoman perkaus täyteen syvyyteen on vaikeaa tai muutoin kallista. Pumppaamot ja penkeret ovat tarpeen kuivatuksen järjestämiseksi myös hankkeissa, joissa vedenpintaa nostetaan vesistön kunnostamiseen tai kosteikon tekemiseen liittyen.

Pumppaamoratkaisua suunniteltaessa on otettava huomioon erityisesti pumppujen mitoitus ja perustamisolosuhteet sekä maan painuminen kuivatettavalla alueella. Rakentamiskustannusten ohella on hankkeen taloudellisuutta arvioitaessa kiinnitettävä huomiota myös käyttökustannuksiin. Pengerryksikuivatus on usein käyttökelpoinen ja joskus ainoa mahdollisuus alavien maiden kuivatuksen turvaamiseksi.

Uoman vahvistamistarpeet riippuvat lähinnä maan geoteknisistä olosuhteista, mutta myös uoman hydrauliset olosuhteet saattavat edellyttää vahvistamista. Maastotutkimuksilla ja hyvällä suunnittelulla voidaan vähentää avo-ojan vahvistamistarpeita oleellisesti. Silloin kun vahvistamistoimenpiteisiin on tarpeen ryhtyä, ne on syytä harkita huolella. Samalla voidaan ottaa huomioon valtaojan mitoituksen ja ympäristöön sopivan ratkaisun ohella rakenteen luonnonmukaisuus.

Rummut ja sillat

Rummun ja sillan vesiaukon vedenjohtokyky riippuu aukon vesipoikkileikkausalasta ja aukon ylä- ja alapuolisten vedenpintojen korkeuserosta eli padotuksesta. Vesiaukko tulee mitoittaa siten, ettei se tulvankaan aikana supista liikaa uomaa ja aiheuta haitallista padotusta.

Vesiaukon mitoitusta varten on kehitetty useita menetelmiä. Pitkään on yleisesti käytetty Tolkmittin menetelmää, josta Nissinen on 1980-luvulla kehittänyt virtausnopeuden muutokseen (n) ja virtausalan supistumiseen (s) perustuvan ns-menetelmän. Molemmat menetelmät soveltuvat hyvin sekä siltojen että rumppujen mitoitukseen. Lisäksi ovat käytössä Seunan k-menetelmä (Seuna 1967a, 1967b) ja Morrisin ja Wiggertin sekä Bradleyn menetelmät (Suomen ympäristökeskus 2009), jotka soveltuvat lähinnä silta-aukoille, eikä niitä tässä yhteydessä lähemmin selvitetä. Tolkmittin kaavat ovat seuraavat:

$$v_1 = \left[2gh + \left(\frac{Q}{F + Bh} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.5)$$

$$F_1 = \frac{Q}{\mu v_1} \quad (6.6)$$

$$h = \frac{1}{2g} \left[\left(\frac{Q}{\mu F_1} \right)^2 - \left(\frac{Q}{F + Bh} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.7)$$

v_1 = veden nopeus vesiaukossa (m s ⁻¹)	g = maan vetovoiman kiihtyvyys (m s ⁻²)
h = vesiaukon aiheuttama padotus (m)	Q = virtaama (m ³ s ⁻¹)
F = uoman vesipoikkipinta-ala (m ²)	B = uoman vesipinnan leveys (m)
F_1 = vesiaukon vesipoikkipinta-ala (m ²)	μ = supistumisesta aiheutuva kerroin

Tolkmittin kaavassa padotus (h) tarkoittaa vedenpinnan kokonaismuutosta, josta todellinen padotus on yleensä 50–75 %.

Supistumisesta aiheutuva kerroin (μ) vaihtelee välillä 0,6–0,95 siten, että se pienenee supistuman kasvaessa. Yleisesti voidaan käyttää arvoa 0,7, kun $v_1/v = 3,0$, ja arvoa 0,8, kun $v_1/v = 2,0$, sekä arvoa 0,9, kun $v_1/v = 1,5$, jolloin veden nopeus uomassa eli $v = Q/F$. Silta-aukon aiheuttama vedenpinnan muutos on esitetty kuvassa 6.11.

Nissisen ns-menetelmä perustuu Tolkmittin kaavoihin eräin yksinkertaistuksin. Padotuksesta johtuva pinta-alan lisäys Bh on jätetty pois ja supistumisen vaikutus (μ) määräytyy itsestään supistuskertoimen s kaavassa virtausnopeuksien muutoksen $v_h - v$ ja $v_h + v$ suhteen x perusteella siten että $m = (1-x)^{1/2}$.

Nissisen ns-menetelmän peruskaavat ovat:

$$v_h = (2g \cdot 1,6h + v^2)^{1/2} \quad (6.8)$$

$$n = \frac{v_h}{v} \quad (6.9)$$

$$s = \frac{v}{v_a} \quad \text{tai} \quad s = \frac{1}{n} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{1/2} \quad (6.10, 6.11)$$

$$F_a = s \cdot A \quad (6.12)$$

$$h = \frac{Nv \cdot v_a}{2g} = \frac{Nv^2}{s2g} = \frac{Nsv_a^2}{2g} \quad (6.13)$$

$$N = \frac{s}{1,6} (n^2 - 1) \quad (6.14)$$

v_h = padotuksen aiheuttama virtausnopeus (m s^{-1})

v = virtausnopeus uomassa (m s^{-1})

h = vesiaukon aiheuttama padotus (m)

s = supistuskerroin (aukkosuhte)

A = uoman virtausala (m^2)

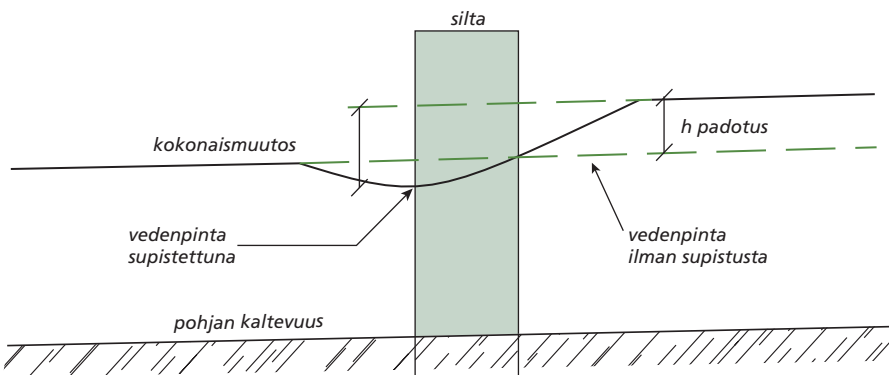
g = maan vetovoiman kiihtyvyys (m s^{-2})

v_a = virtausnopeus vesiaukossa (m s^{-1})

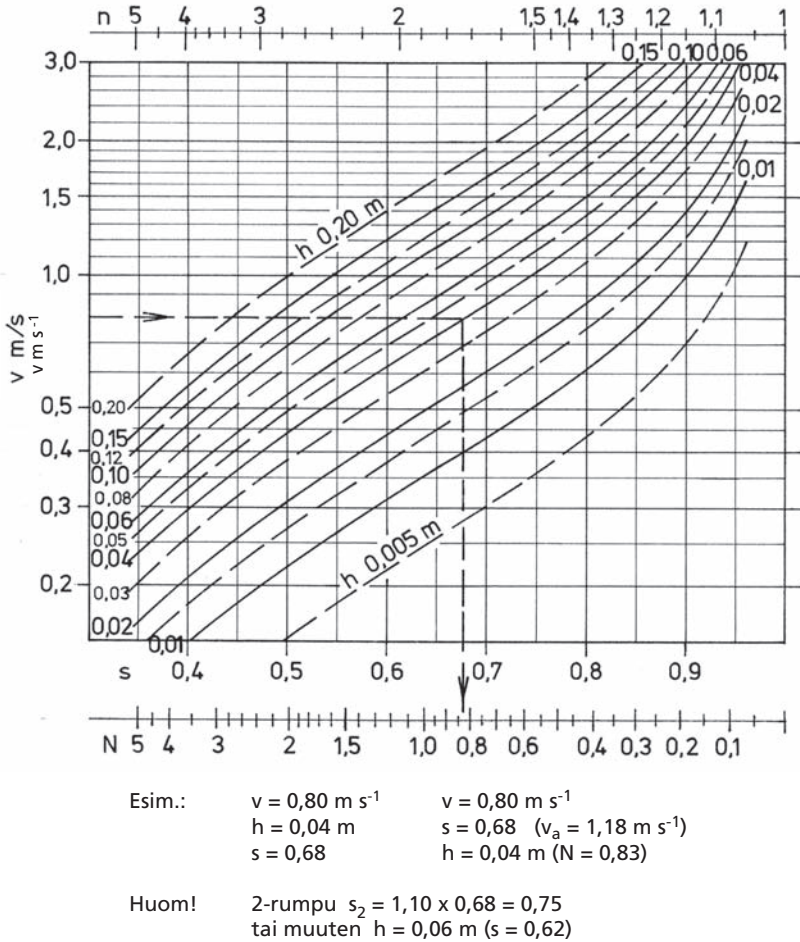
n = nopeuskerroin

F_a = vesiaukon virtausala (m^2)

N = padotuskerroin



Kuva 6.11 Silta-aukon aiheuttama vedenpinnan muutos.



Kuva 6.12 Vesiaukon mitoitus Nissisen ns-menetelmällä.

On huomattava, että ns-menetelmän kaavoissa (6.8–6.14) padotus h on todellinen padotus, joksi on arvioitu 60–65 % supistumisen aiheuttamasta kokonaismuutoksesta (1,6 h). Menetelmän etuna on, ettei supistumiskerrointa (μ) tarvitse lainkaan arvioida. Lisäksi menetelmä voidaan muuntaa nomogrammiksi, joka yksinkertaistaa mitoitusta edelleen, eikä nopeus- ja padotuskertoimiakaan tarvita. Menetelmä soveltuu yleiset mitoitusvaatimukset huomioon ottaen riittävällä tarkkuudella erilaisten silta- ja rumpuaukkojen mitoittamiseen.

Nissisen ns-menetelmän nomogrammissa, joka on kuvassa 6.12, uoman veden virtausnopeuden ja sallitun padotuksen perusteella saadaan supistuserroin s tai vastaavasti virtausnopeuden ja supistumiskertoimen perusteella padotus h . Kaksoisrummun osalta supistumiskerroin on kerrottava luvulla 1,1 eli vesiaukon virtausala on 10 % suurempi kuin tavallisella rummulla.

Vesiaukon mitoitus voi yleensä perustua samaan ylivirtaamaan $HQ_{1/20}$ tai $HQ_{1/100}$ kuin ojan-kin mitoitus. Sallittu tulvanaikainen padotus (m) tulisi määritellä siten, että se on ojan pituuskaltevuudesta riippuen $I^{1/2}$ – $1,5 \cdot I^{1/2}$ eli yleensä 2–6 cm, kun kaltevuus on 5–20 cm/100 m. Näin mitoittaen virtausnopeudet pysyvät riittävän pieninä myös uoman syöpymisvaaran välttämiseksi, mikäli maaperä on eroosioherkkää (siltti, hiekka, liejusavi ja turve). Valtaojien ohjeelliset rumpukoot on esitetty ylivirtaaman ja ojan kaltevuuden mukaan taulukossa 6.5.

Suosittelava enimmäispadotus riippuu uomasta ja maankäytöstä. Se on valtaojissa ja

Taulukko 6.5 Ohjeelliset rumpukoot valtaojissa.

Ylivirtaama HQ, m ³ s ⁻¹	Rumpukoko d (m), kun ojanpohjan kaltevuus I on				
	0,0005	0,0010	0,0020	0,0050	0,0100
0,1	0,6	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)
0,2	0,8	0,6	0,6	0,6	(0,5)
0,3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6
0,4	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
0,5	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
0,6	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8
0,8	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
1,0	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
1,2	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
1,5	1,6	1,6	1,4	1,4	1,2
1,8	1,8	1,8	1,6	1,4	1,4
2,2	2,0	1,8	1,8	1,6	1,6
2,6	(2,2)	2,0	2,0	1,8	1,8
3,0	(2,3)	(2,2)	2,0	1,8	1,8
padotus	2–3 cm	3–4 cm	4–5 cm	6–8 cm	< 10 cm
supistuma	55–35 %	45–25 %	40–20 %	35–15 %	
(d > 0,8 m)					

puroissa peltoalueiden ja taajamien osalta $I^{1/2}$ ja metsä- ja luonnonalueiden osalta $1,5 \times I^{1/2}$ (senttimetrin tarkkuudella). Mitoituspadotukseksi suositellaan puroissa enintään 10 cm ja valtaojissa 15 cm, vaikka uoman kaltevuus on suurempi kuin 0,0100 eli 100 cm/100 m.

Käytännössä valtaojien pienin rumpukoko on 0,6 m, paitsi yleisillä teillä ja rautateillä 0,8 tai 1,0 m. Rumpuputki upotetaan yleensä 10–20 % halkaisijasta ojan pohjan (tasausviivan) alapuolelle, jolloin sen pinta-ala saadaan tehokkaammin käyttöön. Samalla voidaan ottaa huomioon myöhempi ojan syventämistarve varsinkin painuvilla mailla. Myös silta-aukossa on syventämisvara otettava huomioon. Silta-aukon minimileveys on yleensä 1,5 m, jotta se ei suhteettomasti supistaisi uomaa.

Yleisten teiden ja rautateiden rumpujen ja siltojen sekä tulvista erityisesti vahinkoa kärsivien kohteiden ja alueiden rumpujen ja siltojen vesiaukkojen mitoituksessa tulee käyttää niitä koskevien ohjeiden mukaisia ylivirtaamia ja tarvittaessa tarkistaa mitoitus ylivirtaamalla $H_{q1/250}$ (Suomen ympäristökeskus 2009).

Putkiojat

Putkiojan vedenjohtokyky riippuu putken halkaisijasta ja sen pinnan karkeudesta sekä putken tai sen päiden vedenpintojen välisestä pituuskaltevuudesta.

Putkiojan mitoitus voi perustua Manningin (ks. kaavat 6.1–6.3) tasaisen virtauksen kaavoihin. Putken virtaama on

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (6.15)$$

Q = virtaama (m³ s⁻¹)

A = vesipoikkipinta-ala (m²)

p = märkäpiiri (m)

n = putken vastuskerroin

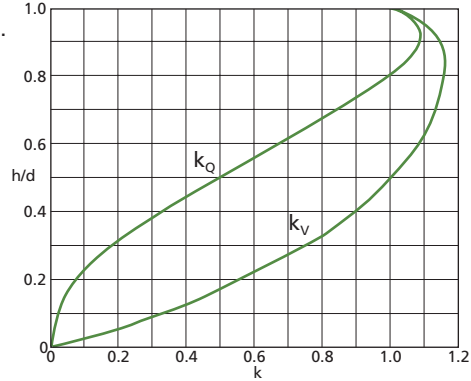
R = hydraulinen säde (m) = A/p

I = putken pituuskaltevuus

Täydellä putkella hydraulinen säde on $d/4$, kun putken sisähalkaisija on d . Tämän perusteella virtaama on

Taulukko 6.6 Vajaan putken virtaama (Rinne 1945).

h/d	k _Q	k _v
0,85	1,00	1,16
0,70	0,85	1,13
0,60	0,68	1,08
0,50	0,50	1,00
0,40	0,33	0,90
0,30	0,18	0,75
0,15	0,04	0,45

**Kuva 6.13** Pyöreän putken täyttökäyrät, k_Q on virtaamakerroin ja k_v virtausnopeuskerroin.

$$Q = 0,312 \frac{1}{n} d^{2,67} I^{\frac{1}{2}} \quad (6.16)$$

Putken sisähalkaisijaksi saadaan tällöin

$$d = \left(\frac{nQ}{0,312 I^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2,67}} = 1,548 (nQ)^{0,375} I^{-0,188} \quad (6.17)$$

Käytännössä putken mitoitustapahtuu nomogrammien avulla täyden putken virtaaman mukaan. Tarvittaessa voidaan tarkistaa vajaan putken virtaama, joka määräytyy vapaassa vietossa täyttöasteen mukaan (kuva 6.13 ja taulukko 6.6).

Vapaassa vietossa virtaama on siis sama sekä täydellä putkella että 0,80:n täyttöasteella. Teoriassa virtaama voi olla 0,90–0,95:n täyttöasteella lähes 10 % suurempi, mikäli virtaus on esteetöntä.

Putken vastuskertoimeen (n) vaikuttaa materiaalin ohella erityisesti seinämän profiili. Yleisesti käytettyjen putkien vastuskertoimet käyvät selville taulukosta 6.7.

Erilaisten putkien mitoitusta varten on käytettävissä nomogrammit, joista yleisimmät ovat betoniputken, sileän muoviputken ja kierresaumatun teräsputken nomogrammit, jotka ovat kuvissa 6.14, 6.16 ja 6.17. Pienet putket voi mitoittaa muovisen salaojaputken nomogrammin mukaan (ks. Luku 7, kuva 7.35).

Putkiojan mitoitustavirraama on määriteltävä tapauskohtaisen tarpeen mukaan riippuen siitä, onko valuma-alueen kaikki vedet johdettava putkiojaan vai voidaanko osa johtaa sen ulkopuolelta. Mikäli kaikki vedet johdetaan putkiojaan, voidaan yleisesti käyttää valtaojan mitoitustavirraamaa ($HQ_{1/20}$), ellei rankkasateista johtuvaa suurempaa virtaamaa ole erityisesti otettava huomioon. Jos putkiojaan johdetaan vain salaojavedet, riittää mitoitustavirraamaksi yleensä $1\text{--}1,5 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Putkiojan kokoa voidaan pienentää johtamalla osa vesistä sen ohi tai yli ns. tulvauoman pitkin. Tällöin tulvauoman virtaama pienentää vastaavasti putkiojan mitoitustavirraamaa.

Putkiojan mitoitukseen vaikuttaa oleellisesti myös putken kaltevuus (I), joka riippuu osittain putken halkaisijasta (taulukko 6.8).

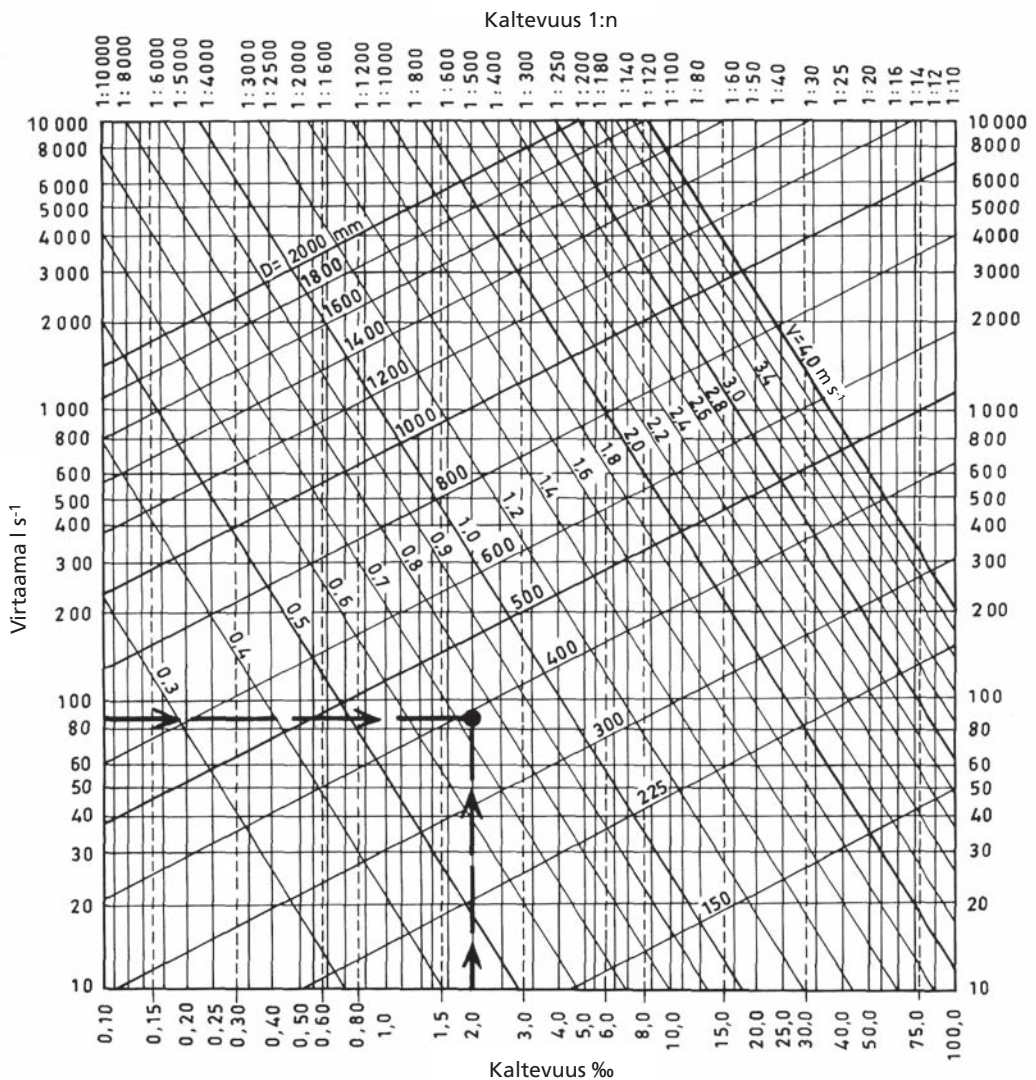
Putkiojan mitoituksessa pituuskaltevuutena (I) voidaan käyttää putken ylä- ja alapään vesipintojen korkeuseron mukaista kaltevuutta. Näin ollen sallimalla putken yläpäähän mahdollisuuksien mukaan padotusta voidaan mitoituskaltevuutta suurentaa ja putken kokoa vastaavasti pienentää. Putken toimivuuden kannalta mitoituksessa tulisi ottaa huomioon, ettei virtausnopeus ylitä 3 m s^{-1} eikä alita $0,6 \text{ m s}^{-1}$.

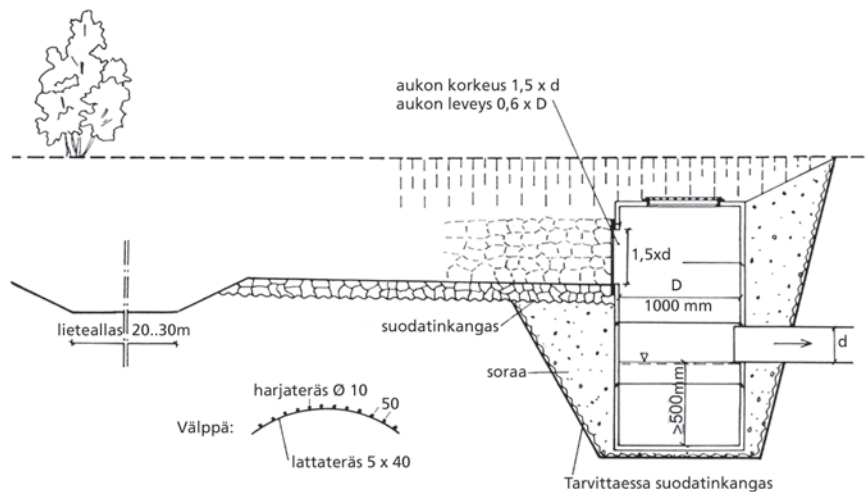
Taulukko 6.7 Putkien vastuskertoimet.

Materiaali	Vastuskerroin
muovi (sisäpinta sileä)	0,009
muovi (sisäpinta korrugoitu)	0,016
teräs (aallotettu)	0,025
teräs (kierresaumattu)	0,020–0,030
betoni	0,015
teräs	0,012

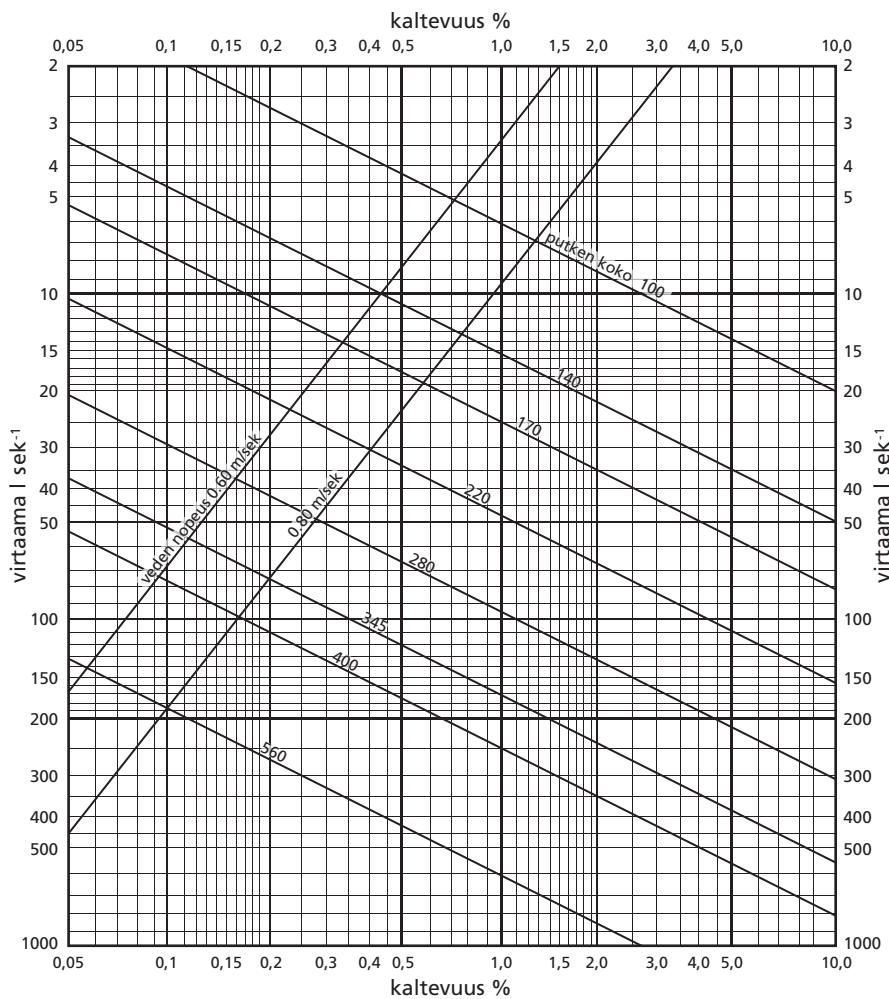
Taulukko 6.8 Putkiojan suositeltavat kaltevuudet.

Putken nimelliskoko tai sisähalkaisija (mm)	Minimikaltevuus	
	l	% (m/100m)
80	0,0018	0,18
100	0,0015	0,15
130–160	0,0010	0,10
200–250	0,0007	0,07
300–	0,0005	0,05

**Kuva 6.14** Mitoitusnomogrammi betoniputkelle.

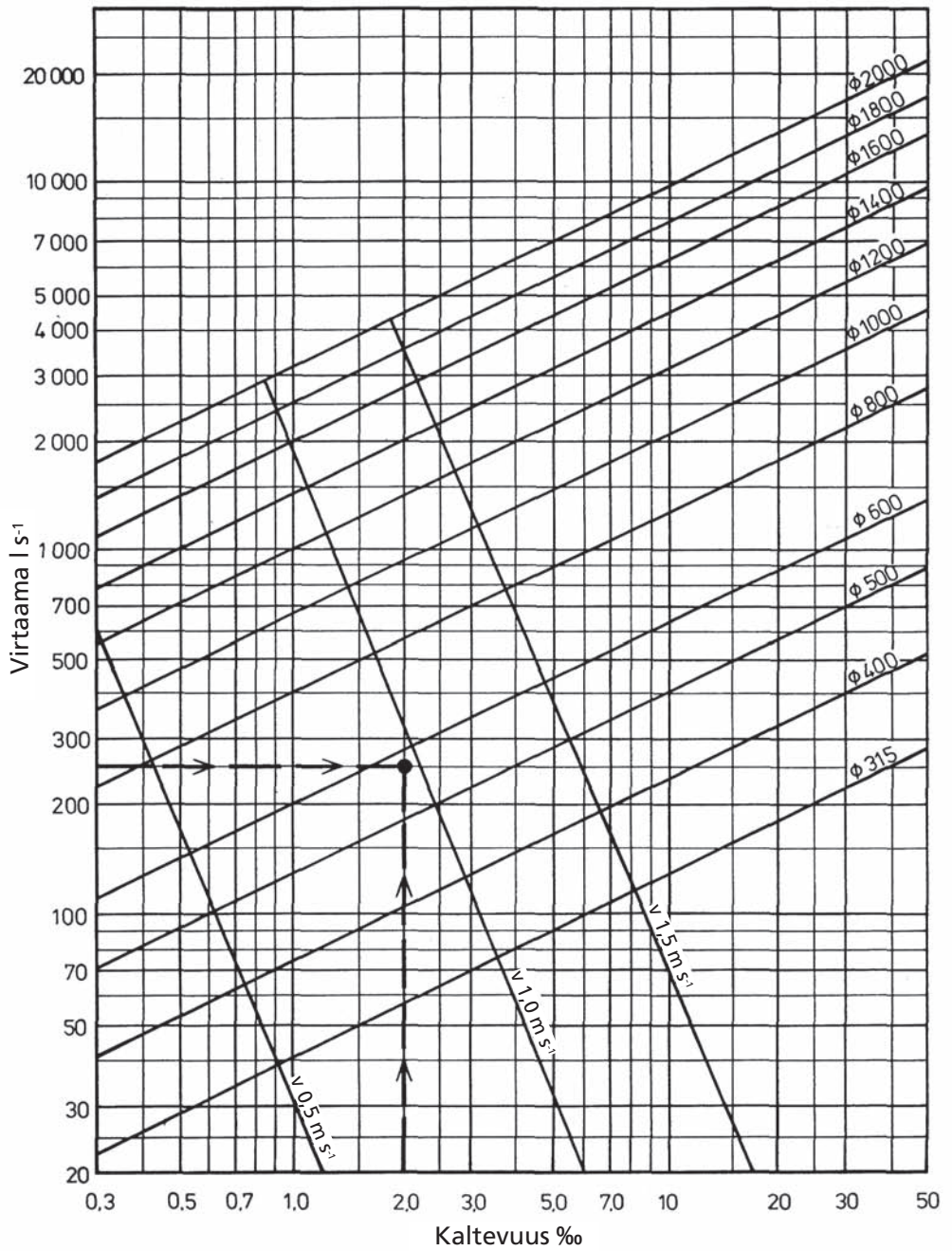


Kuva 6.15 Välppällisen niskakaivon tyypik kuva, kun putkiojan virtaama on enintään 80 l s⁻¹.



Esimerkki: Kun virtaama on 50 l s⁻¹ ja kaltevuus 0,3 %, tulee putken nimelliskooksi 300 mm.

Kuva 6.16 Mitoitusnomogrammi sisältä sileälle muoviputkelle.



Esimerkki: Kun virtaama on $250 l \cdot s^{-1}$ ja kaltevuus 2% , tulee putken nimelliskooksi $600 mm$.

Kuva 6.17 Mitoitusnomogrammi kierresaumatululle teräsputkelle (TR-profiili).

Putkiojissa on mutka- ja taitekohtiin tehtävä kaivot, joiden pohja on vähintään 50 cm putkea syvemmällä. Myös suorille osuuksille enintään noin 100 m:n välein on tehtävä kaivo putken tarkastusta ja puhdistusta varten. Kaivojen (tarkastus- ja lietekaivot) koko riippuu putken koosta siten, että kaivon halkaisija on vähintään 40 cm putken halkaisijaa suurempi. Kuitenkin isojen (halkaisija ≥ 100 cm) putkien tarkastuskaivot voidaan tehdä putken päälle putkea pienempinä. Tarvittaessa putkiojan yläpäähän on tehtävä lähtökaivo niska- tai välppäkaivona virtauksen johtamiseksi putkeen ja putken liettymisen estämiseksi. Lähtökaivo on yleensä tarpeen, kun putken halkaisija on alle 40 cm. Kuvassa 6.15 on tyyppikuva niskakaivosta putkiojalle, jonka virtaama on yli 25 l s^{-1} . Sitä pienemmillä virtaamilla voidaan käyttää salaojituksissa käytettävää niskakaivoa.

Pohjakynnykset

Ojituksen yhteydessä rakennettavia matalia pohjapatoja kutsutaan pohjakynnyksiksi. Yleensä ne toimivat vapaalla ylivirtauksella, mutta tulvan vallitessa on alaveden vaikutus purkautumiseen otettava tarvittaessa huomioon (kuva 6.18).

Vaakasuoan kynnyksen vapaan ylivirtauksen kaava on

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot \left(H + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \quad (6.18)$$

Q = virtaama ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)

μ = purkautumiskerroin

b = kynnyksen pituus (m) virtauksen poikkisuunnassa = kynnysleveys

H = yläveden vedenpinnan ja kynnyksen korkeusero (m) = painekorkeus

v = veden nopeus uomassa (m s^{-1}) g = maan vetovoiman kiihtyvyys (m s^{-2})

Virtausnopeuden vaikutus painekorkeuteen voidaan kuitenkin yleensä jättää huomioon ottamatta, jolloin kaava saa muodon

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot H \sqrt{2gH} \quad (6.19)$$

Jos pohjakynnys on leveäharjainen ($d > 2H$), purkautumiskertoimenä $2\mu/3 = m$ voidaan käyttää arvoa $m = 0,35$, ja jos se on teräväharjainen ($d < H/2$), $m = 0,40$. Jos pato on tylppäharjainen ($H/2 < d < 2H$), niin kerroin $m = 0,40\text{--}0,35$.

Kolmionmuotoisen kynnyksen, ns. v-aukon (kuva 6.19), virtaama voidaan laskea kaavalla

$$Q = \frac{4}{5} \cdot \frac{2}{3} \mu \cdot \frac{1}{2} b \cdot H \sqrt{2gH} \quad \text{tai} \quad Q = \frac{4}{5} \sqrt{2} \cdot \frac{2}{3} \mu \cdot b \cdot \frac{H}{2} \sqrt{2g \frac{H}{2}} \quad (6.20, 6.21)$$

Kolmionmuotoisen kynnyksen virtaama on siten 0,8-kertainen keskimääräistä kynnysleveyttä ($b/2$) tai 1,1-kertainen keskimääräistä painekorkeutta ($H/2$) vastaavaan vaakasuoan kynnnykseen verrattuna (kaava 6.21).

Pohjapadon poikkileikkaus voi olla suorakaide, kolmio tai niiden yhdistelmä (ks. kuva 6.19). Vaakasuoassa kynnyksessä voi olla syvennys tai kynnys voi olla sivuille päin nouseva samalla kun reunat voivat olla vinot tai pystysuorat. Padon virtaamaa (purkautumista) laskettaessa erilaiset kynnyksen osat käsitellään erikseen.

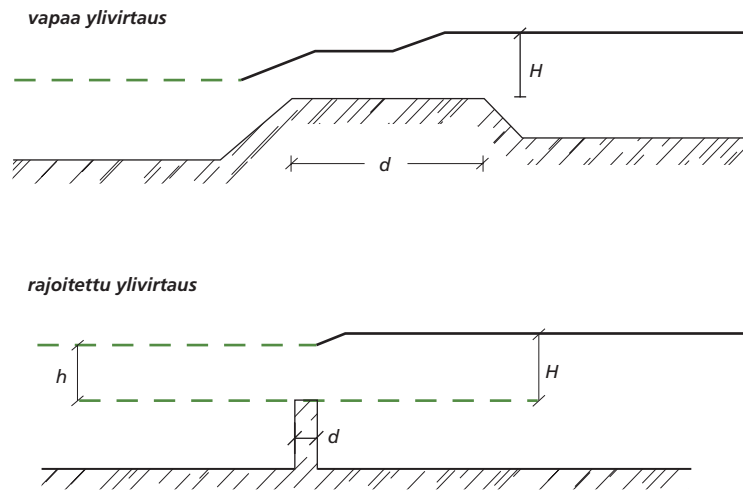
Pohjakynnystä rajoittavat luiskat ovat yleensä ojan luiskan kaltevuudessa ja kynnys voidaan tehdä sivuilta hieman korkeammaksi kuin keskeltä. Siitä huolimatta pohjakyn-

nys voidaan riittävällä tarkkuudella mitoittaa keskimääräisen kynnyskorkeuden ja keskimääräisen leveyden mukaan.

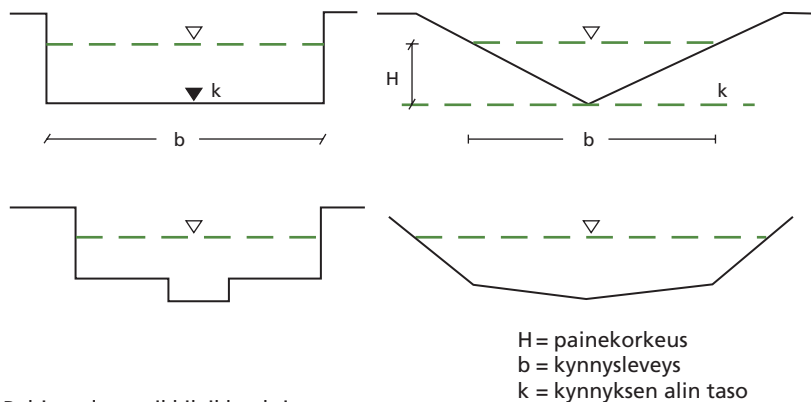
Vapaan ylivirtauksen virtaama ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) on esitetty taulukossa 6.9. Pohjapadon ylivirtaus on vapaa, jos vedenpinta alavirran puolella (alavesi) on kynnystä alempana tai se nousee kynnnyksen yli enintään 70 % ylävirran puolen vedenkorkeudesta (ylävesi).

Kun alaveden ja yläveden suhde h/H on suurempi kuin 0,7, pienentää alavesi ylivirtausta vaikutuksen riippuessa osittain myös kynnnyksen muodosta. Yleisesti voidaan käyttää kerrointa m_p , jonka suuruus riippuu vedenkorkeuksien suhteesta taulukon 6.10 mukaisesti.

Pohjakynnnykseen tai muuhun patoon voi joskus olla tarpeen tehdä pieni alivirtausaukko tai lyhyt alitusputki, jonka kautta vesi voi virrata, vaikka vesipinta laskisi kynnnyksen alapuolelle. Alivirtausaukko tai -putki voidaan mitoittaa kaavalla



Kuva 6.18 Leveäharjainen ja teräväharjainen pohjakynnys. h = alaveden vedenpinnan ja kynnnyksen korkeusero ja H = yläveden vedenpinnan ja kynnnyksen korkeusero.



Kuva 6.19 Pohjapadon poikkileikkauksia.

$$Q = \mu \cdot a \sqrt{2gH}$$

(6.22)

jossa a on aukon pinta-ala ja H veden syvyys aukon keskeltä vesipintaan mitattuna tai sitä pienempi vesipintojen ero. Purkautumiskerroin (μ) on matalalla ja leveällä aukolla ($h/b = 0,1$) 0,5 ja pyöreällä tai neliönmuotoisella aukolla 0,7 ja muutoin 0,6.

Pohjakynnys mitoitetaan perkauksen mitoitusvirtaamalla ($HQ_{1/20}$). Mitoituksessa voidaan sallia vähäistä padotusta niin, että ala- ja yläveden korkeusero on vähintään 5–10 cm. Sijoitettaessa pohjakynnys putouskohtaan tai kohtaan, missä ojan kaltevuus selvästi suurenee, pohjakynnys voidaan yleensä mitoittaa vapaalla ylivirtauksella. Vaikka pohjakynnys sijoitetaan tasaisen kaltevuuden osuudelle, se voidaan yleensä tehdä ojaa leventämättä puolta ylivedensyvyyttä (H_t) vastaavan korkuiseksi ilman haitallista padotusta. Myös keski- ja alivirtaamat (MQ , NQ) otetaan purojen osalta kynnyksen mitoituksessa huomioon. Vedenkorkeuden säätelemiseksi pohjakynnykseen voidaan tehdä seteillä tai matalalla irtokynnyksellä säädettävä syvennys.

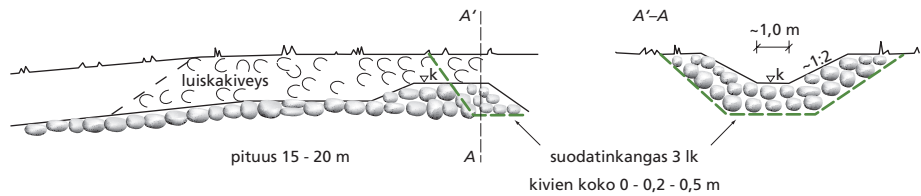
Pohjapato voidaan tehdä puusta, betonista tai kivistä riippuen osittain padon paikasta ja kynnyksen muodosta. Yleensä pohjakynnykset tehdään koskimaisina leveäharjaisina rakenteina erikokoisista luonnonkivistä tai louheesta. Kiveys on ulotettava riittävästi luiskan sisään ja rakenteen tiiveys tarvittaessa turvattava suodatinkankaalla tai murskeella (kuva 6.20). Kynnyksen alapuoli on kivettävä riittävän pitkälti syöpmisen estämiseksi. Suositeltava kiveyksen pituus on 10–20 kertaa kynnyksen korkeus ja alaluiskan (pohjan) keskimääräinen kaltevuus enintään 10 % eli 1 m/10 m. Sopiva harjan leveys (m) on yleensä $L^{1/2}$, jossa L on kynnyksen pituus metreinä. Pitkä kynnys tehdään yleensä ylävirtaan kaarevaksi. Koskimainen pohjakynnys voidaan rakentaa varsin pehmeällekin pohjalle, koska luiskista johtuvan vastapainon ansiosta kiveys ”holvaantuu” (ns. negatiivinen holvi) ja rakenteen painuminen jää suhteellisen vähäiseksi.

Taulukko 6.9 Vapaan ylivirtauksen virtaama leveäharjaisen ($m = 0,35$) ja teräväharjaisen ($m = 0,40$) vaakasuoran kynnyksen pituusmetriä kohti. H = painekorkeus.

Virtaama m ³ s ⁻¹ kynnyksen pituusmetriä kohti											
H(m)	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,2	1,5
m=0,35	0,017	0,049	0,139	0,25	0,39	0,55	0,72	1,11	1,55	2,0	2,8
m=0,40	0,020	0,056	0,159	0,29	0,45	0,63	0,82	1,27	1,77	2,3	3,2

Taulukko 6.10 Alaveden (h) ja yläveden (H) suhteen vaikutus pohjapadon ylivirtaukseen (Rinne 1945).

h/H	0,70	0,75	0,80	0,83	0,85	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99
m _p	1,00	0,97	0,93	0,89	0,85	0,79	0,74	0,68	0,60	0,50	0,36	0,26



Kuva 6.20 Koskimainen pohjakynnys (korkeus noin 1,0 m).

Pumppaamot ja penkereet

Järven, meren tai joen ja puron rantapengerryksissä on yleensä tarpeen rakentaa sekä penger että pumppaamo. Sen sijaan alapuolisen perkauksen korvaava pumppaamo ei yleensä edellytä penkereiden tekemistä. Meren rannalla, jossa äkilliset vedenkorkeusvaihtelut ovat yleisiä, kuivatusta voidaan parantaa myös suojapenkereellä ja sulkuluukulla, joka sulkeutuu meriveden noustessa ja virratessa ojaan päin.

Pumppujen tehontarve (kW) voidaan laskea kaavalla

$$P = \frac{g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (6.23)$$

ja vuotuinen sähkönkulutus (kWh) kaavalla

$$E = \frac{g \cdot V \cdot H}{\eta \cdot 3600} = \frac{W \cdot F \cdot H}{\eta \cdot 367} \quad (6.24)$$

P = pumpun teho (kW)

g = maan vetovoiman kiihtyvyys (m s^{-2})

Q = virtaama ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

H = nostokorkeus (m) nostohäviöineen

h = pumpun hyötysuhde

E = vuotuinen energiankulutus (kWh)

V = pumpattava vesimäärä vuodessa (m^3)

F = pumppaamon valuma-alue (m^2)

W = pumpattava valunta vuodessa (m)

Vuotuinen sähkönkulutus (kWh) voidaan laskea myös kaavalla

$$E = \frac{2,72}{\eta} \cdot W(\text{mm}) \cdot F(\text{km}^2) \cdot H(\text{m}) \quad (6.25)$$

Nostokorkeus (H) on vesipintojen ero nostohäviöineen. Pengerryshankkeissa nostokorkeudet ovat suhteellisen pienet, yleensä 1,5–2,5 m. Pumpun tehoa mitoittaessa voidaan nostokorkeutta arvioitaessa sovitellen käyttää ulkopuolista tulvakorkeutta (MHW–HW) ja sisäpuolista alivettä eli pumppauksen alarajaa. Nostohäviö riippuu lähinnä poistopuolen rakenteesta, mutta yleensä se on alle 0,5 m, kun veden virtausnopeus on alle $2,5 \text{ m s}^{-1}$. Tulopuolella veden virtausnopeuden tulisi olla alle 1 m s^{-1} . Sähkönkulutusta laskettaessa nostokorkeus voidaan arvioida 20–30 % pienemmäksi kuin tehoa laskettaessa, koska se määräytyy suunnilleen pumppausaikojen keskimääräisen vedenkorkeuseron mukaan. Pumppaamon mitoituksen periaate on esitetty kuvassa 6.21.

Pumpun hyötysuhde (h) riippuu pumpputyypistä ja nostokorkeudesta. Matalia nostokorkeuksia varten suunnitellun pengerryspumpun hyötysuhde on yleensä 0,3–0,6. Tavalisen pystyakselipumpun hyötysuhteena voidaan mitoituksessa käyttää arvoa 0,3 ja uppopumpulla arvoa 0,5. Nostokorkeuden pienessä hyötysuhde samalla pienenee, mikä on tarvittaessa otettava huomioon sähkönkulutusta laskettaessa 10–30 % pienempänä hyötysuhteena kuin tehontarvetta laskettaessa.

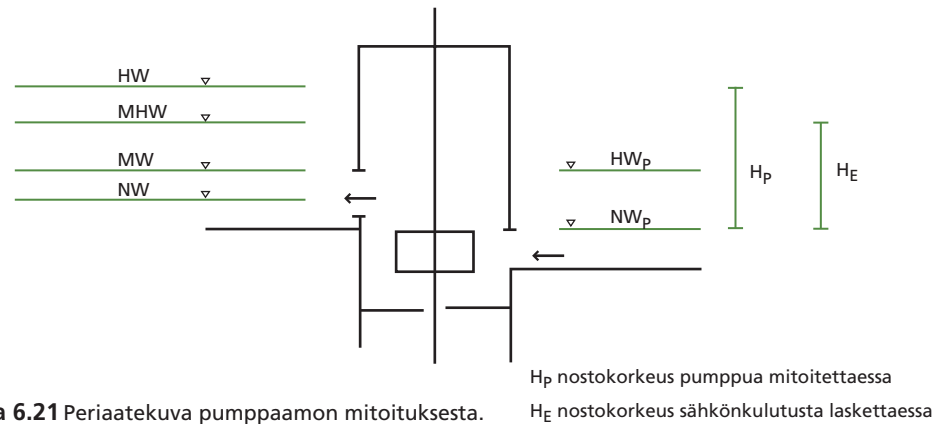
Pumppaamon mitoitusvirtaama riippuu valuma-alueen suuruudesta ja siitä, missä määrin tulvia voidaan eristysojilla tai ohivirtausputkella johtaa pumppaamon ohi ja missä määrin tulva voi nousta ja varastoitua pumpattavalle alueelle. Jos pumppaamoon johdetaan vain salaojitusalueen vedet, mitoitus voi perustua valumaan $1,0\text{--}1,5 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Jos kevättulvat voidaan johtaa pumppaamon ohi, mitoituksessa voidaan myös käyttää samaa arvoa, mutta isoilla valuma-alueilla ($5\text{--}15 \text{ km}^2$) valuma voi olla $0,7\text{--}0,8 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Mikäli kaikki vedet johdetaan pumppaamoon, mitoitusvalumaksi riittää yleensä keskiylivaluma tai sitä hieman suurempi valuma eli $1,5\text{--}2,5 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ valuma-alueen suuruudesta riippuen.

Pumppaamon edessä tulisi olla tasausallas tai allasoja, jotta pumppaus olisi riittävän pitkäkestoista eivätkä vedenpinnan vaihtelut aiheuttaisi luiskien syöpymistä. Altaan koon tulisi olla sellainen, että vesipinnan aleneminen olisi enintään 1 cm minuutissa, joten altaan pinta-alan tulisi olla vähintään 60 m² pumpun 10 sekuntilitraa (l s⁻¹) kohti. Yleensä kuivatusojien pinta-ala ylittää tarvittavan tasausaltaan pinta-alan, ja ne toimivat jossain määrin myös tulvavesien varastoaltaina.

Pumppaamon vuotuinen sähkönkulutus on ensisijaisesti riippuvainen pumpattavasta vesimäärästä. Jos kaikki vesi pumpataan, vesimäärä on vuotuisen valunnan suuruinen eli alueen sijainnista riippuen yleensä 250–320 mm eli 8–10 l s⁻¹ km⁻². Jos kevättulvat voidaan johtaa ohi, vesimäärä on 30–40 % pienempi ja jos pumppaus rajoittuu kasvukauteen, vesimäärä on 30–40 % vuotuisesta valumasta.

Pumppujen valintaan vaikuttavat mitoitusvirtaama ja moottoriteho sekä sähkönkulutus. Pumppujen käytöstä on huomattava, että yhden ison pumpun sijasta on suositeltavaa käyttää kahta pientä pumppua, jotka voivat olla eritehoisia. Jos pumppuja on kaksi (tai useampi), on huomattava, että ne käynnistyvät eri aikaan, mikä vaikuttaa pienentävästi pääsulakkeeseen ja sähköliittymän hintaan. Lisäksi on huomattava, että kesällä samoin kuin talvella kuivavara voi olla varsin pieni, mikä parantaa maan kosteusolosuhteita ja hidastaa maan painumista.

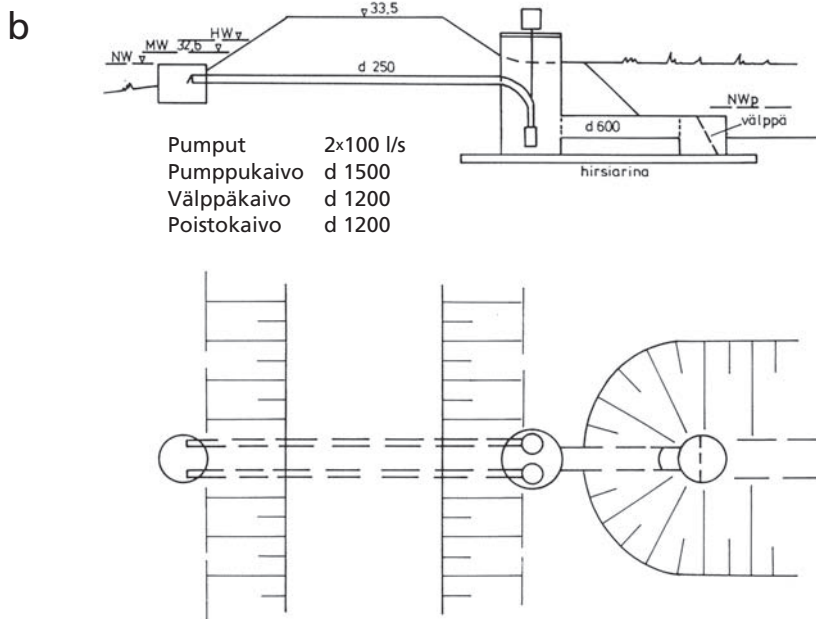
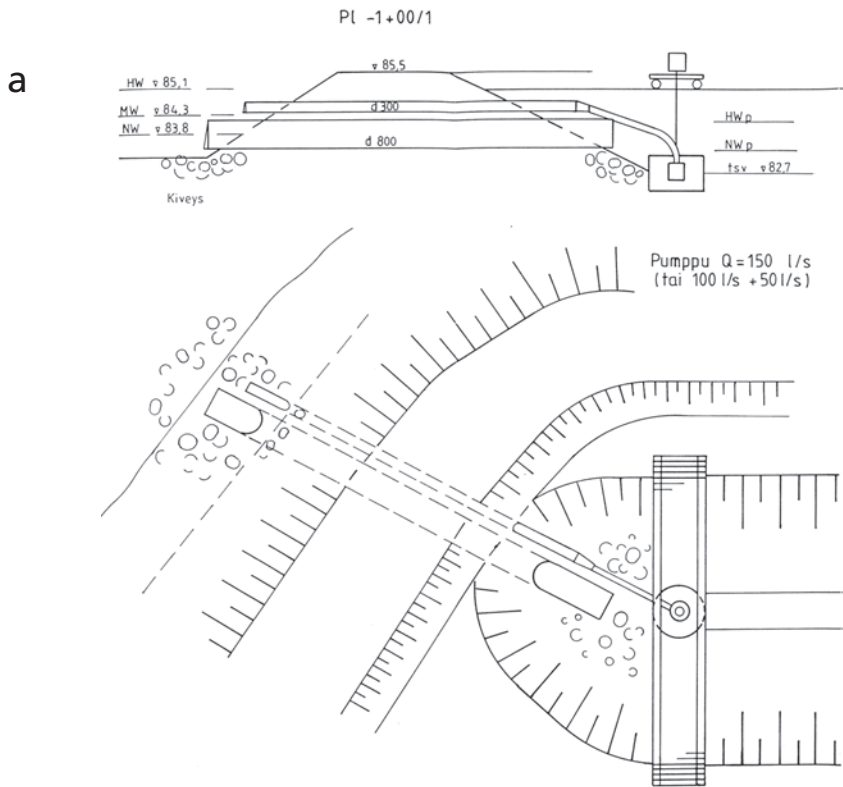
Pengerryskuivatus edellyttää suojapenkereen tekemisen vesistön rantaan. Penkereen harjankorkeudeksi riittää yleensä HW + 0,5–1,0 m, mutta painuvilla mailla se voidaan tehdä matalammaksikin ja korottaa vaihteittain ajan mittaan. Penkereen korkeudessa on järven tai meren rannalla tarvittaessa otettava huomioon aallokon korkeus, joka voidaan arvioida ulapan pituuden ja rannan kaltevuuden mukaan taulukosta 6.11. Taulukko perustuu norjalaisiin nomo-



Kuva 6.21 Periaatekuva pumppaamon mitoituksesta. H_p nostokorkeus pumppua mitoitettaessa H_E nostokorkeus sähkönkulutusta laskettaessa

Taulukko 6.11 Aallon likimääräinen nousukorkeus sisävesillä tuulen nopeudella 12 m s⁻¹ (Ollila 1999). T=tasapohjainen ja K=kivikkopohjainen ranta.

Ulapan pituus (km), L	AALLON NOUSUKORKEUS (cm)						
	Rannan kaltevuus						
	1/30	1/10	1/5	1/4		1/2,5	
	T	T	T	T	K	T	K
1,0	5	15	25	40	15	60	20
2,0	10	20	35	55	20	80	30
4,0	15	30	50	75	30	115	40
6,0	20	35	55	90	35	135	50
8,0	20	40	75	115	45	165	65
10,0	25	50	85	130	55	190	75



Kuva 6.22 Kaksi eri pumppaamoratkaisua.

- Hoitosiltapumppaamo, jossa osa vedestä johdetaan pumppaamon ohi vapaavirtauksena.
- Kaivopumppaamo, jossa kaikki vedet pumpataan.

grammeihin (Forskrifter for dammer, Universitets forlaget, Norge 1981), joissa aallon nousukorkeus perustuu keskimäärin kerran kuukaudessa sattuvaan suurimpaan tuulen nopeuteen.

Yleensä penger voidaan kuitenkin sijoittaa siten, ettei aallokko vaikuta täydellä korkeudella penkereeseen. Kun rannan kaltevuus on $1/10$ – $1/5$, rantaan saapuvan aallon korkeus (m) on suunnilleen $0,2 \cdot L^{1/2}$ (km). Aallokon korkeus on järven rannoilla vain harvoin yli 0,5 m varsinkin kun puut ja pensaas vaimentavat aallokon, joten penkereen vähimmäiskorkeus on yleensä riittävä. Tarvittaessa penkereen luiska on vahvistettava kiviverhouksella aallokkoa vastaan.

Penkereen harjan leveyden tulisi olla 3–4 m. Matalissa penkereissä sisäluiska voidaan yleensä tehdä viljeltäväksi, jolloin sen kaltevuuden tulisi olla 1:6 tai loivempi. Muutoin luiskien kaltevuuden tulisi olla 1:1,5–1:2. Valtaojan, puron ja joen varrella penkereen ja uoman väliin tulee jättää 1–3 m leveä suojakaista korkeuseron tasoittamiseksi ja sortumavaaran vähentämiseksi.

Ojitushankkeiden pumppaamoratkaisuna tulevat lähinnä kysymykseen hoitosilta- ja kaivorakenteet (kuva 6.22). Hoitosiltapumppaamo voi olla yksinkertainen paalu- tai laiturirakenne tai ojan yli tehty kapea siltarakenne. Kaivopumppaamo voidaan tehdä erilaisena rengas- tai putkirakenteena. Mikäli pumpppu sijoitetaan salaojakaivoon, sitä sanotaan salaojapumppaamoksi. Pumppaamo voidaan tehdä myös isoon rumpuputkeen, jolloin sitä sanotaan vaakaputkipumppaamoksi.

Uoman vahvistukset

Valtaojan luiskaa ja pohjaa on tarvittaessa vahvistettava epäedullisista maaperä- ja virtausolosuhteista johtuen. Uoman vahvistamismenetelminä tulevat kysymykseen tapauksesta riippuen (kuva 6.23):

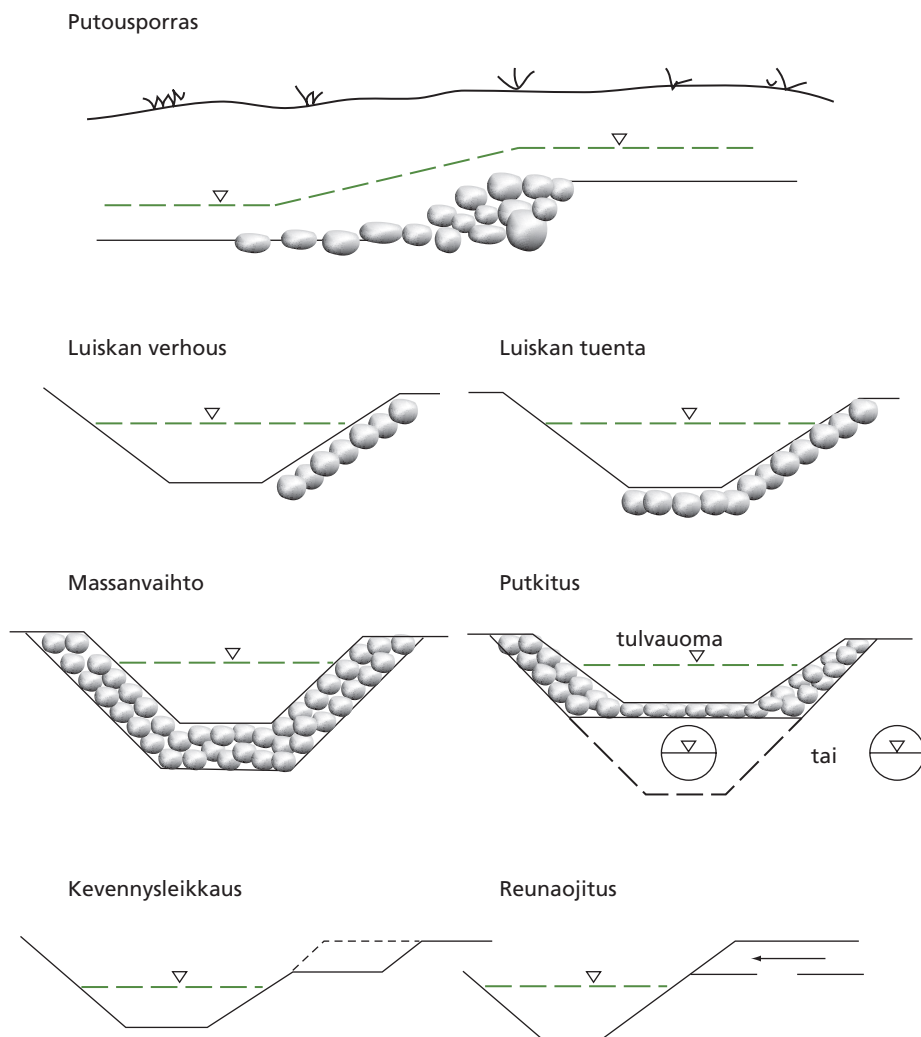
- pohjakynnys tai putousporras
- luiskan suojaus tai tuenta
- massanvaihto tai putkitus
- kevennysleikkaus tai tulvatasanteen kaivu
- vaihteittainen kaivu.

Vahvistamistapa valitaan ensisijaisesti vahvistamistarpeiden perusteella, mutta rakenteen mitoituksen ohella tulee kiinnittää huomiota myös ympäristöön ja rakenteen luonnonmukaisuuteen.

Vahvistamistarpeet pyritään ottamaan riittävästi huomioon jo maastotutkimuksissa ja suunnittelussa, mutta useimmiten ne tulevat esiin vasta työn aikana. Toisaalta suunnittelun aikana ei yleensä kiinnitetä riittävää huomiota maaperätutkimuksiin ja toisaalta varmuuden vuoksi tehtävät vahvistukset saattavat nostaa kustannuksia tarpeettomasti, joten vasta tarpeen mukaan tehtävät vahvistukset ovat kuitenkin useimmiten taloudellisin vaihtoehto.

Pohjakynnyksellä voidaan nostaa vesipintaa tai estää sen liiallinen aleneminen, mikä saattaa estää luiskan sortumisen. Lisäksi virtaus hidastuu, mikä vähentää eroosiovaaraa ja lietteen kulkeutumista. Putousportaalla voidaan eroosioherkillä osuuksilla keskittää putous sopivaan paikkaan ja siten loiventaa ojan pohjan kaltevuutta eroosiovaaran pienentämiseksi. Erityisen herkkiä maalajeja ovat siltti, hieno hiekka sekä liejusavi ja maaton turve, joiden sallittu virtausnopeus on $0,3$ – $0,4 \text{ m s}^{-1}$.

Luiskan suojaamiseksi syöpymiseltä voidaan käyttää erilaisia teknisiä tai insinööribiologisia verhouksia. Useimmiten käytetään luiskan vahvistamista nurmettamalla tai istutuksilla tai kiviverhousta. Myös erilaisia eroosioverkkoja tai ristikkorakenteita voidaan käyttää. Insinööribiologiset menetelmät voivat samalla olla osa kohteen ympäristönhoidon (ks. Tietoruutu 6.3). Tarvittaessa voidaan syöpymisen ja sortumien estämiseksi suorittaa massanvaihto ja korvata heikko pohjamaa kiveyksellä tarvittavine suodatinkankain. Kohteissa, joissa avo-ojaa on vaikea tehdä riittävän syväksi, ojaa voidaan putkittaa, varsinkin jos mitoitusvirtaama ei edellytä kovin suurta putkea.



Kuva 6.23 Uomien vahvistusrakenteita.

Puroissa virtauksen kuluttava vaikutus kohdistuu eniten uoman ulkokaarteisiin, joissa luontaisella kasvillisuudella tai sen puuttumisella on syöpymisen kannalta suuri merkitys. Ulkoluiskaa voidaan vahvistaa erilaisilla istutuksilla tai kiveyksillä. Ulkoluiskan syöpmistä voidaan vähentää myös tekemällä uomaan kivistä tai puista virtausta ohjaavia suisteita tai esteitä.

Korkeissa leikkauksissa voidaan koheesiomailla tehdä luiskan yläosan kevennysleikkaus tai alaosan tulvatasanne sortumavaaran vähentämiseksi. Yleensä riittää yksipuoleinen kevennysleikkaus (ns. jätänpolku), jos vastaluiska jätetään koskematta. Turve- ja liejuilla syvän ojan luiskien vakavuutta voidaan parantaa reunaojituksella, jossa sivulle päin suunnilleen kohtisuoraan uomaan nähden kaivetaan matalia oja 10–20 m:n välein. Mikäli oja on tarpeen tehdä huomattavasti aikaisempaa syvemmäksi tai tehdään uusi oja pehmeään maahan, sortumat voidaan välttää vaiheittaisella kaivulla. Ojan vaiheittainen syventäminen tehdään 1–3 vuoden välein, ja lopulliseen syvyyteen kaivaminen voidaan myös jättää kunnossapidon yhteyteen.

Juha Järvelä

Tietoruutu 6.3

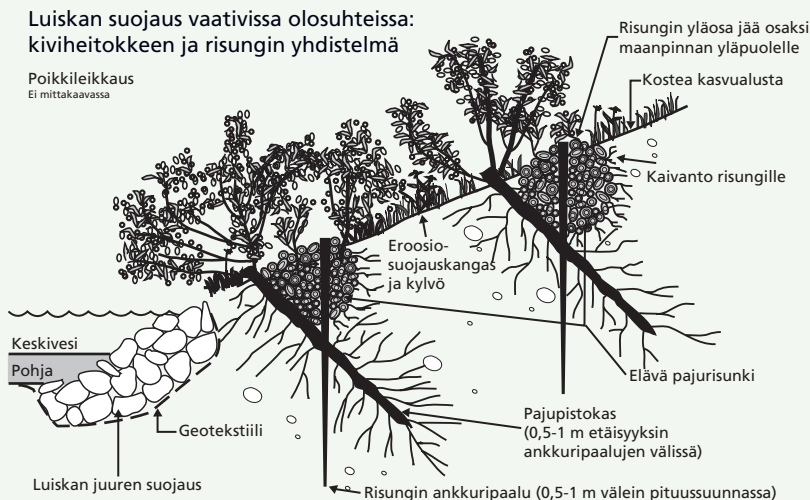
Luonnonmukaiset materiaalit ja insinööribiologia uomien suojaamisessa ja vahvistamisessa

Luonnonmukaisessa vesirakentamisessa suositetaan sellaisten materiaalien käyttöä, jotka vesistöissä kyseisellä paikalla muutoinkin esiintyvät. Yksinkertaisimmillaan luonnonmukainen vesirakentaminen voi olla ns. insinööribiologisten menetelmien hyödyntämistä, millä yleensä tarkoitetaan kasvillisuusistutusten käyttöä kesäaikaisen keskivedenpinnan yläpuolisella rantavyöhykkeellä. Ala on paljolti kehittynyt saksankielisessä Keski-Euroopassa, mistä myös termi *'Ingenieurbiologie'* on suomeksi suoraan käännetty. Englanninkielisiä termivastineita on useampia, mutta *'soil bioengineering'* on näistä vakiintunut kirjallisuudessa.

Yleisimmin insinööribiologisia menetelmiä, mm. risunkeja ja oksakatteita, käytetään eroosiosuojaukseen. Käytettävä menetelmä tai niiden yhdistelmä on valittava olosuhteiden – kuten maalaji, vedenkorkeuden vaihtelut, virtausnopeudet, juuriston syvyys, uusiutumiskyky, ihmisen tai karjan vaikutukset, hoitotarve ym. – mukaisesti. Kasvillisuutta voidaan käyttää yksin tai yhdessä kivien ja puun kanssa (kuva T6.2). Käytettävien kasvien tulee olla sekä valuma-alueelle että kyseisiin habitaatteihin luontaisesti kuuluvia. Puuta voidaan käyttää myös kuolleena, jolloin se toimii välittömänä mekaanisena eroosiosuojana ja monipuolistaa virtausolosuhteita.

Ennen insinööribiologisten menetelmien käyttöä eroosiosuojaukseen on selvítettävä ongelmien syy. Suunnittelussa on otettava huomioon ongelman aiheuttaja eikä hoidettava vain oireita. Usein tehokkaammat ja kestävämmät ratkaisut ovat saavutettavissa ongelman alkulähteillä kuin alempana uomaverkostossa. Virheellinen ratkaisu saattaa vain johtaa jatkuvaan ja kalliiseen kunnossapitotyöhön. Niin ikään on tutkittava ns. nollavaihtoehto, ts. ettei tehdä mitään vaan annetaan luonnon omien voimien muokata uomaympäristöä.

Insinööribiologisia menetelmiä käytettiin yleisesti Suomessa uittoväylien suojaamisessa vielä 1900-luvun alkupuolella. Sittenmin menetelmiä on kehitetty nykyajan olosuhteita vastaaviksi mm. Kyrön- ja Päntäneenjoella tehtyjen kokeilujen avulla. Insinööribiologian käsikirjoja tai julkaisuja ovat laatineet mm. Begemann ja Schiechl (1994), USDA (1996), Eubanks ja Meadows (2002), Florineth (2012), Studer ja Zeh (2014) sekä EFIB (2015). Suomalaisesta näkökulmasta kokemuksia ja ohjeita ovat esittäneet Jormola ym. (2003) ja Näreaho ym. (2006).



Kuva T6.2 Luiskan insinööribiologinen suojaus vaativissa olosuhteissa käyttäen kiviheitokkeen ja risungin yhdistelmää (mukailtu USDA 1996).

6.4 Peruskuivatuksen vesiensuojelu ja ympäristöhoito

Ojituksella on maankuivatuksen ohella monia ympäristövaikutuksia, jotka täytyy ottaa huomioon suunnittelussa ja työn toteuttamisessa. Ympäristövaikutukset voivat olla sekä myönteisiä että haitallisia ja sekä tilapäisiä että pysyviä.

Ojituksen haitallisia vaikutuksia ovat mm. mahdollinen tulvien lisääntyminen alapuolissa vesistössä ja alivirtaamien pieneneminen sekä kiintoaineen kulkeutuminen. Seurauksena voi olla myös ravinnehuuhtoumien lisääntyminen sekä kasvi- ja eläinlajien väheneminen uomassa ja sen varrella. Erityinen ongelma on maan ja valumavesien happamuuden ja metallipitoisuuksien lisääntyminen happamilla sulfaattimailla. Pohjaveteen ojituksen mahdolliset vaikutukset rajoittuvat lähinnä vedenpinnan vähäiseen alenemiseen.

Ojitushankkeessa ympäristöasiat tulee ottaa huomioon niin suunnittelussa kuin myös toteuttamisessa. Ojitussuunnitelmassa tulee kiinnittää huomiota siihen, että ojitushanke toteutetaan mahdollisimman vähän olemassa olevia ympäristöarvoja heikentävästi tai vesistön hydrologisia olosuhteita muuttavasti. Myös kaivumaiden sijoittaminen edellyttää ympäristönäkökohtien huomioon ottamista.

Ojitushankkeissa tulisi noudattaa mahdollisuuksien mukaan luonnonmukaisen vesirakentamisen periaatteita, jolloin huomioon tulevat otetuiksi uoman morfologia, hydrologia, vedenlaatu, biologia ja maisemalliset näkökohdat (ks. Luku 5). Haitallisia vaikutuksia vesistöön ja muuhun ympäristöön voidaan estää tai vähentää erilaisilla toimenpiteillä. Itse uomassa haitallisia muutoksia vesistöön ja muuhun ympäristöön voidaan vähentää mm. putousportailla ja pohjakynnyksillä sekä alivesi- ja tulvauomilla. Peltoalueen ja uoman väliin voidaan jättää piennar tai leveämpi suojakaista tai suojavyöhyke. Lisäksi hankkeita voidaan täydentää tekemällä laskeutusaltaita ja mahdollisuuksien mukaan kosteikkoja vesistökuormituksen vähentämiseksi. Sopiviin maastokohtiin voidaan myös jättää tai muodostaa tulva-alueita luonnon monimuotoisuuden lisäämiseksi ja kiintoaineiden kulkeutumisen vähentämiseksi.

Peruskuivatustöissä on perinteisesti pyritty vähäiseen uomaeroosioon, koska se on uomien toimintakyvyn kannalta edullista ja vähentää niiden kunnossapitotarvetta. Luisien kaltevuuksia voidaan loiventaa, uomien eroosiosuojauksia tehostaa ja käyttää putkioita korvaamaan avo-ojia kuten erityisrakenteiden yhteydessä on lähemmin esitetty.

Ojituksen työnaikaiseen ympäristöhoitoon kuuluu työn haittavaikutusten rajoittaminen sekä työalueella että sen ulkopuolella ja varsinkin ojitusalueen alapuolisessa vesistössä. Työssä on myös huolehdittava kunnostuksen tai perkauksen johdosta vaurioituneiden rakenteiden ja kulkuyhteyksien korjauksesta tai kunnostuksesta. Samalla voidaan tehdä tarvittavia maisemointitoimia ympäristön parantamiseksi.

Vesiensuojelu- ja ympäristöhoitotoimenpiteitä

Ojitushankkeen toteuttamisesta saattaa aiheutua jonkin verran tulvavirtaamien lisäystä alapuolisessa uomassa, varsinkin jos ojituksella poistetaan tulvia. Virtaamanlisäys on kuitenkin yhden hankkeen osalta yleensä niin vähäinen, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon. Mikäli seurauksena kuitenkin olisi huomattavaa tulvimista tai vettymistä alapuolisella alueella, on ojittaja tarpeen mukaan velvollinen osallistumaan alapuolisen uoman laajentamiseen ja kunnossapitoon (VL 5:12).

Ojituksen ympäristövaikutukset riippuvat erityisesti ojan sijainnista ja kaivumaista. Sekä maankäytön että ympäristön kannalta on oleellista kaivumaiden sijoittaminen. Maanomistajalla on oikeus käyttää kaivumaat hyväkseen, mutta muutoin ojitettajan on ne sijoitettava ojan varteen tai muualle siten, että niistä ei ole sanottavaa haittaa (VL 5:10). Maiseman kannalta erityistä merkitystä on ojan linjauksella sekä luiskilla ja pientareilla. Ojaan kuuluu vesilain mukaan sen kummallakin puolella vähintään yhden metrin levyinen piennar (VL 5:10).

Kaivumaat voidaan yleensä pellolla levittää ojan varteen maastoon sopeutuvasti siten, ettei maankäyttöä oleellisesti vaikeuteta, mutta tarvittavin osin ne on vietävä pois maanomistajan kanssa sovittuun paikkaan. Metsän osalla kaivumaat yleensä läjitetään tai tasoitetaan ojan varteen. Tontille tai muutoin erityiseen käyttöön varatulle alueelle kaivumaita ei saa ilman omistajan suostumusta sijoittaa. Kaivumaita voidaan myös käyttää hyödyksi matalien kohtien korottamisessa tai maanpinnan muotoiluun maisemointitarkoituksessa. Pengerryshankkeissa ojien kaivumaat voidaan yleensä käyttää penkereen tekemiseen.

Yleinen ongelma ojitukseen liittyen on kiintoaineksen kulkeutuminen, jota voidaan rajoittaa ja ehkäistä rakenteellisin ja työnaikaisin toimenpitein. Rakenteina tulevat kysymykseen pohjakynnykset sekä lasketusaltaat ja kosteikot, joilla on merkitystä myös ravinnekuormituksen vähentämisessä sekä maiseman ja luonnon monimuotoisuuden edistämisessä. Työnaikaisina rakenteina voidaan tehdä lietteenkeräysaltaita tai lietekuoppia tai matalia työpa-toja. Kiintoaineen kulkeutumiseen voidaan vaikuttaa myös uoman muotoilulla.

Yleensä valtaojat ovat tilusrajojen suuntaisia ja suoria ja niiden luiskat liian jyrkkiä. Maisemallisesti olisi suotavaa, että valtaoja ja varsinkin puroluokan uoma olisi loivasti mutkitteleva ja luiskat riittävän loivat ja kaltevuudeltaan vaihtelevat. Myös penkereiden kohdalla on syytä kiinnittää huomiota maisemallisiin seikkoihin. Yleensä ne ovat kuitenkin niin matalia (alle 1,5 m), etteivät ne juurikaan erotu maisemassa, varsinkin kun sisäpuolinen luiska tehdään viljeltäväksi.

Pellon kohdalla valtaojan varteen jätetään yleensä yhden metrin levyinen piennar ja puron varteen kolmen metrin levyinen suojakaista. Eroosioherkillä ja tulvivilla alueilla voidaan käyttää suojakaistoja huomattavasti leveämpiä suojavyöhykkeitä. Uoman varteen voidaan myös istuttaa puita ja pensaita maisemallisesti merkittäviin kohteisiin, kuten ojien risteyskiin ja pohjakynnysten kohdalla. Samalla lisätään luonnon monimuotoisuutta.

Valtaojien ja purojen kunnostuksessa on tarpeen kiinnittää huomiota myös luonnonmukaisuuteen. Uoman mitoituksessa luonnonmukaisuutta voidaan lisätä sallimalla vähäinen tulviminen alavimmilla alueilla, jolloin uoman perkaustarve samalla vähenee. Aikoinaan oikaistujen purojen mutkia voidaan palauttaa ja viettävillä mailla ojaan voidaan yleensä tehdä matalia pohjakynnyksiä, joiden ansiosta uomassa on vettä kuivinakin aikoina. Ojan luiskien loiventamisen lisäksi voidaan tulvia varten tehdä matala uoman levennys tulvasanteeksi. Usein on mahdollista suorittaa perkaus tai kunnostus toispuoleisena, jolloin toisen puolen luiska jää koskemattomaksi. Uoman varteen voidaan sijoittaa myös kivi-ryhmiä ja luiskaan sopiviin paikkoihin yksittäisiä kiviä. Myös pohjakynnykset ja uomanvahvistukset voidaan kivetä luonnonmukaisesti ja tarvittaessa siten, että niistä on puroissa myös kalataloudellista hyötyä. Kuvissa 6.24–6.27 on esitetty maatalousalueella virtaavan uoman kunnostuksessa käytettyjä luonnonmukaisia ratkaisuja. Kunnostus tehtiin kuivatussyvyyden ja uoman vedenjohtokyvyn parantamiseksi sekä uoman yläjuoksulla esiintyneen eroosion vähentämiseksi.

Happamien sulfaattimaiden kuivatustilanteen parantamisesta aiheutuva erityinen uhka on alapuolisen vesistön happamoituminen, joka voidaan ehkäistä erilaisin toimenpitein. Alueen ojat voidaan kaivaa useassa vaiheessa ja vedenpinnan alentamista voidaan säädellä padoilla. Lisäksi voidaan kaivumaita tarpeen mukaan kalkita. Tarvittaessa voidaan myös rakentaa erityinen asema alueelta poisjohdettavien vesien neutraloimista varten

Suojakaistat ja suojavyöhykkeet

Suojakaistat ja -vyöhykkeet ovat uoman ja pellon välisissä olevia monivuotisen kasvilisäyksen peittämiä alueita, joita ei lannoiteta eikä käsitellä kasvinsuojeluaineilla. Suojakaistoilla ja suojavyöhykkeillä pyritään vähentämään pellolta pintavalunnan mukana tulevaa kiintoainetta ja ravinnekuormitusta sekä torjunta-aineiden kulkeutumista vesiin. Niillä



Kuva 6.24 Perniön Juottimenojaa kunnostuksen jälkeen. Mutkittelleen alivesiuoman yläpuolelle on kaivettu tulvatasanteet uoman vedenjohtokyvyn parantamiseksi (Kuva Liisa Laitinen).



Kuva 6.25 Tulvatasanne voidaan tehdä vain toiselle puolelle uomaa ja toisen puolen kasvillisuus jätetään koskemattomaksi (Kuva Liisa Laitinen).



Kuva 6.26 Juottimenojaan rakennettu pohjakynnys. Kynnys hidastaa virtausta ja pidättää kiintoainesta (Kuva Maija Paasonen-Kivekäs).



Kuva 6.27 Kunnostettua Juottimenojaa. Uoman varteen on jätetty puita ja muuta kasvillisuutta sitomaan maata eroosiota vastaan sekä monipuolistamaan maisemaa ja antamaan eliöille suojaa ja ravintoa (Kuva Maija Paasonen-Kivekäs).

voidaan myös ehkäistä uomien liettymistä ja kunnossapitotarvetta. Kiintoainetta pidätty kasvustoon pintavalunnan hidastuessa ja osan imeytyessä maaperään. Kiintoaineen ja ravinteiden väheneminen riippuu ensisijaisesti suoja-alueen leveydestä ja kasvillisuudesta. Suojavyöhykkeet lisäävät luonnon monimuotoisuutta, muodostavat ekologisia käytäviä ja edistävät riista- ja kalataloutta.

Suojakaistoilla ja suojavyöhykkeillä pyritään ennen kaikkea vähentämään pelloilta pintavalunnan mukana tulevaa kiintoaine- ja ravinnekuormitusta. Kiintoainetta pidätty kasvustoon pintavalunnan hidastuessa ja osan imeytyessä maaperään. Kiintoaineen ja ravinteiden väheneminen riippuu ensisijaisesti suoja-alueen leveydestä ja kasvillisuudesta. Suojavyöhykkeet lisäävät luonnon monimuotoisuutta, muodostavat ekologisia käytäviä ja edistävät riista- ja kalataloutta.

Suojakaistat soveltuvat tasaisille tai loivasti viettävälle pelloille, jotka rajoittuvat valtaajiin, luonnon uomiin, järviin, lampiin ja merialueisiin. Suojavyöhykkeitä on tarpeen perustaa erityisesti jyrkästi viettävälle peltoalueille, joilla esiintyy paljon pintavaluntaa ja eroosiota. Vyöhykkeistä on hyötyä myös helposti sortuvilla uomaosuuksilla. Sopivia suojavyöhykkeiden sijoituspaikkoja ovat myös alavat rantapelot, joille tulva nousee toistuvasti. Näiden alueiden pysyvä kasvipeitteisyys ja lannoittamattomuus vähentävät kiintoaineen kulkeutumista ja ravinteiden huuhtoutumista varsinkin tulva-aikoina. Lisättäessä uomien mutkittelua kunnostushankkeissa voidaan suojavyöhykkeitä käyttää apuna uoman ja peltolohkojen linjauksen suunnittelussa.

Ojitushankkeen yhteydessä voidaan selvittää myös suojakaistojen ja -vyöhykkeiden perustaminen tai laatia erillinen maisemointisuunnitelma, mutta yleensä ne perustetaan tilakohtaisina erillisinä hankkeina. Isojen ja yhtenäisten suoja-alueiden perustaminen edellyttää tilojen välistä yhteistyötä, jota voidaan edistää käyttäen hyväksi alueellisissa ympäristökeskuksissa tehtyjä suojavyöhykkeiden yleissuunnitelmia.

Suojakaistat ja -vyöhykkeet vaativat säännöllistä vuotuista hoitoa. Jotta suojavyöhyke vähentäisi varsinkin liukoisten ravinteiden huuhtoutumia, on kasvusto niitettävä ja korjattava pois vuosittain tai sitä on laidunnettava. Laiduntaminen on sallittua vain, jos se ei lisää eroosiota ja ravinnehuuhtoutumia eikä huononna veden hygieenistä laatua.

Laskeutusaltaat ja kosteikot

Laskeutusaltaalla tarkoitetaan ojan tai puron yhteyteen kaivamalla tai patoamalla tehtyä vesiallasta, jossa virtausnopeutta vähentämällä otetaan talteen pelloilta tai ojaverkosta veden mukana liikkeelle lähtenyt kiintoainetta ja siihen sitoutuneita ravinteita ja estetään niitä pääsemästä vesistöön. Kosteikolla tarkoitetaan luontaista tai rakennettua vesiallasta ja sen ranta-aluetta, joka on suuren osan vuodesta veden peitossa ja muunkin ajan kosteana. Sen on oltava riittävän suuri myös ravinteiden pidättymiseen. Keskeinen tekijä altaan ja kosteikon tehokkuudessa on veden viipymä eli aika, jossa altaan tilavuutta vastaava vesimäärä altaaseen tulevalle virtaamalla kertaalleen vaihtuu (ks. Tietoruutu 6.4).

Laskeutusaltailla ja kosteikoilla pyritään pidättämään uomassa kulkeutuvaa maa-ainesta ja ravinteita. Kosteikot vähentävät kiintoaineen lisäksi myös typen ja fosforin, torjunta-aineiden ja raudan pitoisuuksia vedessä. Tavanomaisilla laskeutusaltailla sen sijaan vähennetään lähinnä vain kiintoaineksen kulkeutumista. Veden savisameuteen laskeutusaltailla ja kosteikoilla ei ole vaikutusta. Jos niiden pinta-ala kuitenkin on riittävän suuri yläpuoliseen valuma-alueeseen verrattuna, niillä on myös virtaamaa tasaava vaikutus.

Laskeutusaltaan toiminta perustuu veden virtausnopeuden hidastamiseen niin paljon, että vedessä olevat kiintoainepartikkelit laskeutuvat altaan pohjalle. Laskeutumiseen vaikuttaa veden viipymä altaassa. Lyhyellä viipymällä vain karkeimmat maahiukkaset ehtivät laskeutua. Hienojakoinen savilajite, joka sitoo runsaimmin ravinteita, ei ehdi laskeutua

muutaman päivänkään viipymän aikana. Käytännössä laskeutusaltailla voidaan pysäyttää vain hietaa ja sitä karkeampia maalajeja.

Kosteikossa tärkeimmät puhdistusprosessit laskeutumisen ohella ovat liukoisten ravinteiden reaktiot sekä ravinteiden pidäytyminen kasvustoon ja vapautuminen kasvustosta. Kosteikon toimivuuden edellytyksenä on runsaan ja monipuolisen vesikasvillisuuden muodostuminen. Kasvillisuus sitoo ravinteita ja vaikuttaa veden ja pohjasedimentin happiolo-suhteisiin ja sitä kautta puhdistusprosesseihin.

Käytännössä laskeutusaltaan ja kosteikon tehokkuuteen kiintoaineen ja ravinteiden pidättäjänä vaikuttaa ennen kaikkea sen pinta-ala suhteessa yläpuoliseen valuma-alueeseen. Lisäksi puhdistustulokseen vaikuttavat rakenteiden muotoilu, valuma-alueen maaperä, tulevan veden laatu ja kosteikon kasvillisuus. Jos rakentamiseen käytetään viljelykäytössä ollutta aluetta, niin on tärkeää poistaa fosforipitoinen pintakerros ennen rakentamista.

Valuma-alueen alaosaan sijoitettavan ison laskeutusaltaan ja kosteikon sijasta on usein edullisempaa sekä niiden mitoituksen, rakentamisen että hoidon kannalta tehdä pienempiä altaita ja kosteikkoja eripuolille valuma-aluetta. Ne olisi pyrittävä sijoittamaan lähelle peltoalueita, joilta purkautuvien valumavesien kiintoaine- ja ravinnepitoisuudet ovat useimmiten korkeampia kuin muiden alueiden. Varsinkin viljelyksestä poistetut alavat ja painuvat alueet voidaan myös kaivaa laskeutusaltaiksi tai kunnostaa kosteikoiksi suojaavyöhykkeineen.

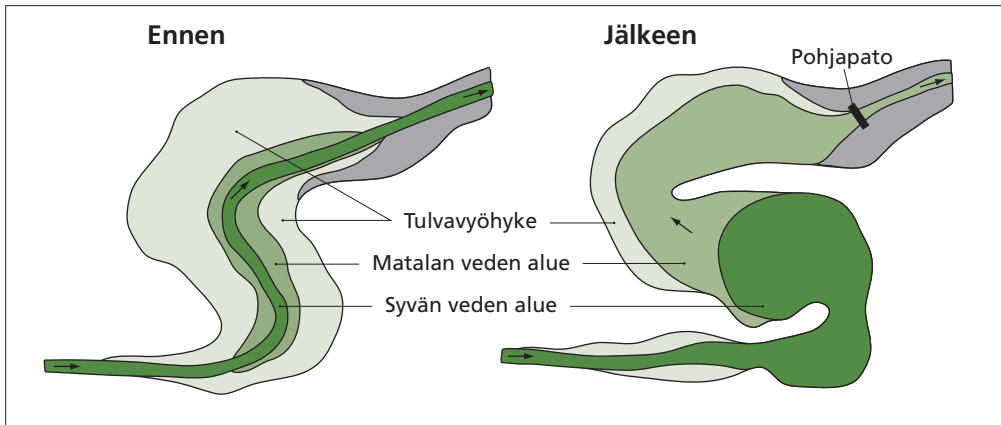
Jos laskeutusallas rakennetaan patoamalla purovesistö, on huolehdittava kalojen ja muiden eliöiden esteettömästä kulusta. Vesi voidaan johtaa pintavirtauksena luonnonmukaisen pohjapadon tai padon sivua kulkevan loivan ohitusuoman kautta.

Laskeutusaltaan vähimmäiskokona pidetään yleisesti 0,1 % yläpuolisesta valuma-alueesta, kuitenkin vähintään 0,2 % peltoalasta. Altaan syvyyden tulisi olla 0,5–1,0 m ja leveyden 10–30 % pituudesta. Altaan vähimmäiskoko on ylivirtaamatilanteita lukuun ottamatta yleensä riittävä, sillä viipymä keskivirtaaman aikana on 1–2 vrk ja keskitulvan aikana 2–5 tuntia.

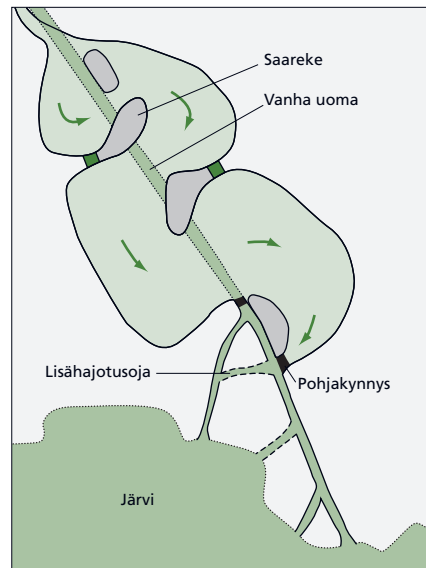
Sopivia laskeutusaltaan paikkoja ovat ojen suut ja haarautumat sekä kohdat, joissa ojan kaltevuus oleellisesti pienenee. Allas voidaan perustaa patoamalla vesi uomaan tai painanteeseen, jolloin sen reunoilla on olemassa luontainen kasvillisuus (kuva 6.28). Alavaan kohtaan laskeutusallas voidaan kaivamallakin tehdä kohtuullisin kustannuksin. Laskeutusaltaan sijoittamisessa ja muotoilussa tulee mahdollisuuksien mukaan ottaa huomioon myös maisemalliset näkökohdat. Laskeutusaltaan ja kosteikon toimivuus paranee, jos tulvan nousu niissä hidastaa riittävästi virtausta tai jos osa tulvista voidaan johtaa niiden ohi, jolloin kerääntynyt liete ei lähde liikkeelle huipputulvankaan aikana. Altaan koon salliessa virtausta voidaan jakaa ja ohjata oikovirtauksia välttämällä myös välipenkereillä ja saarilla ja allas siten tehdä monimuotoiseksi (kuva 6.29 ja 6.30).

Kosteikon pinta-alan tulisi olla vähintään 1–2 % valuma-alueesta eli vähintään 5–10 -kertainen laskeutusaltaaseen verrattuna, jotta kosteikko vähentäisi ravinnekuormitusta. Kosteikon suuruudesta johtuen se voidaan perustaa kohtuullisin kustannuksin vain riittävän alavalle alueelle padotusta hyväksi käyttäen. Tarvittaessa voidaan kuitenkin syvimät kohdat tehdä kaivamalla.

Kosteikon tulisi olla monimuotoinen ja suhteellisen matala ja vaihtelevan syvyinen erilaisten kasvillisuusalueiden aikaansaamiseksi. Yleensä vesisyvyyden tulisi olla 0,5–1,0 m, paitsi matalilla alueilla alle 0,5 m. Kosteikon muoto määräytyy lähinnä vallitsevan maaston mukaan, mutta muotoon voidaan vaikuttaa myös reuna-alueiden kaivulla tai penkereen sijoituksella, jos kosteikon tekeminen edellyttää pengerrystä. Veden virtausta kosteikossa on yleensä tarpeen ohjata ja pitkittää saarekkeilla ja niemekkeillä oikovirtausten estämiseksi tai rajoittamiseksi (ks. kuva 6.29). Samalla ne lisäävät maiseman ja luonnon monimuotoisuutta.



Kuva 6.28 Periaatekuva puroon patoamalla ja kaivamalla rakennettavasta laskeutusaltaasta tai kosteikosta.



Kuva 6.29 Tuusulan Mäyränojan rakennetun monimuotoisen laskeutusaltan periaatepiirros. Allas on rakennettu vanhalla osittain metsittyneelle peltoaluelle. Altaassa on kasvillisuuden peittämiä saarekkeita, avovesialueita ja pohjakynnyksiä. Virtaus järveen tapahtuu useiden hajotusojien kautta. Altaan pinta-ala tulva-alueineen on noin 0,15 % sen yläpuolisesta valuma-alueesta (16 km²). Vesisyvyys vaihtelee välillä 0,4-1,3 m keskiveden vallitessa.



Kuva 6.30 Mäyränojan laskeutusallas yläjuoksulle päin toukokuussa 2009 seitsemän vuotta rakentamisen jälkeen. (Kuva Juha Järvelä)

Tietoruutu 6.4

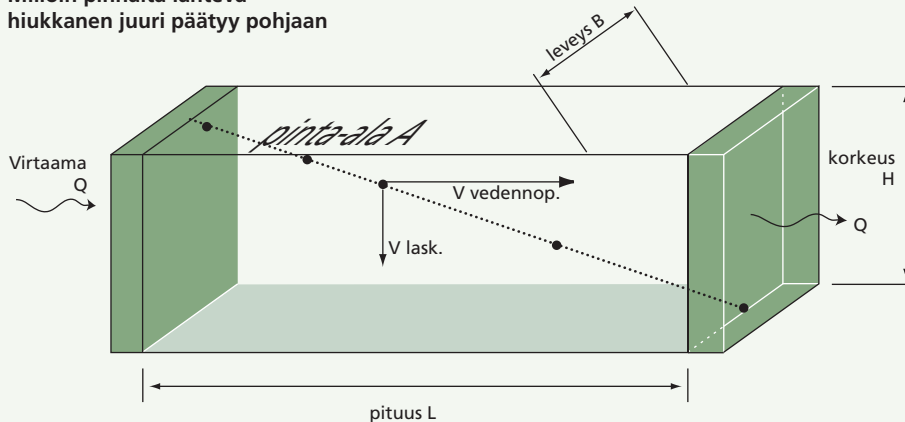
Laskeutusaltaan toimintaperiaate

Laskeutusaltaan ja kosteikon toimivuutta voidaan teoreettisesti tarkastella veden virtausnopeuden ja viipymän sekä maahiukkasen laskeutumisnopeuden ja -ajan perusteella. Altaaseen pidättyy sellaisia hiukkasia, joiden laskeutumisnopeus on vähintään sama kuin altaaseen tulevan virtaaman ja altaan pinta-alan suhde eli pintakuorma. Altaan pintakuormalla tarkoitetaan virtaaman altaan pinnalle aikayksikössä (tunnissa) tuoman vesikerroksen paksuutta (Q/A), jos vettä ei poistuisi altaasta. Maahiukkasten laskeutumisnopeudet käyvät ilmi taulukosta T6.1.

Laskeutusaltaan mitoituksen perusteena on lähinnä kiintoaineksen laskeutuminen altaaseen, jolloin lähtökohtana voidaan pitää esimerkiksi hienon hiedan laskeutumista keskiyli-virtaaman aikana. Tällöin virtaaman ja virtausnopeuden pienetessä myös hietaa hienompaa maa-ainesta laskeutuu altaaseen.

Laskeutusaltaan teoreettista mitoitusta voidaan lähemmin selvittää laatikkomaisen altaan mallilla maahiukkasen laskeutumisen perusteella (kuva T6.3). Jotta maahiukkanen ehtii laskeutua pohjaan altaassa, virtausajan tulee olla sama kuin laskeutumisajan eli $L/V_v = H/V_L$. Koska virtaus ei todellisuudessa jakaudu tasaisesti poikki- ja pituussuunnassa, on altaan pinta-ala tehtävä 1,3–1,8 -kertaiseksi teoreettiseen verrattuna.

Milloin pinnalta lähtevä
hiukkanen juuri päätyy pohjaan



Altaan pinta-ala	$A = B \times L$
Poikkileikkaus	$a = B \times H$
Vedennopeus	$V_v = Q / a = Q / (B \times H)$
Laskeutumisnopeus V_L	

Virtausajan tulee olla = laskeutumisaika
siis: $L / V_v = H / V_L$ ja siitä
 $V_L = (H \times V_v) / L$
sijoittamalla $Q / (B \times H)$ ja $B \times L = A$ saadaan:
 $V_L = Q / (B \times L) = Q / A$

Kuva T6.3 Laskeutusaltaan teoreettinen malli.



Taulukko T6.1 Erikokoisten maahiukkasten laskeutumisnopeus ja laskeutumisaika.

Lajite	Halkaisija mm	Hiukkasen laskeutumisnopeus mm s ⁻¹	Laskeutumisaika 1 m kohden
Hiekka	0,6	85	11 s
(2–0,2 mm)	0,2	25	40 s
Hieta	0,06	3,0	5 min
(0,2–0,02)	0,02	0,28	60 min
Hiesu	0,006	0,065	4 h
(0,02–0,002)	0,002	0,0062	45 h
Savi	0,0015	0,0035	3 vrk
(<0,002)	0,0001	0,000015	750 vrk

Laskeutusaltat ja kosteikot vaativat säännöllistä kunnossapitoa samoin kuin niitä reu-
nustavat suojakaistat ja -vyöhykkeet. Lietteen ja kasvillisuuden poisto täytyy tehdä ajoit-
tain umpeutumisen estämiseksi. Kasvillisuutta voidaan poistaa niittämällä ja laiduntamalla.
Kosteikkokasvillisuuden hoito on tärkeää silloin, jos tavoitteena on lajien monimuotoisuu-
den edistäminen ja ylläpitäminen. Muuten yhden tai muutaman kasvilajin kasvusto saattaa
tukahduttaa muut lajit alleen. Altaan ja kosteikon rantamille saattaa aikaa myöten kasvaa
puita ja pensaita, jotka on raivattava, jos maisema halutaan säilyttää avoimena.

Ojitussuunnitelmassa on pyrittävä käyttämään luontaiset olosuhteet ja tekniset mahdol-
lisuudet hyväksi laskeutusaltaan tai kosteikon tekemiseksi. Käytännössä altaan tai kostei-
kon pinta-ala jää usein tavoitearvoa pienemmäksi, jolloin sen vesiensuojellinen merki-
tys saattaa jäädä suhteellisen vähäiseksi.

Työnaikainen ympäristönhoito

Ojituksen työnaikaiseen ympäristönhoitoon kuuluu työn haittavaikutusten rajoittaminen.
Työn ajankohdan valinnassa ja työjärjestelyissä on kiinnitettävä huomiota myös siihen,
että työstä johtuvat haitat ja häiriöt jäävät mahdollisimman vähäiseksi sekä työalueella että
sen ulkopuolella ja varsinkin ojitusalueen alapuolisessa vesistössä.

Ojitustyön yhteydessä on yleensä tarpeen rajoittaa kaivamisesta johtuvaa kiintoaineiden
kulkeutumista ja veden samentumista. Lisäksi saattaa olla tarpeen virtauksen sulkeminen
tai rajoittaminen sekä tarvittaessa erilaisten tukirakenteiden käyttö rummun tai pohjakyn-
nyksen tai muun rakenteen tekemiseen liittyen.

Ojitustyön ympäristönhoitoon kuuluu myös työn johdosta vaurioituneiden rakenteiden
ja kulku-yhteyksien korjaus tai kunnostus vähintään entisen veroiseksi sekä työkohteiden
viimeistely ympäristöolosuhteet huomioon ottaen. Työn viimeistelyyn liittyen voidaan
samalla tehdä tarvittavia maisemointitöitä ympäristön parantamiseksi.

Työnaikaisen kiintoaineiden kulkeutumisen varalta voidaan sopiviin kohtiin, kuten tai-
tekohtiin ja ojien risteyksiin kaivaa lietekuoppa tai lieteallas, jonka tasausviivan alapuoli-
seksi tilavuudeksi riittää yleensä 1 % yläpuolisesta tai kahden peräkkäisen keräyskohdan
välisestä kaivumäärästä. Vaihtoehtoisesti tai lisäksi voidaan tehdä esim. rummun yhteyteen

matala työpato, joka työn viimeistelyn yhteydessä puretaan. Jos ojitukseen kuuluu pohjakynnyksiä, ne toimivat osaltaan myös työnaikaisina rakenteina, kun ne tehdään ennen yläpuolista kaivua. Kiintoaineksen kulkeutuminen on yleensä sitä herkempää, mitä suurempi ojan kaltevuus on. Tarvittaessa voidaan kaivaa ylhäältä alaspäin. Veden samentumista voidaan eniten rajoittaa suorittamalla työ vähävetisenä aikana.

Rummun, sillan ja putkiojan tekemiseksi ns. kuivatyönä on mahdollista tehdä työpato virtauksen estämiseksi ja tarvittaessa pumpata tai juoksuttaa vettä työkohteen ohi. Mahdollista on myös johtaa virtaus työkohteen sivuitse tilapäisen uoman tai putken avulla. Myös pohjakynnyksen tekemiseksi voidaan menetellä samalla tavoin, mutta se voidaan usein virtauksen ollessa vähäinen tehdä ilman työpatoakin. Virtauksen rajoittamisessa on tarpeen mukaan otettava huomioon alapuolisen vesistön käyttö. Rummun, putkiojan tai pumppuaseman tekemiseen voidaan joskus luiskien sortumavaaran tai paineellisen pohjaveden takia tarvita kaivannon tukemista erilaisilla tukipaaluilla tai tukiseinämillä. Lisäksi pehmeiköillä voidaan työskentelyä ja kuljetuksia helpottaa maan jäädytyksellä.

Kaivumaat on pyrittävä levittämään tai muuten sijoittamaan heti kaivun yhteydessä, mikä on myös maankäytön kannalta yleensä mahdollista, jotta ympäristöhaitat jäisivät mahdollisimman vähäisiksi. Jos kaivumaita kuitenkin on jätettävä tilapäisesti ojan varteen, on huolehdittava siitä, etteivät ne estä veden valumista ojaan tai aiheuta luiskansortumista. Mikäli kaivumaat ovat maankäytön kannalta liian happamia, niitä on ojitustyöhön liittyen tarpeen mukaan kalkittava.

Mikäli ojan varressa kasvaa puita ja pensaita, niiden raivaus työn suorittamiseksi on pidettävä mahdollisimman vähäisenä. Maisemallisesti merkittävät puut tai puuryhmät tulee kuitenkin säilyttää, jolloin ne on tarvittaessa työn ajaksi suojattava vaurioitumisen estämiseksi. Raivatut puut sijoitetaan yleensä runkoina tai rankoina työalueelle tai sen läheisyyteen maanomistajan käyttöön.

Ojitustyön ajankohdan valinnalla voidaan oleellisesti vaikuttaa paitsi työn kustannuksiin myös sen työnaikaisiin vesistö- ja muihin ympäristöhaittoihin. Edullisinta on toteuttaa työ vähävetisenä aikana ja tarvittaessa maan ollessa roudassa sekä olosuhteiden niin vaatiessa kulkuyhteyksien ja työkohteiden jäädyttämiseen turvautuen. Mikäli sääolot muuttuvat työn kannalta huonoiksi, työ on syytä keskeyttää ja jatkaa vasta olosuhteiden parannuttua. Työn ajoituksella ja konevalinnoilla ja muilla työnaikaisilla järjestelyillä voidaan oleellisesti vaikuttaa ojitustyön ympäristöhoitoon ja sen laadullisesti hyvään toteutukseen.

7 Salaojitus

Rauno Peltomaa

7.1 Johdanto

Putkisalaojitus tuli Suomeen 1800-luvun puolivälissä, jolloin hankittiin ensimmäiset tiili-putkien valmistuskoneet. Sitä ennen oli käytetty risu-, kivi- ja riukusalaojia. Putkisalaojituksen vuosittaiset määrät olivat lähes sadan vuoden ajan varsin vaatimattomia. Salaojituksen merkitys osana maatalouden rationalisointia korostui peltoviljelyn koneellistumisen myötä 1940-luvun lopulta alkaen. Tuolloin ensisijainen tavoite oli varmistaa mahdollisimman hyvä sato ja sen korjuu. Salaojitusmäärät kasvoivat nopeasti 1950-luvun alussa, kun salaojakoneet tulivat käyttöön. Samaan aikaan valtio tuki salaojitusta merkittävästi osana maatalouden jälleenrakentamista. 1980-luvun lopulla maatalouden ylituotannon vuoksi salaojituksen valtion tukea alettiin vähentää. 1990-luku oli salaojituksessa laman aikaa. EU-tuet ja maatalouden rakennekehitys käynnistivät salaojituksia uudelleen vuosituhaten vaihteessa. Koko Suomen peltoalasta on salaojissa lähes 60 % eli 1,3 milj. ha ja avo-ojissa on peltoa vielä 0,6 milj. ha.

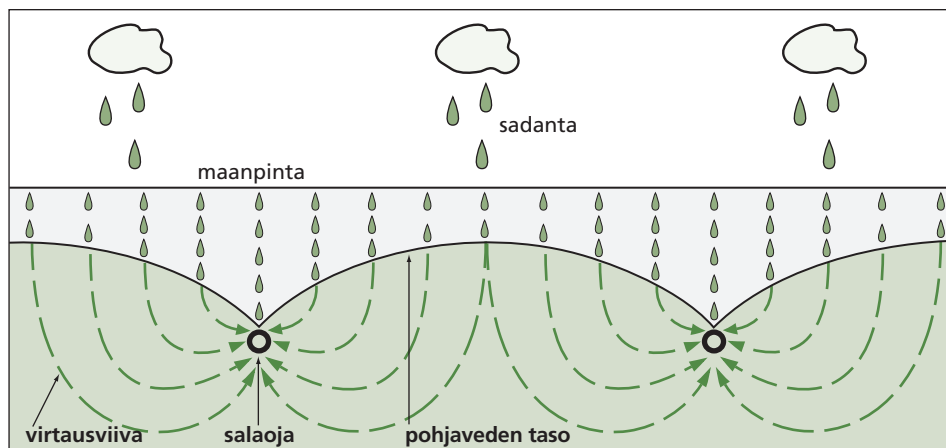
Vaikka salaojitusta tiedetään tehdyn jo tuhansia vuosia, sen suunnittelun teoria kehittyi merkittävästi vasta 1800-luvun puolivälin jälkeen. Pohjavesien virtausteorian uranuurtajana toimi Henry Darcy, joka julkaisi maan hydraulisen johtavuuden peruskaavan 1856. Hänen työtään jatkoi Dupuit julkaisullaan 1863. Heidän työtään täydensivät 1900-luvulla muun muassa Forchheimer 1930 sekä Richards 1931. Viimemainittu tarkasteli veden virtausta vedellä kyllästymättömässä maassa.

Salaojituksen suunnittelussa tarvitaan hydrologian ja maan vesitalouden perusteiden ymmärtämistä sekä salaojituksen toimivuuteen vaikuttavien teknisten ratkaisujen tuntemusta. Suunnittelijan keskeisin tehtävä on osata määritellä oikea salaojien ojaväli. Siltä osin laskentamenetelmien kehitystyö vauhdittui merkittävästi 1940-luvulla. Tuolloin kehitystyötä tekivät monet tutkijat, heidän joukossaan Hooghoudt, Donnan ja Kirkham oppilaineen. Heidän tutkimuksistaan tunnetaan edelleen erityisesti Hooghoudtin laskentamenetelmä.

Suomessa salaojitetaan edelleen avo-ojissa olevia peltoja ja tehdään uusinta- ja täydennysojituksia. Yhdyskuntarakentamisen yhteydessä on tarpeen varmistaa salaojien toimivuus. Lisäksi osaamista tarvitaan salaojien kunnossapitoa ja uusien menetelmien kehittämistä varten. Ympäristökysymysten mukaantulo on laajentanut perustietojen merkitystä ja tarvetta edelleen. Tämän luvun alkuosassa käsitellään salaojitussuunnittelun teoreettisia perusteita. Kirjallisuutena on käytetty kansainvälisiä oppikirjoja, jotka löytyvät kirjallisuusluettelosta: Ritzema (2006), Skaggs ja van Schilfgaarde (1999), Smedema ym. (2004) ja Vlotman ym. (2000). Luvun lopussa käsitellään salaojituksen suunnittelua, toteutusta ja kunnossapitoa kotimaisen käytännön näkökulmasta. Maan kuivatusta ja salaojitusta on käsitelty myös luvussa 5.

7.2 Salaojien toimintaperiaate

Salaoja on Suomessa määritelty paikalliskuivatuksessa käytetyksi putkiojaksi, johon vesi pääsee sisään koko putken pituudelta. Siitä seuraa, että salaojituksen määritelmä on salaojin toteutettu paikalliskuivatus. Salaojituksen varsinainen kuivatusoja on imuoja, josta vesi virtaa kokoojaojaan. Termi on sinänsä harhaanjohtava, mutta vakiintunut käyttöön. Salaojitus suunnitellaan siten, että sateisina ajanjaksoina sekä lumen ja roudan sulaessa kuivatus on riittävän nopea, jolloin voidaan turvata riittävä kuivavara koneille ja estää kasvuston vettymishaitat.



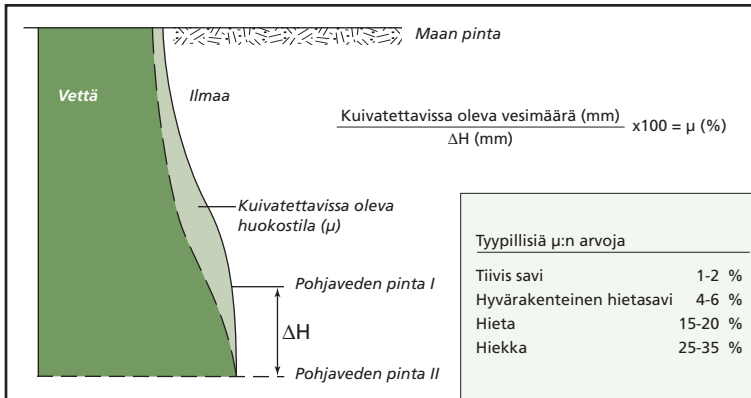
Kuva 7.1 Poikkileikkaus veden virtauksesta salaojaputkeen hyvin vettä läpäisevässä homogeenisessa maassa. Virtausvastuksista johtuen pohjaveden pinta on ojien välissä korkeammalla kuin ojan kohdalla.

Vesi poistuu maaperästä salaojaputkeen, kun maassa olevan veden energiataso on suurempi kuin salaojaputkessa olevan veden energiataso. Näiden energiatasojen erosta käytetään nimitystä hydraulinen korkeus. Salaojituksessa hydraulinen korkeus ilmaisee sen energiatarpeen, jonka vesi tarvitsee päästäkseen maanpinnalta salaojaputken sisään. Maan, salaojan ympärysaineen ja salaojaputken rakenteesta johtuva sisäänpääsyn virtausvastus aiheuttaa sen, että pohjaveden pinta jää kuivatusvaiheessa salaojien puolivälissä salaojaputken tason yläpuolelle. Tässä vaiheessa salaojien väliin muodostuva pohjaveden pinnan tason kaareva muoto on kullekin maalajille tyypillinen tasapainotila. Kuvassa 7.1 on esitetty hietamaalle tyypillinen tasapainotila.

7.3 Kuivatettavissa oleva huokostila

Kuivatussyvyys eli kuivavara vaikuttaa siihen, millainen maan kosteusprofiili juuristokerrokseen muodostuu. Kun kuivatussyvyyttä suurennetaan, osa maaperän huokosista tyhjenee vedestä. Tyhjenevien huokosten määrää kutsutaan kuivatettavissa olevaksi huokostilaksi. Näiden huokosten määrä riippuu ensisijassa maalajista. Kuvassa 7.2 on kuvattu kosteusprofiilin muutosta, kun kuivatussyvyys suurenee tasolta I tasolle II. Syvyyden muutos on kuvattu ΔH :lla. Kuivatettavissa olevan vesimäärän ja pohjaveden pinnan muutoksen suhteesta käytetään merkintää μ ja se kuvaa kuivatettavissa olevaa huokostilaa. Sitä kutsutaan myös *varastokertoimeksi* tai *ominaisainaisuudeksi*. Peltomaan tyypilliset μ :n arvot ovat 2–20 %. Käytännössä esimerkiksi arvo 4 % merkitsee sitä, että pohjaveden korkeuden muutos on 10 cm jokaista 4 mm:n vesimäärää kohti. Kun μ :n arvo on suuri, sateen vaikutus pohjavesitasoon on pieni ja vastaavasti vaikutus on suuri, jos μ :n arvo on pieni.

Kuivatettavissa oleva huokostila on yksi tärkeimpiä maan ominaisuuksia, kun halutaan laskea sadannan vaikutusta maan vesitalouteen. Sen tunteminen on tarpeen mm. maavesimallien hyödyntämisessä. Se edustaa keskimääräistä kosteuden muutosta maaprofilissa, kun pohjaveden pinta muuttuu tietyn määrän. Kuivatettavissa olevan huokostilan laskemiseksi tarvitaan maan vedenpidätyskäyrä ja maan kosteusprofiili pohjaveden eri pinnankorkeuksilla (kaava 7.1). Salaojituksen vaikutus maan kosteuteen riippuu ratkaisevasti maan vedenpidätysominaisuuksista, jota kuvaa maan pF-käyrä (ks. Luku 3). Esimerkki kuivatettavissa olevan huokostilan määrittämisestä on esitetty Tietoruudussa 7.1.



Kuva 7.2 Kuivatettavissa olevan huokostilan kuvaus.

