

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote

N:o 25

**PELTOVILJELYN RAVINNE-
HUUHTOUTUMIEN
VÄHENTÄMINEN PELLON VESI-
TALOUTTA SÄÄTÄMÄLLÄ**

LOPPURAPORTTI

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry
Simonkatu 12 A 11
00100 Helsinki

Toimittaja: Pertti Vakkilainen
Taitto ja ulkoasu: Juha Peltomaa
Kannen kuva: Harri Koivusalo
Säätösalaajituksen koealue Lapuan Ylikylässä
Painopaikka: Trio-Offset Oy, Helsinki 2000

Tämän julkaisun on kustantanut Salaojituksen Tukisäätiö

ISBN 952-5345-02-5

Salaojituksen tutkimusyhdistys selvitti vuonna 1996 meneillään olevia ja suunnitelmissa olevia pellon vesitalouteen liittyviä tutkimushankkeita. Selvityksen tarkoituksena oli koota alan tutkimusta yhteishankkeeksi. Saatujen vastausten pohjalta yhdistys neuvotteli maa- ja metsätalousministeriön kanssa yhteishankkeen rahoitusmahdollisuuksista. Neuvottelujen lopputulos oli, että yhteistutkimus rajattiin salaojitukseen, säätösala- ojitukseen ja salaojakasteluun liittyviin tutkimusaiheisiin. Hanke oli näin ollen jatkoa yhdistyksen aiempiin säätösalaajitustutkimuksiin vuosilta 1992-96.

Vuonna 1997 alkaneen kolmevuotisen tutkimushankkeen nimeksi otettiin "Peltovil- jelyn ravinnehuuhtoumien vähentäminen pellon vesitaloutta säättämällä". Yhteistutki- muksen käytännön toteuttajina olivat Helsingin yliopiston maa- ja kotitalousteknologian sekä soveltavan kemian ja mikrobiologian laitokset, Maatalouden tutkimuskeskuksen luonnonvarojen tutkimuslaitos, Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratorio ja Maatalouden taloudellinen tutkimuslaitos. Tutkimus painottui säätösalaajituksen ja salaojakastelun osalta menetelmien vaikutuksiin typpihuuhtoumiin ja satotasoon sekä tekniseen toimivuuteen peltomittakaavassa. Fosforin osalta keskityttiin pinta- ja salaojavalunnan kautta tulevaan kuormitukseen sekä salaojaveden fosforin pitoisuuksiin vaikuttaviin tekijöihin. Tutkimuksessa kehitettiin myös menetelmä, jolla voidaan kartoittaa peltolohkon huuhtoutumisherkkyys täsmäviljelyä varten. Lisäksi selvitettiin säätösalaajituksen ja salaojakastelun taloudellisuutta sekä viljelijän että vesiensuojelun näkökulmasta.

Tutkimusten rahoitus tapahtui maa- ja metsätalousministeriön, Salaojituksen tuki- säätiön ja tutkimusta tekevien laitosten oman rahoituksen turvin. Kolmivuotisen ohjel- man kokonaiskustannus oli noin 4 miljoonaa markkaa. Tutkimuksen valvojakunnassa toimivat ylitarkastaja Ilkka Reponen puheenjohtajana ja jäsenenä pääsihteeri Juhani Tauriainen, rakennusneuvos Jussi Saavalainen, professori Jouko Sirén, toiminnanjohtaja Rauno Peltomaa ja agronomi Markku Puustinen. Tutkimuksen johtajana toimi profes- sori Pertti Vakkilainen ja tutkimuksen koordinaattorina Salaojituksen tutkimusyhdistys. Rahoituksen järjestymisestä Tutkimusyhdistys esittää tässä yhteydessä rahoittajille parhaat kiitokset. Samoin yhdistys kiittää tutkimuksen valvojakuntaa sen ansiokkaasta panoksesta tutkimuksen ohjaamisessa ja tutkimusryhmiä hyvästä yhteistyöstä ja in- nostuneesta asenteesta tutkimusaihetta kohtaan. Käsillä oleva julkaisu on tutkimuksen loppuraportti, josta yhdistys toivoo olevan apua alalla toimijoille.

Helsingissä 5.10.2000

TIIVISTELMÄ	57
KIRJALLISUUS	58
SUMMARY	60

Vesitalouden säätely pelloilta pintavesiin joutuvan fosfo- ri- ja kiintoainekuorman vähentämiskeinona..... 61

JOHDANTO	61
AINEISTO JA KÄYTETYT MENETELMÄT	62
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	64
TIIVISTELMÄ	72
KIRJALLISUUS	73
SUMMARY	74

Huuhtoutumisherkkyyskartta..... 75

<i>JOHDANTO</i>	75
<i>MENETELMÄ</i>	75
<i>MAATUTKAUS</i>	75
<i>LIERIÖMITTAUKSET</i>	78
<i>KORKEUSMALLI</i>	83
<i>TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET</i>	88
<i>TIIVISTELMÄ</i>	89
<i>KIRJALLISUUS</i>	90
<i>SUMMARY</i>	91

Säätösalaajituksen ja salaojakastelun kustannukset ja hyödyt..... 92

<i>JOHDANTO</i>	92
<i>SÄÄTÖSALAOJITUKSEN YRITYSTALOUELLISET LASKELMAT</i>	92
<i>SALAOJAKASTELUN YRITYSTALOUELLISET LASKELMAT</i>	95
<i>SÄÄTÖSALAOJITUKSEN YHTEISKUNNALLINEN KANNATTAVUUS</i>	96
<i>JOHTOPÄÄTÖKSET</i>	100
<i>TIIVISTELMÄ</i>	101
<i>KIRJALLISUUS</i>	102
<i>SUMMARY</i>	103

Kuvailulehti..... 104

S I S Ä L L Y S L U E T T E L O

Johdanto	6
----------------	---

Vesitalouden säädön vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen	8
---	---

JOHDANTO	8
AINEISTO JA MENETELMÄT	9
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	15
<i>SÄÄTÖSALAOJITUS</i>	15
<i>SALAOJAKASTELU</i>	24
<i>RAVINTEIDEN HUUHTOUTUMINEN SALAOJITETUSTA SAVIMAASTA</i>	28
YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	34
KIRJALLISUUS	36
SUMMARY	39

Salaojavalunnan liukoisen fosforin pitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä.....	41
---	----

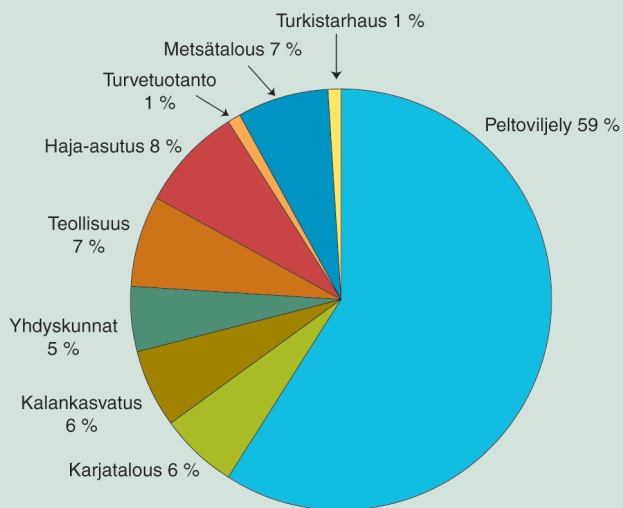
JOHDANTO	41
MATERIAALI JA MENETELMÄT	44
TULOKSET	47
TULOSTEN TARKASTELUA	54

fosforikuormitusta, mutta savimailla salaojien kautta saattaa huuhtoutua huomattavia määriä fosforia. Tavanomainen salaojitus lisää usein typen huuhtoutumista. Salaojitusta on kehitetty viime vuosina palvelemaan entistä paremmin viljelyn tarpeiden lisäksi myös vesiensuojelun tarpeita. Pellon vesitalouden tehostamiseksi on otettu käyttöön säätösalaojitus, salaojakastelu ja valumavesien kierrätys.

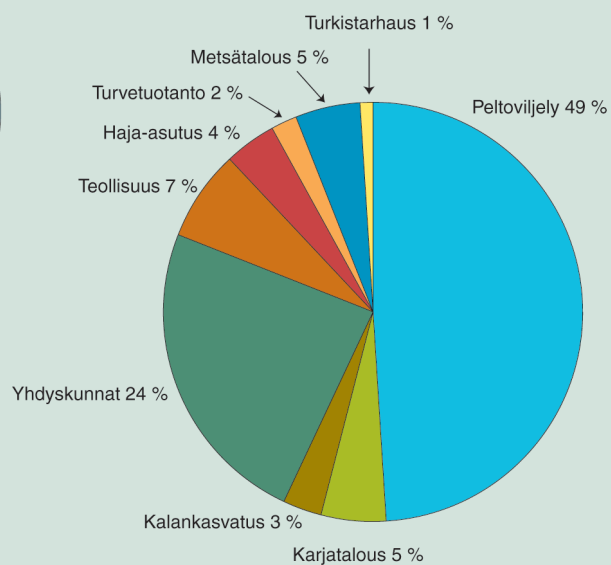
Säätösalaojitus on nimensä mukaisesti salaojitus, jonka kuivatustehokkuutta voidaan säätää. Pohjaveden tasoa pidetään kokoojaputkessa olevan säätökaivon tai avo-ojassa olevan säätöpadon avulla niin korkealla kuin viljelyn kannalta on mahdollista. Säätösalaojitus toimii luontaisen sadannan ehdoilla. Salaojakastelulla tarkoitetaan menetelmää, jossa salaojaverkostoon johdetaan kasteluvettä. Valumavesien kierrätyksessä pellolta tulevat kuivatusvedet käytetään kasteluun. Kierrätys edellyttää valumavesien varastoimista altaaseen tai valtaojiin. Kuvassa 2 on esitetty edellä mainittujen säästömenetelmien periaate.

Tämän tutkimuskokonaisuuden päätavoitteena on ollut selvittää, missä määrin eri säästömenetelmillä voidaan vaikuttaa pelloilta tulevaan ravinnekuormitukseen. Osatutkimukset käsittelevät fosforin ja typen prosesseja ja kulkeutumisreittejä maaperässä, säästömenetelmien teknistä toimivuutta peltomittakaavassa, pellon huuhtoutumisherkyyden kartoitusta sekä säästömenetelmien taloudellisuutta niin viljelijän kuin myös vesiensuojelun näkökulmasta. Lisäksi selvitettiin suojavyöhykkeiden, laskeutusaltaiden ja kosteikkojen toimivuutta osana muita tutkimushankkeita.

FOSFORI



TYPPI



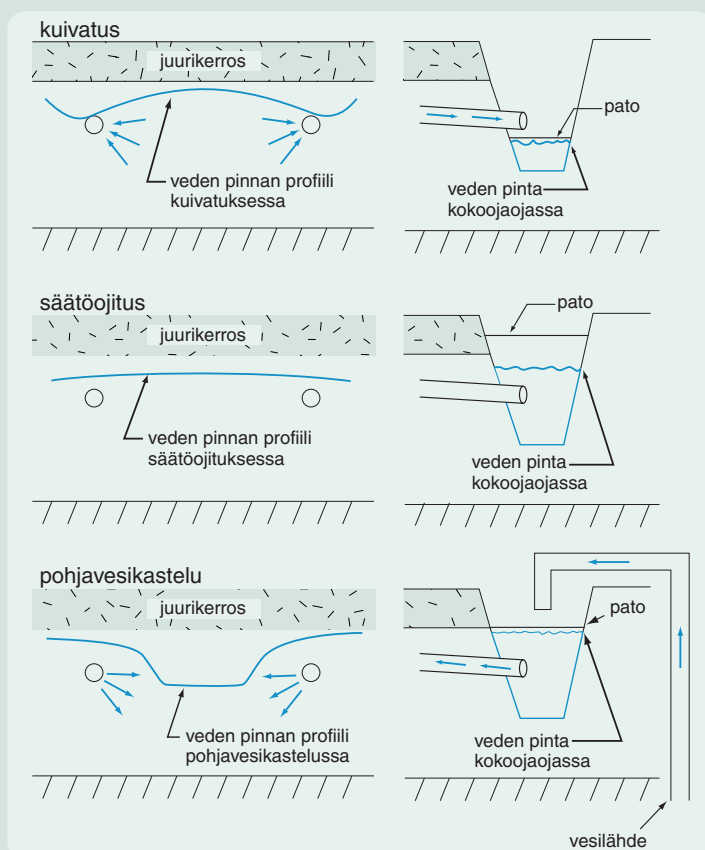
Kuva 1. Ihmistoiminnasta johtuva ravinnekuormitus vesistöihin.

JOHDANTO

Maataloudesta tuleva fosfori- ja typpikuormitus muodostavat nykyään valtaosan vesistöjen ravinnekuormituksesta. Ihmistoiminnoista aiheutuva fosforikuormitus muodostaa 75 % ja typpikuormitus 60 % kokonaiskuormituksesta. Typpikuormituksen, jonka maatalous aiheuttaa Suomen sisävesiin ja Itämereen, arvioidaan olevan noin puolet ihmistoiminnoista johtuvasta kuormituksesta. Fosforin osalta maatalouden osuus on noin 60 %. Peltoalueilta tulevat huuhtoumat muodostavat noin 90 % maatalouden kokonaiskuormituksesta (kuva 1). Vesiensuojelun tavoiteohjelman mukaan kaikkien kuormittajien on vähennettävä päästöjään. Tämä merkitsee sitä, että peltoviljelystä tulevaa typpi- ja fosforikuormitusta tulisi vähentää 50 %:lla vuoteen 2006 mennessä vuonna 1993 tapahtuneeseen kuormitukseen verrattuna.

Ravinnekuormitus kiihdyttää kasviplanktonin tuotantoa vesistössä, mikä johtaa aikaa myöten rehevöitymiseen. Rehevöitymistä voidaan parhaiten rajoittaa vähentämällä sitä ravinnetta, joka on kriittinen levien lisääntymiselle. Useimmiten tämä ravinne on fosfori. Typen merkitys ei ole yksikäsitteinen, vaan se vaihtelee vesistökohtaisesti. Typpikuormituksen pienentäminen vähentää tiettyjä levälajeja, mutta saattaa aiheuttaa sinilevien lisääntymistä varsinkin rehevöityneillä vesialueilla. Tärkeää on vähentää fosforin ja typen kuormitusta samanaikaisesti.

Aikaisempien tutkimusten perusteella tiedetään, että pellon vesitalouden säädöllä on mahdollista vaikuttaa ravinnehuuhtoumiin. Salaojituksen on todettu pienentäneen



Kuva 2. Salaojituksen, säättösalaojituksen ja salaojakastelun periaate.

Salaojakastelulla voidaan turvata kasvuston tehokas veden ja ravinteiden otto, mutta sen on todettu vähentäneen myös typpihuuhtoumia (Mejia ja Madramootoo 1998, Tan 1998). Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin typpi- ja fosforihuuhtoumia salaojitetulta savipellolta, jossa veden virtaus ja ravinteiden huuhtoutuminen oletettavasti poikkeavat karkeammista kivennäismaista (esim. Aura 1990, Larsson 1999).

Tutkimuksen kokeellinen osa tehtiin tavanomaisessa viljelyssä olevilla peltoalueilla Lapualla, Tyrnävällä ja Kirkkonummella. Näin saatiin esille tekijöitä, jotka vaikuttavat mm. säätömenetelmien tekniseen toimivuuteen, pohjaveden pinnan syvyyteen ja ravinteiden huuhtoutumiseen peltolohkon mittakaavassa. Säätösalaojitus ja salaojakastelu edellyttävät tasaisia ja suhteellisen hyvin vettä läpäiseviä maita, minkä vuoksi Pohjanmaan pellot soveltuvat hyvin vesitalouden säätöön. Savimaata edustava koealue sijaitsi Kirkkonummella. Savi on tyypillinen maalaji Etelä- ja Lounais-Suomen viljelyksillä ja niistä valtaosa on salaojitettu. Alueella kokeiltiin myös kuivatusvesien kierrätystä salaojien kautta, mutta menetelmä ei toiminut riittävän tehokkaasti viettävällä savipellolla. Kirkkonummen koealueen valumavesien kiintoainetta ja fosforia tutkittiin yksityiskohdaisemmin Maatalouden tutkimuskeskuksessa ja Helsingin yliopistossa (Uusitalo 2000, Peltovuori 2000).

Mallintamisen tavoitteena oli kuvata koealueiden vesi- ja typpitasetta ja kasvien kasvua sekä arvioida typpihuuhtoumia ja sadon määrää eri ojitusvaihtoehdoissa. Mallia sovellettiin Lapuan koealueelle, jossa tutkittiin säätösalaojitusta. Mallilla tutkittiin myös maaperässä olevien suurten huokosten l. makrohuokosten vaikutusta veden virtaukseen ja typen huuhtoutumiseen. Niiden on todettu sekä lisäävän että vähentävän typen huuhtoutumista ajankohdasta riippuen (Larsson 1999).

AINEISTO JA MENETELMÄT

KOEALUEET JA MITTAUSAINEISTO

Tutkimuksessa käytettiin aineistoja, jotka oli mitattu Lapualla (1993-1996), Tyrnävällä (1994-1996) ja Kirkkonummella (1994-1996) sijaitsevilla peltoalueilla. Lisäksi Kirkkonummella mittauksia jatkettiin syyskuulta 1997 huhtikuulle 1999.

Lapuan mittausaineisto edusti salaojitettuja peltolohkoja, joista toisen laskuaukossa oli säätökaivo ja toinen oli tavanomaisesti ojitettu. Mittaukset tehtiin kolmella osa-alueella, jotka on esitetty kuvassa 1. Lohkojen pintamaa oli hietaa ja pohjamaa savista hiesua. Maakerrosten rakeisuus oli suhteellisen homogeeninen, mutta niiden kemialliset ominaisuudet vaihtelivat paljon happamasta sulfaattimaasta johtuen. Säätösalaojitusta varten ojaväliä tihennettiin 20 metristä 10 metriin ja ojaston 5 laskuaukkoon asennettiin säätökaivo (kuva 2). Ojaston 4 imuojat purkautuivat suoraan valtaojaan. Säätökaivon padotuskorkeus vaihteli 0-106 cm:iin laskuaukon suulta ajankohdasta riippuen. Viljelykasvina oli tärkkelysperuna (1994 ja 1995) ja kaura (1996). Pellolla käytettiin kivennäislannoitteita 70-83 kg N ha⁻¹ ja lokakuussa 1996 maanpinnalle levitettiin tärkkelystehtaan solunestettä, jossa oli typpeä 180 kg ha⁻¹. Koealue ja mittaukset on esitetty tarkemmin julkaisuissa Paasonen-Kivekäs et al. (1997) sekä Paasonen-Kivekäs ja Karvonen (2000).

VESITALOUDEN SÄÄDÖN VAIKUTUS RAVINTEIDEN HUUHTOUTUMISEEN

*Maija Paasonen-Kivekäs, Tuomo Karvonen ja Pertti Vakkilainen
Teknillinen korkeakoulu, Vesitalouden ja vesirakennuksen laboratorio*

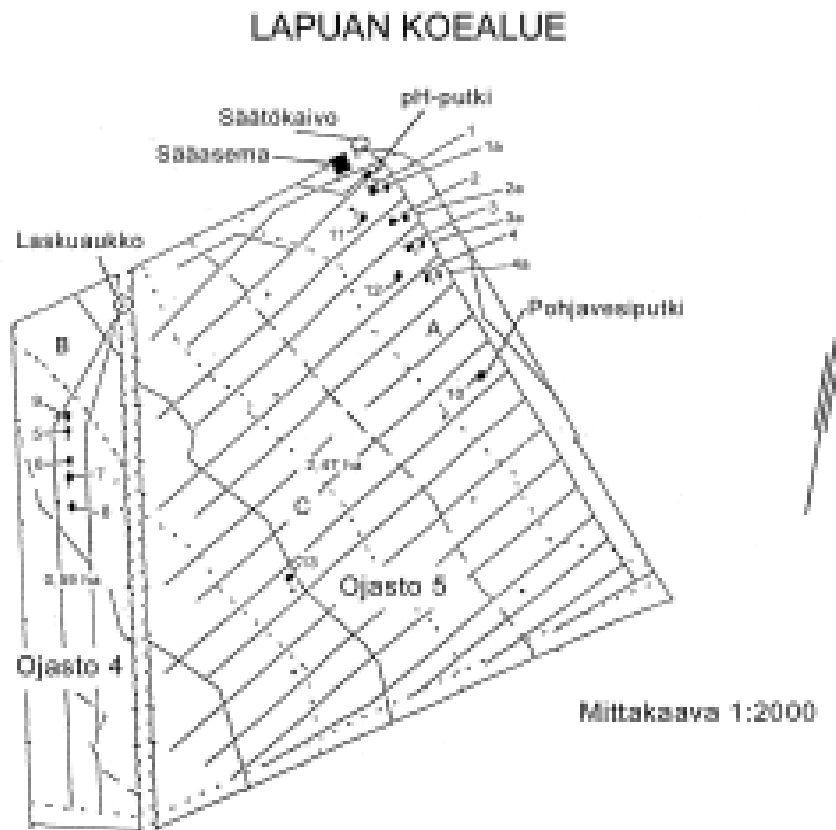
JOHDANTO

Peltoviljelyssä ravinteiden huuhtoutumiseen vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat sadanta, maalaji, viljelykasvi, ojitus ja viljelytoimenpiteet sisältäen lannoituksen. Ojitus vaikuttaa paitsi veden kulkeutumisreitteihin ja maan kosteuteen myös maan happipitoisuuteen ja lämpötilaan, jotka puolestaan säätelevät biologisia ja kemiallisia reaktioita. Useissa tutkimuksissa salaojituksen on todettu lisänneen typen huuhtoutumista avo-ojitukseen verrattuna, mutta toisaalta se on pienentänyt kiintoaine- ja fosforikuormitusta pintavalunnan vähetessä (esim. Seuna ja Kauppi 1981, Skaggs et al. 1994, Evans et al. 1995, Turtola ja Paajanen 1995). Tosin savimaassa salaojien kautta saattaa huuhtoutua huomattavia määriä myös fosforia (Skaggs et al. 1994, Turtola ja Paajanen 1995, Uusitalo 2000). Turvemaissa salaojitus on lisännyt sekä typen että fosforin huuhtoutumista (Evans et al. 1995, Myllys 1999).

Suurin osa kivennäismailta huuhtoutuvasta tyypestä on nitraattityppeä, joka ei juuri-kaan pidäty maa-ainekseen. Vedessä on myös liuenneena tai maahiukkasiin kiinnittyneenä ammoniumtyppeä ja orgaanisia typpiyhdisteitä. Näiden fraktioiden kemialliset ominaisuudet poikkeavat toisistaan ja niiden esiintymistä säätelevät mm. maahiukkasten koko ja mineraalikoostumus, orgaanisen aineksen määrä, happamuus, lämpötila ja kosteus. Varsinkin eloperäisiltä mailta ja happamilta sulfaattimailta huuhtoutuu runsaasti ammoniumtyppeä (Rekolainen 1989).

Nitraattia on erityisen paljon pintamaassa, johon sitä tulee lannoitteena, kasvinjätteiden ja maa-aineksen orgaanisen aineksen hajotessa ja laskeuman mukana. Tiedetyt mikro-organismit pystyvät sitomaan typpeä myös suoraan ilmakehästä. Hapellisissa olosuhteissa orgaanista typpeä mineralisoituu nitraattitypeksi (nitrifikaatio) ja toisaalta nitraattitypen haihtuminen ilmakehään l. denitrifikaatio vähenee. Salaojitus parantaa maan happitilannetta ja edistää siten nitraatin muodostumista. Kun veden kulkeutumista ohjataan maaprofilin kautta, se huuhtoo mukanaan nitraattia salaojiin. Nämä seikat osaltaan selittävät nitraattihuuhtouman kasvun salaojitetussa pellossa (Burt et al. 1995).

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää säätösalaajituksen ja salaajakastelun vaikutuksia ravinnekuormitukseen, erityisesti typen huuhtoutumiseen, ja satoon. Tutkimus koostui kokeellisesta osasta ja matemaattisesta mallintamisesta. Lähtöoletuksena oli, että säätösalaajituksen avulla voidaan vähentää erityisesti typen huuhtoutumista johtuen kokonaisvalunnan ja salaajavesien nitratitypen pitoisuuksien pienenemisestä (Evans et al. 1995). Lisääntynyt maan kosteus edistää myös kasvien kasvua, jolloin ravinteita sitoutuu enemmän kasvustoon eikä jää huuhtoutumisaltiiksi maaperään. Kuivana kesänä jopa 70 % lannoitetyppeä on löytynyt maasta sadonkorjuun jälkeen (Esala 1991).



Kuva 1. Lapuan koealueen ojitukset sekä osa-alueiden A, B ja C ja mittalaitteiden sijainti.

Lohkon keskikaltevuus oli noin 4 %. Salaojitus oli tehty tiiliputkin noin 13 metrin ojavälillä vuonna 1951. Ojitussyvyys vaihteli alle metrillä noin 1.5 metriin. Viljelykasvina oli kevävehnä (1994, 1997-98), ohra (1995) ja syysruis (1996). Typeä annettiin keväisin kivennäislannoitteena 96-120 kg ha⁻¹. Maaperän ominaisuuksia tutkittiin tarkemmin salaojien kohdalta ja häiriintymättömästä maasta ojien väliltä toukokuussa 1999. Maan kerroksellisuutta kartoitettiin sähkönjohtavuusmittauksin syksyllä 1999 ja makro-huokosia merkkiainekokeella kesällä 1998 (Al Soufi 1999).

Lapuan, Tyrnävän ja Sjäkullan koealueilta oli käytössä seuraavat mittaukset: pohjaveden pinnan syvyys sekä pohja- ja salaojaveden pH, nitraatti, ammonium- ja kokonaistypen, fosfaattifosforin ja kiintoaineen pitoisuudet. Maaperästä oli kosteus- sekä nitraatti- ja ammoniumtypen mittauksia 3-8 kertaa vuodessa koealueesta riippuen. Kasvustoaineisto käsitti maanpäällisen kuivabiomassan ja typpimäärän varressa, lehdistä ja jyväissä/mukuloissa sekä lehtialaindeksin (Kleemola ja Teittinen 1996). Kunkin koealueen maaperästä oli määritetty fysikaalisia ominaisuuksia (rakeisuus, tilavuuspaino, huokoisuus, pF-käyrä, hydraulinen johtavuus) sekä orgaanisen aineksen määrä ja pH. Lisäksi Sjäkullasta oli pinta- ja salaojavalunnan sekä lumen ja roudan syvyyden ja lumen vesiarvon mittauksia. Vesinäytteet otettiin manuaalisesti, mutta Sjäkullassa oli ajoittain myös automaattinen näytteenotin salaojavesiä varten. Kaikilla koealueilla oli automaattinen sääasema. Käytetyt analyysimenetelmät on esitetty julkaisuissa Paasonen-Kivekäs et al. (1997).



Kuva 2. Sääasema ja tiedonkeruuyksikkö Lapuan koealueella toukokuussa 1994. Etualalla säätö-
kaivo ja taustalla pohjavesiputkia. Säätkökaivon korkeutta lisättiin 30 cm kesäkuussa 1995.

Tyrnävän kastelualue käsitti noin 8 ha tasaista hietapeltoa. Hietakerros ulottui 1-1.2 metriin, jonka alapuolella oli hiesua. Ennen salaojakasteluhanketta alue oli avo-
ojitettuna nurmikesantona useita vuosia. Salaojakastelu toteutettiin kahdella tavalla
(kuva 3). Ojastoissa 1 ja 2 salaojat olivat 1.1 metrin syvyydessä 14 metrin välein ja ne
toimivat sekä kuivatusta että kastelua varten (1-putkitusalue). Ojastossa 3 kasteluojat
olivat noin 60 cm:n syvyydessä 4 metrin välein ja kuivatusojat 1.1 metrin syvyydessä
30 metrin välein (2-putkitusalue). Ilman kastelua ojastot toimivat sääätosalaojituksen
tavoin. Vertailua-alueella ei ollut salaojitusta eikä kastelua.

Salaojavedet purkautuivat varastoaltaaseen (kuva 4), josta vesi pumpattiin takaisin
pellon reunalla olevaan jakokaivoon. Kaivosta vesi purkautui painovoimaisesti eri
ojastoihin. Altaaseen johdettiin kasteluvettä myös viereisestä Ängeslevänjoesta. Kas-
teluvettä pumpattiin enimmillään noin 5 mm d⁻¹ ja pumpun käyntiä säädeltiin jakokai-
von veden-pinnan korkeuden perusteella. Osa kasteluvdestä palautui salaojien kautta
takaisin altaaseen. Koealueilla viljeltiin kauraa (1994) ja ruokaperunaa (1995, 1996).
Vuosina 1994 ja 1996 käytettiin kivennäislannoitteita 91 ja 67 kg N ha⁻¹ ja vuonna 1995
turpeeseen sekoitettua karjanlantaa noin 154 kg N ha⁻¹. Koealue ja mittaukset on kuvattu
julkaisussa Paasonen-Kivekäs et al. (1998).

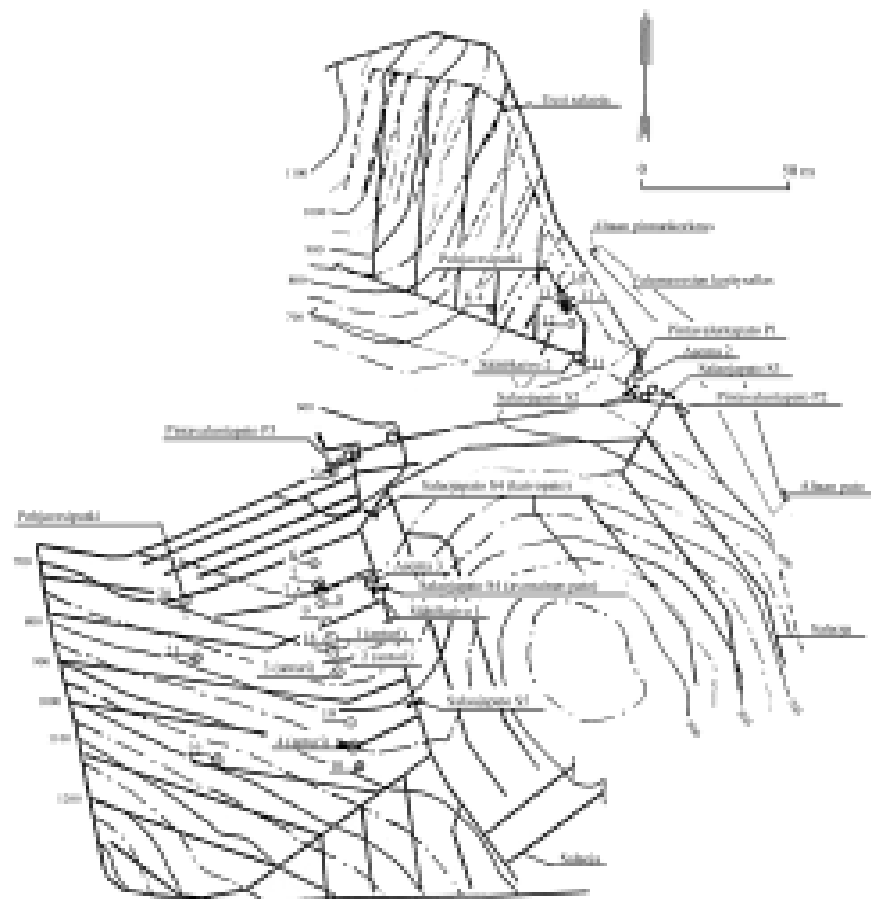
Kirkkonummen eli Sjököllan koealueen mittaukset keskittyivät noin 3.8 ha:n pelto-
alueelle, jossa oli kaksi mittapatoa (S3, S4) salaojavaluntaa varten ja kaksi mittapatoa
(P2, P3) pintavaluntaa varten sekä useita pohjavesiputkia (kuvat 5 ja 6). Pellon pinta-
maa oli hietasavea ja pohjamaa aitosavea. Maa halkeili voimakkaasti kuivina aikoina.



Kuva 3. Tyrväen koealueen ojastot ja varastoallas salaojakastelua varten ja mittalaitteiden sijainti.



Kuva 4. Tyrväen koealueen varastoallas valumavesien kierrätystä varten kesäkuussa 1994. Allas rakennettiin syksyllä 1993. Vasemmassa alakulmassa pellolle nouseva kasteluvesiputki.



Kuva 5. Sjököllan (Kirkkonummi) koealueen salaojitus ja mittapatojen- ja laitteiden sijainti (Koivusalo ja Hyvönen 1994).



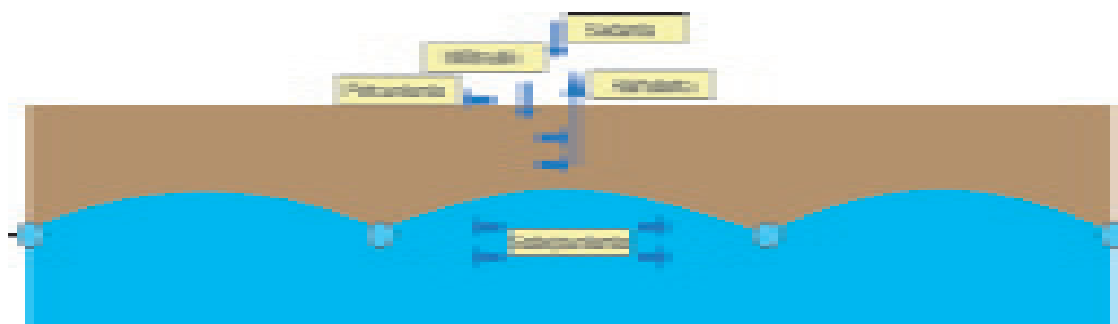
Kuva 6. Sjököllan koealue toukokuussa 1994.

perusteella.

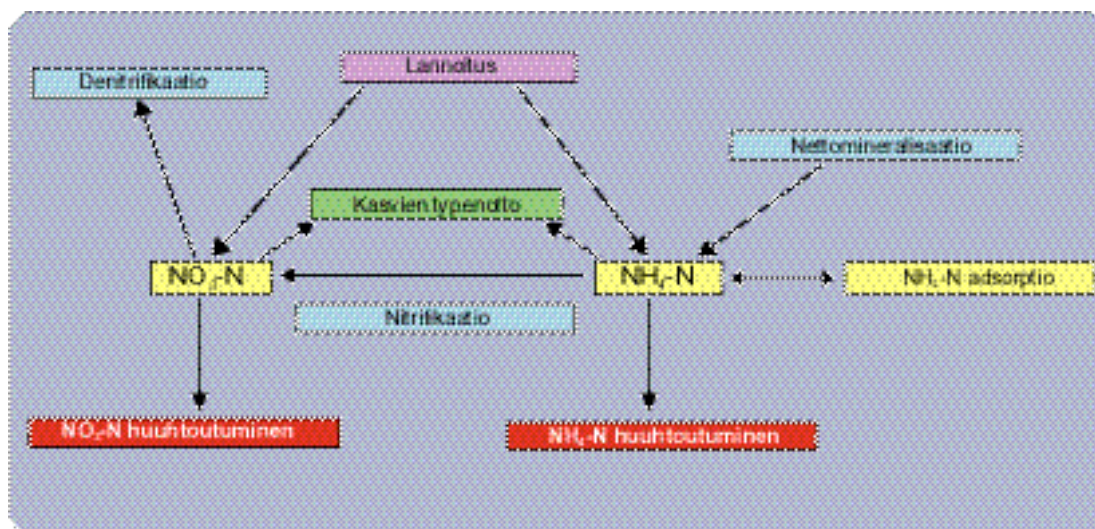
MALLIN SOVELTAMINEN LAPUAN KOEALUEELLE

CROPWATN-mallia sovellettiin Lapuan osa-alueelle A, joka oli lähinnä säätökaivoa ja josta oli eniten pohjavesihavaintoja (ks. kuva 1). Mallin rakenteen testaus ja parametrien kalibrointi tehtiin vuosien 1994-1996 mittausten perusteella. Kalibroinnin jälkeen mallilla simuloitiin eri ojitusvaihtoja. Maaprofiili ulottui 340 cm:n syvyyteen koostuen viidestä kerroksesta, joista kaksi ensimmäistä olivat hietaa ja niiden alapuoliset kerrokset savista hiesua. Orgaanisen aineksen ja rautasaostumien määrä vaihtelivat eri kerroksissa, minkä oletettiin aiheuttavan eroja maan hydraulisiin ominaisuuksiin ja typen prosesseihin samassakin maalajissa. Vedenpidätyskäyrät estimoitiin käyttäen laboratoriossa tehtyjä vedenpidätysmittauksia ja rakeisuusmäärytyksiä. Ojaväli oli 10 m ja ojitussyvyys 130 cm, joka edusti osa-alueen A keskimääräistä arvoa. Säätökaivon padotus vaihteli 65 cm:stä 130 cm:iin maanpinnasta alaspäin ajankohdasta riippuen.

Typpimallissa oli mukana sekä nitraatti- että ammoniumtyppi, koska molempia fraktioita esiintyi pohja- ja salaojavedessä happamasta sulfaattimaasta johtuen. Prosessien parametrit estimoitiin kirjallisuuden perusteella ottaen huomioon maakerrosten ominaisuudet kuten pH ja orgaanisen aineksen määrä (Paasonen-Kivekäs ja Karvonen



Kuva 7. Vesitasemallin komponentit.



Kuva 8. Typpitasemallin muuttujat ja prosessit.

MATEMAATTINEN MALLINTAMINEN

Koealueiden maa-kasvisysteemiä ja ojitusta tutkittiin Karvosen (1999) kehittämällä CROPWATN-mallilla. Se kuvaa kahden salaojaputken väliin jäävää maaprofiilia, jonka oletetaan edustavan keskimääräisesti koko peltoaluetta. Malli koostuu neljästä osamallista, jotka laskevat maan vesi-, typpi- ja lämpötaseen syvyyden ja ajan suhteen sekä kasvien kasvun. Mallin ojitusvaihtoehdot ovat salaojitus, säätösalaajitus ja salaojakastelu. Lähtötietoina annetaan mm. säätilan ja potentiaalisen haihdunnan vuorokausiarvot sekä lukuisia kunkin osamallin prosesseja kuvaavia parametreja.

Mallissa maaveden virtausta ja typen kulkeutumista voidaan tarkastella joko yhdessä huokossysteemeissä tai kahdessa systeemissä, joista toinen edustaa nk. maamatriisia ja toinen suuria huokosia l. makrohuokosia. Oletuksena on, että maamatriisin pienissä huokosissa veden virtaus on erittäin hidasta verrattuna makrohuokosiin, joiden kautta tapahtuvat oikovirtaukset kuljettavat vettä nopeasti pinnalta syvemmälle maaprofiiliin. Maamatriisin ja makrohuokosten välillä on sekä veden että typen vaihtoa.

Vesitasemallin keskeisiä lähtötietoja on kullekin maakerrokselle annettava vedenpidätyskäyrä ja kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus. Makrohuokosia kuvaavia parametreja on useampia kuten niiden osuus pinta-alasta, jakautuminen syvyyden suhteen ja hydraulinen johtavuus. Mallissa on myös optio nk. toisen asteen ojitukselle, jolla voidaan kuvata esim. valtaojan vaikutusta pellon pohjaveden korkeuteen. Kuvassa 7 on esitetty vesitasemallin komponentit. Mallin mukaan salaojavaluntaa syntyy silloin, kun pohjaveden pinta mikro- tai makrohuokosissa nousee salaojitussyvyyteen tai yli säätökaivon padotuskorkeuden.

Typpimallissa on erikseen nitraatti- ja ammoniumtypen varasto, mutta laskennassa voidaan käyttää myös niiden summaa (mineraalityppi) riippuen käytettävissä olevasta mittaussaineistosta ja sovellutuskohdeesta. Nitraattityppi on kokonaisuudessaan liukoisessa muodossa, kun taas ammoniumtyyppistä suurin osa on kiinnittyneenä maahiukkasiin ja vain pieni osa on liuenneena maaveteen. Malliin sisältyvät typen prosessit on esitetty kuvassa 8. Mineralisaatiossa otetaan huomioon erikseen maan orgaanisesta aineksesta ja sadonkorjuun jälkeen kasvinjäänteiden hajoamisesta vapautuva ammoniumtyppi. Typen reaktiot kuvataan kertoimilla, joiden suuruuteen vaikuttavat sekä maan lämpötila että kosteus.

TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

SÄÄTÖSALAOJITUS

Säätösalaajituksen toimivuutta arvioitiin sekä Lapuan koealueen mittaussaineistoa että mallilaskelmia käyttäen. Mittaustulokset on esitetty julkaisussa Paasonen-Kivekäs ja Karvonen (2000), minkä vuoksi tässä yhteydessä on keskitetty mallintamiseen ja eri säätövaihtoehtojen simulointiin. Näiden laskennallisten tulosten perusteella saatiin käsitys säädön vaikutuksista typpihuuhoutumiin ja satoon. Käytännössä säätösalaajituksen tehokkuuteen vaikuttaa oleellisesti pellon kaltevuus, jota on tarkasteltu kenttämittausten

2000). Mineralisaation, nitrifikaation ja denitrifikaation kosteusrajoitukset perustuivat Viltholtin ja Jensenin (1988) esittämiin riippuvuuksiin.

Sadanta-arvot olivat pääasiassa koealueella mitattuja täydennettynä Ilmatieteen laitoksen havainnoilla. Potentiaalisen haihdunnan arvoina käytettiin Geodeettisen laitoksen Penman-Monteithin kaavalla laskemia aluearvoja, joita korjattiin edelleen ko. kasvustojen mukaisiksi (Shuttleworth 1993). Mallin kuvauskykyä arvioitiin vertaamalla laskettuja tuloksia mitattuihin arvoihin seuraavien muuttujien osalta: pohjaveden pinnan syvyys, pohjaveden ja maaperän nitraatti- ja ammoniumtypen pitoisuudet sekä kasvuston biomassa ja tyypipitoisuus. Maan lämpötilaa ja sulantaa kuvaava malli kalibroitiin Ilmatieteen laitoksen Ylistaron aseman mittauksia käyttäen. Laskentajakso oli kaikkiaan kolme ja puoli vuotta, toukokuusta 1993 vuoden 1996 loppuun, yhden vuorokauden aika-askeleella.

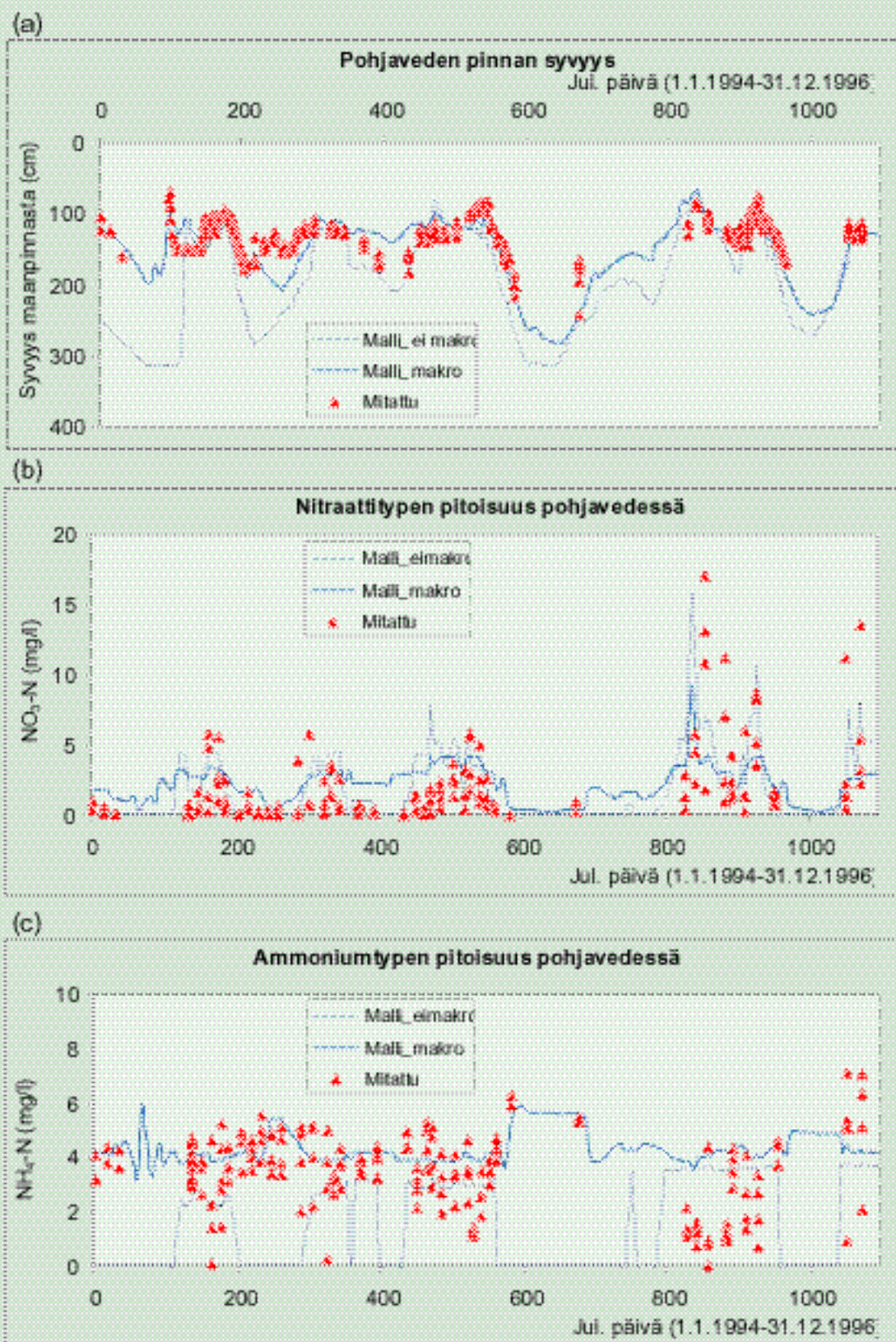
Mallia testattiin tilanteessa, jossa maaperän huokokset toimivat yhtenä systeeminä, ja tilanteessa, jossa maamatriisi ja makrohuokokset jaettiin erillisiksi virtaussysteemeiksi. Makrohuokosia muodostuu erityisesti juuristokerroksessa biologisen toiminnan (kasvien juuret, lierojen kanavat) seurauksena, mutta happamissa sulfaattimaissa rautasaostumat ja maan mururakenne synnyttävät suuria pysyviä huokosia myös syvemmillä maaperässä (Yli-Halla 1983). Makrohuokosten osuuden maanpinnalla arvioitiin olevan 3 % pinta-alasta, josta se pieneni syvyyden suhteen 180 cm:iin asti. Tämän alapuolella makrohuokosia ei oletettu esiintyneen, koska rautasaostumiakaan ei havaittu.