Tietoruutu 7.1

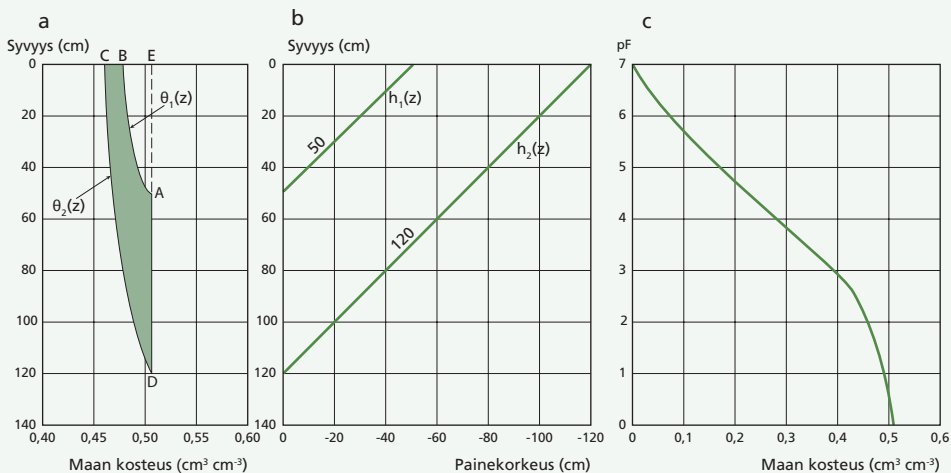
Esimerkki kuivatettavissa olevan huokostilan määrittämisestä

Esimerkissä esitetään kuivatettavissa oleva huokoskoko, kun pohjaveden syvyys muuttuu 50 cm:stä 120 cm:iin. Kuvassa T7.1 maan kosteusprofiilia 50 cm:n kuivatussyvyydellä kuvaa käyrä AB ja vastaavasti 120 cm:n kuivatussyvyydellä käyrä CD. Näin ollen kuivatettavissa olevan huokostilan suuruutta kuvaa alue ABCD. Kaavan (7.1) mukaan saadaan

$$\mu = ABCD/AD$$

Kuivatussyvyiden vaikutus painekorkeuden z :n arvoihin on esitetty kuvassa b ja esimerkkimaa-lajin (hiesusavi) vedenpidätyskäyrä on kuvassa c. Taulukkoon T7.1 on koottu graafisen esityksen tiedot 10 cm:n välein ja laskettu kullekin kerrokselle keskiarvo, joka kerrotaan kerroksen pak-suudella 100 mm. Keskiarvojen summaksi saadaan 28,05 mm. Kun se jaetaan kuivatussyvyiden muutoksella 700 mm, kuivatettavissa olevan huokostilan arvoksi tulee 0,04 eli 4 %.

$$\mu = 28,05 / 700 = 0,04 = 4 \%$$



Kuva T7.1 a. Maan kosteusprofiilit $\theta_1(z)$ ja $\theta_2(z)$ kuivatussyvyyksille 50 cm ja 120 cm, tummennettu alue ADCB kuvaa esimerkin kuivatettavissa olevaa huokostilaa. b. Paine korkeuden muutokset 50 ja 120 cm kuivatussyvyyksille. c. Maan vedenpidätyskäyrä.

$$\mu = \frac{\int\limits_0^{z_2} \theta_2(z) dz - \int\limits_0^{z_1} \theta_1(z) dz}{z_2 - z_1}$$

(7.1)

- μ

=

kuivatettavissa oleva huokostila
- z_1

=

pohjaveden pinnan syvyys tilanteessa 1
- z_2

=

pohjaveden pinnan syvyys tilanteessa 2
- $\theta_1(z)$

=

maan kosteus maaprofilissa pohjaveden syvyyden 1 funktiona
- $\theta_2(z)$

=

maan kosteus maaprofilissa pohjaveden syvyyden 2 funktiona

Pohjaveden syvyys vaikuttaa μ :n arvoon siten, että se kasvaa, kun pohjaveden syvyys suurenee. Kun syvyys ylittää maalajista riippuvan kriittisen rajan, kuivatettavissa oleva huokostila voidaan arvioida kyllästyneen maan ja kenttäkapasiteetin mukaisen maankosteuden erotuksena.

Lohkotasolla kuivatettavissa oleva huokostilavuus voidaan määrittää mittaamalla salaajavalunta ja pohjaveden korkeuden muutos ajan suhteen tilanteessa, jossa haihdunta on vähäistä. Mikäli käytettävissä on pF-käyrä kyseiseltä maalajilta, arvo voidaan määrittää myös siitä. Kuivatettavissa oleva huokostila on riippuvainen huokoskokojakautumasta ja siten se korreloi myös vedellä kyllästyneen maan hydraulisen johtavuuden arvoon. Yhtälöllä (7.2) voidaan karkeasti arvioida μ :n arvoa.

$$\mu = \sqrt{K}$$

(7.2)

μ

=

kuivatettavissa olevan huokostila (%)

K

=

hydraulinen johtavuus (cm d⁻¹)

Taulukko T7.1 Hiesusaven arvot 10 cm:n kerroksin.

Kuivatus- syvyys z (cm)	Etäisyys pohja- veteen 1 $h_1=z$ (cm)	$pF=lg(h_1)$	$\theta_1(z)$ (-)	Etäisyys pohja- veteen 2 $h_2=z$ (cm)	$pF=lg(h_2)$	$\theta_2(z)$ (-)	$\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$ (-)	Keskim. $\Delta\theta$ (-)	Keskim. $\Delta\theta \times 100$ (mm)
0	50	1,70	0,476	120	2,08	0,459	0,017		
10	40	1,60	0,479	110	2,04	0,461	0,018	0,0175	1,75
20	30	1,48	0,483	100	2,00	0,463	0,020	0,019	1,90
30	20	1,30	0,487	90	1,95	0,466	0,021	0,0205	2,05
40	10	1,00	0,492	80	1,90	0,468	0,024	0,0225	2,25
50	0	$-\infty$	0,507	70	1,85	0,470	0,037	0,0305	3,05
60			0,507	60	1,78	0,473	0,034	0,0355	3,55
70			0,507	50	1,70	0,476	0,031	0,0325	3,25
80			0,507	40	1,60	0,479	0,028	0,0295	2,95
90			0,507	30	1,48	0,483	0,024	0,0260	2,60
100			0,507	20	1,30	0,487	0,020	0,0220	2,20
110			0,507	10	1,00	0,492	0,015	0,0175	1,75
120			0,507	0	$-\infty$	0,507	0,000	0,0075	0,75
						Yht.	0,289	0,2805	28,05

7.4 Ojavälin ja ojasyvyyden määrittäminen

Ojavälin ja ojasyvyyden valinnalla vaikutetaan siihen, mihin syvyyteen pohjaveden pinta pellolla asettuu sade- tai sulamistapahtuman jälkeen. Riittävä kuivavara riippuu ennen kaikkea kasvuston tarpeesta ja koneiden kantavuusvaatimuksista. Kun tarvittava kuivavara on määritelty, ojasyvyyden ja ojavälin valinnalla voidaan vaikuttaa kokonaisojamäärään. Optimaalisen ratkaisun löytämiseen on kehitetty erilaisia laskentamenetelmiä, joista tässä yhteydessä tarkastellaan yksityiskohtaisesti vain Hooghoudtin kaavaa, sen teoreettista taustaa ja käytännön soveltamista. Hooghoudtin kehittämän teorian tuntemus on tärkeää siitäkkin syystä, että se on taustalla useissa nykyisissä maa-kasvi-ilmakehän -systeemiä kuvaavissa, joista tunnetuimpia ovat amerikkalainen DRAINMOD, hollantilainen SWAP ja kotimainen CROPWATN (ks. Luku 13).

Ojavälin laskentakaavojen kehitys

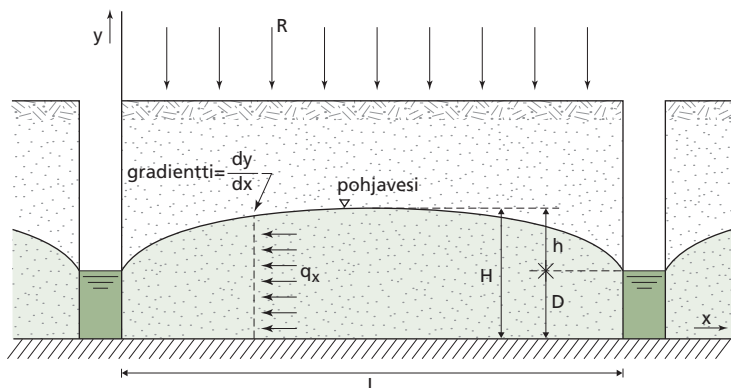
Pohjavesivirtauksen matemaattinen laskenta on varsin monimutkaista. Käytännön sovellutuksissa monimutkaisten yhtälöiden yksinkertaistukset antavat usein lähes yhtä hyvän lopputuloksen kuin monimutkaisemmatkin yhtälöt, koska maaperästä on harvoin käytettävissä riittävän tarkkoja tietoja laskentamenetelmiä varten.

Nykyiset salaojitusyhtälöt perustuvat Dupuit-Forchheimerin johtamaan yhtälöön. Dupuit-Forchheimerin yhtälön yksinkertaistus perustuu kaksisuuntaisen virtauksen pelkistämiseen yksisuuntaiseksi virtaukseksi. Yhtälöä ei voida kuitenkaan soveltaa, jos vettä läpäisemätön kerros ei sijaitse ojasyvyydessä, koska tällöin virtaus salaojaputken läheisyydessä muuttuu säteittäiseksi. Hooghoudt kehitti edellä mainittua yhtälöä edelleen ottamalla käyttöön kuvitteellisen läpäisemättömän kerroksen syvyyden, joka ottaa huomioon säteittäisen virtauksen vaatiman painepotentiaalin tarpeen. Hooghoudt julkaisi ratkaisunsa ensimmäisen kerran 1936 ja varsinaisen sovellutuksen 1940. Hooghoudtin jälkeen kaavoja ovat kehittäneet useat muutkin tutkijat kuten Donnan ja Ernst. Laskennassa keskeinen suure on maan hydraulinen johtavuus, joka tunnetaan Darcyn lakina (ks. Luku 3).

Ojavälin laskentamenetelmät perustuvat joko muuttumattomaan (vakio) tai muuttuvaan tilanteeseen. Pelkistettynä vakiotilanne tarkoittaa, että infiltraatio ja salaojavalunta ovat yhtä suuret, mistä seuraa, että pohjaveden pinnan korkeus ei muutu. Muuttuvassa tilanteessa tapahtuu sekä varaston että pohjaveden pinnan vaihtelua ajan suhteen. Alueilla, joilla sadannan vaihtelut ovat suuria, kuten trooppisilla alueilla, tai joissa käytetään runsasta kastelua, muuttuvan tilan menetelmät soveltuvat paremmin käyttöön kuin vakio-tilanteeseen perustuvat menetelmät.

Kuva 7.3

Virtaus pystysuoraa avo-ojan seinämää kohti, kun ojan pohja yltää läpäisemättömään kerrokseen saakka.



Hooghoudtin kaava

Kaavan johtamisen lähtökohtana on kuvassa 7.3 havainnollistettu tilanne. Siinä vakiotilanteen mukainen virtaus tapahtuu pystysuoraa ja läpäisemättömään kerrokseen saakka ulottuvaa avo-ojan seinämää kohti. Dupuit-Forchheimerin teorian mukaan Darcyn lakia voidaan tällöin soveltaa kuvaamaan pohjavesivirtausta (q_x) pystysuoran seinämän (y) läpi etäisyydellä (x) ojasta.

$$q_x = Ky \frac{dy}{dx} \quad (7.3)$$

q_x = virtausnopeus x-suunnassa ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$)
 K = maan hydraulinen johtavuus (m d^{-1})
 y = pohjaveden korkeus kohdassa x (m)
 dy/dx = hydraulinen gradientti kohdassa x (-)

Jatkuvuusperiaatteesta seuraa, että se vesimäärä, joka kertyy maan pinnalle ojien keskivälin ja pystysuoran tason (y) etäisyydellä (x) täytyy ohittaa tämä poikkileikkaustaso matkalla ojaan. Kun imeytymistä pinta-ala yksikköä kohti merkitään R , virtausnopeus tason (y) läpi on

$$q_x = R \left(\frac{1}{2} L - x \right) \quad (7.4)$$

R = imeytymisnopeus pinta-ala yksikköä kohti (m d^{-1})
 L = ojaväli (m)

Koska virtaus kummassakin tapauksessa on yhtä suuri, niin

$$Ky \frac{dy}{dx} = R \left(\frac{1}{2} L - x \right) \quad (7.5)$$

Yhtälö (7.5) voidaan kirjoittaa muotoon

$$Ky dy = R \left(\frac{1}{2} L - x \right) dx \quad (7.6)$$

Tämän differentiaaliyhtälön integroinnin raja-arvot ovat

$$x = 0 \rightarrow y = D$$

ja

$$x = \frac{1}{2} L \rightarrow y = H$$

D = pohjaveden pinnan korkeus ojassa (m)
 H = pohjaveden pinnan korkeus ojien puolivälissä (m)

Integroimalla differentiaaliyhtälö ja sijoittamalla raja-arvot saadaan

$$L^2 = \frac{4K(H^2 - D^2)}{R} \quad (7.7)$$

tai

$$q = R = \frac{4K(H^2 - D^2)}{L^2} \quad (7.8)$$

q = valunta (m d^{-1})

Edellä esitetty kaava voidaan esittää muodossa

$$q = \frac{4K(H+D)(H-D)}{L^2} \quad (7.9)$$

Kuten kuvasta 7.3 ilmenee, termiä $H - D$ on merkitty h :lla, jolloin $H + D = 2D + h$, jossa h on pohjaveden korkeus ojan vesipintaan verrattuna. Näin ollen kaava voidaan kirjoittaa muotoon

$$q = \frac{8KDh + 4Kh^2}{L^2} \quad (7.10)$$

Jos veden korkeus on ojassa hyvin pieni ($D \approx 0$) kaava supistuu muotoon

$$q = \frac{4Kh^2}{L^2} \quad (7.11)$$

Tällöin q ilmaisee virtausta ojan pohjan tason yläpuolella. Jos läpäisemätön kerros on syvällä vesipinnan alapuolella ($D \gg h$), kaavan jälkimmäinen osa voidaan jättää huomiotta ja se saa muodon

$$q = \frac{8KDh}{L^2} \quad (7.12)$$

jolloin q kuvaa virtausta ojan vesipinnan alapuolella.

Jos maaprofiili koostuu kahdesta kerroksesta, joilla on erilainen hydraulinen johtavuus, ja jos kuivatussyvyys sijaitsee kerrosten vaihtumiskohdassa, yhtälö (7.12) voidaan kirjoittaa muotoon

$$q = \frac{8K_b Dh + 4K_t h^2}{L^2} \quad (7.13)$$

K_b = hydraulinen johtavuus kuivatussyvyyden alapuolella (m d^{-1})

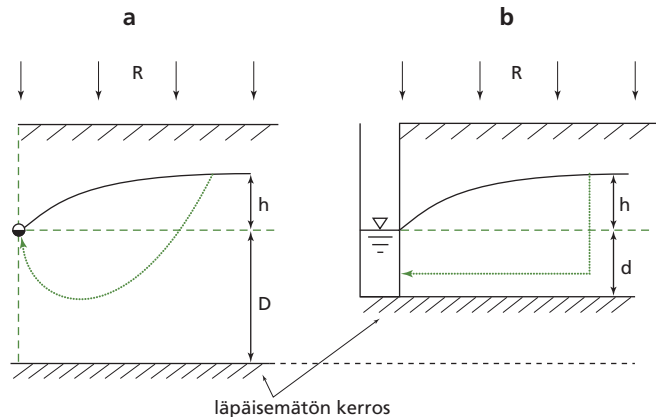
K_t = hydraulinen johtavuus kuivatussyvyyden yläpuolelle (m d^{-1})

Tällainen tilanne on varsin yleinen esimerkiksi savimaissa, koska maaprofiili on usein maan rakenteen vuoksi läpäisevämpää kuivatussyvyyden yläpuolella kuin sen alapuolella.

Kuvassa 7.3 esitetty tilanne on käytännössä teoreettinen, koska se esittää virtauksen vain horisontaalisena. Kun avo-ojan sijasta käytetään salaojaa, veden virtaus ei enää ole horisontaalista vaan virtausviivoista tulee kaarevia salaojasyvyyden alapuolella, kuten kuvasta 7.4 ilmenee. Tästä seuraa, että veden virtausmatka pitenee, mihin tarvitaan enemmän energiaa tilavuusyksikköä kohti kuin pelkästään horisontaalisessa virtauksessa. Lisäenergian tarve nostaa pohjaveden pintaa salaojien välissä.

Kuva 7.4

Horisontaalisen ja säteittäisen virtauksen, kuva a, muuttaminen vastaavaksi horisontaaliseksi virtaukseksi, kuva b, ekvivalenttisyvyyden d avulla.



Hooghoudt ratkaisi teoreettisen ongelman siten, että hän otti käyttöön imaginaarisen läpäisemättömän kerroksen todellisen kerroksen sijaan. Pohjaveden pinnan etäisyyden imaginaariseen läpäisemättömään kerrokseen Hooghoudt nimesi *ekvivalenttisyvyudeksi*. Imaginaarinen kerros vastaa sen kerroksen paksuutta, jota virtaus voisi käyttää horisontaalisessa virtauksessa. Ratkaisun periaate on esitetty kuvassa 7.4.

Ekvivalenttisyvyyttä käytettäessä voidaan kaavalla (7.10) kuvata virtausta salaojaan korvaamalla läpäisemättömän kerroksen todellinen syvyys (D) pienemmällä ekvivalenttisyvydellä (d). Ekvivalenttisyvyys (d) edustaa imaginaarista ohuempaa maaprofilia, jonka läpi sama vesimäärä joutuu virtaamaan samassa aikayksikössä kuin alkuperäisen kaavan edustamassa tilanteessa. Tästä aiheutuva suurempi virtausnopeus pinta-ala yksikköä kohti edellyttää ylimääräistä hydraulista korkeutta. Kaava voidaan näin ollen esittää muodossa:

$$q = \frac{8Kdh + 4Kh^2}{L^2} \quad (7.14)$$

q = mitoitusvalunta (m d⁻¹) K = hydraulinen johtavuus (m d⁻¹)
d = ekvivalenttisyvyys (m) h = hydraulinen korkeus (m)
L = ojaväli (m)

Ojavälin laskemiseen kaavalla (7.14) tarvitaan ekvivalenttisyvyyden (d) määrittäminen. Hooghoudt käytti ekvivalenttisyvyyden, ojavälin, läpäisemättömän kerroksen syvyyden ja putkikoon välisen yhtälön ratkaisemiseen peilikuva (engl. *mirror image*) menetelmää. Edellä mainitut suhteet ovat päättymättömän sarjan muodossa ja olivat Hooghoudtin aikana työläisiä laskettavia. Sen vuoksi hän laati valmiiksi laskettuja taulukoita, joista voi katsoa yleisimpien putkikokojen ekvivalenttisyvyydet (d). Taulukossa 7.1 on esimerkkinä ekvivalenttisyvyydet (d) 100 mm:n putkikoolle. Siitä voidaan todeta, että d:n arvo kasvaa D:n suhteen kunnes $D \approx 1/4L$. Jos läpäisemättömän kerros on vielä syvemmällä, ekvivalenttisyvyys pysyy vakiona, koska syvyys on niin suuri, että sen kasvu ei enää vaikuta virtaukseen. Hooghoudtin taulukoiden jälkeen suunnittelijoiden käyttöön laadittiin nomogrammeja, joilla voi taulukoita nopeammin arvioida ojaväliä. Tietokoneiden myötä laskenta nopeutui ja tarkentui entisestään.

Koska ojaväli L riippuu ekvivalenttisyvyydestä d, joka puolestaan on L:n funktio, kaava (7.14) voidaan ratkaista vain iteroimalla (ks. Tietoruutu 7.2). Laskentaohjelmia varten ekvivalenttisyvyyden laskemiseksi on johdettu edellä mainitulla peilikuvamenetelmällä kaava (7.15), jonka ohjelmointikaavio on esitetty kuvassa 7.5.

$$d = \frac{\frac{\pi L}{8}}{\ln \frac{L}{\pi r_0} F(x)} \quad (7.15)$$

jossa

$$x = \frac{2\pi d}{L} \quad (7.16)$$

ja

$$F(x) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \ln \coth(nx) \quad (7.17)$$

Funktio F(x) edustaa päättymätöntä logaritmistä sarjaa, joka voidaan esittää muodossa

$$F(x) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4e^{-2nx}}{n(1 - e^{-2nx})} \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (7.18)$$

Kaava (7.18) konvergoituu nopeasti, kun $x > 1$. Kun x :n arvo < 1 , konvergoituminen on hidas, mutta jos $x \leq 0,5$ saadaan riittävän tarkka likiarvo johtamalla kaava muotoon:

$$F(x) = \frac{\pi^2}{4x} + \ln \frac{x}{2\pi} \quad (7.19)$$

Hooghoudtin teoriaan liittyy lisäksi kaksi oletusta: 1) putki virtaa puolitäytenä ja 2) putkissa ei ole sisäänpääsyn virtausvastusta.

Putken virratessa puolitäytenä sisääntulon virtausala vastaa puoliympyrän muotoista märkäpiiriä (kuva 7.6), jolloin

$$r_0 = \frac{u}{\pi} \quad (7.20)$$

r_0 = putken säde (m)

u = märkäpiiri (m)

Avo-ojassa ekvivalenttisäteen (r_0) määrittelee märkäpiiri (u) eli avo-ojan seinämän pituus, joka on vesipinnan alapuolella. Kun salaojaputki asennetaan kaivantoon, märkäpiirin suuruuteen vaikuttavat kaivannon koko ja käytetty ympärysaine eli se vettä hyvin läpäisevä materiaali, joka on putken suojana. Tällöin märkäpiiri voidaan määritellä seuraavasti

Taulukko 7.1

Ekvivalenttisyvyyden d arvot D :n ja L :n suhteen Hooghoudtin kaavaan (7.14), kun putkikoko $r_0 = 0,1$ m.

$L \rightarrow$	5 m	7,5	10	15	20	25	30	40	50	$L \rightarrow$	75
D										D	
0,5 m	0,47	0,48	0,49	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,50	0,5 m	0,50
0,75	0,60	0,65	0,69	0,71	0,73	0,74	0,75	0,75	0,76	1,0	0,97
1,00	0,67	0,75	0,80	0,86	0,89	0,91	0,93	0,96	0,96	2,0	1,80
1,25	0,70	0,82	0,89	1,00	1,05	1,09	1,12	1,14	1,15	3,0	2,49
1,50	0,70	0,88	0,97	1,11	1,19	1,25	1,28	1,34	1,36	4,0	3,04
1,75	0,70	0,91	1,02	1,20	1,30	1,39	1,45	1,52	1,57	5,0	3,49
2,00	0,70	0,91	1,08	1,28	1,41	1,50	1,57	1,66	1,72	6,0	3,85
2,25	0,70	0,91	1,13	1,34	1,50	1,69	1,69	1,81	1,86	7,0	4,14
2,50	0,70	0,91	1,13	1,38	1,57	1,69	1,79	1,94	2,02	8,0	4,38
2,75	0,70	0,91	1,13	1,42	1,63	1,76	1,88	2,05	2,18	9,0	4,57
3,00	0,70	0,91	1,13	1,45	1,67	1,83	1,97	2,16	2,29	10,0	4,74
3,25	0,70	0,91	1,13	1,48	1,71	1,88	2,04	2,26	2,42	12,5	5,02
3,50	0,70	0,91	1,13	1,50	1,75	1,93	2,11	2,35	2,54	15,0	5,20
3,75	0,70	0,91	1,13	1,52	1,78	1,97	2,17	2,44	2,64	17,5	5,30
4,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,81	2,02	2,22	2,51	2,71	20,0	5,30
4,50	0,70	0,91	1,13	1,52	1,85	2,08	2,31	2,63	2,87	25,0	5,30
5,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,15	2,38	2,75	3,02	30,0	5,30
5,50	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,20	2,43	2,84	3,15	35,0	5,30
6,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,20	2,48	2,92	3,26	40,0	5,30
7,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,20	2,54	3,03	3,43	45,0	5,30
8,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,20	2,57	3,13	3,56	50,0	5,30
9,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,20	2,57	3,18	3,66	60,0	5,30
10,00	0,70	0,91	1,13	1,52	1,88	2,20	2,57	3,23	3,74	∞	5,38
∞	0,71	0,93	1,14	1,53	1,89	2,24	2,58	3,24	3,88		

Tietoruutu 7.2. esimerkkiaivot

$$u = b + 2r_0 \quad (7.21)$$

b = salaojakaivannon pohjan leveys

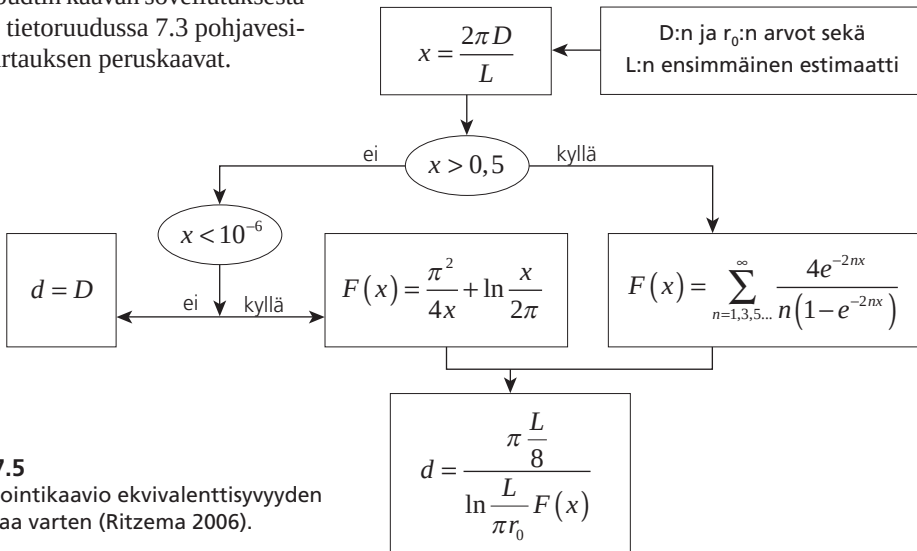
Jos putken ympärillä käytetään ympärysainetta (kuva 7.7) kaava saa muodon

$$u = b + 2(2r_0 + m) \quad (7.22)$$

m = ympärysaineen paksuus putken päällä

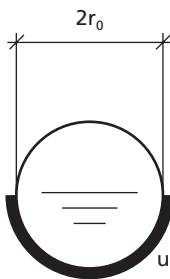
Märkäpiiri vaikuttaa laskennalliseen ojaväliin siten, että putkikoon kasvaessa ojaväli kasvaa. Samoin ympärysaineen käyttö putken ympärillä kasvattaa märkäpiiriä.

Toinen Hooghoudtin kaavan lähtökohta on, että salaojaputkella ei ole sisäänpääsyn virtausvastusta, mikä tarkoittaa, että oletuksena on niin sanottu *ideaaliputki*. Tällainen olettaus on voimassa, kun salaojakaivannon täyttömateriaalin hydraulinen johtavuus on vähintään 10 kertaa suurempi kuin kaivannon ulkopuolella olevassa maassa. Jos hydraulinen johtavuus on pienempi, sopivaa ympärysainetta käyttämällä voidaan putken sisääntulon virtausvastusta pienentää. Näin saadaan mahdollisimman suuri osa hydraulisesta korkeudesta käytettäväksi veden virtaukseen maakerroksessa. Hooghoudtin kehittämä ojavälin määrittämenetelmä on edelleen laajasti suunnittelijoiden käytössä eri puolilla maailmaa. Tietoruu-
dussa 7.2 on esimerkki Hooghoudtin kaavan sovellutuksesta ja tietoruu-
dussa 7.3 pohjavesi-
virtauksen peruskaavat.

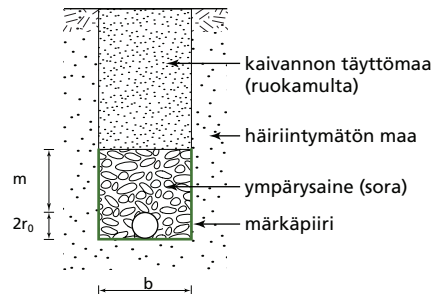


Kuva 7.5

Ohjelmointikaavio ekvivalenttisyvyyden laskentaa varten (Ritzema 2006).



Kuva 7.6 Ekvivalenttisyvyyden laskentaa vassa käytetyn märkäpiirin kuvaus.



Kuva 7.7 Putken tehollinen halkaisija soraste-
tussa salaojassa.

Tietoruutu 7.2

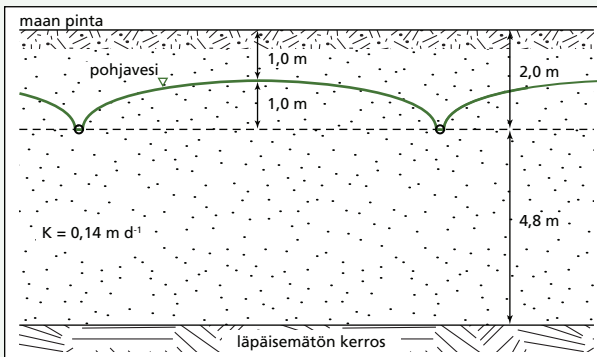
Esimerkit Hooghoudtin kaavan sovellutuksista

Esimerkki 1

Pellolla korkealla oleva pohjavesi haittaa viljelyä ja salaojituksella halutaan parantaa tilannetta. Lasketaan tarvittava ojaväli, kun suunnittelun lähtötietoina ovat:

- mitoitusvalunta on 1 mm d^{-1}
- pohjaveden syvyyden halutaan pysyvän 1 m:n syvyydessä
- salaojien syvyys 2 m
- putkikoko on 0,10 m

Maaperätutkimuksella on selvitetty, että läpäisemätön kerros alkaa 6,8 m:n syvyydessä. Läpäisemättömän kerroksen yläpuolella on homogeeninen maakerros, jonka vedellä kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus on keskimäärin $0,14 \text{ m d}^{-1}$ (kuva T7.2).



$$\begin{aligned} q &= 1 \text{ mm d}^{-1} = 0,001 \text{ m d}^{-1} \\ h &= 2,0 - 1,0 = 1,0 \text{ m} \\ r_0 &= 0,10 \text{ m} \\ K &= 0,14 \text{ m d}^{-1} \\ D &= 6,8 - 2,0 = 4,8 \text{ m} \end{aligned}$$

Kuva T7.2 Esimerkin 1 lähtötietojen kuvaus (Ritzema 2006).

$$L^2 = \frac{8Kdh + 4Kh^2}{q} = \frac{(8 \cdot 0,14 \cdot d \cdot 1,0) + (4 \cdot 0,14 \cdot 1,0^2)}{0,001} \quad (T7.1)$$

$$L^2 = 1120d + 560 \quad (T7.2)$$

Koska ekvivalenttisyvyys d on L :n funktio, yhtälö voidaan ratkaista vain yrityksen ja erehdyksen kautta, ts. iteroimalla. Oletetaan ojaväliksi 75 m, jolloin ekvivalenttisyvyyden arvoksi saadaan interpoloimalla taulukosta 7.1:

$$d = 3,04 + \frac{8}{10}(3,49 - 3,04) = 3,40 \text{ m} \quad (T7.3)$$

$L^2 = 1120 \times 3,40 + 560 = 4368 \text{ m}^2$, mikä on eri kuin $L^2 = 75^2 = 5625 \text{ m}^2$. Arvioitu 75 metrin ojaväli on näin ollen liian suuri. Seuraavaksi oletetaan ojaväliksi $L = 50 \text{ m}$, jolle interpoloimalla taulukosta 7.1 saadaan:

$$d = 2,71 + \frac{8}{10}(3,02 - 2,71) = 2,96 \text{ m} \quad (T7.4)$$

$L^2 = 1120 \times 2,96 + 560 = 3875 \text{ m}^2$, mikä on eri kuin $L^2 = 50^2 = 2500 \text{ m}^2$. Valittu ojaväli on liian pieni.



Oletetaan ojaväliksi $L = 65$ m.

$$d_{65} = d_{50} + \frac{15}{25}(d_{75} - d_{50}) = 2,96 + \frac{15}{25}(3,40 - 2,96) = 3,22 \quad (T7.5)$$

Tällöin $L^2 = 1120 \times 3,22 + 560 = 1471 \text{ m}^2$, mikä vastaa arvoa $L^2 = 65^2 = 4225 \text{ m}^2$, jolloin ojaväliksi valitaan 65 m.

Esimerkki 2

Oletetaan, että edellisessä esimerkissä käytetäänkin avo-ojia salaojaputkien sijaan. Oletetaan, että avo-ojien syvyys on 2,5 m, pohjan leveys 0,5 m ja luiskan kaltevuus 1:1. Suunnitelman mukainen vesisyvyys on 0,5 m, joten vesipinta on 2,0 metrin syvyydessä. Lasketaan tällöin tarvittava ojaväli.

Märkäpiiri u on

$$u = 0,5 + 2\sqrt{0,5^2 + 0,5^2} = 1,91 \text{ m} \quad (T7.6)$$

Vastaavasti ekvivalenttisäde on

$$r_0 = \frac{u}{\pi} = \frac{1,91}{\pi} = 0,61 \text{ m} \quad (T7.7)$$

Taulukkoa 7.1 ei voida käyttää kun r_0 on 0,61 m, joten arvo on laskettava kuvan 7.5 kaavalla.

Oletetaan ojaväliksi ensin $L = 72$ m

$$x = \frac{2\pi D}{L} = \frac{2\pi 4,8}{72} = 0,42 \quad (T7.8)$$

$$F(x) = \frac{\pi^2}{4x} + \ln \frac{x}{2\pi} = \frac{\pi^2}{4 \cdot 0,42} + \ln \frac{0,42}{2\pi} = 3,17 \quad (T7.9)$$

$$d = \frac{\frac{\pi L}{8}}{\ln \frac{L}{\pi r_0} + F(x)} = \frac{\frac{\pi 72}{8}}{\ln \frac{72}{\pi 0,61} + 3,17} = 4,16 \quad (T7.10)$$

$$L^2 = (1120 \cdot 4,16) + 560 = 5221 \quad (T7.11)$$

$$L^2 = 72^2 = 5184 \quad (T7.12)$$

Arvot ovat niin lähellä toisiaan, että ojaväliksi voidaan valita 72 m. Salaoja- ja avo-ojavaihtoehtojen ojavälien 65 ja 72 m erotus on näin ollen 7 m. Erotus johtuu siitä, että ekvivalenttisäteen arvo on suurempi avo-ojalla kuin salaojalla, jolloin säteettäisen virtauksen aiheuttama painehäviö on pienempi ja siitä syystä ojaväli voi olla suurempi.

Tietoruutu 7.3

Pohjavesivirtaus ja Laplacen yhtälö

Veden virtaus pohjavesipinnan alapuolella tapahtuu vedellä kyllästyneessä maaperässä. Virtausnopeus ja sen suunta riippuvat maaveden potentiaalista. Virtaus voi olla kolmiulotteista, mutta käytännön kastelu- ja kuivatustilanteissa virtaus on kokonaan kaksisuuntaista. Tästä syystä peruslakien sovellutuksissa on lähtökohtana vain kaksisuuntaisen virtauksen tarkastelu. Virtausta voidaan kuvata vakiotilanteeseen perustuvilla yhtälöillä, kuten esimerkiksi Laplacen yhtälöllä. Tämä yhtälö yhdistää kaksi pohjavesivirtauksen peruslakia, Darcyn lain ja jatkuvuuslain. Kaksisuuntaisen virtauksen yhtälöt ovat:

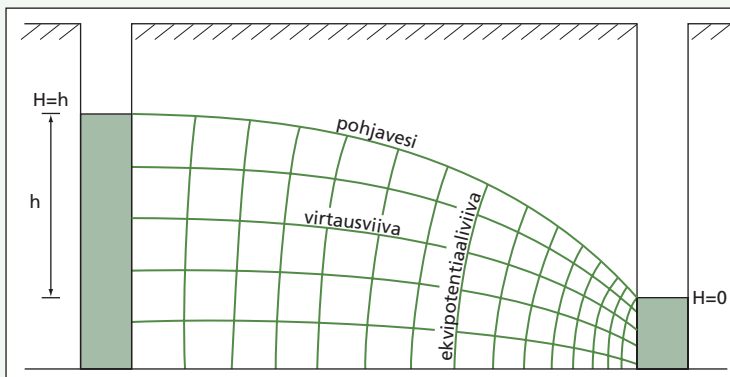
$$\text{Darcyn laki} \quad v_x = -K \frac{\partial H}{\partial x}; v_y = -K \frac{\partial H}{\partial y} \quad (T7.13)$$

$$\text{Jatkuvuuslaki} \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (T7.14)$$

$$\text{Laplacen yhtälö} \quad \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (T7.15)$$

Pohjavesivirtauksen periaate kuvaa salaojien toiminnan keskeistä ilmiötä. Kuivatusvaiheessa salaoja sijaitsee pohjaveden rajapinnassa, jolloin hydraulinen korkeus (H) on salaojaputkessa nolla. Tällöin salaojan yläpuolella olevan pohjaveden gradientti ohjaa vettä salaojaa kohti.

Kuvassa T7.3 on kuvattu kaksisuuntaisen virtauksen potentiaali- ja virtausviivoja. Virtausviivat kuvaavat veden kulkureittiä ylemmältä energiatasolta alemmalle tasolle. Ekvipotentiaaliviiva kuvaa kokonaispotentiaalia, korkeusaseman ja painepotentiaalin summaa. Samalla viivalla kokonaispotentiaali on vakio. Potentiaaliviivojen tiheys ilmentää samalla myös virtausnopeutta. Potentiaalieron aiheuttama virtaus on aina jyrkimmän gradientin suuntaan ja siksi virtausviivat ovat kohtisuoraan ekvipotentiaaliviivoihin nähden. Tämän ominaisuuden avulla Laplacen yhtälö voidaan ratkaista joko numeerisesti relaksaatiomenetelmää käyttäen tai graafisesti virtausverkko- tai neliöintimenetelmällä. Yksinkertaistettuna Laplacen yhtälö voidaan ratkaista myös analyyttisesti, josta esimerkkinä Hoodhoudtin kaavan sovellutus. Pohjavesipinnan muoto kuvaa sitä, miten painepotentiaali (h) jakaantuu ojen välissä. Pohjaveden pinnan kaltevuus eli hydraulinen gradientti on jyrkimmillään alemman pohjavesitason kapealla poikkileikkausalueella.



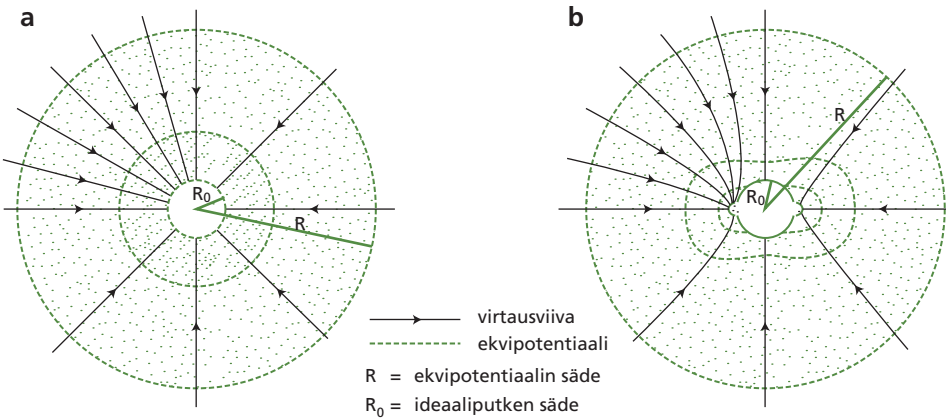
Kuva T7.3 Tyypillinen kaksisuuntaisen pohjavesivirtauksen esitystapa.

Veden virtaus putken ympärillä

Veden virtauksen jatkuvuuteen maaperästä salaojaputkeen vaikuttavat salaojakaivanto, sen täyttömateriaali ja salaojaputki. Merkittävin virtausta rajoittava tekijä on salaojaputken seinämä. Ojavälin laskentakaavat perustuvat olettamukseen, että vesi pääsee esteettä putkeen, jolloin virtausviivat jatkuvat esteettä putken sisälle saakka eikä putken rajapinnassa synny ylimääräisen potentiaalilin tarvetta. Tällöin puhutaan ideaaliputkesta (kuva 7.8a). Käytännössä putket eivät kuitenkaan ole ideaaliputkia, vaan virtaus- ja ekvivalenttiviivat muotoutuvat kuvan 7.8b mukaisesti. Putken aiheuttamaa lisäenergian tarvetta nimitetään *putken sisään pääsyn virtausvastukseksi*. Nykyisin salaojituksissa on käytössä aallotettu putki, jonka ympärillä virtausviivat muotoutuvat kuvan 7.8c esittämällä tavalla.

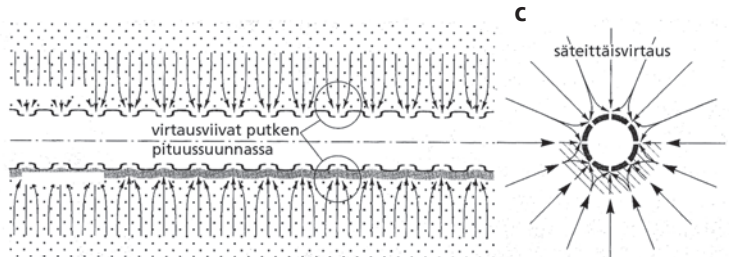
Putken ympärille syntyvää virtausvastusta on tutkittu sekä analyyttisesti että simulointia hyväksi käyttäen. Kuvassa 7.9 on esitetty näiden tutkimusten yhteenvetona sileän ja aallotetun putken sisään pääsyn virtausvastus suhteessa reikäpinta-alaan putkimetriä kohti. Sileän ja aallotetun putken ero selittyy maa-aineksen tukkimisvaikutuksen erolla. Aallotetussa putkessa reikä on aallotusuran pohjalla ja siitä syystä maa-ainek voi estää veden putkeen pääsyä tehokkaammin kuin sileän putken ulkokehällä. Kuvan käyrästä voidaan myös todeta, että kun aallotetun putken reikien pinta-ala ylittää $50 \text{ cm}^2 \text{ m}^{-1}$, sisään pääsyn virtausvastus pienenee sen jälkeen suhteellisen vähän.

Putken rei'itys ja putken ympärysaine vaikuttavat yhdessä sisään pääsyn ja säteittäisen virtausvastuksen kokonaismäärään. Putken ja ympärysaineen yhteisvaikutuksesta voidaan laskea *tehollinen putkikoko* eli se putkikoko, joka vaikuttaa lopullisen ojavälin valintaan. Hyvin vettä läpäisevä ympärysaine kasvattaa tehollista putkikokoa. Vaikka sisään pääsyn virtausvastus ei pienene enää paljoa ympärysaineen paksuuden ylittyä viisi millimetriä, säteittäisen virtauksen vastus pienenee edelleen ja kasvattaa siten tehollista put-

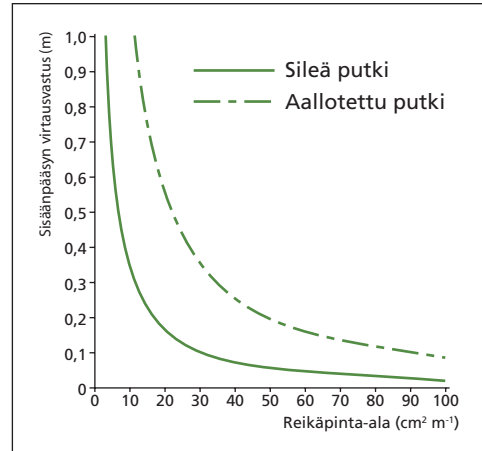


Kuva 7.8

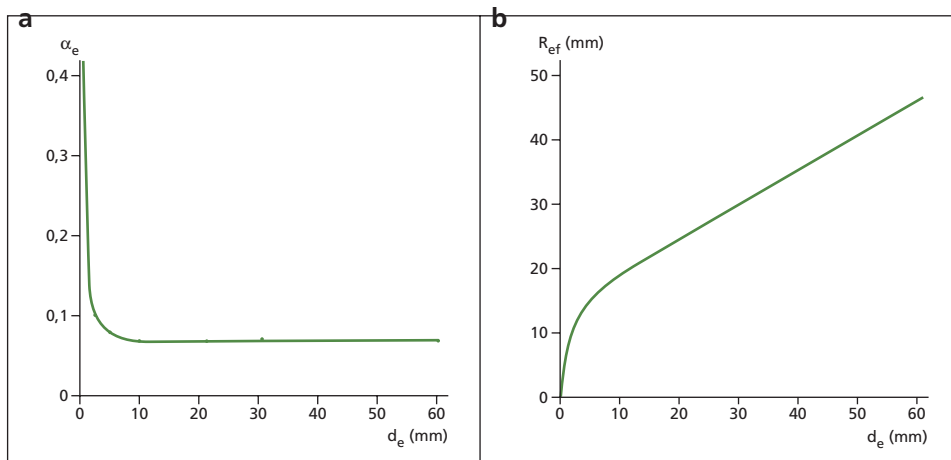
Säteittäinen virtaus ideaaliputkeen (a) ja todelliseen putkeen, jossa on kaksi reikäviivä (b). Nykyisin eniten käytössä olevan aallotetun putken virtausviivat ovat kuvan c mukaisia.



kikokoa. Kuvassa 7.10 on esitetty ympärysaineen paksuuden vaikutus sisäänpääsyn virtausvastukseen ja teholliseen putkikokoon, kun ympärysaineen vedenjohtavuus on kymmenkertainen ympäröivän maan vedenjohtavuuteen nähden. Kuvat havainnollistavat ympärysaineen paksuuden vaikutusta veden putkeen pääsyn helpottajana. Ympärysaineen paksuuden muutos yhdestä millimetristä viiteen millimetriin pienentää sisäänpääsyn virtausvastuksen neljäsosaan ja vastavasti tehollinen putkikoko kasvaa kaksinkertaiseksi.



Kuva 7.9 Putken sisäänpääsyn virtausvastuksen ja reikäpinta-alan suhde sileälle ja aallotetulle putkelle.



Kuva 7.10 Ympärysaineen paksuuden d_e vaikutus sisäänpääsyn virtausvastukseen α_e (kuva a) ja teholliseen putken kokoon R_{eff} (kuva b) kun ympärysaineen vedenjohtavuus on 10-kertainen ympäröivän maan vedenjohtavuuteen nähden.

Ympärysaineet

Ympärysaine-termi on suhteellisen nuori, se on korvannut aiemman yleisesti käytetyn salaajan suodatin-termin. Ympärysaineella tarkoitetaan välittömästi salaajaputken ympärille työn aikana asennettavan tai etukäteen asennettua materiaalia. Putken ympärille joko tehtaalla tai työmaalla asennetusta ympärysaineesta käytetään termiä esipäälyste.

Ympärysaineen tehtävät

Salaojan ympärysaineen tehtävät voidaan jakaa neljään pääryhmään:

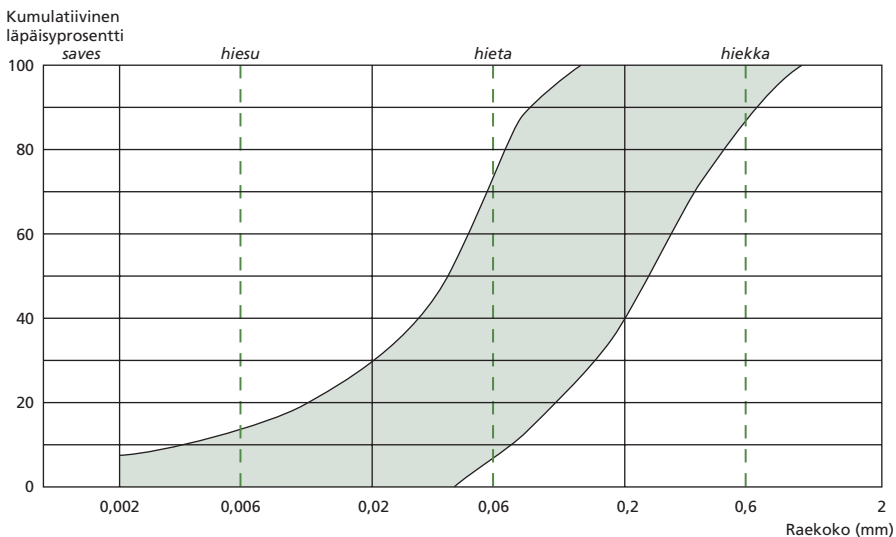
Suodatintehtävä:	Ympärysaine estää tai rajoittaa maa-aineksen pääsyä putken sisään. Putken asennuksen alkuvaiheessa hienoin kolloidinen maa-aines pääsee putken sisään, mutta ympärysaineen ja kaivannon täytön jälkeen putken liettymistä aiheuttava hiukkasten liike maaperästä putkeen estyy.
Hydraulinen tehtävä:	Ympärysaineen hyvä vedenjohtavuus pienentää veden virtausvastusta salaojaputkeen saumojen tai reikien läheisyydessä.
Mekaaninen suojaus:	Ympärysaineen tehtävänä on tukea ja suojata putkea maapaineelta ja estää putken särkyminen tai kokoonpääminen.
Asennuksen varmistaminen:	Ympärysaineella varmistetaan, että asennuspohja on tasainen ja että putki asettuu oikeaan paikkaan ja myös pysyy siinä kaivannon täyttöönsä saakka.

Ympärysaineen tarve

Ympärysaineen laatuvaatimuksissa suodatin- ja hydraulinen tehtävä rajaavat käytettävän materiaalin ominaisuudet tarkimmin. Vaadittavat ominaisuudet ovat kiinteässä vuorovaiikutussuhteessa asennusolosuhteisiin. Putken liettymisen on todettu johtuvan ensisijaisesti seuraavista tekijöistä:

- maapartikkeleiden raekoko on sellainen, että ne pääsevät putken sisään
- maan rakenne on epävaka, jolloin maapartikkelit liikkuvat herkästi veden mukana
- putken kaltevuus on niin pieni, ettei putkeen päässyt maa huuhtoudu pois veden vaikutuksesta.

Maan rakenteen pysyvyyteen vaikuttaa oleellisesti maaperän savespitoisuus ja orgaanisen aineksen määrä. Lauhkeassa ilmastossa maan rakenne on yleensä pysyvämpi kuin muissa



Kuva 7.11 Kuvassa on tummennettuna esitetty niiden maalajien rakeisuuskäyrien alue, joilla salaojien suodatintarve on suurin. Rajausta edustaa lauhkeiden ilmasto-olosuhteiden rajausta.

ilmastovyöhykkeissä. Rakenteen pysyvyyteen vaikuttaa merkittävästi myös maan alkali-teetti ja savimineraalien laatu.

Yksityiskohtainen suodatintarpeen määrittely edellyttää hydraulisen sortuman gradi-entin HFG:n tuntemista. HFG kuvaa maan eroosiokestävyyttä veden virtauksen suhteen. HFG-menetelmä soveltuu maalajeille, joiden hydraulinen johtavuus on $0,02 - 4,5 \text{ m d}^{-1}$ ($0,08 - 19 \text{ cm h}^{-1}$). HFG kuvaa maan eroosiokestävyyttä veden virtauksen suhteen. HFG:n arvo voidaan laskea empiirisen kokemuksen perusteella plastisuusindeksin ja hydraulisen johtavuuden arvoista kaavalla (7.23). Plastisuusindeksi kuvaa maan kosteutta, jossa maa-aines käyttäytyy kuten muovailtava massa.

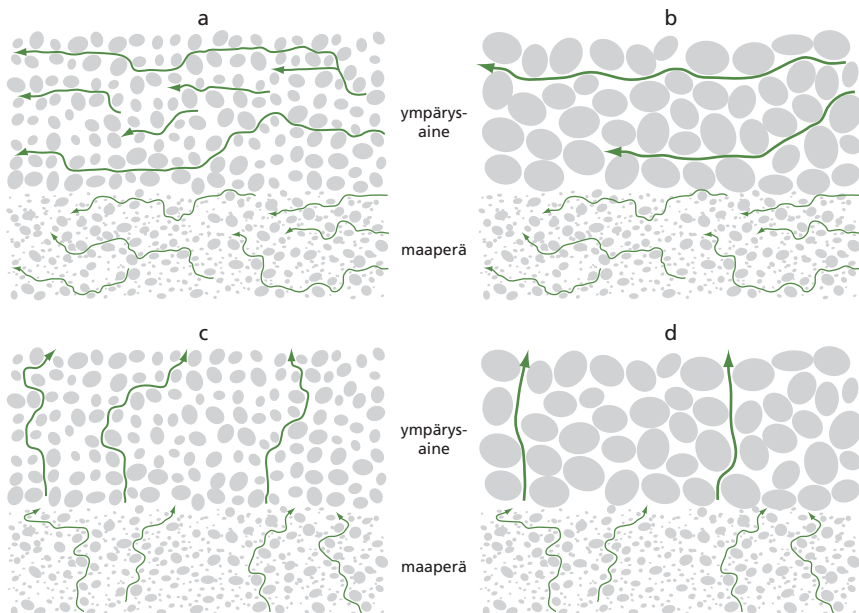
$$HFG = e^{0,333-0,132 K+1,07 \ln PI} \quad (7.23)$$

e = luonnollinen logaritmi

K = vedellä kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus (m d^{-1})

PI = plastisuusindeksi

Käytännössä ensimmäinen indikaattori suodatintarpeen arvioinnissa on maan savespitoisuus. Maan rakenne on pelkästään suodatintarvetta ajatellen riittävän vakaa, jos sen savespitoisuus ylittää 60 % ja vedellä kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus on alle $0,1 \text{ m d}^{-1}$. Lauhkealla ilmastovyöhykkeellä savespitoisuuden alaraja on 30 %. Savimaillakin saattaa hienoa ainesta päästä putkeen, jos maaperässä esiintyy suuria huokosia. Plastisuusindeksin tulisi olla vähintään 12, jotta suodatintarve olisi vähäinen.



Kuva 7.12 Ympärysaineen ja perusmaan rajapinnan suuntainen ja sitä kohtisuoraan tapahtuva virtaus.

a = Hieno ympärysaine ja rajapinnan suuntainen virtaus,

b = Karkea ympärysaine ja rajapinnan suuntainen virtaus

c = Hieno ympärysaine ja rajapintaa kohtisuoraan tapahtuva virtaus,

d = Karkea ympärysaine ja rajapintaa kohtisuoraan tapahtuva virtaus.

Kuvassa 7.11 on esitetty raekoostumus niiden maalajien osalta, jotka ovat märkänä mekaanisesti erityisen epävakaita. Näillä maalajeilla on ympärysaineen laatuun syytä kiinnittää erityistä huomiota. Niihin kuuluvat hienot hiedat ja siltit eli hiesun ja hienon hiedan yhdistelmä hiue sekä tasarakeiset karkeat hiedat. Käytännössä ongelmalliset maalajit voi todeta kairaamalla maahan reiän. Jos se ei pysy auki pohjaveden pinnan alapuolella, suodatintarve on ilmeinen. Samaa asiaa ilmentää avo-ojien luiskien sortumat. Asennusaikaisilla maaperän kosteussuhteilla ja asennustavalla on niin ikään merkittävä vaikutus ympärysaineen tarpeeseen.

Veden virratessa maaperässä se vetää puoleensa maahiukkasia. Veden nopeuden ja hydraulin gradientin kasvaessa vetovoima kasvaa, kunnes se saavuttaa arvon, jolla maapartikkelit alkavat erottua toisistaan ja lähtevät liikkeelle veden mukana. Maahiukkasten siirtyminen voi tapahtua joko painovoiman suuntaisesti tai kohtisuoraan sitä vastaan. Eroosioherkin alue on ympärysaineen ja maaperän rajapinta. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 7.12, jossa hieno ja karkea ympärysaine ovat saman perusmaan päällä. Virtaus on kuvattu sekä salaojaputken suuntaisena (kuvat a ja b) että salaojaputkeen nähden kohtisuoraan (kuvat c ja d).

Perusmaan ja ympärysaineen rajapinnassa veden kitkavoima perusmaan hiukkasiin on suhteessa veden virtausnopeuteen ympärysaineessa. Niin kauan kuin virtausolosuhteet rajapinnassa pysyvät vakiona, hiukkasten liike jatkuu. Salaojan rajapinnan suuntaisessa virtauksessa maahiukkaset liikkuvat yksittäisinä partikkeleina, kun sen sijaan sitä vastaan kohtisuorassa virtauksessa maa-aines liikkuu massana. Tämä johtuu siitä, että vaakasuora virtaus on yleensä turbulenttista, mutta pystysuora vain harvoin.

Koska suurten huokosten osuus ympärysaineessa on suurempi kuin maaperässä, virtausnopeus on samalla gradientilla ympärysaineessa suurempi kuin maaperässä. Vastavasti virtausnopeus on suurempi karkeassa kuin hienossa ympärysaineessa. Kriittinen gradientti, joka saa aikaan maahiukkasten liikkeellelähdon, on vaakasuorassa virtauksessa suurempi hienossa kuin karkeassa ympärysaineessa. Tätä kriittistä gradienttia mitataan hydraulisen sortuman gradientilla.

Veden liikkeessa maaperästä kohtisuoraan ympärysaineen rajapintaa vastaan maahiukkasten liikkeellelähdo tapahtuu eri tavalla kuin rajapinnan suuntaisessa virtauksessa. Kun virtaus tapahtuu pienemmästä huokostilavuudesta suurempaan, veden nopeus on ympärysaineessa pienempi kuin perusmaassa. Kuvissa 7.12c ja d on kuvattu virtausta pohjavedestä salaojaan. Mekanismi on samanlainen painovoiman suuntaan, johon lisäksi vaikuttavana tekijänä tulee mukaan ns. siltaefekti.

Veden liikkeessa maaperässä kohti salaojaa hydraulinen gradientti kasvaa putken ympärillä virtausviivojen kaartumisen vuoksi ja on suurimmillaan maan ja putken rajapinnassa. Kun putken ympärille asennetaan ympärysaine, kriittinen rajapinta siirtyy maan ja ympärysaineen rajapintaan, ja gradientti ympärysaineessa pienenee. Näin ollen ympärysaineen valinnan kriittiseksi kohdaksi muodostuu maan ja ympärysaineen rajapintaan muodostuva gradientti.

Ympärysaineen paksuuden suhteen yleisohjeena on, että mitä paksumpi ympärysaine on, sitä karkeampaa se saa olla. Karkeilla ympärysaineilla, kuten soralla maa-aineksen pidentymistä tapahtuu siltaefektin ansiosta myös ympärysaineen sisällä. Karkeiden ympärysaineiden vähimmäispaksuudeksi suositellaan 8 cm.

Siltaefekti

Siltaefekti-termi juontaa juurensa sillan rakennuksessa käytetystä holvikaaritekniikasta. Maapartikkelit muodostavat ympärysaineessa holvirakenteita, jotka estävät niiden etenemistä ympärysaineessa. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 7.13. Siltaefektin aikaan-

saaminen edellyttää ympärysaineen huokoskoolta ja perusmaan raekoolta tiettyä suhdetta. Suhde määritellään useimmiten O_{90}/d_{90} -suhteena eli ympärysaineen huokoskoon ja maan raekoon 90 %:n arvoilla. Arvo O_{90} on se huokoskoko, jota pienempiä huokosia ympärysaineessa on vähintään 90 % koko huokosjakautumasta.

Holvautumisen on todettu syntyvän, jos perusmaan maahiukkasten koko on vähintään kolmasosa ympärysaineen huokosten koosta. Jos hiukkasten koko on neljäsosa huokosista, holvautuminen on yleistä. Jos koko on vain viidennes, ilmiötä ei juuri synny.

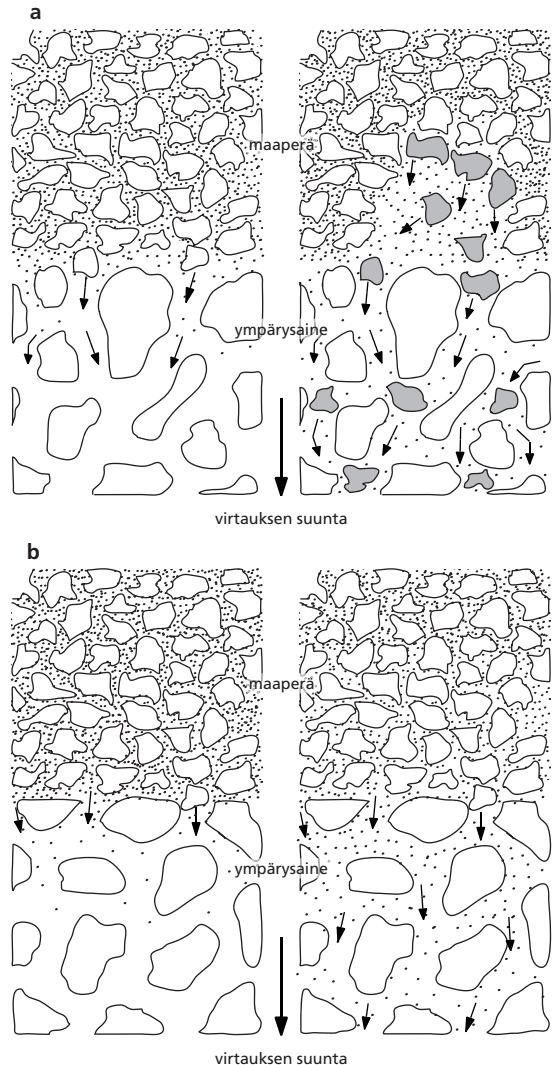
Soraa käytettäessä hienoin maa-aines läpäisee ensi vaiheessa ympärysaineen, mutta karkeampi osa jää siltaefektin ansiosta soraan. Kun holvautuminen on muodostunut, hienoa maa-ainesta ei enää pääse merkittävästi ympärysaineen läpi. Tämä ilmiö aiheuttaa sen, että myös suodatinominaisuudet ovat hyvät hyvin erilaisissa olosuhteissa. Holvautuminen voi kuitenkin särkyä esimerkiksi salaojien huuhtelun yhteydessä tai käytettäessä salaojia kasteluun.

Ympärysaineen laatu

Salaojien ympärysaineiden laatuvaatimusten historian voidaan katsoa alkaneen 1920-luvulla, jolloin Terzaghi loi suunnitteluperusteet soran laadulle hydrau-

lisissa rakenteissa. Sittemmin aallotetun salaojaputken käyttöönotto toi mukanaan esipäällystetyt putket, joiden ympärysaineen materiaalina on käytetty muun muassa orgaanisia aineita, kuten kookoskuitua, turvekuitua, olkea, pellavakuitua tai synteettisiä kuituja.

Kuten edellä esitetyistä ympärysaineen tehtävistä käy ilmi, ympärysaineella tulisi olla kaksi vaikeasti yhteen sovittavaa ominaisuutta, hyvä suodatinominaisuus ja hyvä vedenjohtavuus, jotka pitäisi olla voimassa samanaikaisesti. Ympärysaineiden laatuksiteerit perustuvatkin ensisijaisesti näiden kahden ominaisuuden määrittämiseen. Lisäksi ympärysaineen tulisi olla pitkäikäinen sekä itse materiaalina että toimivuudeltaan.



Kuva 7.13 Siltaefektiä havainnollistava kuva.

a: eroosiotilanne

b: siltaefektin vuoksi vain hieno aines liikkuu

Soran laatukriteerit

Soran laatuvaatimukset määritellään rakeisuuskäyrän avulla. Sopivaan raekokojakautumaan vaikuttaa ensisijaisesti maaperän (d) ja soran (D) raekokojen suhde. Suhteen raja-arvojen tärkeys on sitä suurempi, mitä liettyvämmästä maalajista on kysymys. Salaojasoran rakeisuuskäyrän rajausta määritetään peltosalaojituksissa alla esitetyillä suhteilla, joissa c ja f viittaavat karkeaan ja hienoon rajapintaan (kuva 7.14).

Karkeiden rakeiden (c) raja-arvot ovat:

1. $D_{15c} < 7 d_{85f}$ Tarkistus piste rajaa maan hienon aineksen ja soran karkean aineksen suhteen. Käytännössä on todettu, että mikäli kerroin on suurempi kuin 9, ympärysaineen suodatinkyky ei ole ollut riittävän hyvä.
2. $D_{60c} = 5 D_{15c}$ Suhdeluku kuvaa soran tasarakeisuutta.
3. $D_{100} < 9,5 \text{ mm}$ Arvo kuvaa soran lajittumisriskiä. Liian karkeat rakeet aiheuttavat rakeiden lajittumista materiaalin käsittelyssä. Raja-arvoa ei tulisi ylittää ainakaan käytettäessä murskeita.

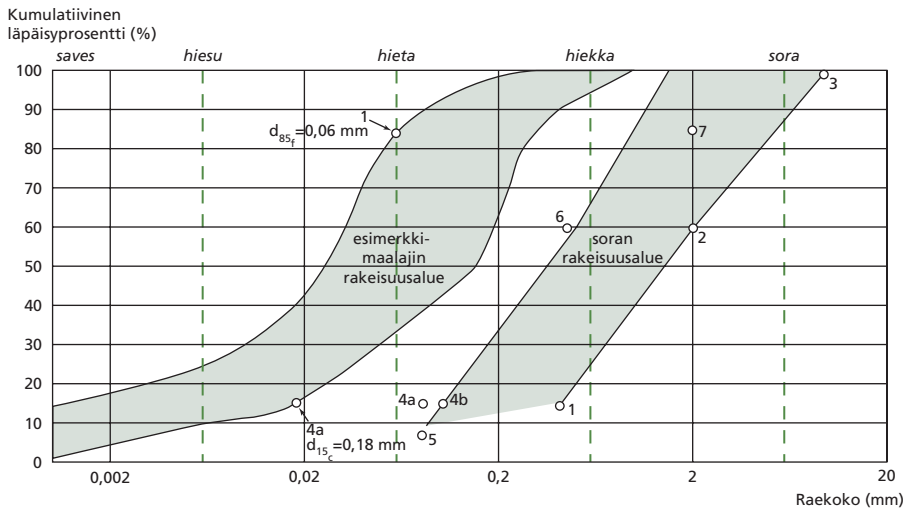
Hienojen rakeiden (f) raja-arvot:

- 4.a $D_{15f} > 4 d_{15c}$ Arvo määrittelee soran riittävän hydraulisen johtavuuden arvon. 15 prosentin läpäisevyysarvo kuvaa soran vedenjohtavuutta, koska kyseinen raekoko määrittelee vedenjohtavuuden kannalta oleellisten huokosten määrän. Kertoimen arvolla 4 soran vedenjohtavuus on teoriassa 16-kertainen ympäröivän maan vedenjohtavuuteen ja käytännössä ainakin kymmenkertainen.
- 4.b $D_{15f} = D_{15c}/5$ Arvo määrittelee raekokojakautuman laajuuden ja hydrauliset ominaisuudet. Rajausta varmistaa, että ympärysaineen vedenjohtavuus on riittävä suhteessa maaperän vedenjohtavuuteen.
5. $D_{5f} > 0,0074 \text{ mm}$ Arvo varmistaa sen, että hydraulinen johtavuus ei ole liian pieni ja että asennuksen yhteydessä ympärysaineesta ei pääse liikaa hienoa ainesta putkeen.
6. $D_{60f} = D_{60c}/5$ Suhde määrittelee sallitun raekokojakautuman laajuuden.
7. $D_{85} > D_{\text{reikäkoko}}$ Arvo varmistaa siltaefektin toimivuuden. Putkien reikien leveys on normaalisti enintään 2 mm, joten $D_{85} > 2 \text{ mm}$.

Edellä esitetyt ohjearvot pätevät maalajeille, joilla ympärysaineen tarve on suuri. Arvojen lisäksi tulee seulonalla varmistaa, että ympärysaineesta ei puutu jotain raekokoa kokonaan, mikä ei välttämättä tule esiin edellä esitetyillä raja-arvoilla.

Mursketta käytettäessä on lisäksi huomioitava, että sen rakeiden muoto tulisi olla sellainen, että pituuden suhde leveyteen ei ole yli kaksi. Eri raekokojen esiintyminen murskeessa on tärkeää. Käytännössä murskeita käytettäessä suurimmat ongelmat ovat johtuneet jonkin raekokoon puuttumisesta kokonaan. Murskeen vedenjohtavuus on todettu olleen usein jopa 100 kertaa suurempi kuin vastaavan raekokojakautuman luonnon soran vedenjohtavuus. Murskeen vedenjohtavuus ei saisi ylittää arvoa 300 m d^{-1} .

Jos putken reikäkokoja pienemmät rakeet muodostavat holvirakenteen, ne eivät kulkeudu veden mukana putkeen. Ympärysaineen raekoon suhteesta putken reikäkoko on todettu, että raekoon ollessa kolmasosan reikäkoosta, siltaefekti syntyy aina. Jos suhde on neljäs-



Kuva 7.14 Ympärysaineen raekokorajauksen määrittäminen esimerkkimaalajille.

Tarkistuspisteinä on käytetty: 1. $D_{15c} < 7 d_{85f}$ 2. $D_{60c} = 5 D_{15c}$ 3. $D_{100} < 9,5 \text{ mm}$ 4a. $D_{15f} > 4 d_{15c}$
 4b. $D_{15f} = D_{15c}/5$ 5. $D_{5f} > 0,0074$ 6. $D_{60f} = D_{60c}/5$ 7. $D_{85} > D_{\text{reikäkoko}}$

osa, holvirakenne muodostuu useimmiten, mutta sitä pienemmillä suhteilla siltaefektiä ei synny. Käytännössä ennen holvirakenteen syntymistä putken lähellä oleva hienoinen pääsee putkeen, mutta sen jälkeen niiden putkeen pääsy on hyvin vähäistä. Siltaefektin varmistamiseksi on syytä huomioida myös seuraavia suhteita hienomman alarajan osalta:

$D_{15} > 0,25 D_{\text{reikäkoko}}$ Mikäli reikäkoko on 2 mm, suhde edellyttää, että D_{15} on vähintään 0,5 mm. Mikäli maaperä on erityisen liettyvää, jolloin suodatusvaatimus on suuri, vaihtoehtona on käyttää pienireikäistä putkea, jolloin D_{15} arvo voi olla pienempi.

$D_{50} > 0,5 D_{\text{reikäkoko}}$ Suhde varmistaa, että raekokojakautuma on myös keskikooltaan sopivaa.

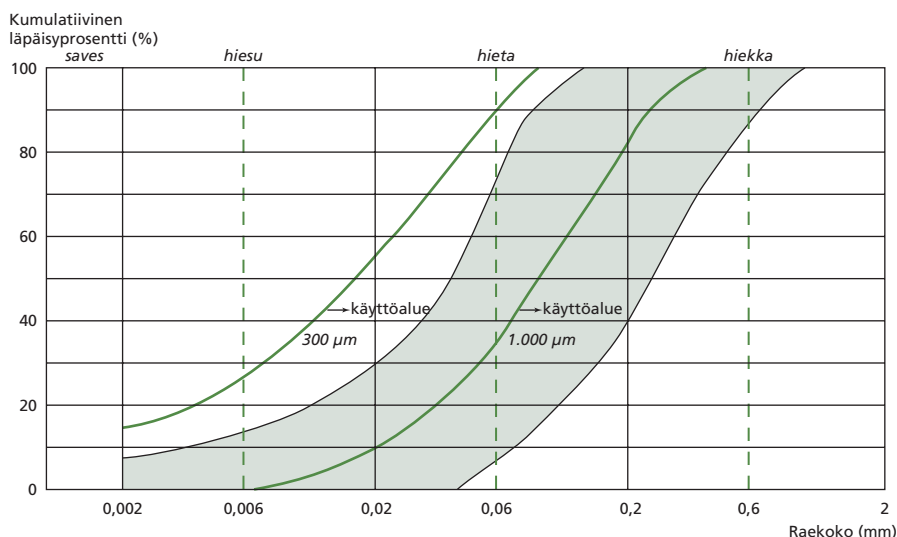
$D_{90} > 1,5 D_{\text{reikäkoko}}$ Suhdeluku varmistaa karkean raekoon oikean suhteen. Arvoa voi verrata myös esipäällysteiden vaatimuksiin, jossa kriteerinä on D_{90} arvo.

Esimerkki erityisen hyvää suodatinominaisuutta vaativan maalajin raekokojakautuman alueesta on esitetty kuvassa 7.14. Samaan kuvaan on piirretty yllä esitetyillä kriteereillä laadittu näille maalajeille soveltuvan soran rakeisuuskäyrän raja.

Esipäällysteet

Esipäällysteet jaetaan materiaalin alkuperän mukaan orgaanisiin ja synteettisiin esipäällysteisiin. Orgaanisten materiaalien kestoikään vaikuttaa orgaanisen aineen määrä päällysteessä ja maaperän olosuhteet (lämpötila, happi, pH jne.). Esipäällysten lahoaminen voi altistaa putket liettymiselle ja lopulta tukkeutumiselle varsinkin ongelmamaalajeilla (Sikkilä 2014). Esipäällystemateriaaleja kehitetään jatkuvasti ja nykyisin käytetyt esipäällysteet ovat pääosin synteettisiä, jolloin hajoaminen ei ole ongelma.

Peltosalaajituksessa käytettäville esipäällysteille ei ole yhtä kattavia laatuvaatimuksia kuin on maa- ja vesirakentamisessa laajasti käytössä oleville geotekstiileille. Esipäällysteiden kriteerit perustuvat ensisijassa paksuuteen, painoon ja huokoskokoon. Tarvittava paksuus ja paino määräytyvät käytetyn materiaalin ja käyttöympäristön mukaan. Suositus esi-



Kuva 7.15 Esipäällysteiden O_{90} huokoskoon vaikutus sen soveltuvuuteen suhteessa maaperän raekoostumukseen.

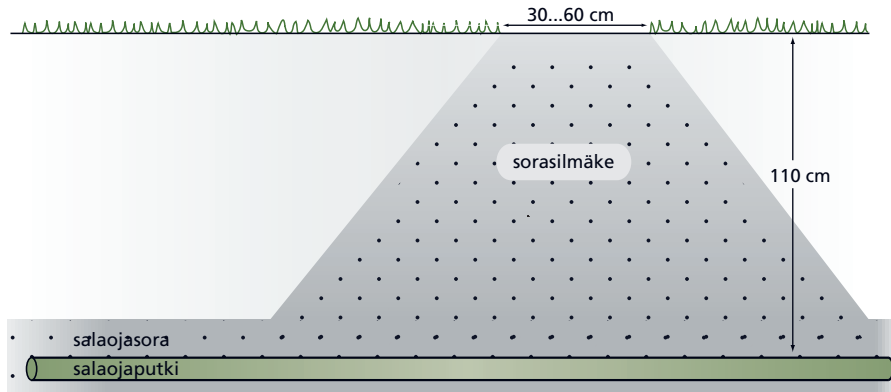
päällysteiden paksuudeksi vaihtelee 3 ja 8 mm:n välillä (mitattuna 2 kPa paineessa). Huokoskokojakauman osalta kriittisenä arvona käytetään seulontatestillä mitattavaa O_{90} -arvoa. Arvo ilmaisee sen huokoskoon, jota pienempiä huokosia esipäällysteessä on vähintään 90 % koko huokoskokojakaumasta. O_{90} -arvon määrittämiseksi sopii SFS-EN ISO 12956, jossa O_{90} -arvo vastaa lähes tasarakeisen maalajitteen keskimääräistä raekokoa, kun esipäällyste pidättää 90 % laitteesta. Peltosalaojituksessa suositeltavat O_{90} -arvot ovat 300–1 000 µm:n välillä. Tällaisten esipäällysteiden soveltuvuus eri maalajeille määritellään O_{90} - ja d_{90} -arvojen suhteella. Tämän suhteen arvo on riippuvainen esipäällysteiden vahvuudesta. Jos esipäällysteiden vahvuus on vähintään 5 mm, suhde ei saa ylittää viittä, 1–5 mm:n vahvuudella esipäällysteellä suhdeluku tulee olla 2,5–5 ja alle 1 mm:n vahvuudella esipäällysteillä alle 2,5. Näillä suhteen arvoilla varmistetaan esipäällysteiden riittävä suodatuskyky. Vedenjohtavuuden osalta ei ole erillistä raja-arvoa, koska edellä mainituilla O_{90} -arvojen rajauksella hydraulinen johtavuus on riittävän suuri. Mikäli esipäällysteiden O_{90} -arvo on alle 200 µm, sen vedenjohtavuus ja tukkeutumisriski rajoittavat esipäällysteiden käyttöä salaojituksissa. (Vlotman 2004)

Kuvassa 7.15 on esitetty esimerkki esipäällysteille, joiden O_{90} -arvot ovat 300 tai 1 000 µm. Käyttöaluerajaus maalajin suhteen on laskettu edellä esitetyillä kertoimilla olettaen, että esipäällysteiden paksuus on 3 mm. Rajausta on verrattu kuvassa 7.11 esitettyyn herkästi liettyvien maalajien raekokojakaumaan. Rajauksen mukaan 300 µm:n esipäällystettä voi käyttää hie- ja sitä karkeimmilla mailla ja 1 000 µm:n päällystettä hienoilla hiekoilla ja sitä karkeimmilla mailla.

Teorian ja käytännön yhteensovittaminen

Ympärysaineen tarpeen yksityiskohtainen selvittäminen on varsin työlästä. Olosuhteissa, joissa asiasta on saatu pitkään käytännön kokemuksia, käytäntö muovautuu yleensä kokemusperäisesti. Pääsääntöisesti peltosalaojituksessa jokin seuraavista tekijöistä edellyttää ympärysaineen käyttöä: suodatintarve, vedenjohtavuuden parantaminen tai putken asennuksen varmistaminen.

Massiivisista ympärysaineista sora on ainut, jota voidaan huoletta käyttää kaikilla maalajeilla. Teollisten esipäällysteiden osalta niiden ominaisuudet suhteessa maaperään muodostuvat ratkaisevaksi tekijäksi. Myös asennusolosuhteilla on vaikutusta onnistuneeseen lopputuloksen kannalta.



Kuva 7.16 Suotosilmäke voidaan tehdä sorasta tai muusta helposti vettä läpäisevästä materiaalista kuten hakkeesta. Silmäke varmistaa tiiviillä maalla pintaveden pääsyä salaojaan.

Työnaikaisista riskeistä suurimmat liittyvät olosuhteisiin, joissa salaoja asennetaan pohjaveden alapuolelle. Tällöin putken pysyminen kaivannon pohjassa vaatii riittävää painotusta. Myös kaivannon vedenläpäisevyys voi jäädä huonoksi tai ympäröivä maaperä voi tukkeutua työn yhteydessä, jos maalaji on märkänä liettymiselle altis. Asennustekniikalla on tällöin oleellinen merkitys.

Salaojaputken välittömässä läheisyydessä oleva ympäröivä maaperä varmistaa, että vesi pääsee mahdollisimman esteettömästi putkeen ja että putkeen ei pääse liikaa ympäröivää maainesta. Putken yläpuolella olevan maakerroksen veden pääsyä salaojaan voidaan nopeuttaa varmistamalla, että salaojakaivanto läpäisee mahdollisimman hyvin vettä. Kaivannon vedenläpäisevyyttä voidaan parantaa joko käyttämällä sopivaa täyttömaata, korvaamalla täyttömaa muulla helposti läpäisevällä materiaalilla tai niiden yhdistelmällä ns. silmäkkeillä. Kaivannon vedenläpäisevyyttä voidaan parantaa esimerkiksi täyttämällä se mahdollisimman täyteen ruokamullalla ja varsinkin savimailla antamalla kaivumaan kuivua kunnolla ennen kuin sitä palautetaan takaisin kaivantoon. Märän savimaan palauttaminen kaivantoon pienentää kaivannon vedenläpäisevyyttä huomattavasti. Kaivannon täyttöön voi käyttää myös esimerkiksi haketta, joka läpäisee hyvin vettä. Suotosilmäkkeiden (kuva 7.16) käyttö on erityisen suositeltavaa, jos ojittavalla alueella on vielä avo-ojitus. Tällöin silmäkkeet on syytä tehdä salaojan ja avo-ojan risteykseen, jolloin tukittavan avo-ojan pohjalla vielä liikkuva vesi pääsee nopeasti salaojaan. Silmäkkeiden kautta voidaan varmistaa myös maanpinnan pieniin painanteisiin kerääntyvän pintaveden pääsyä salaojaan.

Ojitusolosuhteet voivat vaikuttaa merkittävästi ojituksen toimivuuteen. Salaojitusta ei pitäisi tehdä olosuhteissa, joissa maan luontainen rakenne voi huonontua oleellisesti. Työnaikainen maan kosteus ei saa olla liian suuri. Märissä olosuhteissa maa-aines voi tukkia myös esipäällysteiden huokokset tai putken rei'ityksen.

Savimaiden erityiskysymyksiä

Savimaiden salaojitus on haastava tehtävä, koska niiden vedenjohtavuus riippuu oleellisesti maan rakenteesta. Jos savimaahan ei ole muodostunut makrohuokosia juurien, lierojen tai kuivumisen johdosta, sen vedenjohtavuus on erittäin pieni. Lisäksi savimaiden vedenjohtavuus muuttuu sadannan ja vuodenajan suhteen. Kuivan kauden aikaansaamat makrohuokokset umpeutuvat runsaiden sateiden aikana, jolloin maan vedenjohtavuus pienenee merkittävästi. Lisäksi routa vaikuttaa maan rakenteeseen. Edellä esitetyistä syistä johtuen ojavälin määrittäminen laskennallisesti on savimailla vaikeaa.

Savimaiden salaojitusten toimivuuden varmistamiseksi on kiinnitetty huomiota erityisesti salaojakaivannon täyttömateriaalin hyvään vedenläpäisevyyteen. Koska muokkaus-

kerroksen vedenjohtavuus on yleensä suurempi kuin jankon vedenjohtavuus, niin muokauskerroksen vesi on pyritty johtamaan salaojakaivannon kautta salaojaan. Käytännön kokemukset ovat osoittaneet esimerkiksi, että kyntösuunta tulisi olla mahdollisimman koh-tisuoraan imuojien suuntaa vastaan.

Turvemaiden salaojitus

Turvemaiksi luokiteltuja peltoja oli 2000-luvun alussa viljelyksessä 260 000 hehtaaria. Turvepeltojen osuus kasvaa pohjoiseen mentäessä, ja on maakunnallisesti suurin Pohjois-Pohjanmaalla. Viime vuosina uusien peltojen raivaus on lisännyt turvemaiden kokonaismäärää merkittävästi. Arvioiden mukaan turvemaita on raivattu pelloksi vuosittain 3 000–4 000 hehtaaria. Yhtenä syynä on ollut karjatilojen tarvitsema lisäpeltoala lannanlevitysalaksi.

Salaojituksen toimivuuden näkökulmasta turvekerroksen paksuudella ja maatuneisuudella on oleellinen merkitys. Mitä paksumpi turvekerros ja mitä maatuneempi turve, sitä haasteellisempi on salaojitettava pelto. Peltoja, joissa turpeen paksuus on yli 60 cm, on 170 000 hehtaaria eli 7 prosenttia peltoalasta.

Peltoja on Suomessa salaojitettu yli sadan vuoden ajan. Tuona aikana ojavälisuositus on kaikista maalajeista pienentynyt eniten turvemaidella. Maatalouden hevosvetoisella aikakaudella käytetyt ojavälit olivat turvemaidella 20–30 metriä ja savimaidella 15–17 metriä. Tämän oppikirjan ojavälisuositus on turvemaidella 8–14 metriä ja savimaidella 10–14 metriä. Toisin sanoen ojavälisuositus on turvemaidella puolittunut, kun se savimaidella on pienentynyt kolmanneksen. Ojavälin pienentyminen on johtunut ennen kaikkea turpeen maatumisesta.

Turvemaa on vaikea kuivatettava ennen kaikkea siksi, että se pidättää hyvin vettä ja läpäisee sitä huonosti. Tilanteessa, jossa pohjavesi on metrin syvyydessä, maasta painovoiman vaikutuksesta poistuva vesi on valunut pois eikä haihduntaa ole, turpeessa on edelleen 60–75 tilavuusprosenttia vettä. Mitä maatuneempaa turve on, sitä vähemmän siitä poistuu vettä painovoiman vaikutuksesta.

Maan vedenjohtavuuteen vaikuttaa oleellisesti maan huokostilan koko ja muoto. Suurista eli yli 0,03 mm suuruisista huokosista vesi valuu pois painovoiman vaikutuksesta, joten ne ovat kuivatuksen kannalta merkittäviä. Viljelyyn otetun turvemaan huokoskoko muuttuu nopeasti maatumisen edetessä; viljelyyn otettaessa suuria huokosia saattaa olla 35 prosenttia maan kokonaistilavuudesta, mutta kymmenen vuoden jälkeen enää 13–15 prosenttia. Samalla maan vedenjohtavuus pienenee muokauskerroksessa lähes kymmenesosaan ja jankossakin kolmasosaan. Lisäksi turpeen kuivuessa sen vedenjohtavuus pienenee muita maalajeja nopeammin. Maatuneen turpeen vedenjohtavuus on samaa suuruusluokkaa kuin hiesun.

Kotimaisissa tutkimuksissa on todettu, että turpeen kosteus muokauskerroksessa pitäisi saada 60–70 tilavuusprosenttiin, jotta kantavuus olisi riittävä nurmiviljelyssä, jossa juuristo parantaa kantavuutta. Viljan viljelyssä sen pitäisi olla 5 prosenttiyksikköä kuivempaa. Turpeen maatuneisuus vaikuttaa riittävän kantavuuden saavuttamiseen niin, että mitä maatuneempi turve, sitä kuivempaa sen pitäisi olla. Kun lisäksi vedenjohtavuus pienenee maatumisasteen kasvun myötä, kuivatustehokkuuden pitää olla sitä parempi, mitä maatuneempi turvemaa on kyseessä.

Jotta muokauskerroksen kosteus olisi kantavuuden varmistamiseksi riittävän pieni, pohjaveden pinta tulisi saada niin alas, että vesi poistuu muokauskerroksen suurista huokosista, eikä kapillaarinen nousu yllä muokauskerrokseen. Tällöin haihdunta pääsisi kuivattamaan maata.

Käytännössä kuivatussyvyyttä ei ole peruskuivatuksen mataluuden vuoksi ylipääntensä mahdollista kasvattaa eikä taloudellisesti kannattavaa tehdä niin syväksi, että se yksin varmistaisi kantavuuden edellyttämän muokauskerroksen kosteuden. Käytännössä turpeen kuivuminen on haihdunnan varassa.

Tulosten mukaan salaojien kuivatustehokkuutta voidaan parantaa muutamalla prosenttiyksiköllä täyttämällä salaojakaivanto hyvin vettä läpäisevillä materiaaleilla, kuten soralla tai hakkeella, tai täydentämällä salaojitusta suoto-ojilla. Salaojan täyttö vettä hyvin läpäisevällä materiaalilla ei ole turvemailla yhtä tehokasta kuin savimailla, koska veden liike vaakasuorassa suunnassa on hidasta. Turpeessa ei ole muokkaukerroksessa samalla tavalla suuria huokosia kuin savimailla.

Käytännössä pellon pinnan muotoilu on osoittautunut hyväksi salaojituksen tehostuskeinoksi erityisesti Pohjois-Suomessa, jossa kevätulannan määrä on suuri ja lumen sulamisen ja kasvukauden alkamisen välinen aika on lyhyempi kuin eteläisessä Suomessa. Norjalaisten kehittämästä suur-sarka- menetelmästä eli salaojituksen ja avo-ojituksen yhdistelmästä on saatu myös Suomessa hyviä kokemuksia. Sen sijaan turpeen fysikaalisiin ominaisuuksiin viljelyn kannalta positiivisesti vaikuttavan kivennäismaan lisäyksen ei ole todettu tehostavan salaojien toimivuutta.

Viime vuosina turvemaiden vesitalouden tutkimus on painottunut viljelyvarmuuden lisäksi ympäristökysymyksiin kuten ravinnehuuhtoumiin ja kasvihuonekaasujen vapautumiseen, joihin turvemaiden kosteusolot myös vaikuttavat.

Turvemailla typen huuhtoutumat ovat noin kolminkertaiset kivennäismaihin verrattuna ja fosforin vastaavasti samansuuruisia kuin kivennäismailla, sillä erotuksella että turvemailla pääosa fosforista on liukoisessa muodossa.

Kasvihuonekaasujen osalta turvepeltojen osuus koko maatalouden päästöistä on peräti puolet.

Turvepellon kuivatus nopeuttaa turpeen hajoamista ja lisää hiilidioksidi- ja typpioksi-duulipäästöjä. Metaanin päästöt sen sijaan vähenevät. Maanpinnasta mitatun pohjaveden syvyyden pienentämisen 70 senttimetristä 30 senttimetriin on todettu hidastaneen turpeen hajoamista ja vähentäneen kasvihuonekaasujen vapautumista 30 prosentilla. Koska ympäristön kannalta kuivatussyvyyden tulisi olla matala, mutta kantavuuden vuoksi syvä, pohjaveden syvyyttä tulisi säädellä tilanteen mukaan; sitä tulisi laskea alas silloin, kun pellolla liikutaan ja pitää muulloin korkealla. Riittävän pieni ojaväli varmistaa sen, että kuivatussyvyyden säätö eli säätösalaajitus vaikuttaa mahdollisimman nopeasti pohjaveden syvyyteen.

Ojasyvyys

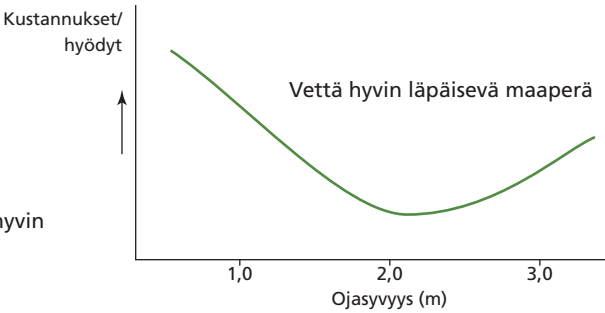
Ojasyvyys lisää Hooghoudtin kaavassa painepotentiaalia h (ks. kuva 7.3) sekä kuivatettavissa olevaa huokostilaa μ (ks. kuva 7.2). Molemmat vaikutukset suurentavat ojaväliä samalla kuivatustehokkuuden arvolla. Salaojasyvyyden lisääminen pienentää näin tarvittavaa ojamäärää ja sitä kautta kustannuksia. Ojasyvyyden lisäys kasvattaa toisaalta asennuskustannuksia erityisesti sen jälkeen, kun ylitetään salaojakoneiden maksimikaivussyvyys. Jos maaperän puolesta ojasyvyys voidaan valita vapaasti, sen vaikutus kustannus-hyötysuhteeseen muuttuu kuvan 7.17 mukaisesti. Esimerkissä kustannustehokkuus on optimissa, kun ojasyvyys on kaksi metriä. Käytännössä ojasyvyyttä ei voida valita yksinomaan tällä perusteella, koska maaperäolosuhteet eivät ole esimerkin mukaisia.

Ojasyvyyden vaikutus satotasoon riippuu ennen kaikkea maalajista. Kuvassa 7.18 on esimerkki siitä, miten ojasyvyys vaikuttaa sadon määrään savi- ja hietamailla. Optimisyyvyys on karkeilla mailla huomattavasti pienempi kuin savimailla, mikä johtuu maalajin pienemmästä vedenpidätyskyvystä ja paremmasta ilmavuudesta. Karkeilla mailla pohjaveden aleneminen optimistasosta voi aiheuttaa liiallista kuivuutta ja sen myötä sadon alenemista.

Ojasyvyyden ja ojavälin välisestä vuorovaikutuksesta on kuvassa 7.19 esitetty yhteenveto perunan satotasoon hollantilaisten tutkimusten perusteella. Kuvasta voidaan todeta, että edullisin ojasyvyys on harvassa ojituksessa suurempi kuin tiheällä ojavälillä. Ojasyvyyden madaltaminen on alentanut satotasoa 4–5 % jokaista 0,1 metrin ojasyvyyden madaltamista kohti.

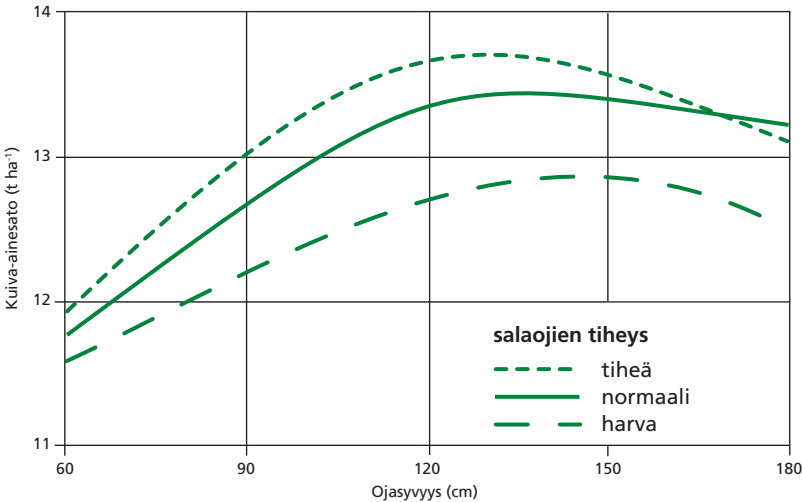
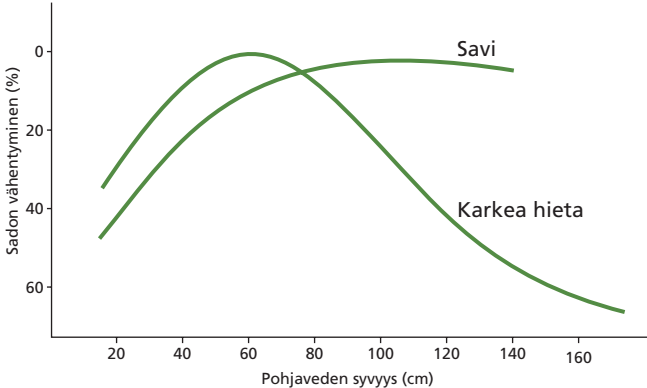
Kuva 7.17

Esimerkki ojasyvyyden vaikutuksesta kustannusten ja hyötyjen suhteeseen hyvin vettä läpäisevillä maalajeilla.



Kuva 7.18

Sadon määrän muuttuminen pohjaveden syvyyden suhteen savimaalla ja karkealla hiedalla.



Kuva 7.19 Ojasyvyyden ja ojavälin vaikutus perunasatoon hollantilaisen aineiston perusteella. Tarkastelujakso käsittää vuodet 1952–81.

Kuivatussyvyys vaikuttaa myös pellon kantavuuteen. Sen varmistaminen on nykyisten maatalouskoneiden painon vuoksi keskeinen kuivatuksen tavoite. Alla olevassa yhteenvedossa on kuvan 7.19 aineiston pohjalta laaditut suositukset kevätiljalle, perunalle ja soke-rijuurikkaalle eri maalajeilla.

	Painepotentiaali 5 cm syvyydessä maanpinnalta		
	Kevätviljat	Peruna	Sokerijuurikas
Hietamaat, joissa saveksen osuus 8-20 %	- 50	- 70	-70
Hienot hiedat, joissa saveksen osuus 20-40 %	- 80	- 100	- 100
Hiesusavet	- 60	- 120	- 100

Suositusarvot on määritelty muokkauskerroksessa viiden senttimetrin syvyydellä vaadittavasta maaveden painepotentiaalista, mikä käytännössä tarkoittaa pohjaveden syvyyttä salaojen puolivälissä. Vähimmäisvaatimuksen on todettu olevan riittävä siihen, että maan rakenne ei kärsi vaurioita kylvön yhteydessä. Suositusarvoista voidaan todeta muun muassa, että kevätiljojen vaatimus on pienempi kuin perunan ja sokerijuurikkaan vastaavat arvot.

Ojien sijoittelu

Pellon topografia vaikuttaa ojien sijoitteluun keskeisimmin. Topografialtaan vaihtelevassa maastossa ojat sijoitetaan vain sinne, missä on kuivatustarvetta. Tällöin kokoojaojat sijoituvat maaston alavimpaan kohtaan ja imuojen suunta määräytyy niiden mukaisesti. Painanteisiin kertyy myös herkästi pintavettä, joten ojarakenteeseen ja mitoitusvalunnan arvoon on syytä kiinnittää huomiota. Tyypillinen tilanne on esitetty kuvassa 7.20a.

Tasaisilla alueilla kokoojan paikan valintaan on yleensä useita vaihtoehtoja. Kokoojan paikka voidaan valita joko niin, että imuojat liittyvät siihen vain yhdestä suunnasta tai molemmilta sivuilta. Vaihtoehtoja on kuvattu kuvassa 7.20b. Sopivissa olosuhteissa salaojakokooja voidaan korvata myös avo-ojalla. Salaojakokoojan korvaamista avo-ojilla puoltavat eniten kustannussäästöt ja mahdollinen salaojen huuhtelutarve. Haittapuolena on avo-ojien kunnossapidon kustannukset, joita lisäävät yksittäisten imuojen laskuaukkojen runsaus. Ojien sijoitteluun vaikuttaa lisäksi se, käytetäänkö salaojastoa myös säätsalaojituksena tai altakasteluun.

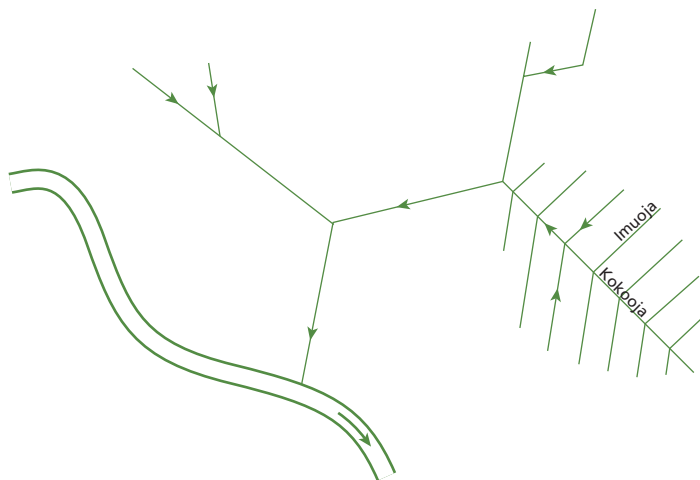
Rinnemailla salaojan suuntaan vaikuttaa rinteiden suunta sekä sen kaltevuus. Mikäli kohteen pohjavesivirtauksen suunta voidaan arvioida, imuojat on syytä sijoittaa siten, että ne katkaisevat pohjavesivirtausta mahdollisimman tehokkaasti. Salaojen sijoittelulle suhteessa rinteiden kaltevuuteen ääri vaihtoehtoina ovat rinteiden suuntainen tai siihen nähden poikkisuunnassa eli korkeuskäyrän suuntainen ojasuunta (kuva 7.20c).

Rinteessä painovoimagradientin suuruus muodostuu korkeuserosta ja virtaus on näin ollen rinteiden suuntaista. Rinteiden suuntaisessa ojasuunnassa salaojan aikaan saama gradientti on korkeuskäyrän suuntainen kun painovoiman gradientti on kohtisuoraan sitä vastaan. Tässä tilanteessa vesi ei virtaa kohtisuoraan salaojaa kohti. Virtauskulma riippuu rinteiden kaltevuudesta. Rinteiden suuntaisia imuojia käytettäessä rinteiden kaltevuus tulee huomioida ojavälin valinnassa. Käytännössä tätä ojasuuntaa ei kannata käyttää kuin rinteillä, joiden kaltevuus on alle viisi prosenttia.

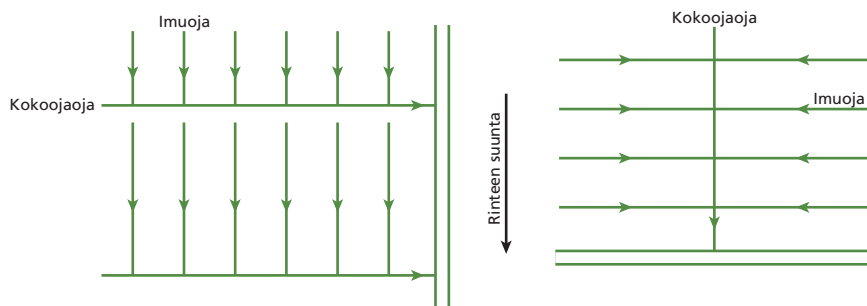
Korkeuskäyrän suuntaista ojasuuntaa käytettäessä painovoiman ja salaojan aikaansaama gradientti voimistavat toisiaan alapuolista salaojaa kohti. Tästä johtuen virtausviivat ja pohjavesitaso muotoutuvat kuvan 7.21 mukaisiksi. Pohjaveden korkeuden maksimi sijoittuu tässä tilanteessa ylärinteessä olevan salaojan puolelle. Rinteiden jyrkkyyden vaikutus ojaväliin on merkittävä, kun sen kaltevuus ylittää kymmenen prosenttia.

Salaojan suunnan vaikutus ojituksen tehokkuuteen on samanlainen aina kahden pro-

a

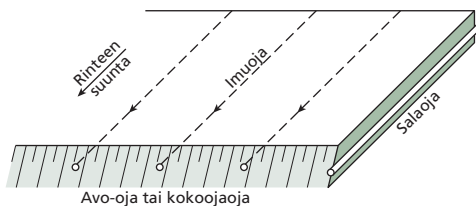


b

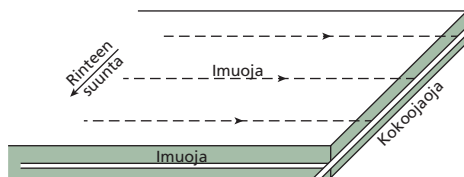


c

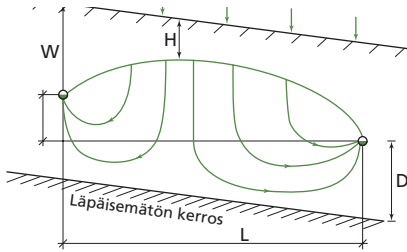
Rinteen suuntainen ojitus



Korkeuskäyrän suuntainen ojitus



Kuva 7.20 Tyypikuvat salaojien sijoittelusta. a. Tyypillinen hajaojitustilanne. b. Imuojien liittäminen kokoojaan joko toispuoleisesti tai molemmilta puolilta. c. Imuojien sijoittelu joko rinteen suuntaisesti tai korkeuskäyrän suuntaisesti.



Kuva 7.21 Virtausviivojen ja pohjaveden pinnan asettuminen korkeuskäyrän suuntaisten imuojien tilanteessa.

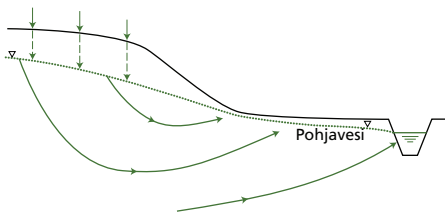
sentin kaltevuuteen saakka. Sitä suuremmilla kaltevuuksilla on syytä käyttää korkeuskäyrän suuntaista salaojaa. Tällöin ojasuunta on tarkoituksenmukaista valita noin kymmenen asteen kulmassa korkeuskäyrään nähden, jolloin putken kaltevuus saadaan virtaukselle optimaaliseksi tasaisella ojasyvyydellä. Tässä vaihtoehdossa myös kokoojan kaltevuus muodostuu sellaiseksi, että putkikoko on mahdollisimman pieni.

Paineellinen pohjavesi

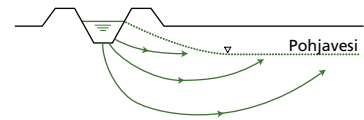
Peltoalueilla paineellista pohjavettä voi esiintyä sekä luontaisesti että rakennettujen kuivatus- ja kastelujärjestelmien vuoksi. Kuvassa 7.22 on esitetty näiden tapausten tyypilliset tilanteet.

Suomen olosuhteissa yleisin tilanne on pellolla oleva lähteikkö. Tällaisen tilanteen taustalla ovat maaperän geologiset muodostumat, jotka mahdollistavat pohjaveden paineen purkautumisen maan pintakerrokseen tai jopa maan pintaan saakka. Kuvassa 7.23 on havainnollistettu tilannetta, jossa pohjaveden paine yltää maanpinnan yläpuolelle. Paineellisen pohjaveden purkautumiskohta sijoittuu usein rinteeseen ja tasaisen alueen taitekohtaan. Jos

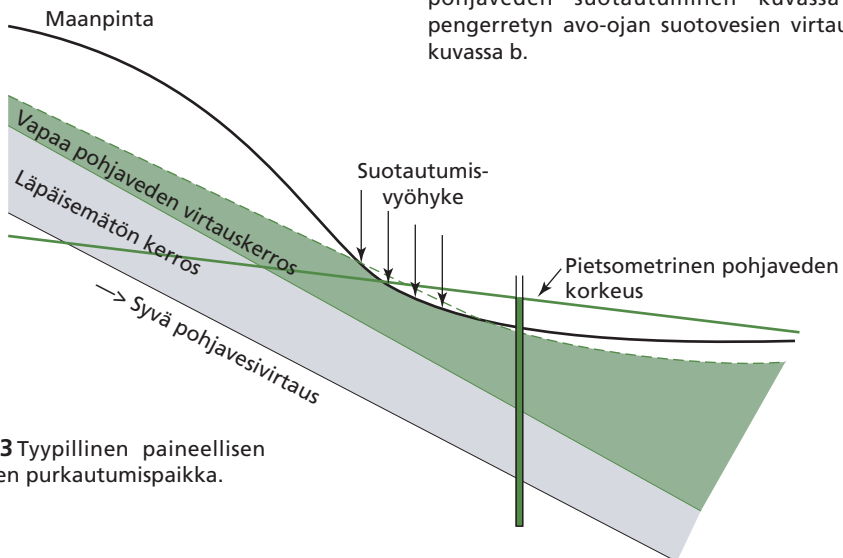
a) Luonnollinen pohjaveden suotautuminen



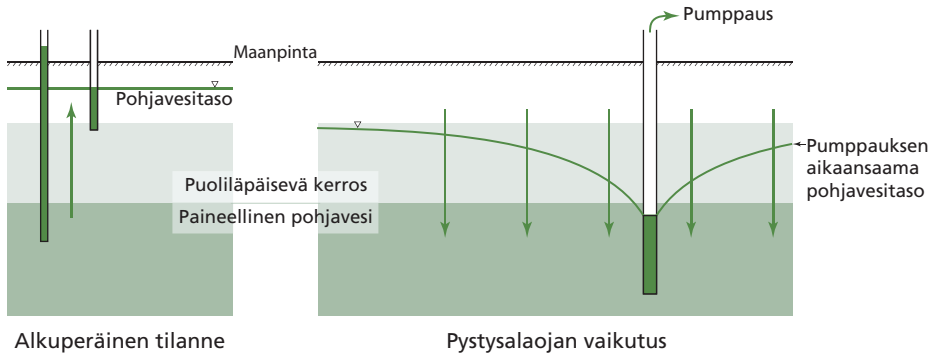
b) Pengeralueen suotautumistilanne



Kuva 7.22 Maaperässä luontaisesti esiintyvän pohjaveden suotautuminen kuvassa a ja pengerretyn avo-ojan suotovesien virtausviivat kuvassa b.



Kuva 7.23 Tyypillinen paineellisen pohjaveden purkautumispaikka.



Kuva 7.24 Esimerkki pystysalaojan vaikutuksesta pohjaveden paineeseen, tasoon ja virtausviivoihin.

paineellisen pohjaveden yläpuolella on puoliläpäisevä maakerros, alueelle syntyy märkä vyöhyke. Tällaisen alueen kasvillisuudelle ovat tyypillisiä kortteet, pajut ja muut kosteikkokasvit. Paineellisen pohjaveden alueiden kuivattamiseen voidaan käyttää joko pystysalaojaa, jonka yksinkertainen muoto on lähdekaivo tai katkaisuoja.

Pystysalaoja

Pystysalaojalla voidaan alentaa paineellista pohjavettä. Menetelmä vaatii yleensä pumppausta. Pystysalaoja muodostaa pohjaveden aleneman suppilon salaojan ympärille. Suppilon laajuus riippuu maaperästä. Kuvassa 7.24 on havainnollistettu pystysalaojan vaikutus pohjaveden pinnan alenemiseen. Pohjavesipaine saadaan pumppauksen avulla pieneneään ja sen pientsometri taso painumaan niin syvälle, että se ei haittaa maan käyttöä. Edullisissa maaperäolosuhteissa selvittää ilman vaakasalaojia.

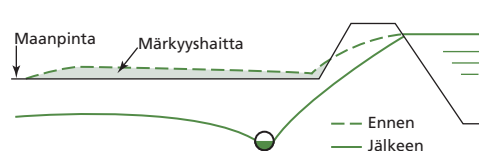
Pystysalaojan yksinkertainen sovellutus on lähdekaivo, jolla voidaan johtaa paineellinen pohjavesi pois kohteesta ilman pumppausta. Mikäli lähdekaivo rakennetaan lähelle talousvesikaivoa, on varmistettava, että se ei aiheuta kaivon kuivumista.

Paineettomilla pohjavesialueilla pystysalaojitusta käytetään eniten aridisilla ilmasto-työhykkeillä, joilla ongelmana on suolainen pohjavesi ja käytetään kastelua. Jotta pystysalaojien tarve olisi niin pieni, että ratkaisu on taloudellisesti tarkoituksenmukainen, pohjamaan vedenjohtavuuden tulee olla hyvä.

Katkaisuoja

Pohjaveden virtaus voidaan katkaista sopivaan kohtaan virtausviivoihin nähden poikisuunnassa asennettavalla salaojalla. Tällaista tarkoitusta varten tehtyä oja kutsutaan katkaisuojaksi. Salaojan käyttö katkaisuojana on yleisintä pengeralueilla, joilla katkaisuojaan ohjataan penkereen ja sen ali suotautuvia vesiä, kuten on esitetty kuvassa 7.25.

Katkaisuojan käyttö edellyttää, että maaperän kerrostumista on riittävän tarkat tiedot. Katkaisuojaa käytettäessä tulee varmistaa, että oja on riittävän syvä, muutoin suotautuminen jatkuu ojan alapuolella ja katkaisuojan vaikutusalue jää vähäiseksi. Suotautumisen määrän arvioinnissa tarvitaan tietoa suotautumiseen vaikuttavan valuma-alueen laajuudesta. Mikäli kyseessä on selvästi purkautuva lähde, sen valuma voidaan mitata paikan päällä. Suomessa käytössä oleva niskaaja voi toimia tietyissä tilanteissa katkaisuojana.



Kuva 7.25 Salaojan käyttö katkaisuojana pengeralueella.

7.5 Salaojituksen mitoitus

Mitoitussadanta

Salaojituksen tehokkuutta määriteltäessä keskeinen suunnitteluperuste on mitoitussadanta, jolla tarkoitetaan sitä sadantaa, jonka aiheuttaman kuivatustarpeen salaojituksen pitäisi kuivattaa. Mitoitussadannan suuruutta valittaessa tulee kiinnittää huomiota siihen sadantaan, joka rajoittaa eniten viljelyä tai sadonmuodostusta. Valintaa tehtäessä käytetään apuna sadannan rankkuutta ja kestoja sekä niiden toistuvuuksia. Sademäärän kasvaessa sen toistuvuus pienenee. Tämä pätee tarkastelujakson pituudesta riippumatta, tarkastellaanpa hetkellisiä sadekuuroja tai pidemmän jakson sademääriä. Salaojitussuunnittelussa aluesadanta on riittävän tarkka mitoituksen perusteeksi. Sadannan aiheuttamia riskejä voidaan arvioida toistuvuusanalyysin avulla, jota kuvataan yleensä frekvenssikäyrän avulla. Kuvassa 7.26 on esimerkki kahden vuorokauden sadannan frekvenssikäyrästä. Siitä voidaan todeta esimerkiksi, että 40 mm:n sademäärä kahden vuorokauden ajanjaksolla on todennäköinen kerran vuodessa ja vastaavasti 85 mm:n sademäärä ylittyy kerran viidessä vuodessa.

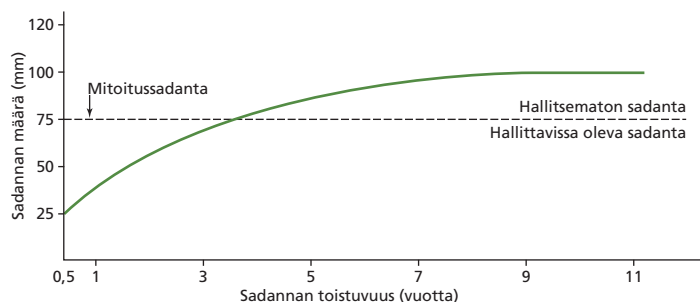
Viljelyn kannalta mitoitussadanta tulee valita kuivatuksen tarpeen kannalta kriittisimmältä ajanjaksolta. Taloudellisella tarkastelulla voidaan arvioida, millaisella toistuvuudella mitoitussadanta on syytä valita. Esimerkiksi, jos järjestelmä on suunniteltu kuvan 7.26 perusteella 75 mm:n sadannalle kahdessa vuorokaudessa, sadanta ylittää todennäköisesti joka kolmas vuosi suunnitteluarvon, josta saattaa aiheutua taloudellisia menetyksiä. Kuivatuksen mitoitussadantaa suurentamalla parannetaan sen hyötyä, mutta se lisää myös investoinnin kustannuksia.