KALIBROINTITULOKSET

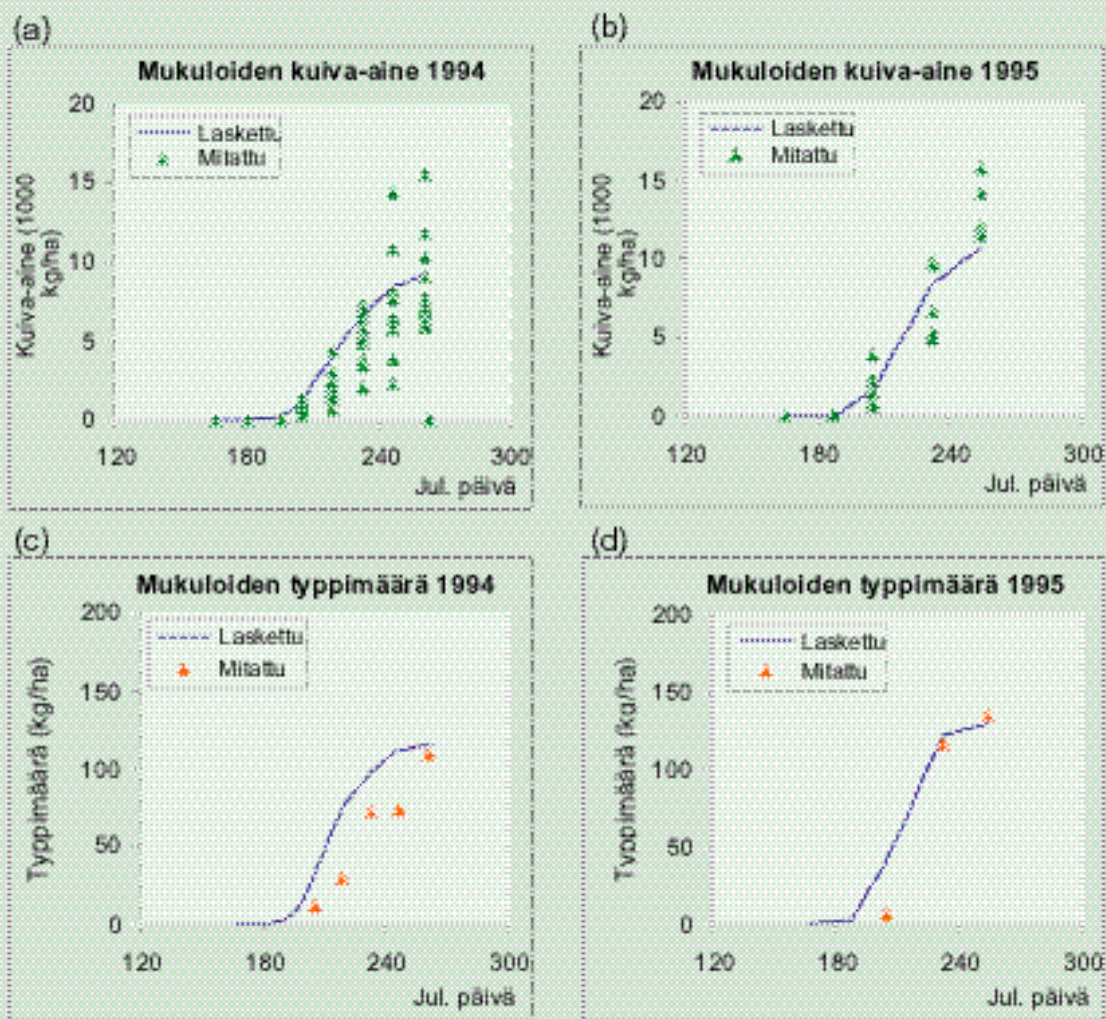
Makrohuokosmalli kuvasi hyvin pohjaveden syvyyden vaihtelua koko laskentajakson ajan. Sitä vastoin mallissa ilman makrohuokosia pohjavesi laski liian syvälle talvella ja kesällä 1994. Kuvassa 9a on esitetty kummallakin ratkaisutavalla saadut tulokset. Makrohuokosmallinkin laskemat syvyydet jäivät jonkin verran alle mitattujen arvojen elokuukuussa 1994. Selviä eroja mitattujen ja laskettujen arvojen välillä oli myös talvella 1995. Makrohuokosmalli tuotti vuosittain 3-38 mm enemmän valuntaa kuin malli ilman makrohuokosia. Pinta- ja salaojavalunnan osuuksissa oli selvin ero talvella 1994. Tällöin mallissa ilman makrohuokosia salaojavaluntaa syntyi hyvin vähän syvästä pohjaveden pinnasta johtuen ja valtaosa valunnasta tuli pintavaluntana. Makrohuokosmallissa lähes kaikki valunta tuli puolestaan salaojien kautta. Pintavaluntaa esiintyi vain kesällä 1996 (8 mm). Valuntamittauksia koealueelta ei ollut käytettävissä, mutta oletettavaa on, että pintavaluntaa esiintyi jonkin verran ainakin sulantakaudella.

Pohjaveden jyrkkä lasku kesällä 1995 ja 1996 selittyy haihdunnalla. Säätökaivon padotus vuosina 1994 ja 1996 oli vain 100-120 cm maanpinnasta, minkä vuoksi säädön vaikutus oli vähäinen 130 cm:n ojitussytydellä. Korkeimmillaan padotus oli 65 cm maanpinnasta kesäkuusta 1995 huhtikuulle 1996. Marras-joulukuun 1996 havainnot edustavat tilannetta, jolloin säätökaivossa ei ollut lainkaan padotusta ja sateita edelsi pitkä kuiva kausi.

Molemmat mallit pystyivät kuvaamaan kohtuullisesti keskimääräisiä nitraatti- ja ammoniumtypen pitoisuuksia pohjavedessä (kuva 9 b ja 9c). Malli ilman makrohuokosia aiheutti suurempia pitoisuuspiikkejä kuin makrohuokosmalli. Alueelle A oli tyypillistä pitoisuuksien suuri hajonta havaintoputkien välillä. Nitraattipitoisuuksien suhteellinen vaihtelu oli suurempaa kuin ammoniumpitoisuuksien vaihtelu, koska ammoniumia esiintyi runsaasti alueen A pohjamaassa ja osa siitä liukeni jatkuvasti pohjaveteen.



Kuva 9. (a) Pohjaveden pinnan syvyys maanpinnasta ja (b) nitraatti- ja (c) ammonium-
typen pitoisuudet vuosina 1994-1996. Ei makro =mallissa ei ole makrohuokosia. Makro=
mallissa makrohuukokset. Mitattu = havaintoputket osa-alueella A. Mallin ojaväli 10 m,
ojitusyvyys 130 cm ja säätökaivon padotus kenttämittausten mukainen.



Kuva 10. (a-b) Perunamukuloiden kuiva-aine ja **(c-d)** typpimäärä vuosina 1994 ja 1995. Laskettu=malli, jossa mukana makrohuukokset. Mitattu = osa-alueen A mittaukset.

tavanomaista salaojitusta ja säätösalaajitusta 10 metrin ojavälillä ja 110 cm:n ojitussyvyydellä. Simulointi tehtiin kolmella säätövaihtoehtoilla, joissa padotuksen korkeus ja ajankohta vaihtelivat vuodenajoittain (taulukko 1). Vaihtoehto 'ei säätö' edusti tavanomaista salaojitusta. Vaihtoehdossa 'säätö 1' padottaminen aloitettiin välittömästi kylvötöiden jälkeen. Vaihtoehdossa 'säätö 2' 90 cm:n padotus maapinnasta laitettiin päälle jo toukokuun alussa niin, että kevätkosteutta varastoitui enemmän peltoon ja koneita varten oli kuitenkin riittävä kuivavara. Kasvukauden padotus oli 60 cm ja syksyn 40 cm molemmissa tapauksissa. Vaihtoehdossa 'säätö 3' padotuskorkeus vaihteli vuosittain sääolosuhteiden mukaan. Padotus oli aina pois päältä sadonkorjuun aikaan ja joulukuun puolivälistä toukokuun alkuun. Pohjaveden pinnan syvyys eri tilanteissa on esitetty kuvassa 11.

Simulointituloksista kävi selvästi esille sääolosuhteiden vaikutus säätösalaajituksen toimintaan. Padotus nosti selvimmin pohjaveden pintaa kesällä ja syksyllä 1994 ja 1996, jolloin esiintyi runsaita sateita. Pohjaveden pinta laski kuitenkin nopeasti myös säätösalaajituksessa vähäsateisina aikoina kuten heinäkuussa 1994. Kesäkuussa 1995 pohjaveden pinta nousi säätösalaajituksessa vain 25 cm tavanomaista ojitusta korkeammalle

Sitä vastoin nitraattia oli hyvin vähän syvemmällä maaperässä (Paasonen-Kivekäs ja Karvonen 2000). Nitraatin pitoisuudet pohjavedessä johtuivatkin todennäköisesti sen huuhtoutumisesta suoraan juuristokerroksesta lannoitteena ja kasvinjäänteiden hajoamistuotteena. Myös tärkkelystehtaan solunesteen levitys aiheutti ilmeisesti pitoisuuksien kasvua marras-joulukuussa 1996.

Makrohuokosmallilla saadut keskimääräiset mineraalityypen (ammonium- ja nitraattityppi) pitoisuudet salaojavedessä olivat 6.8 - 9.1 mg l⁻¹ vuodesta riippuen. Ne olivat samaa suuruusluokkaa kuin mitatut arvot (4.5-9.6 mg l⁻¹), mutta laskettujen arvojen vaihtelu oli pienempää kuin mitattujen pitoisuuksien vaihtelu. Vastaavat arvot mallilla ilman makrohuokosia olivat 9.4-19.3 mg l⁻¹. Salaojaveden pitoisuuksia ei voitu suoraan verrata yksittäisiin pitoisuusmittauksiin, koska mallin maaprofiili edusti vain yhtä osa-aluetta koko 2.5 ha:n ojastosta. Typen dynamiikka pellon eri osissa vaihteli mm. happamasta sulfaattimaasta johtuen, mikä vaikutti myös todellisen salaojaveden koostumukseen. Makrohuokosmallilla laskettu vuotuinen mineraalityypen huuhtouma oli 13-20 kg ha⁻¹, mikä vastaa ko. seudun maatalousvaltaiselta valuma-alueelta (Haapajyrä) mitattuja keskimääräisiä typpihuuhtoumia (Rekolainen 1989).

Kasvustomalli kuvasi hyvin sekä perunamukuloiden että koko kasvuston kuiva-ainetta vuonna 1994, mutta vuoden 1995 lasketut arvot sadonkorjuuvaiheessa jäivät selvästi pienemmiksi kuin mitatut arvot (kuvat 10 a-b). Mukuloiden laskettu typpimäärä kasvukauden lopussa vastasi lähes täysin mitattua arvoa kumpanakin vuonna (kuva 10 c-d). Näytteiden välinen hajonta oli huomattavaa vuonna 1994, jolloin mukuloiden kuiva-ainemäärän keskiarvo oli 8753 ja keskihajonta 3057 kg ha⁻¹. Vastaavat arvot vuonna 1995 olivat 13080 ja 1849 kg ha⁻¹.

SÄÄTÖSALAOJITUKSEN VAIKUTUS TYPPIHUUHTOUMIIN JA SATOON VAIHTELEE SÄÄOLO-SUHTEIDEN MUKAAN - MALLILASKEMAT

Säätösalaajituksen vaikutuksia typpihuuhtoumiin ja satoon arvioitiin mallilla, jossa oli mukana makrohuokokset. Maaprofiili, osamallien parametrit, sääaineisto ja viljelytoimenpiteet olivat samat kuin mallin kalibroinnissa. Viljelykasveista tarkasteltiin vain perunaa, jolle yksityiskohtainen satomalli oli kehitetty. Laskenta tehtiin käyttäen

Taulukko 1. Salaojituksen säätövaihtoehdot, ojitussyvyys 110 cm.

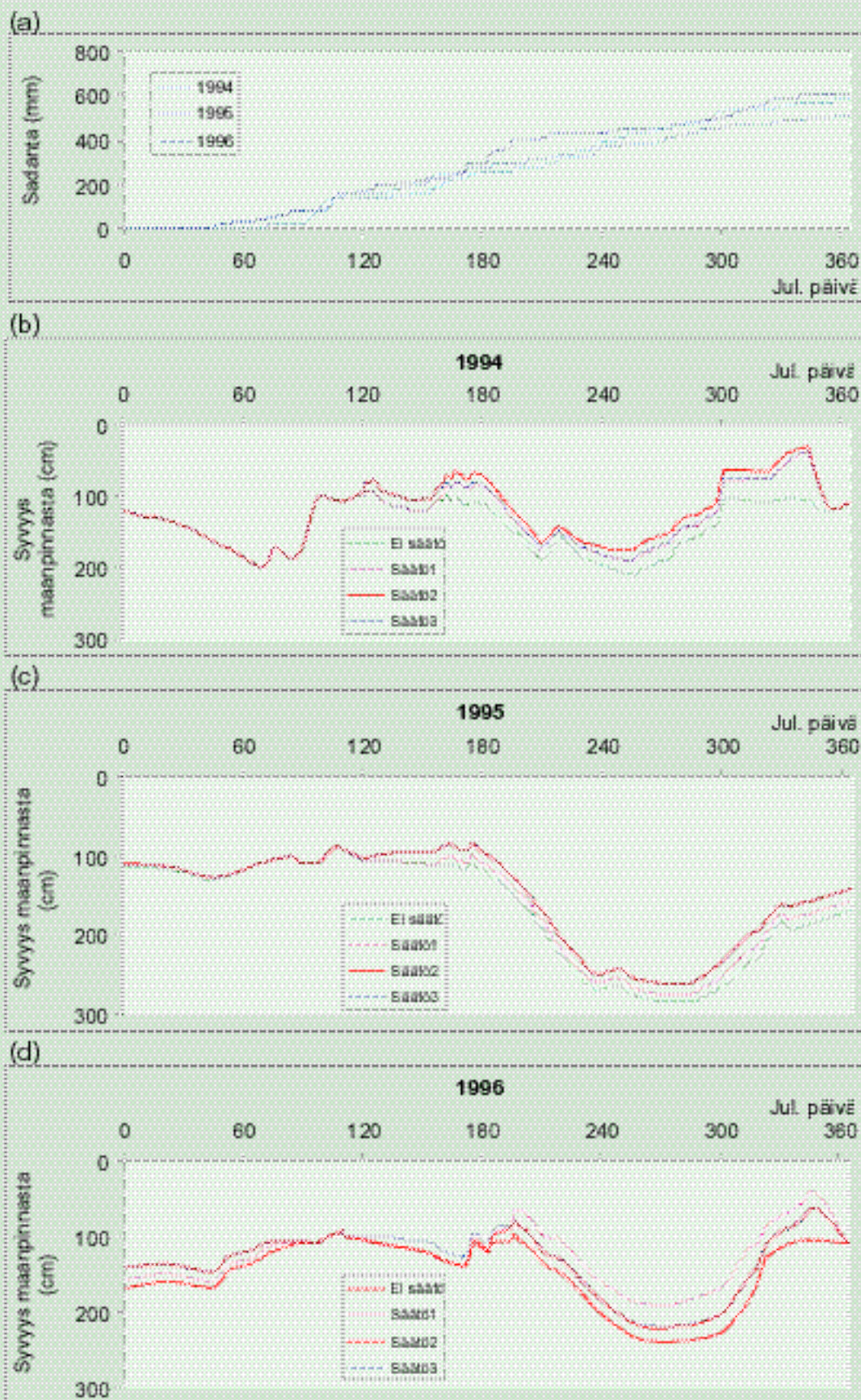
Säätö-vaihtoehto	Padotuskorkeus maanpinnasta, cm	Padotuksen ajankohta ¹⁾
Ei säätö		
Säätö 1	60, 40	Kasvukausi ²⁾ , syksy ³⁾
Säätö 2	90, 60, 40	Kevät ⁴⁾ , kasvukausi, syksy
Säätö 3	90, 90/50, 40	Kevät 94, kasvukausi 94, syksy 94
	90, 50, 40	Kevät 95, kasvukausi 95, syksy 95
	90, 60/90, 40	Kevät 96, kasvukausi 96, syksy 96

¹⁾ Ajankohdat, jolloin padotus oli päällä. Muina aikoina ojitus toimi tavanomaisen salaojituksen tavoin.

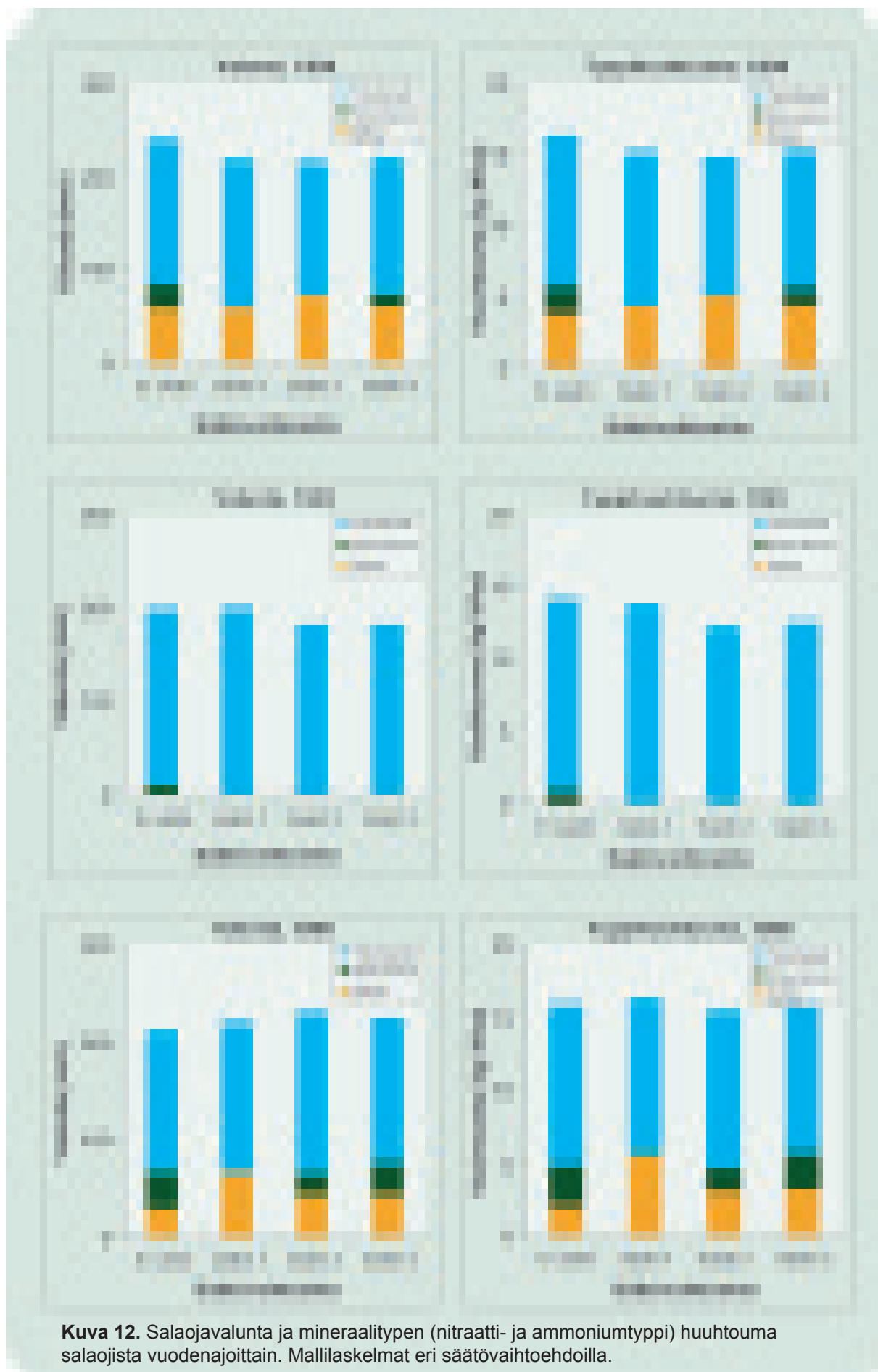
²⁾ Kasvukausi: 24.5.-20.5.1994, 5.6.-11.9.1995 ja 24.5.-14.9.1996

³⁾ Syksy: 5.10.-15.12

⁴⁾ Kevät: 1.-23.5.1994, 1.5.-4.6.1995, 1.-23.5.1995



Kuva 11. (a) Kumulatiivinen sadanta ja (b-d) pohjaveden pinnan syvyys maanpinnasta eri säätövaihtoehtoissa vuosina 1994, 1995 ja 1996. Mallilaskelmat, ojaväli 10 m ja ojitussyvyys 110 cm. Jul.päivä = 1.1. ... 31.12.



Kuva 12. Salaojavalunta ja mineraalityypen (nitraatti- ja ammoniumtyppi) huuhtoutuma salaojista vuodenajoin. Mallilaskelmat eri säätövaihtoehdoilla.

syvästä roudasta, jota esiintyi 80-100 cm:n syvyydessä vielä toukokuun puolivälissä. Routa muuttaa maan huokosrakennetta, joka puolestaan vaikuttaa veden virtaukseen. Vesitasemallissa jäi epäselväksi myös pintavalunnan muodostuminen sulantakaudella.

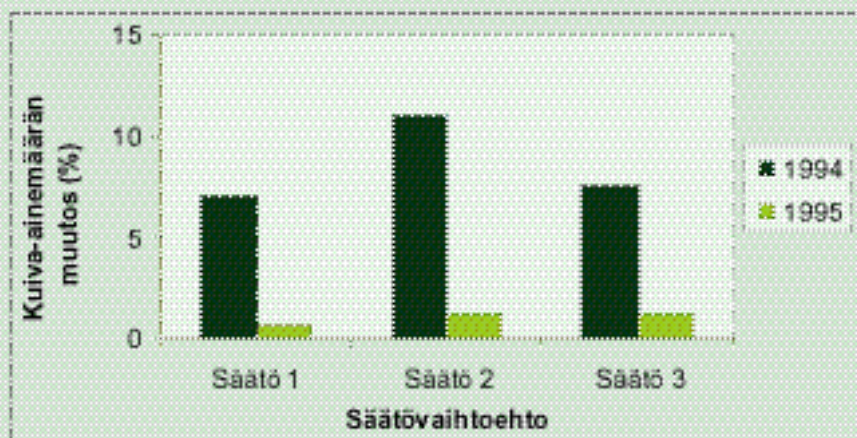
Mallilaskelmien mukaan säätösalaajitus lisäsi syksyn valuntaan, koska haihdunnan ollessa pientä maaprofiiliin kertynyt vesi ei poistunut kuin salaajien kautta. Jos malliin otetaan mukaan syvä pohjavesivalunta esim. läheisiin avouomiin, niin vesi purkautuu hitaasti syvien maakerrosten kautta vähentäen salaajavaluntaa. Tällöin olisi otettava huomioon myös avouomien padottava vaikutus pellolle päin, mikä saattaa nostaa äkillisesti vedenpintaa peltoalueella. Tämän toisen asteen ojituksen käyttö simulointilaskelmissa on hankalaa etenkin silloin, kun käytetään mittaustuloksista poikkeavia sääolosuhteita.

Typimmallin kalibrointia vaikeutti se, että Lapuan alue poikkesi kemiallisilta ominaisuuksiltaan tavanomaisista kivennäismaista. Tämän vuoksi parametrisarvoihin ja osa-prosessien suhteelliseen suuruuteen liittyy myös epätarkkuutta.

PELLON KALTEVUUDELLA SUURI MERKITYS SÄÄTÖSALAOJITUKSESSA

Mallilla saadut tulokset säätösalaajituksen vaikutuksista valuntaan ja typpihuuhtoumiin ovat teoreettisia eivätkä ne suoraviivaisesti edusta Lapuan koealuetta. Malli kuvasi kahden salaajaputken välistä maaprofiilia. Peltoalueella salaajituksen syvyys vaihteli kuitenkin 1-1.5 metriin, minkä vuoksi salaajavaluntaa syntyi erilailla pellon eri osissa. Padotuksen vaikutus ulottui vain osaan 2.5 hehtaarin ojastosta, koska säätökaivoja oli yksi kokoojaputken laskuaukossa ja pellon kaltevuus oli noin 1 % imuojien suunnassa. Kokoojaputken suunnassa maanpinnan kaltevuus oli 0.2 %. Ojaston keskellä pohjaveden pinta nousi harvoin salaajien syvyyteen, mutta toisinaan vedenpinta oli korkeammalla kuin säätökaivon padotus aiheuttaen valuntaa säätökaivosta (Paasonen-Kivekäs ja Karvonen 2000). Ojitusta tihennettiin säätösalaajitusta varten koko peltolohkolla lisäten kuivatuksen tehokkuutta, koska padotusta ei kuitenkaan ollut riittävästi.

Kenttämittausten perusteella säätö vaikutti selvästi esim. kesäkuussa 1995, jolloin padotusta oli 106 cm laskuaukon yläpuolella. Pohjaveden pinta nousi padotuskorkeuteen ojaston keskiosassa asti eikä salaajavaluntaa syntynyt (kuva 14). Kesä-heinäkuu 1996 oli erittäin sateinen ja säätökaivon padotus vain 50 cm laskuaukon pohjalta. Voimakasta virtausta esiintyi säätökaivosta lähes koko heinäkuun eikä maksimipadotukseen



Kuva 13. Perunamukuloiden kuiva-ainemäärän muutos eri säätövaihtoehdoissa verrattuna normaaliin salaajitukseen. Mallin ojaväli 10 m ja ojitussyvyys 110 cm.

ja laski nopeasti loppukesää kohti sateiden vähetessä. Heinäkuun 1996 rankkasateet (sadanta 106 mm kk^{-1}) nostivat pohjaveden pinnan aina padotuskorkeuteen, 60 cm:iin maanpinnasta, josta se laski lähes 2 metriin elokuun loppuun mennessä. Tavanomaisessa salaojituksessa vedenpinta nousi vähän yli salaojitussyvyyden ja laski alle 2 metrin vastaavana aikana. Elokuun sademäärä oli vain 20 mm. Pohjaveden jyrkkä lasku vuoden 1994 ja 1996 lopussa johtui padotuksen poistamisesta joulukuun puolivälissä. Syksy 1995 oli niin kuiva, ettei pohjavesi noussut edes salaojitussyvytyteen.

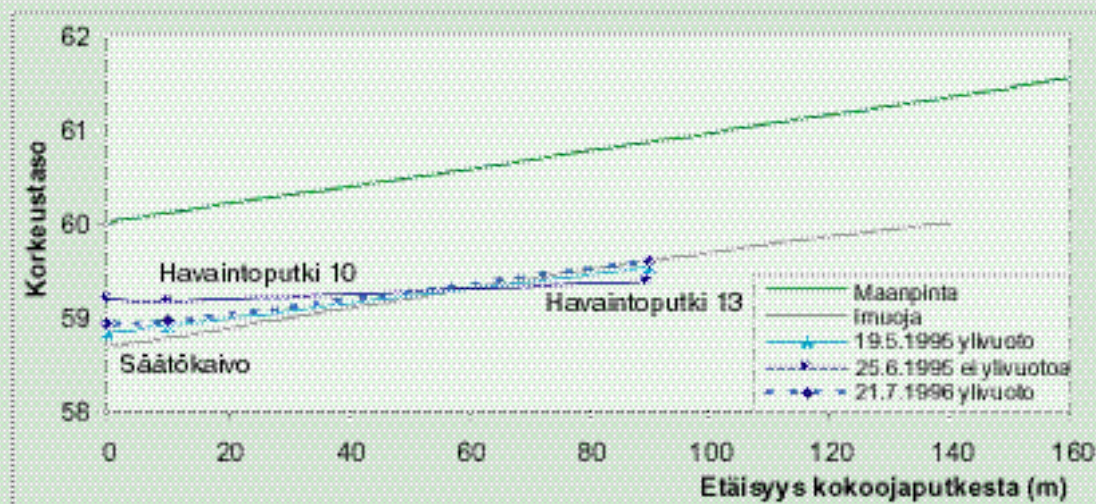
Säätösalaajitus vähensi vuotuista kokonaisvaluntaan 21-24 mm vuonna 1994 ja 1-16 mm vuonna 1995 säätövaihtoehdosta riippuen. Vähennemä vastasi suurimmillaan 10 % tavanomaisen salaojituksen kokonaisvalunnasta. Toisaalta padotus lisäsi valuntaa 10-20 mm runsassateisena vuonna 1996. Tästä pintavalunnan osuus oli 1-2.5 mm. Valtaosa valunnasta syntyi keväällä, minkä vuoksi säädön merkitys jäi vähäiseksi ko. sää- ja maaperäolosuhteissa. Säätösalaajituksella olikin vaikutusta ennen kaikkea valunnan ajankohtaan, sillä padotus vähensi tai esti kokonaan kesäaikaiset valunnat. Valunta lisääntyi jonkin verran syystalvella, kun padotus purettiin. Esimerkiksi syksyllä 1996 lisäys oli 15-38 mm (52-130 %) säätövaihtoehdosta riippuen. Kuvassa 12 on esitetty valunta ja mineraalitypen huuhtouma vuodenajoittain.

Säätösalaajituksen vaikutus typpihuuhtoumiin noudatti pitkälti salaojavalunnan vaihtelua. Suurimmillaan vuotuinen mineraalitypen kuormitus pieneni noin 2 kg ha^{-1} (13 %) vuonna 1995 tapauksessa, jossa padotus oli päällä toukokuun alusta lähtien. Vähennemä oli vain 0.4 kg ha^{-1} silloin, kun padotus aloitettiin vasta perunan istutuksen jälkeen. Vuonna 1994 huuhtouma väheni keskimäärin 1.3 kg ha^{-1} , joka vastasi 8 % tavanomaisen salaojituksen aiheuttamasta kuormituksesta. Säätösalaajituksen vaikutus vuoden 1996 kokonaiskuormitukseen oli lähes merkityksetön (-0.4...+0.4 kg ha^{-1}), mutta se vähensi selvästi kasvukauden ja lisäsi syksyn huuhtoumia. Padotus vasta kylvötöiltä lähtien esti kesäaikaisen kuormituksen (2.8 kg ha^{-1}) kokonaan. Sitä vastoin padotus heti toukokuun alusta vähensi kuormitusta vain 1.3 kg ha^{-1} .

Säätösalaajitus lisäsi perunamukuloiden kuiva-ainemäärää 7-11 % verrattuna tavanomaiseen salaojitukseen vuonna 1994, jolloin sadetta tuli suhteellisen tasaisesti läpi kasvukauden ja sadannan vajoaus (potentiaalinen haihdunta-sadanta) oli 58 mm. Suurin lisäys saatiin silloin, kun padotus aloitettiin 90 cm:llä heti toukokuun alusta ja nostettiin istutuksen jälkeen 60 cm:iin. Tällöin myös typpihuuhtouman vähennemä oli suurin. Sen sijaan säädön vaikutus satoon oli lähes olematon (0.6-1.2 %) vuonna 1995, jolloin sadannan vajoaus oli 148 mm. Mallissa kasvusto kärsi märkyydestä silloin, kun maaveden imu oli pienempi kuin 50 cm juuristokerroksessa. Kuivuusstressi alkoi maaveden imun noustessa yli 500 cm:n tai 1000 cm:n riippuen haihdutustilasta. Haihdunta oli siis potentiaalisella tasolla imun ollessa 50...500/1000 cm, mikä vastasi pintakerroksessa 45 ... 13 tilavuusprosentin kosteutta.

MALLILASKELMIIN LIITTYVIÄ EPÄVARMUUSTEKIJÖITÄ

Edellä esityt laskentatulokset riippuvat paljon mallin rakenteesta ja parametrien arvoista ja luonnollisesti mittausaineistosta. Makrohuokosten käyttö mallissa toi mukanaan lukuisia parametreja, jotka estimoitiin sovittamalla lasketut arvot mahdollisimman hyvin mittauksiin. Mittaustietoa näistä maaperän fysikaalisista ominaisuuksista ei ollut käytettävissä ja useita niistä on lähes mahdotonta mitata. Syitä eri malliratkaisujen välisiin eroihin erityisesti vuonna 1994 ei pystytty osoittamaan. Ne saattavat osittain johtua



Kokoojaputken laskuaukon korkeustaso säätökaivossa 58.34
 Padotuskorkeus 19.5.1996 58.84 ja 25.6.1996 59.40
 Padotuskorkeus 21.7.1996 58.94

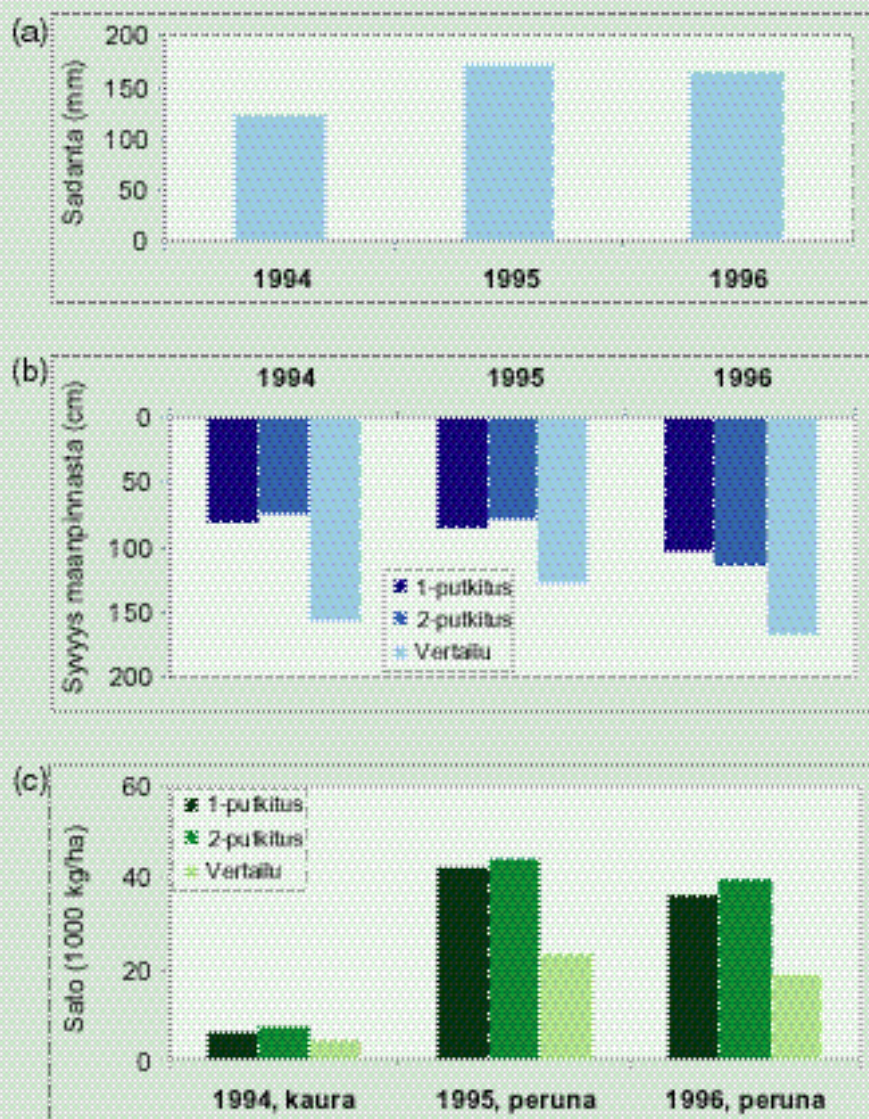
Kuva 14. Säätökaivon padotuksen vaikutus peltoalueella. Pohjaveden korkeustaso imuojien suunnassa ojaiston 5 keskiosassa ja säätökaivossa Lapuan koealueella.

SALAOJAKASTELU

KASTELU LISÄSI SELVÄSTI KAURA- JA PERUNASATOJA

Salaojakastelu Tyrnävän koealueella nosti pohjaveden pintaa keskimäärin 45-80 cm yksi- ja kaksikerrosojituksessa verrattuna alueeseen (vertailualue), jossa ei ollut kastelua eikä salaojitusta. Kastelun vaikutus tuli selvästi esille myös sadon määrässä (kuva 15). Pohjaveden syvyys kasteluilla alueilla vaihteli jonkin verran johtuen maanpinnan korkeuseroista, veden suotautumisesta reuna-alueilla ja todennäköisesti myös kasteluveden epätasaisesta jakautumisesta putkistoon varsinkin kaksikerrosojituksen alueella vuonna 1996 (kuva 16). Matalien kasteluputkien tukkeentumista havaittiin syksyllä 1995 ja lokakuussa 1997 ilmeni, että putket olivat lähes täyttyneet kasvien juurista ja maa-aineksesta (kuva 17). Putket olivat ilman ympärysainetta. Syvemmät kokooskuiduilla ympäröidyt putket yksi- ja kaksikerrosojituksessa olivat kuitenkin hyvässä kunnossa.

Kauran sadonlisäys oli 40-70 % ja perunan 80-110 % vertailualueeseen nähden. Myös sadon typpimäärä kasteluilla alueilla oli korkeampi vuosina 1994 ja 1995. Sitä vastoin vuonna 1996 pienin typpimäärä mitattiin alueelta, jossa kastelu tehtiin 1.1 metrin syvyydessä olevien imuojien kautta. Kastelu vähensi selvästi perunamukuloiden typpipitoisuutta, mikä perunan laadun kannalta on edullista (Wikman et al. 1996; Haverkort ja MacKerron 2000). Näytteiden kuiva-ainemäärän hajonta oli suuri koealueiden sisällä samoin kuin Lapualla. Typpimääritys oli tehty vain yhdestä näytteestä, minkä vuoksi koealueiden sisäisestä vaihtelusta ei saatu käsitystä. Viljelijän arvioiden perusteella kastelu lisäsi korjuukelpoista perunasatoa jopa 190 %, mutta sadon absoluuttiset määrät olivat huomattavasti pienempiä kuin tutkimusnäytteistä lasketut arvot (Matti et al. 1996).



Kuva 15. (a) Sadanta, (b) pohjaveden pinnan keskimääräinen syvyys kasvukaudella ja (c) jyvä-/mukulasato (tuorepaino) Tyrnävän osa-alueilla. 1- ja 2-putkitus=kastelualueet, vertailu = alue ilman kastelua ja salaojitusta.

olisi estänyt valuntaa, sillä vedenpinta pellon keskiosassa nousi sitä korkeammalle. Padotuskorkeuden lisäys olisi todennäköisesti aiheuttanut vettymishaittoja säätökaivon ympäristössä pellon alavimmassa osassa.

Säätösalaojituksessa pellon kaltevuuden raja-arvoksi on esitetty jopa 0.5 %. Kaltevuudet 0.5-1 % vaativat tehokkaita padotusrakenteita, mikä nostaa kustannuksia. Yli 2 %:n kaltevuudella veden suotautuminen alkaa vähentää padotuksen tehoa (Evans ja Skaggs 1989). Lapuan koalueella säätökaivojen lisäys kokoojaputkessa lisäisi jonkin verran padotusta, mutta säätörakenteita pitäisi olla ennen kaikkea imuojien suunnassa. Tämä on hankalaa toteuttaa vanhoissa ojituksissa. Valta- ja piiriojien säätelyä olisikin lisättävä, jotta säätösalaojituksen tehokkuus kasvaisi.



Kuva 16. Kastelualue kaksikerrosojitusta käyttäen Tyrnävällä kesäkuussa 1996. Vakojen pohjat olivat paikoitellen hyvin kosteita.



Kuva 17. Kastelualueiden salaojaputkia Tyrnävän koealueelta. Kaksi oikealla olevaa putkea kaksikerrosoituksen keskialueelta ja vasemmalla oleva putki alueen laidasta (ojitusyvyys noin 60 cm). Näytteet otetut lokakuussa 1997 kolme vuotta kastelun aloittamisen jälkeen.

Tyrnävän koealueella kastelulla saatu lisäsato oli huomattavan suuri, koska alue oli luonnostaan poikkeuksellisen kuiva. Limingassa perunasato salaojakastelussa oli 10-16 % suurempi kuin kastelemattomalla alueella vuonna 1996 (Holma 1999). Samalla seudulla vuonna 1991 avo-ojituksessa toteutettu pohjavesikastelu lisäsi perunasatoa 10 % ja vähensi rupisuutta 50 % verrattuna alueeseen ilman kastelua (Ahonen 1991).

SALAOJAKASTELUN VAIKUTUS TYPPIHUUHTOUMIIN RIIPPUU SÄÄOLOISTA JA PELTOALUEESTA

Tyrnävällä pohjavesi oli luonnostaan syvällä, minkä vuoksi tavanomaisesta salaojituksesta valuntaa olisi syntynyt lähinnä sulantakaudella ja poikkeuksellisten rankkasateiden yhteydessä. Kasteluveden pumppaus aiheutti pientä salaojavaluntaa lähes jatkuvasti, sillä osa vedestä palautui säästökaivojen kautta takaisin varastoaltaaseen. Valunnaksi arvioitiin 0.1-2 mm vuorokaudessa vuoden 1995 mittausten perusteella. Salaojista altaaseen purkautuneen veden typpipitoisuudet olivat yleensä alle 2 mg l⁻¹ kasvukaudella. Kesäkuussa 1995 ja heinäkuussa 1996 typpipitoisuudet olivat kuitenkin selvästi suurempia, mikä johtui ilmeisesti karjanlannan ja lannoitteen huuhtoutumisesta. Korkein pitoisuus (11 mg l⁻¹) mitattiin heinäkuussa 1996 silloin, kun kasteluvettä ei pumpattu ojaan, vaan salaojista purkautuva vesi oli "kuivatusvettä". Kastelun alkaessa pitoisuus laski alle 2 mg:aan l⁻¹.

Varastoaltaassa kokonaistypen pitoisuus pysyi jatkuvasti alle 2 mg:n l⁻¹. Kasteluveden kautta pellolle tullut typpimäärä oli arviolta suurimmillaan noin 0.1 kg ha⁻¹ d⁻¹. Altaan pitoisuuksiin vaikuttivat pellolta purkautuvien vesien lisäksi myös joesta pumpattu lisävesi ja biokemialliset prosessit itse altaassa. Esimerkiksi kesän typpipitoisuudet Sjöökullan koealueen varastoaltaassa pienenivät murto-osaan, kun veden viipymä oli pitkä (Paasonen-Kivekäs et al. 1996). Altaaseen ei johdettu lisävettä. Tyrnävän altaan tilavuus oli suhteellisen pieni peltoalueeseen nähden, minkä vuoksi se ei juurikaan vaikuttanut kevään kuormitukseen. Sen avulla voitiin kuitenkin vähentää tai estää kestäväkäs huuhtoumat.

Pohjaveden kokonaistypen pitoisuudet olivat vertailualueella selvästi suurempia kuin kastelualueilla kesällä 1994, mikä johtui ennen kaikkea kasteluveden aiheuttamasta laimenemisestä. Syksyä kohti erot tasaantuivat. Kesällä 1995 pitoisuuksissa ei ollut niin selvää eroa kuin edellisenä vuonna, mutta pitoisuudet koko alueella olivat edelleen alle 10 mg l⁻¹. Kesä-elokuussa 1996 typen pitoisuudet nousivat huomattavan korkeiksi (8-25 mg l⁻¹) kaikilla osa-alueilla. Tämä johtui todennäköisesti lannoitteen huuhtoutumisesta syvemmälle maaperään rankkasateiden takia. Kuvassa 18 on esitetty pohjaveden pinnan keskimääräinen syvyys ja kokonaistypen pitoisuudet eri osa-alueilla sekä salaojista altaaseen purkautuvan veden ja altaan typpipitoisuudet.

Tyrnävän mittaustulosten ja myös muiden tutkimusten (Skaggs ja Bréve 1994, Mejia ja Madramootoo 1998, Tan et al. 1998) perusteella salaojakastelu lisää todennäköisesti kasvukauden ja alkusyksyn valuntaa. Salaojista purkautuvien vesien pitoisuudet ovat yleensä pieniä kasteluveden aiheuttamasta laimenemisestä johtuen, minkä vuoksi kuormitus voi jäädä alle tavanomaisen salaojituksen. Kriittinen ajanjakso on kesän rankkasateet, jolloin lannoitteet huuhtoutuvat juuristokerroksesta syvemmälle maaperään ja salaojien kautta pois pellolta. Kasteluveden pumppaus ojaan olisikin lopetettava ennen sateita, jotta sadevettä voidaan varastoida pellolle mahdollisimman paljon. Myös allas estää huuhtoumia vesistöön edellyttäen, että varastotilavuutta on riittävästi. Poh-

Sjökullan koealueella salaoja- ja pintavaluntaa esiintyi lähes yhtä paljon mutta niiden ajallinen jakautuminen vaihteli. Pintavaluntaa syntyi runsaasti sulamiskaudella ja loppusyksyllä, mutta ei juurikaan kasvukaudella. Kuvassa 19 on esitetty kuukausittaiset valunnat ja typpihuuhtoumat jaksolla kesäkuu 1994 – joulukuu 1996. Marraskuussa 1996 sekä salaoja- että pintavaluntaa oli poikkeuksellisen runsaasti, sillä sademäärä oli 2.5-kertainen verrattuna pitkän ajanjakson keskiarvoon. Huhtikuun 1996 valunta muodostui lähes yksinomaan koko talven kertyneen lumipeitteen sulamisesta. Kasvukaudella huomattavan paljon salaojavaluntaa esiintyi touko-kesäkuussa 1995 (22 m) ja heinäkuussa 1996 (12 mm).

Mittausjaksolla syyskuu 1997 – huhtikuu 1999 kesä 1998 oli huomattava märkä. Touko-elokuun sadanta oli lähes 400 mm ja valunta noin 55 mm, josta 30 mm tuli elokuussa salaojien kautta. Kesä-heinäkuun sateet (200 mm) aiheuttivat lähes yksinomaan salaojavaluntaa noin 10 mm.

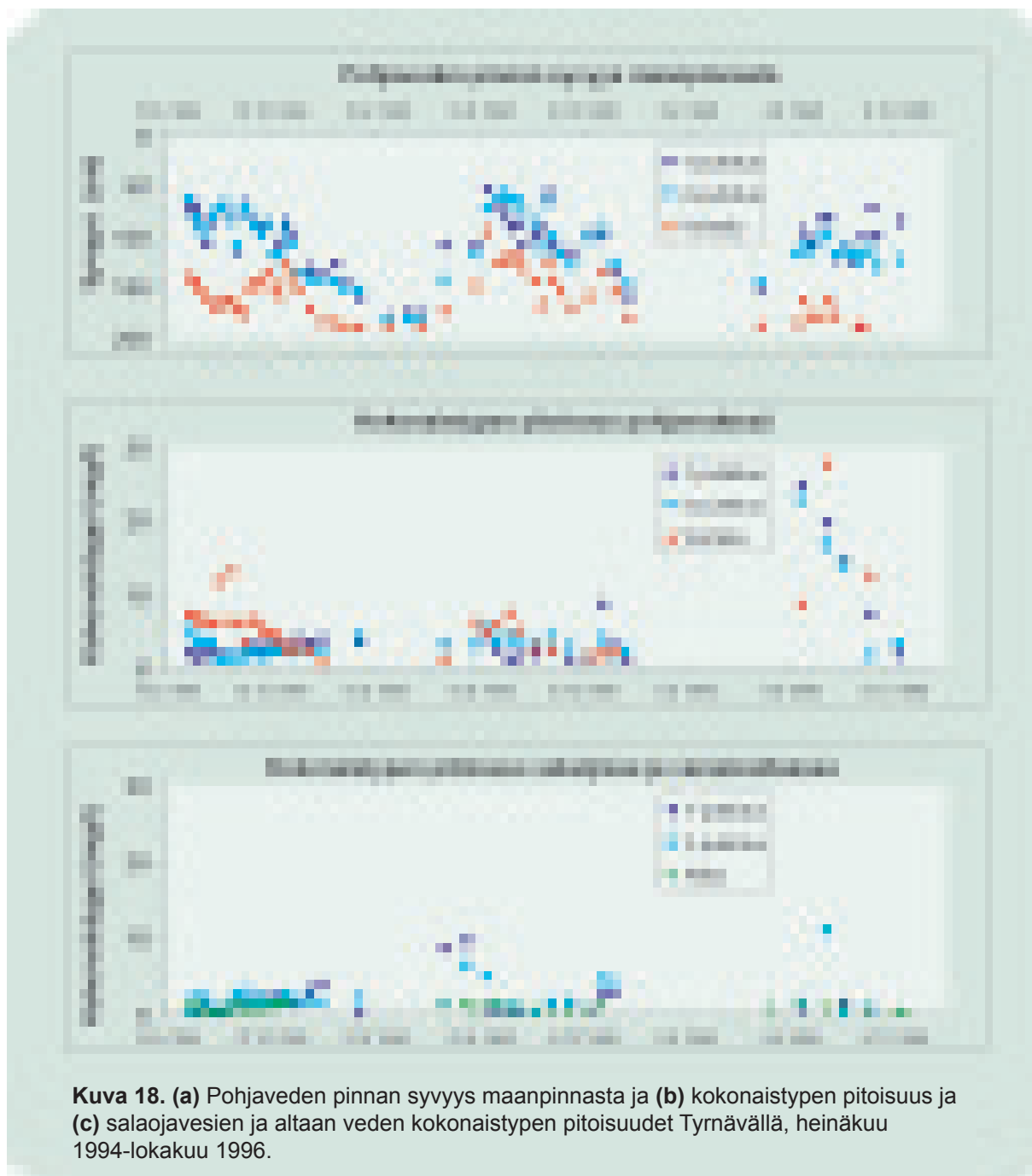
RANKKASATEET LANNOITUKSEN JÄLKEEN AIHEUTTIVAT HUUHTOUMAPIIKIN

Kokonaistypen huuhtouma jaksolla kesäkuu 1994 – joulukuu 1996 oli 30 kg ha^{-1} , josta salaojien kautta tuli 80 %. Kuormituksesta lähes 60 % muodostui kahtena ajankohtana: touko-kesäkuussa 1995 ja marraskuussa 1996. Alkukesän typpihuuhtouma oli 11 kg ha^{-1} johtuen runsaista sateista heti lannoituksen jälkeen ja salaojavesien erittäin korkeista pitoisuuksista. Marraskuussa 1996 salaojavesien pitoisuudet olivat suhteellisen alhaisia niin, että kuormitus (3.8 kg ha^{-1}) jäi alle puoleen touko-kesäkuun 1995 arvosta huolimatta suuresta valunnasta. Tällöin typpeä huuhtoutui myös pintavalunnan mukana noin 2 kg ha^{-1} . Sulamiskaudella salaojavalunta ja sen typpipitoisuudet olivat suhteellisen pieniä, mutta silti kuormitus oli samaa suuruusluokkaa kuin pintavalunnan synnyttämä kuormitus. Kuormitusarvot laskettiin päivittäisten valuntojen ja hetkellisten pitoisuusarvojen perusteella. Epätarkkuutta valunta-arvoissa aiheuttivat mittalaitteiden toimintahäiriöt.