Taloudellisilla laskelmilla voidaan määritellä optimaalinen mitoitussadanta. Kuvassa 7.27 on esitetty periaatekuva siitä, miten mitoitussadanta vaikuttaa taloudellisen optimin valintaan. Kuivatusjärjestelmän vuotuiset kustannukset kasvavat lähes suoraviivaisesti, kun mitoitussadantaa suurennetaan, jolloin myös toistuvuus aika pitenee. Kun toistuvuus aika pitenee, niin liiallisen märkyyden aiheuttamat vahingot vastaavasti pienenevät. Kokonaiskustannus on näiden kustannusten summa. Esimerkkitapauksessa optimikustannukset saavutetaan pisteessä A, jota vastaava mitoitussadanta on 60 mm ja sen toistuvuus aika kaksi vuotta.

Salaojitusten mitoitussadannan valintaan vaikuttaa myös sadon arvo. Mitä arvokkaampi kasvi, sitä harvempi toistuvuus mitoitussadannalle tulee valita. Esimerkiksi Englannissa nurmiviljelyssä käytetään kerran kahdessa vuodessa, viljoilla kerran viidessä vuodessa ja puutarhaviljelyssä kerran kymmenessä vuodessa toistuvaa mitoitussadantaa.

Kasvuston kannalta haitallisen sadannan tyyppi vaihtelee kuivatustarpeesta riippuen. Useita päiviä kestävä ja suhteellisen voimakas sade vaatii salaojitukselta hyvää kuivatustehokkuutta. Pitkittynyt sade täyttää maaprofiilin huokokset ja aiheuttaa helposti myös muokkauskerroksen liiallista märkyyttä ja pohjaveden kohoamista liian lähelle maanpintaa.

Kuva 7.26
Esimerkki kahden
vuorokauden sadannan
toistuvuudesta.



Mitoitussadannan valinta vaikuttaa suoraan salaojituksen suunnitteluun. Mitoitusvalunta q vaikuttaa Hooghoudtin kaavan mukaan suoraan oja-väliin. Viljelijän talouden kannalta on oleellista, mikä mitoituseruste tuo parhaan katteen. Esimerkkilaskelma viljelijän saamasta katteesta on esitetty kuvassa 7.28. Laskelma on tehty amerikkalaisella DRAINMOD mallilla, jolla on laskettu 50 vuoden jakson satoihin perustuva viljelijän kate kuivatustehokkuuden suhteen. Laskelma edustaa Minnesotan olosuhteita Yhdysvalloissa.

Kuvat 7.27 ja 7.28 havainnollistavat mitoitussadannan suuruuden vaikutusta kokonaiskustannuksiin. Kuvista voidaan todeta myös, että optimiarvon jälkeen varmuuden kasvattaminen ei juurikaan lisää kustannuksia tai tuottoa, mutta optimiarvon alittaminen lisää nopeasti sekä kustannuksia että pienentää taloudellista hyötyä. Tästä johtuen mitoitussadanta on syytä valita mieluummin optimiarvoa suuremmaksi kuin sitä pienemmäksi.

Mitoitusvalunnan määrittäminen

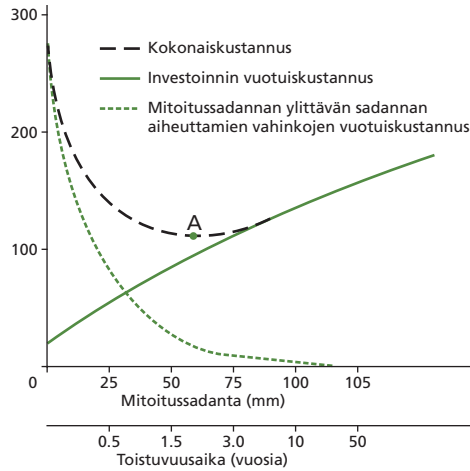
Mitoitussadannan suuruutta arvioitaessa lähtökohtana on yleensä kasvukauden aikaisen ja sen ulkopuolisen kuivatustarpeen määrittely.

Kasvukaudella haihdunta on keskimäärin suurempi kuin sadanta, mistä johtuen pohjaveden pinta painuu usein alle salaojasyvyyden. Kasvukauden aikaisen mitoitusvalunnan kriittinen vaihe syntyy, kun sadantajakso kestää pitkään, jolloin maan huokosto täyttyy vedellä ja varastokapasiteetti täyttyy. Tällöin myös juuristokerroksen kosteuspitoisuus lähestyy kenttäkapasiteettia ja pohjaveden pinta alkaa nousta. Kasvukauden ulkopuolella kriittinen ajankohta ajoittuu kevääseen, jolloin lumen sulannasta johtuva kuivatustarve korostuu. Mitoitussadannan laskentaesimerkit on esitetty Tietoruudussa 7.4. Niissä lähtökohtana on viiden vuorokauden sadanta.

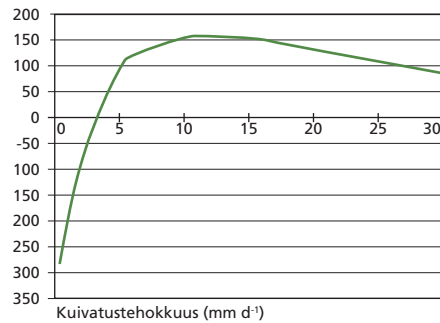
Salaojien mitoitukseen vaikuttaa ojasyvyys W ja kuivatettavissa oleva huokostila μ . Kun ojasyvyys kasvaa, pohjavesi on keskimäärin syvemmällä kuin matalassa ojituksessa ennen seuraavaa sadetta. Näin ollen ojasyvyyden kasvaessa myös varastokapasiteetti kasvaa ja suurempi osa sadannasta voi varastoitua maaperään ilman, että pohjavesi nousee haitallisen korkealle. Tämä pienentää mitoitusvaluntaa.

Myös kuivatettavissa oleva huokostila vaikuttaa mitoitusvalunnan arvoon. Kuivatettavissa olevan huokostilan kasvaessa voidaan käyttää pienempää mitoitusvaluntaa, koska sateen aiheuttama pohjaveden nousu pienenee, kun μ kasvaa.

Taulukossa 7.2 on esitetty μ :n, W :n ja q :n suhteille kertoimet. Vuorovaikutus on suhteutettu perustilanteeseen, jossa $W=1$ m ja $\mu=5$ %. Taulukosta voidaan todeta esimerkiksi,



Kuva 7.27 Kuivatuksen vuotuis-kustannukset.



Kuva 7.28 Kuivatustehokkuuden vaikutus viljelijän saamaan taloudelliseen hyötyyn.

Tietoruutu 7.4

Esimerkit mitoitusvalunnan määrittämisestä

Esimerkki 1

Kasvukauden ulkopuolinen tilanne

Viiden vuorokauden sulanta ja sadanta	70 mm
Painannevarasto	10 mm
Pintavalunta	20 mm
Haihdunta	-
Kuivatustarve	40 mm

Mitoitusvalunta $q = 40 \text{ mm } 5 \text{ d}^{-1} = 8 \text{ mm d}^{-1}$.

Esimerkki 2

Esimerkkilaskelma kasvukauden aikaisen mitoitusvalunnan arvioimiseksi

Viiden vuorokauden sadanta	120 mm
Maaperän varastotila	30 mm
Pintavalunta	20 mm
Haihdunta, keskimäärin 5 mm d^{-1}	25 mm
Kuivatustarve	45 mm

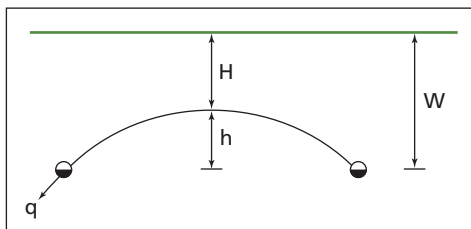
Mitoitusvalunta $q = 45 \text{ mm } 5 \text{ d}^{-1} = 9 \text{ mm d}^{-1}$

että ojasyvyyden olleessa 1,5 m ja kuivatettavissa oleva huokostila 10 %, mitoitusvalunta voi olla 0,65 kertaa perustilanteen mitoitusvalunta.

Mitoitusvalunta on pohjoisella pallonpuoliskolla yleisesti $7\text{--}12 \text{ mm d}^{-1}$ eli valumana $0,8\text{--}1,4 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Esimerkiksi amerikkalaisissa standardeissa luoteis- ja keskilämmen osavaltioissa se on viljoilla $10\text{--}13 \text{ mm d}^{-1}$ ja saksalaisessa standardissa 7 mm d^{-1} , jos vuosisadanta on enintään 600 mm, ja 9 mm d^{-1} , jos vuosisadanta on enintään 1000 mm.

Viljelykasvi tulee myös huomioida salaojituksen mitoituksessa. Oheisessa yhteenvedossa on esimerkki Keski-Euroopassa käytössä olevasta suosituksesta. Taulukon lyhenneet on havainnollistettu kuvassa 7.29. Suositusarvot vastaavat hyväarakenteisen hiesusaven viljelyä.

Viljelykasvin vaativuus kuivatuksen suhteen	$q \text{ (mm d}^{-1}\text{)}$	$H, \text{ (m)}$	$h, \text{ (m)}$	Muokauskerroksen kyllästyminen
Vaattimaton (nurmet)	7	0,3	0,6–0,7	1–2 kertaa/vuosi
Vaativa	7	0,5–0,6	0,4–0,5	Kerran vuodessa
Keskiarvo	7	0,5	0,5	



Kuva 7.29 Salaojituksen tehokkuuteen vaikuttavat suureet.

Taulukko 7.2 Mitoitusvalunta q :n ohjearvot erilaisille ojasyvyyksille W ja kuivatettavissa olevalle huokostilalle μ .

	Ojasyvyys W		
μ	0,7 m	1,0 m	1,5 m
5 %	$1,5 q$	q	$0,8 q$
10 %	$1,2 q$	$0,8 q$	$0,65 q$
15 %	$1,0 q$	$0,65 q$	$0,5 q$
$q = \text{perustilanne } \mu = 5 \% \text{ ja } W = 1,0 \text{ m}$			

Putkien mitoitus

Salaojaputkien mitoitus perustuu yleisiin putkivirtauksen laskentakaavoihin. Kaavat perustuvat virtaaman määrään (Q), hydrauliseen gradienttiin (i), putken halkaisijaan (d) sekä putken seinämän karkeuteen.

Kaavan valinta riippuu virtauksen tyypistä. Jos on kyse tiiviistä putkesta, jolloin vettä siirretään kahden paikan välillä, laskelmissa käytetään tasaisen virtauksen laskentakaavaa. Jos on kyse salaojaputkesta, jolloin putkeen voi tulla lisää vettä myös lähtöpisteen lisäksi koko putken matkalta, käytetään epätasaisen virtauksen laskentakaavaa.

Tasaisen virtauksen tilanteessa hydraulinen gradientti on tasainen koko putken pituudelta ja se noudattaa putken asennuskaltevuutta. Epätasaisessa virtauksessa hydraulinen gradientti kasvaa putken pituussuunnassa virtauksen pakkautumisen seurauksena. Tästä syystä samalle vesimäärälle epätasaisen virtauksen kaavalla lasketut putkikoot ovat pienempiä kuin tasaisen virtauksen kaavalla lasketut putkikoot.

Tasainen virtaus

Tasaisen virtauksen laskentakaavat on johdettu sisältä sileille putkille Darcy-Weisbachin kaavalla ja aallotetuille putkille Manningin kaavalla:

$$\text{Sisältä sileät putket} \quad Q = 50 d^{2,71} i^{0,57} \quad (7.24)$$

$$\text{Aallotetut putket} \quad Q = 22 d^{2,67} i^{0,50} \quad (7.25)$$

Q = putkivirtaama (m³ s⁻¹)

d = putken sisähalkaisija

i = hydraulinen gradientti

Maksimivirtausta voivat aikaa myöten pienentää mm. putkiin kertyvä liete- tai rautasaostumat. Virtaaman pienentymiseen varaudutaan mitoituksessa varmuuskerroimella, joka on yleensä 1,33 eli 25 %:n lisäys putkivirtaaman (Q) arvoon. Varmuuskerroin suurentaa Q:n arvoa, mikä puolestaan suurentaa putkikoon (d) arvoa kaavojen (7.24) ja (7.25) mukaisesti. Koska tasaisessa virtauksessa gradientti on vakio ja sen oletetaan noudattavan putken yläreunan kaltevuutta, ts. putken oletetaan virtaavan täytenä, siinä ei myöskään esiinny yli-painetta. Tätä tilannetta on havainnollistettu kuvassa 7.30a.

Esimerkki putkikoon laskemisesta:

- Sisältä sileä putki
- Putken kaltevuus (i) 0,1 %
- Valuma-alue (A) 20 ha, jonka mitoitusvalunnan q arvo 5 mm d⁻¹
- Varmuuskerroin 1,33

Tällöin $Q = q A$ jossa $q = 5 \text{ mm d}^{-1} = \frac{5}{1000 \cdot 3600 \cdot 24} \text{ m s}^{-1}$ ja $A = 20 \text{ ha} = 20000 \text{ m}^2$ jolloin $Q = 0,0116 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ja varmuuskerroin huomioiden $1,33 \cdot Q = 0,0155 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Kaavaa (7.24) käyttäen putken halkaisijaksi saadaan:

$$d = \left[\frac{0,0155}{50 (0,001)^{0,57}} \right]^{\frac{1}{2,71}} = 0,217 \text{ m}$$

Epätasainen virtaus

Epätasaisen virtauksen kaavat ovat vastaavasti:

$$\text{Sisältä sileät putket} \quad Q = 89d^{2,71}i_{ka}^{0,57} \quad (7.26)$$

$$\text{Aallotetut putket} \quad Q = 38d^{2,67}i_{ka}^{0,50} \quad (7.27)$$

Lyhenteet ovat samat kuin tasaisen virtauksen kaavoissa, mutta i_{ka} on putken keskimääräinen kaltevuus.

Epätasaisessa virtauksessa virtaama lisääntyy putken yläpäästä alapäähän mentäessä. Myös hydraulinen gradientti kasvaa samassa suunnassa. Kuvassa 7.30b on havainnollistettu gradientin epätasaista jakautumista salaojaputkessa. Kaavan lähtökohtana on, että putki virtaa täytenä koko pituudeltaan. Putken rei'ityksestä johtuen putkessa virtaava vesi on pienen ylipaineen alaisena. Kokonaisgradientti on kuitenkin putken ylä- ja alapään korkeuseron suuruinen, minkä vuoksi mitoituksessa käytetään keskimääräistä gradienttia eli putken kaltevuutta.

Tasaisen ja epätasaisen virtauksen kaavojen vertailu osoittaa, että samalla putkikoolla ja putken kaltevuudella epätasaisen virtauksen mitoitusvirtaama voi olla jopa 75 % suurempi kuin tasaisella virtauksella.

Laskentaesimerkki

- Imuojien väli 35 m
- Aallotettu putki
- Imuojien pituus 200 m
- $q = 5 \text{ mm d}^{-1}$
- Putken kaltevuus = 0,1 %

Virtaama Q imuojan alapäässä $Q = q \cdot A/1000 \text{ (m}^3 \text{ d}^{-1}\text{)}$

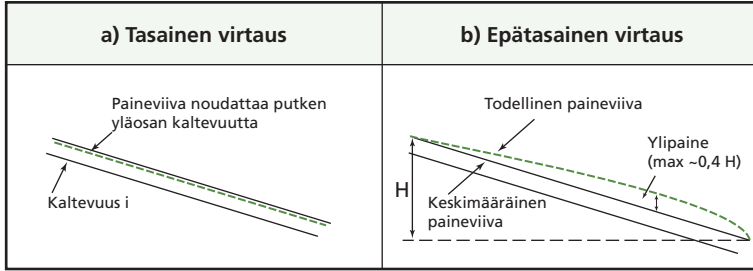
Valuma-alue $A = 200 \times 35 = 7000 \text{ m}^2$, $q = 5 \text{ mm d}^{-1}$, joten $Q = 35 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

Kun käytetään varmuuskertoimena 50 %, mitoitusvirtaama on $2 \times 35 = 70 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Käyttämällä epätasaisen virtauksen kaavaa (7.27) i :n arvolla 0,10 %, putkikooksi saadaan 64 mm.

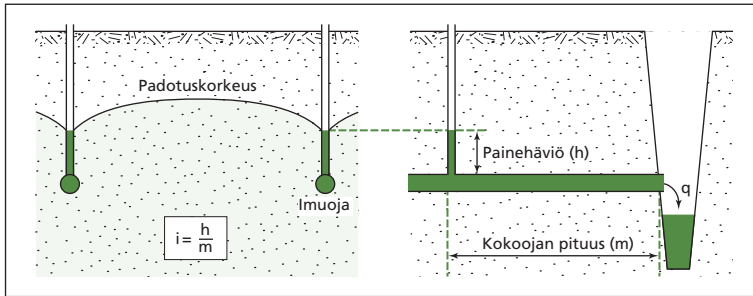
Vedenalaisen ojituksen hydraulinen gradientti on esitetty kuvassa 7.31. Kuvassa on lähtökohtana salaojaputkien asentaminen vaakatasoon ilman putken kaltevuutta, jolloin gradientti riippuu padotuskorkeuden suhteesta putken pituuteen. Putkikokoa määritettäessä on huomioitava, että virtaus vastaa tasaisen virtauksen tilannetta.

Vaikka salaojaputket voitaisiin veden virtauksen puolesta asentaa hyvinkin pienillä kaltevuuksilla tai jopa vaakatasoon pysyvästi vedenalaisissa ojituksissa, yleinen käytäntö on, että putket asennetaan kalteviksi mm. seuraavista syistä:

- Putken kaltevuus varmistaa, että putkeen ei pääse syntymään liettymisriskiä kasvatavaa seisovaa vettä.
- Epätasainen asennus lisää pienillä kaltevuuksilla ilmalukon syntymisriskiä.
- Tasaisen ojasyvyyden saavuttaminen edellyttää useimmiten kaltevuutta myös salaojaputkiin.
- Putken kaltevuus mahdollistaa taloudellisesti edulliset pitkät salaojat ja pienet putkikoot.



Kuva 7.30 Tasaisen (a) ja epätasaisen (b) virtauksen paineviivan kuvaus.



Kuva 7.31 Vedenalaisen ojituksen mitoitusgradientin määrittelyn periaatekuva.

Salaojaputken minimikaltevuus vaatimus perustuu liettymisriskiin. Veden virtausnopeus putkessa määrittelee sen, miten suuria maahiukkasia veden mukana voi liikkua. Veden nopeus on puolestaan riippuvainen putken kaltevuudesta ja putkikoosta. Näin ollen minimikaltevuus määritellään putkikoon mukaan. Liettymisriski on puolestaan riippuvainen maalajista ja salaojan ympäristäaineesta. Mikäli salaojaan ei pääse hietaa tai hiuetta, veden nopeus tulisi olla vähintään $0,15 \text{ m s}^{-1}$. Jos liettymisriski on olemassa, nopeus tulisi olla vähintään $0,4 \text{ m s}^{-1}$. Vedennopeudet edellyttävät esimerkiksi DN/OD 80 aallotetulla putkella vastaavasti minikaltevuuksia 0,09 ja 0,6 %.

Putkille voi olla tarpeen määritellä myös maksimikaltevuus. Esimerkiksi betoniputkella veden virtausnopeuden tulee olla alle $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Erityistä huomiota tulee myös kiinnittää siihen tilanteeseen, jolloin kokoojassa on yläosassa suurempi kaltevuus kuin alaosassa. Jos putkikoko pysyy koko ajan samana, niin veden nopeus hidastuu ja se saattaa aiheuttaa liettymän kertymistä hidastumiskohtaan. Mikäli liettymisriski on merkittävä, taitekohtaan on syytä asentaa tarkistuskaivo.

7.6 Salaojituksen ympäristövaikutuksia

Salaojitus vaikuttaa valunnan määrään ja ajalliseen jakaantumiseen ja veden virtausreitteihin. Pohjaveden pinnan korkeuden alentaminen salaojituksella lisää maan varastokapasiteettia, jolloin virtaamahuiput pienenevät. Avo-ojitetun pellon salaojittamisen vaikutus kokonaisvaluntaan vaihtelee olosuhteista riippuen. Pääsääntöisesti salaojitus vähentää pintavaluntaa ja kesäaikaista kokonaisvaluntaa. Eteläsuomalaisilla savipelloilla tehtyjen tutkimusten mukaan muutaman vuoden aikana ojitamisen jälkeen valtaosa valunnasta

purkautui salaojien kautta, mutta aikaa myöten pintavalunnan osuus kasvoi huomattavasti (Seuna 2004, Turtola 2000).

Pintavalunnan pieneneminen salaojitetuilla pelloilla vähentää eroosiota ja sen mukana huuhtoutuvaa fosforia. Salaojitus kasvattaa kuivatussyvyyyttä ja parantaa siten maaperän ilmanvaihtoa. Se lisää orgaanisen typen mineralisaatiota, jolloin liukoisen nitraattitypen määrä maassa kasvaa. Maan happitilanteen parantaminen vähentää denitrifikaatiota ja siten nitraattitypen kaasumaisia häviöitä ilmakehään. Tästä syystä avo-ojituksen muuttaminen salaojituksesi lisää yleensä typen huuhtoutumista (ks. kohta 4.6 Typpi). Huuhtoutumisriskiä voidaan pienentää säätösalaojituksella.

Happamilla sulfaattimailla kuivatussyvyys vaikuttaa happamien huuhtoutumien määrään. Mitä tehokkaampi kuivatus, sitä nopeampaa on happamien yhdisteiden muodostuminen, mikä saattaa aiheuttaa vastaanottavan vesistön eliöstölle haitallisia vaikutuksia. Haittojen torjumisessa säätösalaojitus on nykyisin merkittävä käytännön menetelmä. Maan pitäminen niin kosteana kuin se on viljelyn kannalta mahdollista, hidastaa happamuutta aiheuttavan pyriitin hapettumista ja sen tuloksena syntyvien happamien yhdisteiden muodostumista. Salaojavesien käsittelyä kalkilla joko salaojakaivannossa tai salaojan laskuaukon jälkeen on myös käytetty happamuuden torjuntaan.

Maan hyvä kasvukunto ja pellon vesitalouden hallinta vähentävät ravinnehuuhtoumia. Vesiensuojelun kannalta salaojituksen etuna on erityisesti fosforin huuhtoutumista pienentävä vaikutus avo-ojitukseen verrattuna. Savimailla on kuitenkin myös salaojavesissä todettu korkeita kiintoaine- ja fosforipitoisuuksia. Salaojitukseseen liittyvää tekniikkaa on viime vuosina kehitetty niin, että ravinnehuuhtoumat olisivat mahdollisimman pieniä. Laajimmin käytäntöön on otettu säätösalaojitus ja siihen liittyvä altakastelu sekä valumavesien kierrätys.

Maan sisäistä eroosiota ja siten salaojista tulevaa maa-aineksen määrää voidaan vähentää ympärysaineen oikealla mitoituksella. Ympärysaineena käytetään Suomessa yleensä soraa, mutta käytössä on myös esipäälysteitä, kuten kookoskuitua ja erilaisia geotekstiilejä. Lisäksi on kehitetty erilaisia salaojan ympärysaineita huuhtoutumien vähentämiseksi. On kokeiltu muun muassa kalkkisuodattimia happamuuden ja fosforikuormituksen vähentämiseksi. Erillisten biosuodattimien käyttöä on kokeiltu salaojavesien typen poistoon.

Salaojituksella suoritettu maankuivatus parantaa savimaiden rakennetta, koska maan kuivuessa siihen muodostuu halkeamia ja mura (ks. kohta 2.7). Turvemailla kuivatus aiheuttaa maan merkittävää painumista.

Luonnon monimuotoisuuden näkökulmasta salaojitusta pidetään haitallisena, koska se vähentää pientareiden määrää. Kuivatus vaikuttaa erityisesti turvemaan kaasutalouteen siten, että hapen määrän maassa kasvaessa orgaaninen aine hajoaa ja hiilidioksidia vapautuu. Maan happitilanteen parantuessa denitrifikaatio hidastuu ja typpioksiduuli N_2O todennäköisesti vähenee.

Muita globaaleja kuivatuksen ympäristövaikutuksia ovat mm. kosteikkojen kokonaisalan pieneneminen, maan painuminen, tuulieroosion lisääntyminen maan pinnan kuivumisen vuoksi ja liukoisten yhdisteiden huuhtoutumisen lisääntyminen vesistöihin. Maailmanlaajuisesti salaojituksen merkitys pellon viljelykannon ylläpitämisessä korostuu aridisilla alueilla, joilla kastelu aiheuttaa maan suolaantumista. Suolaantumisen estäminen edellyttää salaojitusta. Suolapitoisilla kuivatusvesillä voi olla haitallisia vaikutuksia vastaanottavassa vesistössä.

Yleisimmin suunnittelussa tarvittavat perustiedot ilmenevät alla olevasta luettelosta:

- sijainti ja peruslohkon tiedot sekä korkeustaso
- pellon pinnan korkeustiedot, pistetiheys maaston muodon mukaan
- kohteen maaperätiedot vähintään salaojasyvyyteen
- paikalliskuivatusmuoto
- peruskuivatuksen kunto ja laskuaukon paikka
- ympäröivä maasto, esim. varjostava metsä
- vesiensuojelliset erityiskysymykset, esim. happamat sulfaattimaat
- salaojien toimivuuden riskitekijät, esim. salaojien ruostetukkeutuman riski
- lohkon ulkopuolisten vesien johtaminen ja paineellisen pohjaveden esiintyminen
- muut tiedot kohteesta, kuten kaapelit, vesijohdot ja muut maanalaiset rakenteet
- viljeltävät kasvit

Salaojien sijoittelu ja ojavälin valinta

Ojavälin määrittely on perustunut Suomessa ensisijaisesti maalajiin. Maalajikohtaiset ojavälisuositukset ovat muotoutuneet koe- ja tutkimustoiminnan sekä kokemuseräisen tiedon perusteella. Ojavälin määrittäminen laskennallisesti esim. Hooghoudt:n kaavan avulla ei ole ollut tarkoituksenmukaista lohko-kohtaisesti, koska kaavan edellyttämien tietojen varmistaminen pienillä ojitusalueilla on kallista suhteessa siitä saatavaan hyötyyn. Laskennalla voidaan kuitenkin testata eri tekijöiden vaikutusta ojaväliin. Alla esimerkki ympärysaineen laskennallinen vaikutus ojaväliin (Karvonen ja Vakkilainen 1989).

Hooghoudt:n kaavan sovellusesimerkki ympärysaineen vaikutuksesta laskennalliseen ojaväliin.

Laskentaesimerkin lähtötiedot:

Maan hydraulinen johtavuus eli K-arvo $0,45 \text{ md}^{-1}$, arvo vastaa karkean hiedan K-arvoa

Salaojaputken koko	50 mm
Kuivavara H (kuva 7.29)	0,5 m
Ojasyvyys	1,0 m
Läpäisemättömän kerroksen syvyys	3,0 m

Laskennalliset ojavälit (m) ympärysaineen paksuuden suhteen:

Ilman ympärysainetta	18 m
Ympärysaineen paksuus 10 mm	21 m
Ympärysaineen paksuus 25 mm	23 m
Ympärysaineen paksuus 50 mm	24 m

Laskelmasta voidaan nähdä, että ympärysaineella on merkittävä vaikutus ojaväliin.

Viime vuosina maalajikohtaiset ojavälisuositukset ovat olleet seuraavan sivun yhteenvedon mukaisia. Vaihteluväliin vaikuttaa mm. tilan tuotantosuunta. Lähtöolettamuksena on, että salaojan ympärysaineena käytetään soraa.

	Imuojien väli, m
Turvemaat	8–14
Savi-, hiesu- ja hieumaat	10–14
Hietamaat	14–18
Urpaantuneet liejut ja liejusavet	16–24

Ojien sijoitteluun vaikuttavat mm. maaston muoto, laskuaukon paikan vaihtoehdot ja sen vaikutus kokoojan paikkaan. Imuojien sijoittelussa tavoitteena on tasainen ojasyvyys ja kaltevuus. Lohkon tuleva viljelysuunta on myös syytä ottaa huomioon. Ojien sijoittelulla voidaan vaikuttaa myös työn toteuttamisen helppouteen. Ojasyvyyden tulee pääsääntöisesti olla sellainen, että se pellon tasauksen jälkeen on kivennäismailla vähintään 1,0 m ja turvemailla 1,2 m. Poikkeavia ojasyvyyksiä joudutaan harkitsemaan esimerkiksi karikoiden, pienen kuivavaran tai pehmeän pohjamaan vuoksi.

Salaojituksen mitoitus

Salaojituksen mitoitukseen liittyy kaksi keskeistä tekijää. Toinen on kuivatustehokkuus eli mitoitusvalunta ja toinen on putkien koon määrittely.

Mitoitusvalunta

Suomen oloissa maankuivatuksen mitoitukseen vaikuttaa eniten kevään lumen sulamisesta aiheutuva valunta. Tämä on ollut myös salaojien mitoituksen lähtökohtana ja siitä syystä mitoitusvalunta on ollut Pohjois-Suomessa suurempi kuin Etelä-Suomessa. Viime vuosina on keskustelua herättänyt myös kesäsateiden rankkuuden yleistyminen ja ilmiön mahdollinen huomioiminen salaojien mitoituksessa.

Kevätvalunnan käyttämisen mitoitusvalunnan lähtökohtana tekee ongelmalliseksi lumen ja roudan eriaikainen sulaminen. Kuvasta 7.34 voidaan todeta, että viiden vuorokauden maksimisulunta alkaa Etelä-Suomessa keskimäärin maalis-huhtikuun vaihteessa ja routa sulaa vasta huhtikuun loppupuolella. Vastaavat ajankohdat Oulun seudulla ovat kaksi viikkoa myöhemmin. Maantieteellisestä sijainnista riippumatta maksimisulunnan ajankohdasta roudan sulamiseen kuluu aikaa keskimäärin kuukausi.

Maksimisulunta 30 vuorokauden ajanjaksolla 20 vuoden toistuvuudella on Etelä-Suomessa keskimäärin 230 mm ja Pohjois-Suomessa 250 mm. Näistä arvoista suoraan laskien vuorokausivalunta on 7,6–8,3 mm, joka vastaa likimäärin käytössä ollutta 1 l s⁻¹ ha⁻¹ mitoitusvalumaa. Keväällä salaojien mitoitusvalunta riippuu myös maaston muodosta, koska se vaikuttaa ratkaisevasti pintavalunnan määrään. Sulannan ja roudan sulamisen aikaan kuivatustehokkuus ei ole kriittinen kantavuuden eikä kasvien kasvun kannalta, vaan valunnalle on enemmän aikaa kuin kylvöjen ja kasvukauden aikana tehtävien viljelytoimien aikana.

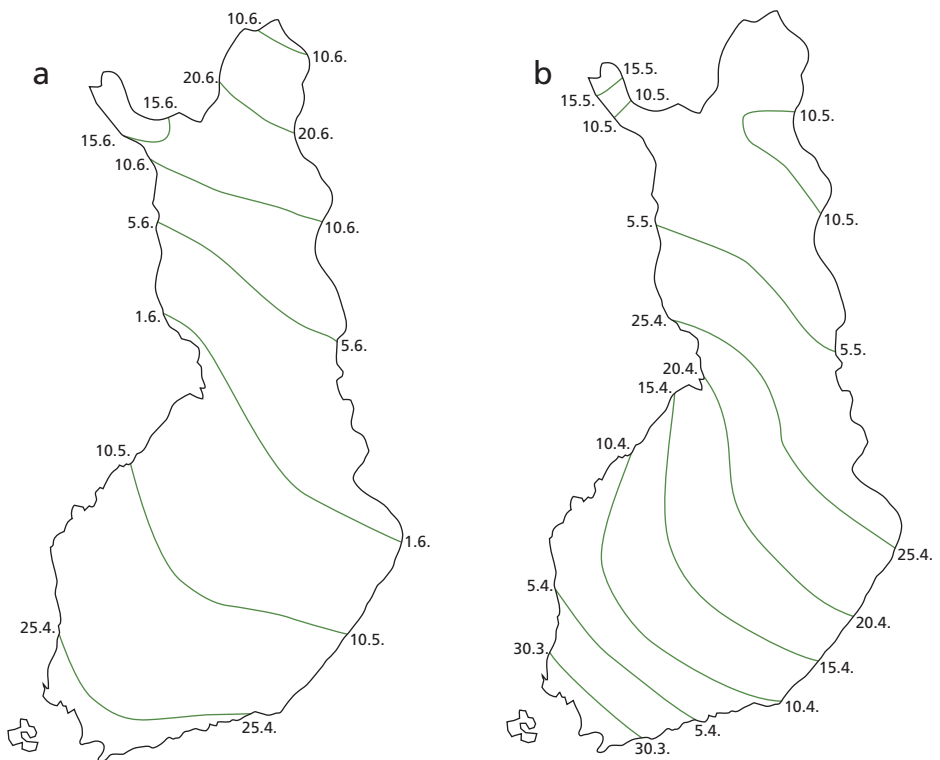
Kasvukauden aikaisen mitoitusvalunnan teoriaa on käsitelty kohdassa 7.5. Mitoitusvalunnan lähtökohtana ovat sadantatiedot. Suomessa sateisimmat kuukaudet ovat heinä- ja elokuu. Viiden vuorokauden sadanta 5 vuoden toistuvuudella on esim. Hämeen ja Varsinais-Suomen alueella 90 mm ja 20 vuoden toistuvuudella 110 mm. Kun näillä sademäärillä arvioidaan mitoitussadantaa Tietoruudun 7.4 esimerkin perusteilla, voidaan todeta, että käytössä oleva mitoitusvaluma 1 l s⁻¹ ha⁻¹, eli valuntana 8,6 mm d⁻¹ vastaa kasvukauden aikaista tarvetta 20 vuoden toistuvuudella. Kuivatettavissa olevan huokoskoon ja oja-
syvyyden vaikutuksista on yhteenveto taulukossa 7.2.

Putkien mitoitus

Peltosalaojituksessa varsinaisista kuivatusojista käytetään nimeä imuoja. Niiden vedet johdetaan puolestaan kokooajojalla valtaojaan. Putkien mitoitukseen on laadittu nomogrammeja, joilla tarvittava putkikoko voidaan nopeasti määrittää. Kuvissa 7.35 ja 7.36 on kohdassa 7.5 esitettyjen kaavojen perusteella laaditut nomogrammit.

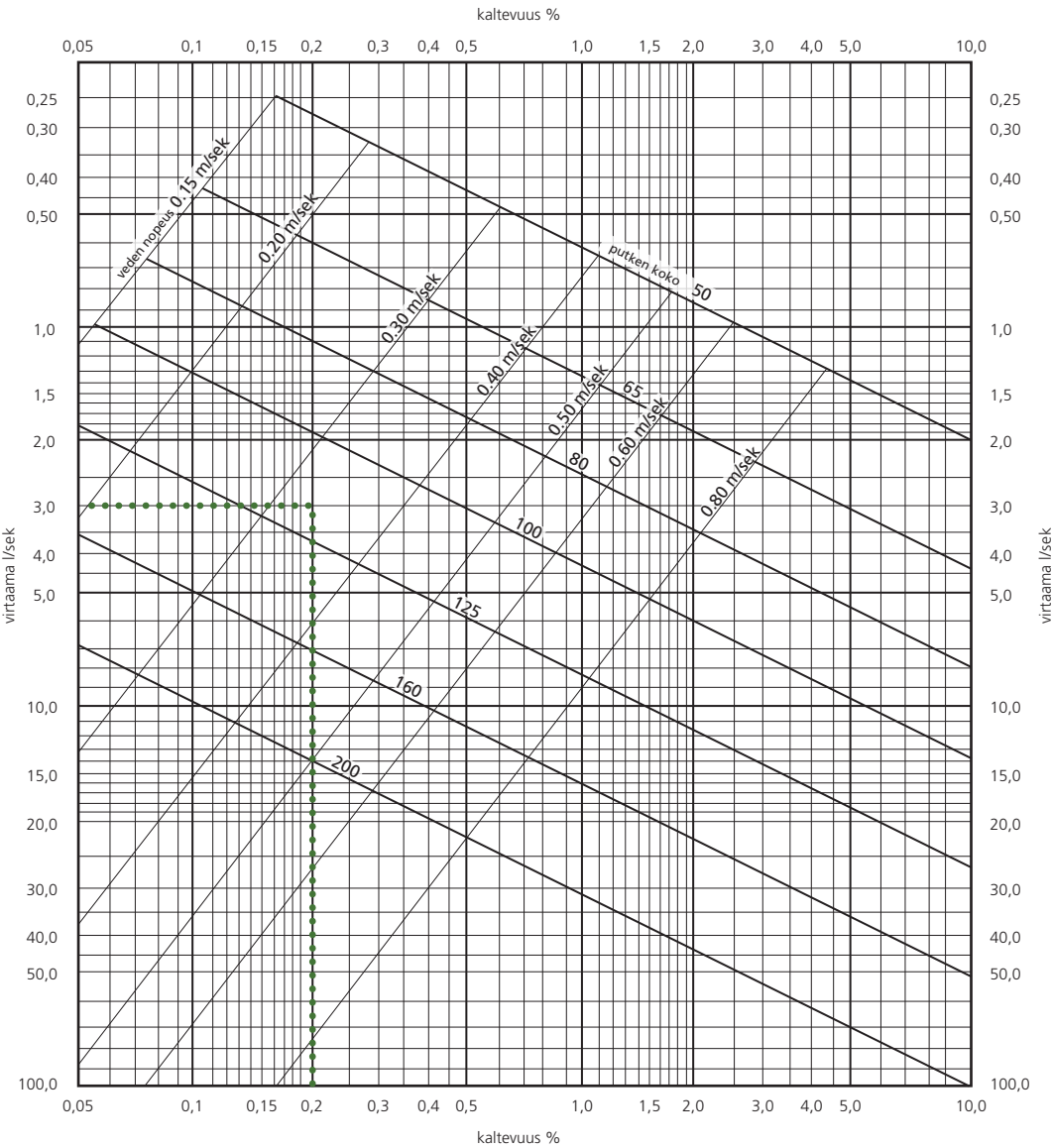
Mitoitusvirtaama saadaan valuma-alueen koon ja mitoitusvaluman perusteella. Sen jälkeen kun on tiedossa putken kaltevuus, voidaan määrittellä putkikoko. Esimerkiksi, jos mitoitusvaluma on $1 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ja valuma-alue 3 ha, niin virtaama on 3 l s^{-1} . Putken kaltevuudella 0,2 % salaojan putkikoko tulee olla vähintään DN 125. Tällöin veden virtausnopeus on $0,33 \text{ m s}^{-1}$ (kuva 7.35).

Putkien minimikaltevuus tulee olla sellainen, että vapaalla virtauksella veden virtausnopeus on vähintään $0,15 \text{ m s}^{-1}$. Kyseinen minimivirtausnopeus edellyttää, että putken ympärysaine on asiallinen ja liettymisriski vähäinen. Mikäli ympärysaineen suodatuskyky on heikko, minimikaltevuuden tulee olla sellainen, että veden nopeus on vähintään $0,4 \text{ m s}^{-1}$.



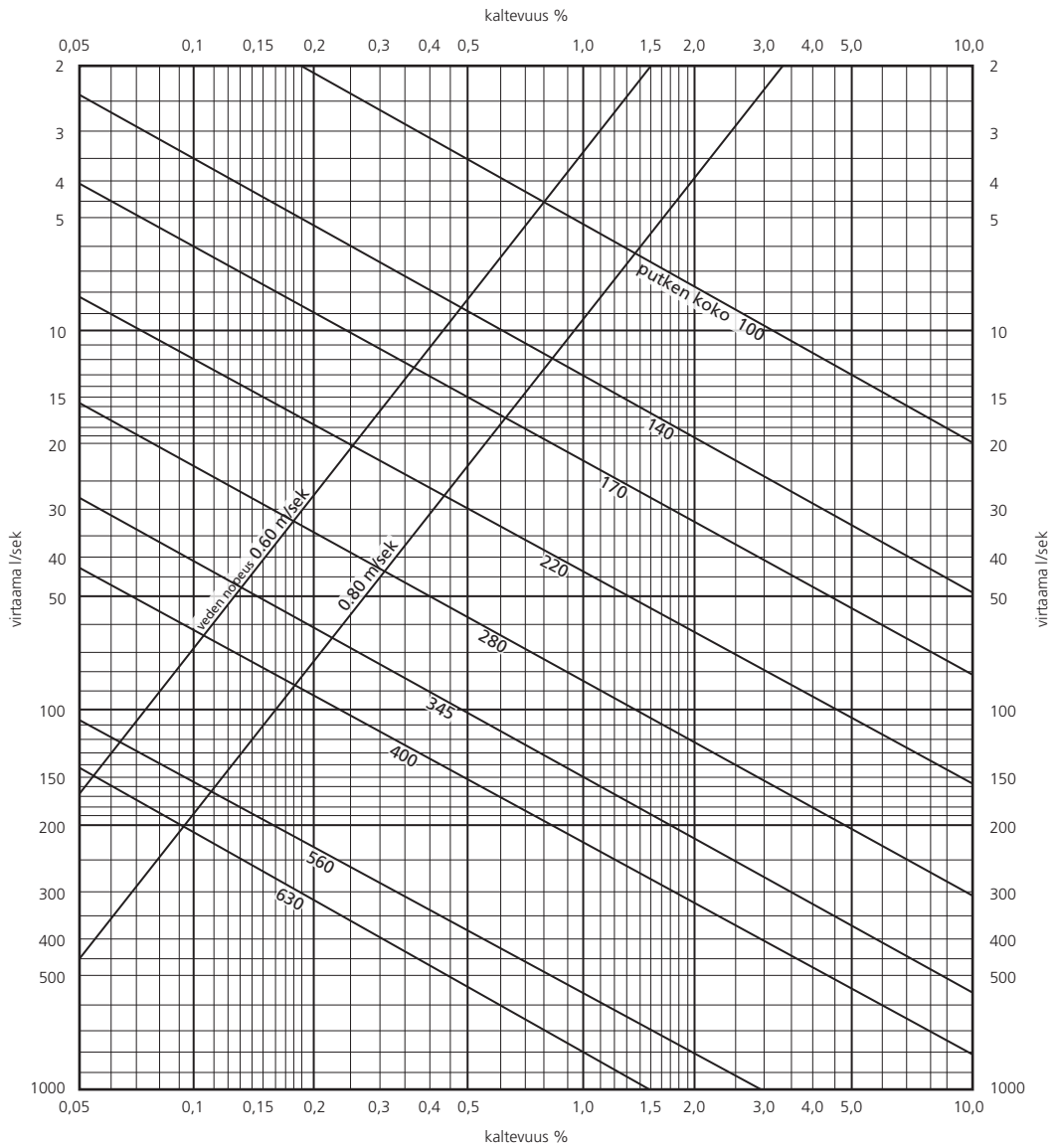
Kuva 7.34 a. Keskimääräinen roudan sulamisen päättyminen (Soveri 1986) ja b. keskimääräinen lumen sulannan 5 vrk:n maksimin alkamisajankohta (Kuusisto 1984).

Nimelliskoko DN/OD	Ulkohalkaisijan vähimmäisarvo	Sisähalkaisijan vähimmäisarvo
50	48,5	43
65	63,5	57
80	78,5	70
100	98,5	88
125	123,5	112
160	158,5	143
200	198,5	180



Putken koko tarkoittaa SFS 5211 / RIL 128-2002 mukaisia DN/OD nimellismittoja, jossa DN/OD vastaa keskimääräistä ulkohalkaisijaa.
Vesimäärät on laskettu Manningin kaavalla: $Q=38d^{2.67}i^{0.50}$, varmuuskerroin 1,33.

Kuva 7.35 Kaavan 7.27 perustella laadittu aallotetun salaojaputken mitoistusnomogrammi ja salaojaputkien nimelliskoot.



Putken koko tarkoittaa sisähalkaisijaa.

Virtaama on laskettu Darcy-Weisbachin kaavalla: $Q=50d^{2,71}i^{0,57}$, varmuuskerroin 1,33.

Kuva 7.36 Kaavan (7.24) perusteella laadittu sisältä sileän tiiviin putken mitoitusnomogrammi.

Suunnitelman sisältö

Salaojasuunnitelmasta tulee ilmetä tarpeelliset tiedot niin itse työn toteutusta ja tarvikkeiden hankintaa varten kuin myös hankkeen rahoituksen järjestelyä varten.

Tärkeimmät suunnitelma-asiakirjat ja niistä ilmenevät tärkeimmät tiedot on esitetty alla olevassa listassa:

- suunnitelmakartta, josta selviää pellon pinnan muoto ja salaojien asennussyvyys sekä putkikoot, karttamerkkien selitykset
- suunnitelmaselostus
- kustannusarvio
- erittely tarvikkeista ja niiden yksikköhinnoista
- muut tarvittavat yksityiskohtaiset piirrokset ja työselitykset
- ohjeet työn teettäjälle
- hankkeen toteutuksessa tarvittavat lomakkeet
- suunnitelman arkistointi tietokantaan

Ennestään salaojitettut ja muut kohteet

Täydennysojituksella tarkoitetaan vanhan salaojituksen täydentämistä uusilla salaojilla. Tällöin suunnittelun lähtötietoja on jo valmiina aiemmassa suunnitelmassa ja vanha ojitus rajaa oleellisesti käytettäviä ratkaisuja. Tyypillinen täydennysojitus on lisätä uudet imuojat vanhojen imuojien väliin, jolloin voidaan hyödyntää olemassa olevaa salaojaverkostoa.

Uusintaojituksessa vanhaa ojitusta ei voida enää hyödyntää. Tällainen tilanne on tyypillinen turvemaidella, joilla turpeen painumisen vuoksi vanhat salaojat ovat liian matalalla.

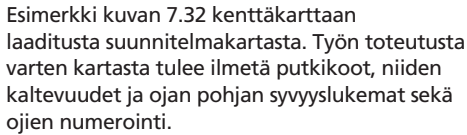
Korjaussuunnitelmalla tarkoitetaan yhdyskuntarakentamisesta johtuvia salaojien korjauksia. Tällaisia kohteita ovat tiet, radat ja erilaiset putkilinjat. Niiden suunnittelussa olemassa olevien salaojien suunnitelmakartat ovat välttämättömiä. Suunnittelussa joudutaan myös erikoisratkaisuihin, joita varten laaditaan yksityiskohtaiset rakennepiirrokset.

Erikoiskohteita ovat esimerkiksi viheralueet, golf- ja muut pelikentät sekä hautausmaat. Niiden toteutuksessa käytetään peltosalaojituksesta poikkeavia työmenetelmiä, jotka on tarpeen ottaa huomioon suunnittelussa.

7.8 Salaojituksen toteutus

Suunnitelman maastoon merkintä

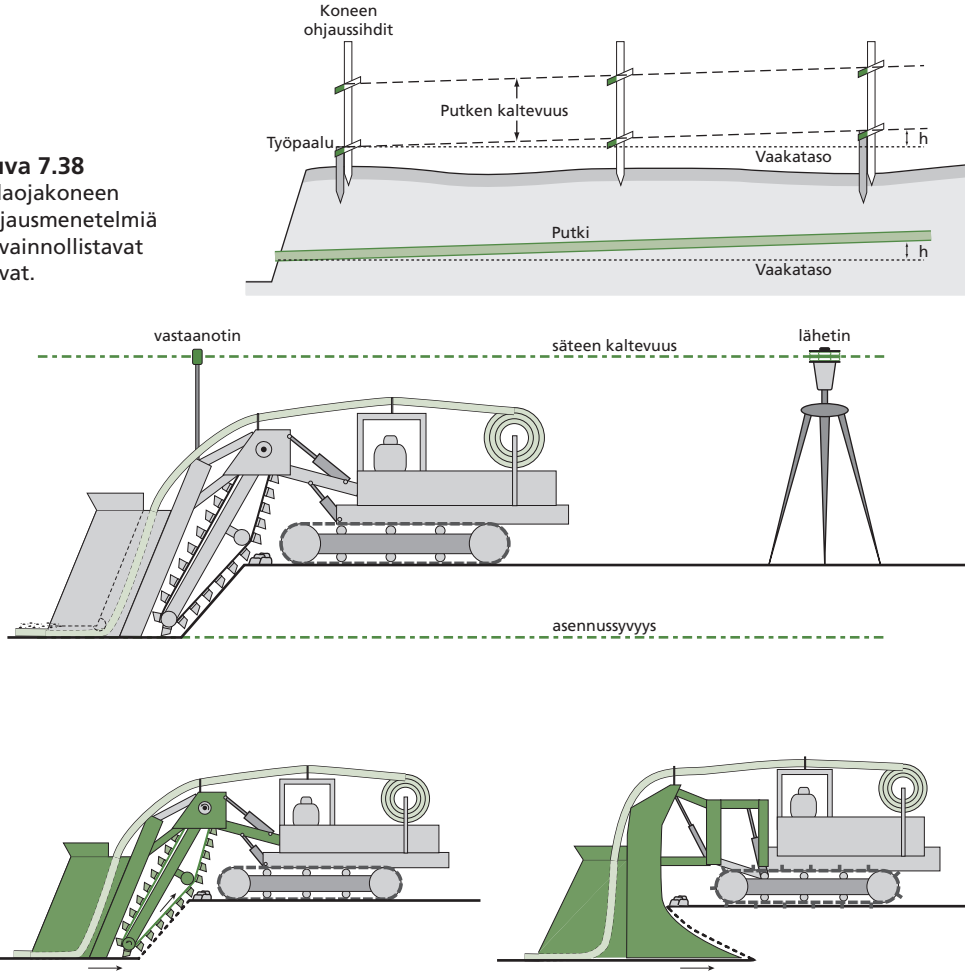
Suunnitelman maastoon merkinnän eli työpaalutuksen tekee yleensä suunnitelman laatija. Tällöin suunnittelija voi vielä varmistaa, että suunnitelma on ajan tasalla ja antaa tarvittaessa lisäohjeita ojituksen tekijälle. Paalutuksen käytännön toteutus riippuu urakoitsijan käyttämästä ohjausjärjestelmästä. Käsivarainen syvyydensäätö edellyttää, että urakoitsija pystyy asettamaan sihtilinjan koneen syvyyden säätöä varten. Tätä menetelmää on havainnollistettu kuvassa 7.38. Nykyisin on yleisesti käytössä laser-syvyydensäätö, joka ei tarvitse välttämättä merkkipaaluissa syvyysmerkintää. Menetelmässä riittävät tiedot ojan paikasta ja pohjan korkeudesta sekä putken kaltevuudesta. GPS-tekniikan soveltaminen salaojakoneen ohjaukseen on kehitystyön alla.



Salaojien asennuksessa on nykyisin käytössä kaksi perusmenetelmää, kaivava ja aurasalaojakone (kuva 7.39). Kaivava kone kaivaa salaojakaivannon auki ja kaivannon täyttö on erillinen toimenpide. Tällöin kaivumaan on hyvä antaa kuivua hyvin ennen sen palauttamista kaivantoon. Kuvassa 7.40 on esitetty salaojitusta kaivavalla salaojakoneella ympärysaineena sora. Erityisesti savimaan kuivattaminen parantaa kaivannon vedenläpäisevyyttä tehokkaasti. Auratekniikassa aura tekee tilaa putken asentamiselle ja kaivanto täyttyy saman tien maa-aineksella. Molemmissa menetelmissä voidaan käyttää erilaisia ympärysaineita.

Peltosalaojituksen laatuvaatimukset on määritelty Suomen Rakennusinsinöörien Liiton RIL:n julkaisussa RIL 128-2002 (uusitaan vuonna 2016).

Kuva 7.38
Salaojakoneen
ohjausmenetelmiä
havainnollistavat
kuvat.



Kuva 7.39 Tyypikuvat kaivavasta ja aurasalaojakoneista.

Kuva 7.40
Salaojitusta kaivavalla
salaojakoneella
ympärysaineena sora.
(Kuva Helena Äijö)



Putket

Peltosalaojituksessa käytetään salaojaputkina aallotettuja poikkileikkaukseltaan pyöreitä muoviputkia. Suomessa valmistetut putket tulee olla valmistettu ja merkitty standardin SFS 5211 mukaisesti. Muista EU-maista tuotavien putkien tulee täyttää vähintään SFS:n 5211 laatuvaatimukset ja että ne tulee olla merkitty valmistusmaan kansallisen standardin mukaisesti. EU:n ulkopuolelta tuotavien putkien osalta maahantuojan on esitettävä putken laadusta EU:n jäsenvaltiossa akreditoitun tarkastuslaitoksen lausunto, että putki täyttää vähintään SFS:n 5211 laatuvaatimukset. Em. standardin mukaiset putket täyttävät rengasjäykkyyshuokat SN 4 (4 kN m^{-2}) ja SN 8 (8 kN m^{-2}).

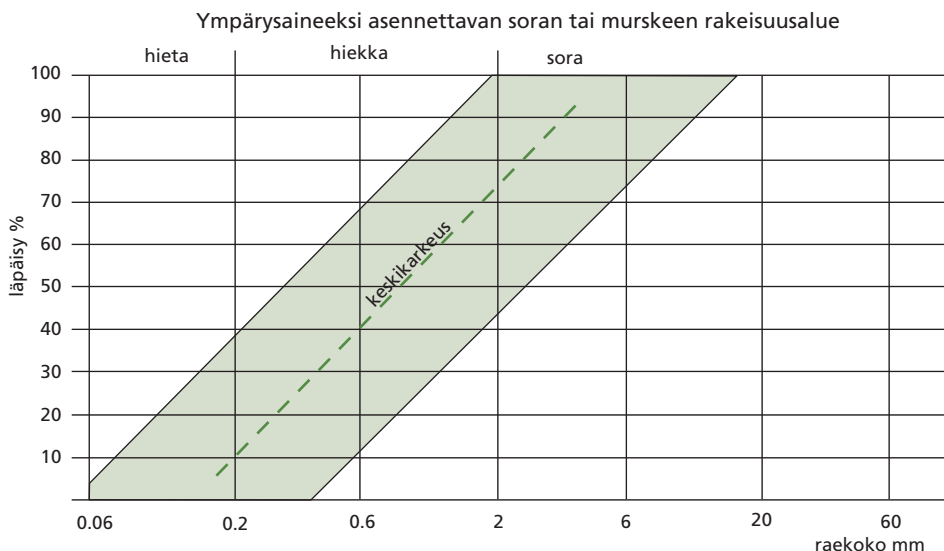
Veden johtamiseen salaojien kokooajojissa ja putkitetuissa valtaojissa voidaan suunnittelijan harkinnan mukaan käyttää, myös luokiteltuja maaviemäriputkia ja kierrätysmateriaalia sisältäviä yleisputkia. Niiden rengasjäykkyyshuokan tulee tällöin olla vähintään SN 2 (2 kN m^{-2}). Vaativissa olosuhteissa, jollei käytetä RIL 77 mukaisesti soraa ympärystäyttyöön, tulee rengasjäykkyyshuokan olla vähintään SN 4.

Ympärysaineet

Ympärysaineiden tarkoituksena on suojata putkea työn aikana ja varmistaa sen asettuminen oikein kaivannon pohjalle, estää maa-aineksen pääsy putkeen, pienentää veden putkeen pääsyn virtausvastusta sekä parantaa salaojakaivannon vedenjohtavuutta. Ympärysaineena voidaan käyttää joko massiivisia aineita, kuten soraa, tai synteettisestä tai orgaanisesta materiaalista valmistettuja esipäällysteitä.

Salaojasoran rakeisuuden tulee täyttää kuvassa 7.41 esitetty raekokojakautuma. Soraa tulee asentaa vähintään 8 cm:n paksuinen kerros putken yläpinnan päälle.

Esipäällysteiden kriteerit perustuvat ensisijassa paksuuteen, painoon ja huokoskokoon. Suositus esipäällysteen paksuudeksi vaihtelee 3 ja 8 mm:n välillä (mitattuna 2 kPa paineessa). Esipäällysteiden suositeltavat huokoskoon O_{90} -arvot ovat 300–1 000 μm :n välillä. (Vlotman 2004) Esipäällysteiden käyttöä tulee harkita kussakin olosuhteessa erikseen.



Kuva 7.41 Välittömästi putken suojaksi asennettavan soran tai murskeen tulee sisältää kuvassa rajatun rakeisuusalueen raekokoja tasaisesti. Tämä ehto täyttyy riittävästi silloin, kun seulontakäyrä ei leikkaa keskikarkeuden viivaa.

Orgaaniset päällysteet saattavat hajota maassa vuosien saatossa. Kuvassa 7.42 on esitetty synteettinen esipäällyste ja kookoskuitupäällyste. Ympärysaineiden soveltuvuudesta on kerrottu tarkemmin kohdassa 7.4 Ympärysaineet.

Työolosuhteet ja asennustarkkuus

Salaojitus on tehtävä sellaisissa olosuhteissa, että se ei vaaranna salaojien asennustarkkuutta eikä salaojien toimivuutta työn jälkeen. Salaojat tehdään merkittyihin paikkoihin, eikä niistä saa poiketa, elleivät kallio, suuret kivet tai muut kohtuuttomat esteet vaikeuta kaivua ko. paikkoihin. Normaali sallittu sivupoikkeama on 0,5 m. Vaikean esteen sattuessa saattaa olla aihetta muuttaa suunnitelmaa, mikä työ on annettava suunnittelijan tehtäväksi.

Salaojan pohjan tasaisuusvaatimus riippuu ojan kaltevuudesta ja maalajista. Jos salaojan kaltevuus on alle 1 %, suurin hyväksytty poikkeama on ± 1 cm, muuten ± 2 cm. Eri-merkiset sallitut maksimipoikkeamat eivät saa esiintyä 10 metrin matkalla. Asennustarkkuus voidaan mitata joko vaaituskoneella putken päältä tai salaojien asennustarkkuusmittarilla putken sisältä.

Vastuukysymykset

Vastuukysymykset tulee selvittää ennen töiden aloitusta ja tarvittaessa laatia kirjallinen sopimus.

Suunnittelijan vastuu

Suunnittelija on vastuussa tilaajalle aiheutuneista vahingoista ja kolmannelle osapuolelle aiheutuneista vahingoista, jotka johtuvat suunnittelijan tekemistä virheistä ja laiminlyönneistä. Ellei takuuaikaa ole määrätty, vastuu päättyy yleensä kahden vuoden kuluttua suunnittelukohteen valmistumisesta. Ellei toisin olla sovittu, suunnittelijan vastuun ylärajana on suunnittelijan veloittaman kokonaispalkkion ja kulujen enimmäismäärä. Muutoin noudatetaan konsulttialan yleisiä sopimusehtoja.

Työn valvonta

Salaojitustyön toteuttamisen valvonta jakaantuu tekniseen valvontaan ja paikallisvalvontaan. Teknisenä valvojana toimii suunnittelija. Tekninen valvoja vastaa siitä, että työ teh-



Kuva 7.42

Pelkkä salaojaputki
(vasen), synteettinen
esipäällyste (keskellä) ja
kookoskuitupäällyste (oikea)

dään suunnitelman tai suunnittelijan antamien lisäohjeiden mukaan. Paikallisvalvojana toimii työn tilaaja. Mikäli tilaaja ei toimi paikallisvalvojana, hänen tulee sopia suunnittelijan kanssa paikallisvalvonnan hoitamisesta. Paikallisvalvojan tehtävänä on päivittäin valvoa työn suoritusta ja ilmoittaa välittömästi suunnittelijalle, jos työn laadussa ilmenee huomauttamista.

Asennustarkkuus todetaan tarvittaessa mittaamalla satunnaisotannalla vähintään 5 % ojamäärästä. Jos työtä tarkistettaessa löytyy virheitä, on tarkistettavien ojien lukumäärää lisättävä. Ojan pohjan tasaisuuden lisäksi tarkistetaan muut salaojan toimivuuteen vaikuttavat tekijät kuten ojan sijainti, putken lasku, ympärysaineen sijoitus, laskuaukot, kaivot ja muut laitteet. Tarkastuksesta laaditaan raportti, josta jätetään jäljennös tilalle.

Tarvikkeiden toimittajien vastuu

Tarvikkeiden toimittaja vastaa, että toimituserä täyttää tarvikkeille asetetut laatuvaatimukset ja että mahdollinen välivarastointi on tehty valmistajan ohjeiden mukaan. Tarvikkeiden toimittaja vastaa, että tavarankäsittely ja varastointiohjeet toimitetaan tilaajalle.

Urakoitsijan vastuu

Urakoitsija vastaa siitä, että työ on tehty suunnitelman ja suunnittelijan työn aikana antamien lisäohjeiden mukaan ja täyttää työn laadulle asetetut vaatimukset. Työmaajärjestelyihin liittyvät työturvallisuusasioista vastaa urakoitsija. Urakoitsija vastaa siitä, että työ tehdään sellaisissa olosuhteissa ja sellaisilla työmenetelmillä, että salaojien toimivuus ei niistä johtuvista syistä vaarannu.

Tilaajan vastuu

Tilaaja vastaa siitä, että suunnittelijalle toimitetaan tarvittavat perustiedot. Mikäli tutkimuksia tarvitaan tilaajan omistamien alueiden ulkopuolelta, tilaaja hankkii luvat tutkimusten suorittamisesta alueiden omistajilta. Tilaaja vastaa hyväksymistään maastotutkimuksista aiheutuvista vahingoista, jotka eivät johdu suunnittelijan tekemistä virheistä tai laiminlyönneistä. Tilaaja on vastuussa johtojen ja kaapeleiden sijainnin merkitsemisestä maastoon, sekä tien alitukseen tarvittavan tielaitoksen luvan hankkimisesta. Tilaaja vastaa siitä, että tarvikkeet on varastoitu tilalla valmistajan ohjeiden mukaisesti ja että valmisteltavat työt on tehty asianmukaisesti työn toteutusta varten. Tilaaja vastaa pellon tasauksesta toteuttamisen jälkeen sekä salaojituksen kunnossapidosta.

Takuu

Peltosalaojituksen takuu-aika on salaojien toimivuuden osalta kaksi vuotta. Mikäli takuuajan jälkeen todetaan selviä tarvikkeiden tai työn laadusta johtuvia virheitä, takuu-aika on viisi vuotta. Virheen korjaamisen maksaa sen aiheuttaja. Työn osalta takuun voima-saolo edellyttää pääsääntöisesti, että työmaasta on laadittu salaojitustyön työmaa- tai lopputarkastuspöytäkirja.

7.9 Kunnossapito

Salaojituksen kunnossapidon tarve on yleensä hyvin vähäinen. Vajaatoimivuus johtuu useimmiten muusta kuin itse salaojien rakenteeseen liittyvistä vioista. Yleisimmät syyt liittyvät peruskuivatukseseen, maan rakenteeseen ja pohjaveden rautapitoisuuden aiheuttamiin ruostesaostumiin. Alla olevaan luetteloon on kerätty yhteenveto salaojituksen vajaan toiminnan syistä ja niiden seurauksia. Yksityiskohtaisemmin on tarkasteltu jankon vedenjohtavuuden mekaanisia parantamismenetelmiä sekä salaojien huuhtelua.

Salaojituksen vajaatoiminnan syitä ja seurauksia

Puutteellinen peruskuivatus

- vesi ei pääse pois salaojasta
- laskuaukot oltava keskimääräisen vedenpinnan yläpuolella

Asennusvirheet

- esimerkiksi ojien notkokohtiin liettymiä, verkostossa ilmalukkoja
- käytännössä vaikea todentaa
- kiinnitettävä työmaan aikana erityistä huomiota

Maan tiivistyminen

- maan huono vedenläpäisevyys
- merkittävä etenkin savimailla, mutta esiintyy myös muilla maalajeilla

Maan painuminen

- merkittävä turvemailla
- suurinta välittömästi kuivatuksen ja viljelyyn oton jälkeen
- ojasyvyys madaltuu

Rautasaostumat

- liukoiset rautayhdisteet saostuvat ilman hapen kanssa
- putken reikiin, ympärysaineeseen, salaojaputkeen
- yleisin Pohjanlahden rannikon nuorilla kuivatusalueilla ja rautapitoisilla turvemailla

Putkitukkeumat

- maa-ainesta tai ruostetta putkessa
- putki rikkoutunut tai puiden ja pensaiden juuret tunkeutuneet putkeen
- keväällä vesi jäätyy putkeen

Pintavesiongelmät

- tasaisilla turvemailla, joilla pintaveden johtavuus on pieni ja vedenpidätyskyky on suuri
- painanteisiin kertyvä vesi
- puutteellinen pellontasaus
- tasaisilla tiivistyneillä savimailla joko pintamaan tai jankon pieni vedenjohtavuus

Toimintahäiriön paikantaminen

- paikannetaan salaojat
- salaojakartat ajan tasalla
- pohjaveden korkeuden muutosten seuraaminen ajan suhteen
- salaojaputkista purkautuvan vesimäärän mittaus ajan suhteen
- putkiston videokuvaus

Pohjamaan vedenjohtavuuden parantaminen

Pohjamaan vedenjohtavuutta pyritään parantamaan mm. syvälle ulottuvalla kuohkeutuksella eli jankkuroinnilla (kuva 7.43) tai syväjuurisilla kasveilla. Salaojituksen ja jankkuroinnin yhteensovittamisessa on tarpeen korostaa, että salaojitus on ensisijainen toimenpide ja syväkuohkeutus täydentävä toimenpide. Jankkuroinnista voi olla enemmän haittaa kuin hyötyä, jos vesi ei pääse kuohkeutuksen jälkeen pois maasta tai se tehdään epäedullisissa olosuhteissa. Jankkuroinnin tai ns. myyräojan käyttöä salaojituksen täydentäjänä on syytä harkita vasta sen jälkeen, kun kuivatusongelman aiheuttaja on riittävän hyvin tiedossa.

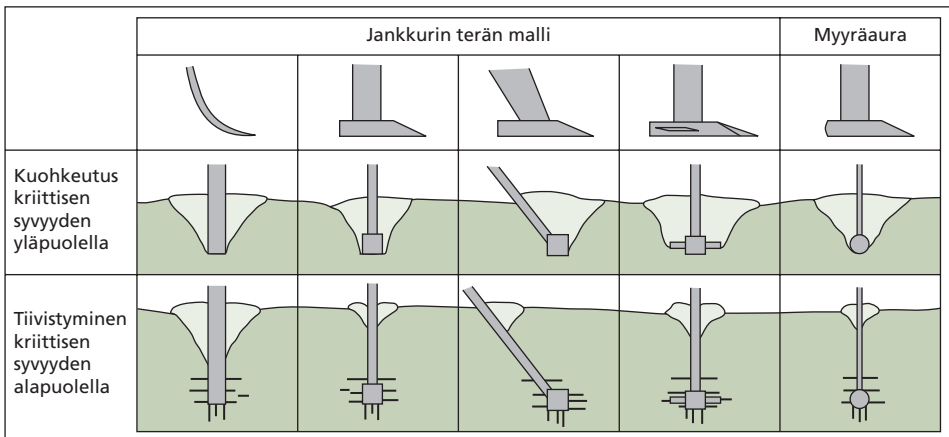
Jos ongelmana on pellon pinnan liettyminen, jankkuroinnilla tai lisäojituksella ei tilannetta voi merkittävästi parantaa. Tällöin toimenpiteinä tulevat kysymykseen pellon pinnan tasaus ja/tai muotoilu sekä pintavesikaivojen tai silmäkkeiden lisääminen. Nurmen ottaminen viljelykiertoon on varma vaihtoehto kaikissa tilanteissa maan rakenteen parantamiseksi, jos se on tilan tuotannon kannalta muuten mahdollista.

Myyrä- ja suoto-ojitus

Myyräojitus on suosittua salaojien täydentäjänä erityisesti Englannissa, jossa sen teknisiä ratkaisuja on myös pitkään kehitetty. Sikäläisestä tekniikasta on esimerkkejä kuvassa 7.43. Suomessa ei ole systemaattisesti selvitetty myyräojien tehokkuutta. 1980-luvulla tutkittiin myyräojituksen kaltaista täydennysojitusta, jota kutsutaan suoto-ojitukseksi. Suoto-ojat tehdään imuojiin nähden poikkisuunnassa ja imuojien yläpuolelle, jolloin niissä kulkeva vesi ohjautuu varsinaisiin salaojiin. Suoto-ojat täytetään kokonaan hyvin vettä johtavalla materiaalilla, esimerkiksi hakkeella.

Salaojien huolto

Merkittävin salaojien huoltoa aiheuttava tekijä on ns. ruostesaostuman kertyminen putkeen, putken reikiin ja ympärysaineeseen. Sen aiheuttamia haittoja voidaan vähentää mm. vedenalaisella ojituksella tai ruosteen muodostumista vähentävillä tai rautayhdisteiden saostumista hidastavilla ympärysaineilla. Toistaiseksi varmin menetelmä haittojen torjumiseksi on salaojien huuhtelu tietyin väliajoin.



Kuva 7.43 Erilaisten jankkurin terämallien vaikutuksia kuohkeutumiseen kriittisen syvyyden ylä- ja alapuolella

Huuhtelun periaate

Salaojien huuhtelu on menetelmä, jolla voidaan poistaa salaojaputkesta sinne kertynyttä maa-ainesta ja muita veden virtauksen esteitä, sekä puhdistaa putkien rei'itystä. Suuttimella varustettu huuhteluletku työnnetään hitaasti salaojaan samalla kun suuttimelle pumpataan vesipaine. Suuttimessa on useita reikiä, joista vesi suihkuu salaojaputken seinämiä kohti. Irronnut maa-aines huuhdellaan runsaalla vedellä pois putkesta. Poistuvan massan laatu ja määrä ilmaisevat putkiston kuntoa, samoin se vastus, joka kohdistuu suuttimeen huuhteluletkua salaojaan työnnettäessä. Huuhtelun tehokkuus riippuu työntönopeudesta, vesipaineesta suuttimella, vesisuihkun kulmasta ja veden määrästä.

Laitteiden kehittyminen

Alkuvaiheessa peltosalaojituksissa käytettiin erityisesti Hollannissa samoja laitteita kuin jätevesiputkistojen puhdistuksessa. Aina viime vuosiin saakka on käytetty laitteita, joiden pumpun teho on ollut yli 50 baaria ja suuttimen yli 20 baaria. Korkeaa painetta käytettiin vetämään huuhteluputki salaojan sisään. Mitä korkeampi paine, sitä paremmin suuttimesta tuleva vesisuihku vetää putkea sisään. Maksimipituus, johon huuhteluputki saattoi edetä riippui putkikoosta, huuhtelupaineesta, suuttimen koosta, putken laadusta, liitoksien tyyppistä ja putkessa olevan veden määrästä.

Tällä menetelmällä kyettiin huuhtelemaan 200–300 m pitkiä salaojia. Vähitellen todettiin, että korkea huuhtelupaine aiheuttaa putken ympärillä olevan maan häiriintymistä ja siitä johtuvaa nopeaa uudelleen huuhtelun tarvetta. Riski oli erityisen suuri ns. kevyillä mailla. Korkeilla paineilla käytettiin kumista valmistettua letkua, jota ei voitu työntää matalalla paineella. Sittenmin on siirrytty polyeteenistä valmistettuun jäykempään putkeen, jota voidaan työntää mekaanisesti, jolloin ei tarvita korkeaa painetta. Hollannissa on jo 1970-luvun puolivälistä lähtien käytetty suhteellisen matalia paineita ja mekaanisella syöttölaitteella varustettuja laitteita, joilla päästään yli 300 m:n huuhtelupituuksiin.

Pumppu

Pumppujen teho luokitellaan matala-, keski- ja korkeapaineisiin laitteisiin. Tällöin pumpun teho on vastaavasti alle 20, 20–35 tai yli 60 baaria ja pumppausteho 70–125 l min⁻¹. Suuttimella oleva paine riippuu useasta tekijästä, mutta se on karkeasti puolet pumpulla olevasta tehosta. Pumpputyypin tulee olla sellainen, että se tuottaa vakiovesimäärän tietyllä kierrosluvulla ja vesimäärä on riippumaton käyttöpaineesta. Käyttöpaine voidaan säätää, jos siihen on tarvetta. Käytäntö on osoittanut, että 70 l min⁻¹ vesimäärä on riittävä aina 65 mm:n putkikokoon saakka.

Huuhteluletku

Letku on tehty normaalisti polyeteenistä (PE), joka kestää noin 35 baarin paineen. Myös muita synteettisiä materiaaleja käytetään. Letkun paksuus on tavallisesti 25–30 mm ja seinämän vahvuus 5–10 mm. Putken jäykkyys tulisi olla sellainen, että se aiheuttaa mahdollisimman vähän kitkaa salaojaputken seinämään. Letkumateriaalit, jotka ovat pienempiä kuin veden tiheys, uivat salaojaputkessa olevassa vedessä ja pienentävät siten työntövastusta. Joidenkin laitteiden pumput antavat painepulsseja huuhteluletkuun, mikä auttaa letkun etenemistä. Pumpun pulssi saa letkussa aikaan pienen hyppäyksen joka pulssilla, mikä vähentää letkun kosketusta hetkellisesti salaojaputken pintaan.

Suutin

Huuhtelulaitteen kriittisin osa on suutin. Se on muodoltaan torpedon näköinen, jossa on yksi reikä eteenpäin ja 4–12 reikää taaksepäin. Suuttimen reikien koko on 1–2,5 mm. Pienet reiät sopivat paremmin kohteisiin, joissa huuhteluvettä on saatavilla niukasti. Reiän muoto määrittää miten vesisuihku hajaantuu. Suutin valmistetaan metallista. Joissakin mal-
leissa käytetään myös suuttimen kannattimia, jotta suihku leviäisi tasaisesti koko putkeen. Eteenpäin suuntautuva suihku avaa tietä letkulle tilanteissa, joissa putki on täysin tukossa. Taaksepäin suuntautuvat suihkut puhdistavat salaojan seinämän ja tuottavat veden, joka kuljettaa veden pois.

Syötön ohjain

Ohjuri varmistaa letkun radan sitä salaojaan työnnettäessä. Nykyisissä laitteissa on moottoroitu syöttölaite. Lisäksi valmistetaan myös sellaisia ohjureita, joilla voidaan syöttää letkua kaivosta, jonka halkaisija on enintään 0,5 m.

Suuttimen muoto

Erilaisia suuttimen rei'ityksiä ja huuhtelupaineita on testattu jo 1980-luvulla. Tulokset osoittivat, että suuttimen etenemisnopeudella oli vain marginaalinen vaikutus siihen, miten paljon hiekkaa tuli putkeen ympärysaineesta. Hidas eteneminen lisäsi vain vähän maa-
aineksen määrää. Eri etenemisnopeuksilla lietteen määrä oli lähes sama samoin kuin niiden reikien määrä, jotka eivät auenneet huuhtelulla.

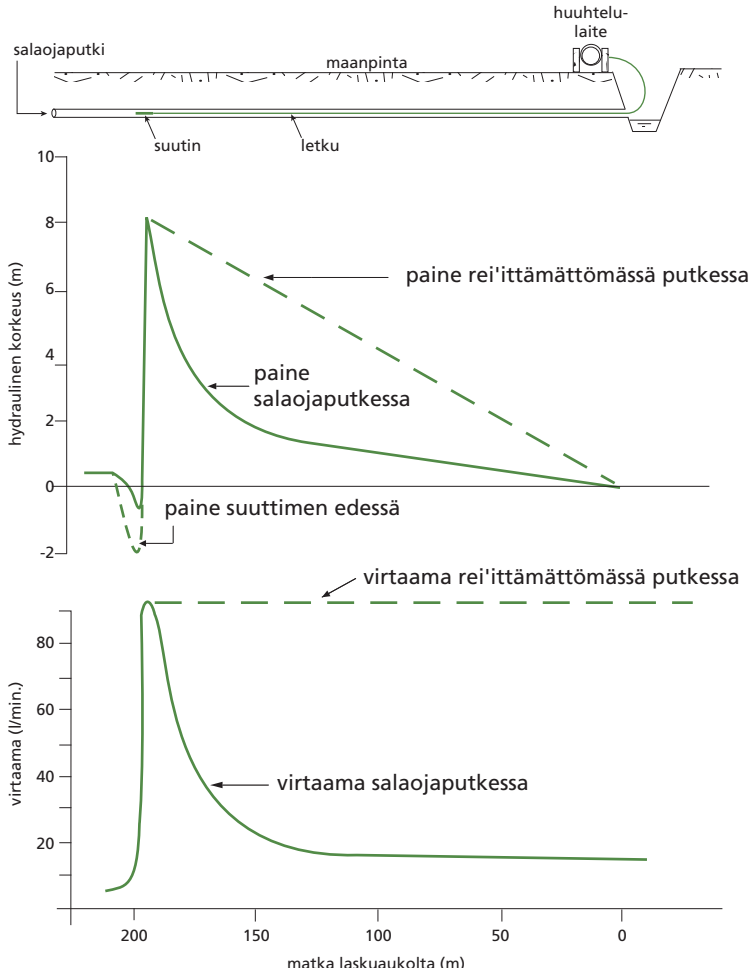
Myöskään suihkun tulokulmalla ei ollut oletettua vaikutusta. Testattavana oli 40, 60 ja 90 asteen tulokulmat. Näistä 60 ja 90 asteen kulmalla tulos oli lähes sama ja vain hieman parempi kuin 40 asteen kulmalla. Kokeiden perusteella suuttimen rei'ityksen suositukseksi tuli yksi reikä eteenpäin ja 12 taaksepäin, joista kuusi reikää 60 asteen kulmassa ja toiset kuusi 40 asteen kulmassa, ja suuttimen etenemisnopeudeksi 20–30 m min⁻¹. Letkua pois vedettäessä nopeus tulee olla vähän pienempi kuin sisään työnnettäessä. Jos työntönopeus on 30 m min⁻¹, niin poistonopeus on hyvä olla noin 25 m min⁻¹. On myös hyvin tärkeää pysäyttää veden syöttö, jos suuttimen eteneminen pysähtyy. Paikalleen jumittuneen suuttimen paine saattaa vaurioittaa salaojaputkea ja sitä ympäröivää maata.

Huuhtelunaikainen paine ja virtaama

Huuhtelun aikana osa huuhteluvedestä poistuu salaojaputkesta maaperään, varsinkin jos se on kuiva. Se vaikuttaa sekä salaojassa olevaan vesipaineeseen että poistuvaan vesimäärään. Kuvassa 7.44 on esitetty tilanne, kun letkua vedetään putkesta pois. Huuhtelun mahdolliset kielteiset vaikutukset syntyvät helpoimmin, jos pohjaveden pinta on salaojan yläpuolella. Tällöin reikien avauduttua ja huuhtelun häirittyä ympäröivää maata pohjaveden paine voi aiheuttaa ympäröivän maan pääsyn salaojaan. Myös huuhteluletkua pois vedettäessä suuttimen eteen syntyvä alipaine voi aiheuttaa lietteen imeytymistä salaojaan.

Laskuaukkojen ja huuhteluhaarojen merkit

Salaojituksen toimivuuden seuraamista varten laskuaukkojen paikat on syytä merkitä maastoon niin hyvin, että ne löytyvät helposti vuosien mittaan kasvavan kasvuston seasta. Samoin huuhtelua varten tehty huuhteluhaarat tai imuojien latvat tulee merkitä niin, että ne löytyvät helposti huuhtelua varten.



Kuvassa 7.44 Huuhtelun vaikutus salaojan pituussuunnassa salaojassa olevaan vesipaineeseen ja vesimäärään tiiviissä ja rei'itettyssä putkessa vedettäessä huuhteluletkua pois putkesta.

8 Säätösalaajitus

Maija Paasonen-Kivekäs

8.1 Johdanto

Säätöojituksella tarkoitetaan kuivatusvesien padottamista maaperään estämällä vapaa virtaus sala- tai avo-ojastosta purkuvesistöön. Kun säätöojitus toteutetaan säätämällä salaajaston kautta purkautuvaa valuntaa, puhutaan säätösalaajituksesta. Johdettaessa salaajaston kautta lisävetä maaperään kyseessä on salaajakastelu. Menetelmästä käytetään myös nimeä altakastelu, pohjavesikastelu, padotuskastelu tai säätökastelu. Säätöojituksen ja salaajakastelun tavoitteena on parantaa kasvuolosuhteita ja vähentää peltoviljelyn vesistökuormitusta.

Säätöojitusta tai sen kaltaisia menetelmiä on käytetty eri puolilla maailmaa vuosisatoja. Ruotsissa löytyy suosituksia avo-ojien purkuaukkojen padottamisesta kasvukaudella veden säästämiseksi kuivia aikoja varten 1700-luvulta. Suomessa ensimmäiset tutkimukset säätöojituksen käyttömahdollisuuksista avo- ja salaajissa tehtiin 1930- ja 1940-luvuilla (Kaitera 1942, Wäre 1947).

Aluksi säätöojitusta käytettiin kasvien vesitalouden parantamiseen, mutta 1970-luvun alussa tehdyt tutkimukset Yhdysvalloissa osoittivat säädöllä olevan myös vesiensuojelullisia hyötyjä. Tämän jälkeen säätöojituksen tutkimus ja käyttö ovat lisääntyneet eri puolilla maailmaa sekä humidisilla että aridisilla alueilla. Nykyisin säätöojitusta tehdäänkin ennen kaikkea ympäristönsuojelullisista syistä, sillä sen on todettu vähentäneen ravinne- ja torjunta-ainehuuhtoumia pinta- ja pohjavesiin tavanomaiseen ojitukseen verrattuna. Vedenalaisella ojituksella on myös estetty rautasaostumien kertymistä salaajiin ja happamuuden muodostumista happamilla sulfaattimailla. Säätöojituksella on estetty maan painumista eloperäisillä ojitetuilla mailla. Säätöojituksen on todettu myös vähentäneen tyyppipäästöjä ilmakseen eloperäisillä viljelymailla. Aridisilla alueilla menetelmää on käytetty kastelun yhteydessä vähentämään kasteluveden tarvetta ja suolojen kulkeutumista kuivatusvesien mukana.

Säädön piirissä voi olla yksittäinen peltolohko, laajempi viljelyalue tai kokonainen valuma-alue, jolloin patorakenteita asennetaan myös valtaojiin tai luonnonuomiin. Tällöin hankkeissa on otettava huomioon kaikki peruskuivatuksen piirissä olevat tilat ja uomien mahdollinen alapuolinen käyttö esimerkiksi kasteluveden ottoon.

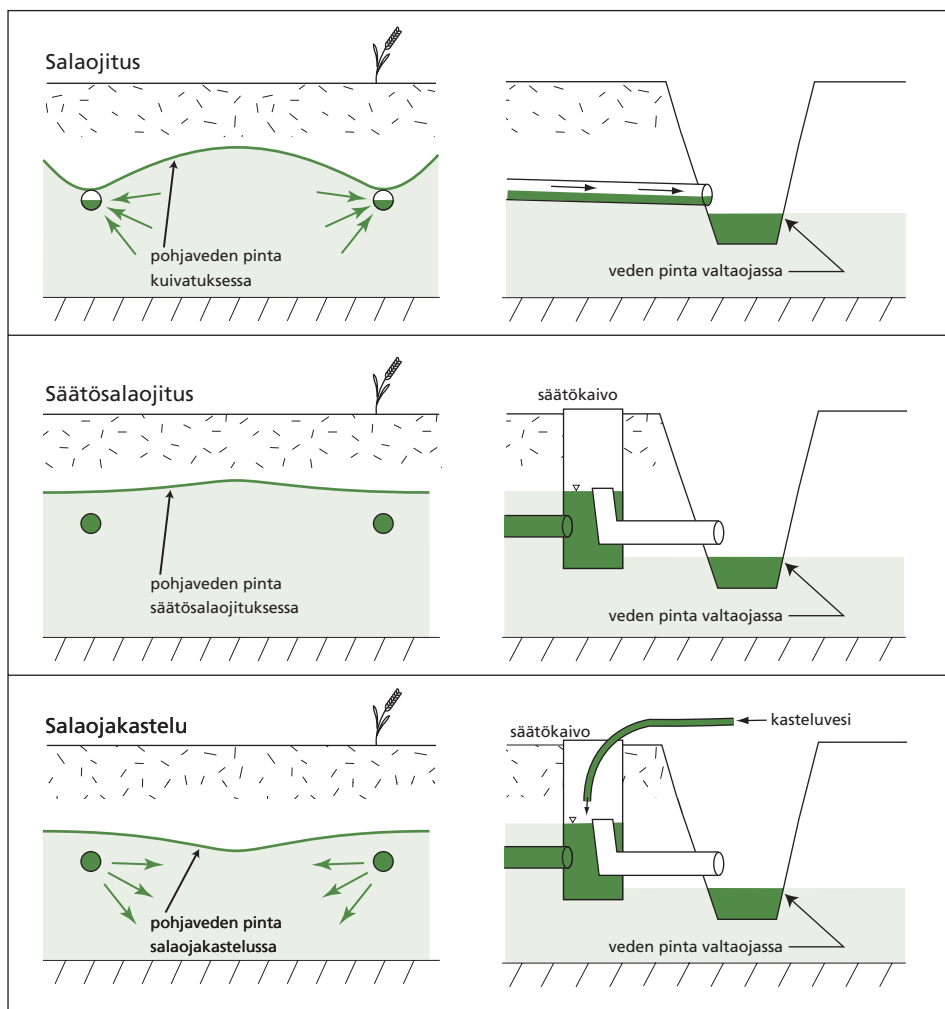
Suomessa säätösalaajitus yleistyi 1990-luvun puolivälin jälkeen, kun menetelmä otettiin mukaan maatalouden ympäristötukiohjelmaan vuonna 1995. Tällä hetkellä säätösalaajitettua peltoa on noin 70 000 hehtaaria, josta valtaosa on Pohjanmaalla ja Satakunnassa. Suomessa säätöojitukseen soveltuvaa viljelymaata on arvioitu olevan noin 600 000–800 000 hehtaaria riippuen siitä, kuinka kalteville pelloille menetelmän katsotaan soveltuvan. Tässä luvussa on keskitytty säätösalaajituksen käyttöön yksittäisessä salaajastossa, mikä on ollut yleisin tapa toteuttaa säätöojitusta Suomessa.

8.2 Säätösalaajituksen toimintaperiaate

Perinteisesti salaajitus mitoitetaan sen mukaan, että kuivatus on riittävän nopea sateisimpina ajanjaksoina sekä lumen ja roudan sulaessa. Säätöojitus poikkeaa tavanomaisesta ojituksesta siinä, että kuivatuksen tehokkuutta voidaan säädellä tarpeen mukaan kasvustosta ja sääolosuhteista riippuen. Useilla alueilla ojaston maksimaalista kuivatustehokkuutta, jolla turvataan riittävä kuivavara koneille ja estetään kasvuston vettymishaitat, tarvitaan vain ajoittain ennen kaikkea keväällä ja syksyllä. Vähäsateisimpina aikoina tavanomainen salaajitus saattaa toimia liiankin tehokkaasti, jolloin kasvukaudella menetetään kasveille

käyttökelpoista vettä. Kuivatusvesien mukana huuhtoutuu myös ravinteita, mikä on epäedullista sekä kasvustolle että ympäristölle.

Tavanomaisessa salaajituksessa kuivatuksen tehokkuus määräytyy ojavälin ja ojitusvyöyden perusteella. Pohjaveden pinnan noustessa vähintään salaajitusvyöyteen vesi virtaa salaajiin ja purkautuu laskuaukosta kunnes vedenpinta laskee alle ojitusvyöyden. Säätösalaajituksessa kokoojaojiin asennetaan säätökaivoja, joista purkautuvan veden määrää voidaan säätää erityyppisillä padotuslaitteilla. Padotuksen seurauksena valunta ojaston laskuaukosta estyy, jos pohjaveden pinta pysyy padotuskorkeuden tasossa tai sen alapuolella. Kun pohjavesi nousee padotuskorkeuden yläpuolelle, vettä purkautuu ojastosta kunnes pohjaveden pinta laskee padotuskorkeuteen. Säätöojituksessa pohjaveden pinnan aleneminen hidastuu tavanomaiseen ojitukseen verrattuna ja maan kosteus kasvaa koko profiilissa ja siten myös kasveille käyttökelpoisen veden määrä. Poistettaessa padotus kokonaan ojitus toimii tavanomaisen salaajituksen tavoin. Säätökaivojen määrä riippuu maanpinnan kaltevuudesta ja ojaston rakenteesta. Säätö voidaan toteuttaa myös kokoojaputkeen asennettavilla venttiileillä, jotka toimivat automaattisesti.



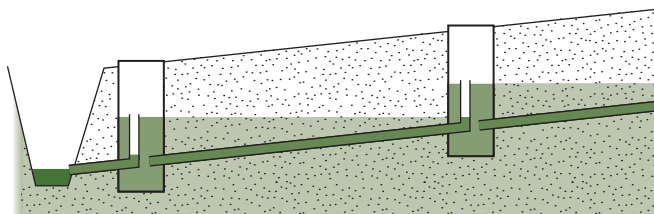
Kuva 8.1 Salaajituksen, säätösalaajituksen ja salaojakastelun periaatteet.

Kuivina kausina pohjavesi voi laskea usean metrin syvyyteen säätöojitetullakin alueella riippuen sadannasta, haihdunnasta sekä pohjaveden suotautumisesta. Pelkkä säätöojitus ei useimmiten takaa kasvien riittävää vedensaantia, mutta sillä voidaan vähentää kastelun tarvetta. Säätösalaajitus myös estää sadetuskasteluvesien purkautumisen salaajista. Salaajakastelulla pohjaveden pinta voidaan pitää halutulla korkeudella läpi kasvukauden, jos kasteluvettä on riittävästi saatavilla. Salaajakastelussa lisävetä pumpataan putkistoon vähäsateisina aikoina. Kasvukauden ulkopuolella ojasto toimii säätösalaajituksen tai tavanomaisen salaajituksen tavoin. Erityyppisten salaajitusten poikkileikkaukset ovat kuvassa 8.1 ja pituusleikkaus kuvassa 8.2. Peltoalueilla yleisesti käytetty säätökaivo on esitetty kuvassa 8.3.

Kasteluhankkeessa pellolta purkautuvia kuivatusvesiä voidaan varastoida erilliseen altaaseen, josta ne pumpataan takaisin pellolle. Menetelmää kutsutaan kuivatusvesien kierrätykseksi. Useimmiten altaan varastotilavuus kattaa vain osan kastelueden tarpeesta, sillä peltojen lähellä on harvoin sopivaa paikkaa riittävän suurien altaiden rakentamiseen. Suuren altaan rakentaminen on kallista eikä investointia välttämättä pystytä kuolettamaan sadon lisäyksellä. Kuivatusvesien kierrätyksessä lisäveden saantimahdollisuus joesta tai järvestä onkin välttämätön, jotta peltoja voidaan kastella täysipainoisesti läpi kasvukauden. Kuvisa 8.4 ja 8.5 on esitetty Pohjois-Pohjanmaalla toteutettu kuivatusvesien kierrätyshanke salaajakastelua käyttäen.

Salaajakastelua on toteutettu myös siten, että vettä on johdettu metsäalueilta varastoaltaaseen tai valtaojaan ja sieltä edelleen painovoimavirtauksena imuojiin ilman pumppausta. Kasteluhankkeissa varastoallas, pumpput ja lisäputket lisäävät tuntuvasti investointien käyttö kustannuksia säätösalaajitukseen verrattuna. Myös kastelun säätö vaatii enemmän työtä kuin pelkkä säätöojitus, mutta sillä on mahdollista saada suurempi sato kuin pelkällä säätösalaajituksella.

Kuva 8.2
Periaatepiirros
säätösalaajituksen
ja salaajakastelun
pituusleikkauksesta.



Kuva 8.3 Salaojaston kokoojaputken laskuaukossa sijaitseva säätökaivo ja sen vaikutuspiirissä oleva 2,5 hehtaarin peltoalue. (Kuvat Maija Paasonen-Kivekäs ja Rainer Rosendahl)

Varastoaltaiden suunnittelussa voidaan ottaa huomioon ympäristönsuojelullisia ja maisemallisia näkökohtia rakentamalla monimuotoisia altaita, joissa on mukana laskeutusallas- ja kosteikkoelementtejä. Keväällä ja kesällä peltoalueilta purkautuvien kuivatusvesien varastointi ja käyttö kasteluun on suotavaa vesiensuojelun kannalta.

Suomessa säätösalaajituksella ja salaajakastelulla pyritään lisäämään kasveille käyttökelpoisen veden määrää maaperässä ja vähentämään salaojien kautta tulevia ravinteiden ja muiden haitallisten aineiden, kuten torjunta-aineiden, huuhtoumia tavanomaiseen salaajitukseen verrattuna. Pohjaveden padotuksella torjutaan myös happamuuden vapautumista happamilla sulfaattimailla. Säättötoimenpiteillä voidaan siirtää kuormitusta vesistön kannalta mahdollisesti vähemmän haitalliseen ajankohtaan.

Säätösalaajituksen toimivuuteen vaikuttavat useat peltoalueen ominaisuudet sekä ilmasto- ja sääolosuhteet, jotka viljelykasvin ohella määräävät hankkeiden taloudellisen kannattavuuden. Koska säädöllä pyritään parantamaan tavanomaisen ojituksen toimintaa ja useat säätösalaajituksen toimintaan vaikuttavat tekijät ovat paikallisia, tulee säätöojituksen tekninen soveltuvuus arvioida kullekin peltoalueelle ja samoin siitä saatavat hyödyt suhteessa kustannuksiin ja mahdollisiin haittoihin.

Viljelijän kannalta ensisijainen tuotto-odotus on sadonlisäys sekä tasaisempi satotaso ja sadon laatu eri vuosina. Yhteiskunnan kannalta tavoitteena on lisäksi vesistökuormituksen vähentäminen, jonka perusteella Suomessa ja muissakin maissa, mm. Yhdysvalloissa ja Kanadassa, valtio on maksanut viljelijöille tukea säätösalaajituksen ja salaajakastelun asentamisesta ja käytöstä.

Kuva 8.4

Peltoalueelta purkautuvien kuivatusvesien varastoallas. Lisävettä kastelua varten johdetaan altaaseen viereisestä joesta. Altaasta vesi pumpataan yläpuolisen peltoalueen reunassa sijaitsevaan kaivoon, josta se virtaa painovoimaisesti kolmeen salaojastoon. (Kuva Maija Paasonen-Kivekäs)



Kuva 8.5

Salaajakasteltua hietapelttoa. Kasteluun käytettävät salaajat sijaitsevat noin 0,6...0,7 metrin syvyydessä ja kuivatusojat noin 1,1 metrin syvyydessä. Paikoitellen vesi on noussut kapillaarisesti perunapellon vakojen pohjalle asti. (Kuva Maija Paasonen-Kivekäs)



8.3 Säätösalaojituksen edellytykset

Säätösalaojitus soveltuu vain tiettyntyyppisille peltoalueille, jotka muutenkin hyötyisivät ojituksesta. Keskeiset tekijät arvioitaessa säätöojituksen käyttökelpoisuutta tietyllä peltoalueella ovat: pohjaveden pinnan luontainen syvyys, maanpinnan kaltevuus, maakerrosten vedenjohtavuus ja vedenpidätyskyky, ojituksen tarve yleensä ja olemassa oleva ojitus. Näitä tekijöitä koskevat suositukset, joita esitetään seuraavassa, pätevät pitkälti myös avojiin tehtäville säätöhankkeille.

Säätösalaojitus soveltuu yleensä vain alueille, joilla pohjaveden pinta on ainakin ajoittain suhteellisen lähellä maanpintaa ja joilla salaojitus on jo ennestään tai se on perusteltua asentaa kuivatuksen vuoksi. Pohjaveden pinnan syvyys peltoalueella riippuu maan lajitekoostumuksesta ja rakenteesta, jotka vaikuttavat maan vedenjohtavuuteen ja vedenpidätyskykyyn, topografiasta ja sääolosuhteista, ennen kaikkea sadannasta ja haihdunnasta. Jos pohjaveden pinta nousee vain satunnaisesti salaojitussyvyyteen kasvukaudella, niin säätösalaojituksella ei voida juurikaan parantaa kasvien vesitaloutta.

Tietyissä olosuhteissa maahan padotettu pohjavesi voi suhteellisen nopeasti suotautua pois peltoalueelta, jolloin siitä ei ole pitkäaikaista hyötyä kasvustolle. Vesistökuormituksen kannalta veden suotautuminen syvemmälle maaperään on kuitenkin hyödyllistä, sillä se vähentää salaojavaluntaa ja lisää maaperän varastotilavuutta tulevia sateita varten. Veden kulkeutuminen paksujen ja usein vähähappisten maakerrosten kautta edistää denitrifikatiota, jossa nitraattityppi pelkistyy kaasumaiseksi typeksi ja poistuu ilmakehään. Suotautumisen aikana fosforia ja torjunta-aineita voi pidättyä pohjamaahan.

Säätöojitettavan peltoalueen topografian tulee olla hyvin tasainen, jotta padotus vaikuttaisi mahdollisimman suurella alueella ja samanlaisesti pellon eri osissa. Tasaiset kosteusolot mahdollistavat kasvuston yhtenäisen kehittymisen sekä tasaisen satotason ja sadon laadun eri osissa peltoa. Maan pinnan kaltevuuden suositusarvo on alle 0,5 % ja ehdotettu maksimina pidetään 2 %. Nämä arvot perustuvat ennen kaikkea taloudellisiin näkökohtiin. Suuret kaltevuudet vaativat lukuisia säätörakenteita, joiden asentaminen on kallista ja ylläpito työlästä. Useat säätölaitteet itse peltoalueella hankaloittavat viljelytoimenpiteitä ja niiden ympäristöön kasvaa helposti rikkaruohoja. Viättävillä alueilla vaakasuuntainen suotautuminen lisääntyy, jolloin padotuksen teho vähenee useista padotuslaitteista huolimatta. Jos säätö tehdään jo olemassa olevaan salaojastoon, on otettava huomioon ojaston imuojien ja kokoojaputken kaltevuus suhteessa maanpinnan viettoon. Jos imuojat kulkevat kaltevuuden suunnassa ja kokoojaputki kaltevuutta vastaan, niin tehokasta säätöä kokoojaputkesta imuojien latvoille on vaikea saada aikaiseksi.

Maan vedenjohtavuus vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti maan pinnalle satanut vesi imeytyy maahan ja virtaa syvemmälle maaperään ja purkautuu salaojista ja kuinka nopeasti kapillaarinen vesi nousee pohjavesivyöhykkeestä maan pintaa kohti. Veden virtaus salaojiin riippuu ennen kaikkea maan vaakasuuntaisesta vedenjohtavuudesta. Jos vedenjohtavuus on hyvin pieni, maasta ei poistu vettä tarpeeksi nopeasti salaojiin, vaikka padotuskorkeutta lasketaan tai padotus poistetaan kokonaan. Tällöin seurauksena saattaa olla vettymishaittoja kasvustolle rankkasateiden jälkeen. Riittävä kuivatus perustuu samoihin kriteereihin kuin tavanomaisen salaojituksen suunnittelussa (ks. Luku 7). Vaakasuuntainen vedenjohtavuus on keskeinen tekijä myös silloin, kun putkistoa käytetään salaojakasteluun. Huonosti vettä johtavassa maassa vesi ei imeydy putkesta maaperään riittävän nopeasti, vaan sitä alkaa kertyä salaojakaivannon paremmin vettä johtavaan täyttömaahan, josta se purkautuu maanpinnalle. Tällöin kastelun vaikutus ulottuu vain lähelle salaojaputkea, missä saattaa syntyä vettymishaittoja. Maan hyvä pystysuuntainen vedenjohtavuus ja suuri kapillaarinen nousukorkeus puolestaan auttavat siinä, että kasvi voi hyödyntää tehokkaasti myös pohjavesivaroja. Veden kulkeutuminen pohjaveden pinnasta juuristokerrokseen määräytyy

vedellä kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden perusteella. Se vaikuttaa myös sadeveden imeytymiseen maanpinnalla ja syvemmällä maassa.

Usein nyrkkisääntönä esitetään, että säätösalaajitus edellyttää vähintään vedenjohtavuutta 0,5 metriä vuorokaudessa, joka vastaa karkean hiedan vedenjohtavuutta. Maan lajitekoostumuksen perusteella säätösalaajitus soveltuukin lähinnä karkeille kivennäismaille. Vedenjohtavuuteen vaikuttaa kuitenkin myös maan rakenne (ks. Luku 2 ja 3), joten pelkkä maalaji saattaa antaa virheellisen kuvan todellisesta tilanteesta. Makrohuokokset toisin sanoen lierojen onkalot, juurikanavat ja murujen väliset raot ovat keskeinen tekijä siinä, kuinka nopeasti vesi virtaa maassa. Pienemmät huokokset määrittävät maan veden varastointikyvyn. Tärkeää onkin tietää pohjamaan vedenjohtavuus kenttäolosuhteissa eli ns. tehokas vedenjohtavuus.

Hyväkuntoisissa savimaissa, joiden pohjamaassa on runsaasti pysyviä makrohuokosia ja rakoilua, säätösalaajitus saattaa olla mahdollista. Yleensä makrohuokoisuus vähenee kuitenkin jyrkästi syvyyden suhteen paitsi urpasavimaissa. Niiden kuivuessa syntyvät halkeamat pysyvät avonaisina, vaikka maa joutuisi uudelleen veden alle (Keso 1940). Muissa savimaissa kuivumishalkeilun väheneminen säätösalaajituksen ja varsinkin salaajakastelun seurauksena saattaa aikaa myöten johtaa maan rakenteen heikkenemiseen.

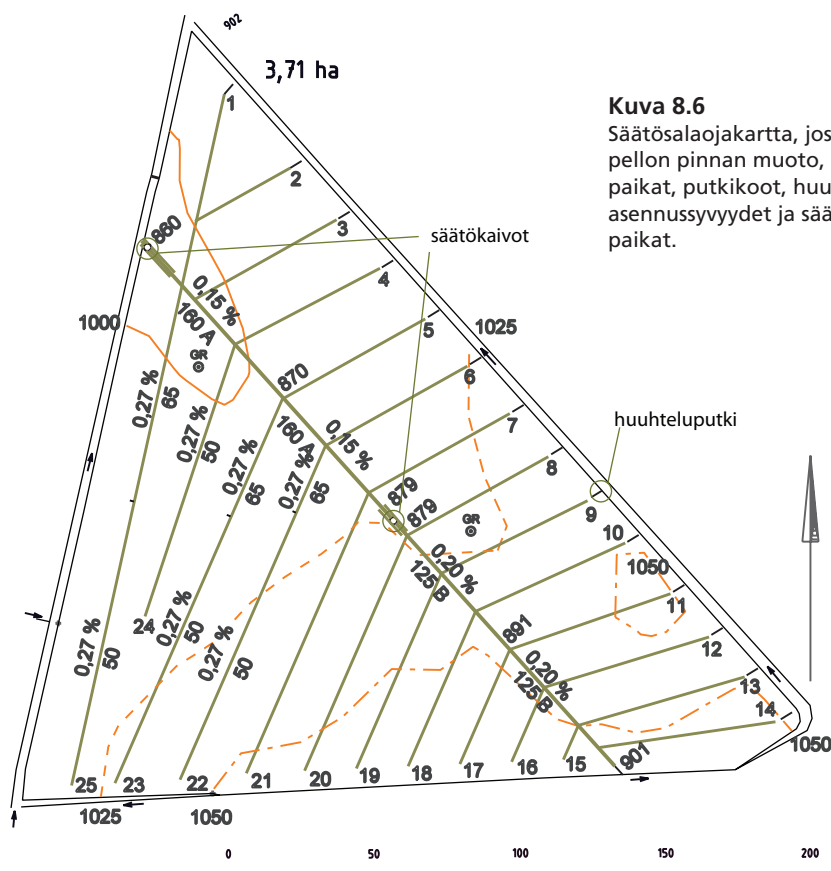
8.4 Säätösalaajituksen suunnittelu ja toteutus

Säätösalaajitus tai salaajakastelu voidaan toteuttaa joko olemassa olevaan salaajastoon tai täysin uutena ojituksena. Kokonaan uuden hankkeen suunnittelussa voidaan paremmin ottaa huomioon menetelmän erityistarpeet, kuten putkiston ja säätökaivojen sijoittelu pellon kaltevuuteen nähden sekä imuojen välinen etäisyys, syvyys ja kaltevuus. Hankkeen alussa selvitetään vanhan ojaston toimivuus ja tehdään ojitustoimenpiteet sen mukaan. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon maanpinnan muoto, maalaji, vedenjohtavuus ja pohjavedenpinnan syvyys. Selvityksessä kartoitetaan alueet, joilla on ongelmia kuivatuksessa, ja ongelmien syyt, kuten putkien tukkeentuminen, maan tiivistyminen ja riittämätön kuivatus. Korjaustoimenpiteinä tulevat kysymykseen esim. huuhtelu, täydennysojitus notkelmiin ja sorasilmäkkeet. Vanhoja ojituksia joudutaan yleensä täydennysojittamaan varsinkin salaajakastelua varten. Peltö on ojitettava kokonaan uudelleen esimerkiksi silloin, jos tiiliputkien liitokset ovat rautasaostumien tukkimia.

Pellon pinta tasataan säätösalaajitusta ja salaajakastelua varten, jotta maan kosteus olisi mahdollisimman samanlainen eri osissa peltoa. Peltö jaetaan korkeusvyöhykkeisiin, joiden perusteella päätetään säätökaivojen paikat ja lukumäärä. Salaajakastelussa myös piiroijien padotus on tärkeää.

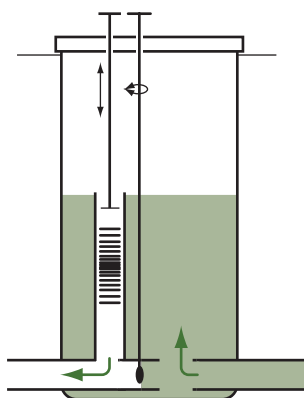
Edellä esitettyjen selvitysten perusteella suunnitellaan ojien sijainti, ojaväli, ojasyvyys, putkikoot, huuhtelaukot, ympärysaine ja säätökaivot. Suunnitelmakarttaan merkitään maanpinnan muoto sekä ojien ja kaivojen sijainti (kuva 8.6). Lisäksi suunnittelija laatii hankkeesta kustannusarvion, tarvikeaineluettelon, työselostuksen ja säätöohjeet. Salaajakastelussa tulee suunnitella myös lisäveden hankinta.

Jos säätöojitus tehdään uutena ojituksena, käytetään 20...30 % tiheämpää ojaväliä kuin tavanomaisessa salaajituksessa. Muutettaessa vanha ojasto säätösalaajitukseksi asennetaan pellolle usein lisää imuojia, mutta paikoitellen vain vettymisongelmista kärsivät kohdat täydennysojitetaan. Jos ojastoa käytetään myös salaajakasteluun, ojaväliä voidaan pienentää jopa puoleen. Tällöin kosteus jakautuu tasaisemmin padotuksen aikana. Vettä poistuu toisaalta nopeammin maasta, kun tarvitaan tehokasta kuivatusta. Tämä on tärkeää sen vuoksi, ettei pääsisi syntymään vettymishaittoja pohjaveden ollessa jo valmiiksi korkealla runsaiden sateiden sattuessa. Happamilla sulfaattimailla täydennysojituksen tarve on tarkkaan harkittava, sillä pohjamaan vedenjohtavuus on todennäköisesti kasvanut aikaa myö-



Kuva 8.6

Säätösalaajakartta, josta ilmenee pellon pinnan muoto, salaojien paikat, putkikoot, huuhteluaukot, asennussyvyudet ja säätökaivojen paikat.



Kuva 8.7 Säätökaivojen periaate.

ten maan kuivatustilan ja rakenteen parantuessa, eikä lisäojitusta silloin tarvita etenkin pelkässä säätösalaajituksessa.

Tiheämpää ojaväliä kompensoi tarkempi säädön ajoitus, mikä tosin vaatii enemmän työtä. Kuivatustehokkuutta voidaan lisätä vähentämällä padotusta riittävän ajoissa ennen rankkasateita. Varsinkin kasvukaudella viljelijän intressinä on säästää pellossa olevaa vettä mahdollisimman paljon siltä varalta, ettei sateita tulekaan. Tällöin riskinä on, että padotusta vähennetään liian myöhään ja syntyy vettymishaittoja.

Kun säätösalaajitus toteutetaan olemassa olevaan ojaan, kokoojaputken läpimitta tulee tarkistaa. Säätökaivon laskuaukko ja läpiviennit on myös mitoitettava tarpeeksi suureksi, jotta vesi pääsee virtaamaan vapaasti, kun tarvitaan nopeaa kuivatusta.

Säätösalaajituksen ja salaojakastelun toiminnan kannalta on edullista, että imuojat asennetaan korkeuskäyrän suuntaisesti ja niiden kaltevuus on mahdollisimman pieni. Näin padotuksesta saadaan suurin teho. Toisaalta kaltevuuden on oltava niin suuri, ettei maa-ainesta kerry putkiin. Putkien minimikaltevuuden tulee olla sellainen, että virtausnopeus on vapaavirtauksessa vähintään $0,15 \text{ m s}^{-1}$.

Säätölaitteina käytetään useimmiten kokoojaputkeen asennettuja säätökaivoja, joissa kokoojaan on liitetty padotus-/ylivirtaamaputki, liukuventtiili tms. (kuva 8.7). Padotuskorkeutta voidaan säätää joko liukuvasti tai asteittain. Säätökaivona voidaan käyttää joko

muovi- tai betonikaivoa. Säätöputket tehdään tiivisteillä varustetuista putkiyhteistä. Muovisia säätökaivoratkaisuja on saatavissa kaupallisina tuotteina. Kaivojen kannen pitää olla helposti käsiteltävä ja kaivon suulle asennetaan erillinen suojalevy, joka estää putoamisen kaivoon. Säätö on mahdollista toteuttaa myös suoraan kokoojaputkiin asennettavilla venttiileillä (kuva 8.8), joiden etuna on se, että ne ovat täysin maan alla eivätkä haittaa peltotöitä. Yhden venttiilin avulla voidaan padottaa vettä noin 0,3 m alajuoksun veden tasoon verrattuna. Venttiilien lisäksi kokoojan laskuaukossa on käytettävä säätökaivoa. Venttiilit ovat olleet koekäytössä Pohjanmaalla vuodesta 2013 alkaen.

Ojastossa tarvittavien kaivojen määrä riippuu maanpinnan kaltevuudesta. Kaivoja asennetaan yleensä yksi 0,4–0,6 metrin korkeustason nousua kohti. Kaivon paikka valitaan niin, että se haittaa mahdollisimman vähän peltotöitä, pysyy hyvin paikallaan, kallistumisvaaraa ei ole ja kunnossapito on helppoa. Jos kaivo on keskellä ojastoa, se on sijoitettava imuojiin nähden siten, että sen etäisyys imuojista on riittävä. Kaivon liitosputket kokoojaojaan ovat reiätöntä putkea riittävältä matkalta, eikä salaojasoraa saa käyttää asennuksessa.

Kaivon asennus on tehtävä huolellisesti ohivirtausten vähentämiseksi ja routavaurioiden välttämiseksi. Kaivon pohjaan tulee tehdä antura ja ympäröidä kaivo routimattomalla maalajilla. Routavaurioiden korjaaminen jälkikäteen on hankalaa ja kallista.

Jos imuojat purkautuvat suoraan valtaojaan, niin padotuslaite tai -laitteet asennetaan siihen. Tällöin varastotilavuus lisääntyy ja valtaojan vettä voidaan käyttää kasteluun. Valtaojaan on mahdollista myös pumpata vettä salaojakastelua varten. Yksittäisten imuojen säätö voidaan toteuttaa asentamalla L-putki laskuaukkoon, jolloin imuojan alapää tehdään reiättömästä putkesta.



Kuva 8.8 Säätöventtiilin asennus (ylh.), Säätöventtiilin pienoismalli (alh.), josta näkyy laitteen toimintaperiaate. Kun venttiili on veden täyttämä kellukkeet kääntävät läpän, joka sulkee venttiilin tiettyyn paineeseen asti. (Kuvat Rainer Rosendahl)

8.5 Säätösalaojituksen käyttö

Säätösalaojituksen tavoitteena on, ettei peltoa kuivateta yhtään enempää kuin on välttämättöntä kasvuston ja koneiden edellyttämän kuivavaran kannalta. Tämä edellyttää viljelijältä padotuksen asianmukaista hoitoa sää- ja kasvuolojen sekä viljelytoimenpiteiden mukaan. Siihen vaikuttavat myös maaperän ominaisuudet ja pellon topografia. Keskeinen tekijä padotuskorkeuden valinnassa on säätökaivon vedenpinnan ja pellon pohjaveden pinnan korkeuden välinen yhteys. Valittu padotuskorkeus on niin kutsuttu tavoitekorkeus. Käytännössä pohjaveden pinta ei nouse tavoitekorkeuteen kuin ajoittain sadannasta, haihdunnasta ja pohjaveden suotautumisesta riippuen.

Keväällä säätösalaojituksen padotuskorkeus määräytyy koneiden vaatiman kantavuuden mukaan. Jos maa ei ole riittävän kuivaa koneita varten, niin vaarana on, että pellolle muodostuu tiivis, huonosti vettä läpäisevä maakerros muokkauskerroksen alapuolelle. Sen

seurauksena pellon kuivuminen hidastuu entisestään, juurten kasvu syvemmälle maaperään estyy ja pintavalunta sekä eroosio lisääntyvät.

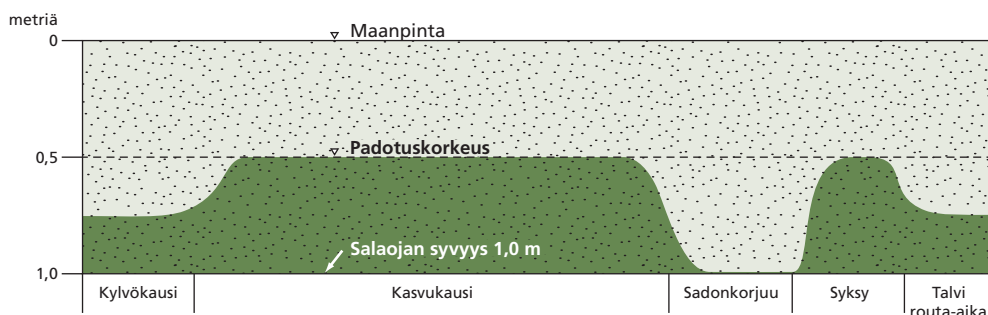
Kylvötöiden jälkeen määrääväksi tekijäksi tulee kasvien vesitalous. Korkealla oleva pohjavesi kasvukauden alussa saattaa rajoittaa juurten kehittymistä, mikä vaikeuttaa kasvien veden saantia myöhemmin kesällä. Toisaalta vedenpinta olisi pidettävä niin korkealla, että siitä on hyötyä kasveille. Kevätkosteuden varastoiminen peltoon on tärkeää senkin vuoksi, että sadannan vajuus on keskimäärin suurin kasvukauden alussa. Suotuisa maan kosteus edistää siementen itämistä.

Kasvukaudella maa saattaa kärsiä vettymishaitoista rankkasateiden jälkeen, minkä vuoksi padotuskorkeutta on laskettava hyvissä ajoin ennen sateita. Jos maassa ei ole riittävästi varastotilavuutta, niin padotus voi johtaa pintavalunnan lisääntymiseen. Toisaalta kesällä pohjavedenpinta saattaa painua niin syvälle, ettei säätösalaojituksella voida vaikuttaa kasvien käytettävissä olevaan vesimäärään. Suomessa kesän sademäärät ja niiden ajallinen ja alueellinen jakautuminen vaihtelevat suuresti, joten kasvukaudella säätökorkeutta voidaan joutua muuttamaan useitakin kertoja. Kriittisin ajanjakso kesällä vesistökuormituksen kannalta on lannoituksen jälkeiset rankkasateet, jolloin valumavesien ravinnepitoisuudet ovat poikkeuksellisen korkeita ja suhteellisen pienikin salaojavalunta aiheuttaa suuria huuhtoumia.

Kasvukauden lopussa pohjaveden pinnan pitäisi olla mahdollisimman syvällä, jotta maaperään syntyy varastotilavuutta syyssateita varten. Varsinkin salaojakastelussa veden johtaminen imuoihin on lopettava ajoissa. Ennen sadonkorjuuta on varmistettava, että maan kantavuus on riittävä. Jos elo-syyskuu on sateinen, padotus on purettava joko kokonaan tai ainakin osittain. Vähäsateisina kesinä ja syksyinä pohjavesi on useimmiten niin syvällä, ettei padotuksella ole mitään merkitystä sadonkorjuun aikaan.

Syysmuokkauksen jälkeen padotuskorkeus asennetaan korkeimmilleen, jotta ojaston laskuaukosta purkautuisi mahdollisimman vähän valumavesiä ja niiden mukana tulevia ravinteita. Riskinä saattaa tosin olla pintavalunnan ja eroosion lisääntyminen, jos pohjavesi on jatkuvasti korkealla ja tulee runsaita sateita. Talvea vasten padotus on syytä poistaa sekä kaivon että putkien jäätymisvaaran vuoksi. Leutoina talvina padotusta voi olla päällä läpi talven, mutta lumien ja roudan sulaessa padotus poistetaan muutamaksi päiväksi kokonaan. Ohjeellinen padotuskorkeus eri vuodenaikoina on esitetty kuvassa 8.9.

Salaojakastelussa vettä voidaan johtaa putkistoon jatkuvasti, jolloin pohjaveden pinta pysyy tietyllä korkeudella koko ajan. Pellolla, jonka pohjamaan vedenjohtavuus on suuri, pohjaveden pinnan pitäminen vakiotasolla edellyttää jatkuvaa ylijuuksutusta säätökaivoista. Kastelu voidaan toteuttaa myös niin, että pohjaveden pinta nostetaan esimerkiksi 50 cm:n etäisyydelle maanpinnasta muutaman päivän ajaksi, minkä jälkeen kasteluveden syöttö lopetetaan ja vedenpinnan annetaan laskea lähelle salaojitussyvyyttä (ei kuitenkaan sen alle), ennen kuin kasteluvettä syötetään uudelleen putkistoon. Tämä on suositel-



Kuva 8.9 Sädön ohjeellinen ajoitus ja padotuskorkeus eri vuodenaikoina.

tavaa juuriston hyvän kasvun ja riittävän hapensaannin turvaamiseksi. Pohjaveden korkeuden pysyvyyden merkitys on eri kasveilla erilainen. Pääsääntöisesti korkeuden vaihtelu on eduksi, koska tällöin juuristo pyrkii mahdollisimman syvälle. Esimerkiksi porkkana voi jäädä lyhyeksi, jos pohjavesi on koko kasvukauden korkealla. Salaojakastelun ohjauksessa on tarkasti seurattava sade-ennusteita, sillä runsaat sateet ja korkealla oleva pohjaveden pinta johtavat herkästi vettymishaittoihin. Syystöiden jälkeen salaojakasteltujen peltöjen padotusta säädetään samalla tavalla kuin säätösalaojituksessa.

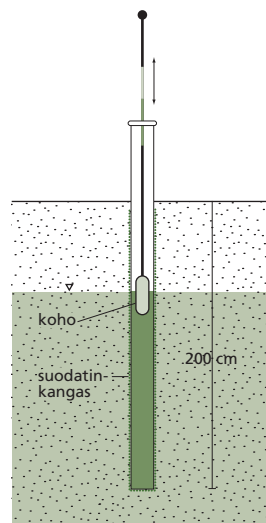
Kaivojen padotuskorkeutta säädetään yleensä käsin. Automaattinen säätö yleistyneen varsinkin salaojakastelussa laitteistojen kehittyessä ja hintojen laskiessa, mutta toistaiseksi se on kehitysasteella ja taloudellisesti kannattavaa vain erittäin arvokkailla kasveilla.

Säätösalaojituksen ohjaus edellyttää pohjavesimittauksia itse peltoalueella. Kasvuston ja koneiden kantavuuden kannalta tärkein tekijä on maan pintakerrosten kosteus, jonka mittaaminen on kuitenkin hankalaa. Kosteutta arvioidaankin usein pohjaveden pinnan syvyyden perusteella, joka on peltoalueilla huomattavasti helpommin mitattavissa kuin maan kosteus. Pohjaveden syvyydelle pellon eri kohdissa ja säätökaivon veden korkeudelle saadaan myös määrättyä yksikäsitteinen yhteys. Pohjaveden havaintoputket asennetaan yleensä salaojien puoliväliin, jossa vedenpinta on korkeimmillaan. Aluksi putkia kannattaa asentaa useampia, jotta saadaan käsitys pohjaveden pinnan syvyydestä erityisesti kriittisillä alueilla, kuten painanteissa, sekä vaihtelusta pellon eri osissa. Myöhemmin säädön ohjaukseen riittää muutama edustava putki koko ojaiston alueella.

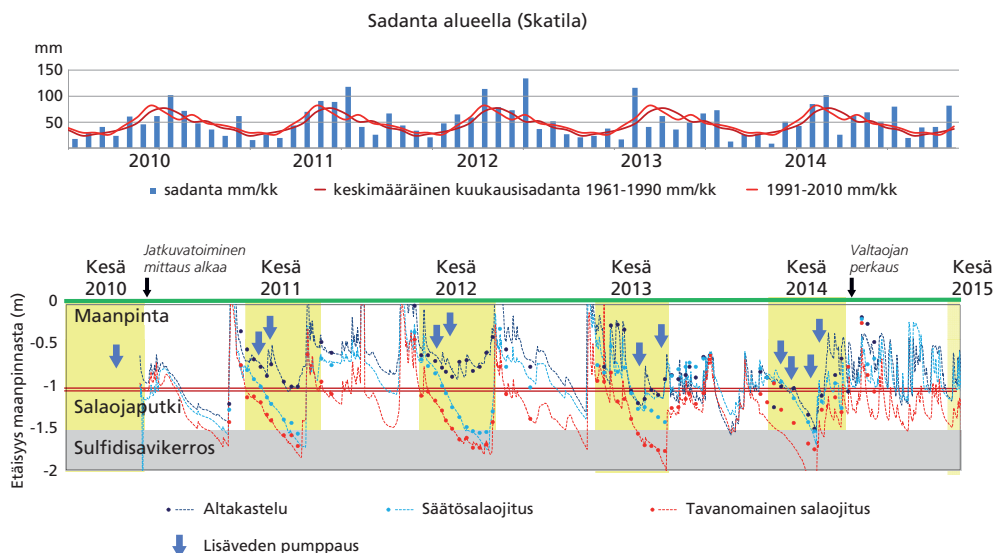
Havaintoputki on yleensä halkaisijaltaan 30-50 mm:n muoviputki ja 1,5-3,0 metriä pitkä (kuva 8.10). Putki kannattaa ympäröidä karkealla hiekalla tai suodatinkankaalla, jotta putkeen ei kerry maa-ainesta. Putken ympärys on tiivistettävä huolellisesti maanpinnalta noin 30-50 cm syvyyteen asti (jankon alapuolelle), ettei pintavaluntavesi pääse oikovirtauksena putkeen. Havaintoputket hankaloittavat peltotöitä. Jotkut viljelijät poistavat putket sadonkorjuun ja muokkaustöiden ajaksi ja asentavat ne uudelleen loppukeväällä. Käytössä on myös putkia, joiden yläosa voidaan poistaa peltotöiden ajaksi.

Vedenpinnan korkeutta pohjavesiputkissa ja säätökaivoissa mitataan useimmiten käsin esimerkiksi asteikolla varustetulla muoviputkella tai digitaalisella mittarilla. Mittauksia kannattaa tehdä ainakin kerran viikossa ja sateisina aikoina tiheämmin. Mittaus voidaan myös automatisoida käyttäen sähköisiä antureita ja dataloggeria, jolloin saada selville lyhytaikaisetkin vaihtelut vedenpinnan korkeudessa. Tiedot dataloggerilta voidaan siirtää esimerkiksi GSM-yhteydellä tietokoneeseen. Automaattista seurantaa käytettäessä on huolehdittava antureiden säännöllisestä kalibroinnista, jotta mittausaineisto olisi mahdollisimman luotettava. Lisäksi mittausaineiston analysointi edellyttää omia ohjelmistojaan. Kuvassa 8.11 on esimerkki pohjavedenpinnan syvyyden vaihtelusta eri salaojitusmenetelmissä happamalla sulfaattimaalla olevilla peltoalueilla Pohjanmaalla.

Säätökaivojen padotuskorkeudelle on edellä annettu ohjeellisia arvoja, mutta pitkälti se riippuu paikallisista olosuhteista. Viljelijä omaksuu tarvittavat säätötoimet kokemuksen myötä muutaman vuoden aikana. Viljelijän havainnot ja muistiinpanot sadannasta ja muista säätekijöistä, vedenpinnan korkeudesta säätökaivossa ja pohjavesiputkissa, salaoja- ja pintavalunnasta sekä sadon määrästä ja laadusta ovat ensiarvoisen tärkeitä, jotta säätöojituksen toiminnasta saadaan systemaattinen käsitys kussakin ojaistossa.



Kuva 8.10 Havaintoputki pohjaveden tarkkailua varten säätöojitetulla alueella.



Kuva 8.11 Kuukausisadanta (Korhonen ja Haavanlammi 2012) ja pohjaveden pinnan syvyys maanpinnasta tavanomaisesti salaojitetulla, säätösalaajitetulla ja altakastellulla peltoalueella happamalla sulfaattimaalla Söderfjärdenin koekentällä Pohjanmaalla. Nuolet osoittavat kasteluveden syötön ajankohdan salaojastoon. (Österholm ym. 2015, kuvan päivitys kesään 2015 Virtanen ym. 2015).

8.6 Säätösalaajituksen vaikutukset

Säätösalaajituksen vaikutuksia pellon hydrologiaan, ravinnekuormitukseen, kasvien kasvuun ja happamuuden vapautumiseen happamilta sulfaattimailta on tutkittu sekä kenttäkokeilla että laskennallisesti matemaattisia malleja käyttäen. Laajaa kokeellista tutkimusta on tehty varsinkin Yhdysvalloissa ja Kanadassa.

Säätösalaajitus on useimmissa tutkimuksissa vähentänyt salaojavaluntaa. Pintavalunta on tosin lisääntynyt tietyissä olosuhteissa, mutta silti kokonaisvalunta (salaoja- ja pinta- valunnan summa) on yleensä pienentynyt tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna. Pohjois-Carolinassa Yhdysvaltojen itärannikolla tehdyissä kenttäkokeissa vuotuinen valunta säätösalaajitetuilta pelloilta oli noin 30 % pienempi kuin tavanomaisesti salaojitetulta peltoilta, kun säätösalaajitusta käytettiin läpi vuoden (Evans ym. 1995). Keskimäärin 40 %:n vähenemisiä on saatu Ohiossa Yhdysvaltojen keskiosassa (Fausey ym. 2004).

Valunnan väheneminen voi johtua useammasta tekijästä. Säädön vaikutuksesta maan kosteus ja veden viipymä maaperässä kasvavat, minkä seurauksena kasveille on enemmän vettä saatavilla ja haihdunta lisääntyy. Haihdunnan lisäys ei yksinään useimmissa tapauksissa selitä salaojavalunnan vähenemistä, vaan maahan padottunut vesi voi suotautua hitaana pohjavesivirtauksena pois peltoalueelta, kun veden vapaa virtaus salaojastosta estetään. Jos alueella ei esiinny merkittävää pohjaveden suotautumista, niin sateiden sattuessa ja haihdunnan ollessa vähäistä pohjavesi voi nousta hyvinkin korkealla eikä varastotilavuutta ole enää riittävästi. Tällöin riskinä on pintavalunnan lisääntyminen, jos padotuskorkeutta ei alenneta riittävän ajoissa.

Useimpien tutkimusten mukaan säätösalaajituksella ei ole ollut juurikaan vaikutusta salaojaveden kokonaistypen pitoisuuksiin, mutta paikoitellen se on pienentänyt nitraattityypen pitoisuuksia keskimäärin 10–20 % tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna. Nitraattityypen määrää maassa säätelevät reaktiot riippuvat melko suoraviivaisesti maan kosteu-

desta (ks. kohta 4.6 Typpi). Märässä vähähappisessa maassa nitraattityppi pelkistyy kaasumaiseksi typeksi denitrifikaatioreaktiossa. Tällöin huuhtoumisaltista (ja kasveille käytökelpoista) nitraattityppeä poistuu maasta ilmakehään, minkä seurauksena maa- ja pohjaveden nitraattitypen pitoisuudet pienenevät. Typpikaasun (N_2) ohella reaktiossa muodostuu dityppioksidia (N_2O), joka on kasvihuonekaasu. Muodostuvien kaasujen osuudet vaihtelevat mm. maan happitilanteen, lämpötilan ja pH:n mukaan. Maan kosteudella on vaikutusta myös orgaanisen typen mineralisaatioon (ammonifikaatio) ja ammoniumtypen hapettumiseen nitraatiksi (nitrifikaatio), joten säädön nettovaikutus maan nitraattitypen määrään on monisyinen.

Säätösalaojituksella ei ole myöskään todettu olevan juurikaan vaikutusta salaojastosta purkautuvan veden kokonaisfosforipitoisuuksiin. Säätösalaojituksen on todettu jopa lisänneen fosforipitoisuuksia, mutta avo-ojissa toteutetun säädön vähentäneen niitä. Märissä ja hapen puutteesta kärsivissä maissa fosforia voi liueta maaveteen Fe-oksidiin pinnoilta, kun Fe^{3+} pelkistyy Fe^{2+} :ksi. Toisaalta säätöojitus lisää veden viipymää maassa, mikä mahdollisesti edistää liukoisen fosfaattifosforin pidättymistä pohjamaahan ja vähentää sen huuhtoutumista.

Typpi- ja fosforihuuhtoumien vähenemä säätösalaojitetuilta alueilta on johtunut pääasiassa salaojavalunnan pienentymisestä tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna. Pohjois-Carolinassa tehdyissä kokeissa vuotuiset kokonaistypen huuhtoumat säätösalaojitetuilta alueilta olivat keskimäärin 45 % pienempiä kuin tavanomaisesti salaojitetuilta pelloilta (Evans ym. 1995). Vastaava vähenemä kokonaisfosforin osalta oli noin 35 %. Ohiossa tehdyissä kokeissa säätöojitus vähensi vuotuista salaojista tulevaa nitraattitypen huuhtoutumaa 45 % tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna (Fausey ym. 2004).

Happamilla sulfaattimailla säätösalaojituksella padotettu pohjavesi hidastaa hapen kulkeutumista syvemmällä oleviin potentiaalisesti happamiin maakerroksiin. Tällöin happamuuden vapautuminen hidastuu tai lakkaa, jolloin myös metalliyhdisteiden liukeneminen maaveteen vähenee. Säätösalaojituksen vaikutus happamuuden vähenemiseen riippuu pitkälti siitä, kuinka paljon ja kauan padotus nostaa pohjaveden pintaa ja kuinka syvällä potentiaalisesti happamat kerrokset ovat. Maaperäolosuhteista sekä sadannan ja haihdunnan suhteesta riippuen padotuksen vaikutus saattaa olla suhteellisen lyhytaikainen. Näissä maissa hapettuneiden maakerrosten veden johtavuus on yleensä hyvä maan rakenteesta johtuen ja vähäsateisina kausina pohjavesi voi laskea usean metrin syvyyteen, mutta tällöinkin säätösalaojitus voi lyhentää hapettumiselle mahdollista ajanjaksoa. Salaojakastellulla vedenpinta on mahdollista pitää happamuutta vapauttavien kerrosten yläpuolella kuivinakin kausina. Suotautumishäviöiden vähentämiseksi on käytetty ratkaisua, jossa asennetaan muovikalvo salaojakastellun pellon ja valtaojan väliin. Pohjaveden noston vaikutusta happamien sulfaattimaiden reaktioihin ja valumavesien laatuun on Suomessa tutkittu sekä lysimetrikokeissa että useissa kenttäkokeissa Pohjanmaalla (esim. Bärlund ym. 2004, Virtanen 2015, Österholm ym. 2015). Kuvassa 8.11 on esitetty pohjaveden pinnan vaihtelu säätösalaojituksessa, altakastelussa ja tavanomaisessa salaojituksessa happamalla sulfaattimaalla olevilla peltoalueilla.

Säätösalaojituksella voidaan vähentää kasvuston lyhytaikaista kuivuusstressiä. Suurin hyöty saadaan kasvukaudella, jolloin kuivuuskaudet ovat lyhyitä. Sateisina kesinä vettä on riittävästi maassa ilman padotustakin. Suurimmillaan säätösalaojituksella on saatu 10–20 % sadonlisäyksiä. Etelä-Ruotsissa tehdyissä kokeissa (Wesström 2002) jyväsadon suurin lisäys oli 14 % ja kasvuston typenoton 11 % tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna. Suomessa matemaattisella mallilla laskettu perunamukuloiden kuiva-ainemäärä kasvoi parhaimmillaan noin 10 %, kun sadannan vajuus oli pieni (Paasonen-Kivekäs ym.

2000). Sitä vastoin vähäsateisina kesinä säätö ei juurikaan lisännyt sadon määrää. Mallin lähtötietoina käytettiin Lapualla sijaitsevan peltoalueen mitta-aineistoa.

Eri tutkimusten perusteella säätösalaoituksen vaikutukset pohjaveden pinnan korkeuteen, valuntaan, ravinteiden huuhtoutumiseen ja kasvustoon vaihtelevat hyvin paljon peltoalueesta ja sääolosuhteista riippuen. Niihin vaikuttavat myös ojituksen toteutus, viljelykasvi ja säätötoimenpiteet. Vaikutukset vaihtelevat samallakin peltoalueella vuodenajoin ja vuosittain. Mikäli padotusta ei hoideta asianmukaisesti säädöllä voi olla myös haitallisia vaikutuksia, esimerkiksi pintavalunnan lisääntymistä, satotappioita ja maan rakenteen huonontumista.

Peltojen säätösalaojittaminen ensiojituksena vaikuttaa erilailla ravinnekuormitukseen kuin jo olemassa olevien salaojastojen säätö. Ensiojitus tai uusintaojitus todennäköisesti vähentää eroosiota ja partikkelimaisen fosforin kokonaiskuormitusta ja lisää typpikuormitusta avo-ointukseen verrattuna varsinkin ojitusta seuraavina vuosina. Typpikuormituksen lisäys voitaneen kuitenkin osittain kompensoida säätöojituksella.

Säätösalaoituksen hyötyjen ja mahdollisten haittojen arviointi Suomen olosuhteissa on toistaiseksi hankalaa vähäisestä kokeellisesta tutkimuksesta johtuen. Ulkomaisia tutkimustuloksia ei voida suoraan hyödyntää erilaisten ilmasto-olojen, maaperän ominaisuuksien ja viljelykäytäntöjen vuoksi. Suomessa säätösalaojitus soveltuu hyvin kesäaikaisen kuormituksen vähentämiseen, sillä maassa on yleensä varastotilavuutta pienehköjä valuntoja varten. Tällä on merkitystä varsinkin sateisina alkukesinä, jolloin valumavesien typpipitoisuudet ovat poikkeuksellisen korkeita ja suhteellisen pienikin salaojavalunta aiheuttaa suuria huuhtoumia. Säädöllä voidaan myös siirtää esimerkiksi alkusyksyn valuntaa ja huuhtoumia myöhempään syksyyn, mikä vesistön tilan kannalta on mahdollisesti vähemmän haitallista. Suomessa eniten valuntaa ja useimmiten myös ravinnehuuhtoumia syntyy keväällä ja syksyllä, jolloin säädön olisi minimoitava sekä salaojavalunnan että pintavalunnan mukana tuleva kuormitus. Luvussa 13 on esitetty matemaattisella mallilla saatuja teoreettisia tuloksia säädön vaikutuksista typpi- ja fosforihuuhoutumiin ja satotasoon Suomen ilmasto-oloissa. Vaikutuksien tarkempi arviointi edellyttäisi myös peltoalueiden vesi- ja ravinnetaseiden mittaamista erilaisissa ojitusmenetelmissä.

Säätösalaoituksen suurimmat kustannukset ovat säätörakenteet, lisäojitus ja maanpinnan taseus. Lisäksi on otettava huomioon vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset, kuten säätötoimet sekä säätökaivojen puhdistus ja mahdolliset korjaukset. Kustannukset vaihtelevat peltoalueittain, koska lisäojituksen tarve ja säätökaivojen lukumäärä riippuvat pellon topografiasta ja olemassa olevan ojituksen ominaisuuksista. Ojitushankkeiden kannattavuuden arviointia sekä viljelijän että yhteiskunnan kannalta on tarkemmin käsitelty luvussa 12.

9 Maatalousmaan kastelu

Harry Linnér

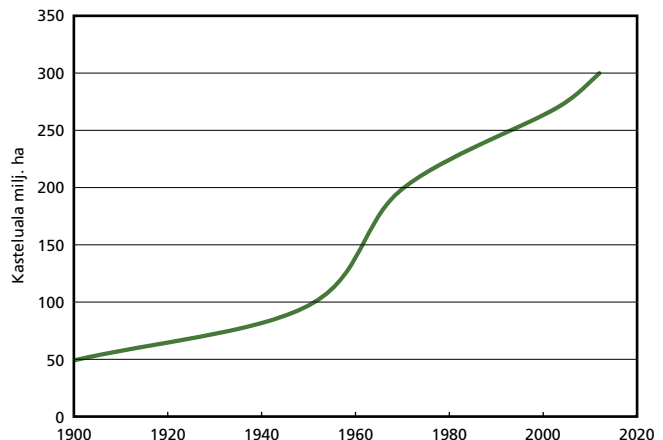
9.1 Kastelun merkitys

Laajoilla alueilla maailmassa maataloustuotantoa rajoittaa ensisijaisesti kuivuus eikä viljely ole mahdollista ilman kastelua. Aridisilla eli kuivilla alueilla, joilla haihdunta on selvästi suurempi kuin sadanta, kastelu on viljelyn ehdoton edellytys. Semiaridisilla (puolikuivilla) alueilla tiettyjä kasveja voidaan viljellä ilman kastelua kahdeksana vuonna kymmenestä. Humidisilla alueilla vuotuinen sadanta on keskimäärin suurempi kuin vuotuinen haihdunta. Kasvukauden sadanta on yleensä riittävä kasvien kasvuun, mutta kuivuus kasvukauden tietyissä vaiheissa tai joinakin vuosina voi rajoittaa selvästi kasvua. Näillä alueilla kastelua käytetään ennen kaikkea turvaamaan satotaso ja parantamaan sadon laatua. Pohjoisissa ilmasto-oloissa kastelua käytetään myös hallantorjuntaan.

Maailman kasteltu viljelyala kasvoi reilussa sadassa vuodessa 50 miljoonasta hehtaaresta 300 miljoonaa hehtaariin (kuva 9.1). Arvioidaan, että 1950-luvun jälkeisestä maataloustuotannon kasvusta vähintään puolet on saavutettu kastelulla. Vajaa 20 prosenttia koko viljelyalasta kastellaan ja kastellulta alueelta saadaan noin 40 prosenttia tuotannosta. Tulevaisuudessa suuri osa väestönkasvun edellyttämästä tuotannon kasvusta oletetaan tapahtuvan alueilla, joilla kastelua tarvitaan. Kastelulla on siis erittäin suuri merkitys maailman maataloustuotannossa.

Kastelun merkitys vaihtelee paljon eri alueilla (taulukko 9.1). Aasiassa, jossa väestötiheys on suuri, kastelu on erityisen tärkeää. Kastelun avulla tuotettujen maataloustuotteiden osuus on Kiinassa noin 70 %, Intiassa yli 50 % ja Pakistanissa yli 80 %. Näissä kolmessa maassa asuu noin 40 % maailman väestöstä. Kastelu on myös erittäin merkittävää Pohjois-Afrikassa ja Lähi-idässä. Egyptissä koko viljelyala kastellaan Niilin tekoaltaaseen varastoidulla vedellä. Iranissa ja Irakissa kastelualat ovat suuria. Saharan eteläpuolisessa Afrikassa kastelu on melko vähäistä. Mantereella ainoastaan 10 % elintarvikkeista saadaan kastelun avulla, joten ruoan tuotanto on useilla alueilla hyvin herkkä sadannan vaihteluille. Tämän takia monet maat ovat riippuvaisia maataloustuotteiden tuonnista.

Euroopassa kastelu on laajamittaista Espanjassa, Italiassa, Ranskassa, Kreikassa ja Romaniassa. Näissä maissa kastelu on monilla alueilla viljelyn edellytys. Muualla Euroopassa kastelun avulla lisätään satoa, parannetaan sen laatua ja tasataan vuosivaihteluita.



Kuva 9.1
Kastelualan kehitys 1900-luvulla.

Taulukko 9.1 Kastelualaa eri maanosissa ja maissa, tiedot vuosilta 2008-2014. Tiedot kastelualan osuuksista* vuodelta 2003. Lähteet: ICID (2009), ICID (2015)

Alue/Maa	Kastelualaa, milj. ha	*Kastelualan osuus viljelyalasta, %
Aasia ja Oseania	214	30
Etelä-, Pohjois- ja Keski-Amerikka	47	11
Eurooppa	23	7
Afrikka	15	7
Yhteensä	299	17
Intia	62,0	31
Kiina	60,0	35
USA	24,7	13
Pakistan	19,1	86
Iran	8,6	42
Indonesia	6,7	13
Meksiko	6,5	23
Turkki	5,7	20
Bangladesh	5,2	56
Thaimaa	4,7	28
Vietnam	4,6	33
Brasilia	4,5	5
Venäjä	4,5	2
Uzbekistan	4,3	85
Egypti	3,7	100
Espanja	3,5	58
Irak	3,6	14
Ranska	2,9	13
Italia	2,4	26
Romania	1,5	32

Lähes 70 % maailman vedenotosta käytetään kasteluun. Monissa maissa kasteluvesi johdetaan suurista joista, kuten Indus, Ganges, Yangtse, Keltainen joki ja Niili. Laajamittainen kastelu tarvitsee monesti melkoisen infrastruktuurin. Jokien vesiä johdetaan usein pitkiä matkoja kanavia ja ojia pitkin kastelualueille. Virtaamien tasaamiseksi jokiin saatetaan joutua rakentamaan patoja.

Veden puute on useilla alueilla erittäin suuri ongelma. Runsaasta vedenkäytöstä johtuen suuret joet kuivuvat ajoittain kokonaan ennen kuin ne laskevat mereen. Liian suuri pohjaveden kulutus johtaa pohjavedenpinnan pysyvään laskuun. Kasteluveden riittävyys on erityisen ongelmallista Intiassa, Kiinassa, Pohjois-Afrikassa ja Pohjois-Amerikan länsiosassa. Käytettävissä olevista vesivaroista kilpailevat myös teollisuus ja kasvavat kaupungit.

Vesihäviöt kastelussa ovat yleensä suuret ja kasteluveden käyttöä onkin syytä tehostaa veden puutteen vuoksi. Kehitysmaissa käytettävien kastelumenetelmien tehokkuusaste on usein alle 50 %, eli kasvit käyttävät alle puolet kasteluvedestä ja loppu valuu pintavaluntana pois pelloilta tai suotautuu juuristokerroksesta syvemmälle maaperään. Osa valunnasta voidaan kuitenkin hyödyntää alempana vesistössä. Nykyaikaisilla kastelumenetelmillä vesihäviöt ovat pienimmillään muutaman prosentin.

Merkittäviä kasteluun liittyviä ongelmia ovat maan suolaantuminen ja vettyminen. Kuivatus kastelun yhteydessä on välttämätöntä kuivilla alueilla, jotta pohjavesi pysyy riittävän alhaalla ja suolat huuhtoutuvat juuristokerroksesta. Monesti kuivatus jää toteuttamatta, jolloin maa aikaa myöten muuttuu viljelykelvottomaksi.

Kastelu Pohjoismaissa

Pohjoismaissa on tyypillistä vuotuisen sadannan ylijäämä eli vuosisadanta on yleensä suurempi kuin vuotuinen haihdunta. Kuivatus on tämän takia ollut tärkein maan vesitaloutta säätelevä toimenpide viljelyalueilla. Keskimääräinen sadannan vaje vaihtelee kuitenkin kasvukaudella 50 ja 200 mm:n välillä ja kuivina vuosina vaje on alueellisesti vielä suurempi. Hallantorjuntakastelulla on tärkeä merkitys mm. varhaisvihannesten, -perunan ja marjojen viljelyssä.

Pohjoismaissa kastelua on käytetty yli 400 vuoden ajan. Kastelua käytettiin esimerkiksi Norjassa Gudbrandsdalenissa jo 1500-luvun lopussa. Ruotsissa on kasteltu niittyjä tulvakasteluna 1800-luvun alusta lähtien. Kokemuksia haettiin lähinnä Tanskasta ja Saksasta. Suomessa tulvakastelua käytettiin jo 1700-luvulla. Sadetuskastelu tuli Pohjoismaihin 1920-luvulla ja sen käyttö yleistyi vuoden 1940 jälkeen. Kastelukoneiden kehittymisen 1970-luvulla lisäsi nopeasti kastelun käyttöä (ks. kohta 5.4).

Suomessa kastelulaitteilla oli vuonna 2010 mahdollista kastella lähes 69 000 hehtaaria peltoa tai puutarhamaata eli noin 3 % koko viljelysalasta (Jaakkonen ja Mattila 2012). Kastelulaitteiden kapasiteetti on Tanskassa 465 000, Ruotsissa 115 000 ja Norjassa 97 000 hehtaaria. Esimerkiksi Ruotsissa kastellaan noin 60 000 hehtaaria keskimääräisinä vuosina ja noin 100 000 hehtaaria erittäin kuivina vuosina. Pohjoismaissa kasteluvesi johdetaan pääasiassa järvistä ja joista, mutta Etelä-Ruotsissa ja Tanskassa kasteluun käytetään paljon myös pohjavettä.

Suomessa kastelu on nykyisin pääosin sadetuskastelua. Tihku-, tippu- ja altakastelun käyttö on yleistynyt jatkuvasti erikoiskasvien viljelyssä 1990-luvulta lähtien. Kastelun tarvetta on varsinkin alkukesällä Etelä- ja Lounais-Suomessa.

9.2 Kastelun tarve

Kastelusta saatava hyöty riippuu paljon kastelun ajankohdasta ja toteutustavasta. On tärkeää, että kasteluvesimäärät ja -ajankohdat sopeutetaan kasvin tarpeeseen, maan ominaisuuksiin ja säätilaan. Kastelua suunniteltaessa on otettava huomioon:

- vallitseva sää ja erityisesti sadanta- ja haihduntaolosuhteet
- eri maalajien vedenpidätyskyky
- juuriston syvyys
- eri kasvien vedentarve eri kehitysvaiheissa

Maan kosteus ja kasvien vedenotto

Sadannan vajauksen aikana maavesivarasto pienenee evaporaation ja kasvin transpiraation seurauksena. Kasvit reagoivat vedenpuutteeseen sulkemalla ilmaraoit, jolloin vesihäviöt ilmakehään pienenevät. Samalla kasvin kasvu rajoittuu. Tämä tapahtuu yleensä paljon ennen kuin lakastumisraja on saavutettu. Maan kosteuden ollessa kenttäkapasiteetissa vesi on sitoutunut maahan 1–1,2 metrin ja lakastumisrajalla 150 metrin vesipatsasta vastaavalla voimalla (ks. kuva 3.24). Monien kasvien osalta kasvu vähenee jo, kun maassa oleva vesi on sitoutunut 5–10 m vesipatsasta vastaavalla voimalla. Jos pyritään maksimaaliseen tuotantoon, kastelu on aloitettava ennen kuin kriittinen raja on saavutettu. Yleensä kasvu

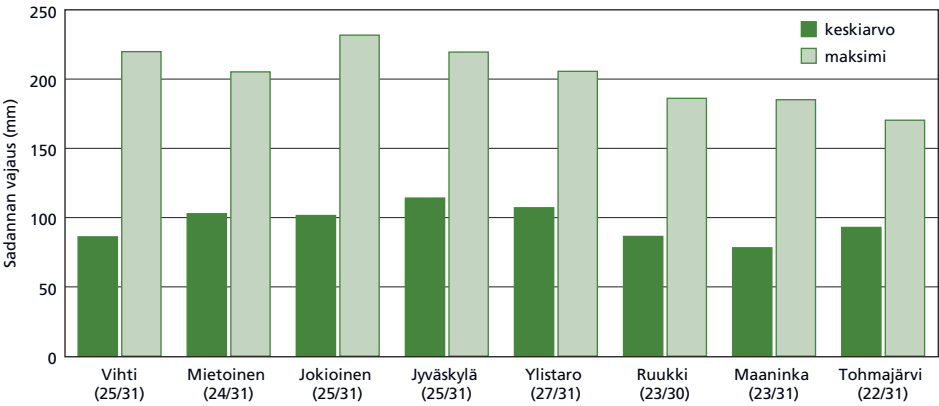
vähenee, kun puolet kasville käyttökelpoisesta vedestä on kulutettu. Luvussa 3 käsitellään veden pidättymistä maahan ja kasvien vedenottoa.

Kuvassa 9.2 on esitetty sadannan vajuus touko-heinäkuussa Suomessa. Haihdunta on useimpina vuosina suurempi kuin sadanta.

Maan vesivarastot ovat yleensä keväällä täysiä ja kasvit voivat hyödyntää osaa maa-vesivarastosta, vaikka sadannan vajuusta esiintyisi. Kastelutarpeen arvioinnissa on otettava huomioon maassa oleva kasville käyttökelpoinen vesimäärä, joka vaihtelee eri maalajeissa (taulukko 9.2).

Jos kasteluvettä käytetään niin runsaasti, että kenttäkapasiteetti ylittyy, osa juuristovyöhykkeen vedestä valuu pois, mikä saattaa johtaa ravinteiden huuhtoutumiseen. Aridisilla ja semiaridisilla alueilla, joilla on olemassa maaperän suolaantumisriski, on käytettävä ylimääräistä vettä haitallisten suolojen huuhtomiseksi juuristovyöhykkeestä.

Kasteluajankohdan määrittäminen vaihtelevien sääolojen vallitessa saattaa olla vaikeaa. Kastelun aloittaminen on aivan liian myöhäistä, kun kasvissa näkyy vedenpuutteen oireita, kuten tilapäistä lakastumista keskellä päivää, tummentuneita tai kellastuneita lehtiä. Kas-



Kuva 9.2 Keskimääräinen ja suurin sadannan vajuus touko-heinäkuussa 1970-2000 eri paikkakunnilla. Laskentaan on otettu mukaan ne vuodet, jolloin sadannan vajuusta esiintyi. Ko. vuosien ja koko laskentajakson vuosien lukumäärä suluissa. Haihdunta on laskettu Class-A -haihtumisastian mittauksista korjauskertoimia käyttäen.

Taulukko 9.2 Kasvien käytettävissä oleva vesimäärä eri maalajeissa (= mm vettä 0,1 metrin paksuista maakerrosta kohti).

Maalaji	Kasvien käytettävissä oleva vesi keskimäärin, mm dm ⁻¹ maata	Vaihteluväli, mm dm ⁻¹ maata	Helposti käytettävissä olevan veden osuus käytettävissä olevasta vedestä, %
Hieno hiekka	10	5–15	50–60
Savinen hiekka-karkea hieta	15	10–20	50–70
Savinen hieno hieta	25	20–30	50–70
Laiha savi, hiesusavi	25	20–35	30–40
Savi	25	20–30	20–30
Aito savi	15	10–20	15–25
Multamaat	40	30–60	50–70
Moreenimaat	15	10–20	40–60

vun hidastuminen on alkanut jo monta päivää ennen näitä oireita. Kastelu olisi aloitettava ennen kuin selviä kuivuusoireita esiintyy. Tämä koskee erityisesti kasveja, joiden veden-tarve ja viljelykustannukset ovat suuret. On myös otettava huomioon kastelukaluston kapasiteetti, jotta koko ala ehditään kastella ennen kuin vahinkoa ehtii syntyä.

Sopivan kasteluajankohdan ja kasteluvesimäärän määrittämistä varten on olemassa erilaisia apuvälineitä kuten maankosteuden mittareita (ks. Luku 3, Maankosteuden mittaaminen). Yleisesti käytetään tensiometriä ja vesitaselaskelmaa.

Tensiometrillä mitataan maan imuvoima, joka osoittaa kuinka käyttökelpoista vesi on kasville. Kastelu on tarpeen kun tensiometrin lukema on karkeilla mailla 40–50 cbar (senttibaaria) ja savimailla 70–80 cbar. Ilmaistuna yksikössä metriä vesipatsasta edellä esitettyt vaihteluvälit ovat 4–5 m v.p. ja 7–8 m v.p. Lämpimällä ja kuivalla säällä kastelu on aloitettava hieman alhaisemmillä tensiometrilukemilla kuin viileällä ja kostealla säällä.

Ongelmana tensiometrimittauksissa on edustavan lukeman saaminen koko juuristovyöhykkeestä. Yleensä kannattaa mitata vähintään kahdesta syvyydestä ja maalajivaihteluiden takia muutamasta mittauspisteestä.

Vesitasemenetelmässä seurataan yksinkertaisimmillaan peltolohkoittain sadannan, kastelun ja evapotranspiraation määrää. Kuvassa 9.3 on esitetty juuristovyöhykkeen vesimäärään vaikuttavat tekijät. Maavesivarasto täyttyy sateen, kastelun ja kapillaarisen nousun johdosta. Varasto tyhjenee transpiraation ja evaporaation sekä valunnan seurauksena. Kapillaarinen nousu juuristovyöhykkeeseen on yleensä pieni kastelua tarvitsevilla maalajeilla ja voidaan jättää huomioimatta. Menetelmä perustuu maavesivaraston muutosten laskentaan eri ajankohtina vesitaseyhtälön avulla:

$$\Delta S = P + K - Q - E_a \quad (9.1)$$

jossa ΔS = maavesivaraston muutos

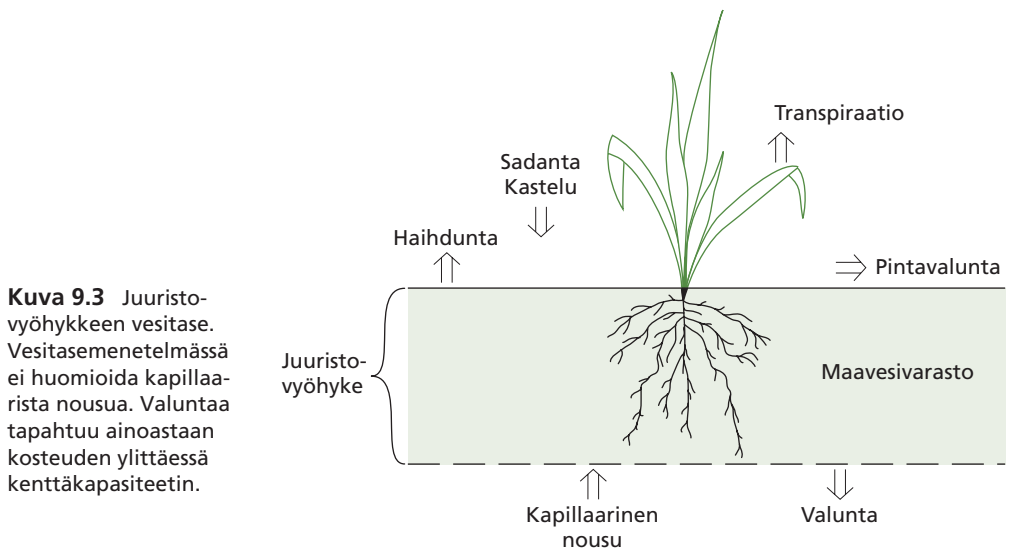
P = sadanta

K = kastelu

Q = valunta

E_a = todellinen evapotranspiraatio

Sadanta on syytä mitata jokaisella maatilalla erikseen. Haihduntatietoja saadaan sääase-

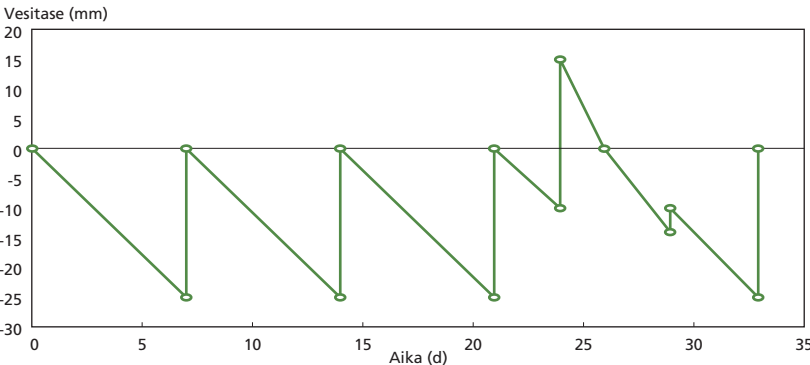


milta tai ne voidaan laskea säähavaintojen perusteella. Myös haihdunta-astioita voidaan käyttää. Jollei ole käytettävissä mitattuja tai laskettuja haihdunta-arvoja, voidaan käyttää kirjallisuudesta saatavia arvoja.

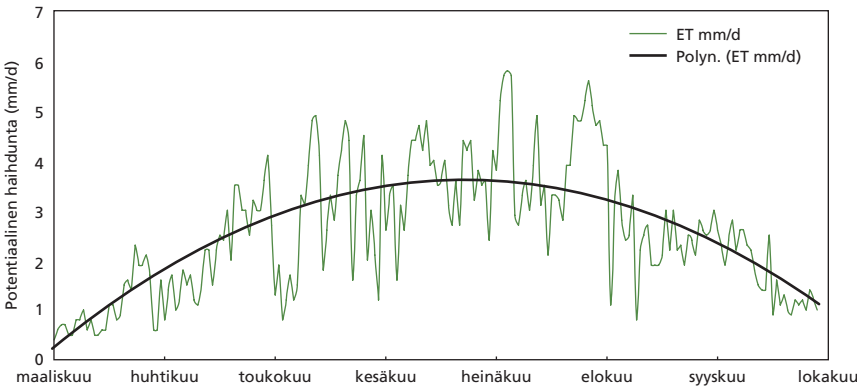
Suomessa voidaan olettaa, että kasvit tarvitsevat kesällä keskimäärin 3–3,5 millimetriä vettä vuorokaudessa. Viileiden ja kosteiden kausien aikana tarve laskee noin 1–2 millimetriin ja lämpimien, kuivien kausien aikana tarve kasvaa 4–5 millimetriin vuorokaudessa.

Kuvassa 9.4 nähdään miten vesitasemenetelmä toimii. Aluksi määritetään sallittu kuivuminen perustuen juuriston syvyyteen ja maan vedenpidätysominaisuuksiin kyseisellä peltolohkolla. Esimerkkinä on maa, joka tarvitsee kastelua, kun 25 mm juuristovyöhykkeessä olevasta kasville käyttökelpoisesta vedestä on kulutettu. Mikäli edellisen kastelukerran jälkeen ei ole satanut, voidaan olettaa, että vesivarasto on kulutettu loppuun ja on aika kastella uudestaan 7–8 päivän kuluttua tavanomaisissa haihduntaolosuhteissa. Tämä yksinkertainen vesitasemenetelmä on osoittautunut toimivan hyvin käytännössä.

Todellinen haihdunta riippuu juuristokerroksen kosteudesta. Kunkin kasvin todellinen haihdunta on pienempi tai yhtä suuri kuin sen potentiaalinen haihdunta. Esimerkki poten-



Kuva 9.4 Esimerkki maan vesivaraston muutoksista juuristovyöhykkeessä. Evapotranspiraatio pienentää varastoa. Varasto kasvaa sateen ja kastelun aikana. Esimerkissä kastellaan päivinä 7, 14, 21 ja 33. Päivinä 24 ja 29 sataa. Kun kenttäkapasiteetti ylittyy (päivä 24) syntyy valuntaa, kunnes kenttäkapasiteetti saavutetaan kahden päivän kuluttua.

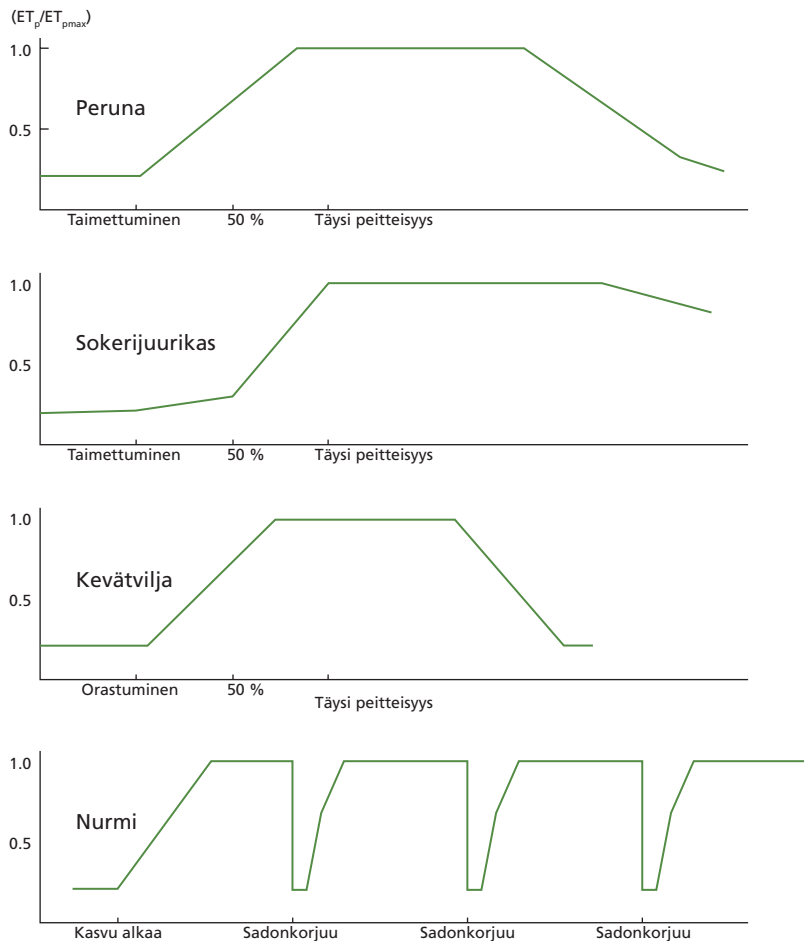


Kuva 9.5 Säähavaintojen perusteella laskettu päivittäinen potentiaalinen haihdunta ja arvoihin sovitettu polynomi.

tiaalisen haihdunnan vaihteluista nähdään kuvassa 9.5. Potentiaalisella evapotranspiraatiolla PET tarkoitetaan hydrologisena käsitteenä lyhyeksi leikatusta nurmesta tapahtuvaa haihduntaa.

Kun kasveille käyttökelpoinen veden määrä juuristovyöhykkeessä on vähäinen, todellinen evapotranspiraatio on pienempi kuin potentiaalinen. Myös liian suuri kosteus rajoittaa haihduntaa. Kasvukauden alussa lehden pinta-ala rajoittaa transpiraatiota. Transpiraatio kasvaa lehden pinta-alan kasvaessa tiettyyn rajaun saakka. Kun lehtialaindeksi, toisin sanoen yhteenlaskettu lehtiala suhteessa maan pinta-alaan, on 3-4, transpiraatio ei enää kasva. Tällöin haihduntaa rajoittavat vain säätekijät. Kasvien vedentarve lisääntyy maan peitteisyyden, lämpötilan, säteilyn ja tuulen lisääntyessä sekä suhteellisen ilmankosteuden pienentyessä kuten luvussa 3 on esitetty.

Kasvuvaiheen merkitys eri kasvien potentiaaliselle evapotranspiraatiolle ET_p nähdään kuvassa 9.6. Maanpinnasta tapahtuva haihdunta eli evaporaatio ennen orastumista riippuu maanpinnan kosteudesta ja maan kapillaarisista ominaisuuksista.



Kuva 9.6 Potentiaalinen evapotranspiraatio (ET_p) muutamien viljelykasvien eri kasvuvaiheessa suhteessa maksimaaliseen evapotranspiraatioon (ET_{pmax}).

Kuvan 9.6 mukaan perunapellolla potentiaalinen evapotranspiraatio ennen taimettumista ja orastumista on noin 25 % siitä tasosta, kun pellolla on täysi kasvipeitteisyys.

Potentiaalinen evapotranspiraatio voidaan arvioida laskennallisesti luvussa 3 esitettyjen kaavojen avulla. Tällöin ongelmana on, ettei tunneta kaavoissa olevien kertoimien arvoja eri kasveille. Erilaisten kasvien potentiaalista evapotranspiraatiota voidaan arvioida käyttämällä vertailukasvia esim. ruohoa. Haihduntojen suhdetta kuvataan kullekin kasville tyyppillisellä kertoimella, jonka suuruus riippuu mm. kasvuvaiheesta ja alueellisista olosuhteista (esim. Dorenbos ja Pritt 1977).

Monessa maassa on kehitetty tietokonepohjaisia malleja, jotka helpottavat kasteluvedentarpeen arviointia. Mallit perustuvat edellä selostettuun vesitaseyhtälöön. Jos on käytettävissä luotettavia tietoja maan ominaisuuksista, kasvien kehityksestä ja säätilasta, voidaan tietokoneella nopeasti laskea eri peltolohkojen kastelutarve. Monilla menetelmillä saatu maan kosteuden tai maaveden imun arvo kuvaa tilannetta mittauspisteen ympäristössä, joten edustavan kuvan saamiseksi tietyltä kasteltavalta alueelta pisteitä tarvitaan verrattain monta. Tiedon siirto-, tallennus- ja käsittelyohjelmistoja edellyttävillä automaattisilla antureilla voidaan seurata maan kosteutta jatkuvasti usealta syvyydeltä koko peltoalueelta, datan käyttö ja tulkinta saattaa tosin olla työlästä (Järvenpää ja Savolainen 2015).

Maan kosteus pellolla on hyvä tarkistaa lapiolla pari päivää kastelun jälkeen. Sadetuskastelua käytettäessä kasteluveden jakaantumista pellolla on syytä seurata sademittareiden avulla.

Juuriston syvyys ja tiheys

Eri kasvien juuriston kasvu eroaa geneettisesti toisistaan (taulukko 9.3). Yleensä juuriston tiheys vähenee syvyyden kasvaessa. Syvällä harvassa olevat juuret eivät voi käyttää hyväkseen kaikkea kasville käyttökelpoista vettä.

Maan mekaaninen vastus saattaa rajoittaa juuriston syvyyttä esimerkiksi hiekkamailla ja tiivistyneillä savimailla. Juuriston kasvua rajoittava tekijä huonosti kuivatuilla ja tiivistyneillä mailla saattaa olla myös hapen puute. Happamilla sulfaattimailla matala pH voi haitata kasvua. Heikko juuriston kasvu lisää kastelun tarvetta.

Kasteluvesimäärän tulee yleensä olla sellainen, että maa on kastelun jälkeen kenttäkapasiteetissaan, mutta valunaa juuristovyöhykkeestä vältetään. Mikäli kasteluvesimäärä on liian pieni, juuristovyöhyke ei kostu kokonaan ja juuriston kasvu saattaa hidastua tai juuria kuolee. Taulukossa 9.4 on esitetty sopivia kasteluvesimääriä eri maalajeilla.

Karkeilla maalajeilla, joissa juuriston syvyys usein ulottuu vain ruokamultakerrokseen, kastellaan 20–30 mm kerralla. Sama koskee matalajuurisia kasveja. Hyvin vettä pidättävillä mailla ja suurilla juuristosityyksillä sopiva kastelumäärä on 40–50 mm. Multamaat pidättävät yleensä suuria vesimääriä, mutta kastelu kannattaa aloittaa ajoissa. Mikäli multamaat kuivuvat kunnolla, ne muuttuvat vettähylkiviksi ja niitä on vaikea saada kostumaan.

Kauden alussa juuren kasvun ollessa vielä vähäistä voidaan taulukossa esitettyjä vesimääriä pienentää. Pienempää kasteluannosta kuin 10–15 mm on harvoin syytä käyttää.

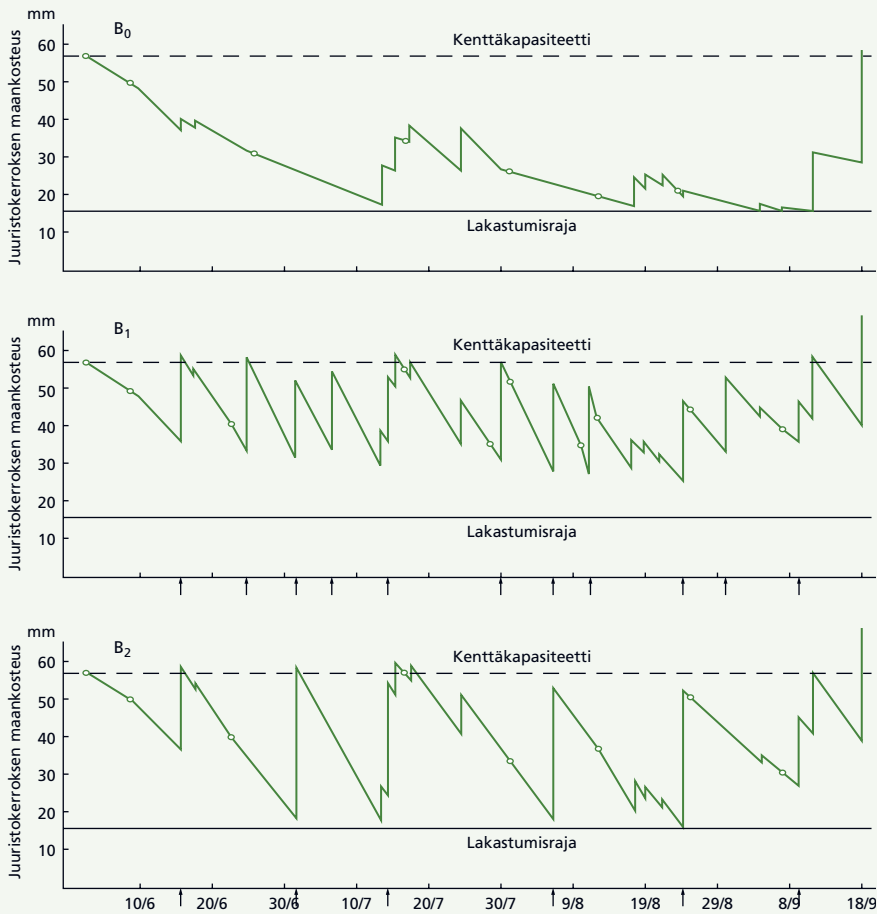
Taulukko 9.3 Tehokas ja maksimaalinen juuriston syvyys hyvissä kasvuolosuhteissa (Aslyng 1984).

25/30 cm	50/60 cm	75/100 cm	100/150 cm
Salaatti	Mansikka	Ruokaperuna	Ohra, kaura
Sipuli	Papu	Porkkana	Syysruis
Pinaatti	Varhaisperuna	Valkoapila	Syysvehnä
	Kaali	Pitkä ruoho	Sokerijuurikas
	Herne	Kevätvilja	Rapsi, rypsi
	Lyhyt ruoho		Puna-apila, lupiini

Tietoruutu 9.1

Maankosteuden merkitys perunan typenottoon

Eräässä ruotsalaisessa kastelukokeessa maaperä pidatti ainoastaan runsaat 40 mm kasville käyttökelpoista vettä juuristovyöhykkeessä, joka ulottui noin 30 cm syvyyteen. Typpilannoitus oli 142 kg ha^{-1} . Ilman kastelua olevan perunapenkin (B_0) maankosteus oli lähes koko kasvukauden lähellä lakastumisrajaa. Tuotto oli tällöin vajaa $19,1 \text{ t ha}^{-1}$. Typenmäärä mukulasadossa oli 84 kg ha^{-1} . Penkkiä B_1 kasteltiin kun noin 50 % kasville käyttökelpoisesta vedestä oli kulutettu. Keskelle juuristovyöhykettä asetetut tensiometrit osoittivat kastelutilanteissa 40-50 cbar. Tuotto oli $43,0 \text{ t ha}^{-1}$ ja typenmäärä mukulasadossa oli 158 kg ha^{-1} . Penkkiä B_2 kasteltiin, kun noin 35 mm vettä oli kulunut. Tuotto oli $38,1 \text{ t ha}^{-1}$ ja typenmäärä mukulasadossa oli 141 kg ha^{-1} . Kuvassa T9.1 on esitetty juuristokerroksen vesimäärä eri koealueilla.



Kuva T9.1 Juuristokerroksen vesimäärä B_0 = ei kastelua, B_1 = kastelu, kun 20-25 mm vettä oli kulutettu, ja B_2 = kastelu, kun 35 mm vettä oli kulutettu. Nuolet osoittavat kastelun ajankohtia.

Taulukko 9.4 Sopivat kasteluvesimäärät riippuen maalajista ja juuriston syvyydestä.

Muokkauskerroksen maalaji	Juuriston syvyys, cm	Kastelu, mm/kastelukerta
Multainen hiekka	0–30	15–20
	0–50	25–30
Multainen karkea hieta	0–30	25–30
	0–50	35–45
Multainen hietasavi	0–30	30–40
	0–50	40–50
Multainen aitosavi	0–30	25–30
	0–50	35–45
Multamaa	0–30	30–40
	0–50	40–50

9.3 Eri viljelykasvien kastelu

Arvokkaita kasveja voi olla kannattavaa kastella jo pienen kuivumisen jälkeen. Varsinkin kauden alussa juuriston ollessa heikosti kehittynyt tiheä kastelu saattaa olla tarpeen. Monella kasvilla on kehitysvaiheita, jolloin vedensaanti on erityisen tärkeää tuotannon määrän ja laadun kannalta.

Kastelukokeet ovat osoittaneet, että kasvu hidastuu, kun puolet kasville käyttökelpoisesta vedestä on kulutettu juuristovyöhykkeessä. Optimaalinen ravinteiden määrä on edellytys sille, että kastelusta voidaan saada täysi hyöty. Riittävä vedensaanti on toisaalta ravinteiden tehokkaan hyödyntämisen edellytys. Kuivien kesien jälkeen maassa on todettu poikkeuksellisen paljon esimerkiksi lannoitetyyppeä.

Nurmen ja muiden rehutuantoon käytettävien kasvien kasvu riippuu paljon juuristovyöhykkeen kosteudesta. Välittömästi niiton tai laiduntamisen jälkeen vedenotto tapahtuu pääasiassa aktiivisesti kasvien osmoottisten voimien avulla, mikä edellyttää suurta kosteutta. Riittävä kosteus auttaa kasviravinteiden saamista kasvien käyttöön.

Laidunnurmien kastelu mahdollistaa tasaisen kasvun kesällä ja vähentää vuosivaihteluita. Erityisesti maidontuotannossa hyvänlaatuinen laidun on taloudellisesti tärkeää.

Perunaa viljellään eniten hiekka- ja hietamailla, joiden vesivarasto on pieni. Kasvi on matalan juuristonsa takia myös kuivuudelle suhteellisen herkkä. Kastelu lisää satoa ja parantaa myös monia laatuominaisuuksia.

Tietoruuudussa 9.1 on esitetty esimerkki vedensaannin merkityksestä perunan tuotannossa kuivana vuonna. Esimerkki osoittaa, että hyvin toteutettu kastelu lisää sadon määrää ja typenottoa ja vähentää siten typen huuhtoutumisriskiä juuristovyöhykkeestä.

Perunanviljelyssä erikoistuminen on lisääntynyt. Viljely voi olla tarkoitettu esimerkiksi ruokaperunan, siemenperunan, tärkkelyksen, perunasoseen tai perunalastujen tuotantoa varten. Lajikkeet ja viljelytekniikka sopeutetaan sadon käyttötarkoituksen mukaan. Viljelyä ohjaavat yhä enemmän sopimukset, joissa yritykset asettavat tiettyjä laatuvaatimuksia. Usein tämä edellyttää, että viljelijällä on mahdollisuus kasteluun, jotta sadon määrä ja laatu eivät vaihtelisi liikaa eri vuosina. Kastelulla ja yhdistämällä erilaisia viljelymenetelmiä voidaan monia ominaisuuksia muuttaa haluttuun suuntaan.

Perunasadon määrään ja laatuun vaikuttavat erityisesti vedensaanti mukulanmuodostuksen ja kasvun aikana. Mukulanmuodostusvaiheessa riittävä maankosteus lisää mukuloiden lukumäärää ja vähentää perunaruven esiintymistä. Mukulan lisäkasvuvaiheessa

vedensaanti vaikuttaa mukuloiden määrään ja kokoon sekä erilaisiin laatuominaisuuksiin. Liian runsas kastelu voi, erityisesti yhdistettynä huonoon kuivatukseen, lisätä tauteja. Kosteissa olosuhteissa viihtyviä perunatauteja ovat esimerkiksi lehtihome/ruskomätä, tyvimätä ja verkkorupi.

Varhaisperunaa kastellaan yleisesti. Kastelun avulla on mahdollista tuottaa taloudellisesti tärkeä aikainen sato. Ruokaperuna vaatii tasaista maankosteutta koko kasvukauden ajan. Kuivahkot olosuhteet kasvukauden loppupuolella antavat suurempia kuiva-ainespitoisuuksia ja parantavat keittolaatua. Siemenperunatuotannossa pyritään saamaan mahdollisimman monta mukulaa tiettyssä kokoluokassa.

Sokerijuurikkaalla vedenpuute näkyy muita kasveja selvemmin lehtien varsiston veltoutumisena lämpiminä päivinä. Monilla muilla kasveilla kasvu on hidastunut jo monta päivää selvien lakastumisoireiden ilmaantuessa. Sokerijuurikkaan tilapäinen lakastuminen ei välttämättä merkitse kasvun pysähtymistä. Sokerijuurikkaan ilma-otot eivät sulkeudu kohtuullisen vedenpuutteen seurauksena. Juurikkaan syvä ja tehokas juuristo voi jatkaa vedenottoa siten, että transpiraatio ja kasvu voivat jatkua. Yleisesti ottaen hyvä vedensaanti parantaa juuriston ja lehtien kasvua sekä lisää juurikkaan sokeripitoisuutta. Kastelu kasvukauden loppupuolella saattaa kuitenkin laskea sokeripitoisuutta.

Kevätvilja tarvitsee yleensä Suomen ilmastossa keskimäärin 250–350 mm vettä, jotta satotaso olisi hyvä. Mailla, jotka pystyvät varastoimaan paljon vettä, sadanta on keskimääräisinä vuosina riittävän suuri. Maavesivaraston ollessa pieni vedenpuute vähentää usein sadon määrää. Kastelu voi kuivina vuosina lisätä satoa hiekkamailla sekä hiesu- ja hieta-savimailla, joissa juuriston kasvu on rajoittunut. Aikainen kastelu saattaa lisätä juuriston kasvua siten, että muokkauskerroksen alapuolisen kerroksen (jankon) vesivarasto on kasvin käytettävissä. Liika vesi lisää lakoonutumisriskiä varsinkin yhdistettynä suuriin typpilannoitemääriin. Viljalajeista erityisesti kevätvehnä hyötyy aikaisesta kastelusta, kun taas ohra ja kaura tarvitsevat vettä kasvukauden loppupuolella.

Öljykasvien kastelu on ajankohtaisin kukinnan aikaan. Kukinnanaikainen kuivuus voi vähentää siemensatoa huomattavasti, mikäli maan vesivarasto on pieni. Toisaalta aikainen kastelu saattaa aiheuttaa liian vahvan kasvun, joka voi pienentää siemensatoa.

Myös *herneellä* kriittisin kausi kuivuudelle on kukintakausi. Kastelu juuri ennen kukintaa ja heti kukinnan jälkeen on yleensä kuivina vuosina kannattavaa. Runsaasti aikaisessa vaiheessa saattaa aiheuttaa liian vahvan kasvun. Liiallinen kosteus voi helposti aiheuttaa hapenpuutetta, joka vahingoittaa kasvia erityisesti huonosti kuivatetuilla mailla.

Monet vihannekset, kuten salaatti, sipuli, porkkana, punajuuri, kaali ja papu, tarvitsevat vettä riittävästi, jotta saavutettaisiin määrällisesti ja laadullisesti hyvä sato. Alueilla, joilla sadanta on pieni tai vaihtelee voimakkaasti, kastelu on usein menestyvän viljelyn edellytys. Monilla vihanneksilla on kehitysvaiheita, jolloin ne ovat erityisen herkkiä kuivuuden suhteen. On myös tilanteita, joissa kohtuullinen kuivuus esimerkiksi kauden alussa voi lisätä satoa. Syynä voi olla maan nopea lämpeneminen. Jos maa on kostea, suurin osa säteilyenergiasta kuluu veden haihduttamiseen ja maan lämpeneminen kestää kauemmin.

Hedelmäviljelyssä vedensaanti vaikuttaa paljon puiden kasvuun sekä sadon määrään ja laatuun. Kastelua tarvitaan erityisesti kasvukauden loppupuolella. Kuivuus kauden alussa voi lieventää liiallista versoontumista ja lisätä kukintaa seuraavana vuonna.

Marjojen kastelu on Suomessa tärkeää. Vadelmat ja mustat viinimarjat tarvitsevat paljon vettä, jotta saadaan paljon ja isoja marjoja. Kuivuus syksyllä voi vähentää versoontumista seuraavana vuonna. Mansikat tarvitsevat paljon vettä kukinnan aikana ja sen jälkeen. Sadonkorjuun jälkeinen kuiva kausi lisää kukkanuppujen muodostumista ja saattaa lisätä seuraavan vuoden satoa. Vadelman kastelu on lopetettava viimeistään elokuun puolivälin jälkeen, sillä märkä maa haittaa talvehtimista.

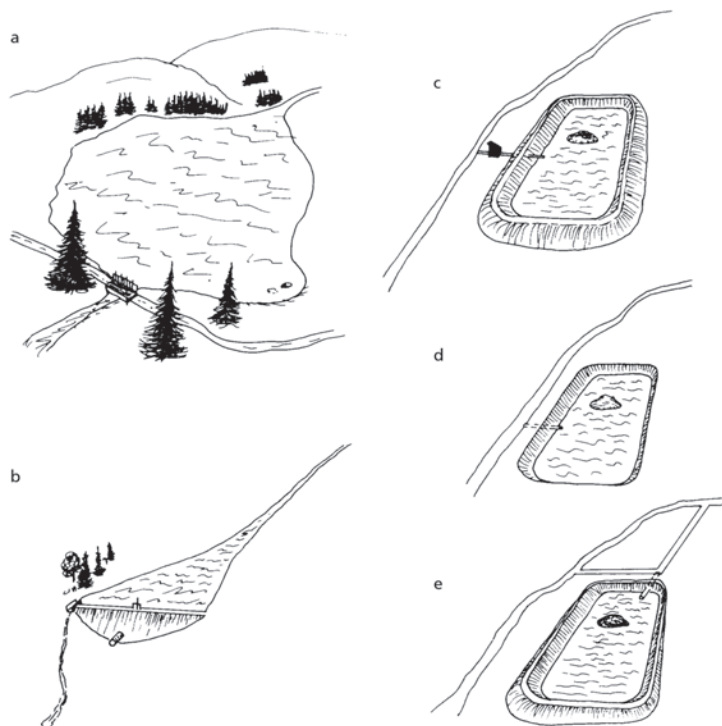
Hedelmä- ja marjaviljelyssä tippukastelun etuna on, että vesi lisätään suoraan juuristovyöhykkeeseen kastelematta lehtiä, mikä voi vähentää sienitauteja. Lisäksi vesihäviöt kastelun aikana ja haihdunta maanpinnasta ovat pieniä. Toisaalta tippukastelu ei suojaa hallaa vastaan. Ainoa mahdollisuus saada tehokas suojelu hallaa vastaan on käyttää jatkuvaa kastelua pienillä sadettimilla.

9.4 Kasteluveden hankinta

Kastelun perusedellytys on, että riittävä määrä laadultaan sopivaa vettä on saatavissa, kun kastelu on tarpeen. On myös tärkeää että, vedenhankintaan liittyvät oikeudelliset kysymykset huomioidaan. Kasteluun tarvittavan vesimäärän arvioimiseksi tarvitaan tietoa kastelta vista kasveista ja kastelualasta sekä sadannan vajauksesta kasvukaudella.

Vesivarastojen suunnittelu

Vedensaanti on kesällä monella alueella rajoittunut ja usein vedestä kilpailevat monet käyttömuodot, kuten kastelu, kalastus, luonnonhoito, teollisuus ja asutus. Vedensaannin varmistamiseksi varastointi voi olla tarpeen. Ennen kastelukautta on yleensä hyvät mahdollisuudet täyttää varastot kevään valumavesillä. Kuivatusvesien talteenotto omalta tilalta on usein riittävä. Vettä voidaan varastoida patoamalla vettä järviin tai jokiin tai rakentamalla erillisiä altaita. Muutamia esimerkkejä on esitetty kuvassa 9.7.



Kuva 9.7 Erilaisia tapoja varastoida vettä. a) Järvissäänöstely, b) joessa oleva pato, c) erillinen allas, jota täytetään pumppaamalla, d) matalalla oleva allas, joka täyttyy itsestään ylivesikausina, e) allas, joka täyttyy itsestään ylävirtaan olevan vedenottokohdan avulla.

Vesivaraston koko mitoitetaan kuivien vuosien vedentarpeen sekä suoto- ja haihdunta-häviöiden mukaan. Vesitarpeen laskelmissa on käytettävä säähavaintoja mahdollisimman pitkältä ajanjaksolta, jotta saadaan käsitys suurimmasta sadannan vajauksesta. Yhden kastelukauden vedentarve lasketaan kastelualan ja kasteltavien kasvien vedentarpeen perusteella. Jos esimerkiksi 20 hehtaaria perunaa kastellaan ja alueen säähavainnot osoittavat, että tarve kuivina vuosina on 150 mm ($=1\,500\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$), tarvitaan vettä 20 ha kertaa $1\,500\text{ m}^3 = 30\,000\text{ m}^3$. Tilavuuteen on lisättävä haihdunta- ja suotohäviöt sekä vesitilavuus, jonka halutaan jäävän altaaseen kastelun jälkeen.

Kasteluveden laatu

Veden laatutekijät, joilla saattaa olla merkitystä veden käytössä kasteluvetenä, voidaan ryhmitellä seuraavasti:

- hygieeniset tekijät (bakteerit, virukset, parasiitit)
- kemialliset tekijät (suolat, raskasmetallit, myrkyt)
- fysikaaliset tekijät (lämpötila, partikkelit, väri)

Jäteveden puhdistamoilta, haja-asutuksesta ja kotieläinrakennuksista tulevat jätevedet saattavat sisältää tauteja aiheuttavia bakteereja, viruksia ja parasiitteja. Bakteereista erityyppiset salmonellabakteerit ovat tavallisia. Ne voivat aiheuttaa vatsaongelmia sekä ihmisillä että eläimillä. Jätevesissä erilaiset virukset ovat myös tavallisia. Monissa maissa on kauan hyödynnetty jätevesiä kasteluun ja siihen on laadittu määräyksiä. Kun kastellaan käsittelemättömällä tai vain vähän käsitellyllä jätevedellä, on elintarvikkeiden saastumisriski suuri. Täydellisen puhdistuksen ja kloorauksen jälkeen tautien leviämisksi on sen sijaan pieni.

Hedelmien, marjojen ja raakana syötävien vihannesten kasteluveden hygieeniset laatuvaatimukset ovat periaatteessa samat kuin talousvedelle. Laatuvaatimukset ovat lievemmät vedelle, jolla kastellaan perunoita ja vihanneksia, jotka keitetään ennen syömistä. Viljojen, öljykasvien, teollisuusperunan ja vastaavien kasvien kastelussa veden mekaanista puhdistamista pidetään monissa maissa riittävänä.

Sadetuskastelussa ei voida kokonaan välttää tartunnan leviämisksiä. Kostealla säällä tuuli voi kuljettaa pieniä bakteereja ja viruksia sisältäviä pisaroita satoja metrejä. Riskien vähentämiseksi tarvitaan suojavyöhykkeitä asutuksen ja teiden lähetyvillä. Maanläheisten ramppien käyttö vähentää leviämisksiä.

Pohjavesi sopii laatunsa puolesta erinomaisesti kasteluvedeeksi. Maamme rannikkoalueilla pohjavedet voivat kuitenkin olla liian suolapitoisia, ja niiden jatkuvaa käyttöä kasteluun tulisi välttää, sama koskee merivettä (Järvenpää ja Savolainen 2015). Meriveden käyttö kasteluun on mahdollista, jos sen suolapitoisuus ei ylitä 0,50 % (Kara ja Pälkkö 1975). Meriveden suolapitoisuus vaihtelee Turun saariston 0,60 % ja Vaasan saariston 0,40 % välillä (Järvenpää ja Savolainen 2015). Tosin rannikon lähistöllä ja jokien suistoalueiden murtovesien suolapitoisuus on huomattavasti alhaisempi. Kun kastellaan suolapitoisella vedellä, on otettava huomioon suolojen vaikutukset sekä kasviin että maahan. Suolapitoisuuden kohoaminen maanesteessä vaikuttaa kasvin veden ja ravinteiden ottoon. Kasvien sietokyky maaveden suolapitoisuuden suhteen vaihtelee. Esimerkiksi sokerijuurikas, ohra ja öljykasvit kestävät korkean suolapitoisuuden. Apila, herne, pavut ja mansikat ovat herkkiä suolalle. Useimmat kasvit ovat suolalle herkimpiä kasvukauden alkuvaiheessa. Polttovaurioita esiintyy helposti, kun kastellaan kuivina ja aurinkoisina päivinä, joten yöllä kasteltaessa riski on pienempi.

Käytettäessä toistuvasti suolapitoista vettä maanesteen suolapitoisuus nousee. Suolan rikastumista maanesteessä vuodesta toiseen ei kuitenkaan yleensä esiinny kosteassa ilmassa, jossa sadanta on riittävän suuri suolojen huuhtomiseksi. Ongelma-alueilla suolojen

natriumionit korvaavat maapartikkeleihin sitoutuneita kalsiumioneja, mikä johtaa maan rakenteen huononemiseen. Jos savimaata kastellaan suolapitoisella vedellä, vedenläpäisevyys pienenee, maa muuttuu tahmeaksi ollessaan märkä ja kovaksi, korppumaiseksi ollessaan kuiva.

Veden lämpötilalla ei juuri ole merkitystä sadetuskastelussa. Riippumatta veden alkuperäisestä lämpötilasta, vesipisaroiden lämpötila on hieman ilman lämpötilaa alhaisempi osuessaan kasvin lehdelle.

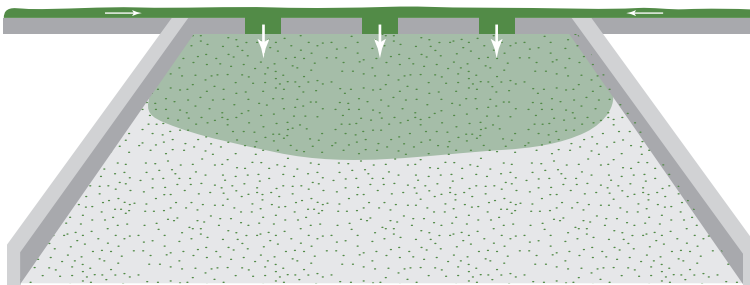
9.5 Kastelumenetelmät

Vanhimmat kastelumenetelmät, valutus- ja padotuskastelu, ovat nykyisinkin eniten käytettyjä maailmassa. (Järvenpää ja Savolainen 2015). Käytettyjä valutuskastelumenetelmiä ovat esimerkiksi vako-, sarka- ja allaskastelu (kuva 9.8). Menetelmissä vesi johdetaan kanavia pitkin ja edelleen tasaisille tai tasaisesti viettäville pelloille painovoiman avulla. Usein maanpintaa on muotoiltava ja tasattava tai on rakennettava terasseja, jotta pintakastelumenetelmät toimisivat hyvin. Kastelumenetelmän valintaan vaikuttavat mm. topografia, maalaji, viljelykasvi, tilussuhteet ja työvoiman saanti. Altakastelussa (salaojakastelu, padotuskastelu, pohjavesikastelu) vettä johdetaan kanavien tai maahan kaivettujen putkien kautta kastelualueelle. Tarkoituksena on pitää pohjavedenpinta niin lähellä maanpintaa, että kasvi saa tarvitsemansa veden alhaalta päin. Suotuisissa olosuhteissa menetelmä on tehokas ja helppohoitoinen. Muita maailmalla laajasti käytettyjä menetelmiä ovat sadetus, tippu- ja tihkukastelu.

Suomessa käytetään yleisimmin erilaisia sadetuskastelumenetelmiä. Pohjavesipadotus toteutetaan nykyisin salaojastoissa, joko säätösalaajituksena tai salaojakasteluna. Tihkukastelu on yleistynyt marjojen ja hedelmien viljelyssä jatkuvasti 1990-luvulta lähtien (Järvenpää ja Savolainen 2015). Tippukastelujärjestelmää käytetään pääasiassa kasvihuoneissa, mutta myös avomaalla esimerkiksi hedelmäpuiden kasteluun (Pajula ja Triipponen 2003).

Sadetus-, tippu- ja tihkukastelu

Sadetuskastelussa vesi pumpataan johtoja pitkin kastelualueelle ja ruiskutetaan korkealla paineella sateenomaisesti ilmaan. Sadetuskastelua voidaan käyttää pinnanmuodoiltaan vaihtelevilla pelloilla, erilaisilla maalajeilla ja useimmille kasveille. Menetelmää käytetään usein kosteilla alueilla, joilla sadannan vajuusta esiintyy kuivakausilla, mutta veden kokonaistarve on kohtuullinen. Tippukastelulla voidaan parhaiten optimoida vedenkulutusta pienellä työmäärällä. Sen investointikustannukset ovat yleensä suuret, mutta käyttökustannukset pienet.



Kuva. 9.8 Valutuskastelu.

Sadetus-, tippu- ja tihkukastelumenetelmien tärkeimmät osat ovat pumppu ja voimanlähde, johtoverkosto veden kuljetusta varten sekä sadetusjärjestelmä.

Pumppu ja voimanlähde

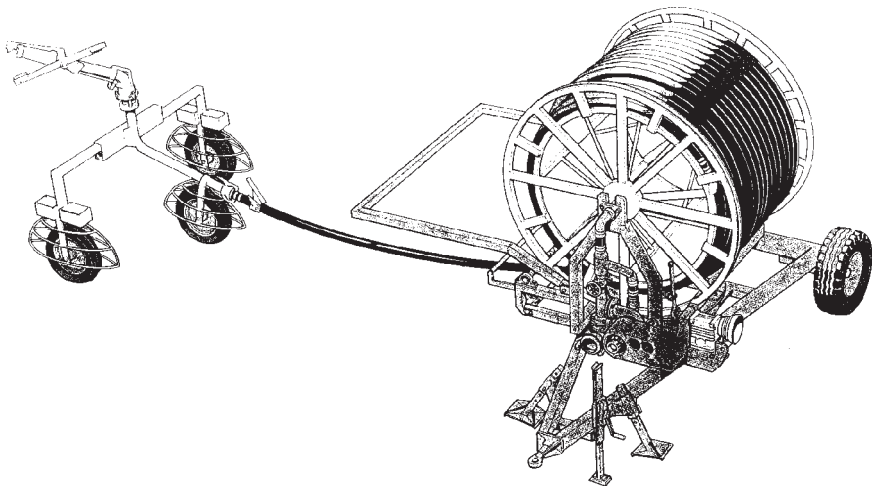
Kastelussa käytetään yleensä keskipakopumppuja. Vedenpinnan ja pumpun välinen korkeusero saa käytännössä olla korkeintaan 6–7 metriä. Otettaessa pohjavettä syvältä käytetään uppopumppua, jossa pumppu ja sähkömoottori on yhdistetty ja voidaan laskea veden alle. Pintaveden otossa voidaan käyttää sähkömoottoria, traktoria tai jotain muuta polttomoottoria. Traktoriin voidaan liittää suojamekanismeja, jotka pysäyttävät moottorin paineen tai virtaamaan muuttuessa tai traktorivian takia. Pumppulaitoksia voidaan automatisoida siten, että niitä voidaan käynnistää ja pysäyttää matkapuhelimella.

Johdot ja jakelujärjestelmät

Kastelujärjestelmien vesijohdot voivat olla siirrettäviä tai kiinteitä. Siirrettävät johdot ovat yleensä alumiinisia ja kiinteät johdot muovisia. Yleensä kiinteät johdot on kaivettu maahan ja varustettu vesiposteilla, joihin siirrettäviä johtoja tai kastelukoneita voidaan liittää.

Perinteisissä kastelulaitteissa on pyöriviä sadettimia, joista kukin kastelee halkaisijaltaan 20–40 m ympyrää. Sadettajat on kiinnitetty alumiinijohtoihin, joita siirretään käsin yhden tai useamman kerran vuorokaudessa. Siirrettävät kalustot ovat työläitä. Arvokkaita viljelykasveja varten hankitaan joskus johtoja ja sadettajia riittävästi koko alueen kattamiseksi. Sellaisia järjestelmiä voidaan myös käyttää hallantorjunnassa esimerkiksi marjanviljelyssä. On olemassa sadetuskastelujärjestelmä, joka koostuu ohuista muovijohdoista ja pienistä sadettajista, joiden sadetusympyrän halkaisija on vain muutaman metrin. Järjestelmää käytetään pienimuotoiseen kasteluun marjanviljelyssä, taimitarhoissa ja vastaavissa.

1970-luvun alussa kehitettiin koneita, jotka vähensivät kastelussa tarvittavaa työmäärää huomattavasti. Pohjoismaissa eniten käytetty konetyyppi koostuu 300–800 m pitkstä polyeteeniputkesta, jota vedetään hitaasti kelalle ja joka kastelee 40–80 m leveää aluetta käyttäen suurta vesitykkiä (kuva 9.9). Koneella voidaan antaa 25–30 mm vettä 1–5 hehtaarille vuorokaudessa. Kastelukoneiden suurin etu on niiden tarvitsema suhteellisen pieni työmäärä. Haittapuolina ovat suuri energiantarve ja sadetuksen epätasainen jakautuminen tuulisella säällä. Tämä johtuu siitä, että vesi ruiskutetaan vesitykillä korkealle ilmaan.



Kuva 9.9 Kastelulaite, jonka osat ovat letkukela, polyeteenijohto ja suuri vesitykki.



Kuva 9.10 Sadetuskastelu, tippukastelu. (Kuvat Harry Linnér)

Sadetuksen kohdentumisen tarkentamiseksi on kehitetty kastelurampeja, joihin on kiinnitetty suuttimia tai pieniä sadettimia. Rampeilla, joiden työleveys on 20–75 m, saadaan tasainen sadetus myös suhteellisen voimakkailla tuulilla. Tarvittava vesipaine on alhaisempi kuin suurilla sadettajilla ja sen takia energiantarve on pienempi. Ramppien haittapuolena on vaikea siirrettävyys.

Tippu- ja tihkukastelujärjestelmä koostuu ohuista muovijohdoista, joiden halkaisija on noin 12–16 mm. Niitä pidetään pellolla vuodesta toiseen. Johdot asetetaan maan pinnalle tai ne upotetaan maahan. Tiputtajien tai pienten suuttimien kautta kasvit saavat hitaasti vettä. Järjestelmiä voidaan myös käyttää liuoslannoitteiden levitykseen. Menetelmät toimivat matalalla vesipaineella ja pienellä työpanoksella. Lisäksi kastelun tarkkuus on hyvä ja järjestelmä on helppo automatisoida. Menetelmiä käytetään eniten hedelmä- ja marjaviljelyssä, jolloin johdot voivat jäädä paikalleen kasvukausien välillä. On myös kehitetty koneita johtojen käsittelyä varten, mikä mahdollistaa tippu- ja tihkukastelun käytön yksivuotisille kasveille. Ongelmia ovat eri syistä (fysikaaliset, biologiset tai kemialliset) johtuvien tukkeutumisten aiheuttamat käyttöhäiriöt. Veden huolellinen suodatus on tukkeutumisriskin vuoksi yleensä tarpeellinen. Sadetus- ja tippukastelu on esitetty kuvassa 9.10.

Altakastelu

Altakastelulla tarkoitetaan menetelmää, jossa hyödynnetään salaojaverkostoa tai avo-ojia kasteluun. Altakastelua kutsutaan myös padotus-, pohjavesi-, salaoja- ja säätökasteluksi (ks. Luku 8, Säätösalaajitus).

Altakastelussa vettä johdetaan maahan olemassa olevista kuivatusjärjestelmistä, joko avo-ojista tai salaojaputkista. Menetelmää voidaan soveltaa pelloilla, jotka ovat tasaisia ja lajitekoostumukseltaan yhtenäisiä. Maan läpäisevyyden on oltava hyvä, jotta pohjavedenpinnan korkeutta voidaan säätää tarpeeksi nopeasti. Syvemmillä maassa on oltava huonosti vettä läpäisevä kerros tai luonnostaan korkealla oleva pohjavesi. Mikäli nämä edellytykset täyttyvät, altakastelu on hyvä menetelmä parantaa maan vesitaloutta. Kasvukaudella vesi padotaan tai sitä pumpataan järjestelmään niin, että pohjavedenpinta pysyy vakiokorkeudella, esimerkiksi noin puoli metriä maanpinnan alapuolella, tai vaihtelee tietyissä rajoissa.

Vesi nousee juuristokerrokseen kapillaarisesti. Kevättöiden ja sadonkorjuun aikana pohja-vedenpinta lasketaan, jotta maa kuivuu ja saavuttaa riittävän kantavuuden.

Ojastossa on oltava padotusrakenteet. Jos kasteluun käytetään salaojastoa, se on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin säätösalojitus. Avo-ojia käytettäessä niihin rakennetaan tarvittavat padotusjärjestelmät.

Suomessa altakastelua käytetään eniten Pohjanmaalla, koska alue on maaperältään sopivaa. Kastelu on pääasiassa toteutettu salaojien kautta. Kasteluvesi johdetaan ojastoon yleensä pumppaamalla vettä joesta tai järvestä. Lisävesi pyritään johtamaan järjestelmään salaojien tai avo-ojien yläpäästä, josta se virtaa säätöjärjestelmien mukaisesti eteenpäin ja imeytyy verkostosta maaperään kasvien käyttöön. On myös mahdollista, että vettä syötetään salaojien alapäästä salaojan kaltevuutta vastaan. Tällöin on yleensä kysymys yksittäisistä valtaojaan päättyvistä salaojista ja vesi syötetään salaojiin padottamalla tai pumppaamalla vettä valtaojiin. Tietyissä olosuhteissa lisävesi voidaan johtaa ojastoon gravitaativirtausta hyödyntäen ilman mitään pumppausta.

Jos salaojia käytetään kasteluun, täytyy ojavälin olla tiheämpi kuin tavanomaisessa salaojituksessa. Näin taataan veden tasainen jakaantuminen pelloille ja tarvittaessa nopea kuivuminen esim. rankkasateiden sattuessa.

Kastelujärjestelmän mitoitus

Kastelujärjestelmän mitoituksessa määrävänä tekijänä on kasteluvedentarve kuivakautena. Arvokkailla kasveilla, kuten perunalla, avomaan vihanneksilla ja marjoilla, on tärkeää että kastelujärjestelmän kapasiteetti on riittävä myös kuivimpina kausina. Muiden kasvien osalta tyydytään usein kastelukapasiteettiin, joka ei ole riittävä kaikista kuivimpina vuosina. Kastelujärjestelmä voidaan mitoittaa esimerkiksi sellaiselle kasvien vedentarpeelle, joka on täysin riittävä keskimäärin kahdeksana vuonna kymmenestä.

Muita kastelujärjestelmän mitoituksessa huomioon otettavia tekijöitä ovat kasvien juuriston syvyys ja maan vedenpidätyskyky. Riittävän suuri kastelukapasiteetti on erityisen tärkeä matalajuurisille kasveille, joita viljellään hiekkamailla. Sellaisissa olosuhteissa kasville käyttökelpoinen vesi saattaa kulu loppuun muutamassa päivässä. Syväjuuriset kasvit hyvin vettä pidättävillä mailla kuluttavat maaprofilissa olevan vesivaraston tasaisesti, eivätkä muutaman päivän kuivuuden vaikutukset ole kovin merkittäviä.

Kastelujärjestelmän mitoituksessa on myös otettava huomioon kuinka monta tuntia vuorokaudessa järjestelmää käytetään. Helppohoitoista tippu- ja tihkukastelujärjestelmää voidaan käyttää noin 20 tuntia vuorokaudessa. Paljon työtä vaativan järjestelmän tehollinen käyttöaika tuulisella alueella saattaa olla keskimäärin vain noin 10–12 tuntia vuorokaudessa. Kun tiedetään kasteluala, vedentarve vuorokaudessa ja käyttöaika vuorokaudessa, järjestelmän kapasiteetti lasketaan seuraavan esimerkin mukaisesti:

20 hehtaarin viljelyalaa täytyy voida kastella keskimäärin 4 mm d^{-1} ($= 40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Kastelulaitteiston käyttöajan arvioidaan olevan keskimäärin 16 h d^{-1} kuivakautena. Vuorokaudessa vettä kuluu $20 \text{ ha} \times 40 \text{ m}^3 = 800 \text{ m}^3$. Jakamalla 800 m^3 käyttöajalla 16 h d^{-1} saadaan järjestelmän kapasiteetiksi $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Jos keskimääräinen käyttöaika on vain 10 h d^{-1} , tarvittava kapasiteetti on $80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, mikä johtaa huomattavasti suurempiin pumppu-, johto ym. investointeihin. Pohjoismaissa vallitsevissa olosuhteissa voidaan mitoituksessa käyttää seuraavia arvoja:

- Arvokkaita kasveja, kuten mansikoita ja vihanneksia, varten tarvitaan keskimäärin $4\text{--}5 \text{ mm d}^{-1}$ suuruinen kastelukapasiteetti.
- Perunalle, sokerijuurikkaalle ja nurmelle riittää noin $3\text{--}4 \text{ mm d}^{-1}$.

9.6 Kasteltujen alueiden kuivatus

Aridiset ja semiaridiset alueet

Aridisilla ja semiaridisilla ilmastoalueilla kastelu voi aiheuttaa vettymis- ja suolaantumiso ongelmia. Suuret suotautumishäviöt kastelun yhteydessä johtavat vähitellen pohjaveden pinnan kohoamiseen. Monella kastellulla alueella pohjavesi on vähitellen noussut juuristovyöhykkeeseen ja johtanut alueiden vettymiseen ja niitä on poistettu viljelystä. Suolaantuminen voi johtua kasteluveden sisältämistä suoloista tai suolaisen pohjaveden kapillaarisesta noususta juuristovyöhykkeeseen. Suola jää maahan veden haihduttua. Suolojen huuhtoutumiseksi juuristovyöhykkeestä maata on kasteltava hieman yli tarpeen, mikä puolestaan johtaa vettymisriskin lisääntymiseen. Suolaantumis- ja vettymisongelmien ennaltaehkäisemiseksi kuivatustarve on välttämätöntä arvioida jokaisen kasteluhankkeen yhteydessä. Kuivatuksen mitoitus ja sen toteutus määräytyvät kuivilla ja keskikuivilla alueilla pääasiassa kastelusta aiheutuvasta valunnasta.

Kapillaarinen nousukorkeus pohjavedenpinnasta saattaa olla suuri (ks. Luku 3). Veden virtausnopeus vähenee kuitenkin pohjavedenpinnan ja maanpinnan etäisyyden kasvaessa. Korkeutta, jossa kapillaarinen nousukorkeus ja siten myös suolojen nousu on merkityksettömän pieni, kutsutaan kriittiseksi kapillaarikorkeudeksi. Pohjaveden noustessa tämän yläpuolelle maa suolaantuu. Kriittinen pohjavedenpinnankorkeus on maan ominaisuuksista riippuen yleensä 1–2 metriä maanpinnasta. Kapillaarisen suolaantumisen välttämiseksi kuivatussyvyyden on maalajista ja haihdunnasta riippuen oltava noin 1,5–2,5 metriä. Valtaojien on oltava noin 2,5–3,5 metriä syviä.

Humidiset alueet

Humidisilla alueilla sataa enemmän kuin haihtuu. Kastelu tapahtuu kuivakausien aikana, jolloin sadanta ja valunta ovat yleensä pieniä. Valuntaa saattaa kuitenkin syntyä, mikäli maata on kasteltu liikaa ennen sadetta. Valunta on kuitenkin vähäistä verrattuna luonnollisiin, lumen sulamisen tai runsaiden sateiden seurauksena syntyviin ylivalumiin. Tämän takia kastelu ei humidisilla alueilla vaikuta kuivatusjärjestelmän mitoitukseen.

Hyvin toimiva kuivatusjärjestelmä on kuitenkin erityisen tärkeä alueilla, joita kastellaan. Kastelu on niin kallista, että sataa ei kannata huonon kuivatuksen vuoksi vaarantaa. Hyvin toimiva kuivatus johtaa hyvään vesi- ja ravinnetalouteen, koska sen avulla vältetään maan tiivistymistä, saadaan hyvä juuristonkasvu ja aikainen kylvö. Tuottopotentiaali on tällöin suuri, mikä mahdollistaa vaativien ja arvokkaiden kasvien viljelyn. Kastelun mahdollisuudet optimaaliseen tuottoon edellyttävät hyvää siemenviljaa, hyvää ravinteiden saantia ja tehokasta rikkakasvien torjuntaa. Kosteassa ilmastossa on ensisijaisesti huolehdittava kuivatuksesta, jonka jälkeen muilla toimenpiteillä voidaan edelleen kasvattaa satotasoa.

9.7 Kastelun ympäristövaikutukset

Ensimmäiset kastelukulttuurit kehitettiin Eufrat- ja Tigris-jokien välisellä alueella noin 6000 vuotta sitten. Tekniikka levittäytyi vähitellen Niilin, Indus-joen ja Keltaisen joen jokilaaksoihin. Monella alueella kastelu loi perustan useille sivilisaatioille, joissa kulttuuri ja tiede kukoistivat. Moni näistä sivilisaatioista kuitenkin rappeutui ajan mittaan. Maa suolaantui tai ravinteet vähenivät. Patoja ja kanavia ei ylläpidetty tai tulvat hävittivät niitä. Kilpailu maasta ja vedestä aiheutti sotia ja kulttuurien taantumista. On kuitenkin syytä korostaa, että kastelun merkitys on yhteiskunnan kehityksen kannalta ollut suuri kuivissa osissa maailmaa.

Kastelulla on merkittäviä ympäristövaikutuksia. Vedentarpeen tyydyttämistä varten rakennetaan usein patoja, joihin tarvitaan suuria maa-alueita. Vesivaroja käytetään liikaa, minkä seurauksena joet kuivuvat ja pohjavedenpinta laskee pysyvästi. Liiallinen vedenotto Araljärveen johtavista joista on aiheuttanut ympäristökatastrofin, joka on maailman suurimpia. On myös isoja jokia, kuten Keltainen joki Kiinassa ja Colorado-joki Yhdysvalloissa, jotka liialliseksi kasvaneen vedenkäytön vuoksi eivät kausittain enää saavuta merta. Pohjavedenpinnan alentuminen on yleistä monissa osissa Kiinaa, Intiaa, Pohjois-Afrikkaa ja Yhdysvaltojen länsiosia.

Sopimaton kastelumenetelmä saattaa aiheuttaa maan ja veden suolaantumisen tai maan vettymisen. Noin 20 prosenttia maailman kastelualasta on vahingoittunut suolaantumisesta. Suolaantumisen ja vettymisen välttämisen keinot ovat tiedossa. On kasteltava yli tarpeen, jotta suolat saadaan huuhtottua maasta. Liiallinen, suolapitoinen vesi täytyy poistaa kuivatuksella, jotta pohjaveden pinta ei nouse niin lähelle juuristovyöhykettä, että suolat nousevat siihen kapillaarisesti. Suolaisesta vedestä eroon pääseminen voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia. Mikäli vesi johdetaan vesistöön, sen veden laatu voi huonontua käyttökelvottomaksi. Joskus suolavesi voidaan johtaa mataliin kohtiin maastossa, jossa se haihtuu. Joissain tapauksissa on jouduttu rakentamaan erityisiä uomia, joita pitkin suolaantunut vesi johdetaan mereen.

Monet trooppisten tautien aiheuttajat ovat riippuvaisia vedestä. Kastelualan laajentaminen saattaa edistää erilaisten tautien, kuten malarian ja halkiomatotaudin (skistosomiasi), leviämistä.

Muutamilla pahiten vesipulasta kärsivistä alueista väestönkasvu on nopeaa. Yhä enemmän vettä tarvitaan maataloustuotantoon. Samaan aikaan kaupunkien ja teollisuuden veden tarve kasvaa. Vedenpuutteen ja nopeasti kasvavan väestön aiheuttamia ongelmia esiintyy Araljärven, Gangesin, Jordanian ja Niilin alueilla. Tilanne on erikoisen herkkä alueilla, joilla monta maata kärsii vedenpuutteesta. Vedenpuute johtaa yleensä maataloustarvikkeiden tuonnin kasvuun. Esimerkiksi yhden viljatonnin tuottamiseen kuluu noin 1 000 tonnia vettä, joten viljantuonnilla on mahdollista säästää vettä muita tarpeita varten.

Kastelun haitalliset vaikutukset ympäristöön ovat yleensä kohtuulliset kosteilla alueilla, joiden vesivarat ovat suuret ja vedentarve pienekkö. Kilpailu vedestä pienissä vesistöissä tai tilapäinen pohjavedenpinnan lasku voi alueellisesti olla ongelma kuivina vuosina, mutta ongelmat voidaan yleensä ratkaista esimerkiksi vettä varastoimalla.

Kastelu kuivina kausina lisää kasvua ja satoa sekä kasvien ravinteiden käyttöä. Ruot salaisten tutkimusten mukaan esimerkiksi kasvien typenotto oli keskimäärin 15–20 prosenttia suurempi kastelluilla kasveilla kuin kastelemattomilla kasveilla, lannoitemäärän ollessa samansuuruinen. Kuivina vuosina kasteltujen kasvien typenotto on ollut jopa 50 % suurempi kuin kastelemattomien kasvien. Sadonkorjuun jälkeen maan ravinnemäärä on usein pienempi kastelluilla kuin kastelemattomilla alueilla. Monet tutkimukset osoittavatkin että ravinteiden huuhtoutumisriski vähenee kastelun seurauksena. Tämä on havaittu etenkin nitraattitypen osalta (Järvenpää ja Savolainen 2015). Toisaalta kastelu sopimattomana ajankohtana, epätasainen tai liiallinen kastelu saattavat kuitenkin aiheuttaa valuntaa ja ravinteiden huuhtoutumista. Myös valmiiksi märkä maa lisää keväisen hallantorjuntakastelun huuhtoutumisriskiä (Järvenpää ja Savolainen 2015).

9.8 Kastelun talous

Kastelujärjestelmän suunnittelussa joudutaan mm. vastaamaan seuraaviin kysymyksiin: Ovatko hyödyt sadonlisäyksinä ja parantuneena laatuna tarpeeksi suuria kattaakseen kustannukset? Voidaanko osaa kustannuksista pitää kuivuuden vakuutusmaksuna? Voidaanko

Taulukko 9.4 Kastelutarpeeseen vaikuttavat tekijät.

Kastelutarve	Sadannan alijäämä	Maavesivarasto	Kasvi
Suurin	Erittäin suuri (< 200 mm)	Erittäin pieni (<50 mm)	Vihannekset, hedelmät, marjat
	Suuri (150–200 mm)	Pieni (50–100 mm)	Peruna, heinä
	Kohtuullinen (100–150 mm)	Kohtuullinen (100–150 mm)	Sokerijuurikas
Pienin	Pieni (<100 mm)	Suuri (>150 mm)	Viljat, öljykasvit

tilan tuotantosuunta muuttaa tehokkaammaksi kastelun avulla? Mitkä ovat tuotantohinnat kuivina vuosina, jolloin kastelun vaikutukset ovat suurimmillaan? Onko riittävästi työvoimaa saatavilla kastelua varten? Onko vedensaanti turvattu vai täytyykö vettä varastoida?

Yksittäisen viljelijän on tilan edellytyksistä riippuen arvioitava onko kastelun järjestäminen ajankohtaista. Kastelun tarpeen määräävät sadannan vajuus kasvukaudella, maan vedenpidätysominaisuudet ja kasvien vedentarve. Kastelun tulos riippuu paljon viljelijän kyvystä hyödyntää vettä mahdollisimman hyvin.

Viime vuosina suuntaus kastelujärjestelmien suunnittelussa on ollut työpanoksen minimoiminen. Käytetään esimerkiksi pumppujen kaukosäätöä, kiinteitä pääjohtoja ja pitkiä johtoja kastelukoneissa siirtojen määrän vähentämiseksi. Arvokkaita kasveja varten investoidaan tippu- ja tihkukasteluun. Kun järjestelmä on helppohoitoinen, kastelu aloitetaan ajoissa ja kastellaan useasti, päästään hyvään tulokseen.

Taulukossa 9.4 on arvioitu kastelutarpeeseen vaikuttavia tekijöitä pohjoismaisissa olosuhteissa. Tarve on suurin alueilla, joilla viljellään arvokkaita kasveja ja kasvukauden sadannan alijäämä keskimäärin suuri ja maan vedenpidätyskyky pieni. Viljeltäessä arvokkaita kasveja saattaa olla kannattavaa investoida kastelujärjestelmään vakuutuksena kuivien vuosien varalta, vaikka sadannan alijäämä olisi pieni.

Kastelun kustannukset riippuvat sen edellytyksistä ja tehdyistä ratkaisuista. Vedenhankinnan kustannukset riippuvat etäisyydestä vesistöön, tarpeesta rakentaa vesivarasto tai porata kaivoja pohjaveden saantia varten. Pumppausasemaa varten saatetaan tarvita pitkiä sähkölinjoja. Pääjohdot voivat olla siirrettäviä tai kiinteitä.

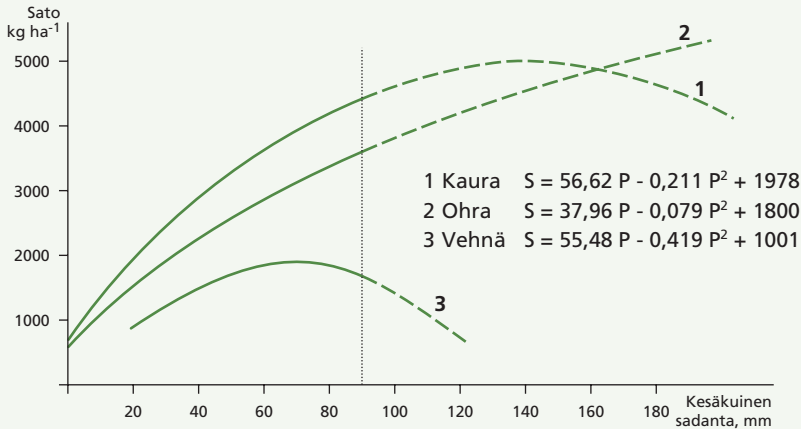
Kastelukustannukset voidaan jakaa kiinteisiin kustannuksiin (vähennys, korko, vakuu- tus) ja käyttökustannuksiin, jotka riippuvat järjestelmän käyttöasteesta (työ, kuljetukset, energia, ylläpito). Kiinteät kustannukset ovat yleensä yli puolet kokonaiskustannuksista. Helppohoitosisissa järjestelmissä käyttökustannukset saattavat olla ainoastaan 20–30 % kokonaiskustannuksista.

Kastelusta saatava hyöty on verrannollinen sadonlisäykseen. Saddonlisäyksen suuruutta ei pystytä kuitenkaan ennakolta tarkasti arvioimaan, koska se riippuu mm. kasvukauden aikaisesta sadannasta. Kastelun vaikutusta satomääriin voidaan arvioida suoritettujen tutkimusten avulla. Lisätuoton arvioinnissa voidaan käyttää tilastollisia menetelmiä, jotka kuvaavat sadannan vajauksen aiheuttamia sadon vähenemisiä ja sadannan vajauksen toistuvuutta. Kenttäkokeiden ja tilastollisten mallien tuloksia käytettäessä on tärkeää ottaa huomioon koeolosuhteiden ja sovellutuskohteiden erot. Tietoruudussa 9.2 on esitetty kastelusta saatava sadonlisäys.

Tietoruutu 9.2

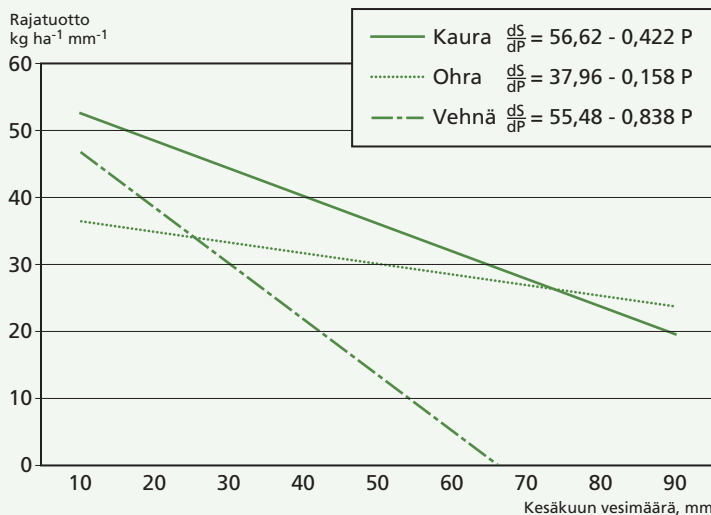
Kastelusta saatava sadonlisäys

Hooli (1971) tutki kastelun vaikutusta kevätiljojen satoon Suomessa useilla koealueilla. Kenttäkokeiden perusteella hän kehitti tilastollisia malleja satomäärien riippuvuudesta kuukausisadannoista ja kastelun rajahyödyistä. Esimerkki kevätiljojen satojen riippuvuudesta kesäkuun vesimäärästä on esitetty kuvassa T9.2. Havaintoaineistoa suurempien sadantojen osalta on riippuvuus piirretty katkoviivalla.



Kuva T9.2 Kevätiljojen sato (S) riippuvuus kesäkuun sadannasta (P) Jokioisten koeaseman vähähumuksisilla kivennäismaalajeilla (Hooli 1971).

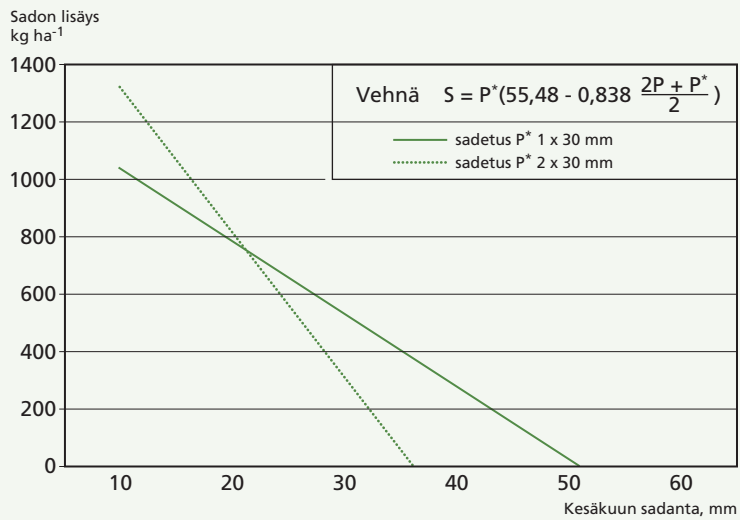
Kuvassa T9.2 esitettyjen yhtälöiden derivaatat kuvaavat sadannan lisäyksen aikaansaamaa satonlisäystä eli rajatuottoa (kuva T9.3).



Kuva T9.3 Kevätiljojen rajatuotot kesäkuun vesimäärän (P) funktiona. Vesimäärällä tarkoitetaan sadannan ja sadetuksen summaa (Laukala 1976).



Sadon lisäys kesäkuun sadannan funktiona yhdellä ja kahdella sadetuskerralla näkyy kuvassa T9.4. Kuvasta näkyy, että vehnän osalta toinen kastelukerta ei tuota sadonlisäystä kesäkuun sadannan ollessa yli 22 mm.



Kuva T9.4 Sadetuksella saatavissa oleva vehnän sadonlisäys sadannan (P) funktiona (Laukala 1976).

Juhani Päivänen

10 Metsäojitus ja vesiensuojelu

10.1 Suo metsänkasvupaikkana ja metsäojitus

Metsäojituksen käsite

Vesi on keskeinen kasvutekijä kaikessa kasvintuotannossa kuljettaessaan kasveihin siihen liuenneita ravinteita ja ylläpitäessään kasvin nestetasapainoa. Toisaalta liiallinen vesi esimerkiksi metsämaassa saattaa aiheuttaa niukkahappisuutta siinä määrin, että puuston kasvu vaikeutuu. Metsäojitus tarkoittaa liian veden poisjohtamista kasvualustasta ojien avulla siten, että puuston kasvuolosuhteet paranevat. Metsäojitus-käsitettä on totuttu käyttämään sekä veden vaivaamien kangasmaiden että soiden ojituksen yhteydessä (Lukkala 1931, Heikurainen 1960, Päivänen 1990). Valtakunnallisissa metsäojitustilastoissa ei siten ole myöskään eroteltu kangasmaiden, ohutturpeisten tai paksuturpeisten soiden ojituksia toisistaan (Metsätilastollinen vuosikirja 2002). Metsäojitus vaikuttaa kasvualustan vesitalouteen sekä pohjavedenpintaa alentamalla että valuntaa nopeuttamalla.

Mikäli halutaan korostaa, että kyse on ollut luonnontilaisena olleen vesiperäisen maan ensikertaisesta ojituksesta, on myös käytetty termejä uudisojitus tai nykyään mieluummin ensiojitus. Kunnostusojitus tarkoittaa aiemmin ojitetun alueen kuivatuksen tehostamista vanhoja ojia perkaamalla ja/tai täydennysojia kaivamalla (Päivänen 2007).

Suon käsite

Suo on turvetta muodostavien kasvien vallitsema kosteikkokasviyhdyskunta. Suon muodostamassa ekosysteemissä vallitsee epätasapaino tuotetun biomassin ja sen hajotuksen välillä, jolloin ilmakehästä sidottua hiiltä varastoituu kasvinjäännöksiin. Turve vuorostaan määritellään epätäydellisesti hajonneista kasvien jäännöksistä muodostuneeksi eloperäiseksi maalajiksi, joka on kerrostunut muodostumispaikalleen (Laine ym. 2002).

Valtakunnan metsien inventoinneissa (VMI) ojitamaton kasvupaikka luokitellaan suoksi, mikäli kasviyhdyskunta muodostaa turvetta. Yleensä rahkasammalten peittävyys pohjakerroksessa on tällöin yli 75 prosenttia. Ojitetuilta kasvupaikoilta edellytetään kuitenkin turvekerroksen olemassaoloa, jotta kasvupaikka luetaan suoksi. Jos turvekerros on ollut niin ohut, että se on hävinnyt kuivatuksen edetessä, entinen suo luokitellaan kivennäismaaksi (Hökkä ym. 2002).