TYPPI KULKEUTUI NOPEASTI PINTAKERROKSESTA SALAOJIIN

Typpipitoisuuksien jyrkkä nousu välittömästi lannoituksen jälkeen viittaa veden nopeaan virtaukseen pintakerroksesta salaojiin. Tämä kulkeutuminen oli selvintä touko-kesäkuussa 1995 ja kesäkuussa 1998, jolloin kokonaistypen pitoisuudet nousivat korkeimmillaan 70 mg:aan l^{-1} (kuva 20). Myöhemmin kasvukaudella esiintyneissä valumissa pitoisuudet olivat selvästi pienempiä kuin alkukesällä. Heinäkuun 1996 rankkasateiden yhteydessä typpipitoisuudet olivat alle 5 mg l^{-1} . Tällöin syysruis oli olettavasti käyttänyt huomattavan osan lannoitteesta. Pitoisuudet laskivat myös heinä-elokuussa 1998 alle 10 mg:aan l^{-1} . Samoin sulantakauden ja syksyn pitoisuudet jäivät yleensä alle tämän arvon. Poikkeuksena oli kuivan kesän 1997 jälkeinen salaojavalunta, jossa typpeä oli huomattavan paljon, $14\text{--}22 \text{ mg l}^{-1}$. Nitraattityppi, joka on suoraan leville käyttökelpoista typpeä, muodosti 26–98 % salaojavesien kokonaistypen pitoisuudesta. Osuus oli suurin kesällä lannoituksen jälkeen ja pienin talvella.

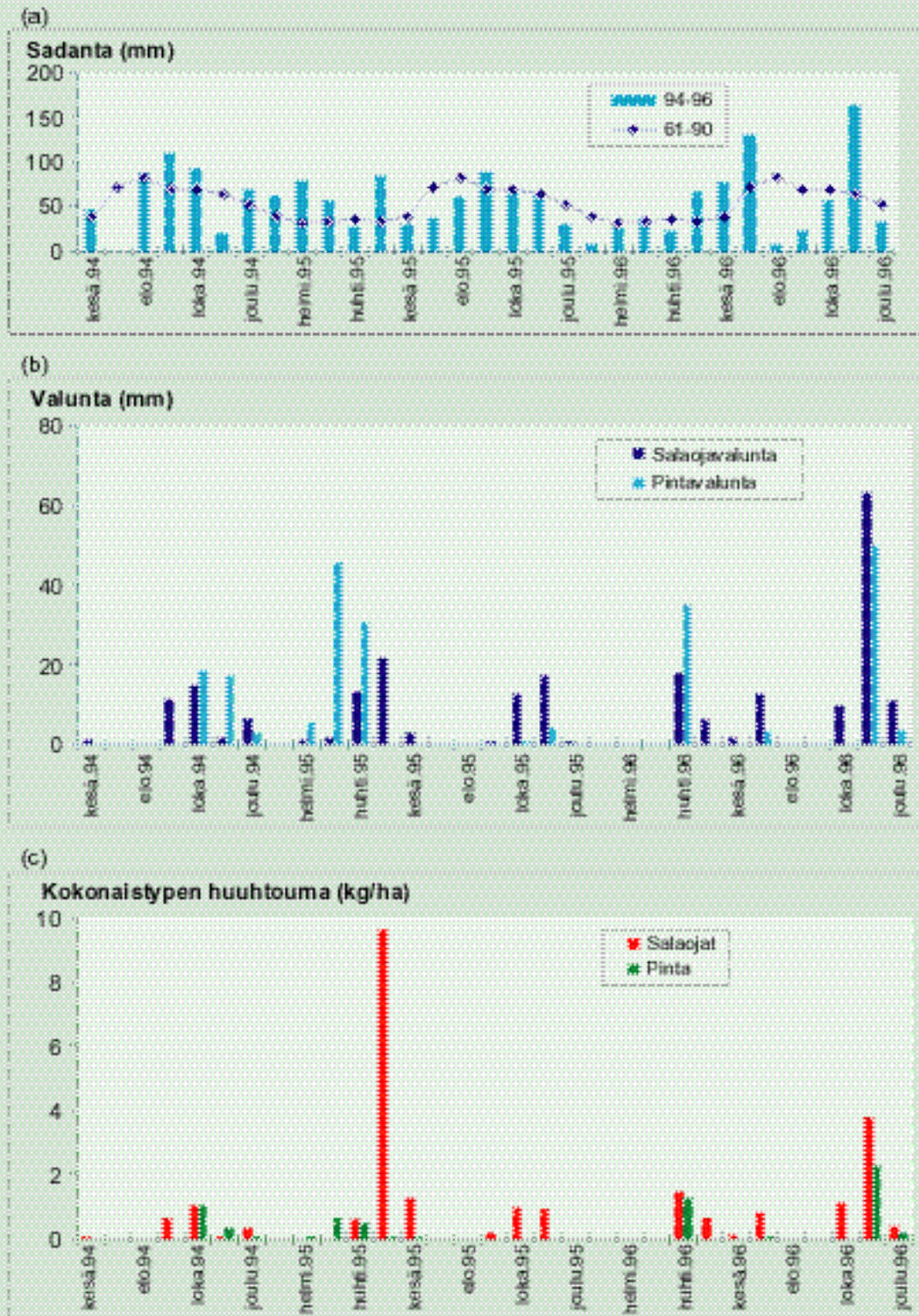
Oikovirtaukset suurten huokosten kautta tulivat esille myös maaprofiilien nitraattityypen määrissä toukokuussa 1995. Tällöin maaveden nitraattikonsentraatiot pintamaassa ($12\text{--}82 \text{ mg N l}^{-1}$) olivat samaa suuruusluokkaa kuin salaojavedessä, mutta salaojitussyvyydellä keskimäärin vain 2 mg l^{-1} (Paasonen-Kivekäs et al. 1999)



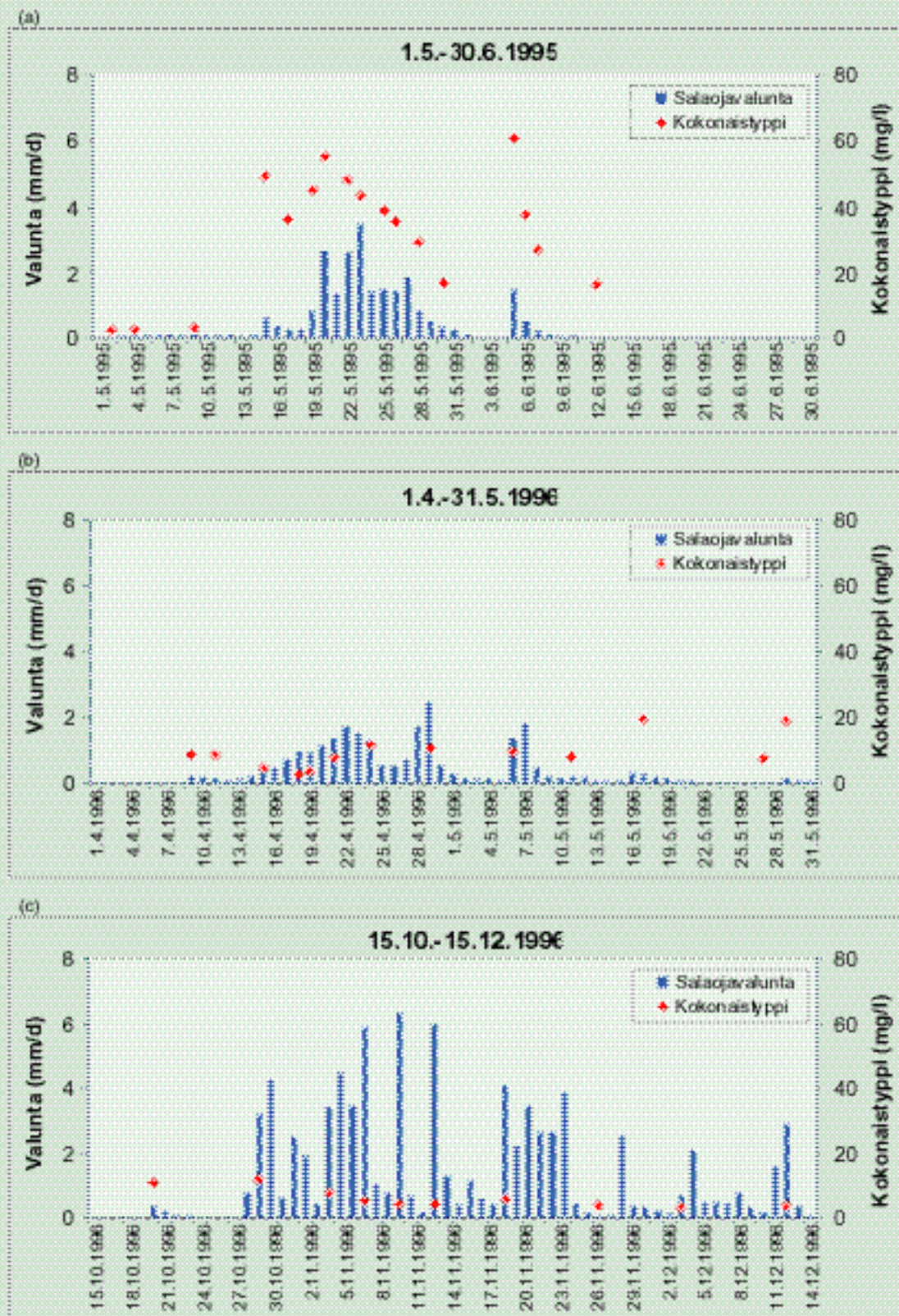
Kuva 18. (a) Pohjaveden pinnan syvyys maanpinnasta ja **(b)** kokonaistypen pitoisuus ja **(c)** salaojavesien ja altaan veden kokonaistypen pitoisuudet Tyrnävällä, heinäkuu 1994-lokakuu 1996.

javeden ollessa korkealla on mahdollista, että pintavalunta ja siten eroosioainekseen kiinnittyneen fosforin huuhtouma lisääntyvät kuten säätösalaojituksen yhteydessä esitettiin. Salaojakastelun vesiensuojelulliset hyödyt ovat pitkälti hankekohtaisia riippuen mm. alueen luontaisesta pohjaveden pinnan syvyydestä sekä kastelun toteutuksesta.

RAVINTEIDEN HUUHTOUTUMINEN SALAOJITETUSTA SAVIMAASTA

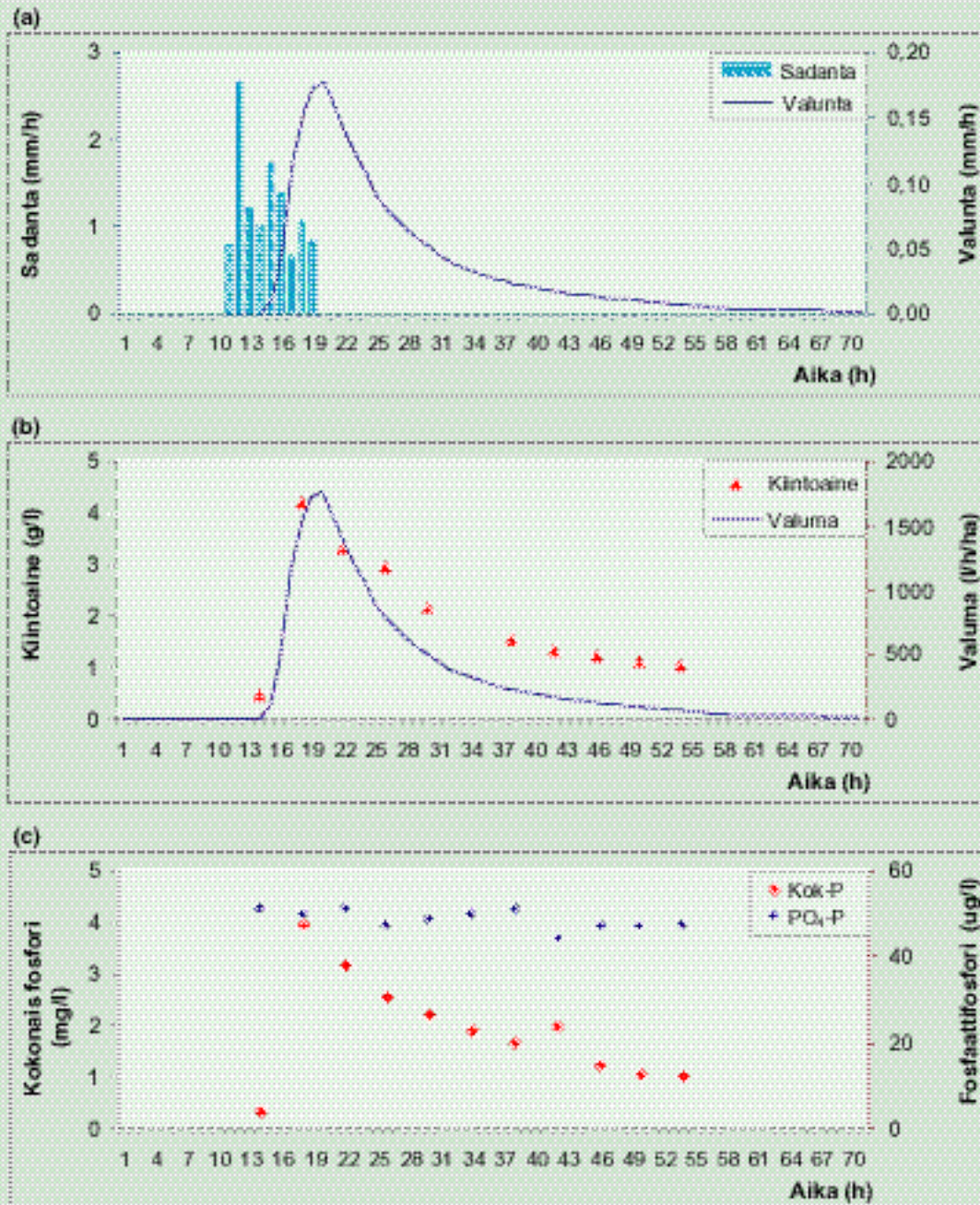


Kuva 19. (a) Sadanta Vihdin Maasoja (Ilmatieteen laitos), **(b)** valunta ja **(c)** kokonaistypen huuhtouma Sjököllän koelueella. Kuukausi- ja kuukausi- kesäkuu 1994-joulukuun 1996 ja sadannan pitkän ajanjakson (1961-90) keskiarvot. Typpilannoitus: 10.5.1995 110 kg ha⁻¹ (ohra), 27.8.1995 28 kg ha⁻¹ ja 18.5.1996 96 kg ha⁻¹ (syysruis).



Kuva 20. Salaojavalunta (vuorokausiarvot) ja salaojaveden kokonaistypen pitoisuudet (pistenäytteet) (a) touko-kesäkuussa 1995, (b) huhti-toukokuussa 1996 ja (c) loka-joulukuussa 1996 Sjököllan koalueella.

kuten edellä esitettiin. Esalan ja Leppäsen (1998) tekemissä laboratoriokokeissa nitraatin huuhtoutuminen oli suurempaa savimaassa tilanteessa, jossa näytteitä sadetettiin 13 päivää lannoituksen jälkeen, kuin lannoitusta välittömästi seuranneessa sadetuksessa. Larssonin (1999) mukaan makrohuokosvirtaus kuitenkin lisäsi nitraattitypen huuhtoutumista silloin, kun rankkasateita esiintyi heti lannoituksen jälkeen. Muulloin makrohuokokset vähensivät huuhtoutumista, koska nitraatti oli pääasiassa pienissä huokosissa, joissa veden liike oli erittäin hidasta. Sjököllä kulkeutumisreittien selvittäminen vaati sekä kokeellista että mallintamistutkimusta, jotta eri tekijöiden osuudesta saadaan tarkempi käsitys.



Kuva 21. (a) Sadanta ja salaojavalunta, (b) salaojavaluma ja kiintoaineen ja (c) kokonaisfosforin ja fosfaattifosforin pitoisuudet salaojavedessä 18.-20.10.1997. Vesinäytteet otettu neljän tunnin välein pistenäytteinä. Sadannan kokonaismäärä 11 mm ja salaojavalunnan

KIIINTOAINE- JA KOKONAISFOSFORIPITOISUUDET VAIHTELIVAT VALUNNAN MUKAISESTI

Sjökullan salaojavesissä todettiin ajoittain paljon kiintoainetta ja siihen sitoutunutta fosforia. Kiintoaineen ja kokonaisfosforin pitoisuudet noudattivat selvästi valuntakäyrän muotoa. Sitä vastoin fosfaattifosforin ja typen pitoisuuksissa ei havaittu selvää vaihtelua virtaamaan suhteen. Kuvassa 23 on esitetty valuntatapahtuma lokakuulta 1997, jolloin kiintoainetta oli runsaasti. Näytteet otettiin neljän tunnin välein pistenäytteinä. Koe-alueen valumavesien kiintoaine- ja fosforipitoisuuksia on tutkinut tarkemmin Uusitalo (2000).

VEDEN JA RAVINTEIDEN KULKEUTUMISREITIT MAAPERÄSSÄ EPÄSELVÄT

Lähtöoletuksena oli, että savimaassa vesi kulkeutuu salaojiin pääasiassa kavaintojen kautta. Sjökullassa tehdyn kartoituksen perusteella kaivannon merkitys on olettavasti vähäisempi kuin maaperässä olevien makrohuokosten. Tiivis jankkokerros estää veden virtausta salaojiin, vaikka syvemmällä olikin erotettavissa humuspitoinen täyttömaa (kuva 22). Halkeamien lisäksi makrohuokosia syntyy juurikanavista ja lierojen kaivamista onkaloista, joiden tiheys voi vaihdella hyvinkin paljon pellon eri osissa (Aura 1990, Nuutinen et al 1998 ja 2000). Suuret huokokset johtavat hyvin vettä, sillä sadannan ja salaojavalunnan välinen aikaviive oli Sjökullassa vain muutamia tunteja silloin, kun maa oli kosteaa sateiden alkaessa (ks. kuva 21). Sjökullan koealueen alustavissa mallintamistuloksissa tuli esille se, että pohjaveden horisontaalisella virtauksella syvemmällä maaperässä saattaa olla merkittävä osa vesitaseessa pinta- ja salaojavalunnan lisäksi (Koivusalo et al. 1999).

Typen kulkeutumiseen vaikuttaa myös sateiden ajoittuminen lannoitukseen nähden



Kuva 22. Salaojakaivanto Sjökullan koealueella.

Säätösalaajituksen ja salaajakastelun ympäristövaikutukset ovat vaikeasti arvioitavissa em. mainituista tekijöistä johtuen. Menetelmiä voidaan käyttää joko jo olemassa olevassa salaajituksessa tai täysin uudessa ojituksessa, jolloin niiden erityisvaatimukset voidaan paremmin ottaa huomioon. Tämä vaikuttaa menetelmien merkitykseen ravinnehuuhtoutumien pienentäjänä. Avo-ojitetun pellon salaajittaminen vähentää fosforihuuhtoumia, mikä on keskeinen tavoite vesiensuojelussa (Ympäristöministeriö 2000). Salaajitus lisää kuitenkin nitraattityypen huuhtoumia, joilla saattaa myös olla haitallisia vaikutuksia veden laatuun. Säätösalaajituksella voidaan vähentää näitä typpihuuhtoumia. Säättömenetelmien vaikutukset fosforikuormitukseen ovat epäselvät. Padotettaessa pohjaveden pintaa on mahdollista, että pintavalunta ja siten kiintoaineen kulkeutuminen lisääntyy, mikä puolestaan lisää fosforin huuhtoutumista. Toisaalta Peltovuoren (2000) mukaan padotuksella voidaan edistää fosforin pidättymistä pohjamaahan ja siten pienentää salaajien kautta tulevaa fosforikuormitusta.

Tutkimuksessa selvitettiin myös pinta- ja salaajavalunnan synnyttämiä ravinnehuuhtoumia savimaalta. Savimaalle tyypillistä oli veden nopea virtaus pintakerroksesta salaajiin. Tämä aiheutti huomattavan typpihuuhtouman tavanomaisesti käytetyillä lannoitemäärillä silloin, kun lannoituksen jälkeen esiintyi rankkasateita. Salaajien kautta huuhtoutui ajoittain myös runsaasti kiintoainetta ja fosforia. Oletettavasti veden virtaus ja siten myös ravinteiden kulkeutuminen salaajiin tapahtuu pääasiassa makrohuokosten kautta eikä itse salaajakaivannoilla ole niin suurta merkitystä vanhoissa salaajituksissa kuin tutkimuksen alussa oletettiin. Vesiensuojelun kannalta on tärkeää lisätä veden viipymää maaperässä, jolloin myös ravinteet jäävät kasvien käyttöön. Hyväkuntoisessa ja tasaisessa savipellossa säätösalaajitus saattaisi olla mahdollista.

Tutkimuksessa käytetyt koealueet edustivat kolmea erityyppistä maaprofilia. Koska ojitusmenetelmien vaikutukset riippuvat paljon maaperän ominaisuuksista, kaltevuudesta ja luontaisesta pohjaveden pinnan syvyydestä, tulosten yleistäminen muille alueille on hankalaa. Säättömenetelmien toimintaa olisikin seurattava erilaisilla peltoalueilla. Huuhtoumien arviointi edellyttää valunnan mittausta, jota koealueilla ei pystytty tekemään. Säätösalaajituksen ja salaajakastelun vaikutuksista sadon määrään ja laatuun on niukasti mittausaineistoa Suomen olosuhteissa. Jatkotutkimuksissa olisi selvitettävä myös menetelmien vaikutuksia maan rakenteeseen ja mikrobiologiaan.

Matemaattiset mallit ovat erinomainen apuväline maa-kasvisysteemin tutkimisessa, vaikka niihin sisältyykin paljon epävarmuutta. Mallin rakenne ja parametriarvot ovat osittain sidoksissa käytettyyn mittausaineistoon, mikä heikentää mallilaskelmien luotettavuutta mittausaineistosta poikkeavissa maaperä- ja sääolosuhteissa. Mallien testaus vaatiikin runsaasti erityyppisiä mittauksia ja pitkiä havaintosarjoja, joita harvoin on tarjolla. Toisaalta mallintaminen auttaa kokeellisen tutkimuksen suunnittelussa, minkä vuoksi laskentaa ja kenttämittauksia olisikin tehtävä lomittain.

Tutkimuksessa mittaukset tehtiin normaalissa viljelyssä olevilla peltolohkoilla, mikä aiheutti useita ongelmia mittausten toteutuksessa ja ojitusmenetelmien vaikutusten arvioinnissa. Toisaalta niistä saatiin selvästi esille säättömenetelmien tekninen toimivuus ja tekijöitä, jotka vaikuttavat veden virtaukseen ja ravinteiden huuhtoutumiseen todellisissa olosuhteissa.

KIRJALLISUUS

YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa selvitettiin säätösalaajituksen ja salaojakastelun vaikutuksia typpihuuhtoumiin ja satotasoon peltoalueilla tehtyjä mittauksia ja matemaattista mallintamista käyttäen. Tulosten perusteella vesitalouden säädön merkitys riippuu paljon pellon ominaisuuksista, ojituksesta, säätilasta ja säätötoimenpiteistä. Menetelmien vaikutukset pohjaveden pinnan syvyyteen ovat erilaiset, sillä säätösalaajituksessa pohjavesi vaihtelee sääolojen mukaan kun taas salaojakastelussa se pidetään tietyllä syvyydellä kasvukaudella. Tämän vuoksi myös salaojavalunta ja salaojista purkautuvan veden laatu poikkeavat säätömenetelmien välillä. Luonnollisesti eroja on myös niiden vaikutuksissa sadon määrään ja laatuun.

Mallilaskelmien perusteella säätösalaajitus vähensi vuotuista typpikuormitusta $0.4\text{--}2\text{ kg ha}^{-1}$ (3–13 %), mutta sateisina vuosina se jopa lisäsi huuhtoumia tietyissä säätövaihtoehtoissa. Säädöllä näyttäisikin olevan vaikutusta ennen kaikkea kuormituksen ajankohtaan, sillä padotus vähensi tai esti kokonaan kesäaikaiset huuhtoumat. Mallin mukaan tämä kuitenkin lisäisi kuormitusta loppusyksyllä. Kesän huuhtoumat ovat keskimäärin pieniä. Lannoituksen jälkeiset rankkasateet voivat kuitenkin aiheuttaa huomattavia kuormituspiikkejä, koska valumavesien pitoisuudet nousevat moninkertaisiksi kevään ja syksyn arvoihin verrattuna. Tämä kuormitus on lähes kokonaan nitraattityyppiä, joka on välittömästi levien käytettävissä. Säätösalaajituksella saatu laskennallinen perunasadon lisäys oli parhaimmillaan noin 10 %, kun sadannan vaje oli pieni. Sitä vastoin vähäsateisina kesinä säädöllä ei juurikaan voida parantaa kasvien vesitaloutta.

Salaojakastelu nosti tehokkaasti pohjaveden pintaa ja satotasoa Tyrnävän hietapelolla. Kastelu voi lisätä kasvukauden ja alkusyksyn valuntaa, mutta typpihuuhtoumat saattavat jäädä pienemmiksi kuin tavanomaisessa salaajituksessa. Kasvukaudella salaajaveden typpipitoisuudet olivat yleensä pieniä laimenemisestä johtuen, mutta kesän rankkasateet nostivat selvästi pitoisuuksia lannoitteen huuhtoutuessa syvemmälle maaperään. Salaojakastelu on ennen kaikkea kastelumenetelmä, jonka vesiensuojelulliset vaikutukset ovat osittain epäselvät. Sitä pitäisikin verrata myös muiden kasteluvaihtoehtojen aiheuttamaan vesistökuormitukseen.

Säädön toiminnan kannalta ratkaisevia ovat tehokkaat säätörakenteet, jotta peltoon saataisiin syntymään mahdollisimman paljon varastotilavuutta. Tällöin määräävä tekijä on pellon ja salaajien kaltevuus, mikä tuli selvästi ilmi Lapuan kenttämittauksista. Vesiensuojelun kannalta hankkeissa olisi pyrittävä laajempien alueiden vesitalouden säätelyyn, jolloin kyseeseen tulee myös valtaojien padottaminen. Salaojakastelussa valumavesien varastoaltailta voidaan vähentää kesän ja alkusyksyn huuhtoumia suoraan vesistöihin. Altaat olisi mitoitettava tietyille viipymälle ja niihin voitaisiin yhdistää myös kosteikkoja, jolloin kierrätyksen vesiensuojelullinen merkitys lisääntyy. Viljelijän aktiivisuus pohjaveden pinnan syvyyden ja säätilan seurannassa sekä säätötoimissa on tärkeää, mutta myös paikallisten sääennusteiden saatavuus ja luotettavuus.

- ojituksen ja padostuskastelun taloudellinen kannattavuus. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 21, 29-37.
- Mejia, M.N. & Madramootoo, C.A. 1998.** Improved water quality through water table management in Eastern Canada. *J. Irrigation and Drainage*, Vol. 124, no. 2, 116-122.
- Myllys, M. 1999.** Drainage of peat soils - benefits and conflicts. NJF drainage symposium, 26-28.5.1999, Lohusalu, Estonia.
- Nuutinen, V., Pitkänen, J., Kuusela, E. Widbom, T. & Lohilahti, H. 1998.** Spatial variation of an earthworm community related to soil properties and yield in a grass-clover field. *Applied Soil Ecology* 8, 85-94.
- Nuutinen, V., Ketoja, E., Pöyhönen, S. & Pitkänen, J. 2000.** Earthworm abundance in relation to subsurface drainage pattern on a sandy clay field. XIII Int. Conf. Soil Zoology, 14-18.8.2000, Ceske Budejovice. Abstrakti.
- Paasonen-Kivekäs, M., Teittinen, M., Kleemola, J. & Karvonen, T. 1996.** Water Table Management in Crop Production -Case studies in Finland. Proc. of 6th Drainage Workshop on Drainage and The Environment, ICID, Ljubljana, Slovenia, April 21-29, 1996, 583-588.
- Paasonen-Kivekäs, M. 1998.** Pellon vesitalouden säädön vaikutus typen huuhtoutumiseen. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 23, 6-32.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. & Vakkilainen, P. 1997.** Säättöojitus Lapuan koealueella -mittausjärjestelyt ja -aineisto. Vesitalouden laboratorion monistesarja 1997:3. Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T., Vakkilainen, P., Teittinen, M. & Kleemola, J. 1998.** Potential of water table management for abatement of nitrogen load. Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment. Proc. of the Seventh Int. Drainage Symposium. ASAE Vol. 7, 02-98, 53-60.
- Paasonen-Kivekäs, M., Koivusalo, H., Karvonen, T., Vakkilainen, P. & Virtanen, J. 1999.** Nitrogen transport via surface and subsurface flow in an agricultural field. Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources (Proc. of IUGG Symposium HS3, Birmingham, July 1999) IAHS Publ. no. 257, 163-170.
- Paasonen-Kivekäs, M. & Karvonen, T. 2000.** Typen huuhtoutuminen Lapuan koealueella. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 24, 27-52.
- Peltovuori, T. 2000.** Valumaveden virtausreitin, maan ominaisuuksien, reaktioajan ja lämpötilan vaikutus salaojaveden liukoisen fosforin pitoisuuteen. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 25, 41-60.
- Rekolainen, S. 1989.** Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland. *Aqua Fennica* 19,2, 95-107.
- Seuna, P. & Kauppi, L. 1981.** Influence of sub-drainage on water quantity and quality in a cultivated area in Finland. Publications of the Water Research Institute 43, National Board of Waters, 32-47.

- Ahonen, J. 1991.** Pohjavesikastelun ja säättöjituksen käyttö ja soveltuvuus Suomessa. Diplomityö, TKK, maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto, vesitalous. 63 s.
- Al-Soufi, R. 1999.** Analysis of macropore flow in Sjäskalla research field. Vesitalouden laboratorion monistesarja 1999:1. Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi.
- Aura, E. 1990.** Salaojien toimivuus savimaassa. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 10/90. Jokioinen.
- Burt, T.P., Heathwaite, A. & Trudgill, S.T. (toim.) 1993.** Nitrate, Processes, Patterns and Management. Wiley.
- Esala, M. 1991.** Split application of nitrogen: effects on the protein in spring wheat and fate of ¹⁵N-labelled nitrogen in the soil-plant system. *Ann. Agriculturae Fenniae*, Vol. 30, 219-309.
- Esala, M. & Leppänen, A. 1998.** Leaching of ¹⁵N-labeled fertilizer nitrate in undisturbed soil columns after simulated heavy rainfall. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29(9&10), 1221-1238.
- Evans, R. & Skaggs, R.W. 1989.** Design guidelines for water table management systems on coastal plain soils. *Applied Eng. in Agriculture* Vol 5, No. 4, 539-548.
- Evans, R.O., Skaggs, W. & Gilliam, J.W. 1995.** Controlled versus conventional drainage effects on water quality. *J. Irrigation and Drainage Eng.*, Vol. 121, No. 4, 271-276.
- Haverkort, A.J. & MacKerron, D.K.L. (toim.) 2000.** Management of nitrogen and water in potato production. Wageningen Pers.
- Holma, M. 1999.** Säätokastelulla hyviä tuloksia perunanviljelyssä. *Tuottava Peruna* 1, 14-16.
- Karvonen, T. 1999.** Influence of agricultural water management on soil water, nitrogen balance and crop growth: Description of the model. NJF drainage symposium, 26-28.5.1999, Lohusalu, Estonia.
- Kleemola, J. & Teittinen, M. 1996.** Satotuloksia säättöjituksen ja padotuskastelun koekentiltä 1994-1995. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 21, 12-19.
- Koivusalo, H. & Hyvönen, P. 1994.** Säättösaloitus- ja padotuskastelututkimusten koekenttien mittausjärjestelyt ja tiedonkeruu- ja siirtoohjelma. Vesitalouden laboratorion monistesarja 1994:6. Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi.
- Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M. & Karvonen, T. 1999.** Modeling water and nitrogen balance on a cultivated field: a characteristic hillslope approach. Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources (Proc. of IUGG Symposium HS3, Birmingham, July 1999) IAHS Publ. no. 257, 157-162.
- Larsson, M. 1999.** Quantifying macropore flow effects on nitrate and pesticide leaching in a structured clay soil. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Agraria* 164. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Mattila, T., Paasonen-Kivekäs, M., Teittinen, M. & Kleemola, J. 1996.** Säättösala-

- Shuttleworth, W.J. 1993.** Evaporation. Teoksessa: Maidment, D.R. (toim). Handbook of Hydrology, 4.1-4.53. McGrawHill.
- Skaggs, R.W. & Breve, M. 1994.** Environmental impacts of water table control. Teoksessa: Belcher, H.W. & D'Itri, F.M.: Subirrigation and controlled drainage, 247-267. Proceeding of the Int. Conference on Subirrigation and Controlled Drainage, Michigan, August 12-14, 1991, Lewis.
- Skaggs, R.W., Brevé, M.A. & Gilliam, J.W. 1994.** Hydrology and water quality impacts of agricultural drainage. Crit.Rev. in Environ. Sci. Technol. 24, 1-32.
- Tan, C.S., Drury, C.F., Soultani, M., van Wesenbeeck, I.J., Ng, H., Gaynor, J.D., Welacky, T.W. 1998.** Controlled drainage and subirrigation effects on crop yields and water quality. Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment. Proc. of the Seventh Int. Drainage Symposium. ASAE Vol. 7, 02-98, 676-683.
- 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, 295-310.
- Uusitalo, R., 2000.** Vesitalouden säätely pelloilta pintavesiin joutuvan fosfori- ja kiintoainekuorman vähentämiskeinona. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 25, 61-74.
- Wikman, U., Torttila, A., Virtanen, A. & Kuisma, P. 1996.** Perunan vesitalous ja sadetus. Perunantutkimuslaitoksen julkaisuja 3/1996. Perunantutkimuslaitos.
- Villholth, K. & Jensen, K.H. 1988.** Conceptual modelling of nitrogen leaching from cultivated areas. NHP-Rapport nr. 22, del 2, 221-239.
- Yli-Halla, M. 1983.** Happamien sulfaattimaiden ominaisuuksista, analytiikasta, käytöstä ja ympäristövaikutuksista. Vesihallituksen monistesarja 1983:191.
- Ympäristöministeriö 2000.** Vesiensuojelun toimenpideohjelma vuoteen 2005. Suo-

SUMMARY

IMPACT OF WATER TABLE MANAGEMENT ON NUTRIENT LOSSES IN AGRICULTURAL FIELDS

Different subsurface drainage systems were examined using data from three on-farm experimental sites. Controlled drainage was studied in a field, in western Finland (Lapua), with fine sand in the surface layer and loam deeper in the profile. A subirrigation-drainage system was constructed in a fine sand field in northern Finland (Tyrvävä). Drainage waters from the field were recycled through a reservoir. Irrigation-drainage was carried out using both single and dual-level pipes. Nutrient losses from a clay field under conventional subsurface drainage were monitored in southern Finland (Kirkkonummi/Sjökulla). A mathematical simulation model was applied to evaluate impacts of controlled drainage on drainage outflow, nitrogen leaching and potato growth. It was assumed that controlled drainage and subirrigation would reduce nitrogen losses to surface waters and enhance crop growth.

The data consisted of meteorological observations, groundwater level and nitrogen concentrations, and moisture and mineral N status in the soil profiles. The crop data included above ground biomass and nitrogen content of leaves, stems and storage organs and leaf area index. Physical soil properties were determined from several soil profiles. Furthermore in the clay field volume and nitrogen and phosphorus concentrations of surface runoff and subsurface drainage waters were measured. The model consisted of four submodels: water, nitrogen and heat balance and crop growth. The water flow model included both one and two pore regions to study importance of preferential flow and transport.

Controlled drainage raised only slightly groundwater level at the Lapua site due to the soil properties and the drainage system. The water table dropped sharply during rainless periods without excess water supply. Impact of controlled drainage on N concentrations and crop yield was hard to assess from the measurements because of a high variation of soil chemical properties in the acid sulphate soil at the Lapua site. According to the model calculations for a three year period, the maximum reduction of annual mineral nitrogen (nitrate and ammonium) losses was 13 % (2 kg ha^{-1}) under controlled drainage compared to conventional subsurface drainage. However, under very rainy periods the load even slightly increased. Controlled drainage clearly reduced nitrogen losses during the growing season, but increased load in the late autumn. Maximum increase in the potato yield was about 10 %. The model did not include deep percolation of groundwater which induced uncertainty in the simulation results. Surface runoff process and nitrogen reactions also need more testing in the model. The model described one soil profile between two drain pipes. In the field conditions, slope of soil surface and drains is crucial for the function of controlled drainage. Spatial variation of the soil properties also limits generalization of the model results to the whole field section.

Subirrigation raised groundwater level 45-80 cm compared to the area without irrigation and drainage. Potato yield was 80-110 % higher under the shallow groundwater table. Subirrigation enhanced subsurface drainage flow during the growing season, but the nitrogen losses likely remained small due to the low concentrations in the outflow

water. However, high nitrogen concentrations occurred after heavy rainfalls. The reservoir for drainage waters partly prevented losses into the adjacent river. Subirrigation is foremost an irrigation method and its costs and benefits should be compared to other irrigation techniques under Finnish conditions.

Subsurface drainage in the clay field accounted for 50 % of the total runoff and 80 % of the total nitrogen losses in June 1994-December 1996. Nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) concentrations in the subsurface drainage water rapidly increased from 2 until 60 mg l^{-1} after the sequence of fertilization and rainfalls. Accordingly, subsurface drainage lead to significant nitrogen losses during the yearly growing season even under moderate fertilizer rates. $\text{NO}_3\text{-N}$ in the soil profiles also denoted prominent preferential flow from the top layer into the tile drains. During the snowmelt and autumn, the determining factor in nitrogen transport was the high water volumes of surface runoff and subsurface drainage. Besides in the surface runoff, high concentrations of suspended solids and total phosphorus were detected in the subsurface drainage discharge. Both concentrations clearly followed the shape of the drainage flow curve. The preferential flow paths in the field are likely caused by macropores. The role of the backfilled drainage trench above the tile drain is assumed to be less important. Model applications to the clayey loam and fine sand fields indicated importance of preferential flow in these soil profiles, too.

The on-farm experiments involved several problems in the measurements and data analysis. For example, homogenous experimental units were difficult to establish with respect to hydraulic and chemical properties of the soils. On the other hand, the experiments gave valuable information on the technical operation of controlled drainage and subirrigation and nutrient transport in the field scale. Several uncertainties are still involved in the modeling results due to the inadequate measurement data and the complex model structure.

The study represents three agricultural fields under a 3-5 year period. It is evident that impacts of the control methods vary greatly according to soil and weather conditions, drainage system and management. So far, there is little knowledge on the impact of controlled drainage and subirrigation on phosphorus transport, crop growth and physical and microbiological properties of soils. In clay soils prevention of nutrient losses via drainage would need longer retention of water in the soil. Function of controlled drainage in flat clay fields might be useful to investigate. In the future, studies in controlled experimental plots and on-farm monitoring are needed to get more versatile results on controlled drainage and subirrigation concerning both crop growth and the environment.

SALAOJAVALUNNAN LIUKOISEN FOSFORIN PITOISUUTEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

MMM Tommi Peltovuori
Soveltavan kemian ja mikrobiologian laitos
Helsingin yliopisto

JOHDANTO

FOSFORI SALAOJAVESISSÄ

Peltoviljelyn vesistöihin kohdistaman fosforikuormituksen arvioidaan Suomessa olevan 0,9-1,7 kg ha⁻¹ vuodessa (Rekolainen ym. 1995). Arvio sisältää huuhtoutumisen pinta- ja salaojavalunnassa; vallitsevan käsityksen mukaan viljaa viljeltäessä fosforikuormituksesta noin 2/3 tapahtuu pintavalunnan ja 1/3 salaojavalunnan kautta. Vaikka suurin osa peltoviljelyn aiheuttamasta fosforikuormituksesta tapahtuu pintavalunnan kautta, saattaa huomattava määrä fosforia huuhtoutua myös salaojissa: edellä esitettyjen arvioiden mukaan keskimäärin 0,3-0,6 kg ha⁻¹ vuodessa. Maatalouden tutkimuskeskuksen Kotkanojan huuhtoutumiskentällä tehdyissä mittauksissa on havaittu salaojavalunnassa huuhtoutuvan fosforia keskimäärin 0,4 kg ha⁻¹ vuodessa ohrakasvustosta ja 0,3 kg ha⁻¹ nurmelta (Turtola ja Jaakkola 1985). Urvas (1994) on arvioinut, että salaojavesissä huuhtoutuu fosforia viljakasvustosta, laitumelta ja nurmelta keskimäärin 0,2-0,5 kg ha⁻¹ a⁻¹. Karjatilojen salaojavesissä fosforia on mitattu huuhtoutuvan jopa 1,7 kg ha⁻¹ vuodessa (Urvas 1996). Ruotsissa salaojavesien aiheuttama fosforikuormitus on samaa suuruusluokkaa: 16 maalajiltaan ja sijainniltaan vaihtelevalla loholla salaojavedessä on mitattu huuhtoutuvan keskimäärin 0,01-1,44 kg ha⁻¹ kokonaisfosforia vuodessa - suurimmalla osalla pelloista huuhtoutuma jää alle 0,5 kg ha⁻¹ (Hoffmann ja Ellström 1993).

Salaojaveden kokonaisfosforipitoisuus vaihtelee yleensä välillä 0,01 mg l⁻¹ - 1 mg l⁻¹. Osa fosforista on kuitenkin pidättynyt vedessä olevaan kiintoainekseen ja vain osa on välittömästi leville käyttökelpoista liukoista fosfaattifosforia (PO₄-P). Fosfaattifosforin pitoisuus on salaojavedessä yleensä alle 0,5 mg l⁻¹, mutta saattaa kohota hetkellisesti korkeaksi, mikäli sadantaa ja valuntaa tapahtuu pian lannoituksen jälkeen. Kotkanojan huuhtoutumiskentällä on tällaisessa tilanteessa ollut salaojavedessä liukoista fosforia noin 1,4 mg l⁻¹ (Turtola ja Jaakkola 1995); Urvas (1994) on mitannut liukoista fosforia salaojavedessä suurimmillaan jopa 14 mg/l. Ruotsalaisissa Hoffmannin ja Ellströmin (1993) tutkimuksissa oli salaojavesissä vuosina 1992 ja 1993 0,02-0,49 mg l⁻¹ kokonaisfosforia ja 0,01-0,47 mg l⁻¹ fosfaattifosforia. Fosfaattifosforin osalta 0,1 mg l⁻¹ ylittävät arvot olivat poikkeuksellisia. Salaojaveden liukoisen fosforin pitoisuus on siis tyypillisesti keskimäärin melko pieni, mutta se saattaa kohota hetkellisesti korkeaksi.

juuri ole julkaistua tietoa, mutta esimerkiksi Kailan (1963) tulokset tukevat käsitystä alhaisesta liukoisen fosforin pitoisuudesta, pienestä raudan ja alumiinin oksideihin pidättyneen fosforin määrästä ja alhaisesta fosforin tasapainopitoisuudesta pohjamaissa. Pohjamaiden fosforinsitomiskyvystä tarvitaan lisää mittauksiin perustuvaa tietoa, mutta myös muita mahdollisia selityksiä teorian ja havaintojen väliselle ristiriidalle pitää tutkia.

Liukoisen fosforin pidättymiselle pohjamaahan on olemassa edellytykset vain silloin, kun saavutetaan kunnollinen kontakti valumaveden ja sorptiopintojen välillä. Valumavesi saattaa kulkea maassa olevissa makrohuukosissa ja halkeamissa niin nopeasti, että veden sisältämä fosfori ei ehdi pidättymään pohjamaahan. Tämä saattaa olla yksi selitys satunnaisille salaojavedessä havaituille korkeille liukoisen fosforin pitoisuuksille. Veden kulkiessa toistuvasti samoissa kanavissa voi kanavien seinämien fosforinsitomiskyky olla lisäksi heikompi kuin pohjamaassa keskimäärin. Näiden tekijöiden vaikutuksen arvioimiseksi tulisi saada tietoa fosforin pidättymisnopeudesta ja sorptio-ominaisuuksien vaihtelusta maan erilaisissa rakenteissa: pysyvien maamurujen pinnoilla sekä halkeamien ja juurikanavien seinämissä.

MAAN LÄMPÖTILAN MERKITYS FOSFORIN SORPTIOSSA

Lämpötila vaikuttaa kaikkien kemiallisten reaktioiden nopeuteen. Yleensä lämpötilan nousu lisää reagoivien komponenttien energiaa ja törmäämistodennäköisyyttä, mikä puolestaan lisää reaktionopeutta. Tämä periaate pätee myös maassa. Suomessa maat ovat melko viileitä: Yli-Hallan ja Mokman (1998) mukaan maan keskilämpötila 50 cm syvyydessä vaihtelee Suomessa 2 ja 6 °C välillä paikkakunnasta riippuen. Maamme routaantuvat käytännöllisesti katsoen joka talvi. Ilmiötä pidetään maan rakenteen kannalta positiivisena, lähes edellytyksenä savimaiden viljelemiselle (Kivisaari 1979). Routaantuminen auttaa osaltaan ylläpitämään hyvää rakennetta viljelymaassa. Hyvä rakenne ja primääripartikkeleiden tehokas aggregoituminen parantavat veden imeytymistä maahan. Mikäli ilmiö siirtää valuman painopistettä pintavalunnasta salaojavaluntaan, pienentää routaantuminen myös fosforin kokonaishuuhtoutumista pelloilta. Maan jäätymisellä ja kylmyydellä on fysikaalisten vaikutusten lisäksi myös kemiallisia vaikutuksia. Ilmiöiden vaikutuksia maan kemialliseen käyttäytymiseen on kuitenkin toistaiseksi tutkittu vähän.

Jäätymisilmiö merkitsee vapaan maanesteen määrän pienentymistä. Maanesteen fosforipitoisuus kasvaa, mikä saattaa lisätä fosforin pidättymistä maahan. Mikäli pidättyminen on osin irreversiibeliä, pienentää se osaltaan liukoisen fosforin huuhtoutumista, mutta heikentää samalla fosforilannoitteiden käyttökelpoisuutta ja johtaa suurempaan lannoitustarpeeseen. Maan lämpötila muokkauskerroksessa on Suomessa alempi kuin 0 °C noin neljä-viisi kuukautta vuodessa, silti salaojavaluntaa tapahtuu yleensä ympäri vuoden keskikesää lukuunottamatta. Yleensä valuntahuiput ajoittuvat huhtikuulle ja loka- marraskuulle, keskikesällä valunta on pientä ja satunnaista. Suuren valunnan aikana maan lämpötila on alhaisempi kuin normaali huoneenlämpötila, jossa fosforin sorptiotutkimuksia yleensä tehdään – metrin syvyydellä maan lämpötila ei koko vuonna juuri ylitä +15 °C:ta. Liukoisen fosforin huuhtoutumisen arviointia varten tehtäviä fosforin sorptiokokeita tulisi siis tehdä todellisuutta vastaavissa lämpötiloissa.

SORPTIO LIUKOISEN FOSFORIN PITOISUUDEN SÄÄTELIJÄNÄ

Suurin osa maahan lannoitteena lisättävästä fosforista pidättyy tiukasti maahan saostumisen tai sorption vuoksi (esim. Sample ym. 1980). Normaalisti suomalaisissa maissa tärkein fosforin sitoutumistapa on fosfaattifosforin sorptio raudan ja alumiinin muodostamien oksidien pinnoille ligandinvaihtoreaktion avulla. Saostumisella saattaa olla merkitystä välittömästi fosforilannoituksen jälkeen, mutta erityisesti huuhtoutuvan liukaisen fosforin reaktioita hallitsee sorptio. Sorptiossa maanesteessä liukoisen oleva ja maan sorptiopinnoille pidättynyt fosfaattifosfori pyrkii tasapainotilaan, jossa pinnoille pidättyneillä ja maanesteeseen liuenneilla fosfaattianioneilla on sama kemiallinen potentiaali. Tämä johtaa fosforin vapautumiseen maapartikkeleista liukoiseen muotoon maanesteeseen, kun maansteen fosforipitoisuus alenee esimerkiksi kasvien fosforinoton seurauksena, ja fosforin pidättymiseen, kun maansteen fosforipitoisuus kasvaa esimerkiksi lannoituksen seurauksena. Täydellistä maansteen ja sorptiopintojen tasapainoa ei saavuteta koskaan, sillä fosfori osallistuu lukuisiin reaktioihin maassa ja osa fosforista pidättyy jatkuvasti hitaasti, mutta erittäin tiukasti, maahan. Tarkasteltaessa riittävän lyhyitä aikavälejä, on sorptiotasapaino kuitenkin käyttökelpoinen käsite maan liukaisen fosforin käyttäytymisen tarkastelussa. Vesistöön huuhtoutuva liukoinen fosfaattifosfori on leville käyttökelpoista ja se aiheuttaa välittömän rehevöitymisriskin. Valunnan aikana tai vastaanottavassa vesistössä veden mukana huuhtoutuvasta kiintoaineksesta vapautuu, eli desorboituu, fosforia liukoiseen muotoon, koska ympäristön fosforipitoisuus alenee. Tämä lisää kokonaisfosforihuuhtoutuman rehevöittävää vaikutusta.