Osalla luonnontilaisia soitamme kasvaa kookkaaksi varttuvaa puustoa. Tällaisia ovat erityisesti kapeat korpijuotit, joissa turvekerros voi olla hyvinkin paksu. Runsaasti mineraaliravinteita sisältävät ja hyvien kaltevuussuhteiden vuoksi liikkuvat vedet mahdollistavat näillä kasvupaikoilla puiden juuriston ravinteiden ja hapen saannin. Luonnontilaisen, puustoisen suon ravinteisuustaso heijastuu sekä puulajisuhteissa että runkoluvussa. Lehtipuuston, lähinnä hieskoivun, osuus puuston tilavuudesta on sitä suurempi, mitä paremmasta kasvupaikasta on kyse. Kuusi ja lehtipuut ovat korpien puulajeja; niukkaravinteillä rämeillä mänty on ainoa toimeentuleva puulaji.

Pääosalla luonnontilaisia soita puun kasvua rajoittavia tekijöitä ovat ravinteiden niukkuus ja/tai kasvualustan märkyys. Pelkästään sadeveden mukana tulevien ravinteiden varassa olevilla kohosoilla korkealla olevan pohjavedenpinnan lisäksi mineraaliravinteiden vähäisyys on puuston kasvua rajoittava tekijä. Tulva- ja rimpinevoille, jotka keräävät vesiä suon pinta-alan nähdessä laajalta valuma-alueelta, puuvartisten kasvien leviäminen on taas mahdotonta, vaikka ravinteista ei olisikaan puutetta.

Vähäpuustoisilla soilla lähellä maanpintaa oleva pohjavesi aiheuttaa maaperään siinä määrin niukkahappiset olosuhteet, etteivät puiden juuristot tule toimeen. Siemen itää hyvin kosteassa sammalessa, mutta puut pystyvät kasvamaan varttuneiksi saakka vain keskimääräistä suonpinnan tasoa korkeammilla paikoilla kuten mättäillä. Suosammal kasvaa korkeutta ja hajotuksen ollessa kasvupaikalla vähäisempää kuin kasvimassan tuotanto, turvetta kertyy kasvupaikalle.

Soiden metsätaloudellinen käyttö – lähestymistavat

Maan vesitalouden järjestely kuuluu olennaisena osana soiden intensiiviseen metsätaloudelliseen hyödyntämiseen. Humidisissa olosuhteissamme tämä on lähinnä metsäojitusta. Jo lähes sadan vuoden ajan metsäojitus onkin Suomessa muodostanut lähtökohdan soiden metsätaloudelliselle hyödyntämiselle.

Valtakunnallisesti tarkasteltuna luonnontilaisia soita ei enää ole tarpeen ottaa metsätalouden käyttöön ojittamalla (Päivänen 2007). Tämä heijastuu myös nykyisessä lainsäädännössämme. Osa suokasvupaikoista tullaan säilyttämään metsälain mukaisina erityisen tärkeinä elinympäristöinä talousmetsissä tai luonnonsuojelulain mukaisina suojeltuina luontotyypeinä joko jo olemassa olevilla tai perustettavilla suojelu- ja toimenpidekieltoalueilla. Näissä tapauksissa soiden käytöllä ei ole puuntuotannollisia tavoitteita (kuva 10.1, taso 1). Myöskään kestävän metsätalouden rahoituslain mukaista yhteiskunnan tukea ei enää myönnetä luonnontilaisen suon ojittamiseen. Vapaaehtoisuuteen perustuva alueellinen metsäsertifiointijärjestelmämme (PEFC) kieltää ojittamasta luonnontilaista suota edes maanomistajan omalla kustannuksella. Osa soista on jo aiemminkin jäänyt metsätaloudellisen käytön ulkopuolelle joko niukkaravinteisuutensa tai pohjoisen sijaintinsa vuoksi. VMI10:n (2004–2005) mukaan ojittamaton suopinta-ala on yli 4 miljoonaa hehtaaria ja tästä runsaat 0,8 miljoonaa hehtaaria on arvioitu metsänkasvatuskelpoiksi, mikäli metsäojituksia vielä tehtäisiin (Korhonen ym. 2006).

Eräissä maissa, kuten osissa Kanadaa, puuta on laajamittaisesti korjattu soilta ja muilta vesiperäisiltä mailta tavalla, joka on täyttänyt luonnonvaran ehdyttävän käytön tunnusmerkit (kuva 10.1, taso 2). Tämä on ollut seurausta siitä, että teollisuuden aikoinaan kymmeniksi vuosiksi vuokraamat hakkuuoikeudet eivät sisältäneet metsänhoitovelvoitteita. Näiden pitkäkestoisten sopimusten umpeuduttua ollaan mainituissakin olosuhteissa vähitellen siirtymässä metsien muodostaman luonnonvaran kestävään hyödyntämiseen, joskin tähän ajatellaan päästävään ilman vesiperäisten maiden ojittamista.

Luonnontilaiset, puustoiset suot saattaisivat soveltua ekologiaaltaan nk. jatkuvan kasvatuksen kohteiksi, millä ymmärretään kasvualan pitämistä jatkuvasti metsän peitossa ilman selkeää metsikkökohtaista uudistamisvaihetta (kuva 10.1, taso 3). Tässä kasvatusmallissa hakkuukypsiksi kehittyneet puut poistetaan metsiköstä yksittäin tai muutaman puun ryhmänä siten, että metsikkö säilyttää eri-ikäis- ja kokoisrakenteisuutensa. Hakkuut toistuvat usein ja hakkuukertymä jää korjuukertaa kohden pieneksi. Korjuuta on vaikea koneellistaa ja jäävä puusto altistuu korjuuvaurioille. Näköpiirissä ei kuitenkaan ole, että metsien käytössä olisi tarkoituksenmukaista palata kuvatunkaltaiseen keräilytalouteen (Päivänen 2007).

Metsätaloudellisen kestävyyyden lisäksi tavoitteena on edistyvyys, johon oleellisenä osana kuuluu kasvupaikan parantaminen (kuva 10.1, taso 4). Valittu strategia perustuu tutkimuksin osoitettuun havaintoon, että soilla ja muilla veden vaivaamilla alueilla on suuri potentiaalinen kyky kasvattaa uudistuvaa luonnonvaraa – puuta. Lainsäädäntö, lähinnä metsänparannuslaki ja kestävän metsätalouden rahoituslaki, on oleellisesti helpottanut metsänparannustoiminnan organisointia ilmasto-olosuhteissamme ja yksityismetsävaltaisessa metsien omistusrakenteessamme (Päivänen 1994b).

1. Soidensuojelu

- ei puunkasvatuksellisia tavoitteita
 - uudistuvan luonnonvaran hyödyntämättä jättäminen

2. Ehdyttävä käyttö

- puunkorjuu avohakkuuna
- tukeutuminen vain luontaiseen uudistumiseen
 - uudistuvan luonnonvaran ehtyminen

3. Jatkuvan kasvatuksen periaate

- puunkorjuu keräilytaloutena
- ekologiset edellytykset luonnontilaisilla, puustoisilla soilla
 - tavoitteena uudistuvan luonnonvaran kestävä käyttö

4. Kestävä ja edistävä käyttö

- kasvupaikan parantaminen
(*ojitus, kunnostusojitus, lannoitus*)
- tarkoituksenmukainen metsänhoito
(*taimikonhoito, harvennushakkuut, päätehakkuu, uudistaminen*)
 - tavoitteena uudistuvan luonnonvaran hoito, käyttö ja lisääminen

Kuva 10.1 Metsänkasvatukseen soveltuvien soiden erilaisten käyttömuotojen vaikutus puuston muodostaman luonnonvaran kestävyteen (vähentyminen tai lisääntyminen) (Päivänen 2007)

10.2 Puunkasvatukseen soveltuvien soiden valinta

Vanhimmat metsäojitusalueet maassamme ovat peräisin 1860-luvun nälkävuosilta, jolloin työllisyystöinä ojitettiin soita lähinnä uuden pellon raivaamiseksi. Osa näistä alueista ei koskaan tullut syystä tai toisesta peltoviljelyn piiriin, vaan jäi metsänkasvulle. Varhaisimpia metsäojituksia perusteltiin myös keinona suojella kangasmaita soistumiselta ja torjua hallanvaaraa. Molemmat tarkoitukset ovat myöhemmin osoittautuneet vähämerkityksiksi tai suorastaan vääriksi. Soistuminen on enää paikallinen ilmiö, koska pääosa soistumiselle alttiista alasta on jo ehtinyt soistua viimeisen jääkauden jälkeen. Ojituksella ei myöskään voida torjua hallaa; turvemaan lämpöolot pikemminkin äärevöityvät ojituksen seurauksena (Päivänen 2007).

Metsäojituksen tavoite onkin kristallisoitunut jo noin sata vuotta sitten metsänkasvatukseen edellytysten parantamiseksi soilla ja muilla vesiperäisillä mailla. Tähän päästään saattamalla suovesi liikkeelle ja laskemalla kasvukaudenaikainen pohjavedenpinta 30–40 cm etäisyydelle maanpinnasta. Metsäojitetulla suolla vallitsee itse asiassa ihmisen tietoisella toiminnallaan aiheuttama suoekosysteemin ”häiriötila”, jota on ylläpidettävä, mikäli puuta halutaan kasvattaa.

Puuston lisäämispyrkimykset ovat tiiviisti tukeutuneet tutkimuksen ja käytännön kokemuksen tuottamaan tietoon erilaisten soiden soveltuvuudesta metsän kasvupaikoiksi. On itse asiassa hämmästyttävää, kuinka varhain esim. Lukkala (1939) esitti myöhemmin varsin oikeaksi osoittautuneen käsityksensä erilaisten soiden soveltuvuudesta metsänkasvatukseen. Ratkaisevia tekijöitä ovat kasvupaikan hyvyys ja ilmastoalue. Luonnontilaiset suot voidaan kuvata ja luokitella kasvillisuuden avulla suotyypeiksi, joita metsätaloudellista käyttöarvoa määritettäessä on yleensä erotettu noin 30 (Laine ym. 2012). Niukkara-vinteisimpia suotyyppisiä edustavat suot ovat metsänkasvatuskelvottomia eteläisessäkin Suomessa; kaikkein runsasravinteisimpia, puustoisia soita on sitä vastoin voitu perustel-

lusti ottaa metsäojituskohteiksi vielä Kolarin ja Sodankylän leveysasteilla (Heikurainen 1973). Tutkimustiedon karttumisen myötä myös käytännön ohjeistoissa esitetyt ojitettavien kohteiden valintakriteerit ovat tarkentuneet (Päivänen 2007).

10.3 Metsäojitustekniikan kehittyminen

Kuivatussyvyys, ojasyvyys ja sarkaleveys

Yleensä on katsottu, että puunkasvatusta varten tulisi saavuttaa noin 40 cm:n kuivatussyvyys erityisesti loppukesästä, jolloin maaperän juuristokerros on lämpimintä. Kuivatus-tekniisillä tunnuksilla, sarkaleveys ja ojasyvyys, on suora vaikutus saavutettavaan kuivatussyvyyteen. Kuivatusojien tulisi olla vaadittavan putouksen rajoissa mahdollisimman paljon korkeuskäyrien suuntaiset, jotta ojan vedenkokoamiskyky olisi mahdollisimman suuri. Kasvualustan ominaisuuksista lähinnä turpeen maatuneisuus, osin myös turvelaji, vaikuttaa turpeen vedenläpäisevyyden kautta saavutettavaan kuivatussyvyyteen. Ojituksesta kuluvan ajan myötä ojan kunnan mahdollinen rappeutuminen heikentää kasvualustan kuivatustilaa. Toisaalta ojituksen vaikutuksesta puuston kasvu ja sen myötä myös tilavuus lisääntyvät, jolloin haihdunta osin kompensoi teknisen kuivatuksen heikkenemistä.

Metsäojitustoiminnan alkuaikoina varsin harvoillakin ojaverkostoilla saatiin hyviä kuivatustuloksia. Tämä johtui huolellisesta kohdevalinnasta, suunnittelusta ja syvistä, miestyönä kaivetuista ojista.

Metsäojituksen koneellistuttua päädyttiin metsäojituksia suunniteltaessa seuraaviin ojasyvyysuosituksiin:

• ohutturpeiset (< 30 cm) suot	70 cm
• paksuturpeiset (> 30 cm) suot	80 cm
• mätät, paksuturpeiset suot	90 cm

Vuosikymmenien kuluessa käytettävät sarkaleveydet kapenivat. Metsäojitustoiminnan loppuvaiheessa keskimääräiset sarkaleveydet olivat seuraavat:

• ohutturpeiset suot	50 m
• paksuturpeiset, puustoiset suot	40 m
• paksuturpeiset, niukkapuustoiset suot	30 m

Käytettäviä sarkaleveyksiä pohdittaessa jouduttiin toteamaan, että taloudellisesti edullisin sarkaleveys on aina biologisesti edullisinta sarkaleveyttä suurempi. Ensin mainittuun vaikuttaa ojametrimäärän lisääntymisen myötä lisääntyvät kustannukset (Päivänen 2007).

Kaivutekniikka

Metsäojat kaivettiin ennen toista maailmansotaa miestyönä; työvälineet olivat kuokka, piilu ja lapio. Noin 0,7 milj. hehtaaria Suomen soista on aikanaan kuivatettu lihasvoimalla. Sodan jälkeen metsäojien tekoa yritettiin myös räjäytysmenetelmällä, mutta työjälki ei ollut hyvä ja työturvallisuuteen liittyvät tarkat räjähdysainesäädökset rajoittivat menetelmän käyttöä.

Metsäojituksen koneellistaminen käynnistyi 1950-luvulla aurausperiaatteeseen tukeutuen (Huikari 1958). Metsäoja-auran veto tapahtui vinssillä levennetyin suoteloin varustetun telaketjutraktorin pysyessä paikoillaan. Auraus oli menetelmälle soveltuviissa olosuhteissa taloudellisesti edullinen metsäojien tekotapa. Aurausyksikön heikko liikuteltavuus saattoi kuitenkin houkutella suunnittelemaan oja-astot enemmän auraus- kuin kuivatustek-

nisten näkökohtien mukaan. Aurasmenetelmässä ojan syvyyden säätömahdollisuudet olivat myös siinä määrin rajalliset, että ojan pohjalle saattoi muodostua kynnyskohtia.

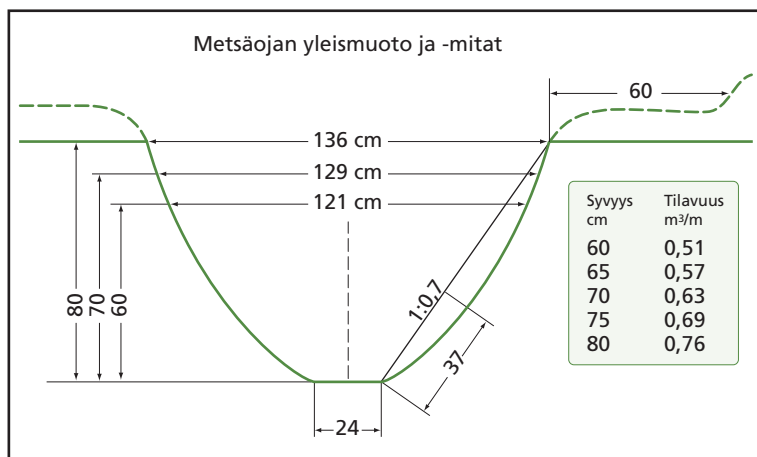
Kuivatusteknisten ja ojan kuntoon vaikuttavien tekijöiden lisäksi hankkeiden koon pienentyminen oli myös omiaan edistämään aurauksesta poikkeavien koneellistamisratkaisujen kehittämistä (esim. Päivänen 1990). Muotokauhalla varustetut traktorikaivurit syrjäyttivätkin vähitellen metsäoja-aurat siten, että kaivuperiaate on ollut lähes yksinomainen menetelmä 1970-luvun lopulta alkaen sekä uusien ojen kaivussa että vanhojen ojen perkauksessa (kuvat 10.2 ja 10.3). Traktorikaivureiden lisäksi myös omalla tela-alustalla liikkuvien kaivukoneiden käyttö metsäojituksissa on lisääntynyt. Metsäojitustöissä kehitettyä kaivuteknologiaa ryhdyttiin soveltamaan myös valmisteltaessa paksuturpeisia soita turpeenkorjuuta varten (Päivänen ja Taipale 1979).

Ojajyrsimiä kehiteltiin erityisesti 1960-luvulla. Jyrsinperiaate soveltui kuitenkin vain kivettömille ja lieottomille paksuturpeisille soille, minkä vuoksi niiden käyttö jäi metsäojituksessa vähäiseksi. Avo-ojitus osoittautui muoviputkitukseen perustuvaa salaajitusta tehokkaammaksi ja useim-



Kuva 10.2

Muotokauhalla ja levennetyillä suoteloilla varustettu kaivukone kunnostusojituksessa. Urjala 2006. (Kuva Juhani Päivänen)



Kuva 10.3 Kaavakuva metsäojan poikkileikkauksesta suositusmittoineen (Niskanen 1980).

mat koemielessä tehdyt salaojitukset onkin myöhemmin korjattu avo-ojituksiksi (Päivänen 1990).

Metsäojien kaivun hinnoittelussa siirryttiin vuonna 1975 ohjemaksusuosituksiin, jotka perustuivat toisaalta työntutkimuksiin kaivutyön tuotoksista erilaisissa olosuhteissa ja toisaalta laskennallisiin koneyksikön käyttötuntikustannuksiin. Ojanperkauksessa metrikustannus asettui noin 75 %:n tasolle verrattuna uuden ojan kaivukustannukseen. Sinänsä toimivasta ohjemaksusuositukseen perustuvasta järjestelmästä on kuitenkin jouduttu luopumaan ja palaamaan urakoiden kilpailuttamiseen EU-säädösten myötä.

10.4 Metsäojitetut suot ja kunnostusojituksen tarve

Suomen nykyisten rajojen sisällä oleva suoala on ennen soiden laajamittaisen hyödyntämisen käynnistymistä ollut noin 10,4 milj. ha eli hiukan yli kolmannes maa-alasta. Jotta soiden metsätaloudellinen käyttö voidaan oikein suhteuttaa sekä kokonaissuoalaan että soiden muihin käyttömuotoihin, on oheen koottu soiden eri käyttömuotojen pinta-aloja osoittavat luvut (Taulukko 10.1). Tarkin tieto toisaalta ojittamattomasta (4 milj. ha) ja toisaalta metsäojitetusta suoalasta (4,95 milj. ha) saadaan valtakunnan metsien 10. inventoinnin (VMI10) maastomittausten tuloksista (Korhonen ym. 2006). Ojitettujen soiden kokonaisala on kuitenkin 5,4 milj. ha, kun mukaan otetaan ojitettu pinta-ala (0,6 milj. ha), joka ojituksen ajankohtana on ollut ohutturpeista suota, mutta turvekerroksen hajoamisen myötä siirtynyt ojitettujen kivennäismaiden maaluokkaan.

Metsäojitustilastojen mukaan ojitusala on mainittua lukua suurempi, eli noin 6 milj. hehtaaria (Metsätilastollinen vuosikirja 2002). Osin tämä ristiriita selittyy sillä, että ojitus-tilastoissa esiintyy päällekkäisyyttä; alunperin harvalla ojaverkostolla kuivatetulle alueelle on laadittu ja toteutettu uusi kuivatussuunnitelma ja sama pinta-ala on saatettu viedä kahden kertaan tilastoihin. Metsäojitustilastot sisältävät soiden ojitusten lisäksi myös soistuneiden tai veden vaivaamien kankaiden ojitusalat.

Soita on myös turvetalouden piirissä ja jäänyt säännöstelyaltaiden alle tai raivattu pelloiksi. Toisaalta turvemaan peltoja on viime vuosina siirtynyt takaisin metsätalousmaan luokkaan.

Suometsien puuston tilavuus 496 milj. m³ on noin 24 % maan kaikkien metsien puuston kokonaistilavuudesta ja vuotuinen kasvu 24,0 milj. m³ eli 24,4 % metsien kokonais-

kasvusta. Inventointitulokset osoittavat myös, että puuston vuotuisen kasvun lisäys viimeisten 50 vuoden aikana on ollut soilla suurempi kuin kivennäismailla (Hökkä ym. 2002). Ojitettujen soiden puustot ovat vielä pääosin ”nuorissa” kehitysluokissa, joten niiden kasvunlisäyksen voidaan olettaa jatkuvan edelleen, mikäli ojen kunnosta, harvennushakkuista ja monissa tapauksissa myös puuston ravinnetaloudesta huolehditaan.

Valtakunnan tasolla tarkasteltuna kestäväen hakkuusuunnitteen toteutuminen edellyttää yhä suurempaa vuotuista korjuukertymää suometsistä (Nuutinen

Taulukko 10.1
Kokonaissuoala ja soiden eri käyttömuodot.

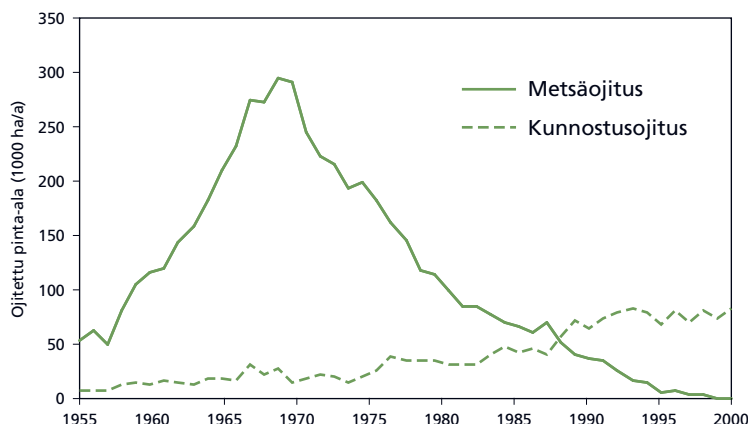
Suon käyttömuoto	Pinta-ala milj. ha
Ojittamatonta suota ¹⁾	4,2 ²⁾
Metsäojitettua suota	5,4
Edelleen maaluokassa suo ¹⁾	4,7 ²⁾
Nykyään maaluokassa kangas, koska turvekerros huvennut ¹⁾	0,7
Suoviljelyksessä ³⁾	> 0,4
Turvetalouden piirissä ³⁾	< 0,2
Tekoaltaiden alla ³⁾	< 0,2
Yhteensä	10,4

Lähteet ja selitykset:

¹⁾ VMI8, (ks. Hökkä ym. 2002)

²⁾ VMI8:ssa (Hökkä ym. 2002) suoksi (ojittamaton + ojitettu) luokiteltu pinta-ala on yhteensä 8,9 milj.ha.

³⁾ Kirjoittajan arvio



Kuva 10.4 Metsäojituksen ja kunnostusojituksen pinta-alojen kehitys vuosina 1955–2001.

ym. 2000). Suometsät muodostavat siten merkittävän osuuden metsiemme uudistuvasta luonnonvarasta.

VMI8:n tulosten mukaan kunnostusojitusten tarpeessa (toimenpide-ehdotukset: vanhojen ojen perkaus, täydennysojen kaivu tai täydennys + perkaus) olevien ojitetujen soiden ala oli 1,41 milj. ha (Hökkä ym. 2002). Jaettuna inventointihetkeä seuraavalle 10-vuotiskaudelle vuotuinen kunnostusojitustarve olisi tuolloin siis ollut noin 140 000 ha. VMI 8:n kenttätöiden aikana kunnostusojituksia tehtiin vuotuisesti noin 62 000 ha ja tämän jälkeenkin, vuosina 1995–2001 vain vähän alle 80 000 ha vuodessa (kuva 10.4; Metsätalostollinen vuosikirja 2002). Kunnostusojituksia onkin koko ajan tehty arvioitua tarvetta vähemmän (Korhonen ym. 2006).

10.5 Kunnostusojitettavien kohteiden valinta

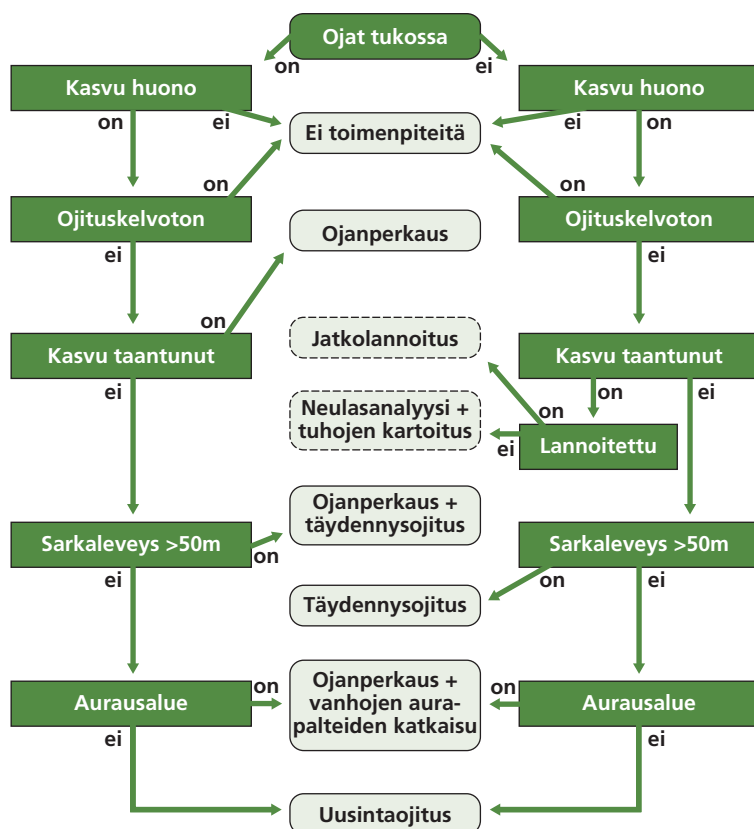
Metsäojitettu suo on vesitaloudeltaan labiili ekosysteemi, jonka kuivatustila vaatii seuranta- ja mahdollisesti myös korjaavia toimenpiteitä. Metsänparannuksen tehtäväkenttä siirtyikin 1990-luvulla metsäojituksesta ojitusalueiden kunnostukseen.

Alustavat ehdotukset kunnostusojituksen tarpeellisuudesta on yleensä kirjattu metsätaloussuunnitelmaan. Valveutuneella maanomistajalla voi myös olla havaintoja maillaan olevan ojitusalueen liiallisesta märkyydestä. Kunnostusojituksen suunnitteluun ryhdyttäessä on aluksi muodostettava käsitys sekä alue- että kuviokohtaisesti kasvualustan metsänkasvatuskelpoisuudesta ottaen huomioon, millä ilmastollisella alueella ollaan. Keskeisiä tekijöitä ovat tällöin alkuperäinen suotyyppi ja lämpösumma.

Puuston metsänhoidollisen tilan ja kasvualustan kuivatustilan kohentamistarvetta ojitusalueilla arvioitaessa tulee pitää erillään kaksi käsitettä, joista toinen on yhteydessä puuston huonoon kehitysluokkaan ja toinen kasvualustan niukkaravinteisuuteen (Päivänen 1990, 1994a).

Vajaatuottoisuus on metsikön puustoa kuvaava kehitysluokka, joka voi johtua vajaa-puustoisuudesta, kasvupaikalle selvästi sopimattomasta puulajista, elpymiskyvyyttömäksi osoittautuneesta metsiköstä tai myrsky-, lumi-, hyönteis- tai sienituhosta. Ravinteiden niukkuus kasvualustassa ei siis sinänsä johda vajaatuottoisuuteen (vrt. ylläpitokelvottomuus). Vajaatuottoiset metsiköt voidaan - sekä kankailla että ojitetuilla soilla - saattaa kasvatuskelpoisiksi tarkoituksenmukaisilla metsänhoidollisilla toimenpiteillä.

Vajaatuottoisuutta esiintyy metsämaan ojitetuilla soilla melko vähän, keskimäärin noin 7 %:lla pinta-alasta (Hökkä ym. 2002). Vajaatuottoisuuden käsitteessä on myös tapahtunut



Kuva 10.5 Kaavio kunnostusojitustarpeen ja -menetelmän määrittämisen avuksi (Ahti ym. 1988).

muutoksia. Aiemmin esim. hieskoivuun suhtauduttiin siinä määrin kielteisesti, että puuston hieskoivuvaltaisuus saattoi viedä kehitysluokan vajaatuottoiseksi. Ojitetuilla soilla hieskoivu katsotaan nykyään kuitenkin kasvupaikalle sopivaksi puulajiksi. Turvekankaiksi kehittyneillä vanhoilla ojitusalueilla tavoitteeksi voidaan kuitenkin asettaa, että seuraavaksi puusukupolveksi pyritään saamaan havupuuvaltainen metsikkö.

Ylläpitokelvottomaksi katsotaan ojitusalueella kuvio, joka ei täytä suotyypiltään ja ilmastoalueeltaan metsänkasvatuskelpoisuuden kriteerejä. VMI8:n mukaan näiden puuntuotantoon soveltumattomien ojitetujen soiden ala oli vajaa 10 % ojitetujen soiden kokonaisalasta. Etelä-Suomessa osuus on 6,2 % ja Pohjois-Suomessa 14,3% (Hökkä ym. 2002). Ylläpitokelvottomiksi katsottavat metsiköt ovat pääosaltaan alun perin olleet avosoita tai vähäpuustoisia ja niukkaravinteisia rämeitä. Näillä kasvualustoilla puuston kasvu ei oleellisesti tule parantumaan, vaikka kasvualustan kuivatustilaa kohennettaisiinkin. Tällaiset alueet rajataan kunnostusojituksen ulkopuolelle ja niiden annetaan palautua takaisin toiminnallisiksi suoekosysteemeiksi.

Kasvupaikka täyttää kunnostusojituskelpoisuuden kriteerit - rajalämpösummaansa edullisemmissa ilmasto-oloissa - ojitetuilla suokasvupaikoilla, jotka kehittyvät ojituksen vaikutuksesta vähintäänkin kohti puolukkaturvekangasta. Isovarpuräme ja eräissä tapauksissa myös tupasvilläräme, jotka kehittyvät ojitetuina varputurvekankaaksi, ovat edullisimmissa ilmasto-olosuhteissamme metsänkasvatuskelpoisia.

Puustolle tulee asettaa tietyt minimivaatimukset kunnostusojitettavia kohteita valittaessa. Jos ensiojitus on aikanaan suoritettu oikein, tulisi kunnostusojitus - mikäli sitä tarvi-

taan - kytkeä ojitusalueella tehtävään puunkorjukseen. Mikäli puusto ei ole ojituksen vaikutuksesta saavuttanut ensiharvennusvaihetta, tulee kriittisesti harkita kaikkiaankin kunnostusojituksen tarkoituksenmukaisuutta (Päivänen ja Sarkkola 2002).

Eräänä lisänäkökohtana voidaan käyttää myös maaluokkaa: Ojituksen vaikutusaikana kuvion maaluokan tulee nousta alun perin niukkaravinteisissa ja vähäpuustoisissa kohteisakin, jollaisia ovat jouto- ja kitumaan suot, metsämaan tasolle. Lisäpanostus ei ole perusteltua metsänparannuskohteisiin, joissa puuston vuotuinen kasvu ei ole saavuttanut metsämaalta edellytettävää minimitasoa $> 1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Jos ojitusalueen puuntuotoskyky on vaarantumassa alun perin teknisesti epäonnistuneen ojituksen, suonpinnan painumisen, alueen ulkopuolella tehtyjen toimenpiteiden tai muiden kasvualustan ravinteisuudesta riippumattomien syiden vuoksi, voidaan kunnostusojitukseen ryhtyä, vaikka edellä esitetyt puustolliset vaatimukset eivät täytyisikään.

Ojitusalueen kuivatustilaan vaikuttaa kaltevuuden, maaperän ominaisuuksien ja ojitus-tekniesten seikkojen lisäksi oleellisesti puusto ja sen kehittyminen. Runsaspuustoisilla ojitusalueilla puuston haihdunta pystyy yleensä kompensoimaan ojaiston kuivatustehon heikkenemisen siten, ettei ojen kunnostusta ole tarpeen tehdä ennen päätehakkuuta. Jos suon lähtöpuusto on vähäinen ja kasvualusta suhteellisen niukkaravintainen, kuten useimmilla rämetyypeillä, ojen kunnan heikkeneminen aiheuttaa puuston kasvuun taantuman ja ojaiston kunnostustarpeen jo ennen päätehakkuuta.

Kunnostustarpeen arvioinnissa tulee kiinnittää huomiota puuston kasvuun, ojen kuntoon ja rahkasammalten vallitsevuuteen pintakasvillisuuden pohjakerroksessa. Myös kasvupaikan laatuun eli siis alkuperäiseen suotyyppiin tulee kiinnittää huomiota. Mikäli kasvupaikka osoittautuu metsänkasvatuskelvottomaksi, tulee se jättää kunnostettavan alueen ulkopuolelle. Edelleen on syytä arvioida, onko puuston kasvu ollut koko ojituksen ajan huono, vai onko se elpymisvaiheen jälkeen vasta myöhemmin taantunut. Jos sarkaleveys on yli 50 metriä, on harkittava täydennysojitusta ojanperkauksen vaihtoehtona. Aurasalueilla palteet on syytä katkaista kaivurilla, ja ojen perkaus kannattaa tehdä ojen kunnosta riippumatta, koska auraajat ovat yleensä matalia. Kunnostusojitustarpeen määrittäminen helpottamiseksi on kehitetty edellä esitettyihin näkökohtiin perustuva kaavio (kuva 10.5).

Ojen perkaus on yleisin ojitusalueen kuivatustilan kunnostustoimenpide. Täydennysojitusta käytetään lähinnä vain silloin, kun perkauksella ei arvioida päästävän haluttuun kuivatustulokseen. Myös seuraavat syyt puoltavat sarkaojen perkausta ensisijaisena vaihtoehtona:

- Uuden ojan kaivaminen on yleensä kalliimpaa kuin vanhan perkaus.
- Ojat pienentävät kasvualaa ja sarkoja ei voida siten jatkuvasti halkoa.
- Jokainen oja vaikeuttaa myöhempiä puunkorjuuta.

Täydennysojitukseen kuuluvat oleellisena osana puuttuvien niskaojen suunnittelu tai väärin sijoitettujen niskaojen siirto sekä suolahdekkeisiin suunniteltavat pisto-ojat.

10.6 Toimenpiteiden järjestys ja toteutus kunnostusojituksissa

Metsäojitusalueilla kunnostusojitukseen liittyvät toimenpiteet tulee sovittaa siten, että työvaiheet tehdään oikeassa järjestyksessä. Erityisen tärkeää on ajoittaa oikein ojituksen ja puunkorjuun suunnittelu ja näiden toteutus. Kunnostusojituksen suunnitteluun tulee ryhtyä jo ennen hakkuita, jotta metsänparannustöiden ja puunkorjuun tarkoituksenmukainen yhteensovittaminen mahdollistetaan.

Kunnostusojituksen suunnittelun yhteydessä voidaan tehdä myös tarpeelliseksi katsottavien metsänhoitotöiden, kuten esim. taimikonhoito, nuoren metsän hoito, metsänlannoitus, metsänuudistaminen, suunnitelmat. Maanmuokkausta tarvitsevat alat on selvitettävä, jotta suunnitellut kuivatusojat ja maanmuokkaus niveltäisivät toisiinsa siten, että myös vesien selkeyttäminen tulee otettua huomioon.

Kunnostusojituksen suunnittelua seuraa korjuun suunnittelu, puukauppa ja puunkorjuu. On huomattava, että kunnostusojitettavilla alueilla voi olla myös kuvioita, joilla voidaan tehdä nuoren metsän hoitoa ja energiapuun kasausta osittain kestävänsä metsätalouden rahoituslain tukemana.

Toimenpiteiden suoritusjärjestys on siten - soveltuvin osin - seuraava (Päivänen 1994a):

Metsänparannussuunnitelmat

- metsätiesuunnitelma
- kunnostusojitusuunnitelma
- metsänhoitosuunnitelmat

Kulkuyhteyksien rakentaminen

- metsätiet ja varastopaikat
- piennartasanteet ja rummut

Puunkorjuun suunnittelu, puukauppa ja korjuun toteutus

Muut ojitusta edeltävät työt

- taimikonhoito
- nuoren metsän hoito ja energiapuun korjuu
- maanmuokkaus

Ojien perkaus ja täydennysojien kaivu

Metsänlannoitus

Kunnostusojituksessa maanomistajan, Suomen metsäkeskuksen alueyksikön, metsänhoitoyhdistyksen, suunnitteluja tarjoavan yrityksen, puunosto- ja korjuuorganisaation sekä metsäkuljetuksen ja ojienkaivun urakoinnin tulee saumattomasti sovittaa tavoitteensa ja toimintansa yhdeksi kokonaisuudeksi. Metsänomistajan omatoimisuutta tulee edistää; erityisesti taimikonhoitotyöt ja energiapuun kasausta sekä mahdollisesti myös hakkuu ja metsäkuljetus saattavat soveltua itse tehtäviksi kokonaisuuden osiksi.

Pääosa perkauksista ja täydennysojituksista tehdään traktorikaivureilla, kunnostusojitukseen kehitetyillä ja hydraulisella voimansiirrolla varustetuilla erikoiskaivureilla tai oma-alustaisilla, ympäröivillä kaivukoneilla. Kapeista perkauskauhoista on luovuttu, koska samoissa hankkeissa tehdään sekä perkauksia että täydennysojan kaivua. Kaivukoneiden tuottavuus on suurempi kuin kaivureiden, mutta ne saattavat myös aiheuttaa puustovaurioita kaivureita enemmän.

10.7 Vesiensuojelu kunnostusojituksessa

Kuormitustilanne

Metsätaloustoimenpiteiden aiheuttama vesistökuormitus arvioidaan valtakunnallisella tasolla vähäiseksi. Typen osalta metsätalouden osuus on 6–7 % ja fosforin osalta noin 9 %. Kuitenkin Itä- ja Pohjois-Suomessa metsätalouden osuus järvien kuormituksesta on usein samaa luokkaa maatalouden kanssa. Suurin osa metsätalouden aiheuttamasta vesis-

tökuormituksesta aiheutuu kunnostusojituksista ja päätehakkuista sekä metsänuudistamiseen liittyvistä maanmuokkauksista (Kenttämies 2003).

Tavoitteet

Vesiensuojelu on jossakin muodossa ollut jo pitkään metsätalouden ohjeistoissa (esim. Joensuu 1999), joita tiedon kertymisen myötä jatkuvasti päivitetään (esim. Joensuu ym. 2004). Kansallinen metsäohjelma 2010 (Maa- ja metsätalousministeriö 1999) edellytti, että valtioneuvoston periaatepäätöksen (19.3.1998) mukaisesti metsätalouden aiheuttama ravinnekuormitus olisi puolitettava vuoden 1993 tasosta vuoteen 2005 mennessä. On kuitenkin arvioitu, että asetettua tavoitetta ei ainakaan typpihuuhtouman vähentämisen osalta saavutettu (Metsätalouden ympäristöopas 2004). Valtioneuvoston periaatepäätöksessä vesiensuojelun suuntaviivoiksi korostetaankin edelleen metsätaloustoimien hyvän suunnittelun ja toteutuksen tärkeyttä (Nyroos ym. 2006).

Kestävän metsätalouden rahoituksesta annetut ohjeet ja määräykset edellyttävät vesiensuojelun huomioon ottamista ja vesiensuojelusuunnitelmaa kunnostusojituksessa. Vesiensuojelu on myös mukana kaikkien toimijoiden metsäsertifioinnin kriteereissä.

Kunnostusojituksen yhteydessä tehtävien vesiensuojelutoimenpiteiden tavoitteena on, että ojaeroosiota tapahtuu mahdollisimman vähän ja että veden mukana kulkevasta kiintoaineksesta saadaan 70–90 % pysäytetyksi ennen kuin vedet päätyvät luonnonuomaan. Tavoitteena on, että myös merkittävä osa kunnostusojituksen aiheuttamasta ravinnekuormituksesta saadaan pysäyttämään käytettävillä vesiensuojelumenetelmillä.

Vesiensuojelutoimet on harkittava tapauskohtaisesti, koska kunnostusojituskohteet ovat erilaisia. Käytettävien menetelmien valintaan vaikuttavat pääasiassa seuraavat tekijät:

- maaston topografia, joka vaikuttaa mahdollisuuksiin hidastaa veden virtausnopeutta
- ojan pohjan maalaji, joka vaikuttaa maaperän eroosioherkkyyteen
- valuma-alueen ja ojitusalueen laajuus, joka vaikuttaa virtaaman määrään
- vesistöjen läheisyys
- maanomistusolot.

Kunnostusojituksen hydrologiset vaikutukset

Kunnostusojituksen vaikutus valuntaan riippuu ainakin osittain perattavien ojien ja täydennysojien määrän välisestä suhteesta ojitusalueella. Jos kunnostus on pääosin vanhojen ojien perkausta, vaikutus virtaamahuippuihin on yleensä vähäinen. Ojien perkauksen ei ole päätelty lisäävän ylivalumaa, mutta sillä saatetaan lisätä sateettomien ajanjaksojen valumaa eli alivalumaa. Täydennysojitus sen sijaan saattaa kasvattaa valuntahuippuja, koska alueen ojatiheys kasvaa ja pintavesien virtaus ojiin nopeutuu ojien välisen etäisyyden pienentyessä (Päivänen ja Ahti 1988).

Kunnostusojituksessa kiintoaineksen huuhtoutuminen on vähintään samaa suuruusluokkaa kuin uudisojituksessa, joskus jopa suurempaakin. Erityistä merkitystä on sillä, joudutaanko laskuojaa kunnostamaan. Kunnostusojituskohteilla eroosioherkät kohdat voidaan tunnistaa vanhojen uomien muodonmuutoksista. Turvekerroksen ohentuminen lisää kunnostusojituksessa eroosioherkkyyttä, koska aiempaa suuremmalla osalla ojaverkostoa kunnostusojat ulottuvat kivennäismaahan saakka.

Kunnostusojituksella pyritään säilyttämään puuston kasvu ojitetun suon ravinnetalouden mahdollistamalla tasolla. Kunnostusojitus vaikuttaa puuston kasvuun maan kuivatustilanteen parantumisen kautta, mutta toisaalta se myös nopeuttaa ravinteiden vapautumista turpeesta.

Kunnostusojituksella on todettu olevan seuraavan suuntaiset vaikutukset alueelta purkautuvien vesien laatuun (Joensuu 2002): Ammoniumtypen huuhtoutuminen lisääntyy kunnostusojituksen seurauksena. Fosforin huuhtoutumisen lisääntyminen liittyy kiintoaineshuuhtouman väliaikaiseen kasvuun. Pääosa fosforista on sitoutuneena hienoon kivennäismaa-ainekseen, erityisesti savekseen. Valumaveden rauta- ja alumiinipitoisuudet saattavat hetkellisesti kohota kunnostusojituksen jälkeen. Myös natrium-, kalium-, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet kohoavat. Valumaveden humuspitoisuus pienenee yleensä kunnostusojituksen jälkeen. Muutosten kesto on pitkäaikainen.

Kunnostusojitus vähentää usein valumaveden happamuutta. Happamuuden väheneminen johtuu todennäköisesti siitä, että vedet valuvat kunnostusojituksen jälkeen ojiin syvemmissä maakerroksissa kuin ennen ojien kunnostusta.

Kaikkiaan on kuitenkin todettava, että ojitettujen metsäalueiden merkitystä vesistöjen ravinnekuormituksessa on vaikea tutkimuksellisesti todentaa. Kuormitusarvioiden tekoa vaikeuttavat mm. maasto-, maaperä- ja kasvupaikkaolosuhteiden erilaisuus, metsätalouden toisaalta päällekkäiset toimenpiteet samalla pinta-alalla ja toisaalta toimenpiteet valuma-alueen eri osissa sekä mahdollisten vaikutusten pitkä aikajänne.

Vesiensuojelutoimet

Seuraavassa esitettävät suunnittelun periaatteet ja toteutuksen toimenpidevalikoimat perustuvat pääosin kunnostusojituksen käytännön toteutusta varten koostettuun ohjeistoon (Joensuu ym. 2004). Kunnostusojitushankkeen suunnittelun yhteydessä tehdään vesiensuojelusuunnitelma, jossa esitetään miten mahdollisesti aiheutuviin vesistöhaittoihin aiotaan varautua. Suunnitelmassa esitetään riittävät tiedot hankkeesta, arvioidaan haittariskit ja esitetään toimenpiteet, joilla haitat pyritään torjumaan. Vesiensuojelusuunnitelma lähetään ympäristöviranomaiselle eli alueelliselle ELY-keskukselle lausuntoa varten. Ojituslupa tarvitaan kunnostusojitushankkeen ulkopuolisilta maanomistajilta, joiden omistamien alueiden kautta vedet kunnostettavalta alueelta ojia myöten johdetaan.

Kunnostusojitushankkeen suunnittelussa selvitetään ojitusalueella mahdollisesti olevat pohjavesialueet, metsälain mukaiset erityisen tärkeät elinympäristöt, kuten pienvedet ja lähteet sekä luonnonsuojelulain mukaiset suojellut luontotyytit. Ne merkitään kunnostusojitussuunnitelman liitteeksi tulevaan karttaan. Näiden säädöspohjaisesti huomioon otettavien kohteiden ympärille jätetään niin laajat suojavyöhykkeet, ettei kunnostusojitus vaaranna kohteiden ominaispiirteiden säilymistä. Erityisen tärkeää on määrittää ojitusvesien purkukohtien sijainti ja valita laskeutusaltaille ja pintavalutuskentille soveltuvat maastokohdat.

Vanhoja syöpyneitä ojia ei tulisi perata, koska ne ovat kuivatuksen kannalta yleensä jo riittävän syviä ja perkaus saattaisi aiheuttaa vain ojien lisääntyvää syöpymistä. Myös lasku- ja kokoojaojat tulisi jättää perkaamatta, mikäli niiden vedenjohtokyky on säilynyt riittävän hyvänä. Alavien rantojen tulva-alueet tulisi jättää kunnostamatta, koska vedenpinnan vaihtelu huuhtoo maa-aineksia ojista vesistöön.

Maa-aineksen mahdollinen liikkeellelähtö tulisi pyrkiä pysäyttämään jo ojakohtaisesti. Eroosioherkillä kivennäismailla ojan pohjaa pitkin kulkeutuvaa kiintoainesta voidaan poistaa lietekuopilla, jotka ovat 1–2 kuutiometrin suuruisia ojaan kaivettuja syvennyksiä. Ojien pohjille kivistä, puusta tai muusta materiaalista tehdyillä pohjapadoilla voidaan hidastaa veden virtausta ojassa ja pidättää pohjakulkeutumana liikkuvaa karkeaa kiintoainesta. Maaston muodon salliessa voidaan perattavaan ojaan jätettävillä kaivu- ja perkauskatkoilla nostaa vesi ojakohtaisesti pintavalutukseksi, jolloin kiintoaines pysähtyy ja osa ravinteista sitoutuu kasvillisuuteen.

Ojitusalueelta tai sen erillisiltä ojastoilta luonnonuomiin valuvia vesiä selkiytetään laskeutusaltailla ja pintavalutuksella.

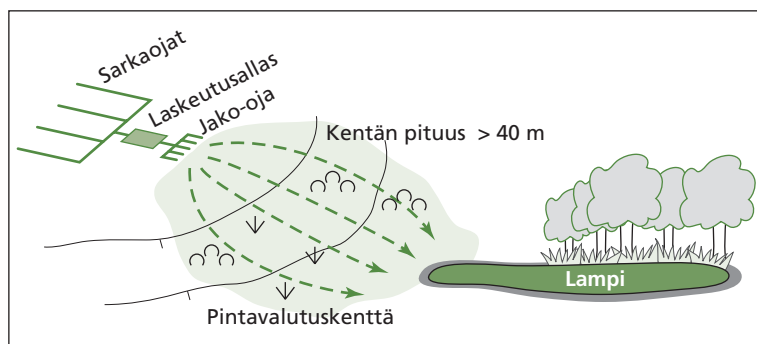
Laskeutusallas on laskuojan alajuoksulle kaivettu allas tai allassarja, jonka tavoitteena on hidastaa veden virtausnopeutta, jotta kiintoaines ehtisi laskeutua altaan pohjalle. Laskeutusaltailla voidaan poistaa vedestä 30–50 % kiintoaineksestä. Parhaissa tapauksissa voidaan päästä jopa 60–70 %:n saantoon. Vesiensuojeluvaiikutusta voidaan edistää, mikäli laskeutusaltaan alapuolelle voidaan aikaansaada pintavalutuskenttä tai jättää suojavyöhyke taikka vedet on mahdollista johtaa altaasta perkaamatta jäävän kasvipeitteisen laskuojan kautta. Tällöin laskeutusaltaaseen jää karkein kiintoaines sekä pintavalutuskentälle suuri osa hienojakoisesta aineksesta ja kiintoainekseen sitoutuneet ravinteet sekä osa liukoisista ravinteista.

Laskeutusaltaan yläpuolisen valuma-alueen tulisi olla enintään 50 hehtaaria; allaspinta-alan tulisi olla 3–8 m² ja lietetilavuuden 2–5 m³/valuma-aluehehtaari. Laskeutusaltaasta lähtevä laskuoja kaivetaan matalammaksi kuin altaaseen tuleva oja. Tällöin altaan lietetilavuus saadaan mahdollisimman suureksi.

Pintavalutuksella tarkoitetaan kunnostusojitusalueelta tulevan veden ohjaamista ojittamattoman alueen läpi. Pintavalutusalueen pintakerroksen tulisi olla heikosti maatonuturvetta. Vesi johdetaan virtaamaan osin pintakerrosvaluntana ja osin pintavaluntana alueella kasvavan kasvillisuuden läpi, jolloin se puhdistuu fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten prosessien seurauksena. Pintavalutusta on sovellettu laajalti turvetuotantoalueiden vesiensuojelumenetelmänä. Pintavalutus on osoittautunut myös kunnostusojituksissa tehokkaimmaksi menetelmäksi pysäyttämään veden mukana liikkeelle lähtenyt kiintoainesta sekä vähentämään liuenneiden ravinteiden kulkeutumista vesistöön.

Pintavalutuskenttänä voidaan käyttää osaa vanhasta ojitusalueesta, kunnostusojituskelvotonta ojitusalueen osaa tai kunnostusojitusalueen alapuolella olevaa luonnontilaista suota. Johdattaessa vettä pintavalutuskentälle kaivetaan kentän yläpuolelle kaaren tai kaman muotoinen jako-oja, jotta ojaston vesi saadaan hajautettua mahdollisimman tasaisesti kentälle. Jako-ojan yläpuolelle voidaan tehdä myös laskeutusallas, johon veden mukana pohjakulkeutumana tuleva karkea aines pysäytetään (kuva 10.6).

Valuma-alue pyritään rajaamaan kaivuteknisesti niin, että pintavalutuskentälle purkautuvat vedet tulevat alle 50 hehtaarin alueelta. Laskuojan riittävä kaltevuus on määräävä tekijä pintavalutuskentän sijainnin suunnittelussa. Samoin itse pintavalutuskentän tulisi olla loivasti viettävä. Pintavalutuskenttä suunnitellaan mieluiten niin, että vedet ohjau-



Kuva 10.6 Periaatekuva vesien johtamisesta metsäojitusalueelta laskeutusaltaan ja pintavalutuskentän kautta kohti luonnonuomaa (Joensuu ym. 2004).

tuvat kentältä alapuolella oleviin vanhoihin ojiin, jolloin laskuojaan ei tarvitse koskea. Mikäli pintavalutuskenttä tehdään vanhalle ojitusalueelle ennallistamalla sopiva osa ojitettua suota takaisin toiminnalliseksi suoekosysteemiksi, alueesta voidaan käyttää myös nimitystä suopuskuri (Sallantaus ym. 1998). Metsäojitetusta suosta ennallistetun suopuskurin on voitu todeta sitovan kiintoaineen lisäksi huomattavan osan valumavesien mukana tulevasta typpi- ja fosforikuormasta (Silvan 2003, 2004).

Suojavyöhyke on vesistön rantaan jätettävä kapea maa-ala, jolla ei maanpintaa eikä pintakasvillisuutta rikota. Kunnostusojituksessa vesistöön johtavat ojat jätetään perkaamatta muutaman kymmenen metrin matkalta ennen vesistöä. Suojavyöhykkeillä olevat vanhat ojat on tarpeen tukkia oikovirtausten estämiseksi. Vesi ohjataan suojavyöhykkeille kääntämällä oja vanhan uoman ulkopuolelle.

10.8 Metsäojitus ja soiden hiilitase

Tärkeimmät kasviaineksen hajottajat turpeessa ovat happihakuisia mikrobeja, ja pääasiallisin vapautuva kaasu on hiilidioksidi (CO_2). Suon ja ilmakehän välillä tapahtuu jatkuvasti hiilidioksidin vaihtoa molempiin suuntiin. Orgaanista ainetta muodostuu hiilidioksidin sitoutuessa kasvien yhteyttämisprosesseissa. Valtaosa hiilidioksidista palaa kuitenkin takaisin ilmakehään orgaanisen aineen hajotuksessa turpeen pintakerroksissa. Happipakoiset (anaerobiset) bakteerit hajottavat pohjavedenpinnan alapuolisissa turvekerroksissa hiiliyhdisteitä lähinnä metaaniksi (CH_4). Metaanipäästöt ovat suurimmat märillä, saravaltaisilla soilla.

Soiden ojitus muuttaa merkittävästi hiilidioksidin ja metaanin virtoja, sillä vedenpinnan lasku lisää turpeen pintakerrosten hapellisuutta. Happipitoisuuden lisääntyminen edistää happea vaativia biologisia toimintoja ja vastaavasti hapettomuutta edellyttävät toiminnot heikkenevät. Aiemmin arveltiin, että metsäojitus saattaisi osaltaan kiihdyttää nk. kasvihuoneilmiön kehittymistä eli maapallon ilmaston lämpiämistä. Ojituksen vaikutus suon hiilenkiertoon riippuu kuitenkin monista tekijöistä.

Ojituksen aiheuttaman biomassan ja kariketuotannon lisääntymisen, ja toisaalta, turpeen voimistuvan mineralisaation suhde ratkaisee, muuttuuko suo ojituksen jälkeen hiilen sitojasta hiilen lähteeksi. Koko suon hiilitaseen tarkastelussa on turpeen hiilivirtojen lisäksi otettava huomioon myös kasvupaikan koko biomassaan, erityisesti puustoon, kertyvä hiili. Ojituksen vaikutus turpeen hiilivarastoihin on osoittautunut oletettua pienemmäksi. Etenkin eteläisen Suomen karuhkoilla soilla hiilen sitoutuminen näyttää jopa selvästi lisääntyneen ojituksen jälkeen huolimatta lisääntyneestä maan ilmanvaihdesta. Kun ojitetujen soiden kasvihuonevaikutuslaskelmissa otetaan huomioon myös pienentyneet metaanipäästöt, tuloksena on, että ojituksen jälkeen soiden kasvihuonevaikutus heikkenee. Tämän vaikutuksen arvioidaan kestävän ainakin muutamia satoja vuosia (Laine ym. 2002, Laine ym. 2008).

11 Turvetuotantoalueiden ojitus ja vesiensuojelu

Björn Klöve,
Heini Postila ja
Hannu Marttila

11.1 Suot turvetuotannossa

Soita esiintyy alueilla, joilla sadanta ja ilman kosteus ovat suuria. Tällaisissa olosuhteissa orgaanisen aineksen hajoaminen estyy, ja kasvimateriaali varastoituu paksuiksi turvekerroksiksi. Suurimmat suovarot löytyvät kylmän ilmastovyöhykkeen alueelta (Kanada, Venäjä, Ruotsi, Viro ja Suomi) sekä päiväntasaajan tuntumasta (Indonesia). Lähes kolmannes Suomen pinta-alasta on turvemaita. Soiden osuus pinta-alasta vaihtelee Etelä-Suomen noin 10 prosentista Pohjois-Pohjanmaan 60 prosenttiin (ks. Luku 2, kuva 2.8).

Soiden ojitus alkoi Suomessa 1800-luvulla, jolloin suot ojitettiin lähinnä pelloiksi. Ojitus metsätaloutta varten yleistyi 1950-luvulla. Tällöin Suomessa ojitettiin yhteensä 4,7 miljoonaa hehtaaria suota (ks. Luku 10). Turpeen poltto yleistyi 1800-luvun loppupuolella. Suomessa valtio pyrki edistämään turpeen tuotantoa ensimmäisen kerran toisen maailmansodan aikana ja perusti vuonna 1945 Valtion polttoainekeskuksen helpottamaan energiapulaa. Vuonna 1967 perustettiin turvekomitea edistämään turpeen käyttöä ja varmistamaan mahdollisten kriisiaikojen energianhuolto. Maailmanlaajuinen öljykriisi 1970-luvulla käynnisti laajamittaisen turvetuotannon.

Turvetta tuotetaan Suomessa vuosittain keskimäärin noin 25 milj. m³, josta 2 milj. m³ on kasvuturvetta. Vuotuinen tuotanto koko maailmassa on noin 143 milj. m³ turvetta. Suurimmat tuottajat ovat Suomen lisäksi Valko-Venäjä, Venäjä, Irlanti, Saksa, Kanada, Ukraina, Ruotsi ja Baltian maat, etenkin Viro. Turvetta käytetään energianlähteenä Suomen lisäksi lähinnä Irlannissa ja hieman Ruotsissa. Suomessa turpeen poltto vastaa noin 5-7 % energian kokonaiskulutuksesta. Noin viidennes kaukolämmöstä tuotetaan turpeella. Turvetta tuotetaan ja varastoidaan myös energian huoltovarmuuden takaamiseksi.

Turvetuottajien hallinnassa suaalasta on noin 140 000 hehtaaria eli noin 1 % suovaroistamme. Aktiivisessa turvetuotannossa oli 2010-luvun alussa noin 65 000 hehtaaria tuotantopinta-alaa. Turvetuotantoon kunnostettua, mutta tuotannosta pois olevaa suopinta-alaa oli 4 500 hehtaaria. Turpeen vuotuisen kasvun määrästä Suomessa kerätään vuosittain noin puolet. Tuotantoon soveltuvaa alaa on arvioitu olevan noin 622 000 ha eli noin 7 % koko suopinta-alasta.

Turvetuotantoalueille on haettava ympäristölupa aluehallintovirastosta. Luvan hakeminen ja siihen mahdollisesti liittyvä korvausmenettely perustuvat ympäristönsuojelulakiin (YSL) ja ympäristönsuojeluasetukseen (YSA). Vuoden 2014 syyskuussa voimaan tulleessa lainsäädännössä ei enää ollut luparajaa (10 ha), joten myös pienet alueet tulivat luvanvaraisiksi (YSL 27 §, YSA 1 §). Lain perustelujen (HE 214/2013) mukaan turpeen pienimuotoinen kotitarveotto olisi edelleen mahdollista ilman ympäristölupaa, jos toimintaa ei katsottaisi ammittamiseksi. Pienimuotoisuuden ehdon arviointi on tehtävä tapauskohtaisesti (Ympäristöministeriö 2015). Ympäristövaikutusten arviointi (YVA) tehdään kaikille uusille yli 150 hehtaarin turvetuotantoalueille (YVA asetuksen 6 §).

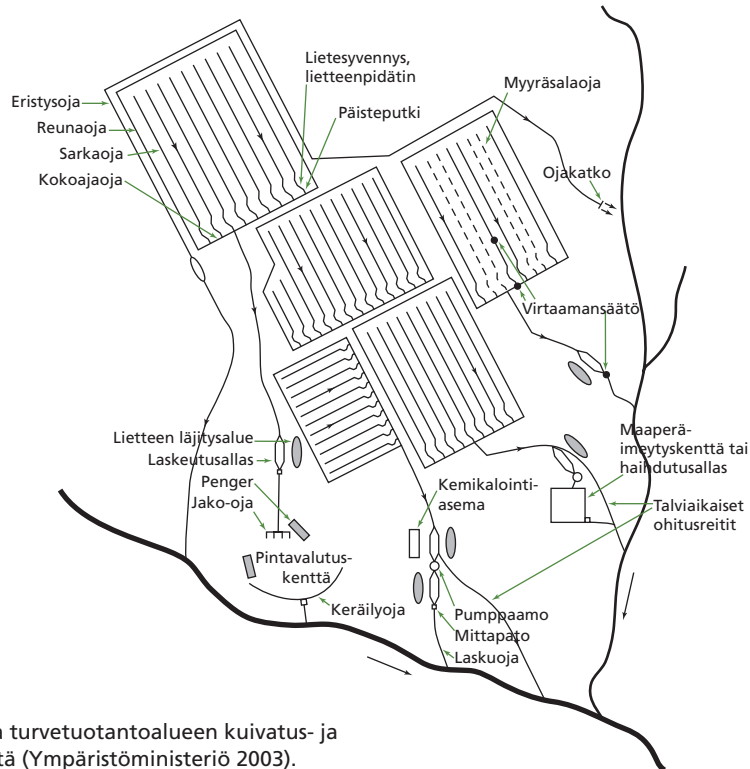
Ympäristöluvassa annetaan määräykset, joiden mukaisesti turvetuotantoa voidaan harjoittaa. Lupamääräykset koskevat mm. ojitusta, vesiensuojelurakenteita, tarkkailuvelvoitteita, jätteiden käsittelyä sekä pölypäästöjä ja melua. Ympäristöluvassa voidaan määrätä korvauksia turvetuotannon aiheuttamista haitoista. Korvauksia on lähinnä suoritettu kalastolle ja kalastukselle aiheutuneista vahingoista ja haitoista osakaskunnille sekä vesistösi-donnaisen virkistyskäytön vaikeutumisesta rantakiinteistöjen omistajille.

Tuotantoa varten suo raivataan, sinne rakennetaan tiet ja ojitus. Lisäksi alue varustetaan erilaisilla laitteilla ja rakenteilla, joilla pyritään vähentämään vesistökuormitusta. Suon kunnostaminen tuotantoon kestää noin 3-5 vuotta. Varsinainen tuotanto tapahtuu touko-elokuussa, ja sääolosuhteet vaikuttavat suuresti vuosittaisiin tuotantomääriin. Tuotettu turve varastoidaan tuotantoalueelle aumoihin, joista sitä toimitetaan käyttäjille pitkin vuotta. Teollinen turvetuotanto kestää samalla alueella keskimäärin 30 vuotta riippuen tuotannon intensiteetistä ja turvekerroksen paksuudesta. Turpeen nostamisen päätyttyä alue on mahdollista ottaa muuhun käyttöön, kuten metsä- tai maatalousmaaksi, tai sen voi antaa soistua uudelleen. Saman turvetuotantoalueen eri osissa voi olla erilaisia jälkikäyttötapoja. Maanomistaja päättää tuotantoalueen jälkikäyttömuodosta ja sen toteutuksesta. Turvetuotannon suopohjia olisi vuoteen 2013 mennessä vapautunut arviolta yli 30 000 ha muuhun käyttöön (Ympäristöministeriö 2013).

Kun teollinen turvetuotanto aloitettiin Suomessa, siihen ei liittynyt erityisiä ympäristövelvoitteita. Varsinaisesti turvetuotannon vesiensuojelutyö käynnistyi 1980-luvun alussa (Selin 1999). Sen jälkeen on kehitetty erilaisia menetelmiä vesistökuormituksen pienentämiseksi, ja ne ovat nykyisin osa tuotantoprosessia.

11.2 Soiden ojitus turvetuotantoon

Suon käyttö turvetuotantoon edellyttää sen tehokasta kuivatusta ennen varsinaisen tuotannon käynnistämistä. Luonnontilaisen suon ojitus turvetuotantoa varten alkaa eristysojien kaivulla ja vesiensuojelurakenteiden perustamisella. Tämän jälkeen kaivetaan kokoojaojat. Suon pinnan kuivuessa kaivetaan tiheämpi sarkaojien verkko. Nykyään suuri osa turvetuo-



Kuva 11.1 Periaatekuva turvetuotantoalueen kuivatus- ja vesiensuojelujärjestelystä (Ympäristöministeriö 2003).



Kuva 11.2 Yleiskuva Luisansuon (Yli-Ii) tuotantoalueesta kuvattuna länsi-itäsuunnassa. (Kuva Suomen ilmakuva 2003)

tantoon otettavista uusista soista on aikaisemmin metsäojitettuja, jolloin ojitus sisältää olemassa olevan ojaiston kunnostuksen sekä tiheimmän sarkaojaston ja eristysojien kaivuun.

Eristysojat johtavat suon ulkopuoliselta valuma-alueelta tulevat vedet tuotantoalueen ohi. Joillakin vanhoilla alueilla ulkopuoliset valumavedet johdetaan suoraan turvetuotannon ojiin. Sarkaojat kaivetaan 20 m välein ja 1,2 m syvyyteen. Sarkaojaa on siten noin 500 metriä tuotantoaluehehtaaria kohti. Sarkaojien kaltevuus noudattaa maan pinnan kaltevuutta ja on usein noin 1–2 %. Virtaaman säädön kannalta ojat kannattaisi kaivaa siten, että saavutetaan pienin mahdollinen kaltevuus. Virtausnopeus ojissa kasvaa kaltevuuden kasvaessa, ja eroosioriski lisääntyy. Suurempi kaltevuus vähentää säätöpatojen taakse jäävää vesivarastoa ja siten säätöpatojen tehokkuutta. Sarkaoja yhdistetään kokoojaojaan putkiojalla eli ns. päisteputkella, jolloin työkonien liikkuminen saralta toiselle on mahdollista. Päisteputken eteen liitetään pidätin ja rakennetaan lietesyvännys estämään putken tukkeutuminen turpeella ja turvekokkareiden kulkeutuminen alapuoliseen vesistöön. Kuvastusta tehostetaan muokkaamalla maanpinta sarkaojan suuntaan kaltevaksi.

Kokoojaojaa pitkin sarkaojista tulevat vedet valuvat vesiensuojelurakenteille, joilla pyritään estämään kiintoaineen ja ravinteiden kulkeutuminen alapuoliseen vesistöön (ks. kohta 11.4). Joihinkin rakenteisiin on tehty puhdistusratkaisujen huoltoa tai kevätvalunnan ohitusta varten ohitusuomat. Nykyisten ohjeiden mukaan pumppaamoille ei enää ohitusmahdollisuutta järjestetä, vaan vesi tulisi varastoida turvetuotantoalueelle häiriötilanteiden sattuessa (Ympäristöministeriö 2013). Mittapato, jolla mitataan virtaama velvoitetarkkailua varten, sijaitsee tyypillisesti vesiensuojelurakenteiden ja alapuolisen vesistön välissä.

Soille kaivetaan myös paloaltaita säännöllisin välein, jotta mahdolliset työkonien kipinästä alkavat turvepalot voidaan sammuttaa. Esimerkki yhden suon kuivatus- ja vesiensuojelujärjestelyistä on kuvissa 11.1. ja 11.2.

11.3 Turvetuotannon ympäristövaikutukset

Turvetuotanto aiheuttaa muutoksia mm. suoalueen hydrologiaan, eliöstön elinolosuhteisiin ja maisemaan. Suon kuivattaminen turvetuotantoa varten muuttaa aineiden käyttäytymistä, esiintymismuotoja ja kulkeutumista tuotantoalueelta vesistöihin ja ilmakehään. Luonnontilainen suo varastoi ravinteita ja sitoo ilmakehän hiilidioksidia. Turvetuotanto lisää yleensä kiintoaine- ja ravinnekuormitusta, mikä saattaa heikentää alapuolisen vesistön veden laatua sekä kalojen, rapujen ja muiden eliöiden elinympäristöjä. Kuivatus lisää myös kasvihuonekaasujen päästöjä ilmakehään. Litorinameren alaisilla mailla ja mustaliuskealueiden läheisyydessä voi myös happaman ja metallipitoisen veden huuhtoutuminen olla riski, jos ojitus yltää sulfidisedimenttikerrokseen (Hadzic ym. 2014, Saarinen ym. 2013a,b).

Suon ojitus turvetuotantoa varten voi aiheuttaa pohjavedenpinnan alentumisen ja pohjaveden saatavuuden vähenemistä. Vaikutukset ovat tapauskohtaisia, riippuvat alueen geologiasta, ja ovat luultavasti mahdollisia, jos ojitus yltää vettä hyvin läpäiseviin hiekka- ja sorakerrokseen asti (Rossi ym. 2012, 2014). Muutokset pohjaveden pinnankorkeudessa, määrässä ja virtauksissa saattavat aiheuttaa myös veden laadun huononemista, esimerkiksi rauta-, mangaani- ja humuspiitoisuuden lisääntymistä.

Turvetuotannon vaikutukset suon hydrologiaan

Turvetuotantoaluetta ojitettaessa veden virtausreitit ja -nopeudet muuttuvat sekä tuotantoalueella että sitä ympäröivällä alueella. Tuotannon loppumisen jälkeen tuotantoalueen hydrologiset vaikutukset vaihtelevat. Viljelykäytössä ja metsitettynä suon virtaamat säilyvät edelleen äärevöityneinä.

Suon vesitase

Luonnontilaisen suon vesitaseen komponentit ovat:

$$Q = P + Q_{po} + Q_{pi} + \Delta SW - E \quad (11.1)$$

Valunta (Q) muodostuu taseesta, johon vaikuttavat sadanta (P), alueelle tuleva pohjavesivalunta (Q_{po}) ja pintavalunta (Q_{pi}), turvesivastaston muutos (ΔSW) sekä haihdunta (E). Pintavalunnalla (Q_{pi}) tarkoitetaan tässä suota ympäröivältä maa-alueelta tulevaa valuntaa. Pohjavesivalunta on turpeen alapuolisesta mineraalimaasta tai kalliosta suotautuva vesimäärä. Turpeen vesivastaston muutos (ΔSW), ja joissakin tapauksissa pohjavesivalunta (Q_{po}), voi olla negatiivinen. Tällöin suolta poistuu vettä myös suotautumalla.

Valunnan muodostumisen kannalta suolle on tyypillistä, että turvekerros jakautuu kahteen erilaiseen kerrokseen: akrotelmaan, jossa on elävää ja vain osittain hajonnutta kasvimateriaalia, sekä katotelmaan, jossa kasviaines on maatunut turpeeksi ja sen hajotus on hidasta. Pohjavedenpinta on useimmiten näiden kahden kerroksen rajapinnassa. Pitkäaikaisten kuivien jaksojen jälkeen vesipinta laskee katotelmaan. Samalla haihdunta akrotelman pinnasta vähenee oleellisesti, mikä osittain hidastaa pohjavedenpinnan laskua. Kuivina kausina valunta suolta voi kokonaan ehtyä. Usein kuitenkin luonnontilainen suo ylläpitää valuntaa myös kuivina kausina (Kværner ja Klöve 2006). Kuivan kauden jälkeen osa sateesta voi varastoitua suohon. Syksyisin ja keväisin, kun suo on useimmiten vedellä kyllästynyt, suurin osa sateesta muuttuu välittömästi valunnaksi. Ajatus siitä, että suot tasaavat oleellisesti valumia tulvaherkkinä ajanjaksoina, on täten osittain virheellinen (Clymo 1987).

Suon ojituksen jälkeen veden kulkeutumisreitit muuttuvat oleellisesti, mutta vesitaseen komponenteissa ei juuri tapahdu suuria muutoksia. Kun suon pintakerros ojituksen jälkeen kuivuu, haihdunta pienenee ja vuosivalunta kasvaa hieman. Luonnontilaisilla soilla

ylivalumat ovat peräisin suon elävästä osasta (akrotelma), ja valumavesien kiintoaine- ja ravinnepitoisuudet ovat pienet. Turvesuolla pohjaveden pinta on katotelmassa, ja suuri osa vedestä suotautuu katotelman kautta, joten turvetuotantoalueilla valunta on peräisin katotelmasta eikä akrotelmasta. Ojituksen jälkeen katotelmasta huuhtoutuu turpeeseen varastoituneita ravinteita, etenkin epäorgaanista typpeä. Ojituksen jälkeen purkautuu yleensä myös suon syviin kerroksiin varastoitunutta vettä, mikä lisää raudan, humuksen ja fosforin huuhtoutumista (Klöve 2001).

Valunnan muodostuminen ojitetulla suolla

Turvetuotantosuolle tuleva ulkopuolinen pintavalunta (Q_{pi} , yhtälössä 11.1) johdetaan eristysojilla suon ohi alapuoliseen vesistöön. Ennen 1980-lukua ojitetuilla soilla alueelle purkautuneet pintavedet on yleensä johdettu turvesuon ojiin, jolloin ne ovat osa mitattua suon valuntaa. Varsinkin ylivirtaamien aikana suuri osa valunnasta on peräisin suoalueen ulkopuolisesta mineraalimaasta. Ulkopuolisten vesien osuus on huomioitava soiden valuntaa arvioitaessa. Aina näin ei ole tehty, ja tämä luultavasti selittää, miksi havaitut ylivirtaamat vaihtelevat voimakkaasti.

Turvesuolla on roudattomana kautena havaittavissa ainakin kolme erityyppistä valuntatilannetta, jotka johtuvat 1) usein toistuvista pienistä sateista, 2) keskisuurista sateista ja 3) suurista pitkäjaksoisista sateista (Klöve ja Bengtsson 1999). Eri tilanteissa valunta on peräisin suon eri osista ja maakerroksista, mikä vaikuttaa veden mukana kulkeutuvaan kuormitukseen.

Usein toistuvat pienet sateet (alle 10 mm d⁻¹) imeytyvät turvekenttään. Noin 5 % sateesta osuu ojiin ja aiheuttaa pienen valuntahuipun. Koska osa ojassa virtaavasta vedestä on sadevettä, ravinteiden pitoisuudet menovirtaamassa laskevat. Valunnan aikakäyrä näyttää samanlaiselta kuin sadantakäyrä. Sademäärän lisääntyessä turvetuotantoalueen kyky varastoida vettä heikkenee, jolloin vesi imeytyy ja suotautuu vedellä kyllästyneeseen turvekerrokseen. Turpeen vettyessä ”pohjaveden” pinta nousee ja valunta kasvaa. Mitä kosteampi kenttä on, sitä suurempi osa valunnasta aiheutuu suotautuneen veden nopeasta purkautumisesta. Sademäärän kasvaessa yhä suurempi osa valunnasta on peräisin tästä vedestä. Kenttien ikääntyessä, tuotannon seurauksena, paljastuu vettä huonosti johtavia maatumia turvekerroksia. Myös huokoisen turpeen painuminen pienentää hydraulista johtavuutta. Näistä seuraa, että vain osa vedestä suotautuu turpeeseen ja osa sateesta muuttuu pintavalunnaksi.

Jos sadetta jatkuu pitkään ja sademäärä kasvaa erittäin suureksi, valuma-alueen ulkopuoliset ojat saattavat tulla tuotantoalueelle, vaikka suolla onkin eristysojia. Tämä voi aiheuttaa varsin voimakasta eroosiota ja syöpymistä, mikä voi johtaa erilaisiin kunnostustoimiin kentällä.

Turvetuotannon vesistökuormitus

Turvetuotanto lisää monien aineiden pitoisuuksia valumavesissä luonnontilaiselta suolta purkautuviin vesiin verrattuna. Tuotantoalueella syntyvän kuormituksen lisäksi myös tuotantoalueen ulkopuoliselta valuma-alueelta purkautuvat vedet voivat kuormittaa ympäristöä. Luonnontilainen suo puskuroi ja tasaa valuma-alueen vedenlaatua ja tämä ominaisuus häviää ojituksen myötä. Jos valuma-alueen ulkopuoliset vedet tulvivat eristysojista tuotantoalueelle, voi tämä aiheuttaa merkittävää eroosiota ja kiintoaineen kulkeutumista.

Keskeisin turvetuotannon haitta on kiintoaineen kulkeutuminen. Turpeen noston, samoin kuin turvemaiden metsätaloudellisten ojitusten (ks. Luku 10), on todettu lisänneen myös typen ja fosforin huuhtoutumista alapuoliseen vesistöön, mikä voi aikaa myöten johtaa vesistön rehevöitymiseen. Myös humuksen, ja joissakin tapauksissa raudan, huuhtoutumi-

sella voi olla haitallisia vaikutuksia alapuolisessa vesistössä. Luonnontilaisilta soilta purkautuva vesi on yleensä happamampaa kuin turvetuotantoalueelta tuleva vesi. Poikkeuksen muodostavat turvetuotantoalueet, joilla ojitus yltää sulfidisedimentteihin. Näitä alueita sijaitsee lähinnä länsi- ja lounaisrannikolla entisen Litorinameren alueella. Mustaliuskevyöhykkeitä, joista sulfidien hapettumisen seurauksena voi myös aiheutua hapanta ja metallipitoista kuormitusta, sijaitsee eri puolilla Suomea (Hadzic ym. 2014). Hapan huuhtouma ja maankäyttö vaikuttavat huomattavasti jokien ekologiseen tilaan (Tolkkinen ym. 2014).

Jokiuomiin laskeutuva kiintoaine voi vaikeuttaa mm. rapujen ja kalojen lisääntymistä, koska orgaaninen aines joen pohjalla vähentää uoman pohjan happipitoisuutta ja tukkii kutusoraikkoja. Kiintoaine voi aiheuttaa myös veden samentumista, mikä haittaa vesistön virkistyskäyttöä. Humuspitoiset valumavedet muuttavat veden väriä tummemmaksi, mikä vaikuttaa eliöiden elinolosuhteisiin. Yhdessä kiintoainekulkeuman aiheuttaman pohjan muutoksen kanssa esimerkiksi vesikasvimuutokset ovat selvästi havaittavia (Selin 1999).

Kuivattamisen seurauksena maaperän happiolot paranevat, jolloin turpeen hajoaminen vähitellen kiihtyy ja eri aineiden esiintymismuodot ja liukoisuus muuttuvat. Ravinnekuormituksen lisääntyminen johtuukin ennen kaikkea orgaanisen aineksen mineralisaatiossa vapautuneista ravinteista, jotka kasvattavat valumavesien liukoisten ravinteiden pitoisuuksia. Lisäksi ravinteita huuhtoutuu myös kiintoainekseen sitoutuneena (Marttila ja Klöve 2009) ja turpeen hajoaminen edistää eroosioriskiä tuotantoalueilla (Tuukkanen ym. 2014). Luonnontilaisilla soilla ravinteiden mineralisaatio on tasapainossa mikrobien immobilisaation ja kasvien ravinteiden oton kanssa, jolloin ravinteita huuhtoutuu yleensä vähän. Kuivatus lisää orgaanisen aineksen hajoamista, mikä johtuu pääasiassa maan lämpötilan noususta, lisääntyneestä hapen määrästä ja mikrobien erilaisten ravintoaineiden saatavuuden paranemisesta. Lisäksi maan muokkaus kiihdyttää orgaanisen aineksen hajoamista, mikä johtaa kasvinjäänteisiin sitoutuneiden ravinteiden mobilisoitumiseen.

2000-luvulla turvetuotannon osuuden ihmistoiminnan aiheuttamasta vesistöjen fosfori- ja typpikuormituksesta arvioitiin olevan alle 1 %. Vaikka osuus valtakunnallisesti on pieni, niin paikallisesti turpeen nosto voi selvästi heikentää veden laatua erityisesti latvavesissä ja vesistöissä, joiden valuma-alueen maankäytöstä turvetuotannon osuus on useita prosentteja (Marja-aho ja Koskinen 1989).

Vuosittainen typpihuuhtouman turvetuotantoalueelta (ominaiskuormitusarvo) on arvioitu olevan $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Alahuhta 2008). Se vastaa suunnilleen maatalouden typpikuormitusta. Turvesoilta huuhtoutuu varsin paljon ammoniumtyyppiä, kun kivennäismaapelloilta huuhtoutuva tyyppi on pääasiassa nitraattityyppiä. Ammoniumtyyppiä vapautuu orgaanisen aineksen hajotessa, mutta sen nitrifikaatio nitraattitypeksi todennäköisesti estyy mm. turvemaiden suuren vesipitoisuuden eli alhaisen happipitoisuuden ja osittain mahdollisesti myös alhaisen happamuuden takia. Turvesoiden fosforin ominaiskuormitusarvona on käytetty $0,27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Alahuhta 2008). Se on pienempi kuin maatalousalueilta tuleva fosforin ominaiskuormitus. Soilla virtaaman ja liukoisen fosforipitoisuuden välillä voi olla negatiivinen korrelaatio toisin kuin maatalousmailla. Tämä johtuu siitä, että fosforipitoisuus on yleensä suurempi hyvin maatuneissa turpeissa, ja virtaaman kasvaessa suon syvimpien kerrosten suhteellinen osuus kokonaisvalunnasta vähenee.

Lähes yksinomaan orgaanista ainetta olevan kiintoaineen kulkeuma saattaa sateisena vuonna nousta arvoon $30 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1} = 300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Keskimäärin se jää kuitenkin alle puoleen tästä. Liuenneen orgaanisen aineksen määrä on havaintojen mukaan $16\text{--}37 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1} = 160\text{--}370 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Turvetuotantoalueilta tuleva valunta, valumavesien pitoisuudet ja siten vesistökuormitus vaihtelevat paljon eri alueiden välillä mm. turpeen maatumisasteesta ja sääoloista johtuen (Karppinen ja Postila 2015). Suota tuotantokuntoon valmistettaessa kuormitus on

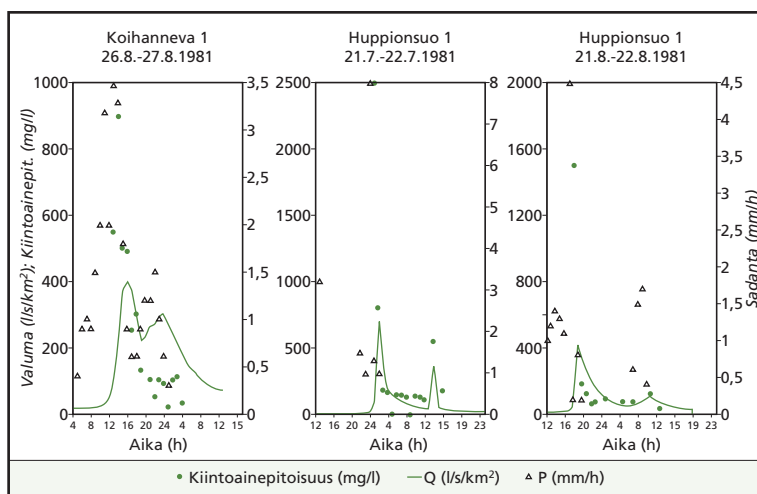
yleensä suurempaa kuin tuotannon ollessa käynnissä. Esimerkiksi orgaanisten humusyhdisteiden määrät ovat suurimmillaan ojitusvuonna. Tämä johtuu suossa seisoneen, kasvien solunesteitä sisältävän veden liikkeelle lähdöstä ojituksen seurauksena (Sallantaus 1983).

Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen

Kiintoaineen kulkeutumista on pidetty turvetuotannon keskeisenä ympäristöhaittana ja siihen on kiinnitetty paljon huomiota tuotantoalueiden vesiensuojelussa. Suurin osa kiintoainekuormasta on peräisin ojien pohjalle laskeutuneen kiintoaineen eroosiosta (Klöve 1998). Turvetta joutuu ojiin tuotantovaiheessa koneiden jyrsiessä kenttää tai kun turvetta kerätään. Joillakin turvemailla voi ojapenkkojen sortuminen myös lisätä ojien turvemäärää. Tämä lienee ongelma alueilla, joilla turpeen leikkauslujuus on pieni. Yleensä kuitenkin ojat pysyvät muodossaan eikä reunojen sortumista esiinny.

Ojitusten ja turvetuotannon aikana kiintoainetta kulkeutuu ja laskeutuu ojiin. Tuotantokauden aikana onkin lietekertymiksi mitattu jopa 5–30 cm (Unkuri 1998). Uomassa liete kerrostuu kahdeksi kerrokseksi: löyhään ja tiiviimpään kerrokseen (Marttila 2005, Marttila ja Klöve 2008). Kiintoainekuorma saattaa johtua osittain myös kelluvan turpeen tai kivennäismaan huuhtoutumisesta. Kuivunut turve on vettä hylkivää, joten kelluvan turpeen huuhtoutuminen voidaan estää pintapuomin tai virtaamaa säättävien putkipatojen avulla. Turpeen maatuneisuusaste lisää eroosioherkkyyttä (Svahnäck 2007, Tuukkanen ym. 2014). Jos ojat ulottuvat kivennäismaahan asti ja kriittinen virtausnopeus ylittää kyseiselle maa-lajille tyypillisen liikkeellelähtönopeuden, eroosio ja kiintoaineen huuhtoutuminen saattaa olla voimakasta. Varsinkin silttimaat ovat herkkiä eroosiolle.

Ylivirtaamien aikana kiintoainetta erodoituu ojista, jos veden virtausnopeus ylittää turvelietteen ns. kriittisen virtausnopeuden.¹ Kriittinen liikkeellelähtönopeus on noin 0,06 m s⁻¹ löyhälle kerrokselle ja 0,15 m s⁻¹ koko turvekerrokselle (Marttila ja Klöve 2008). Kent-



Kuva 11.3 Valuma ja kiintoainepitoisuus Koihannevan ja Huppionsuon turvetuotantoalueilta (Sallantaus 1983, josta modifioitu Klöve 1998).

¹ Tarkkaan ottaen eroosio johtuu ns. kriittisen leikkausjännityksen ylittymisestä. Jos vakionmuotoisessa uomassa on virtausoloiltaan tasainen virtaus, voidaan leikkausjännityksen sijasta tässä yhteydessä käyttää virtausnopeutta.

tämittauksissa kiintoainepitoisuuden on havaittu olevan suurimmillaan virtaaman nousuvaiheessa (kuva 11.3). Tämä osoittaa, että laskeutunut liete erodoituu, kun rajanopeus saavutetaan (Klöve 1998). Padotus voisi siten olla tehokkainta valuntatapahtuman alkuvaiheessa eli pienimmillä ojan vesisyvyyksillä.

Jos kentällä esiintyy pintavaluntaa, on sen kiintoainepitoisuus suurimmillaan valunnan alkaessa. Sateen rankkuus on tärkein tekijä, joka vaikuttaa pintavalunnan mukana erodoituvaa kiintoaineen määrään. Sademäärä ei juuri vaikuta eroosioon. Valunnan alussa kiintoainepitoisuus on suuri osittain norojen syntymisen ja osittain norojen pienen vesisyvyyden takia. Sateen jatkuessa pitoisuus vähenee, koska norojen vesikerros vaimentaa sateen erodoivaa voimaa. Lisäksi noroista on jo kulkeutunut suuri osa erodoituvasta turpeesta, joka on jyrskittä turvetta. Jyrskityn turpeen alla oleva kerros ei yleensä ole herkkä eroosiolle. Sateen lakatessa pitoisuus laskee nopeasti (Klöve 1998). Vesiensuojelussa onkin tärkeää käyttää ratkaisuja, jotka pidättävät kiintoainetta virtaamakäyrän nousuvaiheessa, jolloin sekä pintavalunnan aiheuttama eroosio että uomaeroosio ovat suurimmillaan.

11.4 Turvetuotantoalueiden vesiensuojelu

Turvetuotannon vesistökuormitus on luonteeltaan hajakuormitusta samoin kuin maa- ja metsätalousalueilta tuleva kuormitus. Kuormitukselle on ominaista suuret ainepitoisuuksien vaihtelut ja pitoisuushuippujen ajoittuminen suurten sateiden ja valumien aikaan. Kuivatusvesien puhdistuksella pyritään vähentämään alapuoliseen vesistöön kulkeutuvien ravinteiden ja erityisesti kiintoaineen määrää, sillä ne saattavat aikaa myöten heikentää veden laatua ja eliöiden elinoloja. Tuotantoalueen ulkopuoliselta alueelta tulevat vedet johdetaan eristysojilla tuotantoalueen ohi. Näitä vesiä ei käsitellä.

Turvetuotantoalueiden vesiensuojelun perustasoon kuuluvat päästeputkien pidättimet, virtaamansäätöpädot ja laskeutusaltaat, jotka tulee rakentaa kaikille tuotantoalueille. Lupa- viranomaisten vaatimusten kiristytessä on vesiensuojeluun kehitetty 1990-luvulla uusia menetelmiä, kuten pintavalutuskentät, virtaaman säätö ja kemiallinen valumavesien käsittely. Nämä menetelmät ovat laajasti käytössä. Osa uusista menetelmistä kuten ylivuotokentät, salaojitus, hakepadot, maaperäimeytys ja haihdutuskentät ovat tutkimuksen kohteena, mutta eivät laajassa käytössä. Uusien soiden tuotantoonotto edellyttää perustasoa tehokkaampien menetelmien käyttöä, mm. ympärivuotinen pumppaus pintavalutuskentille on lisääntynyt. Suostrategian suositusten mukaisesti turvetuotantoon otetaan nykyään lähinnä metsäojitettuja soita, joiden luontoarvot ovat vähäiset. Samoin pintavalutuskenttiä on perustettu aikaisempaa enemmän jo ojitetuille alueille.

Päisteputkien pidättimet ja sarkaojat

Pidätin on päisteputken sarkaojan puoleiseen päähän rakennettu mekaaninen laite (esim. puinen säleikkö, kelluva salaojaputki, siivilälevy tms.), jonka avulla estetään päisteputken tukkeutuminen ja siten varmistetaan kentän kuivuminen. Päisteputkien pidättimillä voidaan myös vähentää turpeen kulkeutumista kokoojaojaan. Pidättimien kyky säätää virtaamaa on tärkein kiintoaineen pidätykseen vaikuttava tekijä (Klöve 1997). Laboratoriokokeissa ei ole havaittu suurta eroa eri pidätinmallien kyvyssä pidättää kiintoainetta. Pieniin reikiin muodostuu suuri virtausnopeus, mikä tiivistää turpeen reikään vettä läpäisemättömäksi kerrokseksi. Pieniä reikiä ei siis voi käyttää säätämään virtaamaa. Vaikka ideaalista pidätintyyppiä ei ole vielä löytynyt, ovat seuraavat ominaisuudet tärkeitä pidättimen toiminnalle ja kiintoaineen pidätykselle:

- Pidättimeen ei pidä ottaa vettä pintakerroksesta, jossa on kelluvaa turvetta, eikä uoman pohjalta, jossa on lietettä ja suuri kiintoainepitoisuus.
- Pidätin on parasta sijoittaa siten, että se ottaa vettä 1-2 m ennen ojan päätyä. Näin vältetään pidättimen hautautuminen turpeeseen työkoneiden kääntyessä saran päässä sekä estetään ylimääräisten turvepalojen kulkeutuminen päisteputkeen. Kaikki ns. makaavat pidätintyyppit täyttävät tämän vaatimuksen.
- Mitä suurempi osa pidättimen reikäalasta on veden alla, sitä pienemmäksi jää virtausnopeus rei'issä ja sitä harvemmin pidätin tukkeutuu. Yksittäiset reiät eivät saa olla liian suuria, etteivät kelluvat turvekokkareet pääse lietepidättimen läpi tukkimaan päisteputkea (Hiljanen ja Rinttilä 1998).

Päisteputkien lisäksi sarkaojien päissä käytetään siis yleisesti lietesyvennyksiä ja lietteenpidättimiä. Sarkaojarakenteet poistavat lähinnä kiintoainetta ja siihen sitoutuneita ravinteita. Liukoisten ravinteiden ja orgaanisten aineiden kuormitusta ei näillä rakenteilla voida vähentää.

Sarkaojia puhdistettaessa kiintoainekuormitus on suuri. Jotta ojiin kertynyt liete ei pääsisi kokoojaajaan, on ojien perkaustyö tehtävä huolellisesti annettujen ohjeiden mukaan. Lietteen poisto tulee aloittaa sarkaojaputken puoleisesta ojan päästä.

Laskeutusaltaat

Laskeutusallas on turvetuotantoalueen läheisyyteen kaivettu allas, johon tuotantoalueen valumavedet johdetaan. Laskeutusaltailla valumavesistä poistetaan kiintoainetta ja siihen sitoutuneita ravinteita. Altaaseen kertynyt kiintoaines poistetaan tietyin väliajoin ja siirretään altaan vieressä oleville lietteen läjitysalueille.

Laskeutusaltaat mitoitetaan pintakuormateorian mukaan siten, että pintakuorma (Q/A) on 1 m h^{-1} kun valuma on $300 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Altaan leveys on yleensä noin 8 m ja syvyys noin 1,5 m. Tavallisesti yhden altaan valuma-alue on enimmillään 50 ha.

Laskeutusaltaiden suunnittelun perusongelma on tulovirtaaman voimakas vaihtelu. Kun virtaama kasvaa mitoitusvirtaamaa suuremmaksi, vain osa hiukkasista laskeutuu ja puhdistustaso laskee. Jos kriittinen virtausnopeus ylittyy, laskeutusaltaista erodoituu kiintoainetta. Mitoituksessa käytetty valuma, $300 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, on samaa suuruusluokkaa kuin roudattoman kauden ylivaluma. Vuosina 1995 ja 1996 tehtyjen mittausten perusteella ylivalumat soilla, joilla ei esiinny ympäröivältä alueelta tulevia tulvavesiä, ovat noin $100\text{--}400 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Niillä soilla, joilla eristysojat tulvivat tuotantosuoille, voi mitoitusvaluma $300 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ huomattavasti ylittyä. Uusilla tuotantoalueilla edellä mainittu mitoitusvaluma esiintyy pääasiassa vain lumen sulannan aikaan. Pumppukuivatuksen lisääntyessä, ylivirtaamat ovat myös todennäköisesti vähentyneet sillä pumput mitoitetaan valumalle 1 l/s/ha .

Kenttämittauksissa on todettu, että kentän pinnalta ja ojien pohjilta otetun turpeen laskeutumisenopeus on suunnilleen $0,6 \text{ m h}^{-1}$ (Klöve 1997). Laskeutusaltaat pitäisi siis mitoitaa pintakuormalle $0,6 \text{ m h}^{-1}$ eli hieman suuremmiksi kuin nykyiset altaat, joiden mitoituksessa on käytetty arvoa 1 m h^{-1} . Pintakuormateorian mukaan mitoitusarvoon 1 m h^{-1} perustuvaan altaaseen pitäisi laskeutua kiintoaineesta noin 60 %. Käytännössä kiintoainekuorman vähenemäksi on mitattu noin 30–40 % (Selin ym. 1994). Verrattain pieni puhdistusteho johtuu osittain siitä, että turvetuotannon kiintoaine on useimmiten erittäin hienojakoista eikä laskeudu vaan pysyy suspendoituneena.

Kiintoaineen pidättyminen laskeutusaltaisiin vaihtelee turvesoilla kuormituksen mukaan. Pienten virtaamien aikana, jolloin eroosiota ei juuri esiinny, kulkeutuvat hiukkaset ovat pienikokoisia ja niitä on vähän. Tällöin altain puhdistuskyky on myös alhainen. Pienten hiukkasten poistoa voidaan parantaa ylivuotokentillä tai pintavalutuksella. Molemmilla menetel-

millä turbulenssi on hyvin pieni, ja pienten hiukkasten laskeutuminen on siten mahdollista. Pienten hiukkasten poisto saattaa olla tärkeää, koska niillä on suhteellisesti suurempi pinta-ala ja siten todennäköisesti suurempi fosforipitoisuus kuin isommilla hiukkasilla.

Tehostettu vesiensuojelu

Tehostettuja vesiensuojeluratkaisuja ovat lähinnä pintavalutus ja kuivatusvesien kemiallinen käsittely. Virtaaman säätöä on uusissa lupaehdoissa edellytetty perustason vesiensuojelurakenteeksi. Joissakin tapauksissa käytetään myös ylivuotokenttiä, kosteikkoja, hakepatoja (Röpelinen 2001) ja salaojitusta. Valinta tehdään tapauskohtaisesti ottamalla huomioon suon koko, maaston muodot ja menetelmien toteuttamismahdollisuudet.

Roudattomana aikana eri menetelmillä saavutettuja suuntaa-antavia puhdistusprosentteja on esitetty taulukossa 11.1. Todellinen puhdistustehokkuus vaihtelee alue- ja vuosi-kohtaisesti. Puhdistusteho riippuu myös siitä, miten eri menetelmiä yhdistetään. Jos yksi menetelmä poistaa kaiken kiintoaineen, muiden menetelmien osuus jää vastaavasti pienemmäksi. Useiden menetelmien kohdalla lumen sulannan aikaista kuormitusta ei ole huomioitu. Lumen sulannan alkuvaiheessa sulamisvedet ovat usein varsin puhtaita. Suuret vesimäärät ja talviaikainen puhdistusrakenteiden jäätymisriski asettavat rajoituksia veden puhdistukselle. Virtaaman säätö on ainoa menetelmä, joka on suunniteltu nimenomaan suurille virtaamille, ja se toimii tehokkaasti myös lumen sulannan aikana.

Taulukko 11.1 Vesiensuojelumenetelmien suuntaa-antavia puhdistusprosentteja.

Menetelmä	Puhdistustehokkuus (%)			
	Kiintoaine	Fosfori	Typpi	Kemiallinen hapenkulutus
Laskeutusallas	30-40 ^{1,2}	14 ³	11 ³	
Virtaaman säätö	90 ³	20-50 ³	13-22 ³	
Ylivuotokenttä	75 ³			
Pintavalutus*	55-72 ⁴	46-57 ⁴	29-49 ⁴	
Haihdutust*	89 ⁵	74 ⁵	78 ⁵	-26 ⁵
Imeytys*	34 ⁵	34 ⁵	-368 ⁵	-267 ⁵
Kemiallinen vesienkäsittely*	90 ⁶	85 ⁶	35 ⁶	75 ⁶

*puhdistusprosentti roudattomana kautena (touko-lokakuu). ¹⁾ Selin ja Koskinen 1985; ²⁾ Savolainen ym. 1996; ³⁾ Klöve 1997,

⁴⁾ Ihme 1994, ⁵⁾ Kempainen ym. 1998; ⁶⁾ Ympäristöministeriö 2003.

Pintavalutus

Kuivatusvesien johtaminen luonnontilaiselle suoalueelle, eli pintavalutus, on osoittautunut tehokkaaksi menetelmäksi turvetuotannon vesiensuojelussa. Pintavalutuksessa vesi virtaa osittain pintavaluntana noroissa ja osittain turpeen huokostilassa (Ronkanen ja Klöve 2007). Mitoitussuureet täyttävän kentän ominaisuuksia ovat (Ympäristöministeriö 2003):

- kentän koko vähintään 3,8 % yläpuolisen valuma-alueen pinta-alasta
- pituuden suhde leveyteen (0,5–1)
- suosituskaltevuus 1 %
- minimiturvepaksuus 0,5 metriä
- turve vähän maatonutta sara-rahkaturvetta
- kuormitus enintään 340 m³ ha⁻¹ d⁻¹

Kiintoaineen, fosforin ja typen poistumat ovat pintavalutuskentällä roudattomana aikana varsin suuria (ks. taulukko 11.1). Poistuma riippuu mm. kentän hydraulisesta kuormituksesta sekä turpeen laadusta (Ihme 1994). Viime vuosina on tutkimuksessa ja suunnitte-

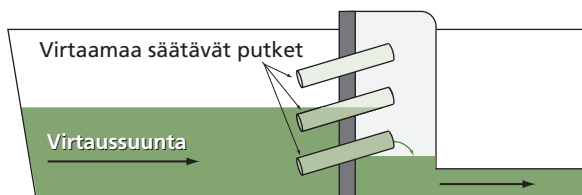
lussa kiinnitetty huomiota mm. turpeen hydraulisen johtavuuden mittaamiseen osana kentän suunnittelua.

Pintavalutuksessa puhdistusta rajoittavana tekijänä on pidetty lähinnä turpeen fosforinsitomiskykyä, joka laskee turpeen kyllästyessä fosforista. Mitä enemmän turpeessa on fosforia sitovia metalleja (Ca, Al, Fe), sitä suurempi on sen fosforinpidätyskyky ja sitä pidempi on pintavalutuskentän käyttöaika (Heikkinen ym. 1994). Turpeen sorptiokykyä näyttää ylläpitävän metallien huuhtoutuminen turvesoilta ja metallien pidättyminen turvekenttään, jolloin pintavalutuskentän hyvä fosforinpidätyskyky voi säilyä vuosikausia (Karjalainen ym. 2003). Kentän puhdistuskyky voi siksi jatkua pitkään.

Ojitetut pintavalutuskentät

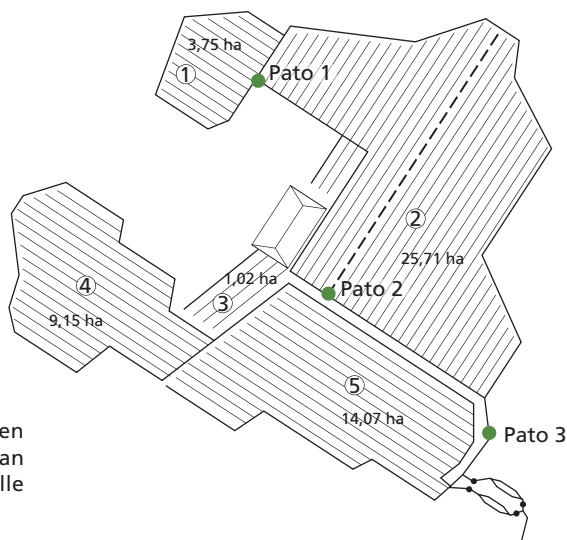
Kuivatusvesiä johdetaan yhä yleisemmin myös aiemmin metsäojitetuille suoalueille pintavalutuksen tapaan puhdistettavaksi. Tutkitut ojitetulle suolle perustetut pintavalutuskentät poistivat valumavedestä yleensä hyvin epäorgaanista tyypeä ja kiintoainetta (Postila ym. 2011, Postila ym. 2014). Osalla kohteista havaittiin kuitenkin ongelmia fosforin ja raudan pidättymisessä, etenkin pintavalutuskenttäkäytön alkuaikoina. Kemiallisen hapenkulutuksen arvot myös yleensä kasvoivat.

Ojitettuja suoalueita pintavalutukseen käytettäessä olisi hyvä huomioida mm. turpeen fosfori-, rauta- ja alumiinipitoisuudet, jotka voivat osaltaan vaikuttaa fosforin pidättymiseen. Pitkälle muuttuneilla soilla, joilla on mm. voimakas puusto, vaikuttaisi olevan suurempi riski osittain heikkoihin puhdistustuloksiin pintavalutuskenttäkäytössä, ainakin käytön alkuvaiheessa, verrattuna kohteisiin, joissa muutokset eivät ojituksen seurauksena ole olleet niin merkittäviä. Ojitetulla alueella kannattaa myös huomioida ojien syvyys, eli ulottuvatko ne mineraalimaahan, jolloin käsiteltävästä vedestä osa voi suotautua pohjamaahan mineraalimaan ollessa hyvin vettä läpäisevää. Vedenjako-, pengeri- ja tukosratkaisuin, voidaan yrittää vähentää veden virtaamista suoraan ojia pitkin.



Kuva 11.4 Periaatekuva ja valokuva Luisansuolta virtaamaa säättävästä putkipadosta, jossa on kolme putkea. Putket kallistetaan menovirtaamaa vastaan, jotta putkeen ei kulkeudu kelluvaa turvetta. Ylimmän putken lähtöpää asennetaan 20 cm kentän pinnan alapuolelle. Alimman putken tulopää asennetaan vähintään 30 cm ojan pohjan yläpuolelle, jotta välttyään uoman erodoitumiselta. Padon leveys on noin 1,5 m. Putkien kaltevuus on kuvassa 1:5. Säleikkö ennen patoa varmistaa padon toiminnan niissä tilanteissa, jolloin ojastossa kulkeutuu paljon kiintoainetta. Säätorakenteen voi sijoittaa rummun yhteyteen. (Marttila 2005)





Kuva 11.5 Esimerkki virtaamaa säätevien patojen sijoittamisesta Yli-lissä sijaitsevan Luisansuon yhdelle turvetuotantolohkolle (Marttila 2005).

Kuivatusvesien kemiallinen käsittely

Kemiallista vedenkäsittelyä käytetään turvetuotantoalueilla, joiden alapuolisen vesistön tila asettaa tavallista suuremmat vaatimukset vesien puhdistukselle (Selin ym. 1994). Menetelmässä veteen sekoitetaan juomaveden käsittelyssä käytettyjä kemikaaleja, kuten ferri-sulfaattia, joka saostaa humuksen laskeutumiskelpoiseksi sakaksi. Sakka laskeutuu laskeutusaltaisiin, jolloin vesi kirkastuu. Koagulointi happamoittaa vettä, joten veden pH on saostuksen jälkeen nostettava lipeällä tai kalkilla.

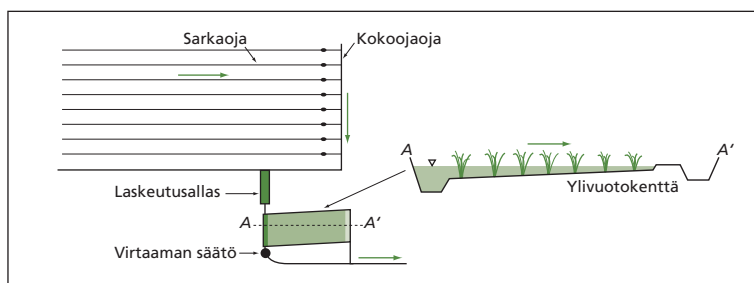
Kemiallinen käsittely poistaa humukseen sidotut aineet. Tuotantokaudella vähemmän on 78–90 % kokonaisfosforin, kemiallisen hapenkulutuksen (COD) ja värin osalta. Kokonaistypen vähemmäksi on mitattu 40 % ja kiintoaineen 30–70 %.

Virtaaman säätö putkipadolla

Virtaaman säädössä vettä padotetaan suurien valumien aikana ojiin ja altaisiin, mikä pienentää ylivirtaamia ja veden virtausnopeutta ojissa. Kun virtausnopeus ojissa on pienempi kuin ns. kriittinen virtausnopeus, uoma ei eroidu ja kiintoainekuormitus vähenee oleellisesti. Virtaaman säätö pienentää myös kentän pinnalta mahdollisesti erodoituvaa kiintoainekuormaa, koska viipymä ojissa moninkertaistuu ja kiintoaine laskeutuu ojiin. Virtaamaa säädetään kuristamalla virtaamaa esimerkiksi ns. putkipatorakenteella, joka on esitetty kuvassa 11.4.

Virtaaman säätöpadot tulisi mitoittaa siten, että uusilla tuotantokentillä, joissa on suuri ojasyvyys ja paljon varastotilaa, mitoittavana ojanopeutena käytettäisiin virtausnopeutta $0,06 \text{ m s}^{-1}$. Vastaavasti madaltuneilla kentillä voitaisiin ohjearvona käyttää $0,15 \text{ m s}^{-1}$ (Marttila ja Klöve 2008). Padon putket valitaan ja sijoitetaan siten, että viipymä on riittävä, eikä kentälle nouse vettä. Jos padottaminen on liian tehokasta, vesi nousee tuotantokentälle. Tällöin jyrstetty turve voi kulkeutua ojiin, ja mineraaliainesta voi kulkeutua ojien pohjalta turvekerrokseen.

Patoon sijoitetaan kolme putkea, joista kaksi alinta putkea toimivat tavanomaisissa tilanteissa. Ylin putki on ns. tulvaputki, jonka koko valitaan siten, että vuorokautinen ylivirtaama läpäisee putken. Tämä estää veden tulvimisen kentän pinnalle. Alimman putken halkaisijan täytyy olla riittävä läpäisemään vettä sateettomina jaksoina siten, että vettä ei padotu ojiin useita kymmeniä senttimetrejä. Jos alueelle purkautuu paljon pohjavettä ja



Kuva 11.6 Periaatekuva ylivuotokentästä, joka koostuu kosteikko- ja suokasveista. Kenttä soveltuu erityisen hyvin tuotannosta poistuville saroille, mikä tehostaa oleellisesti turvetuotannon loppuvaiheen vesiensuojelua.

virtaama on suhteellisen tasainen koko kuivan kauden, alimman putken halkaisijaa täyttyä suurentaa siten, että alivirtaama (tavanomainen virtaama kesän aikana) läpäisee putken padottamatta liikaa. Alivirtaaman padotuskorkeus saadaan putkivirtauksen yhtälöstä ja alivirtaama voidaan arvioida koko valuma-alueen mittapadolta.

Oleellinen osa käytännön suunnittelua on padottavan alueen rajaaminen ja putkipatojen sijoittelu. Tuotantoalueet ovat usein hieman kaltevia, joten yksi pato laskeutusaltaan yhteydessä ei riitä. Padot tulisi sijoittaa siten, että vettä padottuu koko turvetuotantoalueelle. Näin käytetään koko ojatilavuus veden varastointiin ja virtaaman säätöön. Esimerkki patojen sijoittamisesta eräälle suolle on kuvassa 11.5.

Alueen rajaamisessa on otettava huomioon, että ulkopuoliset vedet saattavat tulla tuotantoalueelle, vaikka alueelle on rakennettu eristysojasto. Eristysojien moitteeton kunto on tärkeä osa vesiensuojelua. Niiden kunto ja mitoitus tulisi tarkistaa ennen kuin turvesuolle investoidaan vaihtoehtoisia vesiensuojeluratkaisuja. Patojen toimintaa edesauttaa myös sarkaojen hyvä kunto ja ojien riittävä vesitilavuus.

Ylivuotokentät

Ylivuotokenttä muistuttaa toiminnaltaan tulvaniittyä tai kosteikkoa. Kuivina aikoina kentällä ei ole seisovaa vettä, mikä osittain nopeuttaa kasvien juurtumista kentälle ja estää fosforin resuspensiota. Virtaaman lisääntyessä ja vedenpinnan noustessa vettä purkautuu kentälle ja virtaa kentän yli. Vesi ohjautuu ylivirtaamien aikaan kentälle virtaamaa säättävän rakenteen avulla (kuva 11.6). Kentän kasvillisuus tehostaa laskeutumista. Kentän kasvillisuuspeite koostuu ensimmäisinä vuosina ruohoista, mutta muutaman vuoden kuluessa sammaleet lisääntyvät. Periaatekuva ylivuotokentän rakenteesta on esitetty kuvassa 11.6. Kenttiä ei juuri ole käytössä. Ruokohelpikenttien käyttö pintavalutukseen tosin muistuttaa tätä vesiensuojeluratkaisua.

Maaperäimeytys

Vesien imeyttämistä sora- ja kiviainekseen on perinteisesti käytetty vesihuollossa jätevesien puhdistukseen ja juomaveden tuotantoon. Vesien puhdistus on tehokkainta maakerroksessa, joka on pohjaveden pinnan yläpuolella (kyllästymättömässä kerroksessa). Maaperäimeytyksessä turvetuotantoalueen kuivatusvedet sadetetaan alueen läheisille kankaille (Kempainen ym. 1998). Imeytyskenttään ohjattu kuivatusvesi suotautuu maahan, jossa vesi puhdistuu. Menetelmä poistaa suuren osan vesien ravinteista ja hiukkasista.

Kentän optimaalinen kaltevuus on noin 1-1,5 %. Sadetus lisää jonkin verran imeytysalueen puuston kasvua. Menetelmä soveltuu parhaiten koivuvaltaisille alueille, sillä sadetus heikentää mäntyjen kuntoa etenkin maaston notkelmissa (Kempainen ym. 1998). Sadetuksen seurauksena alueen kasvillisuus muuttuu sellaiseen suuntaan, että se sietää enemmän vettä. Pitkäaikaisessa käytössä imeytyskenttiä on oltava ainakin kaksi, sillä kentän on voitava palautua ja levätä 10 vuoden välein.

Kosteikot

Kosteikkoja käytetään yleisesti monissa eri tilanteissa vähentämään veden ravinne- ja kiintoainepitoisuutta (ks. Luku 6). Kosteikkotyyppejä ovat mm. erilaiset matalat kasvien peittämät lammikot, soraikot ja suoalueet. Tyypillisiä kosteikkokasveja ovat (leveä)osmankäämi (*Typha latifolia*) ja järviruoko (*Phragmites australis*). Myös aiemmin esitetyt menetelmät, pintavalutus, jossa kuivatusvedet johdetaan luonnontilaisille tai ojitetuille suoalueille, ja ylivuotokenttä, lasketaan kosteikkoihin kuuluviksi. Pintavalutuksen toiminta turvetuotannon vesiensuojelussa tunnetaan hyvin, mutta muiden kosteikkoratkaisujen tehokkuudessa on vielä selvittävää.

12 Ojitushankkeiden kustannukset ja hyödyt

12.1 Johdanto

Kuivatushankkeiden kannattavuutta on tarpeen tarkastella sekä maanomistajan että yhteiskunnan kannalta. Kannattavuuden arviointia vaikeuttaa hankkeista koituvien hyötyjen kohdistuminen pitkälle aikavälille. Valtio on tukenut merkittävästi peruskuivatushankkeita, joten on luonnollista, että se on edellyttänyt niiden kannattavuuden arviointia. Kannattavuusarvion lisäksi peruskuivatushankkeissa tarvitaan myös perusteet, joilla yhteishankkeen kustannukset jaetaan hankkeen osakkaille.

Peruskuivatushankkeiden yhteisten kustannusten jaon periaate on otettu lainsäädäntöön jo 1900-luvun alussa. Nykyiset ositteluperusteet osakkaiden suhteellisen hyödyn määrittämiseen ja hankkeen kannattavuuden arviointiin ovat muotoutuneet pääosin vuoden 1962 vesilain määrittelemissä puitteissa. Vuonna 2012 voimaan tulleessa vesilaissa yhteiseen ojitukseen osallistumista ja ojituksesta aiheutuvia kustannuksia koskevat säännökset vastaavat sisällöltään aiempaa lainsäädäntöä. Valtion tuen edellytykset on määriteltä peruskuivatuksen rahoitusta ohjaavassa lainsäädännössä.

Valtion tukea myönnettäessä hankkeen kannattavuutta arvioidaan vertaamalla sen kustannuksia kuivatushyötyyn ja ottamalla huomioon hankkeen muut hyötyvaikutukset, kuten vaikutukset tilojen ja kylien elinkelpoisuuteen ja ympäristöön. Ojitushankkeen yhteiskunnallista kannattavuutta voidaan tarkastella sen myönteisillä vaikutuksilla talouskylän elinkelpoisuuteen ja asutuksen ylläpitämiseen sekä ympäristöön, joihin ojituksella ja siihen liittyvillä toimenpiteillä voi olla huomattava merkitys. Yhteiskunnallisella kannattavuudella on erityistä merkitystä hankkeen rahoituksesta päätettäessä, mikäli hanke on tarkoitus toteuttaa valtion tuella.

Kohdassa 12.3 Salaojituksen kannattavuus tilatasolla tarkastellaan investointiongelman ratkaisemista yleisesti ja salaojitusinvestoinnin erityispiirteitä. Salaojitus kytketään myös osaksi viljelijän päätöksentekotilannetta ja salaojituksen kannattavuuslaskennan periaatteet esitellään. Perinteisen salaojituksen lisäksi arvioidaan myös säätösalojituksen ja alta-kastelun taloudellisia vaikutuksia. Luvun lopussa käsitellään salaojituksen yhteiskunnallisia hyötyjä ja kannattavuutta.

12.2 Peruskuivatuksen kustannukset, hyöty ja kannattavuus

Raimo K. Nissinen

Ojituksen kustannukset ja hyöty

Ojituksen kustannukset muodostuvat vesilain mukaan (VL 5:19) varsinaisista työn suorittamiskustannuksista korvauksineen sekä hankkeen suunnittelusta ja asian käsittelystä ja hoidosta johtuvista menoista.

Ojitushankkeen kustannuksiin eivät kuulu maantien, rautatien sillan tai rummun muuttamis- tai uusimiskustannukset, joista vesilain mukaan (VL 5:13) vastaa tienpitäjä. Vastaa myös kaapelin tai kaasuputken muuttamiskustannuksista vastaa rakenteen omistaja. Sen sijaan yksityisten siltojen ja rumpujen kustannuksista vastaa tarvittaessa oijittaja kun-

nossapidon kuitenkin kuulussa tienpitäjälle tai rakenteen omistajalle (VL 5:13). Samoin menetellään yksityisten putkien ja johtojen osalta.

Vesilain mukaan (VL 5:2) ojituksesta saatavana hyötynä pidetään maan käyttöarvon nousua siinä tarkoituksessa, johon maata käytetään tai olosuhteet huomioon ottaen voidaan lähinnä käyttää.

Vesilain mukaan (VL 5:19) ojituksen hyöty on perusteena ojituskustannusten tilakohittaiseen ositteluun, elleivät hyödynsaajat toisin sovi. Toisaalta maat, jotka saavat yhteisestä hyötyä, muodostavat kuivatusalueen (VL 5:2), joka tarvittaessa jaetaan kustannusten perusteella osittelualueisiin (Valtioneuvoston asetus vesitalousasioista 25 §). Saman asetuksen (26 §) mukaan ojitussuunnitelmaan tulee liittää myös kustannusarvio sekä hyötylaskelma ja kustannusosittelu.

Ojituksen kustannukset

Ojitussuunnitelman kustannusarvio on tarkoituksenmukaista laatia rakenne- ja työvaiheisiin ryhmitellen siten, että työkustannukset ja erilaiset yhteiskustannukset esitetään erikseen. Kustannusarviosta on ilmentävä, miten arvonlisävero on otettu huomioon.

Yleensä ojitustyön kustannusarvio esitetään ilman hankesuunnittelun kustannuksia, jotka lisätään omana kohtanaan arvion loppuun. Ne riippuvat oleellisesti maastotutkimus- ja ojitustoimitustarpeesta ja ovat yleensä 10–20 % hankkeen kustannuksista. Ojitussuunnitelma laaditaan yleissuunnitelmana, jota on tarpeen mukaan täydennettävä työnaikaisella rakennesuunnittelulla. Vanhan hankkeen peruskorjauksessa (uusiminen, muuttaminen) voidaan käyttää hyväksi vanhaa suunnitelmaa.

Ojitustyön kustannusarvio voidaan laatia ympäristöhallinnossa käytettyä työvaiheryhmittelyä soveltaen seuraavan pääryhmittelyn mukaan:

- Raivaus- ja korjaustyöt (raivaus, rakenteiden purku, suojaus, korjaus)
- Kaivutyöt (kaivu, levitys, siirto)
- Kalliotyöt (louhinta, läjitys, siirto)
- Pengertyöt (penkereet, työpadot)
- Viimeistelytyöt (työkohteiden korjaus ja viimeistely, istutukset)
- Putkirakenteet (putkiojat, rummut)
- Erityisrakenteet (sillat, pumppaamot, padot)
- Ympäristörakenteet (pohjakynnykset, putousportaat, koskikiveykset)
- Yhteiskustannukset (työnjohto, mittaukset, kulkuyhteydet, korvaukset, työnaikainen suunnittelu)

Pienen hankkeen kustannusarvion ryhmittely voi olla pelkistetty, esim. raivaukset, kaivutyöt, rumputyöt ja viimeistelytyöt sekä yhteiskustannukset, kun taas isossa hankkeessa voidaan tarvita kaikkia ryhmiä.

Yhteiskustannusten osuus on yleensä 10–20 % kustannusarviosta. Pienissä hankkeissa, jotka toteutetaan ilman varsinaista työnjohtoa, niiden osuus on 5–10 % muodostuen lähinnä työnaikaisten mittausten (työpaalutuksen) kustannuksista ja vähäisistä vahingonkorvauksista.

Ojitustyön kustannuksista valtaosa muodostuu uomien kaivu- ja louhintakustannuksista mukaan lukien kaivu- ja louhintamassojen levitys tai muu sijoitus. Pengerryshankkeissa suurin kustannusosuus muodostuu yleensä kuitenkin pumppaamon ja penkereen kustannuksista.

Myös yksityisten teiden rumpu- ja siltakustannukset saattavat olla huomattavat. Lisäksi työalueen raivaukseen, salaojarakenteiden korjaukseen, työkohteiden viimeistelyyn sekä

tarvittaessa rajamerkkien siirtoon kiinteistötoimituksessa on varauduttava riittävästi kustannusarviossa. Yhteiskustannuksissa on tarvittaessa otettava huomioon myös työnaikainen suunnittelu ja vesistövaikutusten tarkkailu.

Ojitussuunnitelman kustannusarvio laaditaan kuivatus- ja osittelualueittain, mikäli sellainen jako on hankkeessa tarpeen. Koko hankkeen kustannuksista esitetään tällöin yhteen-veto osa-alueiden kustannusarvioiden perusteella.

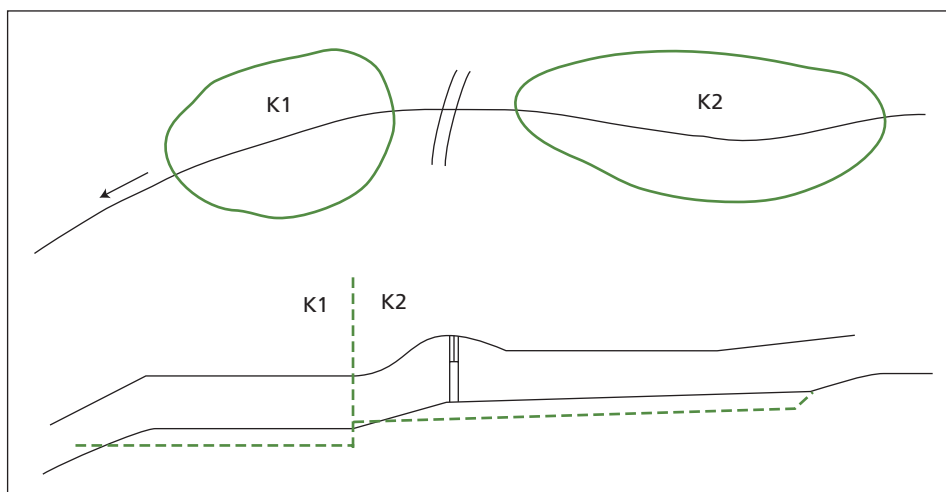
Ojituksen hyöty

Ojituksen hyöty eli kuivatushyöty perustuu ojituksen (suunnittelun) aikaiseen maan käyttömuotoon ja siihen käyttöarvon nousuun, joka ojituksella saavutetaan. Maan käyttöarvon nousu puolestaan perustuu yleensä maan tuottavuuden (tuottoarvon) nousuun, mutta se voi perustua myös maan käyttökelpoisuuden paranemisesta johtuvaan maan hinnan nousuun. Maan käyttömuodon mahdollista muuttamista (metsän raivaamista pelloksi) ei siis voi ottaa hyödyn perusteena huomioon, paitsi jos se on nimenomaan ojituksen tarkoitus. Ojituksen hyöty määrittää tilojen osallistumisvelvollisuuden kuivatusalueen sisällä, ellei muuta sovita (sopimusojitus).

Yhteinen ojitus perustuu yhteiseen ojitustarpeeseen. Ojan putoussuhteet huomioon ottaen hanke jaetaan tarvittaessa itsenäisiin kuivatusalueisiin, jotka voidaan toteuttaa toisista kuivatusalueista riippumatta (kuva 12.1). Kuivatusalueen rajausta vastaa siis hyötyalueen rajausta, mutta siihen kuuluu tarpeen mukaan ojaa ja muita rakenteita myös hyötyalueen ulkopuolella ja jopa toisen kuivatusalueen puolella.

Ojituksen hyöty voi olla sekä välitöntä että välillistä hyötyä. Välitön hyöty koskee aluetta, jolla kuivatus paranee tulvan poistamisen tai alentamisen seurauksena tai peruskuivatuksen paranemisen seurauksena. Välillinen hyöty koskee välittömän hyödyn yläpuolista aluetta, jolle ojituksesta saadaan ns. teknistä hyötyä, kuten erillisten viljelylohkojen samanaikaisen viljelyn mahdollistaminen tai niiden salaojitus vasta matalamman osan kuivatuksen jälkeen.

Ojituksesta voi koitua myös lisähyötyä eli ns. rationalisointihyötyä ojan sijainnin tai linjauksen tarkistuksen taikka ojan putkituksen seurauksena tiluskuvion koon tai muodon paranemisena. Lisähyötyä voi aiheutua myös kulkuyhteyksien parantumisesta. Joskus oji-



Kuva 12.1 Kuivatusalueen ja hyötyalueen rajausta.

tuksesta voi koitua hyödyn vähenemistä tiluskuvioiden huononemisen takia tai jätettäessä hyötyalueen jonkin osan ojayhteys pois hankkeesta.

Ojitus suunnitelmassa hyötylaskelma tehdään hyötyyn perustuvan kustannusosittelu perusteella. Hyötylaskelma esitetään tarvittaessa kuivatus- ja osittelualueittain hankkeen kannattavuustarkastelun yhteydessä (ks. Ojituksen kannattavuus).

Lisäksi ojituksella voi olla myönteisiä vaikutuksia alueen elinkelpoisuuteen sekä vesistöön ja muuhun ympäristöön tai muuta yleistä hyötyä, joka voidaan ottaa huomioon hankkeen kannattavuustarkastelussa.

Ojituksen hyöty lasketaan perinteisesti ns. kaksijyvämenetelmällä, joka on ollut käytössä jo 1920-luvulta alkaen. Siinä maanarvo ja kuivatustilanteen muutos osoitetaan kahdella suhde- eli jyväluvulla. Jyvityksen avulla saadaan lasketuksi ns. muunnettu hyötyala (mha), joka ilmaisee hyödyn täysin kuivatetun pellon määrää vastaavana alana. Muunnettua hyötyalan perusteella voidaan sitten laskea ojituksen euromääräinen hyöty eli maanparannus maan pääomitetun puhtaan tuoton tai maan hinnan mukaan.

Hyödyn arviointi ja kustannusten osittelu

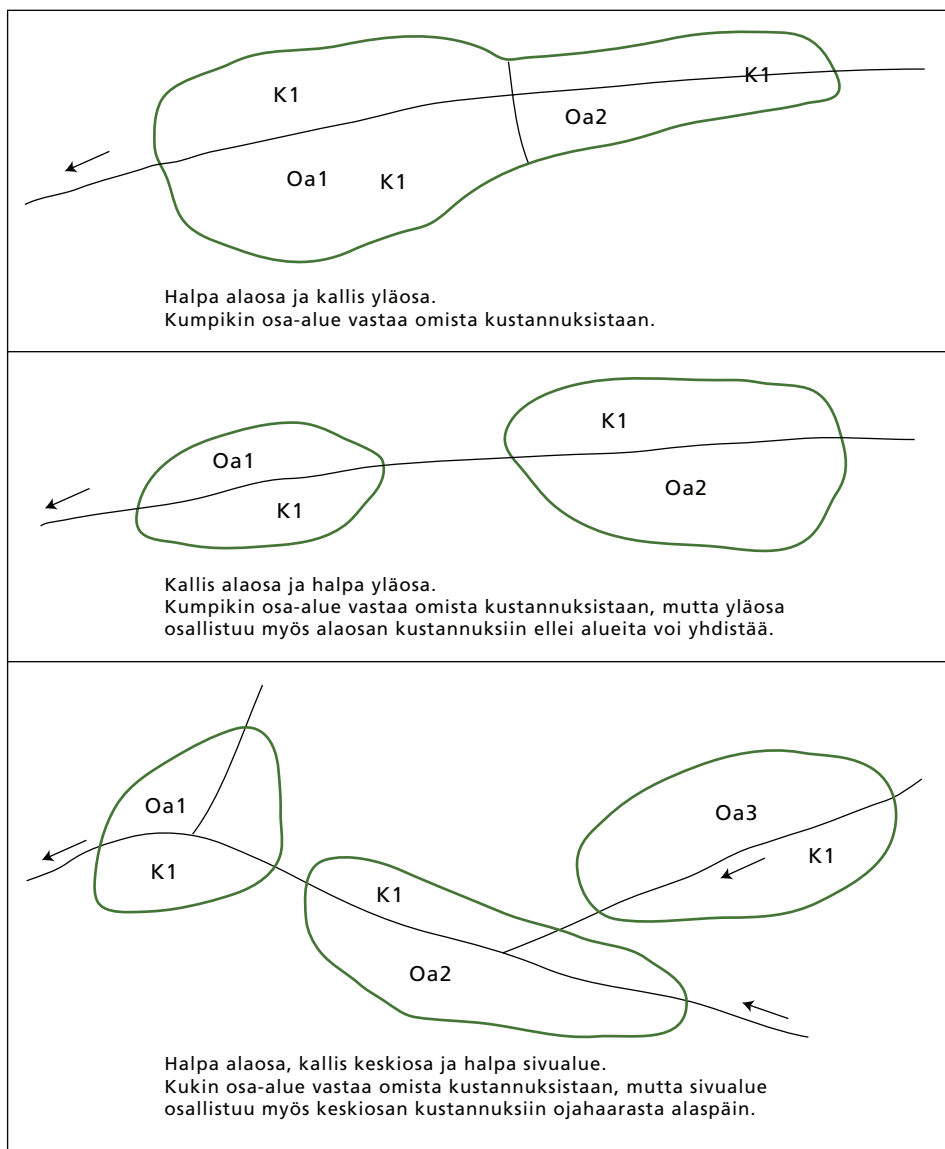
Kuivatusalue rajataan yhteisen ojitustarpeen ja hyödyn perusteella (VL 5:2). Näin ollen kuivatusalueen yhteinen oja alkaa selvästä putouskohdasta tai muuten riittävän alhaalta ja ulotetaan ylöspäin ja sivuhaaroissa niin pitkälle kuin ojitusta vaaditaan. Vastaavasti määräytyy hyötyalue kuivatusarpeen ja saatavan kuivatuksen mukaan.

Tarvittaessa kuivatusalue jaetaan osittelualueisiin (Valtioneuvoston asetus vesitalousasioista 25 §) kustannusten oikean jakautumisen turvaamiseksi (kuva 12.2). Osittelualuejaolla varmistetaan se, ettei kuivatusalueen minkään osan kuivatus tule kalliimmaksi kuin sen toteuttaminen erikseen maksaisi. Osittelualuejaon tarpeellisuus voi johtua kuivatusalueen muodosta, uomaan liittyvistä sivuhaaroista, jonkin kohdan erityisestä kaivu vaikeudesta, kuivatussyvyyden lisäyksen vaatimista lisäkustannuksista tai muusta vastaavasta syystä. Jako osittelualueisiin selvitetään kustannus- ja hyötyvertailun perusteella huomioon ottaen alueiden pituus- ja syvyyssuuntainen riippuvuus yhteisestä uomasta (kuva 12.3).

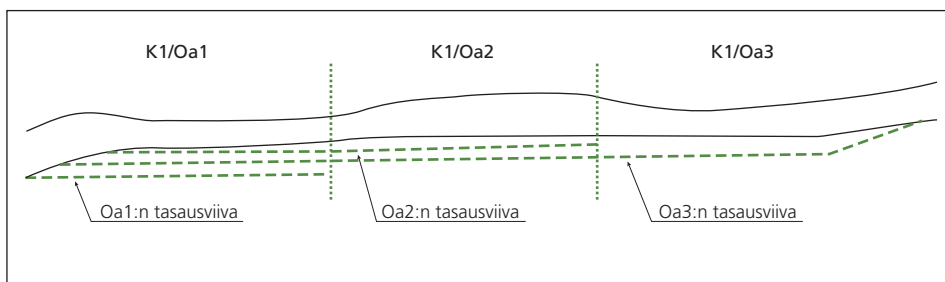
Osittelualuejaossa on erityisesti huomattava, että halvempi alapuolinen ja kalliimpi yläpuolinen alue vastaavat kummatkin omista työosuuksistaan riippumatta siitä, missä määrin yläpuolinen alue tarvitsee alapuolisen osuuden toteuttamista. Sen sijaan halvempi yläpuolinen alue joutuu osallistumaan kalliimman alapuolisen alueen työosuuteen sen mukaan, missä määrin alapuolisella alueella tarvitaan yläpuolisen alueen vuoksi lisäperkausta (ks. kuva 12.3). Usealla osittelualueella voi olla kallis yhteinen työn alaosa, jonka kustannuksiin alueet osallistuvat suhteellisesti vastaavalla tavalla. Tarvittaessa alueet on yhdistettävä samaksi kuivatusalueeksi, jolloin niiden kustannusosuudet ovat hyötyyn verrattuna suhteellisesti yhtä suuret.

Ojituksen hyödyn arviointia varten kuivatusalue jaetaan hyötyrajan mukaan korkeusvyöhykkeisiin sekä tiluslajiin (käyttömuodon) mukaisiin kuvioihin lohkorajat (ojat, tiet) huomioon ottaen (ks. kuva 12.4). Hyötyraja määräytyy peruskuivatusarpeen tai tulvan perusteella mahdollinen tekninen hyötyvaikutus huomioon ottaen sen mukaan, kumpi peruste johtaa korkeampaan rajaan. Maaston ollessa eri tiloilla suunnilleen samanlainen hyödyn arvio voidaan suorittaa ilman korkeusvyöhykejakoakin.

Hyödyn arviointia ja kustannusten jakoa varten hyötyalue jyvitetään tiluskuvioittain maanarvo- ja kuivatusjyviä osoittavilla suhdeluvuilla. Maanarvojyvä määräytyy maan käyttömuodon ja maanlaadun mukaan ja kuivatusjyvä maan korkeusaseman ja kuivatuksen parantamisen (kuivatuslisän) mukaan. Jyvityksen perusteella laaditaan kustannusosittelu, joka osoittaa hyötyä saavien tilojen suhteellisen osuuden kuivatus- tai osittelualueen hyödyistä ja kustannuksista.



Kuva 12.2 Kuivatusalueen (K) jako osittelualueisiin (Oa).



Kuva 12.3 Osittelualuejakoon vaikuttava pituus- ja syvyysuuntainen riippuvuus yhteisestä uomasta. Yläpuolinen osittelualue Oa3 edellyttää lisäperkausta osittelualueilla Oa1 ja Oa2.

Pituussuuntainen riippuvuus osoittaa sen, miltä osin osittelualue tarvitsee lisäperkausta yhteisessä uomassa. Sen selvittämisessä käytetään mitoituksen mukaista tasausviivaa, jota ei tule keinotekoisesti loiventaa uomaosuuden lyhentämiseksi ja perkaustarpeen vähentämiseksi. Syvyysuuntainen riippuvuus määräytyy suunnitellun kuivatuksen mukaisen uoman syvyyden ja käytetyn tasausviivan kaltevuuden mukaan. Kustannusvertailussa riittää yleensä osittelualueen ja yhteisen uomaosuuden kaivu- ja louhintakustannusten vertailu.

Vesilain mukaan (VL 5:19) yhteisen ojituksen kunnossapitoon osallistutaan samoin perustein kuin varsinaiseen ojitukseen, elleivät erityiset syyt vaadi toisenlaista kustannusten osittelua. Yksityisen sillan tai rummun kunnossapidosta vastaa kuitenkin tienpitäjä tai rakenteen omistaja (VL 5:13).

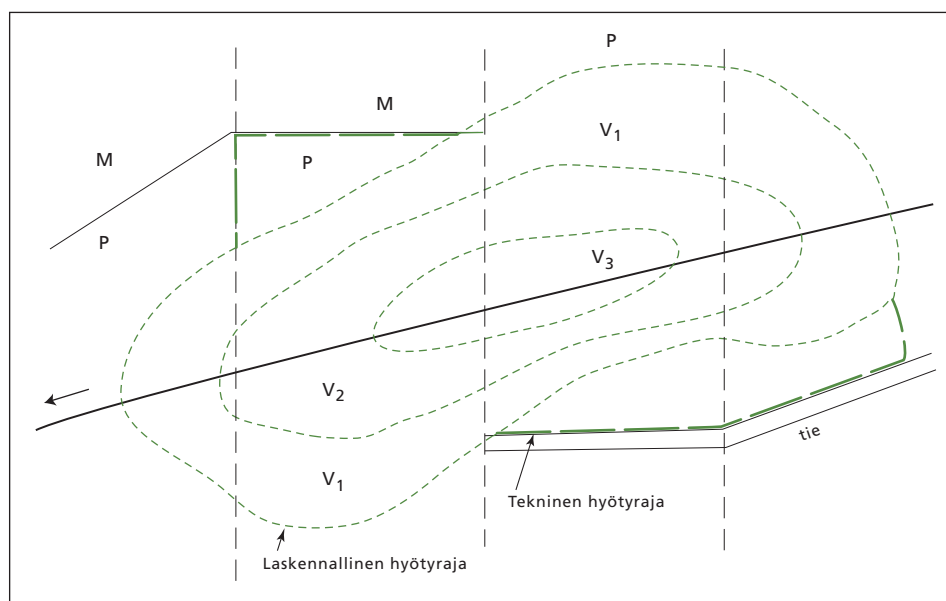
Hyötyraja ja korkeusvyöhykkeet

Ojituksen hyötyalueeksi rajataan se alue, joka kärsii vajaasta kuivatuksesta eli tulvista tai huonosta peruskuivatuksesta ja jolta osin ojitus parantaa kuivatusta. Välitön hyöty rajataan ns. laskennallisen hyötyrajan ja välillinen hyöty ns. teknisen hyötyrajan mukaan. Hyötyalue jaetaan maaston korkeuden mukaan korkeusvyöhykkeisiin, joiden perusteella tilakohtaiset tiluskuviot muodostuvat (kuva 12.4).

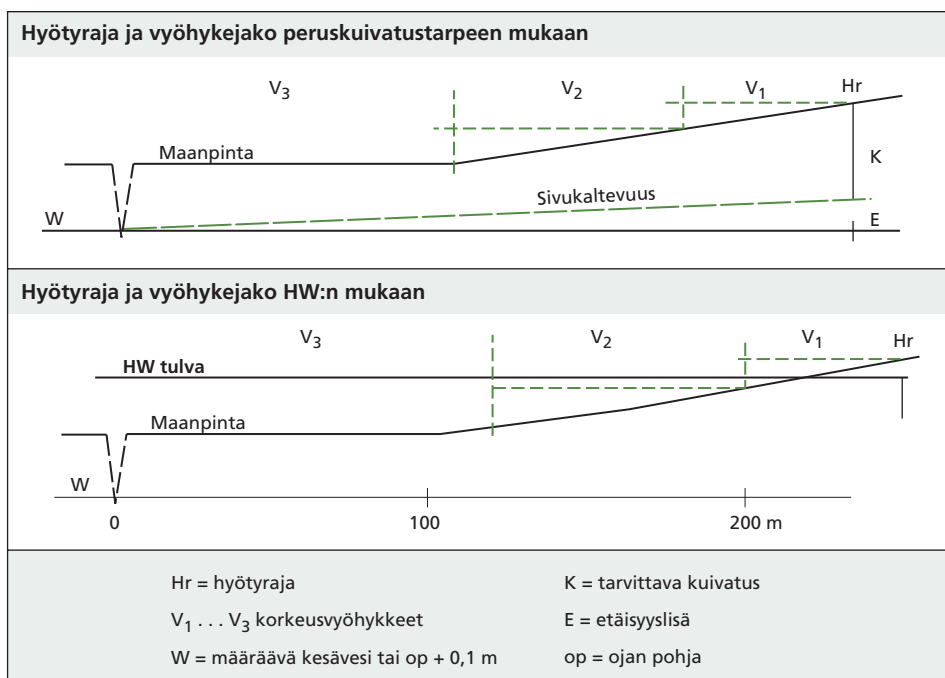
Laskennallinen hyötyraja määräytyy tarvittavan kuivatussyvyyden ja paikallisojituksen vaatiman sivukaltevuuden tai tulvan ja tarvittavan kuivavaran perusteella. Tekninen hyötyraja ulotetaan yleensä lähimpään kuviorajaan asti (raja, tie, metsänreuna), ei kuitenkaan enempää kuin noin metri laskennallista hyötyrajaa ylemmäksi. Vaikka maasto olisi tasainen, hyötyrajaa ei yleensä uloteta 300–400 m kauemmaksi yhteisestä ojasta.

Salaojituksen vaatima kuivatussyvyys on yleisesti 1,4 m ja sivukaltevuuden vaatima etäisyyslisä 0,2 m/100 m. Avo-ojitukseen jäävän pellon osalta kuivatussyvyys on 1,2 m ja metsän osalta 0,9 m sekä sivukaltevuus 0,1–0,2 m/100 m. Lisäksi otetaan painuvilla mailla (turve, lieju) huomioon maan arvioitu painuminen ja kuluminen 10–20 vuoden aikana.

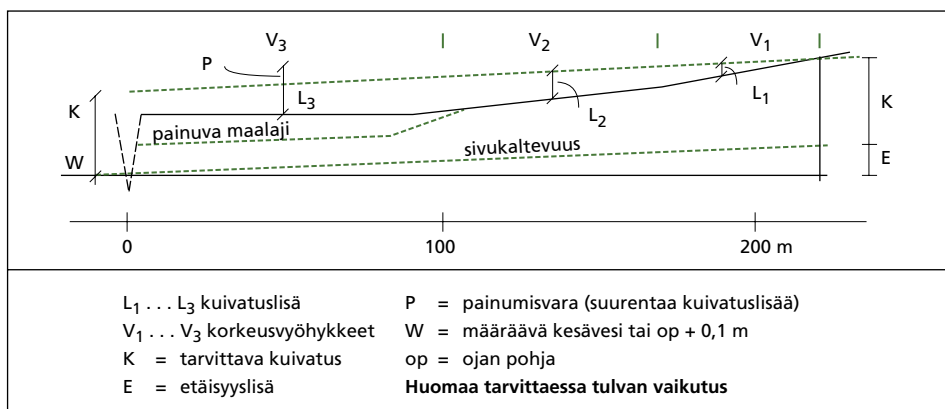
Tulvivilla alueilla hyötyraja määräytyy yleensä tulvan mukaan (ellei se peruskuivatuksen mukaan ole korkeampi) ilman sivukaltevuuden vaatimaa etäisyyslisää. Kevättulvien



Kuva 12.4 Hyötyraja ja vyöhykejako.



Kuva 12.5 Hyötyrajan ja vyöhykejaon määräytyminen.



Kuva12.6 Kuivatuslisän eli lisäkuivatustarpeen määräytyminen.

osalta hyötyraja voi yleensä olla $HW_{1/20} + 0,1-0,3$ m tulvan haitallisuudesta riippuen. Haitallisten kesätulvien osalta (suurten vesistöjen rannoilla) hyötyraja voi olla jopa $HW_{1/20} + 0,3-0,5$ m. Metsän osalta hyötyraja on yleensä MHW +0–0,3 m. Rakennetulla alueella saattaa olla tarpeen ottaa huomioon myös harvemmin sattuvat tulvat kuten $HW_{1/50}$.

Kuivatusalueen korkeusvyöhykkeiden erona käytetään maasto-olosuhteista riippuen yleensä 0,3 tai 0,4 m laskennallisesta hyötyrajasta lähtien, mutta tulvan määrätessä hyötyrajan vyöhykkeiden korkeusero voi olla 0,5 tai 0,6 m. Teknisen hyötyrajan ja laskennallisen hyötyrajan välinen alue muodostaa oman vyöhykkeensä. Korkeusvyöhykkeen keskimääräinen vajaakuivatus määrää sen lisäkuivatustarpeen eli kuivatuslisän (ks. kuvat 12.5 ja 12.6).

Maanarvo- ja kuivatusjyvät

Maanarvoisyvä (0,1:n tarkkuus) osoittaa maan suhteellisen hyvyyden. Se on alueen ensiluokkaisen pellon osalta 1,0 ja huonompien peltojen osalta 0,7–0,9. Myös peltolohkon pieni koko tai hankala muoto sekä tuotantokustannuksia nostava sijainti alentavat maanarvoisyvää 0,1–0,2. Luonnonlaitumen osalta maanarvoisyvä on yleensä 0,3–0,6, mutta laitumena käytetyn alavan pellon osalta se voi olla 0,6–0,8.

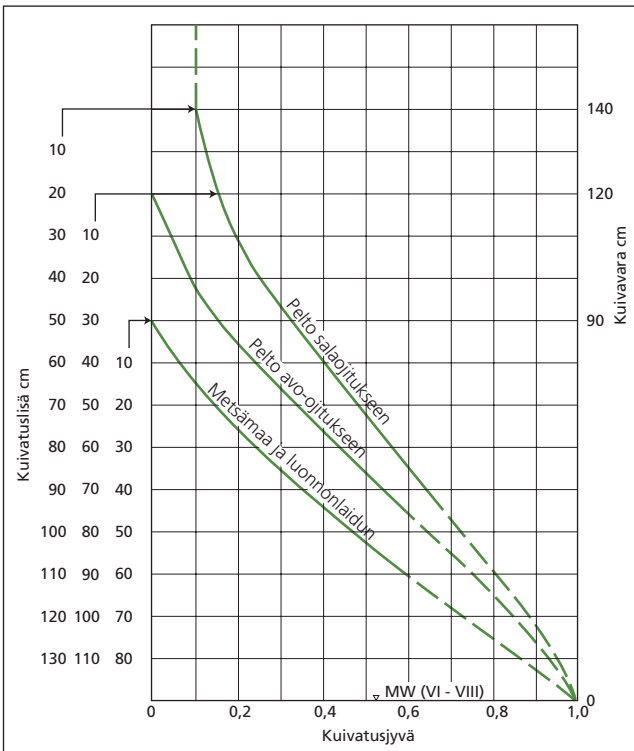
Metsämaan maanarvoisyvänä voidaan käyttää (peltoon verrattuna) 0,2–0,5 metsän hyvyydestä riippuen. Pelloksi tehtävän metsäraivion osalta se voi kuitenkin olla 0,5–0,8. Kitu- ja joutomaan maanarvoisyvä on yleensä 0–0,2.

Rakennusmaan tai muun erityisalueen osalta maanarvoisyvä määräytyy alueen käyttötarkoituksen ja koon perusteella ja voi olla rakennustontin osalta 2,0–3,0 (0,5:n tarkkuus).

Kuivatusjyvä eli korkeusjyvä (0,05:n tai 0,1:n tarkkuus) osoittaa ojituksella saavutettavan kuivatustilanteen suhteellisen paranemisen ja on 0–1,0 vajaakuivatuksen määrästä eli kuivatuslisästä riippuen kuten kuvan 12.7 yleisesti käytetystä nomogrammista käy ilmi. Salaojitettun pellon kuivatusjyvä on suunnilleen 0,7 x kuivatuslisä, kun se avo-ojitettun pellon osalta on 0,1–0,2 sekä metsän osalta 0,2–0,4 pienempi. Tulvan kuivatusjyvä on vastaavasti 0,1–0,3 tulvan haitallisuudesta riippuen. Kuivatusjyvä määräytyy kuvion keskimääräisen kuivatustarpeen mukaan. Samalla korkeusvyöhykkeellä saman käyttömuodon kuvioilla on yleensä sama kuivatusjyvä.

Kuivatuslisä osoittaa vajaakuivatuksen määrän, kun kuivatussyvyyden vaatima etäisyyslisä sekä maan painuminen ja kuluminen on otettu huomioon. Kuivatuslisä riippuu siis tarvittavasta kuivatussyvyydestä ja kuivavarasta, jotka ovat yhtä suuret kesäveden (tai ojan pohjan) korkeudella. Kuivatuslisä siis osoittaa sen, kuinka paljon kesäaikaisen veden korkeutta tai ojan pohjaa on alennettava, jotta riittävä kuivatus saavutetaan. Kuivatusjyvässä otetaan huomioon vain saavutettu kuivatuslisä, joka ei voi olla kuivatustarvetta suurempi.

Tulvan alenemisesta johtuva kuivatuksen paraneminen voidaan ottaa sovitellen huomioon kuivatusjyvässä tai tarvittaessa osoittaa erikseenkin.



Kuva 12.7 Kuivatusjyvän määrittäminen kuivatuslisän mukaan (Vesihallitus 1986).

Kustannusten osittelu

Vesilain mukaan (VL 5:19) yhteisen ojituksen kustannukset jaetaan kuivatus- ja osittelualueittain suhteellisesti sen hyödyn mukaan, jonka osakastilat ojituksesta saavat. Näin ollen osakastilat ovat samassa asemassa tilan sijainnista riippumatta. Kustannusten jaossa on kuitenkin huomattava, ettei kukaan maksa ns. ylöspäin, mikä voidaan välttää osittelualuejaolla, eikä ns. passiiviosakas hyötyään enempää (VL 5:21). Sovittaessa kustannusten jako voi perustua muuhunkin kuin hyötyyn.

Kustannusosittelu laaditaan tilakohtaisesti jyvittämällä kuviot maanarvo- ja kuivatusjyvillä, joiden tulolla kuvion pinta-ala kerrotaan. Näin saatu muunnettu hyötystä (mha) osoittaa kuivatustilanteen paranemisesta saatavan suhteellisen hyödyn, jonka perusteella kustannusosuudet määräytyvät. Osakastilojen kuvioiden yhteenlasketut muunnellut hyötystä ovat pohjana tilojen kustannusosuuksien (% ja euroa) laskemisessa.

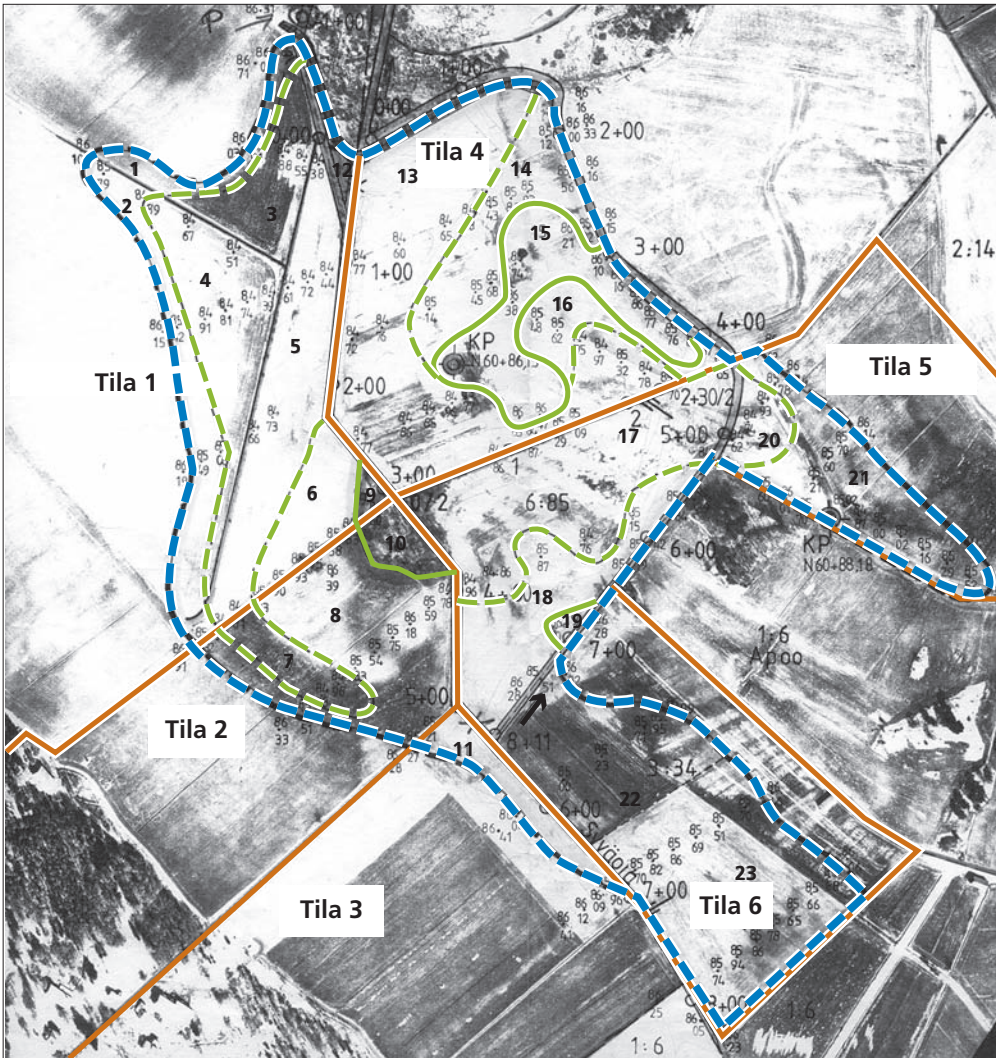
Taulukko 12.1 Kustannusositteluesimerkki (yksi kuivatusalue). Pellon (p) maanarvo on 1,0 ja kuivatusjyvä 0,1 –0,7 ja metsän (m) vastaavasti 0,4 ja 0,1.

Kuvio nro	Tila tiluslaji	hyöttyala		Suhdeluvut		Muunnettu ala		Osuus
		ha	yht			ha	yht	%
Kunta 1, Kylä 1								
Tila 1, Omistaja 1								
1	p	0,27		1,0	0,3	0,081		
2	p	0,91		1,0	0,3	0,273		
3	p	0,66		1,0	0,5	0,330		
4	p	1,18		1,0	0,5	0,590		
5	p	1,46		1,0	0,7	1,022		
6	p	0,57		1,0	0,4	0,228		
9	m	0,06		0,4	0,1	0,002		
12	m	0,04	5,15	0,4	0,1	0,002	2,528	27,64
Tila 2, Omistaja 2								
7	p	0,42		1,0	0,4	0,168		
8	p	1,88		1,0	0,3	0,564		
10	m	0,26	2,56	0,4	0,1	0,010	0,742	8,11
Tila 3								
Omistaja 3								
11	p	0,38	0,38	1,0	0,2	0,076	0,076	0,83
Kunta 1, Kylä 2								
Tila 4, Omistaja 4								
13	p	3,28		1,0	0,7	2,296		
14	p	1,03		1,0	0,3	0,309		
15	p	1,33		1,0	0,1	0,133		
16	p	0,54	6,18	1,0	0,3	0,162	2,900	31,70
Tila 5, Omistaja 5								
17	p	2,07		1,0	0,7	1,449		
18	p	1,23		1,0	0,3	0,369		
19	p	0,06		1,0	0,1	0,006		
20	p	0,29		1,0	0,6	0,174		
21	p	1,28	4,93	1,0	0,3	0,384	2,382	26,04
Tila 6, Omistaja 6								
22	p	1,37		1,0	0,2	0,274		
23	p	2,46	3,83	1,0	0,1	0,246	0,520	5,68
			23,03				9,148	100,00

Mahdollinen lisähyöty ja hyödyn väheneminen voidaan ottaa huomioon jyvityksessä muunnetun hyötyalan vastaavana lisäyksenä tai vähennyksenä. Lisähyöty voidaan osoittaa myös erillisenä kustannusosuutena, joka vastaa aiheutuneita lisäkustannuksia, jotka lisähyödyn saaja maksaa. Esimerkiksi korvattaessa avo-oja putkiojalla, voi siitä hyötävä maanomistaja suoraan vastata aiheutuvista lisäkustannuksista. Vastaavasti voidaan hyödyn väheneminen, esimerkiksi tiluskuvioiden muuttuessa ojituksen takia aikaisempaa huomommiksi, käsitellä vahingonkorvauksena. Käytetäänkö jyvitystä vai lisäkustannusta tai vahingonkorvausta, on lähemmin selvittettävä tapauskohtaisesti.

Ojituksen yleisiä hyötyjä ei arvioida ja ositella kuivatushyödyn ja lisähyödyn tapaan, vaan ne otetaan yleisesti huomioon hankkeen kannattavuustarkastelussa.

Kustannusosittelun laatimisesta on esimerkkinä ojitustoimituksessa käsitelty yhden kuivatusalueen pengerryssuunnitelma, jonka osittelu on taulukossa 12.1 ja kartta kuvassa 12.8. Huomattava on, että tilojen kustannusosuudet esitetään suunnitelmassa vain pro-



Kuva 12.8 Kuivatuskartta: hyötyalue (sininen), korkeusvyöhykkeet (vihreä) ja tiluskuvio (oranssi).

senttiosuuksina, joiden perusteella kustannusvastuu ja osakkuus kuivatus- ja osittelualueittain määräytyvät.

Sopimusojituksessa kustannusten jako voi perustua myös muuhun kuin hyötYPohjaiseen ositteluun. Tällöin kustannukset voidaan jakaa tilojen hyötyalueiden tai ojapituuksien suhteessa tai muulla yhteisesti sovitulla perusteella. Hankkeen hyöty tulee kuitenkin arvioida kuivatuksen paranemisen perusteella.

Ojituksen kunnossapitoa varten laaditaan tarvittaessa erillinen kunnossapito-osittelu. Monihaarisessa hankkeessa voi olla perusteltua jakaa hanke pienempiin kunnossapitoalueisiin tai -osuuksiin, vaikka hanke toteutettaisiin yhtenä kuivatusalueena. Toisaalta osittelualuejako ei välttämättä enää ole tarpeen kunnossapidon osalta. Kunnossapito-osittelu voidaan yleensä laatia varsinaisen osittelun jyvityksen mukaan tarvittaviin osa-alueisiin jakaen.

Peruskuivatuksen kannattavuus

Ojitushankkeen kannattavuutta voidaan tarkastella monesta näkökulmasta. Valtion tukea myönnettäessä hankkeen kannattavuutta arvioidaan vertaamalla sen kustannuksia kuivatushyötyyn ja ottamalla huomioon hankkeen muut hyötyvaikutukset, kuten vaikutukset tilojen ja kylien elinkelpoisuuteen ja ympäristöön. Hyödyn arvioinnissa valtio on käyttänyt muunnettujen hehtaarien menetelmää, joka on kehitetty kustannusten osittelua varten. Kertomalla muunnetut hehtaarit ensiluokkaisen pellon hehtaarihinnalla ongelmana on, että yhteiskunnan tuki vaikuttaa pellon hintaan ja vääristää kannattavuusarviota.

Maanomistajalla on oikeus kuivattaa maata ja kaikkien maanomistajien, jotka saavat hankkeesta hyötyä, on osallistuttava kuivatushankkeen kustannuksiin saamansa kuivatushyödyn suhteessa, elleivät hyödynsaajat toisin sovi (ks. kohta Hyödyn arviointi ja kustannusten osittelu).

Maanomistajat tarkastelevat kannattavuutta tilakohtaisesti. Kannattavuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten tilan tuotantosunta, tilan peltopinta-ala ja yhteiskunnan antama tuki. Peruskuivatuksen parantuessa tilojen tuotantokustannukset alenevat ja investointien käyttöaste paranee.

Yleensä valtion tukea myönnettäessä ojitushankkeen kannattavuutta on tarkasteltu vertaamalla sen kustannuksia sekä hyötyalueen pinta-alaan (ha) että jyvittämällä saatuun muunnettuun hyötYalaan (mha). Tällöin hehtaarikustannus (€/ha) osoittaa ojituksen lisäarvon ja muunnetun hehtaarin kustannus (€/mha) kuivatetun maan "hyötyhehtaarin" hinnan.

Kannattavuusvertailua varten selvitetään hyöty ja kustannukset kuivatus- ja osittelualueittain (K, Oa) seuraavasti:

Alue	Hyöty			Kustannukset		
K, Oa	Ha	mha	€	€	€/ha	€/mha

Ojituksen euromääräinen hyöty eli maanparannus saadaan kertomalla muunnettu hyötYala joko ensiluokkaisen pellon hehtaarihinnalla tai pellon pääomitetulla puhtaalla tuotolla. Pellon hintana voidaan käyttää alueella maksettavaa käypää hintaa tehtyjen kauppojen perusteella. Pellon puhdas tuotto voi perustua pellon keskimääräiseen vuotuisen nettotuottoon (ympäristö- yms. tuet mukaan lukien) käyttäen pääomituksessa kerrointa 20 (5 %:n jatkuva tuotto). Yleensä tuottoarvoa käyttäen hyöty on jonkin verran suurempi kuin hehtaarihintaa käyttäen.

Vertaamalla kustannuksia euromääräiseen hyötYyn saadaan ojituksen kustannuskerroin $k = \text{kustannukset/hyöty}$. Jos kerroin on alle 1, hanketta voidaan sanoa kannattavaksi. Jos kerroin on yli 1, hanke voi olla kannattava, kun huomioon otetaan myös muut hyötyisät

vaikutukset, jotka niin tilojen kuin kyläyhteisön kannalta voivat olla merkittäviä. Mikäli kerroin on yli 1,5, hanke on yleensä kannattamaton, mutta erityisin perusteluin se voi olla toteuttamiskelpoinen.

Ojituksen kannattavuudessa voidaan ottaa huomioon myös toistuvat käyttökustannukset (pumppaamot). Sen sijaan kunnossapitokustannuksia ei kannattavuustarkastelussa oteta huomioon. Kunnossapitotarve on yleensä vähäistä ja kustannukset varsin pienet ojitukseen verrattuna.

Ojitushankkeen yhteiskunnallinen kannattavuus on peruskuivatuksen tukemislaissa (947/97) rahoitusperusteena siten, että vesilaissa tarkoitetun kuivatushyödyn lisäksi otetaan huomioon hankkeesta aiheutuva välitön ja välillinen hyöty erityisesti ympäristölle ja yhteiskuntarakenteelle. Maaseudun elinkelpoisuus ja kulttuuriympäristön säilyminen voivat olla ojitushankkeen myönteisiä vaikutuksia. Ojitushankkeissa voidaan toteuttaa myös kosteikkoja ja muita toimenpiteitä vesistöhaittojen vähentämiseksi sekä kalataloudellista kunnostusta, joiden kustannukset ja hyöty voidaan ottaa yhteiskunnallisessa kannattavuudessa huomioon.

Kaisu Haataja

Jukka Peltola

12.3 Salaojituksen kannattavuus tilatasolla

Tässä kohdassa tarkastellaan ensin investointiongelman ratkaisemista yleisesti ja sen jälkeen salaojitusinvestoinnin erityispiirteitä. Salaojitus kytketään myös osaksi viljelijän päätöksentekotilannetta. Tämän jälkeen käydään läpi tarkemmin salaojituksen kannattavuuslaskennan periaatteet. Perinteisen salaojituksen lisäksi arvioidaan myös säätösalojituksen ja altakastelun taloudellisia vaikutuksia.

Salaojitus investointina

Kilpailevien investointien valinta

Investointi tarkoittaa pääoman pitkäaikaista sijoittamista. Kirjanpitotermein investointi on pitkävaikutteinen meno, josta odotetaan saatavan tuloja useampana kuin yhtenä tilikautena.

Investointi tehdään tulevaisuuden tuotto-odotuksien perusteella. Investoinnin tavoitteiden tulee olla sopusoinnussa yrityksen pitkän tähtäyksen suunnitelmien ja päämäärien kanssa. Investoinnit ovat tärkeitä taloudellisen kasvun ja ylläpidon kannalta pitkällä aikajänteellä. Investoinnin motiiveja voivat olla käytössä olevan investointikohteen loppuun kuluminen, sen taloudellinen vanheneminen, uudet innovaatiot, tarve korvata työtä pääomalla tai tuotantosuunnan muutos.

Investoijan päätöksenteko-ongelma voidaan esittää kolmivaiheisesti:

- 1) perustavoitteiden ja vaihtoehtojen määrittäminen
- 2) vaihtoehtojen kustannusten ja tuottojen arvioiminen
- 3) vaihtoehtoihin liittyvän riskin ja epävarmuuden huomioon ottaminen.

Investointilaskelmalla selvitetään eri investointivaihtoehtojen edullisuutta. Investoinnin arviointimenetelmiä ovat esimerkiksi nykyarvo-, annuiteetti- ja sisäisen korkokannan menetelmä. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- a) perusinvestointi
- b) investoinnista saatavat nettotulot
- c) investoinnin pitoaika
- d) investoinnin jäännösarvo
- e) laskentakorko

Investointilaskentamenetelmä valitaan tarpeen mukaan riippuen siitä, verrataanko eri investointivaihtoehtoja keskenään vai onko kysymyksessä yhden investointivaihtoehdon kannattavuuden selvittäminen. Pääsääntöisesti laskelmassa otetaan huomioon vain ne tuotto- ja kustannuserät, jotka muuttuvat investoinnin myötä.

Investoinnin tuottoja ja kustannuksia arvioitaessa osa eristä on rahamääräisiä ja sinänsä suoraan päätöksenteossa huomioon otettavissa, kun taas jotkut vaikutukset ovat markkina(hinna)ttomia, esimerkiksi ympäristövaikutukset. Investointipäätöksiä tekevän on tiedettävä, mitä laskentaeriä laskelmaan on sisällytetty ja mitkä ovat niiden lähtöoletukset.

Investointisuunnittelun perustehtävä on investoinnin kannattavuuden selvittäminen. Toinen tehtävä on rahoituksen eli tarvittavan pääoman hankinta. Rahoitussuunnitelmalla kartoitetaan pääomaresurssit sekä niiden ehdot ja edullisuus. Näiden laskelmien lisäksi täytyy selvittää hankkeen maksuvalmius, esimerkiksi kassavirtalaskelman avulla. Maksuvalmius tarkoittaa kykyä selviytyä maksuista ja muista taloudellisista velvoitteista silloin, kun ne erääntyvät.

Investointeihin liittyy riskiä ja epävarmuutta. Riski on epäonnistumisen vaara tai uhka, jota voidaan mitata esimerkiksi todennäköisyyksillä. Taloustieteessä riski kuvataan yleisesti tapahtuman todennäköisyyden ja siitä aiheutuvan taloudellisen tappion(voiton) tulona: $\text{riski} = \text{todennäköisyys (\%)} * \text{tappio (€)}$. Riskin ohella viljelijällä on epävarmuutta. Epävarmuus eroaa riskistä siinä, että tapahtuman todennäköisyys ei ole etukäteen arvioitavissa. Epävarmuus aiheutuu tiedon puutteesta, tekijöistä, joita ei voi ennakoita. Maatilatalouden riskit voidaan jäsentää seuraavasti: 1) tuotantotekniset riskit (sää), 2) hintariskit (tuotteiden hinnan muutokset), 3) tekniikkariskit (esim. tuotantomenetelmä vanhenee nopeasti) ja 4) politiikkariskit (mm. tuotannon rajoitukset).

Investointien kannattavuuslaskelmissa riski ja epävarmuus voidaan ottaa huomioon tekemällä laskelma todennäköisimmästä vaihtoehdosta, jolle tehdään herkkyysanalyysi. Siinä tarkastellaan miten muutosherkkiä lopputulokset ovat eri tekijöiden, kuten tuotantopanosten ja tuotteiden hintojen muutoksille. Kun yksittäisiä arvoja vuoronperään vaihdetaan ja seurataan muutoksen vaikutusta tulokseen, saadaan selville hanketta uhkaavat tärkeimmät epävarmuustekijät. Muuttujan kriittisessä pisteessä investointi muuttuu kannattavasta kannattamattomaksi.

Toinen tapa epävarmuuden hahmottamiseen on laatia investointilaskelmat erilaisin odoituksin, esimerkiksi optimistisilla, todennäköisillä ja pessimistisillä lähtöarvoilla. Kolmas, sormituntumaan perustuva, riskiä karttavan yrittäjän, keino on laatia varovainen laskelma siten, että arvioidaan kustannukset odotettua suuremmiksi ja tuotot odotettua pienemmiksi, lisätään laskentakorkokantaan riskilisää, käytetään lyhyempää kestoaikaa ja lisätään ennalta arvaamattomien menojen erä, esimerkiksi 10 % hankintamenosta, peittämään liikkeellelähdon kustannuksia. Esitettyä laskentatapaa voi haluttaessa käyttää, mutta se on hankalasti perusteltavissa eri investointikohteiden vertailuun.

Salaojitusinvestoinnin merkitys tuotannossa

Maatalouden liiketaloustieteen termein korvaus- ja uusintainvestoinneilla tuotantovälineistö pidetään jatkuvasti tuottokuntoisena ja sen kapasiteetti säilytetään entisen laajuksena. Uusinvestoinneilla kapasiteettia sen sijaan laajennetaan. Rationalisointi-investointi on usein samalla myös uusinvestointi. Rationalisointi-investoinnissa otetaan käyttöön uutta, aikaisempaa tehokkaampaa tai tuottavampaa teknologiaa.

Ensimmäistä kertaa salaojitettaessa on hanke sekä rationalisointi- että uusinvestointi. Uusinta- ja täydennyssalaojituksissa on kysymyksessä korvaus- ja uusintainvestoinnista. Kehitettäessä perinteistä salaojitusta sääätösalojituksiksi ja altakasteluksi on kyse jälleen rationalisointi-investoinnista.

Maatalouden investoinneille on tunnusomaista, että suurin osa investoinneista vaikuttaa erittäin kauan aikaa tuotannossa ja pääoman kiertonopeus on hyvin hidas. Investoitaessa maahan ja perusparannuksiin, kuten salaojitukseen, pääoma sidotaan hankkeeseen pitkäksi aikaa.

Salaojitusinvestoinneille on myös tyypillistä selkeä rationalisointihyöty peltoviljelyn tehostajana. Salaojituksen riskiä on myös pidetty vähäisempänä verrattuna muihin maatalouden investointeihin. Se on myös pitkävaikutteinen ja laajasti toimintaan välillisesti vaikuttava. Salaojitusinvestointia kuvaa lisäksi se, että ne ovat peruuttamattomia. Investoinnista saadaan tuottoa ainoastaan viljelemällä tai investointi voidaan realisoida pellon myynnin tai vuokrauksen kautta. Siten salaojitusinvestointiin sidotut varat ovat hyvin epälikvidejä. Salaojitusinvestoinnit ovat yrittäjän kannalta usein ainutkertaisia.

Salaojitus viljelijän päätöksenteossa

Tarkastellaan seuraavaksi salaojitusta viljelijän päätöksenteossa. Luvun tavoitteena on jäsentää yrittäjän valintatilannetta talousteorian näkökulmasta. Taloudellisen mallin avulla pyritään pelkistämään päätöksentekotilanne matemaattiseen muotoon.

Perusoletuksena on, että taloudellista toimintaa harjoittavan maatalousyrittäjän tavoitteena on voiton maksimointi ja/tai kustannusten minimointi. Yksittäisen maatalousyrittäjän näkökulmasta maatilayritys toimii kilpailullisilla markkinoilla, jolloin se ottaa tuotteen ja panosten hinnat annettuina. Yrittäjä voi vaikuttaa tuotannon määrään ja tuotantomenetelmiin ja pyrkii toimimaan siten, että yritystoiminnan voitto on mahdollisimman suuri. Yksinkertaistetussa esimerkissä voitto muodostuu tulojen ja kustannusten erotuksena seuraavasti:

$$\pi(y, x_i; p, w_i) = py - w_i x_i \quad (12.1)$$

π = voitto (€)

y = lopputuotteen määrä, esimerkiksi ohrasato (kg)

x_i = tuotantopanoksen määrä i , esimerkiksi lannoitteet (kg)

p = lopputuotteen hinta (€/kg)

w_i = tuotantopanoksen x_i hinta (€/kg)

Tuotantopanoksella x_i voidaan valitulla tuotantoteknologialla tuottaa lopputuotetta y , tietyn tuotantofunktion $y = f(x_i)$ mukaisesti. Kasvinviljelyyn sovellettaessa tuotantofunktion voidaan ajatella kuvaavan esimerkiksi ohran kasvufunktiota. Yleisessä muodossaan yrityksen voiton maksimointiongelman voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\pi(x_i; p, w_i) = \text{Max } pf(x_i) - w_i x_i \quad (12.2)$$

Yrityksen tavoitteena on maksimoida voittonsa. Yritys valitsee tuotantopanosten käytön, x (ja siten tuotannon, y , tason) siten, että se optimoi taloudellisen tuloksensa. Matemaattisesti ilmaistuna optimaalinen tuotantomäärä löytyy maksimoimalla edellä kuvattu voittofunktiio, eli derivoimalla voittofunktiio tuotantopanoksen x_i (muuttuja) suhteen. Lopullinen tuotantopanosten allokointi ja optimaalinen lopputuotteen tuotannon taso määräytyy hintojen w ja p (parametrejä) sekä olemassa olevan tuotantoteknologian $f(x)$ perusteella. Optimitilanteessa tuotantopanoksen rajatuotto ja rajakustannus ovat yhtä suuret.

Salaojitusinvestoinnista aiheutuu vuosittain tietyn suuruinen kustannusvaikutus, riippumatta siitä viljelläänkö peltoa vai ei. Salaojitusinvestoinnista aiheutuvat kustannukset ovat siis kiinteitä kustannuksia, joilla ei lyhyellä aikavälillä ole vaikutusta panosten käytön optimiin. Vaikutus on samankaltainen kuin suorassa hehtaaritueissa: tuki/kustannus lisää hehtaarituettoa/-kustannusta, mutta se ei muuta panosten käytön optimia.

Lyhyellä aikavälillä yrityksen tulee saada tuottoa vähintään muuttuvien kustannusten verran. Aikavälin pidetessä yhä useampi panos on muuttuva, joten katettavien muuttuvien kustannusten osuus kasvaa. Tällöin myös tuottojen tulee kasvaa, jotta muuttuvat kustannukset voidaan peittää. Pitkällä aikavälillä tuotoilla täytyy kattaa kaikki tuotantokustannukset.

Lyhyellä aikavälillä viljelijällä on tietyt kiinteät tuotantovälineet, esimerkiksi tietty peltoala ja tuotantorakennukset. Viljelijä voi vaikuttaa tuotantomääriin vain muuttamalla muuttuvien panosten käyttömääriä. Investoinnin toteuttamisen jälkeen, kun tilan peltoalaa on esimerkiksi lisätty tai hankittu uutta teknologiaa, viljelijä toimii jälleen kuin lyhyellä aikavälillä optimoimalla muuttuvia tuotantopanoksia uusien, sen hetkisten tuotantomahdollisuuksien puitteissa.

Tuotantofunktiot ja tekninen kehitys

Tuotantofunktiolla $f(x)$ kuvataan teknistä panos-tuotos -suhdetta, jolla panoksia kyetään muuttamaan tuotokseksi. Tuotantofunktio esittää matemaattisesti tuotoksen, joka on saavutettavissa käytettävissä olevilla tuotantopanoksilla. Se muodostaa maatalousyrittäjän päätöksenteolle rajoitteen, johon vaikuttavat fyysiset, tekniset ja biologiset tekijät. Panosten käyttö ja saatava tuotos peltoviljelyssä riippuvat maalajista, eduskasvista, ilmastosta, lajikkeesta, maan ravinnetilasta, viljelytekniikasta ja lopulta kasvin panos-tuotos -suhteesta sekä lannoitteen ja lopputuotteen välisestä hintasuhteesta. Panos-tuotos -suhde on siten kasvupaikka- ja kasvilajikohtainen.

Tuotteiden ja tuotantopanosten hinnat vaikuttavat siihen mitä tuotetaan sekä kuinka paljon ja millä tuotantopanoksilla tuotetaan. Tuotantoteknologian lisäksi myös lainsäädäntö ja tukipolitiikka asettavat rajoitteet optimoinnille. Maatalouspolitiikka ja tuotantomahdollisuudet vaikuttavat täten viljelijän päätöksiin.

Tekninen kehitys parantaa tuottavuutta. Tuottavuus tarkoittaa tietyllä tuotantovälineen käytöllä saatua tuotosta (fyysinen tuottavuus) tai tuottoa (taloudellinen tuottavuus). Panos-tuotos -suhteella mitattuna tuottavuus ilmaisee sen, miten tehokkaasti panokset yhdistetään suoritteiden aikaansaamiseksi. Tekninen kehitys, esimerkiksi salaojitusinvestointi, muuttaa tuotantomahdollisuuksien joukon rajapintaa (kuva 12.9). Uudet innovaatiot vaikuttavat usein myös eri panosten käytön suhteellisiin osuuksiin.

Tuottavuus vaikuttaa tuotoksiin ja panoskäyttöön, ja edelleen tuottoihin ja kustannuksiin eli kannattavuuteen. Kun uusi teknologia on hankittu, muuttuvien panosten käyttömäärät ratkaistaan uuden tilanteen mukaan. Pitkällä aikajänteellä voidaan myös tuotantoteknologiaa vaihtaa/muuttaa. Tuottavuuden paraneminen ei välttämättä johda kannattavuuden paranemiseen, jos paremman panoksen hinta on korkea.

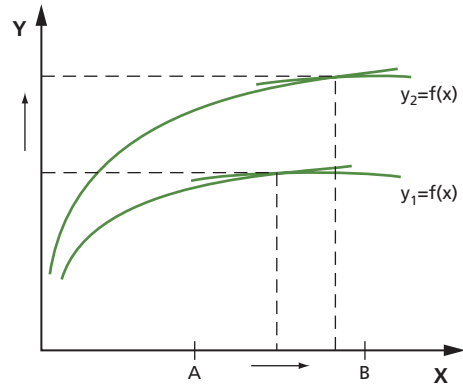
Salaojituksen vaikutus tuotantomahdollisuuksiin

Salaojitus on luonteeltaan tuotantomahdollisuuksia parantava toimenpide ja sen oletetaan parantavan kasvintuotannon sadon määrällistä ja laadullista tuottoa. Tuotantomahdollisuuksien muutokset vaikuttavat viljelijän päätöksentekoon. Salaojituksen tuotantovaikutukset riippuvat paikallisista olosuhteista ja siten salaojituksen merkitys ja kannattavuus vaihtelevat alueittain.

Salaojitus vaikuttaa maatalousyrittäjän päätöksentekoon usealla tavalla. Ensiojituksessa salaojituksesta koituu hyötyjä peltoalan lisääntymisenä, kun avo-ojien ala tulee viljelyyn ja ojista aiheutuva reunahaitta-ala pienenee. Tehollisen alan kasvu voi olla jopa 10–25 % lähtötilanteeseen verrattuna. Osa salaojituksen hyödyistä tulee kustannussäästöjen muodossa, kun sarkaojien aiheuttama lisätyö jää pois ja koneiden käyttö tehostuu. Sarkaojien kunnossapitokustannus korvautuu salaojituksen huollolla.

Täydennys- ja uusintaojituksessa taustalla on usein tilanne, jossa peltojen vesitalous kärsii huonoista kosteusoloista. Salaoituksen myötä viljelykasvin kasvu, lannoitteiden käyttökyky ja sadon määrä kasvavat. Salaoitus voi myös parantaa kasvuston lannoitteen käyttökykyä. Muutoksen seurauksena alkuperäisellä panoskäytöllä saadaan suurempi sato, lannoitteiden hyötysuhde paranee ja samalla lannoitehuuhtoumat vähenevät. Tämä voi ilmetä esimerkiksi kasvin keskiarvosadon kasvuna, tai siten, että keskiarvosato saavutetaan entistä vähäisemmin tuotantopanoksien. Tällaisen kehityksen seurauksena taloudellinen optimisato ja optimaalinen panoskäyttö muuttuvat. Salaoituksen avulla vesitalous paranee ja optimaalinen lannoitustaso saattaa nousta merkittävästi. Kuvassa 12.9 ylempi käyrä kuvaa kasvufunktiota salaoituksen jälkeen.

Salaoitus lisää myös salaoitukseen suoraan kuuluvien tuotantopanosten käytön tehokkuutta. Salaoituksen myötä satomäärän noustessa muut kiinteät kustannukset jakautuvat suuremman satomäärän kesken, ja näin tuotannon talous paranee. Halutessaan viljelijä voi myös kehittää ojitusta muuttamalla perinteisen salaojaston kastelujärjestelmäksi. Salaoituskastelujärjestelmä soveltuu sekä pellon kuivatukseen että kasteluun, ja järjestelmä mahdollistaa kasvintuotannon vesitalouden entistä tarkemman hallinnan.



Kuva 12.9 Salaoituksen (yleisesti teknologian muutoksen) vaikutus viljelijän päätöksiin. Kuvassa x , ja y kuvaavat tuotantopanosten ja tuotoksen määrää. A:lla ja B:llä voidaan merkitä tuotantopanokselle asetettavaa minimi ja maksimirajoja.

Kannattavuuden laskeminen

Kustannukset

Salaoituksen kustannukset muodostuvat suunnittelusta, tarvikkeista, työstä sekä yleiskustannuksista. Kustannuksiin vaikuttavat hankkeen koko, maalaji, salaojatiheys ja käytetty putkimateriaali. Myös peltokuvion muodolla, tasaisuudella, sijainnilla, ojitusajankohdalla sekä ojitustarvikkeiden ja työn hinnalla on oma merkityksensä lopulliseen kustannukseen. Säättösalaoitus- ja altakasteluhankkeissa lisäkustannuksia muodostuu säätkäivoista ja vedenpumppauslaitteistosta.

Salaoituksesta aiheutuvat vuotuiset kustannukset jaetaan yksinkertaisimmillaan korkoon, poistoon ja kunnossapitoon. Salaoituksen taloudellisena poistoaikana käytetään yleisesti 30 vuotta, joskin se vaihtelee ja käytännössä salaojien tekninen ikä voi olla sataakin vuotta.

Korko- ja poistokustannusten laskemisessa voidaan käyttää annuiteettimenetelmää, jossa korko- ja poistokustannukset jaetaan tasasuuruiksi eriksi eri vuosien kesken, jolloin ajan myötä koron osuus vähenee ja poiston osuus kasvaa. Mitä korkeampaa laskentakorkoa käytetään, sitä suuremmaksi muodostuu annuiteetti. Annuiteettimenetelmä edellyttää, että vuotuiset nettotulot, joihin annuiteettia verrataan, ovat keskenään suunnilleen samansuuruiset. Kannattavuus on sitä parempi, mitä suurempi on nettotulon ja annuiteetin erotus.

$$AN = \frac{(1+p) \cdot (1+p^n)}{(1+p^n) - 1} \cdot H \quad (12.3)$$

AN = vuotuinen kustannuserä eli annuiteetti (€)

p = korko, jossa esim. $p=0,07$ vastaa 7 % korkokantaa

n = investoinnin kesto aika (vuosi)

H = investoinnin hankintameno (€)

Salaojituksen huolto-, tarkkailu- ja kunnossapitotyöt on arvioitu noin kahdeksi työtunniksi hehtaaria kohden vuodessa. Tämä erä hinnoitellaan viljelijän palkkavaatimuksen mukaan. Altakastelussa vuosittaisia käyttökustannuksia muodostuu myös veden pumppaamisesta.

Yhteiskunta kannustaa erilaisilla tuilla viljelijöitä salaojittamaan. Perinteinen salaojitus on kuulunut investointitukien piiriin. Salaojituksen tukia tarkennetaan vuosittain MMM:n asetuksella.

Hyödyt

Perusparannusten vaikutukset voidaan jakaa rahamääräisiin ja markkinattomiin tekijöihin. Rahassa määritettävät hyödyt voidaan luokitella edelleen suoriin ja välillisiin vaikutuksiin.

Salaojituksen hyödyt vaihtelevat ojitustyyppin mukaan. Eri ojitustyyppejä ovat sarkaojat korvaava ensiojitus, uusinta- ja täydennysojitus olemassa olevaan salaojastoon, säätösalojitus ja altakastelu (salaojakastelu). Salaojituksen hyödyt koostuvat lähinnä tuottoa lisäävistä ja kustannuksia alentavista tekijöistä. Kustannussäästöt tulevat esille erityisesti ensimmäistä kertaa salaojitettaessa. Uusinta- ja täydennysojituksissa hyödyt tulevat lähinnä sadon kautta ja säätösalojituksen ja altakastelun hyödyt saadaan sadon määrän ja laadun muodossa.

Salaojituksella on myös epäsuoria tuottoa lisääviä ja kustannuksia alentavia vaikutuksia. Esimerkiksi kasvukautta voidaan salaojituksella pidentää, kun ajanjakso, jolloin voidaan tehdä peltotöitä, pitenee. Kuivempi maa on keväällä lämpimämpi, mikä mahdollistaa aikaisemman kasvuun lähdön viljelykasveille. Nämä tekijät yhdessä vaikuttavat, että ajallisuuskustannus kasvukautena pienenee ja parantunut pellon vesitalous pienentää myös satoriskejä ja satovaihtelua.

Salaojituksen välilliset ympäristövaikutukset ilmenevät mm. parantuneena maan rakenteena. Toimiva maan rakenne edistää juuriston toimintakykyä erityisesti ääriolosuhteissa maan ollessa tarpeettoman kuivaa tai märkää. Toimiva salaojitus vähentää myös pintavalumia, eroosiota ja fosforin huuhtoutumista.

Pinta-ala kasvaa ja piennarvaikutus vähenee

Korvattaessa sarkaojat salaojastolla tehdään tavallaan uutta maatalousmaata ja käytettävissä oleva tehollinen tuotantoala kasvaa. Pellon reunoilta ei täyttä satoa saada korjattua maan tallautumisen, rikkaruohojen ja tuholaiden vuoksi. Salaojitus lisää viljelykelpoista alaa myös tällä tavoin viljelemättömien ojanpientareiden ja vähäarvoisen reuna-alueen pienentyessä. Yhdessä avo-ojien poisjäänti ja reunahaitta-alan väheneminen lisäävät tehollista peltotilaa tuotantosunnasta riippuen noin 10–25 %.

Lisäalan tuotto voidaan laskea katetuoton avulla kertomalla salaojitettun pellon kate-tuotto ja lisäpinta-ala keskenään. Tulee kuitenkin huomioida, että salaojitus ei yleensä vaikuta peltoalaperusteisiin tukiin. Tuettava pinta-ala ei muutu, kun sarkaojat jäävät pois, jos peltokuvioden muotoa ei muuten muuteta. Joissain tapauksissa hyvin leveät tai pusikoituneet avo-ojat on kuitenkin vähennetty pois tukialoista. Näissä tapauksissa myös lisääntyvät peltotuotet kannustavat salaojitukseen.

Satohyödyt uusinta- ja täydennysojituksissa

Ojituksen toimivuus vaikuttaa sadon määrään ja laatuun sekä näiden vuosittaiseen vaihteluun. Ruotsissa tehdyissä pitkäaikaisissa kenttäkokeissa huonokuntoinen ojitus pienensi satoja jopa 30 % ja samalla lisäsi vuosittaista satovaihtelua.

Salaojituksen toimivuus tulee esille erityisesti äärikesinä. Märkinä kesinä pelloilla, joilla ojitus ei toimi, sadot laskevat selvästi tai viljely ei onnistu lainkaan. Jos märkyydestä johtuvia katovuosia (100 % kato) on esimerkiksi yksi kesä kymmenessä vuodessa, on sadonmenetys vuotta kohden keskimäärin 10 %.

Säätösalaojituksessa pohjaveden pintaa voidaan säädellä ja altakastelussa voidaan ojaan johtaa tarvittaessa myös lisävetä. Altakastelun vaikutuksia voidaan arvioida muiden kastelumenetelmien kuten sadetuksen tuloksien avulla tai vaihtoehtoisesti kuivuudesta johtuvien menetyksien perusteella. Sadetuksen tapaan altakastelu lisää satoja, parantaa laatua ja pienentää satovaihtelua.

Työmenekki pienenee

Salaojitus poistaa sarkaojat, jolloin ihmis- ja konetyömenekki alenevat. Työmenekin pienemiseen vaikuttavat monet tekijät:

- 1) kuinka suuri varsinaisen pellolla tapahtuvan ajon osuus on ko. työn koko työajasta
- 2) peltoviljelykoneiden koon sopiminen sarkaleveyteen
- 3) sarkojen ja sarkaojien kunto
- 4) lohkon koko, muoto ja sarkaleveys
- 5) päisteiden leveys

Merkittävimmät työsäästöt tulevat pienillä peltokuvioilla lyhyillä ja leveillä lohkoilla. Jos salaojituksella voidaan pääviljelysuuntaa muuttaa edullisemmaksi, säästöä tulee myös tätä kautta. Mitä isompi lohko on, sitä pienempi on lohkon epäedullisen muodon vaikutus ajamisaikaan. Ja mitä edullisempi lohko on muodoltaan, sitä vähäisempi on lohkon koon vaikutus. Kun lohkon koko pienenee kahdesta hehtaarista, ajamisaika pinta-alayksikköä kohti kasvaa jyrkästi.

Eri peltotöissä salaojituksen hyöty vaihtelee. Peltotyöt voidaan jakaa töihin, jotka ovat riippuvaisia peltolohkon koosta ja muodosta, ja työvaiheisiin, joihin salaojituksella ei ole vaikutusta. Näiden kahden tyyppisen työvaiheen keskinäisestä suhteesta riippuu, millä painolla lohkon koko ja muoto vaikuttavat peltotyöaikaan.

Sarkaleveyden ja koneen työleveyden suhde vaikuttaa siihen, kuinka paljon työajassa voidaan lopulta säästää. Ojanvierien mättäät vaikuttavat työmenekkiin hidastaen töitä ja aiheuttaen useampia ajokertoja. Ojanvieriä joudutaan ajamaan hitaammin ja muun muassa käännöksiin kuluva aika lisääntyy. Tämä altistaa myös maan tiivistämiselle.

Työtehoseuran työnormit on laskettu salaojitetulle ns. peruslohkolle, joka on kahden hehtaarin suorakaide (100*200 m). Mikäli lohkon koko, muoto ja ojitus poikkeavat tästä, työmenekki korjataan olosuhteita vastaavaksi kertoimien avulla. Jos ajokaistan pituus avo-ojitetulla pellolla on ≥ 200 m, salaojitetun pellon työmenekki on karkeasti 1,25-kertainen. Mikäli ajokaista on alle 200 m, kertoimena on 1,5.

Sarkaojien poisjäännistä saatava työsäästön arvo saadaan, kun hinnoitellaan työkoneiden ja kuljettajan työtunti. Hinnoittelussa voidaan käyttää Työtehoseuran keräämiä urakointituntihintoja tai määrittämällä tilan omille koneille sopiva marginaalikustannus (Sipiläinen ja Ryytänen 1987).

Sarkaojien avaus 7–10 vuoden välein ja vuosittainen päisteputkien tarkastus aiheuttavat hoitotöitä. Sarkaojien kunnossapitokustannus riippuu pellon maalajista ja sarkaleve-

ydestä. Sarkaojien kunnossapidon poisjäänti arvioidaan perkauskustannusten perusteella esimerkiksi annuiteettimenetelmän avulla.

Sarkaojien korvaaminen salaojastolla alentaa myös siemen-, lannoite- ja kasvinsuojeluainemääriä. Ainemenekin pienenemistä voidaan arvioida siten, että määritetään ensin päällekkäislevityksen pinta-alat sarka- ja salaojitetulla pellolla. Alojen erotuksesta saadaan sarkaojista johtuva päällekkäislevitysala. Kannattavuuslaskelmasta on esimerkki tietoruuksissa 12.1.

Tietoruutu 12.1

Kannattavuuslaskelma

Seuraavassa on esimerkinomaisesti tarkasteltu salaojituksen kannattavuuden määrittämistä ensi- ja uusintaaojituksessa. Viljelykasvina on ohra ja salaojitettavana on 100*200 m suora-kaiteen muotoinen lohko.

Ensi- ja uusintaaojituksen vuotuis-kustannukset on laskettu olettaen, että investointi-kustannus on molemmissa 1800 €/ha (alv 0 %), poistoaika 30 vuotta ja laskentakorko 5 %. Tällöin annuiteettimenetelmällä korko- ja poistokustannukseksi muodostuu yhteensä 117 €/ha/v. 20 %:n investointituki pienentää kustannuksia 23 €/ha/v. Hoitotyökustannus on 16 euroa, kun työmenekki on 2 tuntia/ha/v ja työtunnin hinta on 8 €/tunti. Lopullinen kustannus on 110 €/ha/v (huom. lähtöarvot noin vuodelta 2000).

Satohyödyt lasketaan prosentteina tarkasteltavan ojitusalueen satotasosta. Mikäli ohran hinta on 0,11 euroa/kg ja satotaso 4000 kg/ha, niin 15 % sadonlisäyksellä satohyödyiksi muodostuu 66 euroa/hehtaari. Kustannussäästöä kertyy ensisalojituksessa, kun sarkaojat jäivät pois. Esimerkissä 25 %:n työnsäästö omin konein tuottaa 16 €/ha/v kustannussäästön (urakointihinnoin 52 €/ha/v), ainemenekin pieneneminen 8 €/ha/v ja sarkaojien kunnossapidon poisjäänti vastaavasti 35 €/ha/v. Näissä laskelmissa kaksinkertaisen ainemenekin kustannuksista on huomioitu vain osa, 80 %. Näillä ensiojituksen laskentaoletuksilla hyödyt kattavat kustannukset.

Uusintaaojituksessa tuotot tulevat sadon kautta. Vanha salaojitus saattaa toimia jo niin huonosti, että märkydestä aiheutuu usein satotappioita tai pelto muuttuu viljelykelvottomaksi. Tässä esimerkissä sadonarvo on 440 euroa/ha, jolloin 30 % satotappiot aiheuttavat 132 euron menetykset vuodessa. Näiden satotappioiden poisjäänti kattaa hyvin salaojituksen vuotuis-kustannukset.

Yhteenveto laskelmista on esitetty taulukossa T12.1. Eri viljelykasvien siemen-, lannoite- ja kasvinsuojeluainekustannuksina on käytetty samoja arvoja kuin ProAgria Maaseutukustusten Liiton katetuottolaskelmissa.

Vuotuis-kustannusten kattamiseksi tarvittavia sadonlisäyksiä voidaan arvioida myös laske-malla tarvittavat vähimmäissadonlisäykset.

Laskelmia arvioitaessa on huomattava, että kyseessä on vain kahden hehtaarin lohko. Isommilla lohkoilla salaojituksen hyödyt korostuvat. Salaojituksen kannattavuustarkastelua voidaan laajentaa yksittäisten viljelykasvien osalta käsittämään koko viljelykierto. Kotieläin-tiloilla tulee huomioida, että salaojituksen sadonlisäykset ovat välituote. Lopulliset hyödyt tulevat kotieläintalouden tuottojen kautta. Sadonlisäykset voivat tehdä mahdolliseksi esimerkiksi eläinmäärän lisäyksen tai ostorehujen vähennyksen.

Taulukko T12.1 Salaojituksen kannattavuuslaskelman esimerkki.

(alv 0 %)	Ensiojitus €/ha/vuosi	Uusinta- ja täydennysojitus €/ha/vuosi
KUSTANNUKSET		
Investointikustannus	117	117
+ Työkustannus	16	16
- Avustus	23	23
Kustannukset yhteensä	110	110
HYÖDYT		
Satohyödyt	66	132
Kustannussäästöt:		
+ Työmenekin pieneneminen (urakointina)	16 (52)	
+ Ainemenekin pieneneminen	8	
+ Sarkaojien kunnossapito jää pois	35	
Hyödyt yhteensä	125 (161)^a	132
HYÖDYT – KUSTANNUKSET	15 (51)^a	22

^a omana työnä (urakointyönä)

12.4 Salaojituksen yhteiskunnallinen merkitys ja sen analyysi

Jyrki Aakkula ja Jukka Peltola

Salaojitusta on Suomessa harjoitettu valtion tuella jo 1920-luvulta lähtien. Alun perin tavoitteena oli tuotannon tehostaminen. Myöhemmin, eritoten 1970- ja 1980-luvuilla, maatalouden ylituotanto-ongelmien vaikeutuessa yhteiskunnan kiinnostus ja panostus salaojitukseen hiipuivat. 1990-luvulla kiinnostus virisi uudestaan salaojituksen potentiaalisten positiivisten ympäristövaikutusten myötä. Tuolloin salaojitus alettiin nähdä ympäristöhyötyjen tuottajana.

Yhteiskunnallisessa katsannossa salaojituksen ympäristöhyödyt jakautuvat kaikille yhteiskunnan jäsenille, vaikka varsinainen salaojitusinvestointi on aina yksittäisen viljelijän vastuulla.

Salaojituksen yhteiskunnalliset hyödyt

Yritystaloudellisesta näkökulmasta katsottuna salaojitus on kannattavaa, mikäli salaojituksella saavutettava tuoton lisäys on salaojituskustannusta suurempi. Yhteiskunnallisesta näkökulmasta katsottuna salaojitus on kannattavaa, mikäli salaojituksella saavutettava yhteiskunnallisen hyödyn lisäys on aiheutettua yhteiskunnallista kustannusta suurempi. Pikaisella lukemisella yritystaloudellinen ja yhteiskunnallinen näkökulma salaojitukseen saattavat vaikuttaa samoilta.

Ollennainen ero muodostuu siitä, mitä tuottoihin/hyötyihin ja kustannuksiin lasketaan mukaan. Yritystaloudellinen laskelma perustuu suhteellisen helposti mitattaviin markkinahintaisiin suureisiin. Tuottopuolella arvioidaan, kuinka paljon salaojitus lisää satoa ja vähentää tuotantopanosten käyttöä. Kustannuspuolella arvioidaan rahamääräiset perusta-

mis- ja ylläpitokustannukset. Tämän jälkeen salaojainvestoinnin odotettavissa olevat tuotot ja kustannukset jaksetaan ajan suhteen ja nykyarvotetaan diskonttauksen avulla (ks. kohta Salaojituksen kannattavuus tilatasolla).

Yhteiskunnallisessa tarkastelussa kohdataan kaksi pääasiallista hankaluutta. Ensinnäkin on jossain määrin vaikea tunnistaa kaikkia salaojitukseen liittyviä yhteiskunnallisia hyötyjä ja kustannuksia. Ja vaikka niiden tunnistus onnistuisikin, voi olla vaikea löytää yksimielisyyttä siitä, miten verrata niitä toisiinsa. Arviointia on vaikea tehdä, elleivät yhteiskunnalliset hyödyt ja kustannukset ole esitettyinä yhteismitallisessa muodossa, esimerkiksi rahana. Tässä suhteessa rahamääräiseen yhteismitallistamiseen lähtökohtaisesti perustuva yritystaloudellinen tarkastelu on huomattavasti vakaammalla pohjalla, vaikka siihenkin toki liittyy monia epävarmuustekijöitä: tuotteiden ja tuotantopanosten hinnat voivat yllättäen muuttua eikä diskonttokoronkaan määrittäminen ole yksiselitteinen tehtävä.

Yhteiskunnan harjoittama salaojitusinvestointien tukeminen on siis perustunut sille ajatukselle, että salaojittaminen tuottaa yritystaloudellisen hyödyn lisäksi erilaisia yhteiskunnallisia hyötyjä. Aikojen saatossa näkemykset salaojituksen yhteiskunnallisista hyödyistä ovat muuttuneet paljonkin. Aluksi eli 1920-luvulla tavoitteena oli lisätä maataloustuotannon määrää parantamalla viljelysmaan tuottokykyä. Haluttiin kohentaa elintarvikeomavaraisuutta ja varmistaa, että maan oma maataloustuotanto riittää väestön ravintohuoltoon.

Valtion tuella oli toinenkin merkitys: se helpotti maataloutta vaivaavaa pääomapulaa. Moni normaalein yritystaloudellisin perustein kannattava salaojitusinvestointi olisi saatanut jäädä tekemättä sen takia, että lainansaantiin ei ollut samanlaisia mahdollisuuksia kuin nykyisin. Valtion interventio oli siten perusteltu myös yritystaloudellisesta näkökulmasta.

Maatalouden koneistumisen myötä salaojituksen keskeiseksi motiiviksi tuli peltokuvioiden järjeistäminen. Yhteiskunnallinen hyötymotiivi ei ollut enää esillä aivan yhtä selvänä. Tosin peltokuvioiden järjeistäminen lisäsi peltotöiden tehostumisen kautta maatalouden tuottavuutta, mikä sinänsä oli yhteiskunnankin kannalta suotavaa.

Ympäristöllinen näkökulma tuli mukaan salaojitukseen vakavammin vasta 1990-luvulla. Salaojitus nähtiin potentiaaliseksi eroosion ja ravinnekuormituksen vähentäjäksi ja samalla maatalouden ekotehokkuuden edistäjäksi. Hyvä vesitalous myös parantaa kasvien ravinteiden käyttökykyä. Perusajatuksena on, että mitä tarkemmin lannoitteiden sisältämät ravinteet pystytään hyödyntämään tuotantoprosessissa, sitä vähemmän niiden käytöstä syntyy vesistöjen laatua huonontavia ravinnehuuhtoumia. Tässä kohdin tuotannollinen tehokkuus ja ekotehokkuus lyövät kättä. Suorien typpihuhtoumien vähennyksen suhteen salaojituksen edut ovat kiistanalaiset. Ravinnehuuhtoumien lisäksi salaojituksen katsotaan vähentävän myös torjunta-ainehuuhtoumia ja maan tiivistymistä.

Tällä hetkellä noin 60 % Suomen pelloista on jo salaojitettu. Näin ollen salaojituksen lisäämisellä ei voida enää kovin paljon vaikuttaa ravinnehuuhtoumien vähenemiseen. Keskeiseksi kysymykseksi nouseekin, miten uusintasalaojitusten kanssa menetellään. Ympäristötukijärjestelmä on mahdollistanut tuen saannin aiempaa kehittyneempien salaojitekniikkojen soveltamiseen. Tällaisia ovat säätösalojitus- ja altakastelujärjestelmät. Tutkimusten mukaan menetelmät vähentävät ravinnehuuhtoumia maaperäolosuhteista ja sääoloista riippuen (ks. Luku 8). Näin säätösalojituksen käyttöönotto tuottaa selviä ympäristöhyötyjä.

Ravinne- ja torjunta-ainepäästöjen vähenemisen lisäksi salaojituksesta koituu myös muita hyötyjä. Sarkaojien poistuminen tarkoittaa torjunta-aineiden levitystä ja vähentää peltoliikenteen määrää ja sitä kautta polttoaineen kulutusta. Nämäkin vaikutukset lisäävät omalta osaltaan salaojituksesta koituvia ympäristöhyötyjä.

Pitemmällä tähtäyksellä on myös odotettavissa, että salaojitekniikkojen ja niihin liittyvien muiden vesiensuojelutoimenpiteiden avulla päästään eteenpäin maatalouden haja-

kuormituksen muuttamisessa pistekuormitusluonteiseksi. Kun ennen ojittamattomalle pellolle rakennetaan salaojitusjärjestelmä, ojaisto kanavoi osan ravinnehajakuormituksesta ojaiston laskuaukon kautta valtaojaan. Näin osa hajakuormituksesta saadaan muutettua pistekuormitukseksi, mikä helpottaa kuormituksen hallintaa. Pistekuormitusta on helppompaa seurata, ja mekanismit sen rajoittamiseksi ovat yksinkertaisemmin toteutettavissa kuin hajakuormitustilanteissa.

Viime vuosina huomiota on alettu kiinnittää myös siihen, miten maatalous vaikuttaa luonnon biologiseen monimuotoisuuteen. Tässä yhteydessä on korostunut erityisesti pientareiden merkitys. Ne toimivat luonnollisina kasvupaikkoina monille sellaisille eliölajeille, jotka ovat alkaneet harvinaistua ja jopa uhanalaistua. Lisäksi pientareet ovat tärkeitä leviämisreittejä eri eliölajeille. Salaojituksen yleistyminen on kuitenkin vähentänyt avo-ojien ja sitä kautta pientareiden määrää, minkä katsotaan vaikuttaneen maatalousluonnon biologiseen monimuotoisuuteen epäsuotuisasti (Pitkänen ja Tiainen 2000). Piennarten häviämistä voidaan toki osin kompensoida suojakaistoilla ja suojavyöhykkeillä sekä keinotekoisilla kosteikoilla.

Monimuotoisuusnäkökulmasta tarkasteltuna salaojittaminen ei siis välttämättä ole ekologisen kestävyuden kannalta tarkoituksenmukaista toimintaa. On kuitenkin pidettävä mielessä, että laajemmasta kestävyysperspektiivistä tarkasteltuna salaojituksesta on epäilemättä ollut myös hyötyä. Salaojitus on saattanut parantaa tietyillä peltolohkoilla tuotannon kannattavuutta, mikä on taannut laajemman pinta-alan säilymisen maatalouskäytössä. Tämä on puolestaan vaikuttanut myönteisesti maaseutu ympäristöön kokonaisuutena.

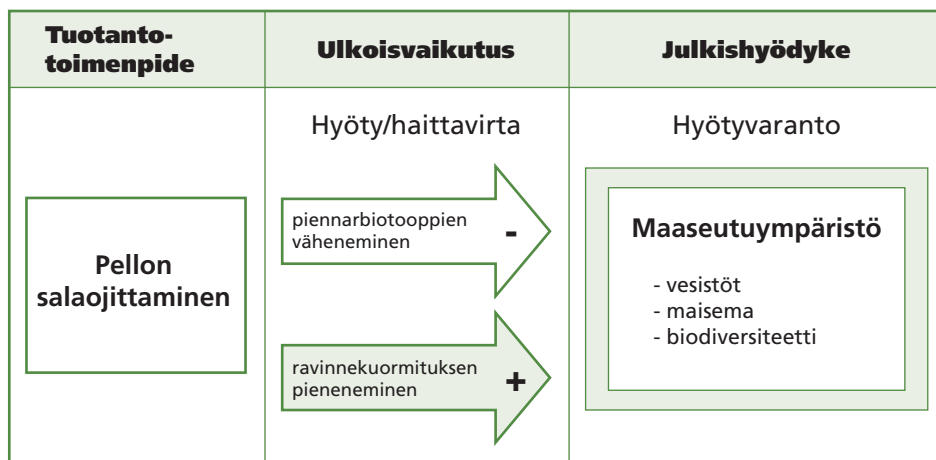
Edellä on jo käynyt ilmi, että salaojitus vaikuttaa maatalouteen ja maaseutu ympäristöön monilla sellaisilla tavoilla, joilla on laajempaakin merkitystä yhteiskunnan hyvinvoinnin kannalta. Salaojitusta ei siis pidä käsitellä pelkkänä yritystaloudellisenä toimenpiteenä, vaan huomioon täytyy ottaa myös sen tuottamat mahdolliset yhteiskunnalliset hyödyt ja haitat, joista keskeisimmät liittyvät salaojituksen ympäristövaikutuksiin.

Niin salaojituksen ympäristövaikutusten kuin muidenkin koko yhteiskuntaa koskevien vaikutusten tarkastelu vaatii käsitteellisen kehikon, jossa niille voidaan antaa mielekäs tulkinta. Yksi vaihtoehto on tarkastella salaojituksen tuottamia ympäristöhyötyjä ja -haittoja maaseutu ympäristön laatua ja/tai arvoa lisäävinä tai vähentävinä tekijöinä. Taloustieteellisessä mielessä tämä voidaan tehdä soveltamalla julkishyödykkeiden ja ulkoisvaikutusten käsitteitä. Käytännössä näillä käsitteillä kuvataan tuotannosta ja kulutuksesta muille kansalaisille aiheutuvia ”sivuvaikutuksia”, jotka tällä tavoin vaikuttavat muihinkin kuin tuottajiin/kuluttajiin itseensä.

Maaseutu ympäristö on hyvä esimerkki julkishyödykekokonaisuudesta. Julkishyödykkeelle on tyypillistä, että ketään ei voida sulkea sen käytön ulkopuolelle. Julkishyödykettä voi siten käyttää sellainenkin henkilö, joka ei millään tavoin osallistu julkishyödykkeen tuottamisesta aiheutuviin kustannuksiin. Lisäksi julkishyödykkeelle on tyypillistä, että sen käyttäminen ei sanottavasti vähennä kenenkään toisen käyttömahdollisuuksia.

Ulkoisvaikutukset ovat positiivisia tai negatiivisia hyödykkeiden tuotannon tai kulutuksen aiheuttamia hyvinvoinnin muutoksia, joiden arvo ei tule sisällytetyksi markkinahintoihin. Ympäristöhyöty onkin tulkittavissa positiiviseksi ulkoisvaikutukseksi. Ulkoisvaikutukset ja julkishyödykkeet voidaan myös mieltää saman kokonaisuuden osiksi. Hanleyn (1991) mukaan ulkoisvaikutus on hyöty-haittavirta, joka vaikuttaa julkishyödykkeen eli varannon arvoon. Esimerkiksi maatalouden investointi voi aiheuttaa positiivisia ulkoisvaikutuksia eli ympäristöhyötyvirtoja, jotka parantavat julkishyödykkeen eli maaseutu ympäristön laatua ja arvoa. Siten maaseutu ympäristöä voidaan kutsua ympäristöhyötyvarannoksi.

Kuvassa 12.10 on havainnollistettu virtavaranto-ajattelua salaojitusviitekehityksessä. Siinä julkishyödykekokonaisuus eli maaseutu ympäristö kuvataan varantona, joka koos-



Kuva 12.10 Salaojituksen ympäristövaikutukset ulkoisvaikutus-julkishyödyke -viitekehyksessä.

tuu kolmesta julkishyödykkeestä: biologisesta monimuotoisuudesta eli biodiversiteetistä, vesistöjen laadusta ja ekologisesta tilasta sekä maaseutumaisemasta. Pellon salaojittaminen taas tuottaa ulkoisvaikutuksen eli virran, joka joko vähentää tai lisää varannon eli maaseutu ympäristön arvoa. Tässä tapauksessa positiivinen ulkoisvaikutus eli hyötyvirta syntyy, kun salaojitus vähentää vesistöjen ravinnekuormitusta ja sitä kautta niiden rehevöitymistä. Negatiivinen ulkoisvaikutus eli haittavirta syntyy puolestaan siten, että salaojitus vähentää pientareiden määrää ja sitä kautta piennarbiotooppien sisältämää biodiversiteettiä.

Salaojituksen vaikutukset vesistöjen ekologiseen tilaan ja biodiversiteettiin heijastuvat myös maaseutumaisemaan. Avo-ojien katoaminen poistaa keskeisen maisemaa jäsentäneen elementin. Toisin sanoen muutos yhden julkishyödykkeen tarjonnan tasossa voi vaikuttaa toisenkin julkishyödykkeen määrään ja laatuun.

Yhteiskunnan kannalta julkishyödykkeillä on suuri merkitys, mutta niiden ominaisuudet vaikuttavat monesti siten, että niiden kysyntä ja tarjonta eivät kohtaa toisiaan markkinoilla. Nykyään onkin yleisesti hyväksytty, että yhteiskunta voi tietyissä tapauksissa osallistua julkishyödykkeiden tuotantoon verovaroin ja siten varmistaa julkishyödykkeiden riittävän tarjonnan. Suomen maatalouden ympäristötukijärjestelmä onkin esimerkki juuri tällaisesta ajattelusta. Voidaankin ajatella, että viljelijät ovat tehneet julkisen vallan kanssa sopimuksen ympäristöhyödykkeiden tuottamisesta korvausta vastaan. Näin julkinen valta on varmistanut maatalouden tuottamien ympäristöhyödykkeiden riittävän tarjonnan. Salaojituksen merkityksen mallintamista on esitetty tietoruuudussa 12.2.

Yhteiskunnallisen kannattavuuden arviointi

Yhteiskunnan kannalta salaojitukseen liittyvä päätöksenteko-ongelma on hiukan toisen tyyppinen, vaikkakin samoja elementtejä sisältävä. Voittoa vastaava päätösmuuttuja on yhteiskunnallinen hyvinvointi, jota yhteiskunta pyrkii maksimoimaan. Yhteiskunnan tehtävänä on selvittää salaojitukseen liittyvät yhteiskunnalliset nettohyödyt ja sen perusteella päättää, miten salaojitukseen suhtaudutaan. Yksinkertaisin vaihtoehto on lähteä siitä, että salaojitusmarkkinat toimivat täydellisesti. Tällöin yhteiskunnan ei pidä tehdä mitään: voittoa maksimoivat viljelijät ja salaojitusyrittäjät päätyvät markkinaratkaisuun, jonka tuloksena on optimaalinen salaojituksen määrä ja laatu.

Tietoruutu 12.2

Salaojituksen merkityksen mallintaminen

Viljelijä on lähinnä kiinnostunut niistä seikoista, jotka vaikuttavat tilan tulonmuodostukseen, eli tuotantopanosten ja lopputuotteiden hinnoista ja käytetystä tuotantoteknologiasta. Kaa-
van muodossa tämä voidaan esittää seuraavasti:

$$\text{Max } \pi(x; p, w) = pf(x) - wx, \quad (T12.1)$$

missä p ja w ovat lopputuotteiden ja tuotantopanosten hinnat vastaavasti, x kuvaa tuotantopanosten määrää, ja $f()$ määrittelee tuotantoteknologian.

Yhteiskunnan näkökulmasta katsottuna viljelijän toiminta ekosysteemin osana on monimutkaisempi. Maataloustuotannon tuottamat haitat ja epäsuotuisat ulkoisvaikutukset vaikuttavat tuotannon hyväksyttävyyteen ja tuotannon tuottamiin yhteiskunnallisiin nettohyötyihin. Viljelijän ei tarvitse ottaa tuotantonsa ulkoisvaikutuksia huomioon niin kauan kuin niille ei ole asetettu rajoituksia tai niille ei ole muodostunut markkinahintaa. Yhteiskunnan näkökulmasta ulkoisvaikutukset on kuitenkin arvioitava, koska niiden tuottamat haitat vaikuttavat yhteiskunnan jäsenten kokemaan hyötyyn ja siten laskevat yhteiskunnan kokonaishyötyä.

Perinteisesti tuotantotoiminnan negatiivisia ulkoisvaikutuksia (esim. ravinnehuuhtoutumat) ei ole hinnoiteltu lainkaan, joten haitalla ei ole ollut merkitystä viljelijän tulonmuodostukseen. Halutessaan yhteiskunta voi asettaa haitalle hinnan, esim. haittaveron ($t > 0$), ja tällöin viljelijä automaattisesti pyrkii vähentämään haitan tuottamistaan. Mikäli negatiivisia ympäristövaikutuksia, esim. ravinnehuuhtoutumia kuvataan symbolilla $z = g(x_i)$, ja huuhtoutumille arvioitu ja asetettu yksikköhinta, esim. vero, on t , edellä kuvattu malli voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\text{Max } \pi(x; p, w) = pf(x) - w_i x - t \cdot g(x) \quad (T12.2)$$

Mikäli haittaveron asetetaan, niin $t > 0$. Jos taas ympäristövaikutuksia ei hinnoitella, $t = 0$. Käytännössä kasvinviljelyn hajakuormitus on kuitenkin vaikeasti kontrolloitavissa. Sen vuoksi yhteiskunta onkin haittaveron sijasta nostanut lannoitteen hintaa lannoiteveroin, ja vaihtoehtoisina kontrollikeinoina on myös käytetty lannoitteen ylimpiä sallittuja käyttörajoja. Lisäksi on ehdotettu ravinnetaseeseen sidottua veroa, jossa vero määräytyy esim. lohkolle tulleiden ravinteiden (lannoite) ja sieltä lähteneiden ravinteiden (viljan ja kasvien osien sisältämät ravinteet) erotuksen mukaan.

Säätösalojituksen ja altakastelun käyttöönottoon kannustava tuki on puolestaan maksettu sen perusteella, että otetaan käyttöön uusi instrumentti, säätösalojitus, joka vähentää haitan muodostumista. Salaojituksen myötä haitan määrä lannoitteen funktiona muuttuu, eli $g(x) \rightarrow (g^{so}(x) \text{ funktion arvo } g^{so}(x) \leq g(x) \text{ kaikilla } x:n \text{ arvoilla})$. Näin valtio voi vapaaehtoisin keinoin vaikuttaa maataloudessa tuotettujen haittojen määrään.

Säätösalojituksesta aiheutuu tietty vuotuiskustannus, vk , ja siksi valtio maksaa viljelijälle tukea, että tämä kustannuksesta huolimatta ottaisi käyttöön ympäristöä hyödyttävän uuden tekniikan. Mikäli käytetty salaojitus samanaikaisesti tehostaa kasvintuotantoa ($f(x) \rightarrow f^{so}(x)$, jossa funktion arvo $f^{so}(x) \geq f(x)$ kaikilla $x:n$ arvoilla), viljelijä saa salaojitusinvestoinnista myös yksityishyötyä. Näin viljelijän tavoitefunktioista muodostuukin seuraavan kaltainen:

$$\text{Max } \pi(x; p, w) = pf^{so}(x) - wx - vk + T^{so} - 0 \cdot g^{so}(x) \quad (T12.3)$$

Viljelijä voi arvioida vastaavtko (tai ylittävätkö) kasvinviljelyn parempi tuotto ja salaojitusinvestoinnille maksettu tuki salaojitusinvestoinnista muodostuneet kustannukset ja mahdolliset käyttökulut. Viljelijä tekee investoinnin, mikäli se on kannattava. Toki laskelmaan liittyy monia epävarmuustekijöitä.

Jos kuitenkin edellä esitettyyn tapaan oletetaan, että salaojitus tuottaa ympäristövaikutusten kaltaisia, markkinoilla syystä tai toisesta hinnoittelematta jääviä ulkoisvaikutuksia ja/tai julkishyödykkeitä, yhteiskunnan saattaa olla mielekästä puuttua salaojitusmarkkinoiden toimintaan. Tietyillä edellytyksillä yhteiskunnan kannattaisi esim. maksaa tukea salaojittaville viljelijöille.

Tietoruudussa 12.3 esitetty yhteiskunnan hyvinvointifunktio on luonnollisesti hyvin voimakkaasti yksinkertaistettu ja perustuu oletukseen, että maataloustulon ja ympäristövaikutusten määrän arvostuksen muutokset eivät vaikuta välillisesti muihin mahdollisiin yhteiskunnan hyvinvointifunktion komponentteihin. Silti esimerkki paljastaa ne keskeiset ongelmat, jotka yhteiskunnallisen päätöksenteon tasolla on tavalla tai toisella ratkaistava, mikäli halutaan yhteiskunnan toimin vaikuttaa salaojittamiseen.

Ensinnäkin on löydettävä mittari, jota käytetään yhteiskunnallisen hyvinvoinnin, W , ilmaisemiseen. Koska varsinaisia mitattavia hyvinvointiyksiköjä ei ole olemassa, hyvinvoinnin muutoksia on totuttu kuvaamaan rahamääräisin yksiköin. Toisin sanoen erilaiset hyvinvoinnin muutokset on rahan avulla yhteismitallistettu. Tällainen menettely ei tietenkään ole teoreettisessa mielessä täysin perusteltua, mutta sitä voidaan puolustaa käytännön syillä: erilaisten vaihtoehtojen vertailu on äärimmäisen vaikeaa, ellei niiden seuraamuksia ilmaista yhteismitallisin yksiköin, ja raha puolestaan on vakiintunut ja kaikille tuttu hyvinvoinnin mittari.

Tietoruutu 12.3

Yhteiskunnan hyvinvointifunktio

Salaojituksen tukemisen yhteiskunnallisen kannattavuuden havainnollistamiseksi oletetaan seuraavanlainen yksinkertainen yhteiskunnan hyvinvointifunktio kuvaamaan yhteiskunnallista hyvinvointia, W . Lähtökohta on, että yhteiskunnalliseen hyvinvointiin vaikuttavat toisaalta maatalouden, eli yksittäisten maatilojen tuottama yhteenlaskettu voitto eli maataloustulo, Π , ja toisaalta maatalouden ympäristövaikutusten arvostus, $V(g(x))$, joka muodostuu päästöjen funktiona ja perustuu siten välillisesti käytettyihin lannoitemääriin. Käytännössä $V(\cdot)$ kuvaa kansalaisten arvostusfunktiota ja näin ollen ilmoittaa maatalouden ympäristövaikutusten arvon, jota tässä yksinkertaistetussa esimerkissä edustaa pelkkä lannoitteiden käytöstä johtuva ravinnehuuhtouma. Yhteiskunnan hyvinvointifunktio, jota yhteiskunta pyrkii maksimoimaan, voidaan siten kirjoittaa muotoon: $W = W(\Pi, V(\cdot))$.

Yhteiskunnan kannalta salaojituksen lisääminen on perusteltua, mikäli salaojitus (so) lisää yhteiskunnan hyvinvointia lähtötilanteeseen (lt) verrattuna, toisin sanoen jos

$$W^{so}(\Pi, V(\cdot)) > W^{lt}(\Pi, V(\cdot)) \quad (T12.4)$$

Tässä tilanteessa yhteiskunnan kannattaa tukea salaojitusta niin kauan kuin viljelijöiden salaojituksesta saama yhteenlaskettu nettohyöty (alla olevan kaavan 1. ja 2. termin erotus) lisätynä kansalaisten saamalla julkishyödykkeen arvolla (3. termi) on suurempi kuin yhteiskunnan salaojitukselle maksaman yhteenlasketun tuen, T :n, summa.

$$\sum \left[\overbrace{p_{so} f^{so}(\cdot) - wx^{so} - vk}^{1. \text{termi}} \right] - \sum \left[\overbrace{p_{lt} f^{lt}(\cdot) - wx^{lt}}^{2. \text{termi}} \right] + \overbrace{V((\cdot)^{so} - (\cdot)^{lt})}^{3. \text{termi}} > \sum T \quad (T12.5)$$

Voiton eli maataloustulon Π osalta tilanne on siinä mielessä ongelmaton, että maataloustulo ilmaistaan valmiiksi euroissa. Sen sijaan ympäristövaikutusten määrään liittyvä arvostusfunktio $V(\cdot)$ on hankalampi tapaus: ympäristövaikutusten määrä pitää jotenkin voida muuttaa rahamääräiseksi suureeksi. Tämä pitäisi kaiken lisäksi tehdä vielä siten, että arvostusfunktiossa otettaisiin huomioon kaikkien ympäristövaikutusten kanssa suorasti tai epäsuorasti tekemisiin joutuvien ihmisten mieltymykset ja arvostukset eli preferenssit.

Perusongelmana on, että käytetäänpä arvostusfunktiossa mitä tahansa preferenssien paljastamis- ja yhdistämismenetelmää, päädytään vertailemaan erilaisia näkemyksiä. Jonkinasteiselta yhteismitallistamiselta ei siis kerta kaikkiaan voida välttyä, ja yhteiskunnan käytössä olevien resurssien (joihin on laskettava myös aika) niukkuus asettaa rajat sille, miten on mahdollista menetellä.

Ympäristövaikutusten taloudellinen arvo voidaan periaatteessa määrittää usealla eri menetelmällä. Menetelmät perustuvat yleensä joko todettuihin tai lausuttuihin preferensseihin. Todettuihin preferensseihin pohjaavat menetelmät hyödyntävät sellaisia ihmisten jo tekemiä valintoja, joiden katsotaan sisältävän tietoa heidän suhtautumisestaan kyseiseen ympäristövaikutukseen. Tällöin lähdetään siitä oletuksesta, että ympäristövaikutukseen reagoiminen on yhteydessä jonkin markkinahyödykkeen kuluttamisen kanssa. Näin ollen ympäristövaikutuksen taloudellinen arvo saadaan johdettua markkinahyödykkeen hinnan ja määrän muutoksista. Lausuttuihin preferensseihin tukeutuvat menetelmät käyttävät puolestaan hyväksi informaatiota sellaisista valinnoista, joita ihmiset eivät vielä ole tehneet, mutta joita he oman ilmoituksensa mukaan olisivat valmiita tekemään heille esitetyissä, tarkkaan määritellyissä tilanteissa.

Lausuttuihin preferensseihin pohjautuvien menetelmien perusidea on se, että erilaisten kyselymenettelyjen avulla vastaajat saadaan ilmaisemaan preferenssinsä myös rahamääräisesti suhteessa tiettyihin tutkijan määrittelemiін muutoksiin jonkin ympäristövaikutuksen määrässä. Vastaajille esitetään joko yksi vaihtoehtoinen tai useampia vaihtoehtoisia muutoksia ympäristövaikutuksen määrässä. Tämän jälkeen vastaajia pyydetään valitsemaan joko mieluisin ympäristövaikutuksen määrän muutos tai järjestämään muutokset mieluisuusjärjestykseen. Valintaan tai järjestämiseen liitettyä rahamääräistä vertailutekijää hyödyntäen voidaan tuottaa suhteellisia tai absoluuttisia rahamääräisiä arvioita eri ympäristövaikutusvaihtoehtoihin liittyvistä hyvinvointimuutoksista (Morrison ym. 1996).

Lausuttujen preferenssien menetelmäperheeseen kuuluvassa ehdollisen arvottamisen menetelmässä luodaan arvottamisen kohteelle keinotekoiset markkinat kysymällä ihmisiltä, kuinka paljon he ovat valmiita maksamaan tietyn ympäristövaikutuksen laadun tai määrän muutoksesta. Toinen vaihtoehto on kysyä, kuinka paljon ihmiset vaatisivat korvausta, että hyväksyisivät tietyn muutoksen ympäristövaikutuksen laadussa tai määrässä (Mitchell & Carson 1989). Ihmisiltä voitaisiin esimerkiksi kysyä, kuinka paljon he olisivat valmiita maksamaan siitä, että salaojituksella vähennettäisiin jokin tietty osuus maatalouden tuottamista ravinnehuuhtoumista.

Mikäli salaojituksen ympäristövaikutukset rajataan koskemaan pelkkiä ravinnehuuhtoumia, on mahdollista soveltaa teoreettisesti hiukan heikosti perusteltua, mutta kuitenkin varsin kiinnostavaa arvottamisen menetelmää. Salaojituksen tuottamilla ravinnehuuhtoumavähennyksille on mahdollista johtaa rahallinen arvo siten, että arvioidaan, kuinka paljon kustannuksia aiheutuisi saman ravinnehuuhtoumavähennyksen aikaansaamisesta jollakin toisella menetelmällä. Kustannusreferenssinä voidaan käyttää esim. yhdyskuntien jätevedenpuhdistusta. Vehkasalo (1999) onkin käyttänyt tällaista lähestymistapaa arvioidessaan ympäristötukijärjestelmän yhteiskunnallista kannattavuutta maatalouden ravinnepestöjen vähentämisessä (ks. myös Haataja 2000).

Kustannus-hyötyanalyysi

Miten sitten käytännössä toimitaan, jos halutaan ottaa kantaa esim. siihen, pitääkö yhteiskunnan tukea viljelijöiden salaojitusinvestointeja? Vastaus on yhteiskunnan tasolla tehtävä kannattavuuslaskelma eli yhteiskunnallinen kustannus-hyötyanalyysi (YKHA). Sen avulla voidaan tarkastella, onko salaojittaminen yhteiskunnan kokonaishyvinvoinnin kannalta kaikkein tarkoituksenmukaisin keino huolehtia esim. juuri ravinnepäästöjen vähentämisestä.

Kustannus-hyötyanalyysiä voidaan periaatteessa käyttää missä tahansa tilanteessa, jossa kyse on tiettyyn resurssien käytön muutokseen liittyvien kustannusten ja hyötyjen arvioinnista (Boadway ja Bruce 1986). Randallin (1999) mukaan kustannus-hyötyanalyysi onkin ennen kaikkea hyvinvointimuutoksen mittaamiseen kehitetty talusteoriaan pohjautuva käytännön sovellus, joka perustuu kompensatioperiaatteelle: vaatimuksena on, että toimenpiteestä hyötyvien on (ainakin periaatteessa) kyettävä kompensoimaan toimenpiteestä muille aiheutuva haitta.

Sekä teoriassa että käytännössä kustannus-hyötyanalyysi soveltuu parhaiten sellaiseen tilanteeseen, jossa on ratkaistava, mikä toimintavaihtoehto valitaan toteutettavaksi toisen poissulkevien toimintavaihtoehtojen joukosta. Valintakriteerinä käytetään yleensä toimintavaihtoehdolle laskettua nettonykyarvoa (NNA), joka voidaan määrittellä toimintavaihtoehdon diskontatuksi odotetuksi taloudelliseksi arvoksi (Gittinger 1989). Kustannus-hyötyanalyysin tarkoitus onkin tunnistaa sellainen toimintavaihtoehto, joka maksimoi nettonykyarvon eli

$$\max NNA = \max \sum_{t=1}^T (B_t - C_t) \cdot \frac{1}{(1+r)^t} \quad (12.4)$$

missä $(B_t - C_t)$ kuvaa nettohyötyjä ajan hetkellä t , $1/(1+r)^t$ on diskonttaustekijä korolla r ja T on tarkasteluajanjakson pituus esim. vuosina.