Sorptiotasapainotila määräytyy maan ominaisuuksien mukaan. Erityisesti ns. maan fosforinkyllästysaste vaikuttaa tasapainoon (esim. Lookman ym. 1995). Jos maassa on paljon fosforia pidättäviä oksideja, mutta vähän niiden muodostamille sorptiopinnoille pidättyntä fosforia, on fosforinkyllästysaste alhainen, ja maa sitoo maanesteessä olevaa fosfaattifosforia erittäin tehokkaasti: Se pyrkii kohti tasapainotilaa, jossa tasapainoliuoksen fosforipitoisuus on alhainen. Jos taas maan oksidipinnoille on jo pidättynyt paljon fosforia, sitä vapautuu helposti maanesteeseen. Fosforin sorptio maahan on liukaisen fosforin huuhtoutumisen kannalta tärkeä prosessi tarkasteltaessa sekä pintaa että salaojavaluntaa. Pintavalunnassa korostuu yleensä paljon fosforia sisältävän maan fosforinluovutuskyky ja salaojavalunnassa pohjamaan fosforinsitomisoimaisuudet.

SORPTIO-OMINAISUUKSIEN VAIHTELU MAANNOSPROFIILISSA

Fosforilannoitus on kohottanut viljelymaidemme pintamaan fosforipitoisuutta, ja siten fosforinkyllästysastetta, ja kohottanut maansteen fosfaattifosforin tasapainopitoisuutta muokkauskerroksessa. Tästä syystä pintavalunnan liukaisen fosforin pitoisuus saattaa olla joissakin tapauksissa suuri. Fosfori liikkuu maassa melko huonosti, ja lannoituksen vaikutus kohdistuukin lähes pelkästään muokkauskerrokseen. Muokkauskerroksen alapuolella oleva maa sisältää yleensä vähän fosforia, ja sen kyvyn sitoa fosforia voidaan olettaa olevan suuri alhaisen fosforinkyllästysasteen vuoksi. Tästä syystä muokkauskerroksesta salaojiin siirtyvän veden liukaisen fosforin pitoisuuden tulisi teoriassa olla hyvin alhainen.

Edellä esitetyt korkeat kentällä mitatut salaojaveden liukaisen fosforin pitoisuudet ovat ristiriidassa tämän teorian kanssa. Onko oletus pohjamaiden suuresta fosforinsitomiskyvystä siis virheellinen? Suomalaisten pohjamaiden sorptio-ominaisuuksista ei

miseen maassa tarkasteltiin tutkimuksessa lähinnä ns. Q/I-tekniikan (isotermitekniikka) avulla. Lisäksi fosforin pidättymistä pohjamaahan tarkasteltiin padotuskokeen avulla. Maassa esiintyvien makrohuokosten ominaisuuksien merkitystä salaojiin valuvan veden fosforipitoisuuteen pyrittiin selvittämään ottamalla näytteitä huokosten seinämistä. Tässä luvussa esitetään käytetyt menetelmät pääpiirteissään.

MAANÄYTTEET

Sorptiotutkimuksissa käytetyt maanäytteet otettiin neljästä kohteesta syksyllä 1997. Näytteenotto tehtiin maannosprofileista horisonteittain, jotta saatiin käsitys maan ominaisuuksien vaihtelusta eri syvyyksillä. Näytteenottoa varten horisontit eroteltiin Soil Taxonomy-maannosluokitus-järjestelmän mukaisesti mm. värin, lajitekoostumuksen ja rakenteen perusteella (Kuva 1). Maannosprofilien ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1. Kotkanojan (MTT, Jokioinen), Toholammin (MTT) ja Sjäskullen (TKK) maat on otettu koekentiltä, joissa voidaan seurata fosforin salaojavalunnan määrää ja koostumusta (MTT, Maatalouden tutkimuskeskus; TKK, Teknillinen korkeakoulu). Lopen maa valittiin tutkimukseen sen pitkään jatkuneen runsaan fosforilannoituksen vuoksi. Maanäytteitä säilytettiin homogenoinnin jälkeen näytteenottokosteudessa +5 °C lämpötilassa. Kaikista näytteistä otettiin osanäytteitä, jotka ilmakeivattiin ja/tai pakastettiin. Näillä osanäytteillä on tutkittu maanäytteen säilytystavan vaikutusta sorptiokokeiden tuloksiin.

Q/I-TEKNIikka

Maannosprofilien eri horisonttien fosforinpidätysominaisuuksia tutkittiin Q/I-tekniikalla. Menetelmää käytettiin myös tutkittaessa lämpötilan sekä maan jäätyksen vaikutusta fosforin pidättymiseen ja pidättymisnopeuteen. Menetelmä on kuvattu tarkemmin tutkimuksen väliraportissa (Peltovuori 2000) ja sen periaate on lyhyesti seuraava: Maanäytteiden annettiin tasapainottua eri väkevyisten fosforiliuosten kanssa kontrolloiduissa olosuhteissa; tasapainotuksen jälkeen maasuspensio suodatettiin 0,2 µm polykarbonaattisuodattimen läpi ja sen fosfaattifosforipitoisuus mitattiin askorbiinihappomenetelmällä. Näin saatuihin havaintoihin sovitettiin Langmuirin (esim. Hartikainen ja Simojoki 1997) tai Freundlichin (esim. Fitter ja Sutton 1975) sorptiota kuvaava yhtälö ja piirrettiin yhtälön mukainen Q/I-kuvaaja. Yhtälöiden avulla estimoitiin fosforimäärä, jonka maa kykenee enimmillään pidättämään ($Q_{\max}$, maksimisorptiokapasiteetti, mg kg⁻¹) ja maanesteen tai valumaveden fosforipitoisuus, jossa maa ei vapauta eikä siihen pidäty fosforia (EPC, tasapainopitoisuus, mg l⁻¹).

Tutkittaessa tasapainotusajan vaikutusta sorptioon käytettiin seuraavia tasapainotusaikoja: 10 min, 1 h, 4 h ja 21 h, ja tutkittaessa lämpötilan vaikutusta käytettiin seuraavia tasapainotuslämpötiloja: +5 °C, +15 °C ja +25 °C. Maan jäätymistä käsittelevissä osatutkimuksissa tasapainotettavat maasuspensiot jäädytettiin -18 °C:een. Aikakäsittelyt oli valittu siten, että saadaan tietoa fosforin ns. nopeista reaktioista (h-vrk) maassa. Sorptio-ominaisuuksia maannosprofilin eri osissa tutkittiin samalla tekniikalla lisäksi ns. bulkkimaanäytteissä ja halkeamien seinämistä otetuissa näytteissä.

PADOTUSKOE

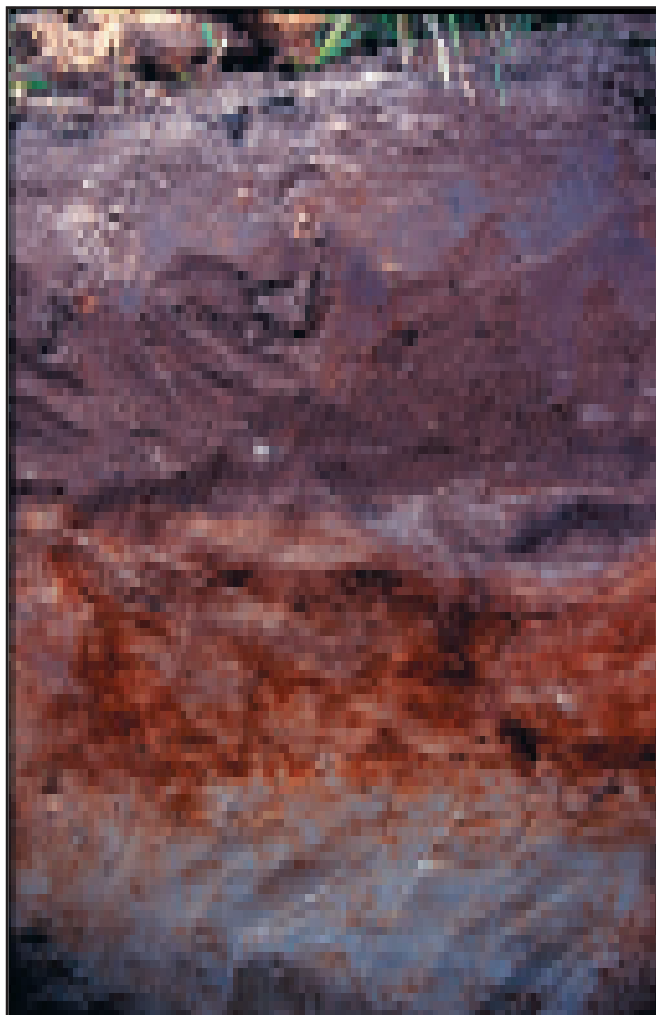
Säätösalaojitusta vastaavaa valumaveden padotusta pohjamaassa simuloitiin 1997 ns. padotuskokeen avulla. Padotuskoe on kuvattu tutkimuksen väliraportissa (Peltovuori

SORPTIOTUTKIMUKSET

Helsingin yliopiston Soveltavan kemian ja mikrobiologian laitos osallistui 1997-1999 yhteistutkimukseen 'Vesitalouden säätely pelloilta pintavesiin joutuvan fosfori- ja kiintoainekuorituksen vähentämiskeinona'. Laitoksella tutkittiin suomalaisen maannosprofiilien fosforinpidätysominaisuuksia ja luontaisen tai lannoitteena peltoon lisätyn fosforin esiintymistä profiilissa, lämpötilan ja erityisesti maan jäätyamisen vaikutusta fosforin pidättymiseen ja pidättymisen nopeuteen sekä maan rakenteen merkitystä fosforin pidättymisen kannalta. Pääpaino tutkimuksissa oli epäorgaanisen fosfaattifosforin reaktioilla.

Tulosten perusteella pyritään arvioimaan, millä tekijöillä on eniten merkitystä salaojavälun liukoisen fosforin pitoisuuden määräytymisessä sekä pohtimaan keinoja huuhtoutuvien määrien pienentämiseksi. Tutkimuksessa saatavia tietoja on mahdollista käyttää hyväksi suunniteltaessa mahdollisim-

man vähän ympäristöä kuormittavaa ojitustekniikkaa. Säätosalaojitus tarjoaa perinteistä salaojitusta paremman mahdollisuuden kontrolloida salaojaveden ja pohjamaan välisiä reaktioita. Sen avulla saattaa olla mahdollista suurentaa vedessä olevan liukoisen fosforin kontaktiaikaa pohjamaan kanssa ja siten pienentää salaojavesissä huuhtoutuvan fosforin määrää sekä kontrolloida valunnan ajankohtaa. Tämän tutkimuksen koejärjestelyt ja näytteenotto on suunniteltu siten, että tuloksia voidaan käyttää suoraan tai välillisesti säätosalaojituksen hyötyjen ja haittojen arvioimiseen liukoisen fosforin huuhtoutumisen kannalta.



MATERIAALI JA MENETELMÄT

Maannosprofiilien ominaisuuksien ja olosuhteiden vaikutusta liukoisen fosforin pidätty-

Taulukko 1. Tutkimuksessa käytettyjen maanäytteiden ominaisuuksia.

Horisontti	Syvyys cm	Saves —— % ——	OC	pH (0,01 M CaCl ₂)	P _{AAA} mg l ⁻¹
Sjökulla					
Ap1	0-20	49	2,1	4,4	6,2
Ap2	20-29	50	2,5	5,2	5,5
Bw	29-46	83	0,7	5,7	
BC†	46-70	89	0,4	6,2	
C†	70-	80	0,2	7,0	
Kotkanoja					
Ap	0-24	48	2,5	6,5	11,2
Bh	24-32	58	0,6	4,8	
Bg1	32-56	80	0,4	5,3	
Bg2	56-76	83	0,3	5,6	
C†	76-	76	0,3	5,8	
Toholampi					
Ap	0-27	4	3,0	5,0	6,5
Bs	27-39	2	1,2	4,5	
Bw	39-62	8	0,2	4,4	
BC‡	62-140	7	0,1	4,4	
C	140-	8	0,1	4,6	
Loppi					
Ap	0-30	9	3,6	6,7	88,3
Bs	30-49	8	0,5	6,2	
Bw	49-65	7	0,3	6,0	
C‡	65-	19	0,1	5,5	

† = kerroksellista savea, ‡ = hiesukerros 63-66 cm, ‡ = kova, massiivinen rakenne;
OC=orgaaninen hiili; P_{AAA}=viljavuus-P

MAANNOSPROFIILIN TEOREETTINEN FOSFORINPIDÄTYSKAPASITEETTI ON SUURI

Maiden fosforin sorptiokapasiteetti oli suurimmillaan alle 50 cm syvyydellä olevissa horisonteissa. Q/I-tekniikalla horisonteille estimoidut maksimisorptiokapasiteetit olivat sopusoinnussa horisonttien sisältämien heikosti kiteytyneiden alumiinin ja raudan pitoisuuksien kanssa (Kuva 2). Raudan oksideilla oli alumiinin oksideja suurempi merkitys sorptiokapasiteetin muodostumisessa molemmissa savimaissa, alumiinin oksidit puolestaan olivat tärkeitä erityisesti Lopen maassa. Noin metrin syvyydeltä otettujen näytteiden fosforinpidätyskyky ja heikosti kiteytyneiden oksidien pitoisuudet olivat pienempiä kuin ylemmissä horisonteissa.

1998). Tutkimuksessa käytettiin häiriintymättömiä ja tavanomaisia seulottuja ja homogenoituja maanäytteitä, jotka otettiin Kotkanojan näytteenottopaikan läheisyydestä 30-55 cm syvyydeltä. Häiriintymättömät näytteet otettiin MTT:n traktorikäyttöisellä kairalla (Pöyhönen ym. 1997). Häiriintymättömät näytteet ja vastaavaan geometriaan pakatut häiriintyneet näytteet kyllästettiin kahdessa lämpötilassa (+5 °C ja +15 °C) fosforiliuoksella, ja seurattiin maassa ja maan kanssa tasapainottumassa olevassa liuoksessa tapahtuvia muutoksia 30 vrk:n ajan. Osaan näytteistä sekoitettiin helposti hajoavaa orgaanista ainesta (1 % glukoosia maan massasta), jotta saataisiin käsitys voimakkaan mikrobiaktiivisuuden aiheuttaman alhaisen redox-potentiaalin vaikutuksesta fosforin sorptiopintoina toimivien Fe-oksidiin kestävyyteen. Padotusvedestä mitattiin tasapainotuksen jälkeen (1 h; 1, 7, 15 ja 30 vrk) liukoisen fosforin (PO_4^-) pitoisuus, pH ja liukoisen raudan (Fe^{2+}) sekä mangaanin (Mn^{2+}) pitoisuudet. Maanäytteiden redox-tilan muutoksia seurattiin koko padotuksen ajan.

MAKROHUOKOSET

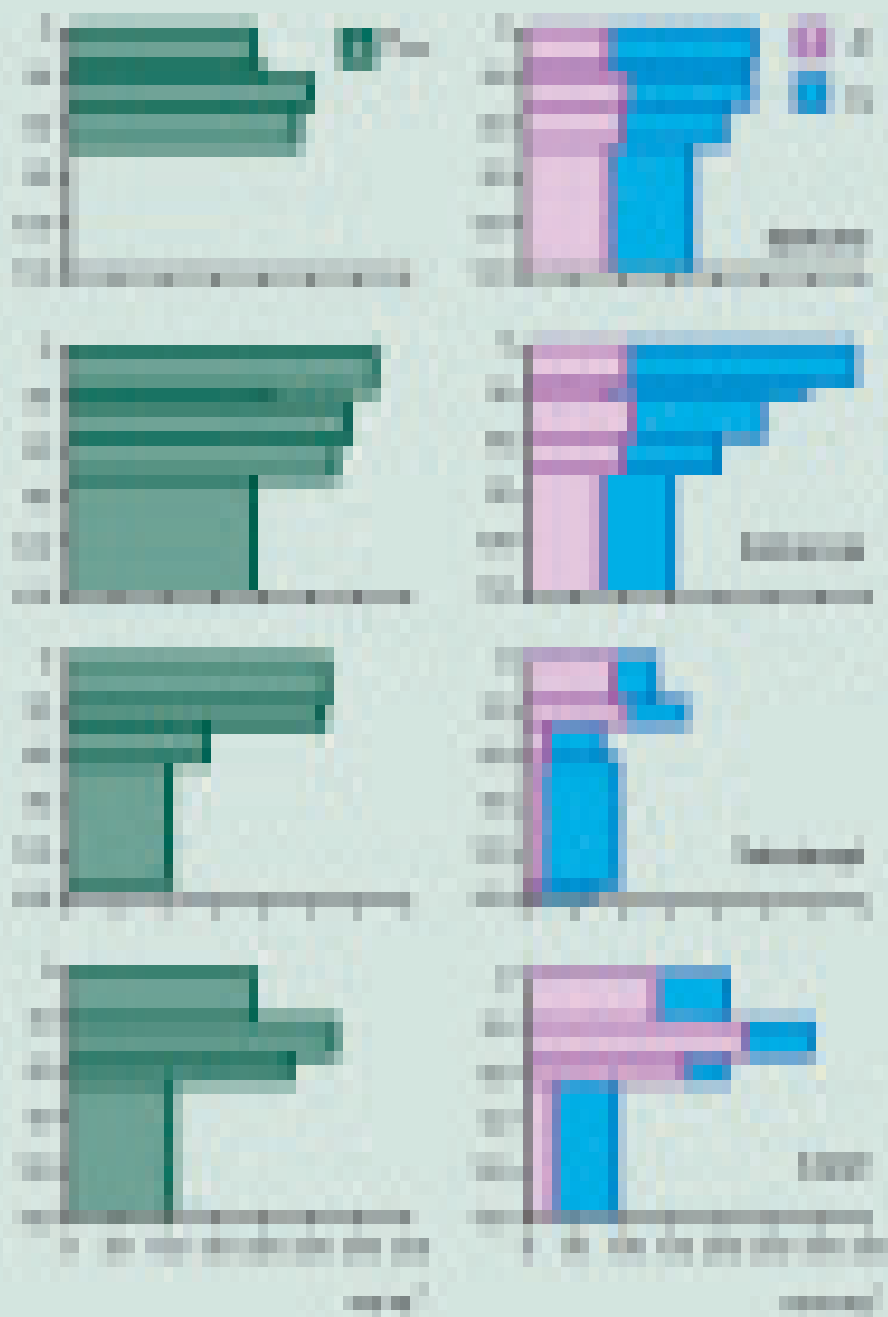
Makrohuokosia käsittelevissä pienimuotoisessa työssä käytettiin vuonna 1999 Jokioisten Lintupajusta otettuja maanäytteitä. Näytteet otettiin maannoskuopan seinämästä horisonteittain kuten muissa osatutkimuksissa. Näytteenottopaikan profiilissa erotettiin seuraavat horisontit:

Horisontti	Syvyys, cm
Ap	0-27
B	27-87
C	87-115

Ap-, B- ja C-horisonteista otettiin tavanomainen maanäyte siten, että näytteeseen tuli maata koko horisontin paksuudesta. Maan rakenteeseen ei tässä vaiheessa kiinnitetty huomiota. Makrohuokostutkimusta varten otettiin näytteitä B-horisontissa olleiden halkeamien seinämistä veistämällä puukolla n. 2 mm paksu kerros kuopan seinämästä irrotettujen kappaleiden niiltä sivuilta, jotka olivat maassa luontaisen halkeaman seinämänä. Näytteet siirrettiin laboratorioon kylmälaukussa, homogenisoitiin ja niitä säilytettiin ennen analyysijä näytteenottokosteudessa +5 °C:ssa.

Makrohuokoskokeen maanäytteiden fosforinpidätyskapasiteetti määritettiin Q/I-menetelmällä. Kaikkien maanäytteiden lajitekoostumus määritettiin pipettimenetelmällä (Elonen 1971) ja orgaanisen hiilen pitoisuus Leco® CHN-900 analysaattorilla. Heikosti kiteytyneiden alumiinin, raudan ja mangaanin oksidien pitoisuus määritettiin uuttamalla näytteet 0,05 M ammoniumoksalatilla pimeässä (Niskanen 1989).

TULOKSET



Kuva 2. Langmuirin yhtälön avulla horisonteille estimoitu fosforin maksimisorptiokapasiteetti, $Q_{\max}$ ja näytteiden heikosti kiteytyneen alumiinin (Al) ja raudan (Fe) pitoisuudet. Pystyakselilla syvyys maan pinnalta (cm). Sjöskullan ja Toholammen C-horisonttien maksimisorptiokapasiteetti-tiedot puuttuvat.

Langmuirin Q/I-yhtälön avulla maannoksen eri horisonteille estimoitujen maksimisorptiokapasiteettien avulla voidaan tarkastella maiden fosforinpidätyskykyä myös kilogrammoina hehtaaria kohti (laskelmassa oletettu maan kuivatilavuuspainoksi savimailla $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$ ja karkeilla mailla $1,5 \text{ kg dm}^{-3}$). Maannosprofiili muokkauskerroksen (Ap) alapinnalta metrin syvyyteen asti tarkasteltuna voi näin laskettuna pidättää maksimissaan seuraavat määrät fosforia:

Jokioinen	2 400	kg ha^{-1}
Sjökulla	2 100	kg ha^{-1}
Toholampi	1 600	kg ha^{-1}
Loppi	1 900	kg ha^{-1}

Alhaisesta fosforikyllästysasteesta johtuen myös Q/I-tekniikalla määritetyt fosforin tasapainopitoisuudet ovat pohjamaanäytteissä ennakko-odotusten mukaisia eli erittäin pieniä. Q/I-kuvaajien avulla estimoidut tasapainopitoisuudet olivat :

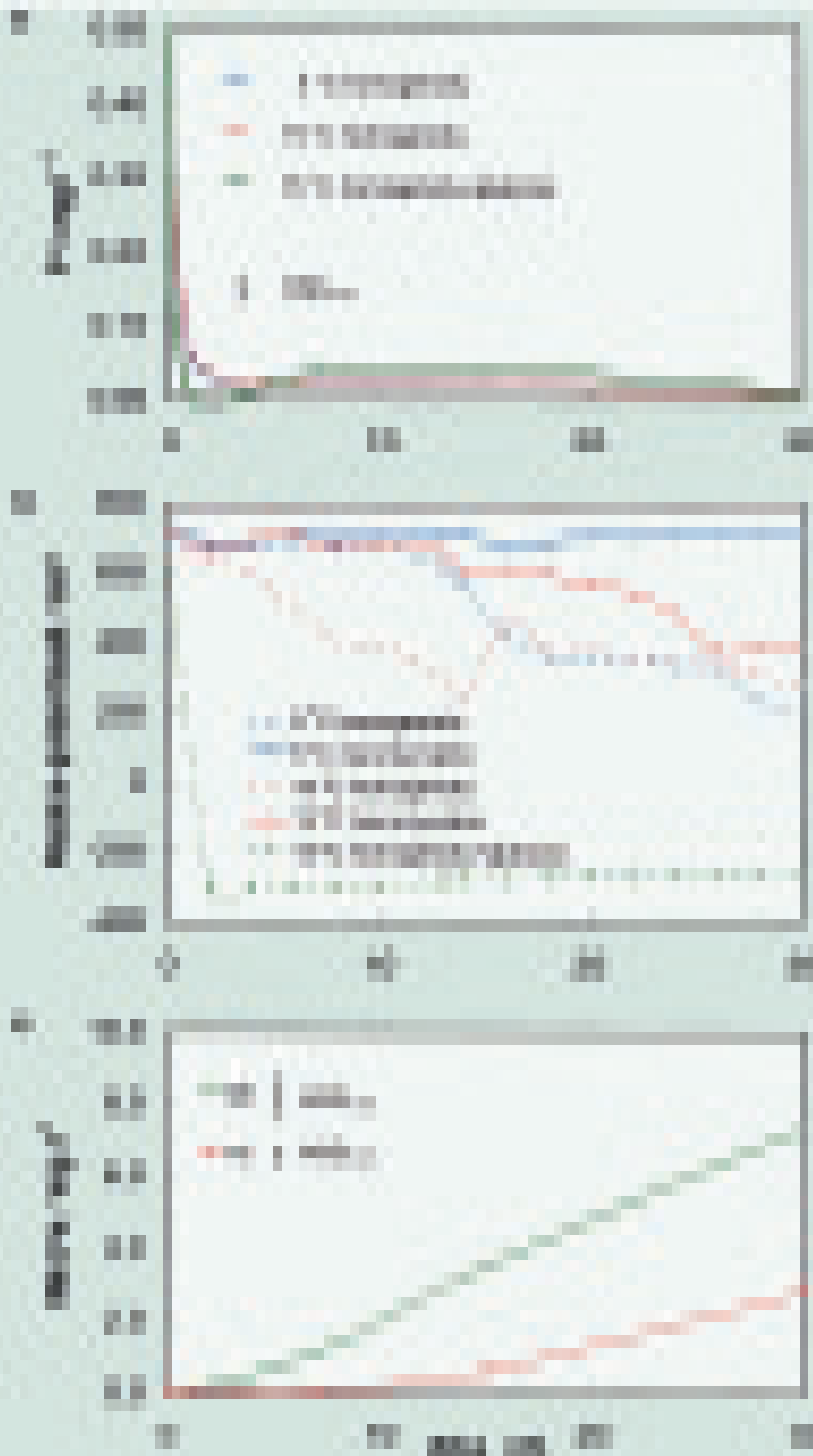
Sjökulla Ap1	0-20	$0,03 \text{ mg l}^{-1}$
Sjökulla Ap2	20-29	$0,04 \text{ mg l}^{-1}$
Kotkanoja Ap	0-24	$0,06 \text{ mg l}^{-1}$
Loppi Ap	0-30	$1,61 \text{ mg l}^{-1}$

Muissa horisonteissa tasapainopitoisuudet eli näytteiden EPC-arvot olivat käytännössä 0 mg l^{-1} , eli kaikkien profiilien pohjamaista ja Toholammin muokkauskerroksesta ei pitäisi vapautua fosforia veteen lainkaan, vaan horisonttien pitäisi pidättää sitä tehokkaasti. Alhaisella tasapainopitoisuudella lieenee fosforin huuhtoutumisen kannalta suurempi merkitys kuin maksimisorptiokapasiteetilla, jota ei käytännössä koskaan päästä hyödyntämään kokonaisuudessaan. Tutkimuksessa käytettyjen maaprofiilien kykyä pidättää liukoista fosforia on tarkasteltu aiemmin tutkimuksen väliraportissa (Peltovuori 2000).