Kustannus-hyötyanalyysiä on kritisoitu mm. mekanistisuudesta ja kyvyttömyydestä ottaa huomioon ihmisten preferenssejä muuten kuin markkinahintojen kautta. Dorfman (1996) listaa kolme merkittävää kustannus-hyötyanalyysiin liittyvää puutetta, joista ensimmäinen liittyy edellä esille tuotuun yhteismitallistamisen ongelmaan: on vaikea kuvitella, että jonkin ihmisryhmän tiettyyn toimenpiteeseen liittämät moniulotteiset käsitykset kustannuksista ja hyödyistä kyettäisiin ilmaisemaan yksikäsitteisen selvästi pelkkää rahaa mittarina käyttäen. Onkin pidettävä mielessä, että ihmisten mieltymysten kirjoa ei välttämättä saada pelkistettyä yksiulotteiseen arvosuureeseen kuten nettonykyarvoon, vaan päätöksenteko vaatii pohjakseen myös muita kriteerejä ja kattavan demokraattisen prosessin (Dorfman 1996, s. 3).

Kustannus-hyötyanalyysin toinen ongelma on, että sillä ei voida arvioida tulonjakovaihtokutuksia, eli mitkä yhteiskuntaryhmät hyötyvät ja mitkä kärsivät valitusta toimintavaihtoehdosta. Kustannus-hyötyanalyysi jäljittää pelkästään aggregoituja hyödyn tai hyvinvoinnin muutoksia yhteiskunnassa, se ei edes pyri löytämään häviäjiä ja voittajia. Päätöksentekijöille tieto vaikutusten jakautumisesta on kuitenkin tärkeä. Esimerkiksi säätösalaajituksella saadut hyödyt jakautuvat epätasaisesti, osittain vesistöjen sijaintien ja osittain mm. maala-ajan soveltuvuuden vuoksi, sillä säätösalaajitus ei sovellu kuin osalle viljellystä maa-alasta. Siten koko maan tasolla tehty yhteiskunnallinen kustannus-hyötyanalyysi on karkeahko tapa arvioida säätösalaajituksen yhteiskunnallista kannattavuutta. Esimerkiksi kuntakohtaiset tai valuma-alueen käsittävät analyysit lienevät tämän vuoksi tarkoituksenmukaisempia.

Kustannus-hyötyanalyysin kolmantena ongelmana Dorfman (1996) mainitsee tuloksiin liittyvän epävarmuuden ja sen, että epävarmuuden tasoa ja vaikutusta on vaikea arvioida. Yleensä arviot kustannuksista ja hyödyistä sisältävät paljon epävarmuustekijöitä. Säätösalaajituksen, altakastelun samoin kuin perinteisen salaajituksenkin ympäristövaikutuk-

sista on edelleen suhteellisen vähän tutkimustietoa, ja tehdyt tutkimukset ovat usein aika- ja paikkasidonnaisia. Tulosten epävarmuutta ei voida mitenkään kokonaan poistaa, joten kustannus-hyötyanalyysiin tulisikin aina liittää kattava herkkyyshanalyysi, joka parantaisi tulosten käytettävyyttä.

Edellä mainitut ongelmat saattavat heikentää kustannus-hyötyanalyysin uskottavuutta. Ongelmat johtavat pahimmillaan vääristyneisiin ja yksipuolisiin toimenpide-ehdotuksiin, mikä voi suurestikin haitata päätöksentekoa. Kokonaisuutena Dorfman (1996, s. 4) kuitenkin painottaa kustannus-hyötyanalyysin hyödyllisyyttä. Se on kaikesta huolimatta yksi toimivimmista keinoista tukea päätöksentekoa. Lisäksi kustannus-hyötyanalyysin avulla pystytään esittämään rahamääräisiä arvioita eri toimintavaihtoehtojen hyödyistä ja haitoista useimmille päätöksenteon osapuolille tutussa kontekstissa. Tiedon todellisen käytettävyyden vuoksi on tärkeää, että yhteiskunnallisessa kustannus-hyötyanalyysissä pyritään aina selvittämään, miten toimenpiteiden hyödyt ja haitat kansalaisten kesken jakautuvat (Dorfman 1996, s. 5). Tulosten epävarmuus on tuotava selväsanaisesti esiin, ja epävarmuuden vaikutusta on minimoitava herkkyystarkastelujen avulla.

Myös Randall (1999) kannustaa kustannus-hyötyanalyysin käyttöön tietyin varauksin. Hänen mukaansa analyysin suoraviivaista käyttöä on vältettävä. Analyysi on kuitenkin hyödyllinen päätöksenteon pohjana, kunhan sen ei anneta toimia ainoana päätöksenteon kriteerinä. Randall (1999) painottaakin, että hyvä kustannus-hyötyanalyysi perustuu tiukasti talousteorian: mm. oikean korkokannan merkitys diskontatessa on suuri. Jotta kustannus-hyötyanalyysi ei muodostuisi vain yksinkertaiseksi taloudelliseksi kannattavuuslaskelmaksi, on tarkasti arvioitava valittujen tekijöiden sisältö ja merkitys. Kustannus-hyötyanalyysin ongelmia onkin pyritty vähentämään kehittämällä sellaisia vaihtoehtoisia arvottamistapoja, jotka eivät pohjautu yhteismitallistamiseen rahamääräistämisen kautta.

Haataja (2000) sekä Haataja ja Peltola (2001) totesivat, että sääätösalaajitus on yhteiskunnallisesti kannattava investointi, kun sekä ravinnepestöjen vähenemisen arvo että satohyödyt otetaan laskelmissa huomioon. Pelkät ympäristöhyödyt eivät riitä takaamaan sääätösalaajituksen ja altakastelun yhteiskunnallista kannattavuutta. Tehdyssä aluetason analyysissä sääätösalaajitusinvestoinnin kustannusosa oli laskennallisesti määriteltävissä, mutta hyötyvaikutuksen arviointi oli vaikeammin toteutettavissa. Vehkasalo (1999) mukaillen sääätösalaajituksen tuottamat typpihuuhtoumavähenemät rahamääräistettiin siten, että niiden arvoksi tuli se kustannus, joka olisi syntynyt, mikäli vastaava typpipestövähennys olisi saatu aikaan jätevedenpuhdistuslaitoksen typenpoistoa edelleen tehostamalla.

Tämän kustannus-hyötyanalyysin perusteella salaajitusinvestoinnit eivät siis olleet kannattavia pelkkien ympäristöhyötyjen kannalta arvioituna. Jos mukaan otettiin myös saadut satohyödyt, sääätösalaajitusinvestoinnit muuttuivat yhteiskunnallisesti kannattaviksi. Tehdyssä analyysissä otettiin ympäristöhyötynä huomioon ainoastaan typpihuuhtoumien vähenemisestä koituva hyöty. Koska myös fosforinpoisto jätevesistä on varsin kallista, sääätösalaajituksen yhteiskunnallinen kannattavuus saattaisi parantua huomattavasti, mikäli sääätösalaajituksella mahdollisesti saavutettava fosforihuuhtoumavähennys voitaisiin arvottaa ja ottaa mukaan kustannus-hyötyanalyysiin.

Vehkasalo (1999) arvotti kustannus-hyötyanalyysin avulla maatalouden ympäristötukijärjestelmää kokonaisuutena, jossa salaajitukseen liittyvät ympäristötuen erityiset olivat yhtenä osana. Vehkasalon analyysissä ympäristötukijärjestelmän kannattavuus maatalouden ravinnehuuhtoumien vähentäjänä oli hyvä. Tosin johtopäätöksissä todettiin, että yhteiskunnallinen kannattavuus on hyvä myös kokonaan ilman ympäristöhyötyjen arvottamista, koska EU:lta saatava rahoitusosuus on merkittävä. Toisaalta joitakin ympäristöhyötyjä jäi analyysissä kokonaan arvottamatta, kuten maaseutumaisema ja luonnon monimuotoisuus. Niiden sisällyttäminen tuen tuottamiin ympäristöhyötyihin olisi todennäköisesti parantanut tuen yhteiskunnallista kannattavuutta.

13 Matemaattiset mallit maan vesi- ja ravinnetalouden säädössä

Tuomo Karvonen

13.1 Johdanto

Tietokonemalleja alettiin kehittää salaojituksen suunnittelun apuvälineiksi 1970-luvun lopulla samanaikaisesti Yhdysvalloissa ja Euroopassa, aluksi Hollannissa ja Puolassa ja muutama vuosi myöhemmin Suomessa ja Ruotsissa. Alkuvaiheessa mallien kehittämisen tärkein tavoite oli löytää ojaväli ja ojasyvyys, joilla viljakasvien sato olisi suurin mahdollinen. Erityisesti Yhdysvalloissa ajatuksena oli se, että malleilla voitaisiin tilakohtaisesti arvioida paras mahdollinen ojaväli. Suomen olosuhteissa keskeinen merkitys oli sadon ohella suunnitella ojitukset niin, että pellot saadaan keväällä riittävän ajoissa kylvökuntoon ja sadonkorjuun aikana pellot kantavat työkoneet riittävän hyvin. Viime aikoina ympäristönäkökulma on noussut entistä tärkeämmäksi. Maatalouden hajakuormitusta pitäisi pystyä edelleen vähentämään usealla kymmenellä prosentilla nykytasostaan. Mallien rooli tässä työssä tulee kasvamaan tulevaisuudessa.

Tässä luvussa esitellään lyhyesti tärkeimmät käytössä olevat matemaattiset mallit, jotka on joko alun perin kehitetty salaojituksen (kuivatuksen) suunnittelun apuvälineiksi tai joita myöhemmin on laajennettu niin, että ne soveltuvat myös pellon vesi- ja ravinnetalouden säädön vaikutusten arviointiin. Luvussa ei esitellä niitä lukuisia maavesimalleja, joissa pääpaino on maa-kasvi-ilmakehä -systeemin simulointi tutkimustarkoituksiin. Tarkasteluun ei myöskään oteta niitä malleja, joissa on erittäin monipuoliset menetelmät ravinteiden käyttäytymisen ennustamiseen tai viljelytoimenpiteiden vaikutusten arviointiin, mutta joissa salaojituksen vaikutusta ei pystytä ottamaan huomioon. Tämän tyyppisiä malleja ovat mm. WOFOST (van Diepen ym. 1988) ja ICECREAM (Rekolainen ja Posch 1993, Tattari ym. 2001). MACRO-mallia käytetään paljon kasvinsuojeluaineiden huuhtoutumisen laskentaan (Jarvis 1998; Jarvis ja Larsson 2001; Siimes ja Alakukku 2008), mutta mallista puuttuu kasvien kasvun osamalli ja kasvuston ottaman tyypin määrän laskenta, joten MACRO-mallia ei myöskään esitellä tässä luvussa. Kaikkien tarkasteluun otettavien mallien on myös pystyttävä takaisinkytkennän mallintamiseen (ks. Tietoruutu 13.1).

Tässä luvussa esitellään yleisellä tasolla myös kaikki osamallit, joita tarvitaan arvioitaessa pellon vesi- ja ravinnetalouden säädön vaikutus salaojavaluntaan, viljakasvien kasvuun ja ravinteiden huuhtoutumiseen. Mallien soveltamismahdollisuuksia käydään läpi laskentaesimerkein ja luvun lopussa tehdään arvio siitä, miten mallien käyttö tulee kehittymään seuraavan vuosikymmenen aikana. Luvun lopussa pohditaan mahdollisuutta muuttaa pellon vesi- ja ravinnetalouden säätö optimointiongelmaksi, jossa minimoidaan levillä käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma.

13.2 Pellon vesi- ja ravinnetalouden laskentamallien esittely

Maavesien liike

Pohjois-Carolinan yliopiston professori R. Wayne Skaggs oli kehityksen edelläkävijä Yhdysvalloissa ja hän laati ensimmäisen version laajasti tunnetusta DRAINMOD-mallistaan vuonna 1978 (Skaggs 1978 ja 1980). Vastaavan eurooppalaisen mallin ensimmäinen

versio, SWATR, kehitettiin Hollannissa ja Puolassa samoihin aikoihin (Feddes ym. 1978). DRAINMOD-mallissa ja SWATR-mallissa valittiin erilaiset lähestymistavat maavesien virtausten laskentaan. Toinen keskeinen ero mallien välillä oli se, miten maan kosteuspi-toisuus ja pohjavedenpinnan syvyys vaikuttavat viljakasvien satoon.

Hollannissa ja Puolassa – ja myöhemmin sekä Ruotsissa että Suomessa – kehitetyissä malleissa maavesien liike lasketaan Tietoruudussa 3.6 esitetyllä Richardsin yhtälöllä. Kyse on ns. osittaisdifferentiaaliyhtälöstä, jonka ratkaiseminen tuli mahdolliseksi vasta tietokoneiden myötä.

Ensimmäiset maankosteuden laskentaan tarkoitetut sovellutukset tehtiin 1970-luvun alussa. Näistä malleista kehitettiin myöhemmin salaojituksen suunnitteluun tarkoitetut sovel-lutukset. Ruotsissa ensimmäiset maavesien laskentaan tarkoitetut sovellutukset tehtiin SOIL-mallilla (Jansson 1980) ja vastaavan suomalaisen mallin esitteli Vakkilainen (1982). Sala-ojakeskuksessa kehitettiin vuosina 1985–1988 salaojituksen suunnittelun apuvälineeksi tie-tokonemalli (Karvonen 1988). Kolmessa viimeksi mainitussa sovellutuksessa vesien liikettä kuvaava malli oli lähes samanlainen kuin SWATR-mallissa. Richardsin yhtälön ratkaisuna saadaan laskettua ajan suhteen muuttuvina suureina veden virtaus salaojista, sekä kosteuspi-

Tietoruutu 13.1

Mitä mallintamisen yhteydessä tarkoitetaan takaisinkytkennällä?

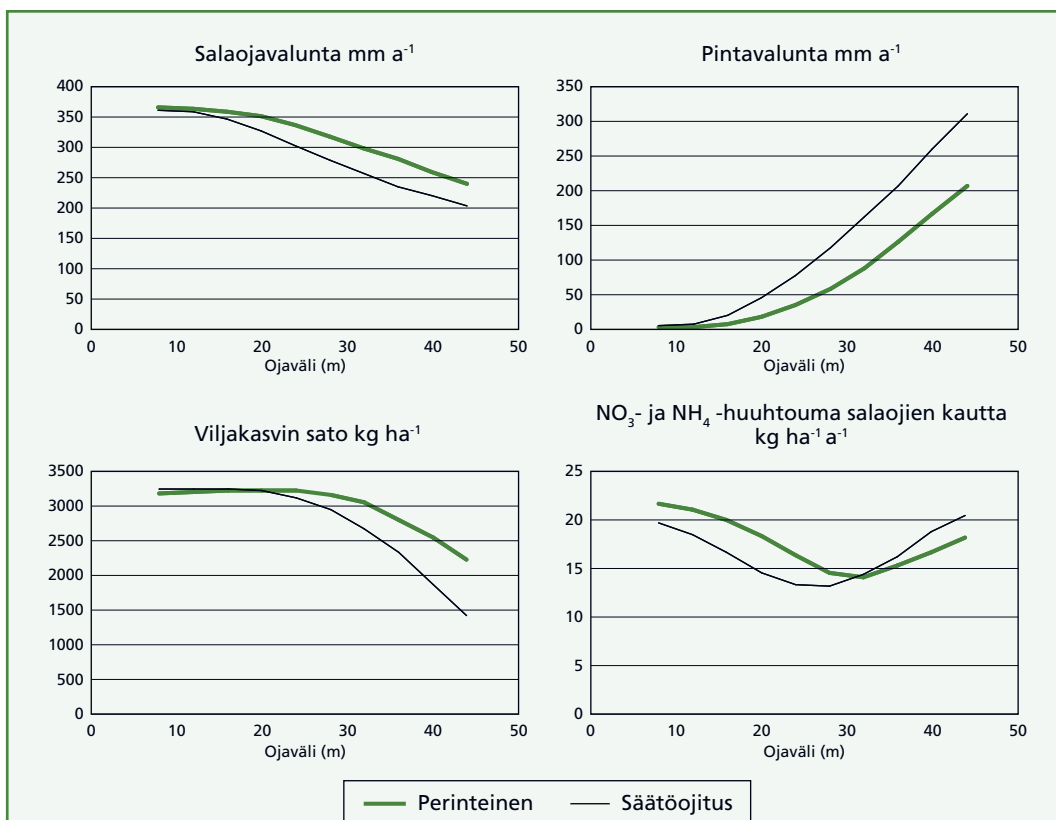
Pellon vesitalous ja sen mahdollinen säätö, lannoitus, kasvien kasvu ja ravinteiden otto sekä ravinteiden huuhtoutuminen ovat hyvin tiukasti yhteydessä toisiinsa ja yhden tekijän muut-tuminen vaikuttaa useimmin kaikkiin pellon vesi- ja ravinnetaseiden komponentteihin. Asi-oiden syy- ja seurausyhteyksien mallintaminen edellyttää, että käytetty laskentamalli osaa automaattisesti ottaa huomioon jonkin tekijän, esimerkiksi liian korkean pohjavedenpinnan, vaikutuksen kasvien kasvuun, ravinteiden ottoon ja huuhtoutumiseen.

Takaisinkytkennän periaate selviää tarkastelemalla kuvan T13.1 tuloksia. Ojavälin kasvat-taminen johtaa salaojavalunnan pienenemiseen ja pintavalunnan kasvuun. Pintavalunnan kasvu puolestaan tarkoittaa käytännössä sitä, että kasvi kärsii ainakin ajoittain hapen puut-teesta ja kasvaa huonommin. Takaisinkytkennällä tarkoitetaan esimerkissä sitä, että pohja-vedenpinnan korkeus vaikuttaa haihduntaan, haihdunta vaikuttaa kasvien kasvuun, kasvien heikentynyt kasvu pienentää haihduntaa, mikä puolestaan pyrkii edelleen nostamaan poh-javedenpintaa jne. Esimerkissä salaojien kautta tapahtuvalla nitraatti- ja ammoniumtypen huuhtoumalla on selkeä minimikohta, joka perinteisessä salaojituksessa saavutetaan ojavä-lillä 32–33 m ja säätöojituksessa ojavälillä 26–27 m. Näillä ojaväleillä viljakasvien sato on vielä melko lähellä maksimiaan. Sadon muodostumisen kannalta optimaalinen ojaväli olisi esimerk-kitapauksessa selvästi pienempi eli noin 20 m. Ojavälin kasvattaminen huuhtouman kannalta parhaasta mahdollisesta arvosta pienentää salaojien kautta tapahtuvan valunnan määrää. Loogisesti ajatellen salaojien kautta tapahtuvan huuhtouman pitäisi vastaavasti pienentyä, kun valunta pienenee. Tulosten mukaan käy kuitenkin niin, että pohjavedenpinta nousee liian lähelle maanpintaa, kun ojaväli on liian suuri. Seurauksena on kasvien kasvun heiken-tyminen ja sitä kautta typen oton pieneneminen, mikä aiheuttaa sen, että liukoista typpeä on enemmän alttiina huuhtoutumiselle. Monimutkaisen takaisinkytkennän kautta liukoisen typen huuhtouma alkaa mallin kukaan kasvaa kun ojaväli ylittää 35 m perinteisessä ojituk-sessa tai noin 30 m säätöojituksessa. On huomattava, että kyseessä on laskentaesimerkki, jolla osoitetaan se, kuinka oleellista takaisinkytkennän mallintaminen on. Tuloksia ei voi yleistää koskemaan kaikkia hietamaita.



toisuuden jakaantuminen pystysuunnassa. Maaprofiili jaetaan vertikaalisuunnassa esim. 5–20 cm:n paksuisiin kerroksiin ja jokaiselle kerrokselle lasketaan erikseen vesipitoisuus. Laskennan edetessä kosteusprofiili muuttuu sen mukaan, kuinka paljon sadantaa tulee ja mikä on kasvien haihduttama vesimäärä eli transpiraatio ja paljonko vettä poistuu salaojien kautta.

Alkuperäinen DRAINMOD ei sen sijaan laske maan kosteusprofiilia ollenkaan, vaan pitää kirjaa siitä, kuinka paljon pohjavedenpinnan yläpuolella on vapaata huokostilavuutta. Malli olettaa, että sateen jälkeen maaprofiili asettuu välittömästi ns. hydrauliseen tasapainotilaan (ks. Luku 3). Richardsin yhtälöä käytettäessä veden kulkeutuminen maan pinnalta pohjaveteen kestää maalajista riippuen muutamasta tunnista muutamaa päivään, mutta DRAINMOD-mallissa osa vedestä kulkeutuu pohjavedenpintaan heti sateen jälkeen, eli sadanta jaetaan välittömästi koko pohjavedenpinnan yläpuoliseen maaprofiiliin. Sadanta nostaa pohjavedenpinnan korkeutta, jos haihdunnan ja salaojiin menevän vesimäärän summa on pienempi kuin sadanta. Teoreettisesti ajatellen DRAINMOD-mallin oletus on väärä: luonnossa vesi ei saavuta tasapainotilaa käytännössä koskaan. Oleellista kuitenkin on, että mallin oletus on hyvin lähellä totuutta silloin, kun pohjavedenpinta on riittävän lähellä maanpintaa – arviolta 1,0–1,5 m – ja maalaji on riittävän hyvin vettä läpäisevää.



Kuva T13.1 Salaojien välisen etäisyyden ja salaojitustavan (tavanomainen tai säätöojitus) vaikutus salaojavaluntaan, pintavaluntaan, viljakasvin satoon ja liukoisen nitraatin huuhtoutumiseen. Esimerkkinä hietamaa, jossa pohjamaan K-arvo on $0,4 \text{ m d}^{-1}$, typpilannoitus on $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, fosforilannoitus $15 \text{ kg P ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ja kevätvehnän tavoitteellisenä satotasona on noin 3500 kg ha^{-1} . Tulokset ovat CropWatNP-mallilla laskettuja 20 vuoden tarkastelujakson keskiarvoja.

Makrohuokosten vaikutusten mallintaminen

1980-luvulla makrohuokosten merkitystä veden liikkeisiin ei tiedostettu vielä tarpeeksi hyvin, eikä yksikään edellä mainituista malleista ottanut huomioon sitä, että esim. savimailla erityyppisten isojen huokosten kuten madonreikien ja juurikanavien vaikutus salaojavalunnan muodostumisessa on keskeinen (ks. Tietoruutu 4.12). Mallien rakennetta tutkimalla voi huomata, että DRAINMOD ottaa epäsuorasti makrohuokosten vaikutuksen huomioon, ja sopii siten myös maalajeille, joissa isojen huokosten vaikutus on merkittävä. DRAINMOD-malliin ei siis ole tarvinnut lisätä erikseen makrohuokosten vaikutusta kuvaavaa osamallia.

Makrohuokosten kautta tapahtuvalla virtauksella on iso rooli salaojavalunnan muodostumisessa esim. savimailla mutta erityisen suuri merkitys oikovirtauksilla on ravinteiden ja torjunta-aineiden kulkeutumisen laskennassa (ks. kohta 4.3, kuvat 4.11–4.13). Tämä on pakottanut eurooppalaiset mallien kehittäjät uudistamaan simulointimallien rakenteen niin, että malleissa voidaan erotella maamatriisin ja makrohuokosten kautta kulkevien vesien ja ravinteiden määrä. SWATR-mallin uusi versio on nimeltään SWAP (van Dam ym. 1997; van Dam 2000), SOIL-mallin seuraaja puolestaan on COUP-malli (Jansson ja Karlberg 2005) ja Salaojakeskuksessa kehitetyn mallin nimi on nykyään CROPWATNP (Karvonen ja Kleemola 1995; mallin uusimman version kuvaus tässä luvussa). Kaikissa kolmessa mallissa on mahdollisuus jakaa huokostilavuus kahteen osaan: maamatriisi ja makrohuokokset. CROPWATNP-mallissa käytetty tapa on kuvattu Tietoruudussa T13.2. Vastaavaa menetelmää oikovirtausten laskentaan on käyttänyt Suomen olosuhteissa Warsta (2007). Tietoruudussa 13.3 on esitetty prosessipohjainen hydrologinen tietokonemalli FLUSH. Mallin ensimmäinen versio julkaistiin väitöskirjatyönä (Warsta 2011).

Miten mallinnetaan pellon vesitalouden vaikutus kasvien kasvuun?

Kuivatuksen vaikutus viljakasvien satoon saadaan malleissa laskettua kasvien käyttämän vesimäärän perusteella. Mitä enemmän kasvi haihduttaa, sitä suuremman osan ajasta lehtien ilmaraut ovat auki ja sitä enemmän hiilidioksidia kasvi pystyy ottamaan eli sitä paremmin kasvi kasvaa. Jos maaprofiili on liian kuiva, transpiraatio pienenee tai lakkaa kokonaan ja kasvi joutuu ainakin osittain sulkemaan ilmarakojaan, jolloin kasvu hidastuu tai pysähtyy. Salaojituksen vaikutus tässä systeemissä näkyy siten, että liian pieni ojaväli tai liian suuri ojasyvyys saattavat kuivattaa maata liian tehokkaasti, jolloin kasvu hidastuu. Jos ojaväli on liian suuri, pohjavedenpinta nousee rankkasateiden jälkeen hyvin lähelle maanpintaa ja kasvu hidastuu siitä syystä, että kasvien juuret eivät saa happea. Juuret kuolevat ja kasvu pysähtyy, jos hapeton tilanne jatkuu liian pitkän ajan. Kasvilajista riippuen tämä aika on muutamasta päivästä arviolta viikkoon. Suomen oloissa salaojituksen ehkä keskeisin vaikutus on kuitenkin se, että ojituksen avulla pellot saadaan keväällä kylvökuntoon riittävän aikaisin. Lyhyen kasvukauden kaikki päivät on hyödynnettävä.

DRAINMOD-mallissa sekä kuivuuden että liian korkean pohjavedenpinnan vaikutus otetaan huomioon laajoihin kenttäkokeisiin perustuvilla regressioyhtälöillä. Kuivuuden suhteen lasketaan todellisen ja potentiaalisen haihdunnan suhdetta ja sen vaikutus satoon saadaan kaavoista, jotka ovat viljakasvikohtaisia ja sidoksissa niihin ilmasto-olosuhteisiin, joissa kaavojen taustalla olevat kenttäkokeet on tehty. Siitä syystä DRAINMOD-mallia ei voi suoraan käyttää Suomen olosuhteissa arvioitaessa kuivuuden vaikutusta viljakasvien satoon. Puutteellisen kuivatuksen vaikutus otetaan DRAINMOD-mallissa huomioon ns. SEW30-indeksillä, joka kuvaa sitä kuinka pitkän aikaa pohjavedenpinta on lähempänä maanpintaa kuin 30 cm. Mitä kauemmin pohjavesi pysyy lähellä maanpintaa, sitä suurempi on SEW30-luku. Tämän indeksin yhteys viljakasvien satoon saadaan myös pitkäaikaisen kenttäkokeiden perusteella laadituista regressioyhtälöistä. Näitäkään kokeita ei ole

Tietoruutu 13.2

Makrohuokosten vaikutuksen mallintaminen

Makrohuokosten vaikutuksen mallintaminen voidaan tehdä laskemalla veden ja aineiden liike kahdessa rinnakkaisessa huokossysteemissä (maamatriisi ja makrohuokoset) siten, että sallitaan veden ja aineiden vaihto em. huokossysteemien välillä. Veden liike lasketaan molemmille huokossysteemeille erikseen Tietoruudussa 3.6 esitetyllä maaveden virtausyhtälöllä (esim. Gerke ja van Genuchten 1993; Chittinjan ym. 1997; Simunek ym. 2003; Warsta 2007)

$$C_m(h_m) \frac{\partial h_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_m(h_m) \left(\frac{\partial h_m}{\partial z} - 1 \right) \right] - S_m(h_m) - q_{D,m} + \frac{\Gamma}{1 - f_m} \quad (T13.1)$$

$$C_M(h_M) \frac{\partial h_M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_M(h_M) \left(\frac{\partial h_M}{\partial z} - 1 \right) \right] - S_M(h_M) - q_{D,M} - \frac{\Gamma}{f_M} \quad (T13.2)$$

missä merkinnät ovat samat kuin Tietoruudussa 3.6, mutta lisäksi mukana on salaojavalunta maamatriisiin ($q_{D,m}$) ja makrohuokosten ($q_{D,M}$) kautta, sekä veden vaihtoa kuvaava termi Γ (d^{-1}) ja makrohuokosten tilavuusosuus f_M . Kaavojen alaindeksi m viittaa maamatriisiin ja M makrohuokosiin. Vaihtotermi Γ voidaan yksinkertaisesti esittää seuraavasti:

$$\Gamma = \alpha_{m,M} K_{m,M} (h_M - h_m) \quad (T13.3)$$

missä $\alpha_{m,M}$ (m^{-2}) on kalibroitava parametri, joka kuvaa veden vaihdon nopeutta, $K_{m,M}$ ($m \cdot d^{-1}$) on hydraulinen johtavuus kahden huokoston rajapinnassa (esim. $K_m(h_m)$:n ja $K_M(h_M)$:n keskiarvo). Kaavan (T13.3) mukaan vesi liikkuu makrohuokosesta maamatriisiin, jos $h_M > h_m$, ja päinvastaisessa tapauksessa vesi ja siihen liuenneet aineet siirtyvät maamatriisista makrohuokoseen.

Maamatriisille ja makrohuokosille on annettava omat van Genuchtenin (1980) mallin mukaiset pF-käyrät (ks. kuva 3.28), vedellä kyllästyneen maan vedenläpäisevyys K_s ja vedellä kyllästymättömän maan hydraulinen johtavuus $K(h)$ (ks. Tietoruutu 3.8). Alkutilanteen arvona voi olla hydraulinen tasapainotila niin, että pohjavedenpinnan syvyys annetaan lähtötietona. Yläpuolisena reunaehtona annetaan sadanta ja potentiaalinen haihdunta (ks. Tietoruutu 3.4) ja alapuolisena reunaehtona on Hooghoudtin kaavalla (ks. Luku 7) laskettu virtaus salaojiin. Sen lisäksi on mahdollista antaa ylimääräisenä reunaehtona virtaus syvempiin pohjavesikerrokseen tai veden vaakasuuntainen virtaus suoraan valtaojiin. Valtaojien padottava vaikutus on myös mahdollista huomioida.

Aineiden liikkuminen lasketaan erikseen maamatriisissa ja makrohuokosissa ja aineiden vaihtoa tapahtuu sekä veden virtauksen mukana että diffuusion/dispersion vaikutuksesta (Simunek ym. 2003).

$$R_m \frac{\partial C_m}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - v_m \frac{\partial C_m}{\partial z} - k_b C_m + F_A - U_C - q_{D,m} C_m - \frac{\Gamma_s}{1 - f_m} \quad (T13.4)$$

$$R_M \frac{\partial C_M}{\partial t} = D_M \frac{\partial^2 C_M}{\partial z^2} - v_M \frac{\partial C_M}{\partial z} - k_b C_M - q_{D,M} C_M - \frac{\Gamma_s}{f_M} \quad (T13.5)$$

$$\Gamma_s = \alpha_s (C_M - C_m) + C^* \Gamma \quad (C^* = C_M \text{ kun } \Gamma > 0 \text{ ja } C^* = C_m \text{ kun } \Gamma < 0) \quad (T13.6)$$

missä α_s on empiirinen massansiirtokerroin (d^{-1}).

Tietoruutu 13.3

FLUSH-malli

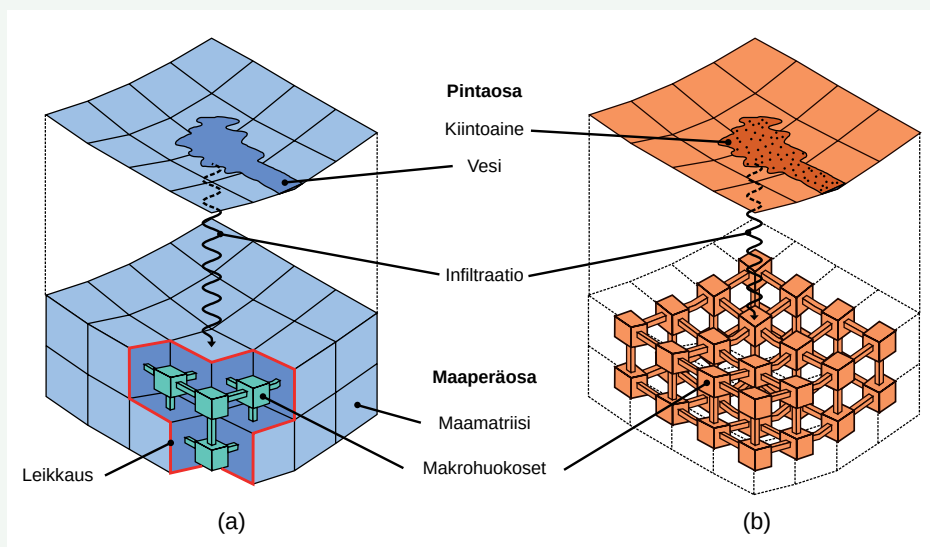
Lassi Warsta

FLUSH on avoimen lähdekoodin (MIT-lisenssi), prosessipohjainen hydrologinen tietokone-malli, joka on kehitetty etenkin rakenteellisten maiden kuten savien kuvaamiseen. Mallin ensimmäinen versio julkaistiin väitöskirjatyönä Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulussa (Warsta 2011) ja sen esikuvina toimivat Vakkilaisen (1982) ja Karvosen (1988) esittelemät laskentamallit. FLUSHilla voi kuvata veden liikkeitä, lumipeitettä ja lämmön kulkeutumista, eroosiota sekä aineiden liikkeitä rakenteellisissa maissa kuten savissa. Simulaatioissa voi tarkastella useiden erillisten kuivatusjärjestelmien, jotka koostuvat avo- ja salaojista, vaikutusta maan vesitalouteen (Turunen ym. 2013). FLUSH-simulaatioissa tutkittava alue hajotetaan yksikulotteisista pätkistä koostuvaan uomaverkostoon, kaksikulotteiseen maan pintaosaan ja kolmiulotteiseen maaperäosaan (Warsta ym. 2013a; Haahti ym. 2016). Maaperän huokostilavuus jaetaan edelleen pieniin (maamatriisi) ja suuriin huokosiin (makrohuokokset), mikä mahdollistaa hitaiden ja nopeiden virtaus- ja kulkeutumisprosessien samanaikaisen kuvaamisen.

Pintavirtailua maan pinnalla simuloidaan mallissa diffuusioaaltomenetelmällä. Veden virtausta maaperässä kuvataan Richardsin yhtälöllä sekä matriisi- että makrohuokossysteemeissä (Tietoruudut 3.6 ja 13.2). Veden vaihto matriisiin ja makrohuokosten välillä lasketaan vallitsevan hydraulisen paineron funktiona (esim. Gerke ja Van Genuchten 1993). Maan kyllästymätön vesipitoisuus ja hydraulinen johtavuus ratkaistaan van Genuchtenin (1980) kuvaavilla funktioilla (Tietoruutu 3.8). Lumipeitettä simuloidaan Koivusalo ym. (2001) esittelemällä kaksikerroksisella energiataseeseen perustuvalla mallilla, ja lämmönkulkeutumista maaperässä ja maan jäätymistä muunnetulla konvektio-diffuusioyhtälöllä (esim. Karvonen 1988). Eroosiota maan pinnalla simuloidaan sedimentin jatkuvuusyhtälöllä, johon on kytketty hydraulisen ja sadepisaraeroosion sekä virtauksen kuljetuskapasiteetin kuvaukset (Tietoruudut 4.13, 4.14 ja 13.9) (Taskinen ja Bruen 2007). FLUSH on yksi harvoista malleista, joilla voidaan kuvata suspendoituneen kiintoaineen kulkeutumista pellon pinnalta salaojiin makrohuokosia pitkin (Kuva T13.2) (Warsta ym. 2013b), mikä mahdollistaa kokonaiskiintoainekuormituksen laskemisen salaojitetuilla pelloilla. Malliin on kehitetty myös aineiden kulkeutumista kuvaava malli, jolla voidaan simuloida aineiden kulkeutumista maamatriisissa ja makrohuokosissa kahden yhteen kytketyn advektio-dispersio yhtälön avulla (Tietoruudut 4.8 ja 4.9) (Salo ym. 2015). Ainemallilla voidaan kuvata myös useiden aineiden muodostamia reaktioketjuja sekä aineiden pidentymistä maapartikkeleihin (Tietoruudut 4.10, 4.11 ja 4.15). Saven kutistumisprosesseja ja vaikutuksia maan hydraulisiin ominaisuuksiin simuloidaan SWAP-mallista (van Dam ym. 2008) johdetulla menetelmällä. FLUSHiin on yhdistetty Saint Venantin yhtälöihin perustuva avouomaverkostomalli (Haahti ym. 2016), joka mahdollistaa mallin soveltamisen pienille valuma-alueille.

FLUSH-simulaatioissa tutkitun alueen pintaosa jaetaan laskentaverkolla nelikulmion muotoisiin ja maaperäosa heksahedrin muotoisiin laskentaelementteihin (Kuva T13.2), joiden välillä virtaus- ja kulkeutumisprosessit lasketaan. Virtausta ja kulkeutumista kuvaavat osittaisdifferentiaaliyhtälöt ratkaistaan laskentaverkossa kontrollitilavuusmenetelmällä, ja käytetyt implisiittiset, iteratiiviset menetelmät mahdollistavat stabiilit numeeriset ratkaisut simulaatioissa (Warsta 2011). Mallin laskenta on rinnakaistettu Message Passing Interface -rajapinnan avulla, mikä mahdollistaa mallin ajamisen laskentaklustereissa ja supertietokoneissa. Sovelluksissa käytetään tyypillisesti aika-askelia, jotka vaihtelevat välillä 1 h ja 3,5 s. Laskentasuojen horisontaalinen pinta-ala on vaihdellut tutkimuksissa 4 m² ja 0,4 ha välillä, kun taas suojen vertikaalinen paksuus on ollut 0,01–0,5 m. Simuloitujen alueiden koot ovat vaihdelleet laboratoriomittakaavasta noin 20 ha laajuisiin viljapeltoihin. Simulaatioiden pituudet ovat olleet pisimmillään viisi vuotta.

FLUSH-mallia on kehitetty edelleen ja sovellettu Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi (PVO2) ja Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA) hankkeissa (Salo ym. 2015; Turunen ym. 2013; 2015; Äijö ym. 2014), ja sillä on tutkittu koepeltojen vesitaseita, salaojitusten toimintaa sekä typen prosesseja. Mallin avulla voitiin sitoa yhteen mitatut meteorologiset muuttujat kuten sadanta, mitattuihin hydrologisiin muuttujiin kuten pinta- ja salaojavalunta, pohjaveden pinnankorkeudet sekä maan kosteudet, ja näin tarkastella mittauksen luotettavuutta. Mallilla laskettiin ympärivuotiset vesitaseet sekä Nummellan tilan (Jokioinen) että Gårdskulla Gården (Siuntio) salaojitetuille savipelloille. Pelloilta mitattujen suureiden avulla mallilla ratkaistiin vaikeasti mitattavien haihdunnan, pohjavesivalunnan ja varaston muutoksen osuudet vesitaseissa. Simulaatioiden onnistumisen kannalta mallin oleellisia prosesseja savimaissa olivat lateraaliset virtaukset, talviprosessit sekä kaksoishuokoskuvaus. Malliin integroidulla aineiden kulkeutumiskomponentilla tutkittiin typen kulkeutumista ja kuormaa syyskausina Nummellan pellolla. Mallilla simuloitiin ammoniumtypen mineralisaatiota, ammoniumtypen nitrifioitumista nitraattitypeksi ja nitraattitypen muuttumista typpi-kaasuksi denitrifikaation kautta.



Kuva T13.2 Konseptuaalinen kuva tutkittavan alueen jakamisesta laskennallisiin osiin a) veden virtauksen ja b) kiintoaineen kulkeutumisen laskennassa FLUSH-mallissa.

tehty riittävästi Suomen olosuhteissa, joten tämä on toinen tekijä, joka vaikeuttaa DRAIN-MOD-mallin käyttöä kuivatuksen suunnittelun apuvälineenä Suomessa.

Kaikissa tässä luvussa mainituissa eurooppalaisissa malleissa (SWAP, COUP ja CROP-WATNP) kasvien fotosynteesi lasketaan kasvuston absorboiman säteilyn avulla. Tarkastelutapa on kuvattu Tietoruudussa 13.4. Kuivuuden vaikutus lasketaan todellisen ja potentiaalisen haihdunnan suhteen avulla ja märän maan vaikutus otetaan huomioon Feddesin ym. (1978) esittämällä menetelmällä, joka perustuu maaveden matrikpotentiaalin (paine-potentiaalin) h_t arvoon juuristokerroksessa. Jos matrikpotentiaali on liian suuri (pohjavesi liian lähellä maanpintaa) kasvi kärsii hapenpuutteesta ja haihdunta pienenee. Tutkimusten mukaan kriittinen matrikpotentiaali on noin -0,3–0,5 m.

Tietoruutu 13.4

Viljakasvien kasvun mallintaminen

Kasvien kasvu ja vedenkäyttö (transpiraatio) ovat suorassa suhteessa toisiinsa. Kasvin haihduttaessa vettä ilmaraot aukeavat ja vesihöyryn poistuessa kasvi saa ”tilalle” hiilidioksidia, joka on yhteyttämisen perusedellytys. Kasvien kasvun ja haihdunnan mallintaminen (ks. Tietoruutu 3.4) perustuvat suurelta osin samoihin lähtötietoihin, joista tärkeimmät ovat ilman lämpötila, säteily, tuulen nopeus ja ilman suhteellinen kosteus.

Viljakasvin kasvun mallintamisessa on kaksi päälähestymistapaa: 1) suoraan haihdunnan avulla kuten Tietoruudussa 3.3 on esitetty tai 2) kasvuston absorboivan säteilymäärän avulla (Spitters 1986). Molemmat lähestymistavat antavat käytännössä saman tuloksen, sillä haihdunta on suoraan yhteydessä käytettävissä olevaan nettosäteilyyn, joka puolestaan on oleellisesti sidoksissa auringon kokonaissäteilyn kanssa.

Säteilyyn perustuissa satomalleissa päivittäinen kasvu G (kg DM ha⁻¹ d⁻¹) lasketaan seuraavasti (Aslyng ja Hansen 1982; Kleemola 1990; Karvonen ja Kleemola 1995):

$$G = f_{HA} E_{RAD} f_{LAI} 0.48 R_S \text{MIN}(f_T, f_W, f_N, f_P) \quad (T13.7)$$

$$f_{LAI} = (1 - e^{-k_E LAI}) \quad (T13.8)$$

missä f_{HA} on muunnoskerroin yksiköstä g m⁻² yksikköön kg ha⁻¹ (=10), E_{RAD} on kasvilajikohtainen säteilyn hyväksikäyttökerroin (g DM MJ⁻¹ m⁻²), f_{LAI} on kerroin, jolla otetaan huomioon kuinka suuren osan tulevasta kokonaissäteilystä kasvusto pystyy ottamaan, LAI on lehtialaindeksi (m² m⁻²), k_E on säteilyn vaimenemiskerroin kasvustossa (0,6..0,7), 0,48 on fotosynteesistä aktiivisen PAR-säteilyn osuus kokonaissäteilystä, f_T on ilman lämpötilan, f_W on maan kosteuden, f_N on lehtien typpipitoisuuden ja f_P on lehtien fosforipitoisuuden suhteellinen vaikutus fotosynteesiin. Termi MIN() etsii pienimmän arvon suhteellisista kertoimista f_T , f_W , f_N ja f_P , joiden kaikkien arvo vaihtelee välillä 0..1,0. Kyseessä on siis kasvun minimitekijä, joka voi vaihtua päivästä toiseen.

Useimmissa kasvomalleissa lasketaan erikseen lehtien, varsien, juurien ja jyvien (mukuloiden) kuiva-ainemäärät. Lehtien biomassan perusteella on mahdollista arvioida lehtialaindeksi LAI, jota tarvitaan kaavoissa (T13.7) ja (T13.8). Satomalleissa päivittäinen kasvu jaetaan lehtien, varsien ja jyvien biomassan kesken joko ns. allokaatioparametrien avulla tai käyttämällä hyväksi epäsuoria menetelmiä, joissa annetaan lähtötietoina kasvuvaiheen funktiona kunkin kasvin osan suhteellinen osuus koko maanpäällisestä biomassasta (de Wit ym. 1978; van Keulen 1986; Karvonen ja Kleemola 1995; Jansson ja Karlberg 2005).

Maaperän typen kierron ja kasvien typen oton mallintaminen

Typen kierron mallintaminen lähti alun perin liikkeelle tavoitteesta suunnitella lannoitus tarkemmin (mm. van Keulen 1986). Myöhemmin tarkastelu laajeni kattamaan myös ravinteiden huuhtoutumisen ja pellon vesitalouden säädön vaikutuksen ravinnetaseisiin. DRAINMOD-mallin yhteyteen kehitettiin nitraatin huuhtouman ja denitrifikaation ennustava osamalli DRAINMOD-N (Brevé 1994; Brevé ym. 1997) ja myöhemmin paljon monipuolisempi DRAINMOD-NII (Youssef ym. 2005 ja 2006), jolla pystytään laskemaan myös ammoniumin huuhtoutuminen ja arvioimaan maaperän orgaanisen typen vaikutus ravin-

Tietoruutu 13.5

Maaperän typen kierron ja kasvien typen oton mallintaminen

Maaperän typen kierto on kuvattu Luvussa 4. Maan typen kiertoa kuvaavassa mallissa on useimmiten mukana ainakin kolme typpivarastoa: maan orgaaniseen ainekseen sitoutunut tyyppi (N_{ORG}), sekä typen vesiliukoiset fraktiot eli ammoniumtyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$) ja nitraattityppi ($\text{NO}_3\text{-N}$). Useissa malleissa orgaanisen typen varasto on jaettu useampaan osaan, eli nopeasti hajoava ja hitaasti hajoava aines.

Orgaanisen aineksen hajotessa siihen sitoutunut tyyppi vapautuu maaveteen ammoniumionina prosessissa, jota kutsutaan mineralisaatioksi. Mineralisaation suuruusluokka on Suomessa tehtyjen kenttäkokeiden mukaan ollut noin 30-100 kg ha⁻¹ a⁻¹. Orgaanisen aineen hajoamiseen vaikuttavat käytettävissä olevien varastojen lisäksi myös maan lämpötila ja maan kosteus. Mineralisaatio on nopeampaa lämpimässä ja kuivassa maassa. Pellon vesitalouden säädöllä voidaan vaikuttaa mineralisaation määrään (liian märässä maassa mineralisaatio hidastuu).

Orgaanisen aineen hajoamisessa vapautuva ammoniumtyppi voi pidäytyä maahiukkasten pintojen vapaina oleviin negatiivisiin varauspaikkoihin ja tätä prosessia voidaan matemaattisesti kuvata adsorptioisotermin avulla (ks. Tietoruutu 4.10). Jakaantumiskertoimen K_d arvo vaihtelee useimmiten välillä 2-4 l kg⁻¹. Ammoniumin pidäytyminen maahiukkasten pinnoille hidastaa sen kulkeutumista maaprofiilissa kuten kuvissa (4.9) ja (4.10) on esitetty.

Liukoinen ammonium muuttuu mikrobitoiminnan seurauksena nitraatiksi prosessissa, josta käytetään nimeä nitrifikaatio. Nitrifikaatio toimii tehokkaimmin kuivassa ja lämpimässä maassa, joten pellon vesitalouden säädöllä voidaan vaikuttaa myös tämän prosessin nopeuteen. Liukoinen nitraatti voi puolestaan haihtua ilmaan kaasuna denitrifikaatiossa, jota tapahtuu voimakkaimmin hapettomissa olosuhteissa. Tämänkin prosessin nopeuteen voidaan vaikuttaa pellon vesitalouden säädöllä.

Kasvit ottavat typeä sekä nitraatti- että ammoniummuodossa. Kasvien ottaman typen määrään vaikuttavat maaperässä käytettävissä olevien $\text{NO}_3\text{-N}$ - ja $\text{NH}_4\text{-N}$ -varastojen lisäksi myös kasvien typen tarve ja maaperän lämpötila (ks. kuva 3.14). Kasvien typen tarve määräytyy malleissa useimmin sen mukaan kuinka paljon kasvien siihen mennessä ottama typpimäärä jää alle tavoitetason. Tavoitetaso saadaan antamalla kasvuvaiheeseen sidottu ”optimaalinen” typpipitoisuus eri kasvin osille (lehdet, varret ja jyvät/mukulat). Mallit laskevat koko ajan kussakin kasviosassa olevan typen määrän ja typpipitoisuuden ja vertaavat näitä arvoja optimitilanteen typpimääriin (erotus on kasvin typen tarve). Typen oton mallintamisessa otetaan huomioon se että suljetun kasvuston typen oton maksimi ei yleensä ole suurempi kuin 5 kg ha⁻¹ d⁻¹ (van Keulen 1986).

netaseisiin. SOIL-mallin ympärille kehitettiin ensin SOILN-malli (Eckersten ym. 1995) ja myöhemmin SOIL- ja SOILN-mallit yhdistettiin COUP-malliksi (Jansson ja Karlberg 2005). COUP-mallissa on erittäin monipuolinen typen kiertoa kuvaava osamalli. CROPWATN-malliin lisättiin myös typen kierron osamalli (Karvonen ja Kleemola 1995; Kleemola ja Karvonen 1996; Kleemola ym. 1996 ja 1998). Tyypillinen typen kierron ja kasvuston typen oton osamalli on kuvattu Tietoruudussa 13.5. Typen liikkuminen maaperässä lasketaan kahdessa huokossysteemissä Tietoruudun 13.2 esittämällä mallilla niin, että nitraatin ja ammoniumin kulkeutuminen lasketaan erikseen.

Maaperän fosforin kierron ja kasvien fosforin oton mallintaminen

CROPWATNP-mallissa on mukana myös maaperän fosforin kiertoa ja kasvien fosforin ottoa kuvaavat osamallit. Fosforin osamalli perustuu kasvien kasvun osalta ns. Redfieldin N:P-suhteen käyttöön (ks. Tietoruutu 13.6). Redfieldin N:P-suhdetta on mahdollista käyttää arvioitaessa kasvin fosforin tarvetta, lehtien fosforipitoisuuden vaikutusta fotosynteesiin, orgaanisen aineen mineralisaatiossa vapautuvan fosfaattifosforin määrää sekä laskettaessa leville käyttökelpoisen huuhtouman suuruutta.

Tietoruutu 13.6

Redfieldin C:N:P-suhteiden hyödyntäminen viljakasvien kasvun ja ravinteiden oton mallintamisessa

Amerikkalainen meritieteilijä A.C. Redfield analysoi 1920- ja 30-luvuilla useita tuhansia merestä otettuja biomassanäytteitä ja havaitsi tutkimuksissaan, että hiilen, typen ja fosforin suhteet olivat hämmästyttävän stabiilit eri puolilta maapalloa otetuissa näytteissä: C:N:P=106:16:1 (mooleina) ja C:N:P=41:7.2:1 (massoina). Tietyn hiilimäärän tuottamiseen tarvitaan merialueilla siis suunnilleen 7,2 kertaa enemmän typpeä kuin fosforia. Redfieldin suhteita käytetään hyvin paljon mm. järvien vedenlaatumalleissa, mutta niiden käyttö on ollut toistaiseksi hyvin vähäistä maatalousalan mallintamissovellutuksissa. On hyvin todennäköistä, että Redfieldin suhteet eivät ole jalostetuissa viljakasveissa yhtä stabiilit kuin esimerkiksi levien tapauksessa. Kiistämätön tosia lienee kuitenkin se, että kasvi tarvitsee kasvuunsa sekä fosforia että typpeä ja jälkimmäistä selvästi enemmän.

Kasvien kasvumalleissa tarvitaan lähtötietona viljakasvien ”optimaalinen” fosforipitoisuus kasvin eri osissa (lehdet, varret, jyvät). Typelle näitä käyriä on tehty selvästi enemmän kuin fosforille, joten malleissa on mahdollista laskea kasvin eri osien optimaalinen fosforipitoisuus yksinkertaisimmin jakamalla typpipitoisuuden optimikäyrän arvot Redfieldin N:P-suhteella eli luvulla 7,2.

Maassa olevan orgaanisen aineen hajoamisessa (mineralisaatiossa) vapautuu typpeä ja fosforia ja tässäkin tapauksessa on mahdollista arvioida vapautuvan fosforin määrä jakamalla mineralisoituneen typen määrä Redfieldin N:P-suhteella. Typpi vapautuu mineralisaatiossa ammoniumionina ja fosfori fosfaatti-ionina, joka pyrkii vapautumisen jälkeen sitoutumaan maahiukkasten pinoilla ja vain osa mineralisoituneesta fosforista tulee kasvien käyttöön.

Redfieldin N:P-suhteen kolmas soveltamismahdollisuus on pyrittäessä minimoimaan pelton vesi- ja ravinnetalouden säädön avulla leville käyttökelpoisen typpi- ja fosforihuuhtouman määrä (ks. kohta 13.4). Minimoinnin kriteerinä voidaan käyttää ns. Redfield N:P-suhteella $R_{N:P}$ painotettua huuhtoumaa H_p ($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$): $H_p = H_N + R_{N:P} H_N$ missä H_N on leville käyttökelpoisen typen huuhtouma ($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ja H_p on vastaava fosforin huuhtouma ($\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Painotettu huuhtouma ottaa huomioon sen, että yhden fosforikilon huuhtouman vaikutus levien kasvuun on suhteessa yhtä suuri kuin jos typen huuhtouma on 7,2 kg.

Maaperän fosforin kierron mallintaminen on kuvattu lyhyesti Tietoruudussa 13.7. Fosforin osalta oleellista on pystyä hyödyntämään viljavuusanalyysissä mitattavaa fosforilukua (P-luku), josta on olemassa erittäin kattavat mittaustiedot koko Suomen alueelta. Fosforiluvun käyttö CROPWATNP-mallissa on kuvattu Tietoruudussa 13.8.

Fosforin kokonaishuuhtoumasta iso osa tulee pintavalunnan mukana maapartikkeleihin sitoutuneena fosforina. Tämän fraktion mallintaminen edellyttää eroosiomallin kytkemisen mukaan pellon vesi- ja ravinnetalouden säätöä kuvaaviin malleihin. CROPWATNP:n eroosiomalli on hyvin yksinkertainen yhtälö, joka perustuu mallin laskemaan pintavalunnan määrään. Eroosioyhtälö on kuvattu Tietoruudun 13.9 kaavassa (T13.10). Pintavalunnan mukana vesistöihin huuhtoutuva partikkeleihin sitoutunut typpi ja fosfori lasketaan yhtälöillä (T13.11) ja (T13.12).

Salaojien kautta vesistöön kulkeutuvan kiintoaineen määrä ja sen mukana kulkevan partikkelifosforin määrä lasketaan Tietoruudussa 13.9 kuvatuilla kaavoilla (T13.13–T13.15). Eroosion määrän selittäjä on makrohuokosten kautta salaojiin virtaavan veden määrä $q_{D,M}$ (mm d⁻¹).

Tietoruutu 13.7

Maaperän fosforikierron ja kasvien fosforin oton mallintaminen

Maaperän fosforikiertoa on kuvattu tarkemmin Luvussa 4. Matemaattisissa malleissa tarkastellaan helppoliukoisen fosforivaraston lisäksi useampia maahiukkasten pinnoille tai orgaaniseen ainekseen pidättyneitä varastoja (esim. Yli-Halla ym. 2005). Helppoliukoisen fosforin varasto P_s (mg kg⁻¹) voidaan määrittää viljavuusanalyysin fosforiluvun (P-luvun) avulla Tietoruudussa 13.8 esitetyllä tavalla. Epäorgaaninen fosfori jaetaan yleensä helppoliukoiseen labiiliin varastoon (P_f) ja stabiiliin, niukkaliukoiseen epäorgaanisen fosforin varastoon. Orgaanisen fosforin varasto jaetaan usein ainakin kahteen osaan: helposti hajoavissa kasvin jäänteissä ja mikrobiomassassa oleva fosfori ja stabiilissa orgaanisessa aineksessa oleva fosfori.

Helposti hajoavissa kasvinjätteissä oleva fosfori vapautuu fosfaatti-ionina vastaavaan tapaan kuin ammoniumioni typen kierron yhteydessä. Tutkijoiden keskuudessakaan ei ole täyttä yksimielisyyttä siitä, kuinka suuri osa orgaanisen aineen hajoamisesta vapautuvasta fosforista on siinä muodossa, että kasvit pystyvät sitä hyödyntämään. Mineralisaatiossa vapautuva fosfaattifosfori on joka tapauksessa alttiina adsorptiolla, mikä pienentää sen käyttökelpoisuutta kasvien kannalta.

Kasvien fosforin oton mallintamista vaikeuttaa se, että maalajimme sitovat itseensä sen kasveille käyttökelpoisen liukoisen muodon - mitä happamampi maa, sitä tiukemmin. Hapamuuden lisäksi ongelmia aiheuttaa myös hienojakoinen savi, jossa on paljon fosforia sitovia Fe:n ja Al:n oksideja. Turvemaille fosforin sitoutuminen on sen sijaan heikompa. Maan ominaisuuksien lisäksi kasvien fosforin ottoa vaikeuttaa fosforin hitaus liikkuu maassa. Koska fosfori ei juuri liiku, kasvin juurien on kasvettava tiheäksi ja kattavaksi, jotta ne kykenisivät ottamaan riittävän määrän fosforia. Maan fosforiluvun lisäksi on tärkeää ottaa nykyistä paremmin huomioon maan orgaanisen aineksen pitoisuus fosforilannoituksen määrää mietittäessä. Orgaanisen aineksen läsnäolo parantaa fosforin käyttökelpoisuutta.

Laskentamalleissa fosforin tarve ja otto voidaan laskea vastaavalla periaatteella kuin typelle olettamalla, että fosforin optimipitoisuus kasvin eri osissa voidaan laskea käyttämällä apuna Redfieldin N:P-suhdetta (ks. Tietoruutu 13.5).

Pellon vesitalouden säädön mallintaminen

1990-luvulla sekä kansainväliseen että kansalliseen tietoisuuteen nostettiin käsite säätö-salaojitus (ks. luku 8). Termin otti ensimmäisenä käyttöön Yhdysvalloissa professori Skaggs tutkimusryhmineen. Kenttäkokeiden yhteydessä he ryhtyivät padottamaan vettä valtaojissa, eli he kontrolloivat pellon salaojavaluntaa pitämällä tiettyinä aikoina valtaojien vedenpinnan niin korkealla, että virtaus salaojista estyi. Tavoitteena oli ensisijaisesti lisätä viljakasvien satoa. Idea pellon vesitalouden säädöstä pitämällä pohjavedenpinta korkealla joko kaivo- tai patorakenteiden avulla ei sinänsä ole uusi. Sitä on toteutettu esim. Suomessa jo paljon ennen kuin termi säätösalaojitus otettiin käyttöön. Pellon pohjavedenpinnan nostamista tehtiin lautaputkiojitusten yhteydessä jo vuosikymmeniä sitten tavoitteena estää putkien lahoaminen. Hollannin alavilla peltoalueilla vedenpinnan säätelyä lienee tehty jo vuosisatojen ajan. Skaggsin ryhmän ansio on se, että he osoittivat mittauksen avulla, että pellon vesitalouden säädöllä on mahdollista pienentää typpihuuhtoumia ainakin Pohjois-Carolinan ilmasto-olosuhteissa parhaimmillaan jopa 50 %. Vaikutus on kolmijakoinen. Yhtäältä kasvien typen ottoa voidaan tehostaa, kun maan kosteusolosuhteet pidetään kasvien kannalta suotuisina. Toisaalta salaojavalunnat ja siten ravinnehuuhtoumat pienenevät kun haihdunta lisääntyy. Kolmas osatekijä on denitrifikaatio eli typen haihtuminen kaasuna ilmakehään. Kasvukauden ulkopuolella pohjavedenpinta pidetään korkealla, jolloin hapettomissa olosuhteissa viihtyvät bakteerit muuttavat nitraatin kaasumaiseen muotoon.

Tietoruutu 13.8

Miten viljavuusanalyysin fosforilukua voidaan hyödyntää mallintamisessa?

Maaperän fosforimallissa tarvitaan alkutilanteen arvona koko maaprofiilin helppoliukoisen fosforin arvo yksikössä mg kg^{-1} . Laskentamalleissa voidaan käyttää Siimeksen ym. (1998) kehittämää menetelmää, jossa kyntökerroksen helppoliukoisen fosforin alkuarvo, P_s (mg kg^{-1}), lasketaan viljavuusanalyysin fosforiluvusta P_{luku} avulla seuraavasti:

$$P_s = \begin{cases} \frac{P_{\text{luku}} \cdot 7,8}{B_D} & ; P_{\text{luku}} \leq 3 \\ \frac{109}{B_D} \left(1 - e^{\left(\frac{-P_{\text{luku}} - 0,6}{15} \right)} \right) & ; 3 < P_{\text{luku}} \leq 30 \\ \frac{80 + 0,5 P_{\text{luku}}}{B_D} & ; P_{\text{luku}} > 30 \end{cases} \quad (T13.9)$$

P_{luku} (mg l^{-1}) on ammoniumasetaattimenetelmällä mitattu viljavuusluku, jota käytetään suunniteltaessa ympäristötuen ehtojen mukainen fosforilannoitus (Yli-Halla ym. 2001). B_D on maan kuivatilavuuspaino (kg dm^{-3}).

Simulointimalli laskee helppoliukoisen fosforin varaston P_s kehitystä koko laskentajakson ajan ja yhtälön (T13.9) käänteisfunktiolla on mahdollista arvioida P -luvun muutos laskentajakson aikana. Varastoa lisäävät annettu fosforilannoitus sekä orgaanisen aineksen hajoamisessa vapautuva fosfori (muutama $\text{kg fosforia vuodessa}$) ja niukkaliukoisesta fosforivarastosta hitaasti vapautuva P . Helppoliukoista fosforivarastoa kuluttavat kasvien fosforin otto, huuhtouma ja helppoliukoisen fosforin muuttuminen niukkaliukoiseen muotoon.

Vesitalouden säädön mallintaminen onnistuu, jos mallissa on mukana Tietoruudussa 13.1 kuvattu takaisinkytkentämekanismi, ja malli pystyy laskemaan maankosteuden vaikutuksen haihduntaan, kasvien kasvuun ja ravinteiden ottoon. Säättösalaoituksessa salaojavalunta lasketaan Hooghoudtin kaavalla (ks. Luku 7) niin, että valuntaa aiheuttava ylipaine lasketaan pellon keskellä olevan pohjavedenpinnan ja padotuskorkeuden erotuksena. Jos padotus on esim. syvyydellä 0,7 m maanpinnasta ja pohjavedenpinnan etäisyys

Tietoruutu 13.9

Eroosion mallintaminen

Eroosioprosesseja on kuvattu tarkemmin kohdassa 4.4 ja tässä esitellään lyhyesti yksi mahdollinen tapa arvioida pellolta kiintoaineen huuhtoutumisen mukana vesistöihin kulkeutuvaa typen ja fosforin kuormitusta. Eroosion aiheuttaa sadannan ja pintavalunnan yhteisvaikutus. Sadepisaroiden isku irrottaa maapartikkeleita toisistaan ja pintavalunta kuljettaa partikkelit ja siihen adsorboituneen typen ja fosforin lähimpään valtaojaan. Pinnan kautta tapahtuvan eroosion ohella myös ns. sisäisellä eroosiolla on etenkin savimailla suuri merkitys.

Pintavalunnan mukana tapahtuva eroosio E_p ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) voidaan laskea kaavalla, jossa otetaan huomioon pintavalunnan q_p (mm d^{-1}) lisäksi pellon kaltevuus (f_g), viljelytekniikan vaikutus (f_{CULT} : kynnös, kyntämätön, sänkimuokkaus jne.), kasvilaji (f_{CROP}), sekä roudan ja maan jäätyamisen vaikutus (f_R).

$$E_p = f_{HA} f_R f_{CROP} f_{CULT} f_S a_p (q_p)^{b_p} \quad (\text{T13.10})$$

Kertoimet a_p ja b_p ovat empiirisiä parametreja, joiden arvo valitaan kenttäkokeiden perusteella ja f_{HA} on muunnoskerroin yksiköstä $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ yksikköön $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ($=10$).

Huuhtoutuvan kiintoaineen kokonaistyyppi- ja fosforipitoisuudet (mg kg^{-1}) 0-2 cm:n pintakerroksessa on annettava mallille lähtötietona ($N_{T,0-2\text{cm}}$ ja $P_{T,0-2\text{cm}}$). Pintavalunnan mukana huuhtoutuvan typen määrä N_E ($\text{kg N ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) ja fosforin määrä P_E ($\text{kg P ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) voidaan laskea sen jälkeen kaavoista (T13.11) ja (T13.13):

$$N_E = N_{T,0,2\text{cm}} E_p 10^{-6} \quad (\text{T13.11})$$

$$P_E = P_{T,0,2\text{cm}} E_p 10^{-6} \quad (\text{T13.12})$$

Kaavojen luku 10^{-6} on yksikkömuunnos yksiköstä $\text{mg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ yksikköön $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$. Peltovuoren (2006) mukaan fosforin pitoisuudet maan pintakerroksessa vaihtelevat hyvin paljon ja ovat suurimmillaan yli 100 mg kg^{-1} . Kyntökerroksessa olevan kokonaistypen määrä on vielä suurempi, joten typpipitoisuudet voivat nousta arvoon $2\,000 - 3\,000 \text{ mg kg}^{-1}$.

Sisäisen eroosion voi olettaa olevan pääasiassa sidoksissa makrohuokosten kautta virtaavaan salaojavaluntaan $q_{D,M}$ (mm d^{-1}).

$$E_D = a_{D,M} (q_{D,M})^{b_D} \quad (\text{T13.13})$$

$$N_D = N_{T,Z} E_D 10^{-6} \quad (\text{T13.14})$$

$$P_D = P_{T,Z} E_D 10^{-6} \quad (\text{T13.15})$$

Mallin kokeelliset parametrit ovat $a_{D,M}$ ja b_D . Laskelmissa tarvitaan lähtötietona kiintoaineeseen pidättyneen kokonaistypen määrä $N_{T,Z}$ (mg kg^{-1}) ja kokonaisfosforin määrä $P_{T,Z}$ (mg kg^{-1}) maaprofiilissa eri syvyyksillä. Peltovuori (2006) on mitannut näitä arvoja fosforille. Typelle arvot joudutaan arvioimaan maaprofiilin kokonaistypen mittausten perusteella.

maanpinnasta on 0,3 m, niin ylipaine on 0,4 m. Padotuskastelussa otetaan huomioon myös ”negatiivinen ylipaine” eli jos pellon keskikohdan pohjavedenpinta on säätöpadon tasoa syvemmällä, niin laskentamalli syöttää vettä maaprofiliin negatiivisen paine-eron funktiona. Salaojavirtaus on näinä päivinä negatiivinen eli virtaus tapahtuu ulkopuolelta pellon suuntaan. Padotuskastelussa malli pystyy laskemaan tarvittavan kasteluveden määrän (=kaikkien negatiivisten salaojavaluntujen summa). Säättöojituksessa ja padotuskastelussa mallille annetaan lähtötietona padotuskorkeus erikseen kasvukaudelle, kasvukautta edeltävälle kuivatusvaiheelle, korjuuajankohdalle sekä syksy- ja talviajalle.

13.3 Miten tietokonemalleja voidaan käyttää apuna vesi- ja ravinnetalouden suunnittelussa

Matemaattisia malleja on alun perin ryhdytty käyttämään salaojituksen suunnittelussa päätöksenteon apuvälineinä. Tehtävät päätökset voivat olla luonteeltaan joko pitkän aikavälin *strategisia* valintoja tai lyhyen aikavälin *taktisia* päätöksiä. Aikajanne pitkän aikavälin päätöksissä on useita kymmeniä vuosia. Taktisia päätöksiä puolestaan joudutaan tekemään vähintään kerran kasvukauden aikana ja monesti jopa muutaman päivän välein. Salaojituksen ojavälin ja ojasyvyyden valinta on tyypillinen strateginen päätös. Lyhyen aikavälin päätös puolestaan voisi olla se, milloin säättöojituksessa on tarpeen muuttaa padotuskorkeutta. Matemaattisia malleja voidaan hyödyntää sekä pitkän että lyhyen aikavälin päätöksissä. Kuivatuksen suunnitteluun tarkoitettujen mallien pääpaino oli alun perin pitkän aikavälin päätöksenteossa, mutta kehitys näyttää menevän siihen suuntaan, että jatkossa mallien rooli tulee kasvamaan taktisia valintoja tehtäessä.

Tässä kohdassa tarkastellaan kolmen esimerkin avulla mallien käyttöä pellon vesi- ja ravinnetalouden säädön apuvälineenä. Ensimmäinen esimerkki on pitkän aikavälin strateginen päätös, jossa ojavälin ja ojasyvyyden valinnan kriteerinä ei kuitenkaan ole sadon maksimointi vaan pellon ravinnehuuhtoumien minimointi. Toisessa esimerkissä oletetaan, että pelto on jo salaojitettu ja nyt halutaan tutkia, mitä pitkäaikaisvaikutuksia pellon vesitalouden säädön aloittamisella olisi satotasoihin ja ravinnehuuhtoumiin. Kolmannessa esimerkissä mallia käytetään suunniteltaessa pellon typpi- ja fosforilannoitusta niin, että leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma on mahdollisimman pieni, mutta sato on silti lähellä optimiarvoa.

Ojavälin ja ojasyvyyden vaikutus leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoumaan

Salaojituksen suunnittelun ja toteutuksen tärkein tavoite on ollut sadon lisääminen ja Suomen olosuhteissa tärkeä rooli on edelleen sillä, että pellot saadaan keväällä riittävän ajoissa kylvökuntoon ja sadonkorjuun aikana pellot kantavat työkoneet riittävän hyvin. Viimeisten vuosikymmenten kuluessa ympäristönäkökulma on kuitenkin noussut entistä tärkeämmäksi. EU:n myötä maatalouden tukipolitiikka on muuttunut entistä enemmän hehtaarikoh- taiseksi tueksi, joten sadon optimoinnin sijasta on järkevää kääntää salaojituksen optimointiongelmaksi toisin päin: miten ojaväli ja ojasyvyys pitäisi valita eri maalajeissa ja eri ilmasto-olosuhteissa (sadanta ja potentiaalinen haihdunta) niin, että leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma olisi pitkällä aikavälillä pienin mahdollinen? Kuinka paljon näin valittu optimi poikkeaa tilanteesta, jossa kriteerinä olisi sadon maksimointi? Matemaattinen malli on ainoa tapa pyrkiä löytämään vastaus ravinteiden huuhtoutumisen minimointiongelmaan.

Laskentaesimerkissä maalajiksi valittiin hiesu, jossa pohjamaan vedenläpäisyarvo on $0,15 \text{ m d}^{-1}$, makrohuokosten tilavuusosuuden oletettiin olevan kyntökerroksessa 2 % ja nii-

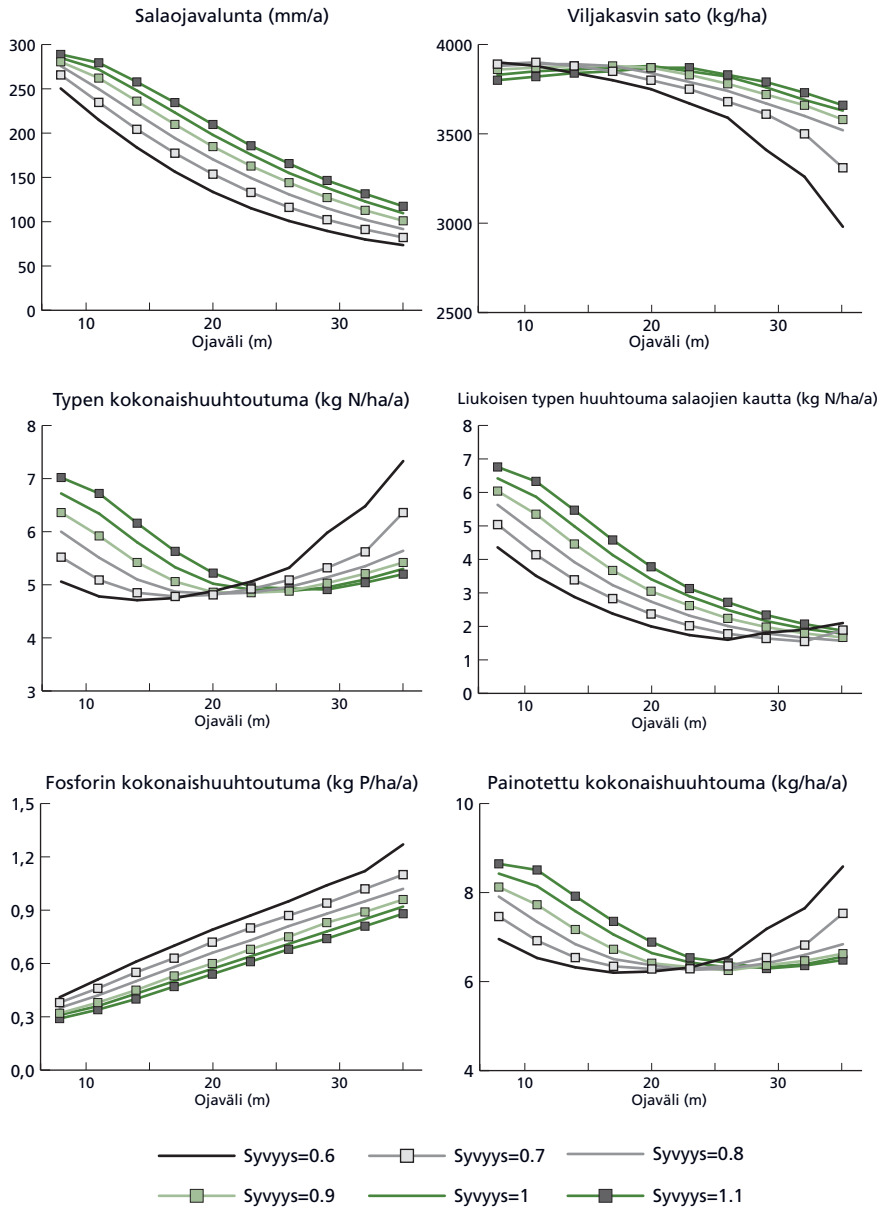
den vedenläpäisevyydellä käytettiin arvoa 15 m d^{-1} . Typeä annettiin $80 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, fosforia $15 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa oli 10 mg l^{-1} . Viljakasvina oli kevävehnä ja laskenta tehtiin käyttäen kahta eri satotasoa (3900 kg ha^{-1} ja 4200 kg ha^{-1}). Malleissa tarvittavalla sadannalla ja potentiaalisella haihdunnalla käytettiin kahta eri arvoa. Ensimmäisessä laskelmassa sadanta oli 600 mm a^{-1} ja haihdunta 400 mm a^{-1} . Toisessa tapauksessa keskimääräinen vuosisadanta pienennettiin arvoon 550 mm a^{-1} ja potentiaalista haihduntaa kasvatettiin arvoon 430 mm a^{-1} . Jälkimmäisen tapauksen vuosisadanta ja -haihdunta ovat tyypillisiä arvoja Suomen länsirannikolla. Laskentajakson pituus oli 20 vuotta ja kuvissa 13.1 ja 13.2 esitetyt vesi- ja ravinnetaseen komponentit ovat laskentajakson vuosikeskiarvoja. Mallissa käytetään lähtötietoina päivittäisiä sadannan ja potentiaalisen haihdunnan arvoja. Laskelmissa arvoja on mahdollista skaalata niin, että tarkastelujakson keskimääräisiksi vuosisummiksi saadaan halutut arvot. Ojavälin annettiin vaihdella laskelmissa 8 ja 35 m:n välillä ja ojasyvyyden $0,6\text{--}1,1 \text{ m:n}$ välillä.

Leville käyttökelpoisten ravinteiden laskennassa käytettiin Tietoruudussa 13.6 esitettyä painotettua huuhtouman arvoa, jossa otetaan huomioon sekä typen että fosforin huuhtouma. Fosforin huuhtouma kerrotaan Redfieldin N:P-suhteella (7,2), sillä levien kasvussa typeä tarvitaan massoina laskettaessa 7,2 kertaa enemmän kuin fosforia yhden leväkilon tuottamiseen. Painotettua huuhtoumaa laskettaessa oletettiin, että 50 % kiintoaineeseen sitoutuneesta ja eroosion mukana vesistöihin kulkeutuvasta fosforista vapautuu vesistöissä leville käyttökelpoiseen muotoon.

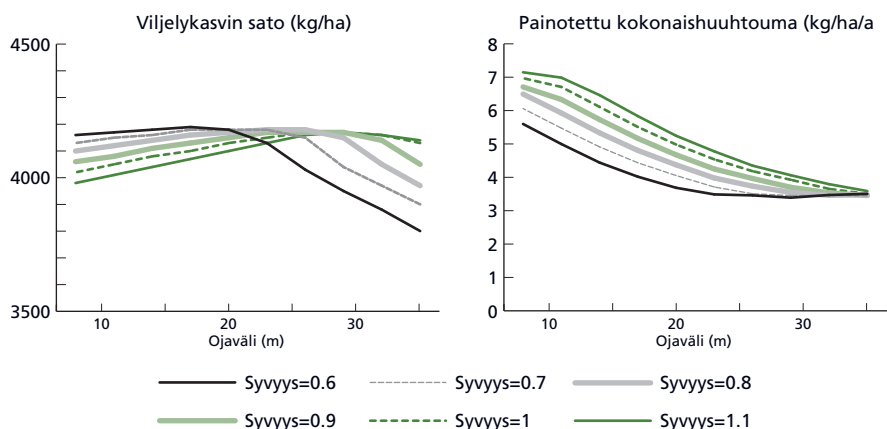
Laskennan tulokset on esitetty kuvissa (13.1) ja (13.2). Kuvan (13.1) tulosten mukaan leville käyttökelpoisen huuhtouman arvolle löytyi selkeä minimiarvo kaikilla laskennassa mukana olleilla ojasyvyyksillä. Huuhtouman kannalta paras ojaväli ei kuitenkaan ollut sama eri ojasyvyyksillä. Matalilla ojasyvyyksillä huuhtouman kannalta paras ojaväli oli pienempi kuin esimerkiksi nykyisin käytössä olevalla ojasyvyydellä $1,0 \text{ m}$. Leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouman minimiarvo ojasyvyydellä $1,0 \text{ m}$ saavutettiin ojavälin ollessa noin $26\text{--}27 \text{ m}$. Vastaava ojaväli sadon maksimoinnin kannalta oli ojasyvyydellä $1,0 \text{ m}$, noin 16 m eli selvästi pienempi kuin ravinteiden huuhtoutumisen kannalta paras ojaväli. Ojavälillä $26\text{--}27 \text{ m}$ viljakasvin sato oli jonkin verran pienempi kuin sadon optimiarvo, mutta ero oli vain noin $200\text{--}300 \text{ kg ha}^{-1}$.

Kuvan (13.1) laskelmissa painotetulla huuhtoumalla on selkeä minimialue. Liian suurilla ojaväleillä pintavalunta kasvaa ja fosforin huuhtouma kääntää painotetun huuhtouman nousuun, kun ojaväli on suurempi kuin 25 m . Pienillä ojaväleillä leville käyttökelpoisten ravinteiden määrää kasvattaa liukoisen nitraatin (ja ammoniumin) huuhtouma salaojien kautta.

Paikallisten sääolosuhteiden merkitys selviää hyvin kuvan 13.2 laskelmista. Kaikki muu lähtötieto on sama kuin kuvan 13.1 tuloksia laskettaessa lukuun ottamatta keskimääräistä vuosisadantaa ja vuosihaihduntaa, sekä pientä tavoitesatotason nousua (arvosta 3900 kg ha^{-1} arvoon 4200 kg ha^{-1}). Vuosisadanta oli esimerkissä 50 mm a^{-1} pienempi ja potentiaalinen haihdunta oli 30 mm a^{-1} suurempi kuin kuvan 13.1 laskelmissa. Näiden muutosten vaikutus näkyy mallissa pienempänä pintavaluntana (keskimäärin noin 40 mm a^{-1}), jolloin pintavalunnan mukana kulkeutuvan eroosion ja partikkelifosforin määrät olivat selvästi pienempiä kuin kuvan 13.1 tapauksessa. Partikkelifosforin pienempi suhteellinen osuus merkitsi käytännössä sitä, että painotettu huuhtouma ei kasvanut näillä lähtöarvoilla ojavälin kasvaessa niin paljon, että painotetulle huuhtoumalle olisi löytynyt vastaava minimialue kuin kuvassa 13.1. Leville käyttökelpoisen ravinnehuuhtouman minimi oli sitä pienempi, mitä suurempi oli ojituksen ojaväli. Pienemmällä sademäärällä ja suuremmalla haihdunnalla satotason mukainen paras mahdollinen ojaväli oli suurempi kuin kuvan 13.1 tapauksessa. Ojasyvyydellä $1,0 \text{ m}$ sato olisi suurin silloin kun ojaväli on noin 25 m . Suuremmilla sademäärillä vastaava arvo oli 16 m .



Kuva 13.1 Salaojituksen ojavälin ja ojasyvyyden vaikutus salaojavaluntaan, viljakasvin satoon, typen ja fosforin kokonaishuuhtoutumaan, liukoisen typen huuhtoutumaan salaojien kautta ja painotettuun kokonaishuuhtoutumaan (leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoutumaan). Maalajina hiesu, viljakasvina kevätvehnä, satotavoite noin $3\,900\text{ kg ha}^{-1}$, vuosisadanta 600 mm a^{-1} , potentiaalinen haihdunta 400 mm a^{-1} , typpilannoitus $80\text{ kg N ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$, fosforilannoitus $15\text{ kg P ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$. Viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa oli 10 mg l^{-1} . Laskentajakson pituus oli 20 vuotta.



Kuva 13.2 Salaojituksen ojavälin ja ojasyvyyden vaikutus viljakasvin satoon ja painotettuun kokonaishuuhtoumaan (mittaa leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoumaan). Lähtötiedot ovat muuten täsmälleen samat kuin kuvassa (13.1), mutta satotavoite hieman korkeampi, vuosisadanta on 550 mm a^{-1} ja potentiaalinen haihdunta 430 mm a^{-1} .

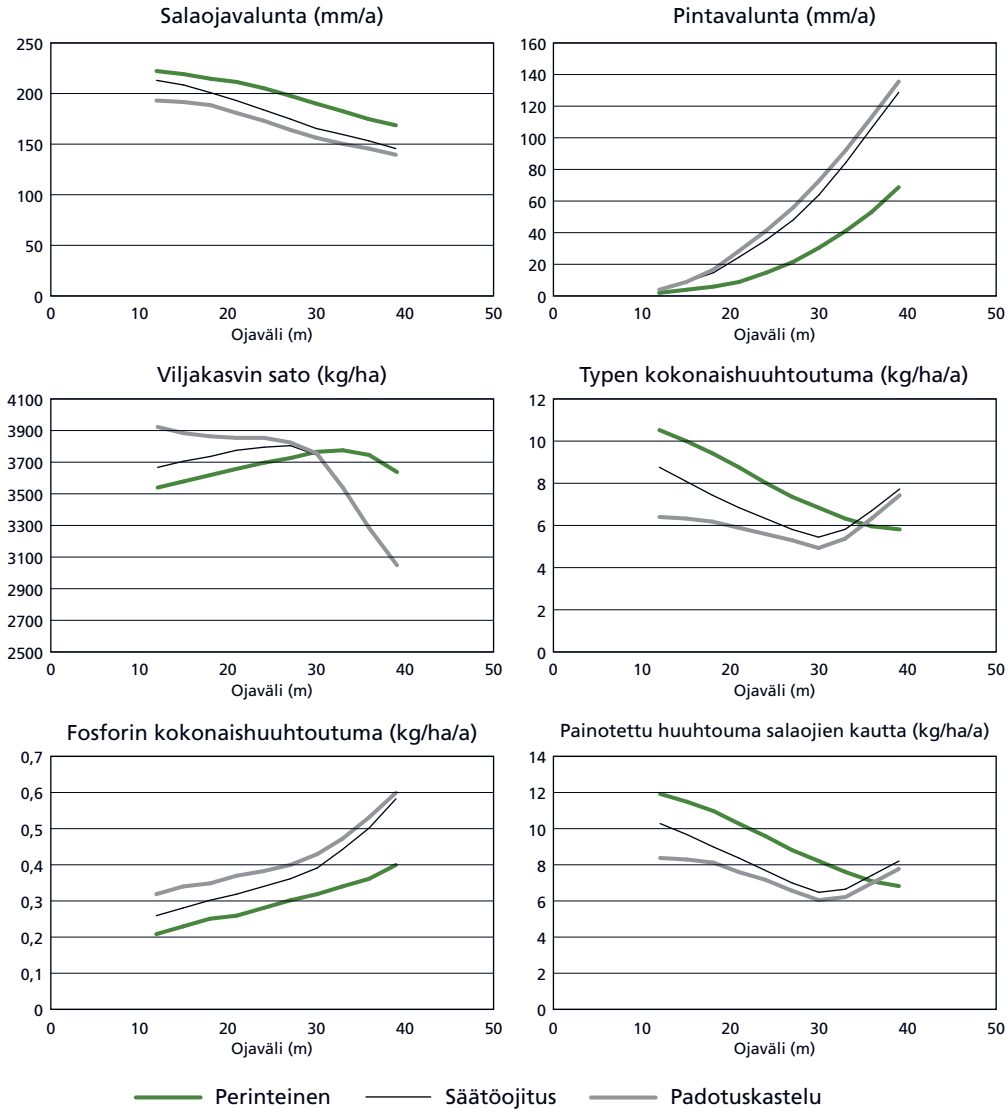
Pellon vesitalouden säädön vaikutus ravinnehuuhtoumiin

Toisessa laskentaesimerkissä tutkittiin pellon vesitalouden säädön vaikutusta ravinnehuuhtoumiin ja viljakasvien satoon. Malli laskettiin kolmella salaojitusavalla: tavanomainen salaojitus, säätösalaajitus ja padotuskastelu (ks. Luku 8). Laskelmissa maalajina oli hieta (pohjamaan K-arvo $0,4 \text{ m d}^{-1}$) ja makrohuokosten tilavuusosuuden oletettiin olevan kyn-
 tkerroksessa 2 % ja niiden vedenläpäisevyydellä käytettiin arvoa 15 m d^{-1} . Tyyppiä annettiin $100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, fosforia $15 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa oli 10 mg l^{-1} . Viljakasvina oli kevätevehnä ja laskenta tehtiin käyttäen tavoitesatotasoja 4000 kg ha^{-1} . Sadannalla ja potentiaalisella haihdunnalla käytettiin vuosikeskiarvoja 550 mm a^{-1} ja 400 mm a^{-1} .

Ojavälin annettiin vaihdella laskelmassa 12 ja 40 m:n välillä ja ojasyvyyden 0,6–1,1 m:n välillä. Tämän tyyppisellä maalajilla ojaväli toistaiseksi toteutetuissa hankkeissa on yleensä ollut noin 20–25 m. Laskelmien tulokset on esitetty kuvassa 13.3. Tulosten mukaan leville käyttökelpoiselle huuhtouman arvolle löytyy selkeä minimi, jos ojitustapana on säätösalaajitus tai padotuskastelu. Painotetun huuhtouman kannalta paras ojaväli olisi noin 30 m, joka on suurempi kuin nykyisten salaojituksen suunnitteluohjeiden mukainen ojaväli ko. maalajille. Perinteisessä salaojituksessa selkeää minimiä leville käyttökelpoiselle huuhtoumalle ei ollut, vaan minimihuhtouma saavutettiin suurimmalla laskennassa mukana olleella ojavälillä (40 m). Tulos tarkoittaa käytännössä sitä, että pintavalunnan mukana vesistöihin kulkeutuvan fosforin rooli oli perinteisen salaojituksen tapauksessa niin pieni, että salaojien kautta tapahtuva typpihuhtouma dominoi leville käyttökelpoisen huuhtouman arvoa. Padotuskastelussa ja säätösalaajituksessa pohjavedenpinta pidettiin kasvukauden ulkopuolella 0,7 m etäisyydellä maanpinnasta. Tästä oli seurauksena pintavaluntaa, jos ojaväli oli liian suuri ja sen eroosion lisääntyessä myös fosforin huuhtouma kasvoi suurilla ojaväleillä.

Säätösalaajituksella ja padotuskastelulla pystyttiin laskelmien mukaan pienentämään ravinnehuuhtoumien arvoa kaikissa niissä tapauksissa, joissa ojaväli oli pienempi kuin 35 m. Prosentuaalinen pienennys oli mallin mukaan suurimmillaan lähes 40 % perinteiseen ojitukseen verrattuna. Osa säädön kuormitusta pienentävästä vaikutuksesta tuli sadon ottaman lisätyön ansiosta ja osa oli seurausta pienentyneestä salaojavalunnasta. Viljakas-

vien sadon määrä kasvoi erityisesti padotuskastelua käytettäessä silloin, kun ojaväli oli pienempi kuin 30 m. Laskelmissa käytettiin kasvukauden aikana padotussyvyyyttä 0,6 m, mikä nosti suurilla ojaväleillä pohjavedenpinnan aika ajoin liian lähelle maanpintaa ja tämä pienensi säätösaloajituksen ja padotuskastelun laskennallista satoa silloin, kun ojaväli oli suurempi kuin 30 m.



Kuva 13.3 Salaojituksen ojavälin ja ojitustavan (tavanomainen, säätöojitus, padotuskastelu) vaikutus salaojavaluntaan, pintavaluntaan, viljakasvin satoon, typen ja fosforin kokonaishuuhtoutumaan, ja painotettuun kokonaishuuhtoutumaan (leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoutumaan). Maalajina hietä, viljakasvina kevätvehnä, satotavoite noin 4 000 kg ha⁻¹, vuosisadanta 550 mm a⁻¹, potentiaalinen haihdunta 400 mm a⁻¹, typpilannoitus 100 kg N ha⁻¹ a⁻¹, fosforilannoitus 15 kg P ha⁻¹ a⁻¹. Viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa oli 10 mg l⁻¹. Laskentajakson pituus oli 20 vuotta.

Typpi- ja fosforilannoitustason vaikutus ravinteiden huuhtoumaan

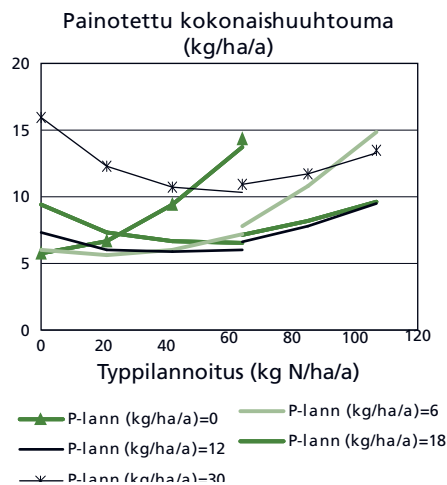
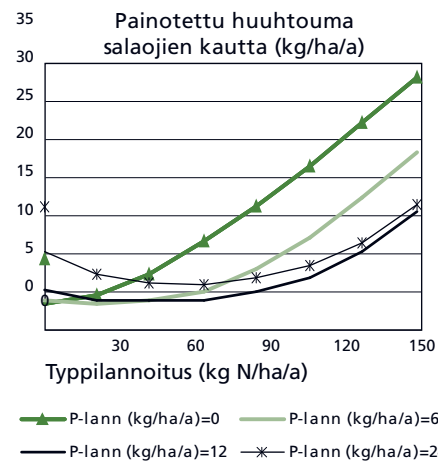
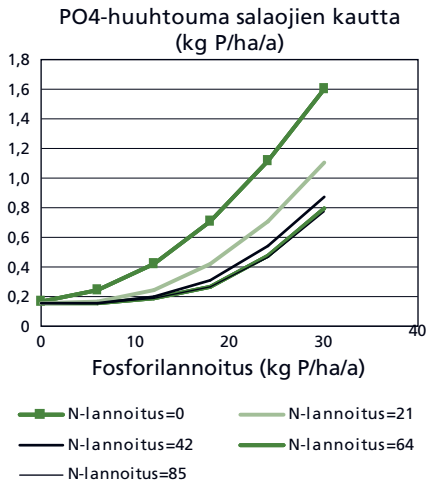
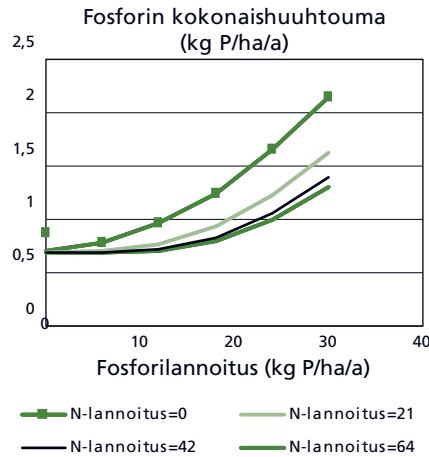
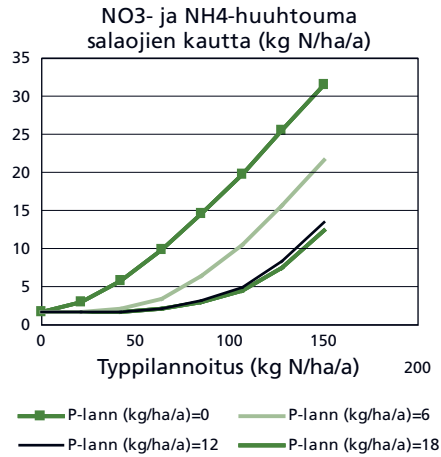
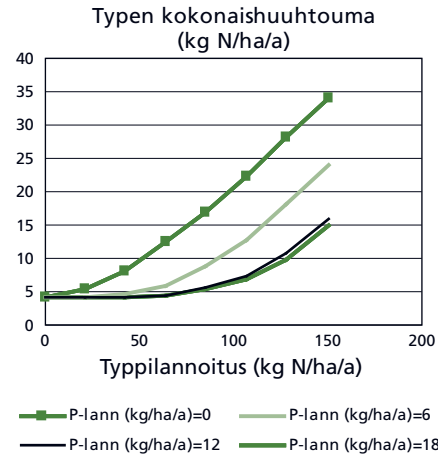
Kolmannessa esimerkissä tarkasteltiin savipellon typpi- ja fosforilannoituksen vaikutusta ravinnehuuhtoumiin kun salaojituksen ojaväli ja ojasyvyys pysyvät vakiona. Onko tällaisessa tilanteessa mahdollista löytää lannoitusyhdistelmä, jolla ravinnehuuhtoumat voidaan minimoida niin että viljakasvin sato pysyy lähellä optimia? Laskelmissa pohjamaan K-arvo oli hyvin pieni eli $0,01 \text{ m d}^{-1}$, mutta makrohuokoston oletettiin olevan hyvin toimiva. Makrohuokosten tilavuusosuus oli kyntökerroksessa 4 % ja niiden vedenläpäisevyydellä käytettiin arvoa 10 m d^{-1} . Tässä esimerkissä salaojaväli oli 12 m ja ojasyvyys 1,0 m ja laskenta tehtiin olettaen, että käytössä on tavanomainen salaojitus. Viljakasvina oli kevätvehnä ja tavoitesatotasoa 3500 kg ha^{-1} . Sadannalla ja potentiaalisella haihdunnalla käytettiin vuosikeskiarvoja 550 mm a^{-1} ja 400 mm a^{-1} . Laskennassa typpi- ja fosforilannoituksen tasoa vaihdeltiin. Typpeä annettiin $0\text{--}150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja fosforia $0\text{--}30 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa oli 10 mg l^{-1} . Ravinnehuuhtoumien lisäksi tutkittiin sitä, miten fosforin lannoitustaso vaikuttaa viljavuusanalyysin fosforilukuun.

Laskelmien tulokset on esitetty kuvissa 13.4 ja 13.5. Laskennassa oli mukana ”epämielekkäitä” yhdistelmiä kuten runsas fosforilannoitus ja hyvin niukka typpilannoitus tai päinvastoin. Näiden yhdistelmien huuhtouma oli selvästi suurempi johtuen siitä, että kasvusto ei kasvanut kunnolla eikä ottanut ravinteita, kun toisen kasvutekijän puutos (näissä laskelmissa useimmiten fosfori) oli liian suuri. Leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoumalle löytyi minimikohta $5,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, kun fosforin lannoitustaso oli $6 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Optimi typpilannoitus ravinteiden huuhtouman kannalta oli siinä tapauksessa noin $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja sato oli noin 2500 kg ha^{-1} . Painotettu huuhtouma oli tällä lannoitustasolla pienempi kuin jos lannoitusta ei olisi annettu ollenkaan (huuhtouma noin $5,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Syy tähän on ymmärrettävästi se, että kasvusto ei kasva kunnolla, jos typpeä ja fosforia ei anneta ollenkaan. Sato olisi vain noin 1500 kg ha^{-1} (kuva 13.5), kun $N=0$ ja $P=0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Kun kasvatetaan fosforin lannoitustaso arvoon $12 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma kasvaisi hieman arvoon $5,8 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Ympäristön kannalta optimaalinen typpilannoitustaso olisi noin $40\text{--}45 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja viljakasvin sato kasvaisi arvoon noin $3000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Jos fosforin lannoitustaso olisi $18 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, niin minimihuhtouma olisi $6,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ optimaalisella typpitasolla $65 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Viljakasvin sato olisi tällöin jo noin $3250 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eli yli 90 % siitä sadosta, joka saavutetaan antamalla riittävän paljon ravinteita. Leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma kasvoi selkeästi, kun fosforin lannoitustaso ylitti $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

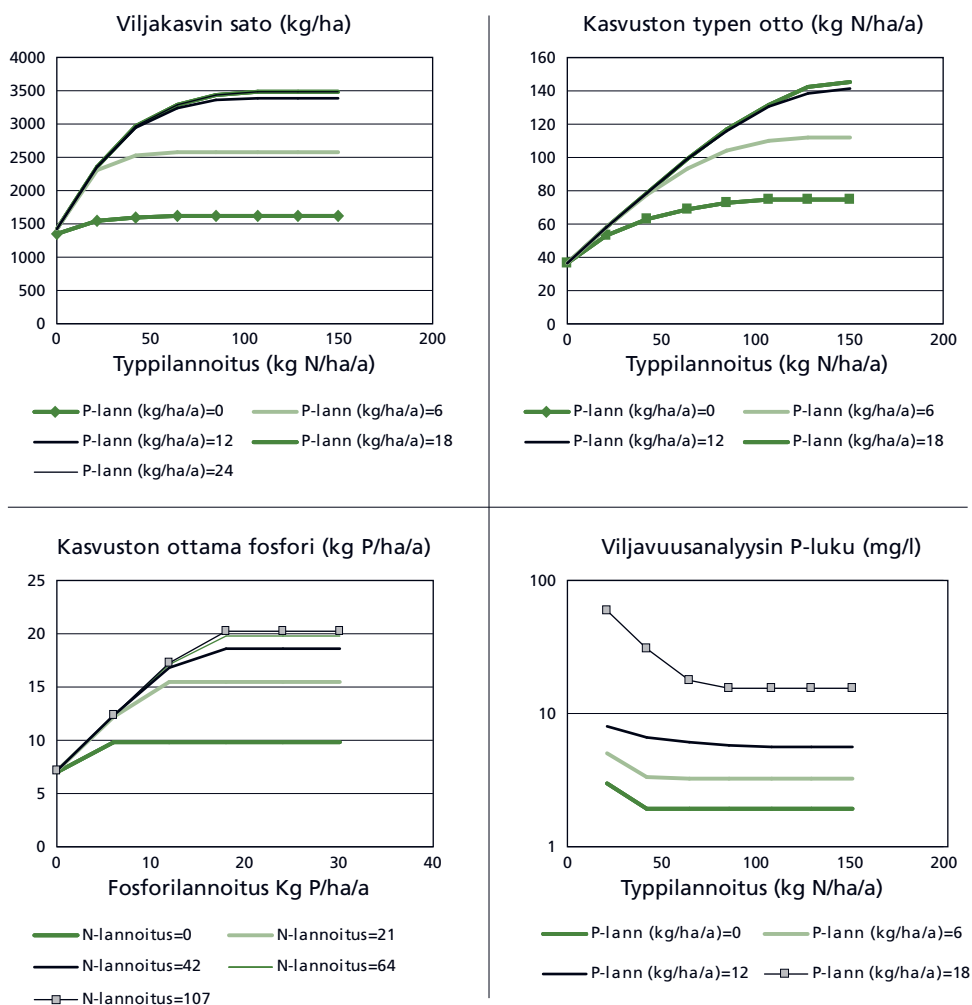
Kuvassa 13.5 on esitetty viljakasvin ottaman typen ja fosforin kokonaismäärät yhden kasvukauden aikana. Kyseissä luvussa on mukana myös lehtien ja varsien sisältämä typpi ja fosfori.

Kevätvehnällä sadon mukana poistuva typpi on laskentamallin oletusten mukaan noin 60 % koko kasvukauden aikana otetusta tyypestä ja fosforista eli esimerkissä fosforin osalta sadon mukana poistui suurimmillaan noin $12 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Korsien ja kuolleiden lehtien sisältämien ravinteiden oletettiin palautuvan kiertoon.

Käytetyllä laskentamallilla voidaan tehdä arvio käytetyn lannoitustason vaikutuksesta maan fosforiluvun muutokseen laskentajakson aikana. Kuvassa 13.5 on esitetty laskennan lopputilanteen fosforiluku, kun typpi- ja fosforilannoituksen taso vaihtelevat. Typen lannoitustaso vaikuttaa fosforilukuun vain silloin, jos kasvi ei kasva kunnolla, jolloin se ei myöskään ota lannoitteena annettua fosforia ja maan fosforiluku kasvaa tarkastelujakson (20 vuotta) aikana. Esimerkkinä tästä on kuvan 13.5 (viljavuusanalyysin P-luku (mg/l)) lannoitustaso $18 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Kun typpilannoitus on yli $50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, niin fosforiluvun muutoksiin vaikuttavat mallissa vain annetun fosforilannoitteen määrä, mineralisaation kautta vapautuvan fosforin määrä ja aktiivisen fosforivaraston (ks. Tietoruutu 13.8) reaktiot niukkaliukaisen fosforivaraston kanssa. Laskennassa käytetyillä lähtöarvoilla maan fosforiluku putosi hieman alkuarvostaan 10 mg l^{-1} (lukemaan 5,9), jos lannoitustaso oli $12 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, ja mallin mukaan fosforiluvun ylläpitäminen tasolla 10 mg l^{-1} vaati fosforilannoitusta noin $14\text{--}15 \text{ kg P ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.



Kuva 13.4 Typpi- ja fosforilannoituksen tason vaikutus typen ja fosforin kokonaishuuhtoumaan, salaojien kautta tapahtuvaan typen ja fosforin vesiliukoisten muotojen sekä painotettuun kokonaishuuhtoumaan (leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoumaan). Maalajina tiivis savimaa, jossa hyvin toimiva makrohuokosto, viljakasvina kevävehnä, satotavoite noin 3 500 kg ha⁻¹, vuosisadanta 550 mm a⁻¹, potentiaalinen haihdunta 400 mm a⁻¹, typpilannoitus 0-150 kg N ha⁻¹ a⁻¹, fosforilannoitus 0-30 kg P ha⁻¹ a⁻¹ ja viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa 10 mg l⁻¹. Laskentajakson pituus oli 20 vuotta.



Kuva 13.5 Typpi- ja fosforilannoituksen tason vaikutus viljakasvien satoon, kasvuston ottaman typen ja fosforin määrään sekä viljavuusanalyysin fosforilukuun (P-luku laskennan lopussa). Maalajina oli tiivis savimaa, jossa hyvin toimiva makrohuokosto, viljakasvina kevätvehnä, satotavoite noin 3 500 kg ha⁻¹, vuosisadanta 550 mm a⁻¹, potentiaalinen haihdunta 400 mm a⁻¹, typpilannoitus 0-150 kg N ha⁻¹ a⁻¹, fosforilannoitus 0-30 kg P ha⁻¹ a⁻¹ ja viljavuusanalyysin fosforiluku laskennan alussa 10 mg l⁻¹. Laskentajakson pituus oli 20 vuotta.

13.4 Pellon vesi- ja ravinnetalouden säädön mallintaminen tulevaisuudessa

Tietokonemallien kehitystyötä salaojitukseen liittyvissä sovellutuksissa on tehty kansainvälisesti yli 30 vuoden ajan ja Suomessakin yli 20 vuoden ajan. Alkuperäisenä ajatuksena 1980-luvun puolivälissä oli se, että malleilla voitaisiin tilakohtaisesti arvioida paras mahdollinen ojaväli, jos peltojen vedenläpäisevyys eli K-arvo tunnetaan riittävän hyvin. 1980-luvulla tämä tavoite osoittautui hyvin vaikeaksi saavuttaa. Suomalaiset maalajit ovat niin epähomogeenisia, että ei löytynyt riittävän luotettavaa ja halpaa keinoa mitata malleissa

tarvittavat vedenläpäisevyydet samassa yhteydessä, kun kartoitus tehdään. Alkuvaiheessa malleja käytettiin arvioitaessa salaojien mitoitusvalunnan riittävyttä, sekä tutkittaessa millainen on eri tyyppimaalajien (hieta, hiesu, savi) paras mahdollinen ojaväli, kun maan vedenläpäisevyys oletetaan tunnetuksi (Karvonen 1988).

Tilakohtainen säädön mallintaminen tavoitteena minimoida leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma

Tämän luvun kohdassa 13.3 esitetyt laskelmat osoittavat, että leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtoumalle on mahdollista löytää tapauskohtainen minimi. Ympäristön kannalta parhaaseen N-P-lannoitustasoon vaikuttavat mm. maalaji, olemassa oleva salaojitus ja sen toimivuus, makrohuokoston rakenne, pellon eroosioherkkyys, vuotuisen sadannan ja haihdunnan arvot, viljakasvi, satotasotavoite, orgaanisen aineksen hajoamisessa vapautuvat ravinteet ja viljavuusanalyysin fosforiluku. Näyttää siltä, että ei ole mahdollista laatia yleispäteviä ohjeita suosituksista, joilla minimoidaan leville käyttökelpoisen huuhtouman määrä. Laskelman on oltava tapauskohtainen ja se on tehtävä mieluiten tilalla viljelijän ja maatalousalan ammattilaisen yhteistyönä.

On hyvin todennäköistä, että lähivuosien aikana tullaan kokeilemaan pellon vesi- ja ravinnetalouden säädön muotoilua ns. *rajoitetetuksi minimointiongelmaksi*. Optimoinnissa tarvitaan kohdefunktio, joka voisi olla Tietoruudussa 13.6 esitetty leville käyttökelpoisten ravinteiden huuhtouma. Optimoinnin *rajoitusehto* olisi esimerkiksi se, että viljakasvin sadon täytyy olla vähintään 90–95 % siitä sadosta, joka saavutettaisiin riittävän suurella lannoitustasolla.

Tilakohtaisen laskennan osalta tilanne on muuttunut 1980-luvun vuosista. Suomessa on tehty 1990-luvulta alkaen salaojitukseen liittyviä kenttämittauksia useilla maalajeilla, eri kasveilla ja eri puolilla Suomea (Paasonen-Kivekäs ym. 2000, 2008). Lisäksi mm. Suomen ympäristökeskuksessa, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksessa ja yliopistoissa on tehty pitkäaikaisia kenttäkokeita, joiden tuloksia voi käyttää kalibroitaessa mallien maalaji- ja kasvilajikohtaisia parametreja (Lemola ja Turtola 1998; Puustinen 1999; Turtola ja Lemola 2000; Uusitalo ym. 2000 ja 2001; Kukkonen ym. 2004; Virkajärvi ja Uusi-Kämpä 2006; Peltovuori 2006). Tulevaisuudessa on mahdollista, että tietokannat saadaan niin kattaviksi, että on mahdollista arvioida säädön vaikutuksia tila- ja lohkokoh- taisesti. Suomen pelloista suurin osa on jo salaojitettu, joten pääpaino siirtyy pitkän ajan tarkasteluista lyhytaikaisempien taktisten päätösten tekoon. Olemassa oleva salaojitus ja muut tarvittavat tiedot annetaan lähtötietoina ja mallien avulla suunnitellaan vesitalouden mahdolliset säästötoimenpiteet ja lannoitussuosituksiset. Mallien avulla on mahdollista arvioida eri vaihtoehtojen vaikutus sekä viljakasvien satoon että ravinteiden huuhtoutumiseen. Yhdeksi tärkeäksi mallintamisen kohteeksi nousee myös pellon kasvukunnon kehittymisen ennustaminen.

Pitkäaikaisvaikutusten ennustamisen tärkeys korostuu tulevaisuudessa

DRAINMOD-mallin onnistunut käyttö salaojituksen suunnittelun apuvälineenä perustuu osittain siihen oivallukseen, että mallilla kannattaa laskea yhdessä ajossa vähintään 20 vuoden yhtäjaksoinen simulointi. Tämä mahdollistaa sen, että ojavälin ja ojasyvyyden suunnittelun pohjana on sääolosuhteiltaan erilaisia vuosia niin kuin todellisuudessaakin ja suunniteltu yhdistelmä antaa keskimäärin parhaan tuloksen. Tamm (2002) on väitöskirjassaan vertaillut Feddesin ryhmän SWAP-mallia ja CROPWATN-mallia ja todennut, että samoilla lähtötiedoilla mallit antavat kutakuinkin samat tulokset. Tamm laski CROPWATN-mallilla 30 vuoden jakson Viron sääaineistoilla ja totesi, että jatkuvalla simuloin-

nilla on mahdollista saada käytännön suunnittelua varten paremmin tietoa kuin yksittäisten vuosien laskennalla. Syy tähän on se, että peräkkäisillä kuivilla ja kosteilla vuosilla on ylivuotinen vaikutus, joka näkyy vain, kun laskenta tehdään jatkuvana riittävän pitkälle ajanjaksolle (20–30 vuotta). Tammin mukaan pitkä simulointi tarjoaa hyvän keinon tutkia sitä, näkyykö ojavälin ja ojasyvyyden vaikutus joko liian tehokkaana tai puutteellisenä kuivatuksena.

Pellon vesitalouden säädön ja eri viljelytoimenpiteiden yhteisvaikutuksen ennustaminen ravinteiden käyttäytymiseen ja pellon kasvukuntoon (hiilen, typen ja fosforin kokonaismääriin, maan rakenteeseen, makrohuokosten esiintymiseen ja maan tiivistymiseen) tulee olemaan yksi 2010-luvun tärkeimmistä mallintamisen haasteista. Tämä edellyttää sekä uusien mallien kehittämistä että kaikkien olemassa olevan koetoiminnan tulosten hyödyntämistä.

Muuttuva kuivatustehokkuus tietotekniikkaa hyödyntäen

Salaojitusta alun perin toteutettaessa suunnittelijan on valittava ojaväli ja ojasyvyys, jotka pysyvät samoina koko ojituksen toiminta-ajan, joka voi olla jopa enemmän kuin 50 vuotta. Kyse on siis hyvin pitkä aikavälin strategisesta päätöksestä. Toteutuksen jälkeen ojaväliä voidaan tietysti tihentää laittamalla imuojat entisten väliin, mutta kustannukset kasvavat helposti liian suuriksi. Kuivatustehokkuutta voidaan osittain säätää sääolosuhteiden mukaan. Säätoikaivoja voidaan käyttää pidättämään vettä pellolla kuivina kesinä ja tarvittaessa kaivojen ja imuojen kautta voidaan lisätä pellolle vettä eli kastella peltoa alakaudesta. Märkinä vuosina salaojat toimivat normaaliin tapaan ilman että säätö vaikuttaa siihen mitenkään. Toistaiseksi tämäntyyppisen säädön toteutuksessa ei ole käytetty tietotekniikkaa apuna, mutta teknologian nykyinen taso mahdollistaisi sen, että säätö automatisoitaisiin. Siihen tarvittaisiin sekä tietokonemalleja, että pellolla pohjavedenpintaa jatkuvasti rekisteröiviä antureita. Malleilla laskettaisiin koko ajan pellon pohjavedenpinnan korkeutta antamalla lähtötietoina toteutuneet säähavainnot ja lähitulevaisuuden ennakkoinnissa apuna käytettäisiin lyhyen ajan sääennusteita. Säätoikaivojen padotuskorkeutta voitaisiin muuttaa joko manuaalisesti tai täysin automaattisesti. Isoilla peltolohkoilla ja erikoiskasvien viljelyssä tämäntyyppinen ratkaisu saattaisi olla myös taloudellisesti kannattavaa. Vesitalouden säädön ohella avautuisi myös mahdollisuus parantaa ravinteiden käytön tehokkuutta ja vähentää siten ympäristökuormitusta.

Kenttäkokeita vai mallinnusta

Ennen tietokonemallien käyttöön ottoa ojavälin etsintä perustui kenttäkokeisiin, joissa vaihdeltiin ojaväliä ja ojasyvyyttä ja tutkittiin mikä oli eri yhdistelmien vaikutus satoon. Ongelmana oli tietysti se, että kokeita oli tehtävä usealla eri maalajilla ja monella eri ojaväli- ja ojasyvyyshdistelmällä. Lisäksi kokeita oli jatkettava riittävän monta vuotta, jotta erilaisten sääolosuhteiden vaikutus näkyi mittaustuloksissa. Kaikkia maalaji-ojitusyhdistelmiä ei voitu kokeilla. Tietokonemalleissa puolestaan on mahdollista laskea ojavälin ja ojasyvyyden vaikutus keskimääräiseen satoon usealla eri maalajilla ja viljakasvilla esimerkiksi 20–30 vuoden sääaineistoa käyttäen, jolloin on todennäköistä, että märkien ja kuivien vuosien vaikutus tulee otettua huomioon. Kenttäkokeet eivät suinkaan ole tarpeettomia: niiden avulla saadaan mittaustuloksia, jonka avulla mallien oikeellisuus voidaan arvioida. Parhaaseen lopputulokseen päästään kenttäkokeiden ja mallien järkevällä yhteiskäytöllä. Malli on ainoastaan apuväline ja lopulliset päätökset tekee viljelijä maatalousalan asiantuntijoiden avustuksella.

Kirjallisuus

2. Maaperä

- Aaltonen, V.T. 1951. Maannostuminen ja maannos. Teoksessa: Granö ym. (toim.). Suomen maantieteen käsikirja. Otava. Helsinki. s. 57–64.
- Andersson, S., Håkansson, I. 1966. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord, XVI. Strukturodynamiken i matjorden. En fältstudie. Grundförbättring 1966/3: 192–228.
- Andersson, S., Wiklert, P. 1972. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXIII. Grunförbättring no 25. s. 53–143.
- Barrett, G.W., Rodenhouse, N., Bohlen, P.J. 1990. Role of Sustainable Agriculture in Rural Landscapes. Julkaisussa: Edwards, C. A., Rattan, L., Madden, P., Miller, R. H., House, G. (toim.). Sustainable Agricultural Systems. Soil and Water Conservation Society. s. 624–636.
- Blume, H.P., Hartge, K.H., Schwertmann, U. 1976. Lehrbuch der Bodenkunde. 9. Auflage. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart. 394 s.
- FAO 1974. Soil Map of the World 1:5000 000. Volume 1. Legend. UNESCO. Paris.
- FAO 1988. World Soil Resources Report 60. Prepared and published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1988. Reprinted with corrections, 1990. Saatavissa: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils/docs/isricu_i9264_001.pdf
- FAO 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84. Rome, Italy. 88 s.
- FAO 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports 103. Rome, Italy. 128 s. Saatavissa: http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2007_corr.pdf
- FAO 2014. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports 106. FAO, Rooma. 181 s.
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V., Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology* 19 (5): 1456–1469.
- Heinonen, R., Hartikainen, H., Aura, E., Jaakkola, A., Kemppainen, E. 1992. Maa, viljely ja ympäristö. WSOY. Porvoo. 334 s.
- Ilvessalo, Y. 1960. Soiden esiintyminen Suomessa. *Suo* 11: 55–62.
- Laine, J., Vasander, H. 1990. Suotyypit. Kirjayhtymä. Helsinki. 80 s.
- Lilja, H., Uusitalo, R., Yli-Halla, M., Nevalainen, R., Väänänen, T., Tamminen, P. 2009. Suomen maannostietokanta. Käyttöopas versio 1.0. MTT Tiede 6. 77 s.
- Munsell 1994. Munsell Soil Color Charts. Munsell Color. New Windsor, New York, USA.
- Myllys, M. 1992. Physical properties of agricultural peat soils and their effects on drainage. Proceedings 9th International Peat Congress, Uppsala, Sweden, June 22–26, 1992. s. 352–360.
- Nuutinen, V. 2000. Läpi harmaan saven – pellon pienet kovakasvot maan rakennetta hoitamassa. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, Sarja A 79. s. 39–46.
- Palojärvi, A., Nuutinen, V. 2002. Maaperäeliöstö ja maan rakenne. Julkaisussa: Alakukku, L., Teräväinen, H. (toim.). Maan rakenteen hoito. Tieto tuottamaan 98. ProAgria Maaseutukeskusten Liitto. s. 24–32.

- Regina, K. 2015. Kirjallinen tiedonanto. 7.10.2015.
- Ringrose-Voase, A.J., Bullock, P. 1984. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *J. of Soil Science* 35: 673–684.
- Shipitalo, M.J., Nuutinen, V., Butt, K.R. 2004. Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey subsurface-drained soil. *Applied Soil Ecology* 26: 209–217.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. 12th ed. USDA-NRCS, Washinton, DC. Saatavissa: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs142p2_053580
- Yli-Halla, M., Mokma, L., Peltovuori, T., Sippola, J. 2000. Suomalaisia maaprofileja. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, Sarja A 78. 104 s.

Muu kirjallisuus

- Alakukku, L., Ristolainen, A., Sarikka, I., Hurme, T. 2008. Maan rakenne ja vesitalous vesistökuormituksen taustatekijöinä. Julkaisussa: Turtola, E., Lemola, R. (toim.). Maatalouden ympäristötuen vaikutukset vesistökuormitukseen, satoon ja viljelyn talouteen v. 2000–2006 (MYTVAS 2). Maa- ja elintarviketalous 120, MTT. s. 31–39.
- Alakukku, L., Turtola, E., Ventelä, A.-M., Nuutinen, V., Aura, E., Uusitalo, R. 2004. Suorakylvön soveltuvuus vesiensuojelutyöhön – esiselvitys. Pyhäjärvi-Instituutin julkaisuja Sarja A nro 28. 92 s.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L., O'Connor, G.A. 2001. Soil Chemistry. 3. painos. Wiley. New York. 307 s.
- Brady, N.C., Weil, R.R. 2004. Elements of the Nature and Properties of Soils. 2. painos. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 624 s.
- Essington, M.E. 2004. Soil and water chemistry. An integrative approach. CRP Press. Roca Baton. 534 s.
- Kirchmann, H. 1991. Properties and classification of soils of the Swedish long-term fertility experiments. I. Sites at Fors and Kungsängen. *Acta Agriculturae Scandinavica* 41: 227–242.
- Lilja, H., Uusitalo, R., Yli-Halla, M., Nevalainen, R., Väänänen, T., Tamminen, P. 2006. Suomen maannostietokanta. Maannoskartta 1:250 000 ja maaperän ominaisuuksia. MTT:n selvityksiä 114. MTT. Jokioinen. 72 s.
- Maaperäkartan käyttöopas 2005. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/aaineistot/mp-opas/>
- McBride, M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press. New York.
- Mokma, D.L., Yli-Halla, M. 2000. Keys to soil taxonomy for Finland. USDA Natural Resources Conservation Service. 31 s.
- Mokma, D.L., Yli-Halla, M., Hartikainen, H. 2000. Soils in a young landscape on the coast of southern Finland. *Agricultural and Food Science in Finland* 9: 291–302.
- Peltovuori, T., Uusitalo, R., Kauppila, T. 2003. Phosphorus reserves and apparent phosphorus saturation in four weakly developed cultivated pedons. *Geoderma* 110: 35–47.
- Pitkänen, J. 1999. Viljelytekniikan vaikutus pintavirtailuun peltoalueella. Julkaisussa: Salo, R., Yli-Halla, M. (toim.). Maataloustieteen päivät 2000. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, Sarja A 67. s. 22–33.
- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M. 1979. Geotekniikka 464. Otatieto. Espoo. 295 s.
- Reintam, E., Köster, T. 2006. The role of chemical indicators to correlate some Estonian soils with WRB and Soil Taxonomy criteria. *Geoderma* 136: 199–209.
- Risdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141–163.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. 2002. Lehrbuch der Bodenkunde. 15. painos. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 563 s.

- Schwertmann, U., Süsser, P., Nätcher, L. 1987. Protonenpuffersubstanzen in Böden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 150: 174–178.
- Soil Survey Staff 2006. Keys to Soil Taxonomy. US Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. 10th Edition. 332 s. Saatavissa: ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/keys.pdf
- Suomen kartasto. 1990. Vihko 124. Maaperä. Maanmittaushallitus ja Suomen Maantieteellinen Seura.
- Taipale, K., Saarnisto, M. 1991. Tulivuorista jääkausiin. Suomen maankamaraan kehitys. WSOY. Porvoo. 416 s.
- Tamminen, P., Tomppo, E. 2008. Finnish forest soils. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 100. 21 s.
- Timonen, S., Valkonen, J. 2013. Sienten biologia. Gaudeamus.
- USDA Textural triangle (maalajikolmio). Saatavissa: <http://edis.ifas.ufl.edu/SS169>
- Vasander, H. (toim). 1996. Peatlands in Finland. Finnish Peatland Society. Helsinki. 168 s.
- Virtanen, S. 2015. Redox reaactions and water quality in cultivated boreal acid sulphate soils in relation to water management. Doctoral thesis in environmental soil science 25/2015. University of Helsinki. 80 s.
- White, R. 1997. Principles and practice of soil science. 3. painos. Blackwell Science. Cambridge. 348 s.
- Yli-Halla, M., Mokma, D.L. 2001. Soils in an agricultural landscape of Jokioinen, south-western Finland. Agricultural and Food Science in Finland 10: 33–43.

3. Hydrologian perusteita

- Anderson, E. 1968. Development and testing of snow pack energy balance equations. Water Resources Research 4 (1): 19–37.
- Andersson, S. 1971. Kommentar till ett diagram. Uppsala.
- Andersson, S., Wiklert, P. 1972. Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. XXIII. Grunförbättring no 25. s. 53–143.
- Boast, C.W., Kirkham, D. 1971. Augerhole seepage theory. Proceedings of Soil Science Society of America 35:3. s. 65–374.
- Bouma, J. 1977. Soil survey and the study of water in unsaturated soil. Soil Survey Institute. Wageningen. 107 s.
- Cowan W.L. 1956. Estimating hydraulic roughness coefficient. Agricultural Engineering 7: 473–475.
- de Wit, C.T. 1958. Transpiration and crop yields. Versl. Landb. K. Onderz. 64.6. Wageningen. 88 s.
- Gash, J., Stewart, J. 1975. The average surface resistance of pine forest derived from Bowen ratio measurements. Boundary-Layer Meteorology 8 (3–4): 453–464.
- Eijkelkamp. Agriseach Equipment Catalogue. Saatavissa: <http://www.eijkelkamp.com/>
- Feddes, R.A. 1979. Physics of soil-moisture. International course on land drainage. Wageningen, The Netherlands.
- Ilmatieteen laitos 2004. http://www.fmi.fi/saa/tilastot_10.html. Viitattu 7.10.2008.
- Järvinen, E. 1978. Astioista ja lysimetreistä tapahtuva haihdunta. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriolosasto. Otaniemi, Espoo. 147 s.
- Kaitera, P. 1939. Lumen kevätsulamisesta ja sen vaikutuksesta vesiväylien purkautumissuhteisiin Suomessa. Maataloushallituksen kulttuuriteknilisiä tutkimuksia 2. Helsinki. 256 s.

- Kaitera, P. 1949. On melting of snow in springtime and its influence on the discharge maximum in streams and rivers in Finland. Teknillisen korkeakoulun tutkimuksia No.1, Helsinki.
- Kaitera, P., Teräsvirta, H. 1972. Snow evaporation in South and North Finland, 1969/1979 and 1979/1971. *Aqua Fennica* 1972: 11–19.
- Kuusisto, E. 1984. Snow accumulation and snowmelt in Finland. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja* 55. Vesihallitus. Helsinki. 149 s.
- Monteith, J. 1965. Evaporation and environment. *Proc. Symp. Soc. Exp. Biol.* 19.
- Monteith, J. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J.R. Met. Soc.* 107.
- Mustonen, S.E. 1968. Ylivalumasta pienillä alueilla. *Rakennustekniikka* 5/1968.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3).
- Niinivaara, K. 1955. Haihtumismääristä eri kuukausina. *Maa- ja vesirakentaja* 2.
- Niinivaara, K. 1961. Ylivalumien todennäköisestä vaihtelusta Suomessa päävesistöjen alueilla. *Teknillinen Aikakauslehti* 1/1961.
- Skaggs, R.W., van Schilfgaarde, J. (toim.) 1999. *Agricultural Drainage*. Agronomy 38. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 1328 s.
- Smedema, L. K., Vlotman, W. F., Rycroft, D. W. 2004. *Modern Land Drainage, Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems*. Balkema. Rotterdam. 447 s.
- Soveri, J. 1986. Routa ja routiminen. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) *Sovellettu hydrologia*, Luku 6 Maavedet. *Vesiyhdistys*. Helsinki. s. 94–98.
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M., Foufoula-Georgiou, E. 1992. Chapter 18: Frequency analysis of extreme events. In: Maidment, D.R. (Ed.), *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Stenberg, L. ja Vakkilainen, P. 2009. Hydrologista havaintotoimintaa pienillä valuma-alueilla Suomessa vuosina 1931-1958. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 17. Teknillinen korkeakoulu, Espoo.
- Suomen ympäristökeskus. 2004. Hertta-tietokanta.
- Suomen ympäristökeskus. 2005. Suomen vesitase – yleispiirteet 1961–1990/sadanta. SYKE/ hydrologian yksikkö.
- Suomen ympäristökeskus. 2009. <http://www.i3.ymparisto.fi/i3/tilanne/fin/routa/los.htm> Viitattu 18.3.2009.
- Vakkilainen, P. 1982. Maa-alueelta tapahtuvan haihdunnan arvioinnista. *Acta Universitatis Ouluensis. Series C Technica* No. 20. Oulun yliopisto. 146 s.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.
- Vesi- ja ympäristöhallitus. 1990. Lumen vesiarvon alueellinen ja ajallinen vaihtelu Suomessa. *Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A* 56. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki. 260 s.

Muu kirjallisuus

- Kaitera, P. 1971. Estimation of the maximum and minimum discharge in Finland. *Aqua Fennica* 1971.
- Mustonen, S.E. (toim.). 1986. *Sovellettu hydrologia*. Vesiyhdistys ry. Helsinki. 503 s.

4. Aineiden käyttäytyminen maaperässä

- Ahtiainen, M., Huttunen, P. 1995. Metsätaloustoimenpiteiden pitkäaikaisvaikutukset purovesien laatuun ja kuormaan. Julkaisussa: Saukkonen, S., Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 2. Suomen ympäristökeskus. 420 s.
- Ahtiainen, M., Huttunen, P. 1999. Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Env. Res.* 4: 101–114.
- Alahuhta, J. 2008. Selkämeren rannikkovesien tila, vesikasvillisuus ja kuormitus. Rehevöitymistarkastelu. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 9/2008. 111 s.
- Appelo, C.A.J., Postma, D. 1994. Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema. Rotterdam. 536 s.
- Aura, E., Saarela, K., Rätty, M. 2006. Savimaiden eroosio. MTT:n selvityksiä 118. MTT. Jokioinen. 32 s.
- Bergström, L., Brink, A. 1986. Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil. *Plant and Soil* 93: 333–345.
- Beven K., Germann P. 1982. Macropores and Water Flow in Soils. *Water Resources Research* 18 (5): 1311–1325.
- Bissonnais, Y. L., Singer, M. J. 1992. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6), 1898–1903.
- Bryan, R. B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32(3), 385–415.
- Bärlund, I., Tattari, S., Puustinen, M., Koskiaho, J., Yli-Halla, M., Posch, M. 2009. Soil parameter variability affecting simulated field-scale water balance, erosion and phosphorus losses. *Agricultural and Food Science* 18(3-4): 402–416.
- Burgoa, B., Wauchope, R.D. 1995. Pesticides in run-off and surface waters. Julkaisussa: Roberts, T.R., Kearney, P.C. (toim.). *Environmental behaviour of agrochemicals*. Wiley. Chichester, UK. s. 221–255.
- Cerdan O., Poesen J., Govers G., Saby N., Le Bissonnais Y., Gobin A., Vacca A., Quinton J., Auerswald K., Klik. A., Kwaad F., Roxo M.J. 2006. Sheet and Rill Erosion. Teoksessa: Boardman, J., Poesen, J. (toim.). *Soil Erosion in Europe*. Wiley. s. 501–513.
- Domenico P. A., Schwartz F. W. 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley. 824 s.
- Esala, M. 1991. Split application of nitrogen: effects of the protein in spring wheat and fate of ¹⁵N-labelled nitrogen in the soil-plant system. *Annales Agriculturae Fenniae. Seria Agrogelologia et chimica N.* 158. - Sarja Maa ja lannoitus n:o 158, 30: 219–309.
- Finér, L., Ahti, E., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Mattsson, T., Nieminen, M., Tattari, S. 2008. Metsätalouden vesistökuormituslaskelmat Kansallisen metsäohjelman valmistelua varten. Julkaisussa: Uusivuori, J., Kallio, M. ja Salminen, O. (toim.): *Vaihtoehtolaskelmat kansallisen metsäohjelman 2015 valmistelua varten*. METLAN työraportteja 75. Metsäntutkimuslaitos. s. 68–86.
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P., Koskiaho, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola, S., Vuollekoski, M., 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen ympäristö* 10.
- Flury, M., 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils - a review. *J. of Environmental Quality* 25: 25–45.
- Foster, G.R., Meyer L.D. 1972. Transport of Soil Particles by Shallow Flow. *Trans. of the ASAE* 15 (1): 99–102.

- Foster, G.R. 1982. Modeling the Erosion Process. Teoksessa: Hann, C.T., Johnson, H.P., Brakensiek D.L. (toim.). Modeling of Small Watersheds. ASAE Monograph No. 5. 533 s.
- Hendrickx, J.M.H., Flury, M. 2001. Uniform and preferential flow, mechanisms in the vadose zone. Julkaisussa: National Research Council (toim.). Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. National Academy Press. Washington, DC. 392 s.
- Jarvis, N., Larsson, M.H. 2001. Modeling macropore flow in soils: Field validation and use for management purposes. Julkaisussa: National Research Council (toim.). Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone. National Academy Press. Washington D.C. s. 189–215.
- Jauhiainen, M. 2004. Estimation of soil hydraulic properties from particle size distribution curve. Väitöskirja, Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorion julkaisuja TKK-VTR-10. 155 s.
- Järvenpää, L., Savolainen, M. 2015. Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu (2. päivitetty painos). Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2015. 191 s.
- Karjalainen, A. K., Siimes, K., Leppänen, M. T., Mannio, J. 2014. Maa- ja metsätalouden kuormittamien pintavesien haitta-aineseuranta Suomessa. Seurannan tulokset 2007 – 2012. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 38/2014. Suomen ympäristökeskus. 112 s. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/153152>
- Karvonen, T. 2003. Aineiden kulkeutuminen II –kurssiin liittyvä WWW-opetusmateriaali, Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorio. Espoo.
- Kenttämies, K., Haapanen, M. 2006. Metsätalouden toimenpiteiden aiheuttama kasvinravinteiden huuhtouminen ja kansallisen metsäohjelman suositustason vaikutus siihen. Julkaisussa: Kenttämies, K., Matsson, T. (toim.). Metsätalouden vesistökuormitus, MESUVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 816. Suomen ympäristökeskus. Helsinki. s. 83–90.
- Kenttämies, K., Matsson, T. (toim.) 2006. Suomen ympäristökeskus. Metsätalouden vesistökuormitus: MESUVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 816. Suomen ympäristökeskus.
- Kladivko, E.J., Brown, L.C., Baker, J.L. 2001. Pesticide transport to subsurface tile drains in humid regions of North America. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 31: 1–62.
- Knisel, W.G., (toim.) 1980. CREAMS: A Field Scale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Conservation Research Report No. 26. United States Department of Agriculture (USDA).
- Kronvang, B., Andersen, H. E., Larsen, S. E., Audet, J. 2013. Importance of bank erosion for sediment input, storage and export at the catchment scale. Journal of Soils and Sediments, 13(1), 230–241.
- Koivusalo, H., Lappalainen, M., Leinonen, A., Ahti, E., Joensuu, S., Laurén, A., Nieminen, M., Nevalainen, R. 2008. Miten metsätalous vaikuttaa kiintoaineen kulkeutumiseen? Vesitalous 6: 15–18.
- Konttiokari, V., Mattsoff, L. 2011. Proposal of Environmental Quality Standards for Plant Protection Products. The Finnish Environment 7/2011, 172 p. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/37029>.
- Kortelainen, P., Ahtiainen, M., Finer, L., Mattsson, T., Sallantausta, T., Saukkonen, S. 1999. Luonnonhuuhtouma metsäalueilta. Julkaisussa: Ahti, E., Granlund, H., Puranen, E. (toim.). Metsätalouden ympäristökuormitus. Tutkimusohjelman väliraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 745: 9–13.
- Kortelainen, P., Matsson, T., Finér, L., Ahtiainen, M., Saukkonen, S., Sallantausta, T. 2006. Controls on the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland. Aquatic Sciences 68: 453–468.

- Kotola, J., Nurminen, J. 2003. Kaupunkialueiden hydrologia - valunnan ja ainehuuhtouman muodostuminen rakennetuilla alueilla, osa 1: Kirjallisuustutkimus. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 7. 92 s.
- Kuisma, P. 2002. Split nitrogen fertilization with irrigation on potato. *Agricultural and Food Science in Finland* 11: 59–74.
- Kukkonen, M., Niinioja, R., Puustinen, M. 2004. Viljelykäytäntöjen vaikutus ravinnehuuhtoumiin Liperin koekentällä Pohjois-Karjalassa. Alueelliset ympäristöjulkaisut 367. Pohjois-Karjalan Ympäristökeskus.
- Laitinen, P., 2000. Torjunta-aineiden kulkeutuminen, tulokset vuosilta 1993–1998. Julkaisussa: Laitinen, P. (toim.). Torjunta-aineet peltomaassa, Huuhtoutumiskenttätutkimukset 1993–1998. Maatalouden tutkimuskeskus, Kasvinsuojelu. s. 24–45.
- Laurén, A., Mattsson, T., Kortelainen, P., Koivusalo, H., Lappalainen, M. 2008. Metsätalouden aiheuttama typpikuormitus vaihtelee. *Vesitalous* 6: 12–14.
- Leonard, R.A., W.G. Knisel, Still, D.A. 1987. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. *Transactions of the ASAE* 30 (5):1403–1418.
- Leppänen, A., Esala, M. 1995. Keväisen mineraalityypianalyysin käyttö lannoitustarpeen ennustamisessa. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 1/95. 29 s.
- Lilja, H., Turtola, E., Hyväluoma, J., Hakala, O., Puustinen, M., Uusi-Kämpä, J. 2014. Suomen peltojen karttapohjainen eroosioluokitus: karttojen kattavuus ja käyttömahdollisuudet. MTT Raportti 113. 40 s.
- Linsey, R., K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. 1949. *Applied Hydrology*. McGrawHill. New York. 689 s.
- Læg Reid, M., Bøckman, O.C., Kaarstad, O. 1999. *Agriculture, Fertilizers and the Environment*. CABI, Norsk Hydro ASA. 294 s.
- Mannnerkoski, H., Finér, L., Piirainen, S., Starr, M. 2005. Effects of clear-cutting and site preparation on the level and quality of groundwater in some headwater catchments in eastern Finland. *Forest Ecology and Management* 220: 107–117.
- Markkula, M., Tiittanen, K., Vasarainen, A. 1990. Torjunta-aineet maa- ja metsätaloudessa. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 2/90. 58 s.
- Mattsoff, L. 2005. Torjunta-aineiden maaperän eliöille aiheuttamien riskien arviointi: toistuvan käytön rajoituksen tarkentaminen. Suomen ympäristö 804. Suomen ympäristökeskus. Helsinki. 56 s.
- Mattsson, T., Finér, L., Kortelainen, P., Sallantausta, T. 2003. Brooks water quality and background leaching from unmanaged forested catchments in Finland. *Water, Air, and Soil Pollution* 147: 275–297.
- Muotka, J., Mustonen, T., Savolainen, M., Torsner, M., Björnström, T., Riihimäki, J., Vehanen, T., Yrjänä, T. 2003. Menetelmät ja koehankkeet vesiluonnon monimuotoisuuden edistämiseksi. Julkaisussa: Kerätär, K. (toim.). Pohjoisten rakennettujen vesistöjen monimuotoisuus sekä luonnonmukaiset kunnostusmenetelmät. Suomen ympäristö 627. Suomen ympäristökeskus. s. 37–46.
- Muukkonen, P., Hartikainen, H., Lahti, K., Särkelä, A., Puustinen, M., Alakukku L. 2007. Influence of no-tillage on the distribution and lability of phosphorus in Finnish clay soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 120: 299–306.
- Nearing, M.A., G.R. Foster, L.J. Lane, S.C. Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project Technology. *Trans. of the ASAE* 32 (5):1587–1593.
- Nordin, C.F., Quivey, R.S. 1971. Suspended load. Julkaisussa: Shen, H.W. (toim.). *River Mechanics*. Fort Collins, Colorado.
- Nyroos, H., Partanen-Hertell, M., Silvo, K., Kleemola, P. (toim.) 2006. Vesiensuojelun suuntaviivat vuoteen 2015. Taustaselvityksen lähtökohdat ja yhteenveto tuloksista. Suomen ympäristö 55/2006. Suomen ympäristökeskus. 68 s.

- Paasivirta, J. 1994. Torjunta-ainekemia. 2. täydennetty painos. Jyväskylän yliopisto. Jyväskylä. 208 s.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T., Vakkilainen, P. 2000. Vesitalouden säädön vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 25: 8–40.
- Paasonen-Kivekäs, M., Yli-Halla, M. 2005. A comparison of nitrogen and carbon reserves in acid sulphate and non acid sulphate soils in western Finland. *Agricultural and Food Science* 14 (1): 57–69.
- Paasonen-Kivekäs, M., Vakkilainen, P., Karvonen, T. 2008. Nutrient transport through tile drains on a clayed field. *Proceedings of the 10th international Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage*. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 16. s. 142–150.
- Peart, M.R., Walling, D.E. 1986. Fingerprinting sediment source: The example of a drainage basin in Devon, UK. In *Drainage Basin Sediment Delivery Proceedings of the Albuquerque Symposium*, August 1986. IAHS Publ. 159: 41–55.
- Peltovuori, T. 2006. Phosphorus in agricultural soils of Finland – characterization of reserves and retention in mineral soil profiles. Department of Applied Chemistry and Microbiology, University of Helsinki. Academic Dissertation. Pro Terra 26. 69 s.
- Petersen, C.T., Holm, J., Koch, C.B., Jensen, H.E., Hansen, S. 2003. Movement of pendimethalin, ioxynil and soil particles to field drainage tiles. *Pest Management Science* 59: 85–96.
- Pietiläinen, O.-P., Ekholm, P. 1992. Origin of eroded material in small agricultural drainage basin in southwestern Finland. *Aqua Fennica* 22 (2): 105–110.
- Pitkänen, J., Nuutinen, V. 1998. Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology* 9: 411–415.
- PPDB 2007. The PPDB Pesticide properties Database. The Agricultural Environment Research unit at the University of Hertfordshire, UK. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/atoz.htm>; päivitetty 23.1.2015, luettu 30.1.2015.
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiahio, J., Linjama, J. 2007. Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland. *Soil & Tillage Research* 93: 44–55.
- Rapala, J., Gustafsson, J. 2005. Pohjavedestä todetut torjunta-ainepitoisuudet vesilaitosten ongelmana. *Ympäristö ja terveys* 36: 57–63.
- Rekolainen, S. 1989. Effect of snow and soil frost melting on the concentrations of suspended solids and phosphorus in two rural watersheds in Western Finland. *Aquatic Sciences*, 51(3), 211–223.
- Rekolainen, S., Posch, M. 1993. Adapting the CREAMS model for Finnish conditions. *Nordic Hydrology* 24: 309–322.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies G.A., McCool, D.K., Yoder D.C. (toim.) 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook No. 703. USDA. 44 s.
- Roberts, T.R., Hutson, D.H., Lee, P.W., Nicholls, P.H., Plimmer, J.R. (toim.) 1998. *Metabolic pathways of agrochemicals, Part one: Herbicides and plant growth regulators*. The Royal Society of Chemistry, information services, Cambridge, UK.
- Roberts, T.R., Hutson, D.H., Lee, P.W., Nicholls, P.H., Plimmer, J.R. (toim.) 1999. *Metabolic pathways of agrochemicals, Part two: Insecticides and Fungicides*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- Saarela, I., Vuorinen, M. 2008. Turvemaiden fosforitasapaino vaatii tarkkuutta. *Maaseudun Tiede* 65 (4): 15.
- Salo, T., Lemola, R., Esala, M. 2007. National and regional net nitrogen balances in Finland in 1990–2005. *Agricultural and Food Science* 16 (4): 366–375.

- Salomaa, A. 2005. Merkkiainekokeet rinnehydrologiassa; kirjallisuustutkimus ja merkkiainekoe natriumkloridilla. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorio. Espoo.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. 1998. Lehrbuch der Bodenkunde. 14. painos. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- Schwertmann, U., Süsner, P., Nätcher, L. 1987. Protonenpuffersubstanzen in Böden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 150: 174–178.
- Seuna, P., Kauppi, L. 1981. Influence of sub-drainage on water quantity and quality in a cultivated area in Finland. Vesitutkimuslaitoksen julkaisuja 43. Vesihallitus. s. 32–47.
- Seuna, P., Vehviläinen, B. 1986. Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.). Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys ry. Helsinki. s. 226–255.
- Siimes, K., Rämö, S., Welling, L., Nikunen U., Laitinen, P. 2006. Comparison of the behaviour of three herbicides in a field experiment under bare soil conditions. Agricultural Water Management 84: 53–64.
- Sillanpää, N. 2013. Effects of suburban development on runoff generation and water quality. Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS, 160/2013. 226 s.
- Šimek, M., Virtanen, S., Křišťek, V., Simojoki, A., Yli-Halla, M. 2011. Evidence of rich microbial communities in the subsoil of a boreal acid sulphate soil conducive to greenhouse gas emissions. Agriculture, Ecosystems and Environment 140, s.113–122.
- Sippola, J. 1981. Viljelymaan typpivarat. Koetoiminta ja käytäntö 39: 51.
- Sippola, J. 1986. Maan typpivarojen mineraloituminen. Koetoiminta ja käytäntö 43: 67.
- Sippola, J., Ylänta, T. 1985. Mineral nitrogen reserves in soil and nitrogen fertilization of barley. Annales Agriculturae Fenniae 24: 125–129.
- Siren, A. 1985. Jokirantojen maaperäongelmat Etelä-Pohjanmaalla. Erillisliite 3. Teoksessa: Turunen, H. 1985. Lakeuden joet. Etelä-Pohjanmaan vesienkäytön historia. Etelä-Pohjanmaan maakuntaliitto. Kurikka. 288 s.
- Stevenson, F.J., Cole, M.A. 1999. Cycles in soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. Wiley. 428 s.
- Tattari, S., Bärlund, I., Rekolainen, S., Posch, M., Siimes, K., Tuhkanen, H-R., Yli-Halla, M. 2001. Modeling Sediment Yield and Phosphorous Transport in Finnish Clayey Soils. Trans. of the ASAE 44 (2): 297–307.
- Tattari, S., Rekolainen S. 2006. Finland. Teoksessa: Boardman, J., Poesen, J. (toim.). Soil Erosion in Europe. Wiley. West Sussex, England. s. 27–32.
- Tike 2014. Tilasto: Kasvinsuojeluaineiden käyttö maataloudessa. <http://www.maataloustilastot.fi/tilasto/4081>
- Tomlin, C. (toim.) 2003. The Pesticide Manual. 13. painos, Crop Protection Publications, The British Crop Protection Council, The Royal Society of Chemistry. UK.
- Trojan, M.D., Linden, D.R. 1992. Microrelief and rainfall effects on water and solute movement in earthworm burrows. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 727–733
- Turtola, E., Jaakkola, A. 1985. Viljelykasvin ja lannoitustason vaikutus typen ja fosforin huuhtoutumiseen savimaasta. Maatalouden Tutkimuskeskus, Tiedote 6/85. 43 s.
- Turtola, E., Paajanen, A. 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. Agricultural Water Management 28 (4): 295–310.
- Turtola, E., Alakukku, L., Uusitalo, R. 2007. Surface runoff, subsurface drainflow and soil erosion as affected by tillage in a clayed Finnish soil. Agricultural and Food Science 16: 332–351.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Alakukku, L., Mylly, M., Koivusalo, H. 2015a. Effects of terrain slope on long-term and seasonal water balances in clayey, subsurface drained agricultural fields in high latitude conditions. Agricultural Water Management, 150, 139–151.

- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Koivusalo, H. 2015b. Simulating water balance and evapotranspiration in a subsurface drained clayey agricultural field in high-latitude conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(sup1), 44-57.
- Uusitalo, R. 2004. Potential bioavailability of particulate phosphorus in runoff from arable clayey soils. *Agrifood Research Reports* 53. MTT Agrifood Research Finland. Doctoral dissertation. 99 s.
- Uusitalo, R., Turtola, E., Kauppila, T., Lilja, T. 2001. Particulate phosphorus and sediment in surface runoff and drainflow from clayey soils. *Journal of Environmental Quality* 30: 589–595.
- Vapo. 2009. Eri maankäyttömuotojen huuhtoumat. Kalvosarja 21.01.08 (Vapo Oy, Turveruukki Oy/ Pöyry).
- Villholth, K.G., Jensen K.H., Fredericia J. 1998. Flow and transport processes in a macroporous subsurface-drained glacial till soil I: Field investigations. *J. of Hydrology* 207 (1–2): 98–120.
- Vuorenmaa, J., Rekolainen, S., Lepistö, A., Kenttämies, K., Kauppila, P. 2002. Losses of nitrogen and phosphorus from agricultural and forested areas in Finland during the 1980s and 1990s. *Environmental Monitoring and Assessment* 76: 213–248.
- Vuorimaa, P., Kontro, M., Rapala, J., Gustafsson, J. 2007. Torjunta-aineiden esiintyminen pohjavedessä. *Suomen ympäristö* 42. Suomen ympäristökeskus. 111 s.
- Västilä, K., Järvelä, J. 2011. Environmentally preferable two-stage drainage channels: considerations for cohesive sediments and conveyance, *International Journal of River Basin Management*, 9:3-4, 171-180, DOI: 10.1080/15715124.2011.572888
- Warsta, L. 2007. Modelling the hydrological cycle of an agricultural field. Thesis for the degree of Lic. Sci. in Tech., Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Water Resources. Espoo. 70 s.
- Warsta, L., Taskinen, A., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. 2013. Simulation of soil erosion in a clayey, subsurface drained agricultural field with a three-dimensional FLUSH model. *Journal of Hydrology*, 498, 132-143.
- Weiler, M.H. 2001. Mechanisms controlling macropore flow during infiltration-dye tracer experiments and simulations, Diss. ETHZ No. 14237, Zürich, Sveitsi. 151 s. Saatavissa: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:24150/eth-24150-02.pdf>
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. *Agricultural Handbook* No. 537. USDA. 58 s.
- Äijö, H., Myllys, M., Nurminen, J., Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Korpelainen, E., Salo, H., Sikkilä, M., Alakukku, L., Koivusalo, H., Puustinen, M. 2014. PVO2-hanke: Salaojitusmekaniikat ja pellon vesitalouden optimointi. Loppuraportti 2014. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 31. 105 s.

Muu kirjallisuus

- Bohn, H.L., McNeal, B.L., O'Connor, G.A. 2001. *Soil Chemistry*. 3. painos. Wiley. New York. 307 s.
- Brady, N.C., Weil, R.R. 2004. *Elements of the Nature and Properties of Soils*. 2. painos. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 624 s.
- Faeh, A.O. 1997. Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation: a study based on the numerical simulation of hillslope experiments. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 150. Zürich.
- Heinonen, R., Hartikainen, H., Aura, E., Jaakkola, A., Kemppainen, E. 1992. *Maa, viljely ja ympäristö*. WSOY. Helsinki. 334 s.
- Jarvis, N.J., 1998. Modeling the impact of preferential flow on nonpoint source pollution. Julkaisussa: Selim, H.M., Ma, L. (toim.), *Physical Nonequilibrium in Soils: Modeling and Application*. Ann Arbor Press. Chelsea, MI. s. 195–221.

- Kenttämies, K., Saukkonen, S. 1996. Metsätalous ja vesistöt. Yhteistutkimusprojektin ”Metsätalouden vesistöhaitat ja niiden torjunta” (METVE) yhteenveto. MMM:n julkaisuja 1996 (4). Maa- ja metsätalousministeriö.
- Lemola, R., Turtola, E. 1998. Kasvipeitteisyys, eroosio ja ravinnekuormitus. Kirjallisuuskatsaus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, Sarja B 18. MTT. Jokioinen. 28 s.
- Mansikkaniemi, H. 1982. Maaperän eroosio intensiivisesti viljellyillä alueilla Lounais-Suomessa. Turun yliopiston maantieteen laitoksen monisteita 3. 75 s.
- McBride, M.B. 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press. New York.
- Schepers, J.S., Raun, W.R. (toim.) 2008. Nitrogen in agricultural systems. Agronomy Monograph 49. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. 965 s.
- Sparks, D.L. 1995. Environmental soil chemistry. Academic Press. San Diego. 267 s.

5. Maaperän vesitalouden järjestelyn lähtökohdat

- DVWK 1991. Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Merkblätter 220. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn.
- EY 2000. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY, annettu 23.10.2000, yhteisön vesipolitiikan puitteista. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, L 327 (22.12.2000). 72 s.
- EY 2007. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2007/60/EY, annettu 23.10.2007, tulvariskien arvioinnista ja hallinnasta. Euroopan yhteisöjen virallinen lehti, L 288 (6.11.2007). 8 s.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, The Netherlands. 189 s.
- Frauendorfer, R., Winkler, H. 1985. Der Zusammenhang zwischen Revitalisierungsmaßnahmen und der Biozonose von Fließgewässern am Beispiel der Fischerei. Teoksessa: Revitalisierung von Fließgewässern. Landschaftswasserbau, Band 5. Zweite erweiterte Auflage. Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau. s. 39–68.
- Jormola, J., Harjula, H., Sarvilinna, A. 2003. Luonnonmukainen vesirakentaminen – Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun. Suomen ympäristö 631. Suomen ympäristökeskus. 168 s.
- Järvelä, J., Helmiö, T. 2003. Ekohydrauliikka. Teoksessa: Jormola, J., Harjula, H., Sarvilinna, A. (toim.). Luonnonmukainen vesirakentaminen. Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun. Suomen ympäristökeskuksen julkaisuja, 631.
- Järvenpää, L. 2004. Tavoitetilan määrittäminen virtavesikunnostuksissa - esimerkkinä Nuuksion Myllypuro. Suomen ympäristö 737. Suomen ympäristökeskus. 96 s.
- Järvenpää, L., Savolainen, M (toim.) 2015. Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu (2. päivitetty painos). Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2015. 191 s.
- Kern, K. 1992. Rehabilitation of streams in south-west Germany. Teoksessa: Boon, P.J., Calow, P., Petts, G.E. (toim.). River conservation and management. Wiley. Chichester. s. 321–352.
- Louhi, P., Mykrä, H, Paavola, R., Huusko, A., Vehanen, T., Mäki-Petäys, A., Muotka, T. 2011. Twenty years of stream restoration in Finland: little response by benthic macroinvertebrate communities. Ecological Applications 21: 1950-1961.
- Madsen, B.L. 1995. Danish Watercourses – Ten Years with the New Watercourse Act. Miljønyt nr. 11. Ministry of Environment and Energy, Danish Environmental Protection Agency. 208 s.
- Näreaho, T., Jormola, J., Laitinen, L., Sarvilinna, A. 2006. Maatalousalueiden perattujen purojen luonnonmukainen kunnossapito. Suomen ympäristö 52. Suomen ympäristökeskus. 64 s.
- Paavolainen, M. (toim.) 1989. Maankuivatuksen historiaa. Maa- ja vesitekniiikan tuki ry. Helsinki. 216 s.

- Powell, G. E., Ward, A. D., Mecklenburg, D. E., Draper, J., and Word, W. 2007. Two-stage channel systems: Part 2, case studies. *J. Soil Water Conserv.* 62(4): 286-296.
- Päivänen, J. 2007. Suot ja suometsät – järkevän käytön perusteet. *Metsäkustannus*. Hämeenlinna. 368 s.
- Regina, K. 2015. Kirjallinen tiedonanto. 7.10.2015.
- Siitonen, N., Västilä, K., Järvelä, J. 2013. Hienojakoisen sedimentin kulkeutuminen ja kasautuminen maatalousuomissa. *Vesitalous* 54(6): 30-34.
- Skaggs, R.W., van Schilfgaarde, J. (toim.) 1999. *Agricultural Drainage*. Agronomy 38. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 1328 s.
- Tenhovuori, M. 1986. The influence of soil water potential and soil temperature on the seedling emergence of wheat and barley. *Journal of agricultural science in Finland* 58:185–190.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Alakukku, L., Myllys, M., Koivusalo, H. 2015. Effects of terrain slope on long-term and seasonal water balances in clayey, subsurface drained agricultural fields in high latitude conditions. *Agricultural Water Management*, 150: 139-151.
- USDA 2001. *Stream corridor restoration: principles, practices and processes*. Revised edition, August 2001. ISBN-0-934213-59-3.
- USDA 2007. *Two-Stage Channel Design*. Teoksessa: *National Engineering Handbook*, Part 654 *Stream Restoration Design*. Natural Resources Conservation Service.
- Vakkilainen, P. 1980. Tutkimus pellon tiivistymisen vaikutuksesta salaojituksen toimintaan. *Vesitalous* 2/1980: 23–28.
- Västilä, K., Jalonen, J., Järvelä, J. 2011. Sedimenttiprosessien vaikutukset luonnonmukaisten uomien suunnitteluun. *Vesitalous* 52(4): 28-31.
- Västilä, K., Järvelä, J. 2011. Environmentally preferable two-stage drainage channels: considerations for cohesive sediments and conveyance. *International Journal of River Basin Management* 9(3-4): 171-180.
- Västilä, K., Järvelä, J., Koivusalo, H. 2015. Flow-vegetation-sediment interaction in a cohesive compound channel. *Journal of Hydraulic Engineering* 04015034.
- Ympäristöministeriö. 2012. *Uudistunut vesilaki 2011. Keskeinen sisältö ja tärkeimmät muutokset*. Helsinki 2012. 107 s.
- Äijö, H., Myllys, M., Nurminen, J., Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Korpelainen, E., Salo, H., Sikkilä, M., Alakukku, L., Koivusalo, H., Puustinen, M. 2014. PVO2-hanke: Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi. Loppuraportti 2014. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 31. 105 s.

Muu kirjallisuus

- Aarrevaara, H. 2003. Suomen salaojituksen historia. *Salaojituksen tukisäätiö*. Helsinki. 276 s.
- Joensuu, S. 2008. Metsien kunnostusojituksen tulevaisuus. *Vesitalous* 4/2008: 25–26.
- Pajula, H., Triipponen, J-P. 2003. Selvitys Suomen kastelutilanteesta. Esimerkkialueena Varsinais-Suomi. Suomen ympäristö 629. Suomen ympäristökeskus, Lounais-Suomen ympäristökeskus. 86 s.
- Triipponen J-P., Purhonen, O. 2008. Kastelun menetelmät ja mahdollisuudet Suomessa. *Vesitalous* 4/2008: 29–30.
- Äijö, H., Siivola, L., Vakkilainen, P. 1992 (toim.). *Hyödyn ja vahingon arviointi vesitaloudessa*. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, vesitalouden laboratorio. Espoo. 560 s.

6 Peruskuivatus

- Begemann, W., Schiechl, H.M. 1994. Ingenieurbiologie: Handbuch zum ökologischen Wasser- und Erdbau. 2., neuarbeitete Auflage. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin. 203 s.
- DVWK 1991. Hydraulische Berechnung von Fließgewässern. Merkblätter 220. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. 64 s.
- EFIB 2015. European guidelines for soil and water bioengineering. European Federation of Soil and Water Bioengineering. 170 s. [<http://www.efib.org/publications/>]
- Eubanks, C. & Meadows, D. 2002. A soil bioengineering guide for streambank and lakeshore stabilization. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Technology and Development Program, San Dimas, CA. 187 s.
- Florineth, F. 2012. Pflanze statt Beton: Sichern und gestalten mit Pflanzen. Patzer, Berlin. 340 s. ISBN 978-3876171241.
- Helmiö, T. 2004. Effects of cross-sectional geometry, vegetation and ice on flow resistance and conveyance of natural rivers. Helsinki University of Technology Water Resources Publications, TKK-VTR-11. 56 s.
- Jalonen, J. 2015. Hydraulics of vegetated flows: estimating riparian plant drag with a view on laser scanning applications. Aalto University Doctoral Dissertations, 137/2015.
- Jormola, J., Harjula, H., Sarvilinna, A. 2003. Luonnonmukainen vesirakentaminen – Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun. Suomen ympäristö 631. Suomen ympäristökeskus. 168 s.
- Järvelä, J. 2004. Flow resistance in environmental channels: Focus on vegetation. Helsinki University of Technology Water Resources Publications, TKK-VTR-10. 54 s.
- Järvelä, J., Helmiö, T. 2003. Ekohydrauliikka. Julkaisussa: Jormola, J., Harjula, H., Sarvilinna, A. Luonnonmukainen vesirakentaminen – Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun. Suomen ympäristö 631. Suomen ympäristökeskus. s. 125–139.
- Järvenpää, L., Savolainen, M (toim.) 2015. Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu (2. päivitetty painos). Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2015. 191 s.
- Kaitera, P. 1949. On the melting of snow in springtime and its influence on the discharge maximum in streams and rivers in Finland. Teknillinen korkeakoulu tutkimuksia no 1.
- Kuusisto, E. 1985. Estimation of mean maximum spring runoff in Finland. Aqua Fennica 15 (15): 47–51.
- Maa- ja vesirakennus 1968. RIL 67. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki. 881 s.
- Madsen, B.L. 1995. A riverkeeper's field book. Ministry of Environment and Energy, Danish Environmental Protection Agency. 57 s.
- Näreaho, T., Jormola, J., Laitinen, L., Sarvilinna, A. 2006. Maatalousalueiden perattujen purojen luonnonmukainen kunnossapito. Suomen ympäristö 52/2006. Suomen ympäristökeskus. 64 s.
- Ollila, M. (toim.) 1999. Ylimmät vedenkorkeudet ja sortumariskit ranta-alueille rakennettaessa. Suositus alimmista rakentamiskorkeuksista. Ympäristöopas 52. Suomen ympäristökeskus, ympäristöministeriö ja maa- ja metsätalousministeriö. 54 s.
- Patt, G. 1911. Wassergeschwindigkeiten und Wassermengen. Druck von Hartman & co, Hannover.
- Seuna, P. 1967a. Silta-aukkojen mitoituksista vesiuomissa. Maataloushallituksen insinööriosasto. Maa- ja vesitekninen tutkimustoimisto. Tiedotus 1. Helsinki.
- Seuna, P. 1967b. Sillan aiheuttamasta patoumasta. Maataloushallituksen insinööriosasto. Maa- ja vesitekninen tutkimustoimisto. Tiedotus 1a. Helsinki.
- Seuna, P. 1983. Influence of physiographic factors on maximum runoff. Tiivistelmä: Aluetekijöiden vaikutus pienten alueiden ylivalumiin. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 50. Vesihallitus. 50 s.

- Studer, R. & Zeh, H. 2014. Soil bioengineering - construction type manual. Verein für Ingenieurbiologie, European Federation for Soil Bioengineering, vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich, Switzerland. 440 s. ISBN 978-3-7281-3642-8. [Open access, <http://vdf-online.ch/soil-bioengineering/>]
- Suomen ympäristökeskus 2009. Silta- ja rumpuaukkojen mitoitusohje. Julkaisematon käsikirjoitus.
- USDA 1996. Streambank and shoreline protection. Engineering field handbook. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture.
- USDA 2001. Stream corridor restoration: principles, practices and processes. Revised edition, August 2001. Saatavissa: http://www.nrcs.usda.gov/technical/stream_restoration/newtofc.htm
- Västilä, K. 2015. Flow–plant–sediment interactions: Vegetative resistance modeling and cohesive sediment processes. Aalto University Doctoral Dissertations, 220/2015.

Muu kirjallisuus

- Heino, S., Kinnunen, I., Nissinen, R.K., Pajula, H. 1990. Putkiojien suunnittelu. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja B, 3. Vesi- ja ympäristöhallitus. 72 s.
- Jormola, J., Harjula, H., Sarvilinna, A. 2003. Luonnonmukainen vesirakentaminen – Uusia näkökulmia vesistösuunnitteluun. Suomen ympäristö 631. Suomen ympäristökeskus. 168 s.
- Puustinen, M., Koskiaho, J., Jormola, J., Järvenpää, L., Karhunen, A., Mikkola-Roos, M., Pitkänen, J., Riihimäki, J., Svensberg, M., Vikberg, P. 2007. Maatalouden monivaikutteisten kosteikkojen suunnittelu ja mitoitus. Suomen ympäristö 21/2007. Suomen ympäristökeskus. 77 s.
- Rinne, V. 1945. Vesirakentajan virtausoppi. Kustannusosakeyhtiö Otava. Helsinki. 353 s.
- Ruotula, J. (toim.) 1996. Kosteikkojen ja laskeutusaltaiden suunnittelu. Suomen ympäristökeskuksen moniste 11.
- Yleinen vesitekniikka, RIL 141–1982. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. Helsinki. 400 s.

7. Salaojitus

- Karvonen, T., Vakkilainen, P. 1989. Salaojan ympärysaineen mitoitus. Vesitalous 6/1989.
- Kuusisto, E. 1984. Snow accumulation and snowmelt in Finland. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 55. Vesihallitus. Helsinki. 149 s.
- Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2002. Peltosalaojituksen laatuvaatimukset 2002. RIL 128-2002. 31 s. *Uusitaan vuonna 2016*.
- Ritzema, H.P. 2006. Drainage principles and applications. 2. painos. ILRI Publication 16. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. Wageningen. 1125 s.
- Seuna, P. 2004. Valuntasuhteet muuttuvat salaojitetulla pellolla. Vesitalous 6/2004.
- Sikkilä, M. 2014. Esipäällysteen toimivuus salaojituksessa. Maisterintutkielma. Helsingin yliopisto, Maataloustieteiden laitos. 76 s.
- Skaggs, R.W., van Schilfgaarde, J. (toim.) 1999. Agricultural Drainage. Agronomy 38. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 1328 s.
- Smedema, L. K., Vlotman, W. F., Rycroft, D. W. 2004. Modern Land Drainage, Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems. Balkema. Rotterdam. 447 s.
- Soveri, J. 1986. Routa ja routiminen. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.) Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys. Helsinki. s. 94–98.
- Turtola, E. 2000. Ojitus, muokkaus ja lannoitus ratkaisevia fosforikuormitukselle. Salaojakeskus ry:n jäsenjulkaisu 1/2000. s. 14–21.

Vlotman, W.F., Willardsson, L. S., Dierichx. 2000. Envelope design for subsurface drains. ILRI Publication 56. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI. Wageningen. 358 s.

Muu kirjallisuus

ASAE Standards 2001. American Society of Agricultural Engineers.

Lampela, E. 2014. Turvemaiden viljelyn nykytilanne ja tulevaisuuden näkymät Pohjois-Pohjanmaalla. Opinnäytetyö 41 s. Oulun ammattikorkeakoulu

Myllys, M. 1992. Physical properties of agricultural peat soils and their effects on drainage. Proceedings 9th International Peat Congress: 352-360.

Myllys, M. 1999. The effect of soil water content on the trafficability of cultivated peat soils. In: Chemical, physical and biological processes in peat soils, Jokioinen 23-27 August, 1999; abstracts / toim. L.Halko ja M.Myllys. International Peat Society. p. 61-62.

Myllys, M., Sinkkonen, M. 2004. Viljeltyjen turve- ja multamaiden pinta-ala ja alueellinen jakauma Suomessa. Suo. Mires and peat 55 3-4: 53-60

Myllys, M., Regina, K. 2014. Controlled drainage on a cultivated peat soil. Geophysical Research Abstracts 16. 1 s.

Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2013 Maahan ja veteen asennettavat kestonuoviputket. Asennusohjeet. RIL 77-2013 70 s.

Regina, K., Sheepley, J., Myllys, M. 2014. Mitigating greenhouse gas fluxes from cultivated organic soils with raised watertable. Mitigation and adaptation strategies for global change. 8 p.

Regina, K., Myllys, M. 2014. Pohjaveden tason vaikutus turvepellon kasvihuonepäästöihin. Maataloustieteen Päivät 2014, 8-9.2014 Viikki, Helsinki. Esitelmät ja posteritiivistelmät / Toim. Risto Kuisma, Nina Schulman, Hanna-Riitta Kymäläinen ja Laura Alakukku. Suomen Maataloustieteellisen seuran tiedote 31. 195 s.

Saavalainen, J. 1981. Salaojittajan käsikirja. 1A, Suomen olosuhteet kuivatusta silmälläpitäen. 116 s.

Saavalainen, J. 1981. Salaojittajan käsikirja. 2B, Salaojitusstöiden toteuttaminen. 61 s.

Saavalainen, J. 1983. Salaojittajan käsikirja. 1B, Kuivatuksen perusteet. 83 s.

Saavalainen, J. 1984. Salaojittajan käsikirja. 2 A, Salaojituksen suunnittelu. 167 s.

Saavalainen, J. 1991. Salaojittajan käsikirja. Osa 3, Salaojitusstöiden toteuttaminen, salaojitusten kunnossapito, täydennysojitus. 49 s.

Saavalainen, J. 2002. Pieni Salaojituskirja. 72 s.

Salaojakeskus 1999. Salaojien kunnossapito-opas. 62 s.

Salaojayhdistys ry. 2015. Peltosalaojitus. Helsinki. 23+2 s.

8. Säätosalaojitus

Bärlund, I., Tattari, S., Yli-Halla, M., Åström, M. 2004. Measured and simulated effects of sophisticated drainage techniques on hydrology and runoff chemistry in areas of boreal acid sulphate soils. Agricultural and Food Science 14: 98-111.

Evans, R.O., Skaggs, W., Gilliam, J.W. 1995. Controlled versus conventional drainage effects on water quality. J. Irrigation and Drainage Eng. 121 (4): 271-276.

Fausey, N., King, K.W., Baker, B.J., Cooper, R.L. 2004. Controlled drainage performance on Hotyville soil in Ohio. Julkaisussa: Cooke, R. (toim.). Proc. of the 8th International Drainage Symposium. ASAE. s. 84-88.

- Kaitera, P. 1942. Miten voin torjua kuivuutta. WSOY. 63 s.
- Keso, L. 1940. Ojaetäisyyskoe urpasavimailla. Suomen maataloustieteellisen seuran julkaisuja 42, 2. Acta Agraria Fennica. Helsinki.
- Korhonen, J., Haavanlammi, E. 2012. Hydrologinen vuosikirja 2006-2010. Suomen ympäristö 8/2012. Suomen ympäristökeskus (SYKE). 234 s.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T., Vakkilainen, P. 2000. Vesitalouden säädön vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 25: 8–40.
- Virtanen, S. 2015. Redox reactions and water quality in cultivated boreal acid sulphate soils in relation to water management. Doctoral thesis in environmental soil science 25/2015. University of Helsinki. 80 s.
- Virtanen, S., Uusi-Kämpä, J., Österholm, P., Yli-Halla, M. 2015. Controlled Drainage and Sub-Irrigation as a Method for Mitigate Acid Loading in Finnish Acid Sulfate Soils. Nordic View to Sustainable Rural Development - the 25th NJF Congress. Riika, Latvia, 16.–18.6.2015. Julkaisematon esitelmä.
- Wesström, I. 2002. Controlled drainage, Effects on subsurface runoff and nitrogen flows. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria 350. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala. 140 s.
- Wäre, M. 1947. Maan vesisuhteista ja viljelykasvien sadoista Maasojan vesitaloudellisella koekentällä vuosina 1939-1944. Maa- ja vesiteknillisiä tutkimuksia no. 5. 240 s.
- Österholm, P., Virtanen, S., Rosendahl, R., Uusi-Kämpä, J., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Mäensivu, m., Turtola, E. 2015. Groundwater management of acid sulfate soils using controlled drainage, by-pass flow prevention, and subsurface irrigation on a boreal farmland. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant A Science 65: 110-120.

Muu kirjallisuus

- Skaggs, R.W., van Schilfgaarde, J. (toim.) 1999. Agricultural Drainage. Agronomy 38. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. 1328 s.
- Smedema, L. K., Vlotman, W. F., Rycroft, D. W. 2004. Modern Land Drainage, Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems. Balkema. Rotterdam. 447 s.

9. Maatalousmaan kastelu

- Aslyng, H.C. 1984. Soil water capacity, climate and plant production. The development and future of irrigation. Julkaisussa: Linnér, H. 1984 (toim.). Proceedings of North-Western European Conference. NJF-utredning nr 16. s. 2–39.
- Dorenbos, J., Prit, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and drainage paper 24. FAO, Rome. 156 s.
- Hooli, J. 1971. Säätekijöiden vaikutuksesta viljelykasvien satoihin ja vesitalouteen. Teknillinen korkeakoulu, Tieteellisiä julkaisuja 35, Espoo.
- Jaakkonen, A-K., Mattila, P. 2012. Maatalouslaskenta 2010. Kastelu avomaalla ja energia. Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus Tike.
- Järvenpää, L., Savolainen, M. (toim.) 2015. Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu (2. päivitetty painos). Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2015. 191 s.
- Kara, O., Pälikkö, E. 1975. Sadetusopas. Timokarin Kustannus, Forssa. 129 s.
- Laukala, H. 1976. Kastelun yleisjärjestely Kirkkojoen valuma-alueella. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. Espoo. 104 s.
- Pajula, H., Triipponen, J-P. 2003. Selvitys Suomen kastelutilanteesta. Esimerkkialueena Varsinais-Suomi. Suomen ympäristö 629. Suomen ympäristökeskus, Lounais-Suomen ympäristökeskus. 86 s.

ICID 2009. International Commission on Irrigation and Drainage. Kotisivut www.icid.org luettu 29.4.2009.

ICID 2015. Annual Report 2014-15. www.icid.org. Luettu 20.10.2015

Muu kirjallisuus

Aslyng, H.C. 1978. Vanding i jordbruget. Kulturteknik II, 4 udg. DSR Forlag. Den kgl. Vet.- og Landbohøjskolen. 167 s.

Bailey, R. 1990. Irrigated crops and their management. Farming Press, UK. 192 p.

Johansson, W., Linnér, H. 1977. Bevattning. Behov – Effekter – Teknik. LTs förlag. 141 s.

Linnér, H. (toim.) 1984. Proceedings of the North-Western European Irrigation conference. NJF-utredning nr 16. 214 p.

Linnér, H. 1984. Markfuktighetens inflytande på evapotranspiration, tillväxt, näringsupptagning, avkastning och kvalitet hos potatis. Rapport 142. Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet. 153 s.

Persson, R. 1984. Vattenmagasin för bevattning. Avdelningen för lantbrukets hydroteknik, Sveriges Lantbruksuniversitet, Rapport 139. 57 s.

Postel, S. 2000. Konstbevattnat jordbruk i omvandling. Tillståndet i världen 2000. Naturvårdsverket. s. 50–71.

10. Metsäojitus ja vesiensuojelu

Ahti, E., Päivänen, J., Vuollekoski, M. 1988. Kunnostusojitus. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 308: 46–55.

Heikurainen, L. 1960. Metsäojitus ja sen perusteet. WSOY. Porvoo – Helsinki. 378 s.

Heikurainen, L. 1973. Soiden metsänkasvatuskelpoisuuden laskentamenetelmä. Acta Forestalia Fennica 131: 1–35.

Huikari, O. 1958. Metsäojituksen koneellistamisesta. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 50(5): 1–93.

Hökkä, H., Kaunisto, S., Korhonen, K.T., Päivänen, J., Reinikainen, A., Tomppo, E. 2002. Suomen suometsät 1951–1994. Metsätieteen aikakauskirja 2B/2002: 201–357.

Joensuu, S. 1999. Ojitettujen soiden puuntuotanto ja ympäristöhoito. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki. 50 s.

Joensuu, S. 2002. Effects of ditch network maintenance and sedimentation ponds on export loads of suspended solids and nutrients from peatland forests. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 868:1–83.

Joensuu, S., Makkonen, T., Matila, A. 2004. Metsätalouden vesiensuojelu. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Helsinki. 47 s.

Kenttämies, K. 2003. Tilanne ja tavoitteet metsätalouden vesistökuormituksen vähentämiseksi. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 886. s. 9–16.

Korhonen, K.T., Heikkinen, J., Henttonen, H., Ihalainen, A., Pitkänen, J., Tuomainen, T. 2006. Suomen metsävarat 2004–2005. Metsätieteen aikakauskirja 1B/2006: 183–221.

Laine, J., Päivänen, J., Vasander, H. 2002. Metsänkasvatuksen erityispiirteet turvemilla. Tapion taskukirja, 24. uudistettu painos. Metsälehti Kustannus. s. 217–232.

Laine, J., Penttilä, T., Kojola, S., Hökkä, H., Ahti, E., Minkkinen, K., Nieminen, M. 2008. Metsänkasvatuksen erityispiirteet turvemilla. Tapion taskukirja, 25. uudistettu painos, Metsäkustannus. Hämeenlinna. s. 207–218.

Laine, J., Vasander, H. 2005. Suotyypit ja niiden tunnistaminen. Metsäkustannus. 110 s.

- Laine, J., Vasander, H., Hotanen, J.-P., Nousiainen, H., Saarinen M., Penttilä, T. 2012. Suotyypit ja turvekankaat - opas kasvupaikkojen tunnistamiseen. Metsäkustannus Oy. 160 s. + dvd-liite.
- Lukkala, O.J. 1931. Metsäojituksen oppikirja. Keskusmetsäseura Tapio. Helsinki. 258 s.
- Lukkala, O.J. 1939. Soiden metsäojituskelpoisuus. Keskusmetsäseura Tapio. Helsinki. 48 s.
- Maa- ja metsätalousministeriö 1999. Kansallinen metsäohjelma 2010. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2/1999. 36 s.
- Metsätalouden ympäristöopas 2004. Metsähallitus. Edita Prima. 159 s.
- Metsätalastollinen vuosikirja 2002. SVT maa-, metsä- ja kalatalous 2002: 45. Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus. 378 s.
- Niskanen, M. 1980. Metsäojitus. Teoksessa: Metsänparannustekniikka ja -koneet. Metsänparannussäätiö. Hämeenlinna. s.17–25.
- Nuutinen, T., Hirvelä, H., Hynynen, J., Härkönen, K., Hökkä, H., Korhonen, K.T., Salminen, O. 2000. The role of peatlands in Finnish wood production – analysis based on large-scale forest scenario modeling. *Silva Fennica* 34(2): 131–153.
- Nyroos, H., Partanen-Hertell, M., Silvo, K., Kleemola, P. (toim.) 2006. Vesiensuojelun suuntaviivat vuoteen 2015. Taustaselvityksen lähtökohdat ja yhteenveto tuloksista. Suomen ympäristö 55/2006: 1–68.
- Päivänen, J. 1990. Suomensät ja niiden hoito. Kirjayhtymä. Helsinki. 231 s.
- Päivänen, J. 1994a. Kunnostusojitettavien kohteiden valinta ja kunnostusmenetelmät. Työtehoseuran metsätiedote 533: 1–4.
- Päivänen, J. 1994b. Metsänparannuslaki ojituksen ja ojitusaluemetsien kunnostuksen suuntaajana. Työtehoseuran metsätiedote 530: 1–4.
- Päivänen, J. 2007. Suot ja suomensät – järkevän käytön perusteet. Metsäkustannus. Hämeenlinna. 368 s.
- Päivänen, J., Ahti, E. 1988. Ditch cleaning and additional ditching in peatland forestry – Effect on ground water level. Suomen Akatemian julkaisuja 4. s. 184–189.
- Päivänen, J., Sarkkola, S. 2002. Ensiharvennuksen ja kunnostusojituksen vaikutus varputurvekankaan männikön kuivatustilaan. *Metsätieteen aikauskirja* 4/2002: 634–636.
- Päivänen, J., Taipale, J. 1979. Turvesuon sarkaojien kaivu. *Metsätehon seloste* 13/1979: 1–20.
- Sallantaus, T., Vasander, H., Laine, J. 1998. Metsätalouden vesistöhaittojen torjuminen ojitetuista soista muodostettujen puskurivyöhykkeiden avulla. *Suo* 49 (4): 125–133.
- Silvan, N. 2003. Ennallistettujen suopuskurit metsätalouden vesistökuormituksen torjunnassa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 886: 69–76.
- Silvan, N. 2004. Nutrient retention in a restored peatland buffer. Helsingin yliopiston Metsäekologian laitoksen julkaisuja 32: 1–44.

Muu kirjallisuus

- Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen, M., Murtovaara, I. (toim.) 2005. Suosta metsäksi. Suomensien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947. s. 1–376.
- Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille 2007. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Metsäkustannus. Helsinki. 50 s.
- Päivänen, J. 2008. Soiden metsätaloudellinen käyttöönotto. Teoksessa: Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (toim.) Suomi – Suomea. Soiden ja turpeen tutkimus sekä kestävä käyttö. Suoseura ja Maahenki. Helsinki. s. 96–100.
- Päivänen, J., Sarkkola, S. 2008. Suomensien hoito ja kasvatusta. Teoksessa: Korhonen, R., Korpela, L., Sarkkola, S. (toim.) Suomi – Suomea. Soiden ja turpeen tutkimus sekä kestävä käyttö. Suoseura ja Maahenki. s. 163–173.

11. Turvetuotantoalueiden ojitus ja vesiensuojelu

- Alahuhta, J. 2008. Selkämeren rannikkovesien tila, vesikasvillisuus ja kuormitus. Rehevöitymistarkastelu. Lounais-Suomen ympäristökeskuksen raportteja 9/2008. Turku. 111 s.
- Clymo, R. S. 1987. The ecology of peatlands. *Sci. Prog., Oxf.* 71: 593–614.
- Hadzic, M., Postila, H., Österholm, P., Nystrand M., Pahkakangas, S., Karppinen, A., Arola, M., Nilivaara-Koskela, R., Häkkinen, K., Saukkoriipi, J., Kunas, S. ja Ihme, R. 2014. Sulfaattimailla syntyvän happaman kuormituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät – SuHE-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2014. 88 s.
- Heikkinen, K., Ihme, R., Lakso, E. 1994. Ravinteiden, orgaanisten aineiden ja raudan pidentymiseen johtavat prosessit pintavalutuskentällä. Vesi- ja ympäristöhallitus, julkaisusarja A. 85 s.
- Hiljanen, R., Rinttilä, R. 1998. Lietteepidätintutkimus Haapaveden Piipsannevalla 1997. Vapo Oy Energia. 32 s.
- Ihme, R. 1994. Pintavalutus turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistuksessa. VTT julkaisuja 798. 140 s.
- Karjalainen, S.-M., Klöve, B., Heikkinen, K., Kettunen, A., Amundsen, C.-E. 2003. Phosphate sorption properties of northern wetland soils. Julkaisussa: Proc. of the Int. Conference on Constructed and Riverine Wetlands for Optimal Control of Wastewater at Catchment Scale. September 29–October 2, Tartu, Estonia. Mander, Ü., Vohla, C., Poom, A. (toim.); Publicationes Instituti Geographici, Universitatis Tartuensis 94, University of Tartu. s. 269–273.
- Karppinen, A., Postila, H. (edited). 2015. The formation of peat extraction related water pollution and its management opportunities – Final report of the SulKa project. Reports of the Finnish Environment Institute 23/2015. 126 s.
- Kempainen, S., Lippo, H., Hiljanen, R., Selin, P. 1998. Haihdutus ja maaperäimeytyminen turvetuotannon vesienkäsittelyssä. METLA tiedonantoja 687. 98 s.
- Kvæerner, J., Klöve, B. 2006. Tracing sources of summer streamflow in boreal headwaters using isotopic signatures and water geochemical components. *Journal of Hydrology* 331: 186–204.
- Klöve, B. 1997. Environmental impact of peat mining; development of storm water treatment methods. Doctoral dissertation. Report No 1020, Lund University. Lund, Sweden. 159 s.
- Klöve, B. 1998. Erosion and sediment delivery from peat mines. *Soil & Tillage Research*, 45: 199–216.
- Klöve, B. 2001. Characteristics of nitrogen and phosphorus loads in peat mining wastewater. *Water Research* 35 (10): 2353–2362.
- Klöve, B., Bengtsson, L. 1999. Runoff generation in a plough-drained cutover fen in Central Finland. *Journal of Hydrology* 218: 157–168.
- Marja-aho, J., Koskinen, K. 1989. Turvetuotannon vesistövaikutukset. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja 36. Vesi- ja ympäristöhallitus. 278 s.
- Marttila, M. 2005. Virtaaman säätö ja kiintoaineen kulkeutuminen turvetuotannon uomissa. Diplomityö. Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikka, Vesi- ja ympäristötekniikan laboratorio. 125 s.
- Marttila, H., Klöve, B. 2008. Erosion and deposition of peat sediment. *Water Resources Research*, 44 (6).
- Marttila, H., Klöve, B. 2009. Retention of sediment and nutrient loads with peak runoff control. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 134(2), 210–216.
- Postila, H., Heikkinen, K., Saukkoriipi, J., Karjalainen, S.-M., Kuoppala, M., Härkönen, J., Visuri, M., Ihme, R., Klöve, B. 2011. Turvetuotannon valumavesien ympärivuotinen käsittely – Tukos-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristö 30/2011. 155 s.

- Postila, H., Saukkoriipi, J., Heikkinen, K., Karjalainen, S-K., Kuoppala, M., Marttila, H., Kløve, B. 2014. Can treatment wetlands be constructed on drained peatlands for efficient purification of peat extraction runoff? *Geoderma*, 228-229, 33-34.
- Ronkanen, A.K., Kløve, B. 2007. Use of stabile isotopes and tracers to detect preferential flow patterns in a peatland treating municipal wastewater. *Journal of Hydrology* 347: 418–429.
- Rossi, P. M., Ala-aho P., Ronkanen, A-K., Kløve, B., 2012. Groundwater–surface water interaction between an esker aquifer and a drained fen. *Journal of Hydrology* 432-433: 52-60.
- Rossi P. M., Ala-aho P., Doherty J., Kløve B. 2014. Impact of peatland drainage and restoration on esker groundwater resources: modeling future scenarios for management. *Hydrogeology Journal*. *Hydrogeology Journal* 22 (5), 1131-1145.
- Röpelinen, J. 2001. Tuotantokentällä tehtävien toimenpiteiden vaikutus turvetuotannon valumavesien määrään ja laatuun. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Oulun yliopisto. 173 s.
- Saarinen, T., Mohammadighavam, S., Marttila, H., Kløve, B. 2013. Impact of peatland forestry on runoff water quality in areas with sulphide-bearing sediments- how to avoid acid surges. *Forest Ecology and Management* 293, 17–28.
- Saarinen, T. Celebi, A., Kløve, B. 2013 Variation of water acidity with land use and hydrology. *Boreal Environment Research* 18, 359-372.
- Sallantausta, T. 1983. Turvetuotannon vesistökuormitus. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Energiaosasto. Sarja D:29. 122 s.
- Savolainen, M. Heikkinen, K., Ihme, R. 1996. Turvetuotannon vesiensuojelu. Suomen ympäristöopas 6. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus. 84 s.
- Selin, P. 1999. Turvevarojen teollinen käyttö ja suopohjien hyödyntäminen Suomessa. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 79. Jyväskylän yliopisto. 239 s.
- Selin, P., Koskinen, K. 1985. Laskeutusaltaiden vaikutus turvetuotantoalueiden vesistökuormitukseen. *Tiedotus* 262. Vesihallitus. 112 s.
- Selin, P., Marja-aho, J., Madekivi, O. 1994. Aqua Peat 95. Uusia menetelmiä turvetuotannon vesienkäsittelyyn. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Energiaosasto, katsauksia B182. s. 1–195.
- Svahnäck, L. 2007. Precipitation-induced runoff and leaching from milled peat extraction mires by peat types: a comparative method for estimating the loading of water bodies during peat production. PhD-thesis No. 200 of the Department of Geology, University of Helsinki.
- Tolkkinen, M., Marttila, H., Saukkoriipi, J., Martinmäki, K., Tammela, S., Tertsunen, J., Heikkinen, K., Tuohino, J., Ihme, R., Kløve B. pH-levels in intensively drained and peatland dominated river basin: paleolimnological approach to detect impacts of past land use. 2014. *Ecological Engineering*, 64, 367-376.
- Tuukkanen T., Marttila H., Kløve, B. 2014. Effect of soil properties on peat erosion and suspended sediment delivery in peat extraction sites. *Water Resources Research* 50(4), 3523-3535.
- Unkuri, J. 1998. Mittauksia Kyrö- ja Valkiannevalle vuonna 1998. Julkaisematon tutkimus.
- Ympäristöministeriö 2003. Turvetuotannon ympäristönsuojeluohje 19.9.2003. Ympäristöministeriön moniste117. 116 s.
- Ympäristöministeriö 2013. Turvetuotannon ympäristönsuojeluohje. Ympäristöhallinnon ohjeita 2 | 2013. 81 s.
- Ympäristöministeriö 2015. Turvetuotannon ympäristönsuojeluohje. Ympäristöhallinnon ohjeita 2 | 2015. 92 s.

Muu kirjallisuus

- Marttila, H. Kløve. B. 2009. Retention of sediment and nutrient loads with peak runoff control *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135 (2): 210–216.

- Ronkanen, A.K., Kløve, B. 2007. Use of stabile isotopes and tracers to detect preferential flow patterns in a peatland treating municipal wastewater. *Journal of Hydrology* 347: 418–429.
- Ronkanen, A.K., Kløve, B. 2008. Hydraulics and flow modelling of water treatment wetlands constructed on peatlands in Northern Finland. *Water Research* 42 (14): 3826–3836.
- Ronkanen, A.K., Kløve, B. 2009. Long-term phosphorus and nitrogen removal processes and flow paths in Northern constructed peatlands. *Ecological Engineering* 35: 843–855.
- Seuna, P. 1986. Ihmisen toiminnan vaikutus hydrologiseen kiertoon. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.). *Sovellettu hydrologia. Vesiyhdistys*. Helsinki. s. 387–408.
- Vesitalous-lehti 1/2009. Turvetuotannon vesiensuojelu.

12. Ojitushankkeiden kustannukset ja hyödyt

- Boadway, R.W., Bruce, N. 1986. *Welfare Economics*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, Great Britain. 344 s.
- Dorfman, R. 1996. Why Benefit-Cost Analysis is Widely Disregarded and What to Do About It? *Interfases* 26: s. 1–6.
- Gittinger, J.P. 1989. *Economic Analysis of Agricultural Projects*. 2nd ed. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, USA.
- Haataja, K. 2000. Säättösalaojituksen ja salaojakastelun kustannukset ja hyödyt. Maatalouden taloudellisen tutkimuslaitoksen selvityksiä 5/2000. 33 s.
- Haataja, K., Peltola, J. 2001. Salaojituksen kannattavuus Suomessa. Maatalouden taloudellisen tutkimuslaitoksen selvityksiä 20/2001. 39 s.
- Hanley, N.D. 1991. *Farming and the Countryside. An Economic Analysis of External Costs and Benefits*. CAB International, Great Britain.
- Mitchell, R.C., Carson, R.T. 1989. *Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method*. Resources for the Future. Washington D. C., USA.
- Morrison, M.D., Blamey, R.K., Bennett, J.W., Louviere, J.J. 1996. A comparison of stated preference techniques for estimating environmental values. Research Report No. 1. The School of Economics and Management, University College, The University of New South Wales, Canberra, Australia.
- Pitkänen, M., Tiainen, J. 2000. Maatalous ja luonnon monimuotoisuus. BirdLife Suomen julkaisuja no 1. Helsinki. 101 s.
- Randall, A. 1999. Why Benefits and Costs Matter? *CHOICES*, Second Quarter: 38–41.
- Sipiläinen, T., Ryytänen, V. 1987. Salaojituksen kannattavuuteen ja ojitushalukkuuteen vaikuttavat tekijät. Helsingin yliopiston maatalousekonomian laitoksen julkaisuja 25. 132 s.
- Vehkasalo, V. 1999. Ympäristötuen yhteiskunnallinen kannattavuus. Julkaisussa: Maatalouden ympäristöohjelma 1995–1999:n taloudellinen analyysi. Ympäristötukijärjestelmä ja tulevaisuus -tutkimuksen loppuraportti. 1999. Maatalouden taloudellinen tutkimuslaitos. Julkaisuja 90. s. 42–77.
- Vesihallitus 1986. Maankuivatukseen suunnittelu, osa I tekstiosia ja osa II liitteet. Tiedotus 278. 2 41 s.

Muu kirjallisuus

- Aho, T. 1989. Investointilaskelmat. *Ekonomia-sarja* 76. Vaasa. 317 s.
- Doll, J.P., Orazem, F. 1984. *Production economics. Theory with applications*. 2nd ed. USA. 470 s.
- Isotalo ym. 1982. Maaperän rakenteesta ja maastotutkimusmenetelmistä. Tiedotus 219. Vesihallitus. 109 s.

- Järvenpää, L., Savolainen, M. (toim.) 2015. Maankuivatuksen ja kastelun suunnittelu (2. päivitetty painos). Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2015. 191 s.
- Karttunen, J., Mattila, P., Myyrä, S., Uusitalo, P. 2002. Esteiden aiheuttamien haittojen arvo peltoviljelyssä. Maa- ja elintarviketalous 14. MTT. 59 s.
- Klemola, E., Kaila, R., Laaksonen, K., Kirkkari, A-M. 2002. Lohkon koon ja muodon vaikutukset työaikaan. Työtehoseuran maataloustiedote (545).
- Linner, H. 1983. Vattenfaktorns inflytande på skördevariationen. Från: Skördevariationer – orsaker, effekter och motåtgärder. Konsulentavdelningens rapporter. Allmänt 57. Sveriges lantbruksuniversitet. Uppsala.
- Leppiniemi, J., Puttonen, V. 1996. Yrityksen rahoitus. Ekonomia-sarja. WSOY.
- Myyrä, S. 2002. Tilusrakenteen vaikutus tuotannon järjestämiseen ja kannattavuuteen. MTT Taloustutkimus. Tutkimuksia 253/2002. 35 s.
- Myyrä, S., Pietola, K. 2002. Economic importance of parcel structure on Finnish farms. Agricultural and Food Science in Finland 11 (3): 163–173.
- Pentti, S. 2003. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. Työtehoseuran maataloustiedote 7/2003 (558). 12 s.
- ProAgria Maaseutukeskusten Liitto 2003. Mallilaskelmia maataloudesta 2003. ProAgria Maaseutukeskusten Liiton julkaisuja no 999. 48 s.
- Saavalainen, J. 1984. Salaojittajan käsikirja osa IIA. Salaojakoulutuksen kannatusyhdistys. Helsinki. 167 s.
- Sipiläinen, T. 1992. Maanviljelijöiden pitkävaikutteiset investointipäätökset: esimerkkinä salaojitus. Maanviljelystalouden lisensiaattityö. Helsingin yliopiston maatalousekonomian laitos. Helsinki. 172 s.
- Tuononen, E. 1982. Peruskuivatuksen hyödynarviointi ja kustannusten osittelu. Tiedotus 217. Vesihallitus. 147 s.
- Turkki, A. 2002. Maatalouden liiketaloustieteen perusteet. Helsingin yliopisto. Taloustieteen laitoksen monistesarja nro 2/2002.
- Turkki, A. 2003. Tuotantoekonomia. Helsingin yliopisto. Taloustieteen laitoksen monistesarja 4/2003.
- Ylätaalo, M., Mäkinen, H. 2001. Investoinnit, rahoitus ja maksuvalmius. Helsingin yliopisto. Taloustieteen laitoksen luentomoniste.
- Äijö, H., Siivola, L., Vakkilainen, P. (toim.) 1992 . Hyödyn ja vahingon arviointi vesitaloudessa. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, vesitalouden laboratorio. Espoo. 560 s.

13. Matemaattisen mallit maan vesi- ja ravinnetalouden säädössä

- Aslyng, H.C., Hansen, S. 1982. Water balance and crop production simulation. Model WATCROS for local and regional application. Hydrotech. Laboratory, The Royal Vet. and Agr. Univ., Copenhagen. 200 s.
- Brevé, M.A. 1994. Modelling the movement and fate of nitrogen in artificially drained soils. Ph.D. thesis. North Carolina State University. Raleigh, N.C.
- Brevé, M.A., Skaggs, R. W. Gilliam, J. W., Parsons, J. E., Mohammad, A.T., Chescheir, G. M., Evans, R.O. 1997. Field testing of DRAINMOD-N. Transactions of the ASAE 40 (4): 1077–1085.
- Chittaranjan, C., Ellsworth, T.R., Valocchi, A.J., Boast, C.W. 1997. An improved dual porosity model for chemical transport in macroporous soils. J. of Hydrology 193: 270–292.

- Wit, C.T. de. Goudriaan J., van Laar H.H., Penning de Vries F.W.T., Rabbinge R., van Keulen H., Sibma L., de Jonge C. 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. *Simulation Monographs*. Pudoc. Wageningen (Netherlands). 141 p.
- Eckersten, H., Gärdenäs, A., Jansson, P-E. 1995. Modelling Seasonal Nitrogen, Carbon, Water and Heat Dynamics of the Solling Spruce Stand. *Ecological Modelling* 83: 119–129.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, The Netherlands. 189 p.
- Gerke, H.H., van Genuchten, M.Th., 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resour. Res.* 29: 305–319.
- Hahti, K., Warsta, L., Kokkonen, T., Younis, B. A., Koivusalo, H., 2016. Distributed hydrological modeling with channel network flow of a forestry drained peatland site. *Water Resour. Res.*, 52, 246–263.
- Jansson, P-E. 1980. SOIL water and heat model. II. Field studies and applications. - *Acta Universitatis Upsaliensis*. Abstract of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science 568. 26 s.
- Jansson, P.E., Karlberg, L. 2005. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere system. Technical description of the Coup-model. Saatavissa: <http://www.lwr.kth.se/vara%20datorprogram/CoupModel/index.htm>
- Jarvis, N.J. 1998. Modeling the impact of preferential flow on nonpoint source pollution. Julkaisussa: Selim, H.M., Ma, L. (toim.). *Physical Nonequilibrium in Soils: Modeling and Application*, Ann Arbor Press. Chelsea, MI. s. 195–221.
- Jarvis, N., Larsson, M.H. 2001. Modeling macropore flow in soils: Field validation and use for management purposes. Julkaisussa: Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., USA. s. 189–215.
- Karvonen, T. 1988. A model for predicting the effect of drainage on soil moisture, soil temperature and crop yield. Väitöskirja. Publications of the laboratory of hydrology and water resources engineering 1988/1. Teknillinen korkeakoulu. Espoo. 214 s.
- Karvonen, T., Kleemola, J. 1995. CROPWATN: Prediction of water and nitrogen limited crop production. Julkaisussa: Kabat, P., Marshall, B., van den Broek, B.J., Vos, J., van Keulen, H. (toim.). *Modelling and Parameterization of the Soil-Plant-Atmosphere System: A Comparison of Potato Growth Models*. Wageningen Pers. Wageningen, The Netherlands. s. 335–369.
- Kleemola, J. 1990. Kauran ja perunan sadon ennustaminen dynaamisella satomallilla. Pro Gradu -työ, Helsingin yliopiston kasvinviljelytieteen laitos.
- Kleemola, J., Karvonen, T. 1996. Modelling growth and nitrogen balance of barley under ambient and future conditions. *Agr. and Food Sci. in Finland* 5: 299–310.
- Kleemola, J., Teittinen, M., Karvonen, T. 1996. Modelling crop growth and biomass partitioning to shoots and roots in relation to nitrogen and water availability, using a maximization principle. I. Model description and validation. *Plant and Soil* 185:101–111.
- Kleemola, J., Teittinen, M., Karvonen, T. 1998. Modelling crop growth and biomass partitioning to shoots and roots in relation to nitrogen and water availability, using a maximization principle. II. Simulation of crop nitrogen balance. *European Journal of Agronomy* 8 (3–4): 191–204.
- Koivusalo, H., Heikinheimo, M., Karvonen, T. 2001. Test of a simple two-layer parameterisation to simulate the energy balance and temperature of a snow pack. *Theor. Appl. Climatol.* 70: 65–79.
- Kukkonen, M., Niinioja, R., Puustinen, M. 2004. Viljelykäytäntöjen vaikutus ravinnehuuhtoumiin Liperin koekentällä Pohjois-Karjalassa. Alueelliset ympäristöjulkaisut 367, Pohjois-Karjalan Ympäristökeskus.

- Lemola, R., Turtola, E. 1998. Kasvipeitteisyys, eroosio ja ravinnekuormitus. Kirjallisuuskatsaus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja B 18. 28 s.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T., Vakkilainen, P. 2000. Vesitalouden säädön vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote n:o 25, s. 8–40.
- Paasonen-Kivekäs M., Vakkilainen, P., Karvonen, T., 2008. Nutrient transport through tile drains on a clayey field. Proceedings of the 10th international drainage workshop of ICID working group on drainage. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 16. s. 142–152.
- Peltovuori, T. 2006. Phosphorus in agricultural soils of Finland – characterization of reserves and retention in mineral soil profiles. Department of Applied Chemistry and Microbiology, University of Helsinki. Academic Dissertation. Pro Terra 26. 69 s.
- Puustinen, M. 1999. Viljelymenetelmien vaikutus pintaeroosioon ja ravinteiden huuhtoutumiseen. Suomen ympäristö 285. Suomen ympäristökeskus. 116 s.
- Rekolainen, S., Posch, M. 1993. Adapting the CREAMS model for Finnish conditions. *Nordic Hydrology* 24: 309–322.
- Salo, H., Warsta, L., Turunen, M., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Koivusalo, H. 2015. Development and application of a solute transport model to describe field scale nitrogen processes during autumn rains. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 03/2015; 65(sup1):30–43.
- Siimes, K., Tuhkanen, H., Yli-Halla, M. 1998. Simulation of the phosphorus cycle in soil by ICECREAM. Julkaisussa: Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: an OECD sponsored workshop, Antrim, Northern Ireland, 16.–19.6.1998. Workshop paper abstracts & poster papers. s. 38–39.
- Siimes, K., Alakukku, L. 2008. Torjunta-aineiden hajoamisen ja huuhtoutumisen mallinnus. Julkaisussa: Ruuttunen, P., Laitinen, P. (toim.). Torjunta-aineiden toistuvan käytön ympäristöriskit perunanviljelyssä. Maa- ja elintarviketalous 119. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. s. 93–120.
- Simunek, J., Jarvis, N., van Genuchten, M.Th., Gärdenäs, A. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *J. of Hydrology* 272: 14–35.
- Skaggs, R. W. 1978. A water management model for shallow water table soils. Report No. 134. Raleigh, N.C: North Carolina State University, North Carolina Water Resources Research Institute.
- Skaggs, R. 1980. A water management model for artificially drained soils. Tech. Bul. No. 267. North Carolina Agricultural Research Service. 54 s.
- Spitters, C.J.T. 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agr. and For. Meteorology* 38: 231–242.
- Tamm, T. 2002. Effects of meteorological conditions and water management on hydrological processes in agricultural fields: Parameterization and modeling of Estonian case studies. Väitöskirja, TKK:n vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorion julkaisuja TKK-VTR-5. 192 s.
- Taskinen, A., Bruen M., 2007. Incremental distributed modelling investigation in a small agricultural catchment: 2. Erosion and phosphorus transport, *Hydrol. Proc.*, 21: 92–102.
- Tattari, S., Bärlund, I., Rekolainen, S., Posch, M., Siimes, K., Tuhkanen, H-R., Yli-Halla, M. 2001. Modeling Sediment Yield and Phosphorous Transport in Finnish Clayey Soils. *Trans. of the ASAE* 44 (2): 297–307.
- Turtola, E., Lemola, R. 2000. Vesistökuormitus kyntämättä viljelyssä. Loppuraportti tutkimuksesta 'Ympäristötuen kasvipeitteisyysvaatimuksen ympäristövaikutukset syyssänkimuokkauksessa, aurattoman viljelyn suorat ravinnepestöt'. Maatalouden tutkimuskeskus MTT. 22 s.

- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Myllys, M., Alakukku, L., Äijö, H., Puustinen, M., Koivusalo, H. 2013. Modeling water balance and effects of different subsurface drainage methods on water outflow components in a clayey agricultural field in boreal conditions. *Agric. Water Manag.* 121: 135–148.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Alakukku, L., Myllys, M., Koivusalo, H. 2015. Effects of terrain slope on long-term and seasonal water balances in clayey, subsurface drained agricultural fields in high latitude conditions. *Agric. Water Manag.* 150: 139–151.
- Uusitalo, R., Turtola, E., Kauppila, T., Lilja, T. 2001. Particulate phosphorus and sediment in surface runoff and drainflow from clayey soils. *Journal of Environmental Quality* 30: 589–595.
- Uusitalo, R., Yli-Halla, M., Turtola, E. 2000. Suspended soil as a source of potentially bioavailable phosphorus in surface runoff waters from clay soils. *Water Research* 34: 2477–2482.
- Vakkilainen, P. 1982. Maa-alueelta tapahtuvan haihdunnan arvioinnista. *Acta Universitatis Ouluensis. Series C Technica* No. 20. Oulun yliopisto. 146 s.
- van Dam, J. C. 2000. Field-Scale Water Flow and Solute Transport. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. 167 s.
- van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., van Diepen, C. A. 1997. Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources, Wageningen Agricultural University. 167 s.
- van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F., Kroes, J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.* 7: 640–653.
- van Diepen, C.A., Rappoldt, C., Wolf, J., van Keulen, H. 1988. Crop Growth Simulation Model WOFOST. Documentation v. 4.1, Centre for World food studies, Wageningen, The Netherlands. 299 s.
- van Genuchten, T. 1980. A closed-formed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–989.
- van Keulen H. 1986. Crop yield and nutrient requirements. *Julkaisussa: van Keulen, J. (toim.). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Simulation monographs.* Pudoc, Wageningen. s. 155–180.
- Virkajärvi, P., Uusi-Kämppe, J. (toim.) 2006. Laitumen ja suojava-yöhykkeiden ravinnekierto ja ympäristökuormitus. Maa- ja elintarviketalous 76. MTT. 208 s.
- Warsta, L. 2007. Modelling the hydrological cycle of an agricultural field. Thesis for the degree of Lic. Sci. in Tech., Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Water Resources. Espoo. 70 s.
- Warsta, L., 2011. Modelling water flow and soil erosion in clayey, subsurface drained agricultural fields. Väitöskirja, Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Espoo. 212 s.
- Warsta, L., Karvonen, T., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., Taskinen, A. 2013a. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. *J. Hydrol.* 476: 395–409.
- Warsta, L., Taskinen, A., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. 2013b. Modelling soil erosion in a clayey, subsurface-drained agricultural field with a three-dimensional FLUSH model. *J. Hydrol.* 498: 132–143.
- Yli-Halla, M., Nykänen, A., Siimes, K., Tuhkanen, R. 2001. Ympäristötuen ehdot ja maan heppoliukaisen fosforin pitoisuus. MTT:n julkaisuja, Sarja A 77. 45 s.
- Yli-Halla, M., Tattari, S., Bärlund, I., Tuhkanen, H. R., Posch, M., Siimes, K., Rekolainen, S. 2005. Simulating processes of soil phosphorus in geologically young acidic soils of Finland. *American Society of Agricultural Engineers* 48 (1): 101–108.

- Youssef, M.Y., Skaggs, R.W., Chescheir, G. M., Gilliam, J. W. 2005. The nitrogen simulation model, DRAINMOD-N II. *Trans. ASAE* 48 (2): 611–626.
- Youssef, M.Y., Skaggs R.W., Chescheir G. M., Gilliam J. W. 2006. Field evaluation of a model for predicting nitrogen losses from drained lands. *J. Environ. Qual.* 35: 2026–2042.
- Äijö H., Myllys, M., Nurminen, J., Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Korpelainen, E., Salo, H., Sikkilä, M., Alakukku, L., Koivusalo, H., Puustinen, M. 2014. PVO2-hanke. Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi – Loppuraportti 2014. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 31. Salaojayhdistys ry. Helsinki. 105 s.

Muu kirjallisuus

- Haahti, K., Younis, B.A., Stenberg, L., Koivusalo, H., 2014. Unsteady flow simulation and erosion assessment in a ditch network of a drained peatland forest catchment in Eastern Finland. *Water Resour. Manag.* 28: 5175–5197.
- Kleemola, J. 1997. Modelling nitrogen and water limited crop growth. Ph.D. Thesis, Publication No. 48, Department of Plant Production, Section of Crop Husbandry, University of Helsinki. 148 p.
- Pitkänen, J., Nuutinen, V. 1998. Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology* 9: 411–415.
- Teittinen, M., Kleemola, J., Hellman, T. 1994. Säättösalojituksen vaikutus vehnän ja kauran kasvuun. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 18:5–14.
- Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. 2008. Modelling runoff at an agricultural field. *Julkaisussa Proceedings of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen* 16. s. 209–217.

Hakemisto

#

1:1-mineraali 90
2:1-mineraali 90

A

advektio 156
aerobi laji 98
aggregaatti 139
ainekuorma 129
aktinobakteeri 98
alivaluma 30, 383
alivesi 256
alivirtaama 55
alloktoninen 78
altakastelu 337
aluehallintoviraston (AVI) lupa 227
amfoteerinen 143
ammoniakki 197
ammonifikaatio 194
anaerobi laji 98
anionien sitoutuminen 140
anioninvaihto 140
apatiitti 182
aridiset alueet 368
arkeoni 97
asennustarkkuus 330
assosiatiivinen eli
puolisymbioottinen typensidonta 194
astepäivätekijä 21
Atterbergin luokitus 79
aurasalaojakone 327
autoktoninen 78
auttajabakteeri 98
avo-oja 283
avo-ojitus 377
avouomavirtaus 65

B

bakteeri 98
Bernoullin energiayhtälö 68
biogeeniset sedimentit 78
biologinen typensidonta 193
biota 96
biotiitti 88

C

Chezyn yhtälö 66
COUP 438

CROPWATN 287
CROPWATNP 432
Cunananen kaava 62

D

d50-menetelmä 81
Darcyn laki 287
Darcyn yhtälö 45
Darcy-Weisbachin kaava 316
delta 76
denitrifikaatio 195
diffuusio 157
dispersio 157
DRAINMOD 287, 429
DRAINMOD-NII 437
drumliini 75
Dupuit-Forchheimerin yhtälö 287
dyyni 78

E

efektiivinen KVK 134
ekohydrauliikka 233
ekvivalenttisyvyys 290
elektroniaktiivisuus 153
elektrostaattinen sitoutuminen 130
eliö 100
eliöstö 120
eloperäinen aines 119
eloperäiset kerrostumat 78, 86
eloperäiset maat 107
ELY-keskus 227, 229
emäskyllästysaste 134
ennallistaminen 230, 233, 386
ensiojitus 373
eolinen maa 81
epäorgaaninen fosfori 183
epäspesifinen pidättyminen 140
epästationäärinen eli muuttuva virtaus 65
epätasainen virtaus 65, 316, 317
eroosio 169, 234, 393
eroosioherkkyys 174
eroosion mallintaminen 441
eroosion torjuntamenetelmä 181
eroosio Suomessa 169
eroosiovoima 173
esipäällyste 297
EU:n vesipolitiikan puitedirektiivi 231
evaporaatio 23
evapotranspiraatio 23

F

fakultatiivinen anaerobi mikrobi 154
 fakultatiivisesti anaerobit 98
 fermentaatio 154
 ferrosulfidi eli pyriitti 154
 Fickin laki 158
 fiksaatio 93, 135
 FLUSH 434
 fosfori 182, 392
 fosforin lannoitustaso 447
 frekvenssikäyrä 313
 Frouden luku 243
 fulvohappo 95
 fungisidi 205
 fysikaalinen rapautuminen 74

G

Gamma-jakauma 59
 geologinen eroosio 169
 GEO-luokitus 79
 glasiaalisavi 77
 glasiaaliset muodostumat 75
 GPS-järjestelmä 320
 Gumbelin jakauma 59

H

habitaattihydrauliikka 233
 haihdunnan arviointi 26
 haihdunta 23
 hajoaminen 209
 hapen huuhtouma 392
 hapetin 151
 hapettumisreaktio 75
 hapetus-pelkitysreaktio 151
 happamat liejusavet 84
 happamat sulfaattimaat 154, 319, 340
 happovoimakkuus 132
 harju 76
 havaintoputki 346
 herbisidi 205
 hiekkamaa 107
 hiesu 300
 hiesumaa 106
 hieta 300
 hietamaa 107
 hiilidioksidi 386
 hiilitase 386
 hilaväli 92
 hiue 81, 300
 hohkasiliikaatti 88
 Hooghoudtin kaava 287
 horisontti 74, 99
 HQ 18

humidiset alueet 368
 humifioituminen 87
 humiini 95
 huminositeetti 86
 humus 87, 94
 humushappo 95
 huokosjakauma 109
 huokoskokojakauma 286
 huokoskokoluokka 110
 huokosluku 109
 hydratoituminen 75, 88
 hydratoituneet oksidit 94
 hydraulinen gradientti 316
 hydraulinen johtavuus 43, 46, 286, 292, 299
 hydraulinen korkeus 44, 284
 hydraulinen mitoitus 239
 hydrologia 283, 390
 hydrologinen kierto 15, 129
 hydrologisen kierron perussuureet 16
 hydrolyysi 75
 hyödyn arviointi 404
 hyöty 417
 hyötyalue 404
 hyvyysluku 62
 hyyfi 98

I

ideaaliputki 292
 ihmisen toiminta 103
 illiitti 92
 ilmarihmasto 98
 imeytymiskyky 44
 immobilisaatio 195
 imuoja 283, 323
 infiltraatio 287
 insektisidi 205
 integroitu kasvinsuojelu 213
 interseptiohaihdunta 23
 ionipotentiaali 136
 ionisäde 136
 isomorfinen korvautuminen 89, 132
 itsepuhdistumiskyky 186

J

jääeroosio 169
 jako-oja 385
 jankko 86, 306
 jankkurointi 333
 järvimuta 78, 86
 jatkuva kasvatusta 374
 juurikanava 119
 juuriston syvyys 358
 juuriston tiheys 358

K

kaasumainen tyyppiyhdiste 191
 kaivanto 291
 kaivava salaajakone 327
 kaivukone 377, 382
 kaivutapa 237
 kaivuvaikeus 320
 kaksijyvämenetelmä 404
 kaksikerrosmineraali 90
 kaksitasopoikkileikkaus 237
 kaksitasouoma 237
 kalkitus 123
 kannattavuuden laskeminen 416
 kaoliniitti 91
 kapillaari-ilmiö 33
 karkeuskerroin 66
 kasteltujen alueiden kuivatus 368
 kastelujärjestelmän mitoitus 367
 kastelumenetelmät 223, 364
 kastelun kehitys 226
 kastelun talous 369
 kastelun ympäristövaikutukset 368
 kastelu Pohjoismaissa 353
 kasteluveden laatu 363
 kasvien kasvu 217
 kasvihuoneilmiö 386
 kasvillisuus 238
 kasvinsuojeluaine 205
 kasvinsuojeluainepäästö 212
 kasvitauti 205
 kasvukausi 314
 kasvunsäädä 205
 kasvusto 119
 kationinvaihto 130
 kationinvaihtokapasiteetti 131, 134
 kationinvaihtokyky 90
 kationinvaihtomallit 138
 katkaisuoja 312
 kemiallinen rapautuminen 74
 kemialliset sidokset 117
 kenttäkapasiteetti 314, 354
 keskikaltevuus 58
 keskikokoiset huokoset 114
 keskiylivaluma 55
 kiintoaine 391
 kiintoaineen kulkeutuminen 393
 kiintoainemäärä 170
 kiintoaineshuhtouma 384
 kitkahäviö 66
 kivennäismaa 79, 322
 kokonaisfosforipitoisuus 348
 kokonaistypen määrä 193
 kokonaistyyppi 347

kokoojaaja 283, 323
 kolmikerrosmineraali 90
 kompleksiyhdiste 75
 komplementtikationi 136
 korjaussuunnitelma 326
 korkeusjyvä 408
 korpi 373
 kosteikko 277, 400
 kosteusprofiili 284
 kuivatettavissa oleva huokostila 284, 314
 kuivatusalue 404
 kuivatushankkeiden kannattavuus 401
 kuivatushyöty 401, 403
 kuivatusjyvä 408
 kuivatussyvyys 376
 kuivatustehokkuus 313, 322
 kuivatusvesi 338
 kuivatusvesien kemiallinen käsittely 396
 kuivatusvesien kierrätys 339
 kuivavara 247, 287
 kuivuus 351
 kulkeutuminen 210
 kunnostaminen 233
 kunnostusojituksen suunnittelu 382
 kunnostusojitus 373
 kunnostusojitushanke 384
 kunnostusojituskelpoisuus 380
 kunnostusojitustarve 379, 381
 kustannus 416
 kustannus-hyötyanalyysi 427
 kustannusten osittelu 404
 kvartaärisedimentti 75

L

lähteikkö 311
 lähtöaines 100
 lajitekoostumut 79
 laminaarieroosio 171
 lämmönjohtavuus 53
 lämpökapasiteetti 53
 laskeutusallas 277, 385, 395
 laskuaukko 322
 Lewisin happo 143
 lieju 78, 86
 liejusavi 78, 82
 liero 99, 121
 lierokäytävä 121
 lietsaostuma 316
 liettymisriski 323
 ligandinvaihtomekanismi 140
 lima-aine 184
 liuenneiden aineiden kulkeutumisprosessi 155
 liuennot orgaaninen aine 392

liukeneminen 74
 logaritminen normaalijakauma 59
 lössi 81
 luiskan kaltevuus 249
 lumen keskimääräinen maksimiviesiarvo 55
 lumen vesiarvo 19
 lumipeite 19, 53
 luonnollinen eroosio 169
 luonnon monimuotoisuus 230, 319
 luonnonmukainen vesirakentaminen 230, 231, 233
 lustosavi 77

M

maa 74
 maafauna 96
 maalaji 79, 284
 maalajikolmio 80
 maalajiluokitus 80
 maalajite 79
 maanarvojuuva 408
 maan erodoituvuus 174
 maaneste 138
 maan happamoituminen 146
 maan happamuuden luonne 145
 maan happamuuden määrittäminen 144
 maan huokoisuus 109
 maan huokoskokojakauma 36
 maan huokosto 109
 maan hydraulinen johtavuus 45, 287
 maankamara 74
 maan kastuminen 117
 maankosteuden mittausmenetelmät 39
 maan kosteuspitoisuus 52
 maan kosteusprofiili 284
 maankuivatus 221, 319
 maan kuivuminen 117
 maan lajitekoostumus 73
 maan mekaaninen muokkaus 123
 maannoksen muodostuminen 100
 maannos 74, 99
 maannosluokitusjärjestelmät 101
 maannostumisprosessi 105
 maanpinnan kaltevuus 341
 maan rakenne 109
 maan rakennetyypit 114
 maan suolaantuminen 353
 maan tekstuuri 79
 maan tiivistyminen 125, 220
 maan vedenpidätyskäyrä 284
 maan vedenpidätyskyky 33
 maan vesipitoisuus 36
 maan vesitalous 283
 maaperä 15, 73, 74
 maaperäimeyitys 399
 maaperän fosforin kierto 438
 maaperän lämpötila 52
 maaperän ravinnetalous 155
 maaperän typen kierto 437
 maaperäolosuhteet 348
 maaperäselvitys 320
 maaprofiili 284
 maaston muodot 100
 maatalousmaan kastelu 351
 maatumisaste 86
 maaveden potentiaali 35
 maavesi 16, 32
 maavesimalli 284, 429
 maavesivarasto 15, 353
 maisemamuodot 73
 makrofauna 99
 makrohuokonen 43, 156
 makrohuokokset 112
 maksimikaltevuus 318
 Manningin kaava 316
 Manningin kerroin 66
 mantu 74
 märkäpiiri 292
 massan säilyvyyden laki 156
 matemaattiset mallit 180, 429
 megafauna 99
 mekaaninen maa-analyysi 80
 mekaaninen rapautuminen 74
 mesofauna 99
 metaani 386
 metaboliitti 209
 metsäoja-aura 376
 metsäojituksen tavoite 375
 metsäojitus 373
 metsäojitustilasto 378
 MHQ 18
 mikrobisto 120
 mikrofauna 99
 mikrokanavaeroosio 171
 mineralisaatio 87, 194
 minimikaltevuus 318, 323
 mitoitusadanta 313
 mitoitusvaluma 322
 mitoitusvalunta 314
 mitoitusvirtaama 55, 245, 323
 MNQ 18
 moreeni 79
 moreenimaat 80, 107
 MQ 18
 multamaa 86
 muovailtavuus 91
 mururakenteen muodostuminen 115
 mykorritsasieni 98, 183
 myyräojitus 333

N

nitraattityppi 347
nitrifikaatio 194
nomogrammi 55, 260
noroeroosio 171
NQ 18

O

ohjaavat periaatteet 232
oikovirtaus 165
ojajyrsin 377
ojanperkaus 381
ojan syvyys 247
ojasyvyys 287, 307, 314, 376, 432
ojaväli 283, 287, 432
ojien perkaus 381
ojien sijoittelu 309, 322
ojituksen hyöty 403
ojituksen kustannukset 402
ojituksesta ilmoittaminen 227
ojitus 122, 234, 387
ojitusoikeus 227
ojitus pohjavesialueella 229
ojitus suunnitelma 242
ojitustoimitus 227
ojitustyön ympäristönhoito 281
ojitusyhteisö 241
okkludoituminen 184
ominaisantisuus 284
ominaispinta-ala 95
orgaaninen fosfori 184
osittelualue 404

P

padotus 256
padotuskastelu 337
padotuskorkeus 338, 344
paikalliskuivatus 217, 222, 283
paikallisojitus 241
painovoimaeroosio 169
päisteputki 394
paisuvahilainen savimineraali 92
Pearson III -tyyppi 62
pedogeneesi 99
pelkistin 151
pellon vesitalous 15
peltojen typpimäärä 193
peltoliikenne 125
peltoprosentti 58
peltosalaojitus 323
penger 267
perkaus 230, 234
permanenti varaus 132

peruskuivatuksen kannattavuus 411
peruskuivatus 222, 234, 241
peruskuivatushanke 401
pF-asteikko 36
pF-käyrä 38, 284, 286
pH:sta riippuva varaus 132
pienet huokokset 114
pinta- eli ablaatiomoreeni 76
pintaeroosio 171
pintakerrosvalunta 15
pintavalutus 396
pintavalutuskenttä 385
pintavesi 212
pisaraeroosio 171
pituussuuntainen jatkuvuus 234
pKa-arvo 132
plastisuus 91
plastisuusindeksi 299
pohjakynnys 256
pohjamaan vedenjohtavuus 333
pohjareeni 75
pohjan kaltevuus 248
pohjasedimentti 185
pohjaveden korkeus 284
pohjavedenpinta 32
pohjavesi 213, 313
pohjavesikastelu 337
pohjavesikerros 15
pohjavesimittaus 346
poikittainen jatkuvuus 234
postglasiaalinen muodostuma 75
postglasiaalisavi 78
potentiaaliero 44
potentiaalinen evaporaatio 23
potentiaalinen evapotranspiraatio 23
potentiaalinen KVK 134
primaarinen mineraali 87
protolyysi 75
pumppaamo 256, 267
puro 241
puskurointireaktio 147, 148
putken sisäänpääsyn virtausvastus 296
putkikoko 290
putkioja 259
putkivirtaus 316
pystysalaoja 312

R

rahkaturve 86
rajoitettu minimointiongelmia 450
rakeisuuskäyrä 302
räme 373
rapautuminen 74

Ratio Law 139
rautasaostuma 316, 337
ravinnehuuhtouma 201, 319
ravinnekuormitus 392
ravinnepitoisuudet 345
redoxparametri 153
redoxpari 151
redoxpotentiaali 154
reunamuodostuma 76
Reynoldsin luku 65
riittävä kuivatus 250
rikkakasvi 205
ritsosfääri 98, 148
routa 53, 118
routaantuminen 53
routalajit 54
routuminen 53
rumpu 255, 256
ruostesaostuma 333
RUSLE 177

S

säätökaivo 338
säätökastelu 337
säätölaite 343
säätöojitus 337
säätösalaajitus 217, 319, 337, 440
sadanta 18
sädebakteeri 98
sadetuskastelu 223, 364
sadon arvo 313
sadon lisääminen 442
sadonlisäys 340
sähköinen kaksoiskerros 138
salaojakaivanto 296
salaojakastelu 337
salaojan ympärysaine 284
salaojaputki 296
salaojasuunnitelma 326
salaojavalunta 287
salaojien huuhtelu 333
salaojien kunnossapito 283
salaojituksen yhteiskunnalliset hyödyt 420
salaajitus 217, 236, 378
salaajitus investointina 412
salaajitus suunnittelu 313
salaajitus viljelijän päätöksenteossa 414
sandur 76
SAR-arvo 139
saraturve 86
sarkaleveys 376
satotaso 205
savespitoisuus 299
savi 81

savimaa 105, 289, 319
savimineraalit 88
sedimentin kulkeutuminen 234
sedimentti 79
sekundaarinen kloriitti 93
semiaridiset alueet 368
seoshilamineraali 93
sienijuuri 98
sienirihma 98
silikaattikerros 88
silmäke 305
silta 255, 256
siltaefekti 300
siltti 79, 300
sisäinen eroosio 171
sisäkompleksi 141
sitoutuminen 208
smektiitti 93
Soil Taxonomy -järjestelmä 100, 108
sora 321
sorption 159
spesifinen pidättyminen 140
spesifinen sitoutuminen 134
stationäärinen eli pysyvä virtaus 65
strateginen valinta 442
strukturi 109
subakvaattinen 77
sulfidisedimentti 392
suo 373, 387
suojakaista 274
suojavyöhyke 274, 386
Suomen maannostietokanta 105
suopuskuri 386
suoto-ajitus 333
suotosilmäke 305
suotyyppi 375
suppa 76
supra-akvaattinen 77
suunnitelmakartta 326
suunnitelmaselostus 326
suunnittelija 320
SWAP 287, 432
SWATR 430
symbioottinen typensidonta 193
syväkuohkeutus 333

T

takaisinkytkennän periaate 430
taktinen päätös 442
tarkistuskäivo 318
tasainen virtaus 65, 316
tavoitekuva 234
täydennysojitus 326, 381

täyttömateriaali 296
 tehokas vedenjohtavuus 342
 tehollinen putkikoko 296
 tekstuuri 79
 tensiometri 355
 Thiobacillus 155
 tihkukastelu 364
 tippukastelu 223, 364
 todellinen haihdunta 23
 todennäköisyysjakauma 59
 toistumisaika 59, 246
 toistuvuusanalyysi 55, 313
 Tolkmittin kaava 256
 topografia 100
 traktorikaivuri 377, 382
 transpiraatio 23
 trapetsipoikkileikkaus 237
 tuholaiset 206
 tulvanhallinta 232, 236
 tulvasuojelu 230
 tulvatasanne 234, 238
 turve 78, 373, 387
 turvetuotanto 387
 tuulieroosio 169
 työpaalutus 326
 typen esiintymismuodot 192
 typen kierron mallintaminen 437
 typen kierto 191
 typen kulkeutuminen 199
 typensitojaorganismi 98
 typpi 191, 392
 typpihuhtouma 200
 typpikuormitus 199, 200
 typpilannoitustaso 447
 typpitase 198

U

uomaeroosio 175
 uoman mitoitus 238
 uoman poikkileikkaus 249
 uoman vahvistus 270
 USLE-yhtälö 177
 uusintaajitus 326

V

vaihtuva kationi 130
 vajaatoimivuus 331
 vajaatuottoisuus 379
 valtaoja 241, 323
 valtaojan mitoitus 241
 valtioneuvoston asetus vesitalousasioista 229
 valuma 16
 valuma-alue 15

valunta 29, 30, 322
 valutuskastelu 223, 364
 vapaa typensidonta 194
 varastokapasiteetti 314
 varastokerroin 284
 varmuuskerroin 316
 vastuskerroin 243
 vastuukysymykset 330
 vedellä kyllästymätön maakerros 15
 vedenjohtavuus 342
 vedenkorkeus 16
 vedenpidätyskäyrä 36
 vedenpidätysominaisuus 284
 veden puute 352
 verkkosilikaatti 88
 vermikuliitti 92
 vertailuvesistö 55
 vesiaukon vedenjohtokyky 256
 vesiensuojelu 273, 394
 vesiensuojelusuunnitelma 383, 384
 vesieroosio 169
 vesihäviöt kastelussa 352
 vesilaki 227, 241, 401
 vesirakentaminen 230
 vesistöjen kunnostaminen 230
 vesistökuormitus 340, 391
 vesitase 390
 vesitasemenetelmä 355
 vesivarastojen suunnittelu 362
 vettyminen 353
 viljakasvien kasvun mallintaminen 436
 viljely 122
 viljelykasvien kastelu 360
 viljelykasvien typenotto 197
 viljelykierto 125
 viljelysuunta 322
 virtaama 16
 virtaamahavainto 55
 virtaamahuippu 318
 virtaaman säätö 398
 virtausnopeus 318
 virtausreitti 318
 virtaustila 65
 virtaustyytit 65
 virtausvastus 239
 virtausyhtälö 242

W

Weibullin kaava 62
 Weibullin todennäköisyysjakauma 64
 World Reference Base for Soil Resources (WRB) -järjestelmä 101

Y

- yhteiskunnallinen kannattavuus 401
- yhteiskunnallisen kannattavuuden arviointi 423
- ylivaluma 21, 30, 383
- ylivalunta 245
- ylivirtaama 55, 245
- ylivuotokenttä 399
- ylläpitokelvottomuus 379, 380
- ympäristölupa 387
- ympäristönäkökulma 442
- ympäristönhoito 273
- ympäristönläätunormi 212
- ympäristönsuojelulaki 229
- ympäristövirtaama 64
- ympärysaineet 297, 330