HÄIRIINTYMÄTTÖMÄSSÄ MAASSA MAANESTEEN JA MAAN VÄLINEN KONTAKTI JÄI HUONOKSI

Padotuskokeessa Kotkanojan huuhtoutumiskentän läheisyydestä otettujen seulottujen ja homogenoitujen pohjamaanäytteiden kanssa kontaktiin saatetun fosforiliuoksen fosforipitoisuus laski alle vuorokaudessa alkutilanteen 10 mg l^{-1} :sta alle $0,1 \text{ mg l}^{-1}$:aan (Kuva 3, a). Lämpötilakäsittelyillä ei ollut vaikutusta pidättymiseen: liuoksen fosforipitoisuus laski hyvin nopeasti sekä $+5 \text{ °C}$:ssa että $+15 \text{ °C}$:ssa. Helposti hajoavan orgaanisen aineksen lisääminen maahan nopeutti liukoisen fosforin häviämistä tasapainotusliuoksesta.

Padotuskokeen häiriintymättömistä näytteistä saatiin padotuksen jälkeen valutettua vettä vain kahdesta kokeesta mukana olleesta 24 näytteestä. Näiden kahden padotusveden liukoisen fosforin pitoisuudet olivat suurempia kuin seulotuista näytteistä mitatuissa vesissä: $0,37 \text{ mg l}^{-1}$ (7 vrk:n padotus) ja $2,4 \text{ mg l}^{-1}$ (30 vrk:n padotus). Tuloksesta voi päätellä valumaveden joutuvan jäykässä savimaassa kosketuksiin vain erittäin rajoitetun maatilavuuden kanssa. Tavanomaisella bulkkimaanäytteellä tehtyjen analyysien perusteella on siten mahdotonta ennustaa häiriintymättömän maan käyttäytymistä.



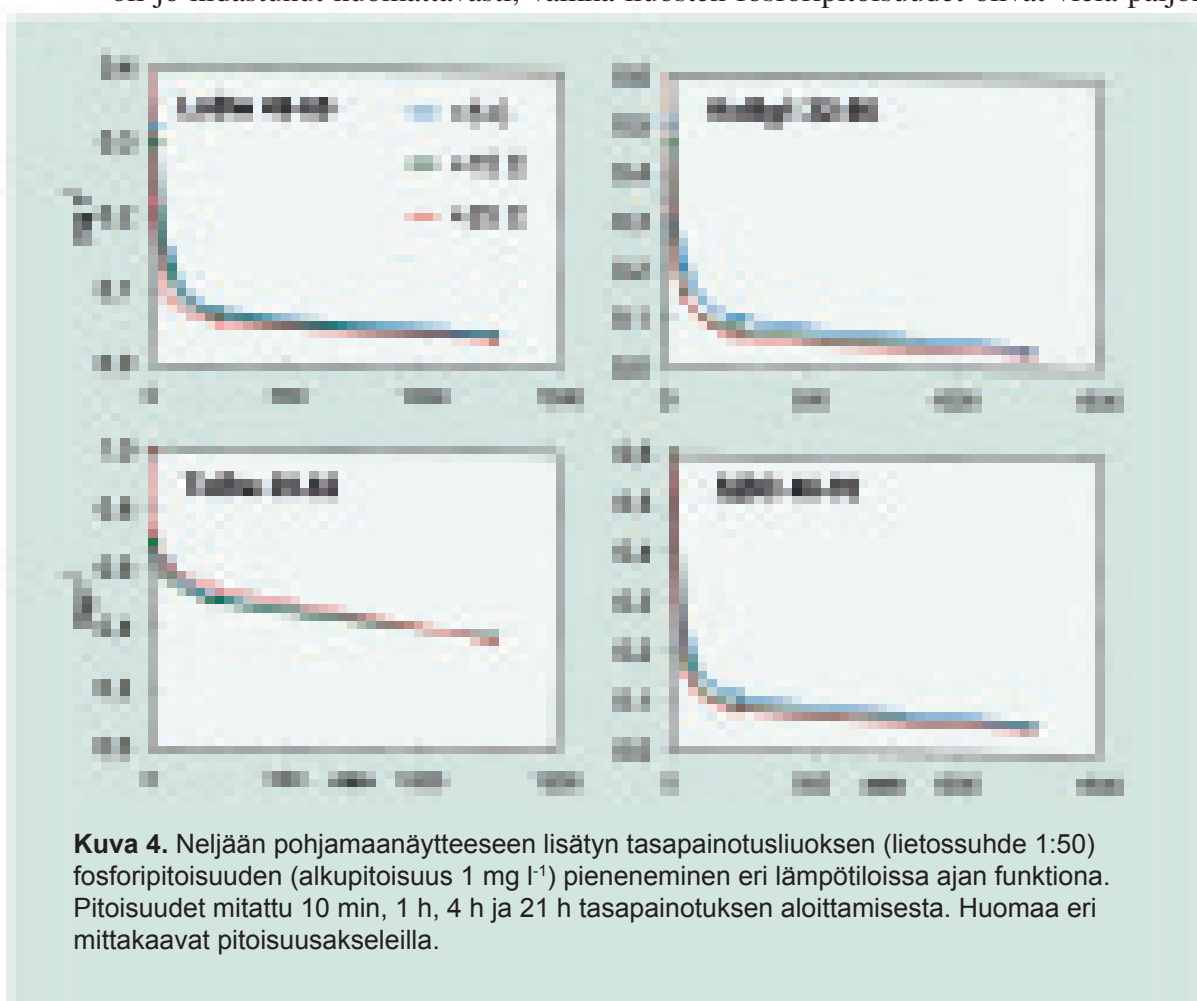
Kuva 3. Padotuskokeessa tasapainotusliuoksesta mitattu liukoisen fosforin pitoisuus (a), koeastioista padotuksen aikana mitattu redox-potentiaali (b) ja tasapainotusliuoksesta mitattu liukoisen mangaanin (Mn) ja raudan (Fe) pitoisuus glukoosilisäyksen saaneissa koejäsenissä (c) ajan funktiona.

Padotuskokeessa seurattiin myös vedellä kyllästetyn maan redox-potentiaalia. Glukoosilisäyksen saaneissa astioissa redox-potentiaali laski nopeasti jopa -300 mV:iin (Kuva 3, b), mikä näkyi liukoisen mangaanin ilmaantumisena padotusveteen vuorokauden, ja liukoisen raudan ilmaantumisena seitsemän vuorokauden kuluttua kokeen aloittamisesta (Kuva 3, c). Raudan oksidien muodostamien sorptiopintojen hajoaminen johti myös väliaikaiseen liukoisen fosforin pitoisuuden kohoamiseen padotusvedessä (Kuva 3, a). Koskemattomissa maanäytteissä, joihin ei lisätty helposti hajoavaa orgaanista ainesta, redox-potentiaali pysyi yli +500 mV:ssa koko 30 vrk kestäneen kokeen ajan harvoja poikkeuksia lukuunottamatta. Alemmassa lämpötilassa redox-potentiaali pysyi lähtötasolla koko kokeen ajan. Myös padotuskokeen tuloksia on aiemmin käsitelty tutkimuksen väliraportissa (Peltovuori 1998).

RIITTÄVÄN PITKÄ REAKTIOAIKA VARMISTAA LIUKOISEN FOSFORIN PIDÄTTYMISEN POHJAMAAHAN

– LÄMPÖTILALLA MELKO VÄHÄN MERKITYSTÄ

Myös Q/I-kokeissa fosforin tehokkaan pidättymisen edellytys oli riittävän pitkä tasapainotusaika. Kaikilla tutkituilla pohjamaanäytteillä fosforin pidättyminen tasapainotusliuoksesta (alkupitoisuus 1 mg l^{-1}) oli erittäin nopeaa ensimmäisten tuntien aikana, 21 tunnin tasapainotuksen aloittamisen jälkeen liuoksen fosforipitoisuuden pieneneminen oli jo hidastunut huomattavasti, vaikka liuosten fosforipitoisuudet olivat vielä paljon



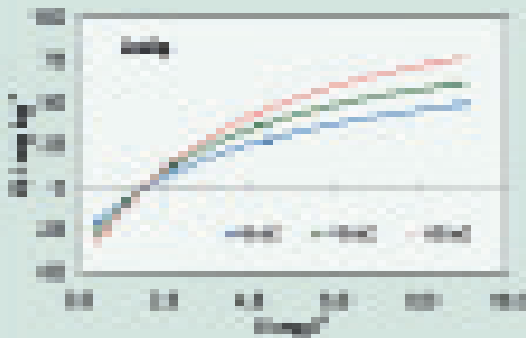
Kuva 4. Neljään pohjamaanäytteeseen lisätyn tasapainotusliuoksen (lietossuhde 1:50) fosforipitoisuuden (alkupitoisuus 1 mg l^{-1}) pieneneminen eri lämpötiloissa ajan funktiona. Pitoisuudet mitattu 10 min, 1 h, 4 h ja 21 h tasapainotuksen aloittamisesta. Huomaa eri mittakaavat pitoisuusakseleilla.

moituja EPC- eli tasapainopitoisuuksia. Jäätymisen seurauksena tasapainopitoisuudet pienenivät noin puoleen verrattuna + 25 °C lämpötilassa 21 tunnin tasapainotusajalla saatuihin tuloksiin. Erityisen mielenkiintoista oli se, että jäätymispisteen alittaminen käänsi yli +5 °C lämpötilassa havaitun lämpötilan vaikutuksen pääläelleen: lämpimisessä tasapainotusoloissa lämpötilan laskeminen pienensi fosforin pidättymistä maahan suurista tasapainopitoisuuksista, mutta jäätyminen edisti sitä. Vaikutukset olivat samansuuntaisia kaikissa tutkituissa Ap-horisonteissa. Erityisen selvästi jäätyminen vaikutti fosforin pidättymiseen Lopen maannoksen Ap-horisontissa, jota ei kuitenkaan voida pitää kovin tyypillisenä maana suuren fosforipitoisuutensa vuoksi.

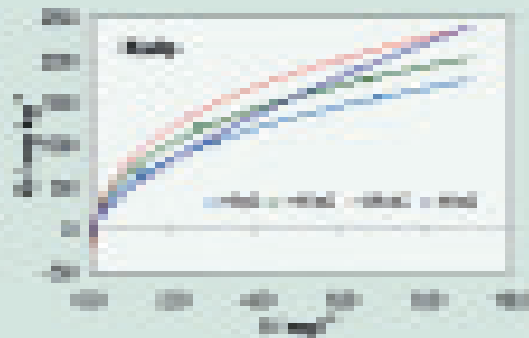
MAKROHUKOSTEN SEINÄMIEN KOOSTUMUS EI POIKENNUT BULKKIMAASTA

Makrohuokostyössä tutkitun kohteen muokkauskerroksessa on paljon desorboituvaa fosforia syvällä sijaitseviin horisontteihin verrattuna. Lannoituksesta peräisin oleva fosfori näkyy Ap-horisontin EPC-pisteen korkeana arvona (0,44 mg l⁻¹). B-horisontista otetun bulkkimaanäytteen ja halkeaman seinämien fosforinpidätyskyvyssä ei ollut Q/I-kuvaajien perusteella eroa: Mittausten perusteella piirretyt Q/I-kuvaajat olivat lähes identtisiä (Kuva 7). Molemmille estimoitu tasapainopitoisuus oli erittäin pieni verrattuna Ap-horisonttiin. Myös C-horisontista otetulle näytteelle estimoitu tasapainopitoisuus oli suunnilleen sama.

Halkeamien seinämissä oli hieman enemmän orgaanista hiiltä kuin samalta syvyydeltä otetussa bulkkimaanäytteessä (Taulukko 2). Myös orgaanista typpeä on halkeamien enemmän kuin bulkkimaassa, mutta C/N-suhteen puolesta halkeaman seinämät ja bulkkimaa eivät eronneet. Eri tavoin B-horisontista otettujen näytteiden lajitekoostumus ei poikennut toisistaan - molempien savespitoisuus oli 80 %. Heikosti kiteytyneiden oksidien pitoisuus oli tutkittujen halkeamien seinässä sama kuin samalta syvyydeltä otetussa bulkkimaassa (Taulukko 3). Suurin eroavaisuus oli mangaanioksidien pitoisuudessa, mutta niiden pitoisuus raudan ja alumiinin oksidien pitoisuuksiin verrattuna oli hyvin pieni, ja sillä tuskin on merkitystä fosforin sorption määräytymisessä.



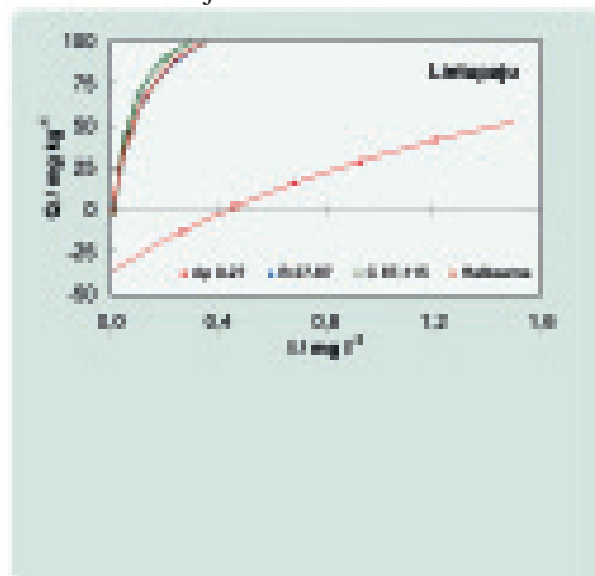
Kuva 5. Lopen Ap-horisontille 21 tunnin tasapainotusajalla kolmessa eri lämpötilassa määritetyt Q/I-kuvaajat (Langmuir-yhtälö).



Kuva 6. Kotkanojan Ap-horisontille 21 tunnin tasapainotusajalla määritetyt Q/I-kuvaajat. Tasapainotuslämpötilat +5 °C, +15 °C ja +25 °C sekä jäädetyksikäsittely (-18 °C) tasapainotuksen aikana (Freundlich yhtälö).

Q/I-kuvaajasta estimoituja tasapainopitoisuuksia (EPC) suurempia (Kuva 4). Valtaosa liuoksen fosforista pidättyi maahan ensimmäisten neljän tunnin aikana Toholammin Bw-horisonttia lukuunottamatta. Siinäkin noin puolet maahan lisätyn liuoksen fosforista oli pidättynyt neljän tunnin tasapainotuksen jälkeen.

Lämpötilalla ei ollut suurta vaikutusta pohjamaan kanssa kontaktissa olevan liuoksen fosforipitoisuuden pienenemiseen. Sillä ei havaittu Q/I-kokeissa myöskään merkittävää vaikutusta fosforin huuhtoutumisen määräytymisen kannalta olennaiseen fosforin tasapainopitoisuuteen (EPC-arvo). Lämpötilan kohoaminen Q/I-kokeissa +5 °C:sta +25 °C:een sen sijaan suurensi sekä ns. B-tyypin (Hartikainen 1982) Q/I-kuvaajan avulla estimoitua fosforin maksimisorptiokapasiteettia ($Q_{\max}$) (Kuva 5) että ns. A-tyypin Q/I-kuvaajan avulla estimoitua fosforin maksimidesorptiota (Q_0) pintamaista, joskin jälkimmäisissä käsittelyjen väliset erot olivat melko pieniä eivätkä näkyneet lyhimmillä tasapainotusajoilla.



MAAN JÄÄTYMINEN EDISTI FOSFORIN PIDÄTTYMISTÄ

Jäätyminen suurensi Q/I-kuvaajasta estimoitua maksimisorptiokapasiteettia ja pienensi maiden kuvaajasta arvioitua puskurikapasiteettia eli maan kykyä vastustaa fosforikonsentraation muutoksia tasapainotusliuoksessa normaalisti salaojavalunnassa vallitsevilla fosforipitoisuuksilla (Kuva 6). Samalla se alensi jonkin verran Q/I-kuvaajista estimoitua fosforin maksimidesorptiota (Q_0) pintamaista, joskin jälkimmäisissä käsittelyjen väliset erot olivat melko pieniä eivätkä näkyneet lyhimmillä tasapainotusajoilla.

Taulukko 2. Makrohuokostyön (Lintupaju) näytteiden orgaanisen hiilen ja typen pitoisuudet sekä C/N-suhteet.

Horisontti	C, %	N, %	C/N
Ap 0-27	2,67	0,25	10,7
B 27-87	0,29	0,04	6,6
C 87-115	0,19	0,04	5,5

Taulukko 3. Makrohuokostyön näytteiden happamaan ammoniumoksalattiin uuttuvan alumiinin, raudan, mangaanin ja fosforin pitoisuudet.

Horisontti	Al	Fe	Mn	P
	mmol kg ⁻¹			
Ap 0-27	55,3	79,0	5,5	24,7
B 27-87	41,9	28,3	2,1	9,6
C 87-115	31,9	17,4	1,4	8,4
Halkeaman seinämä	42,7	27,6	1,2	10,2

liuos pääsee kosketuksiin riittävän suuren maatilavuuden kanssa. Q/I-kokeissa suurin osa liuoksessa olleesta fosforista pidättyi maahan tätäkin nopeammin, koska maasuspensioita ravisteltiin tasapainotuksen aikana. Padotuskokeessa mitään ulkopuolista sekoitusta ei käytetty.

Käytännössä mahdollisesti sovellettava tekniikka valumavedessä olevan liukoisen fosforin ja pohjamaan kontaktin parantamiseen on säätösalaajitus. Pellon vesitalouden tarkalla kontrolloinnilla on mahdollista hidastaa valumaveden virtausta maaprofilissa ja hyödyntää pohjamaan suurta fosforinpidätyskykyä mahdollisimman tehokkaasti. Liukoisen fosforin huuhtoutumisen rajoittamisessa parhaat tulokset on todennäköisesti saavutettavissa lannoituksen jälkeisten valuntatapahtumien yhteydessä. Tehokkaan pidättymisen vaatima yhden vuorokauden viipymä maaprofilissa lienee mahdollista sovittaa myös muihin mahdollisiin säätelytarpeisiin. Valunnan hidastaminen edistää fosforin pidättymistä kontaktiajan pidentämisen lisäksi todennäköisesti myös suurentamalla valumaveden tavoitettavissa olevaa sorptiopintaa, sillä valunnan hidastuessa veden virtaus ei keskity ainoastaan suuriin huokosiin, vaan vesi tunkeutuu myös maassa oleviin pieniin huokosiin ja muruihin tavoittaen niissä olevia sorptiopintoja.

Eräs säätösalaajitukseen liittyvä uhka on maan kyllästämisen aiheuttama mahdollinen redox-potentiaalin lasku, ja siitä seuraava Fe-oksidiin liukeneminen ja niihin aiemmin pidättyneen fosforin vapautuminen liukoiseen muotoon. Padotuskokeen tulosten perusteella tällainen tilanne on hyvin epätodennäköinen. Pohjamaassa on yleensä niukasti helposti hajoavaa orgaanista ainesta, joka saattaisi hapettomissa olosuhteissa aiheuttaa mikrobiaktiivisuuden voimakasta kasvua ja redox-potentiaalin laskua. Lisäksi pohjamaat ovat viileitä ja niissä on hyvin vähän oksidipinnoille pidättynyttä fosforia. Tässä tutkimuksessa maan redox-potentiaali saatiin alhaiseksi yhdessä käsittelyistä keinotekoisesti. Tämä johti raudan oksidien hajoamiseen ja niiden pidättämän liukoisen fosforin vapautumiseen. Vapautunut fosfori pidättyi kokeen jatkuessa maahan kuitenkin muilla mekanismeilla.

LÄMPÖTILAN JA JÄÄTYMISEN VAIKUTUS FOSFORIN SORPTIOON VAIKEASTI HYÖDYNNETTÄVISSÄ

Lämpötilalla on selvästi merkitystä fosforin reaktioihin maassa, mutta fosforin huuhtoutumisen kannalta tällä lienee vain vähän merkitystä. Ilmiötä ei kyetä käyttämään hyväksi, koska maan lämpötilaa on mahdotonta kontrolloida. Sorption teorian kannalta lämpötilan vaikutus on kuitenkin mielenkiintoinen. Q/I-kokeissa havaittu lämpötilan vaikutus sekä maksimisorptiokapasiteetin että maksimidesorption estimaatteihin on helposti ymmärrettävissä lämpötilan yleisellä vaikutuksella kemiallisten reaktioiden nopeuteen. Maksimisorptiokapasiteetin estimaatin kasvulla korkeissa tasapainotuslämpötiloissa on tosin vähän käytännöllistä merkitystä, koska koko pidätyskapasiteettia ei yleensä koskaan kylläsetä - täysin fosforilla kyllästyneen maan kanssa tasapainossa olevan veden liukoisen fosforin pitoisuus olisi ympäristön kannalta kestäättömän suuri. Lämpötilan vaikutuksella desorboituvan fosforin estimaattiin Q_0 sen sijaan saattaa olla jonkin verran käytännön merkitystä: lämpimissä oloissa desorptio maasta on tehokkaampaa, jolloin sekä kasvien fosforinsaanti helpottuu että liukoisen fosforin huuhtoutumisriski kasvaa. Samansuuntaisia tuloksia lämpötilan vaikutuksesta sorptioon on saanut mm. Barrow (1979).

Maasuspensioiden jäädyttäminen Q/I-kokeen tasapainotuksen aikana johti todennä-

TULOSTEN TARKASTELUA

RIITTÄVÄN KONTAKTIN PUUTTUMINEN ESTÄÄ POHJAMAATA PIDÄTTÄMÄSTÄ FOSFORIA TEHOKKAASTI

Tutkituissa maaprofileissa on muokkauskerroksen alapuolella valtavasti lähes käyttämätöntä fosforin pidätyskapasiteettia. Myös muokkauskerroksissa on jäljellä fosforin pidätyskapasiteettia, joten maidemme kyllästymisestä fosforilla ei liene pelkoa, kuten joissakin intensiivistä maataloutta harjoittavissa maissa, esimerkiksi Belgiassa (Lookman ym. 1995). Pohjamaan suuresta teoreettisesta sorptiokapasiteetista huolimatta liukoista fosforia huuhtoutuu salaojavalunnassa, koska valumavedessä olevan liukoisen fosforin ja pohjamaan sorptiokomponenttien välille ei synny tasapainoa. Tasapainon syntymisen estää se, ettei maassa muodostu kunnollista kontaktia valumaveden ja fosforia pidättävien komponenttien välille.

Padotuskokeen tulokset osoittavat, että pohjamaassa –ainakin jäykässä savimaassa– valumavesi joutuu kontaktiin vain erittäin rajoitetun maatilavuuden kanssa. Tämä estää osaltaan hyvän kontaktin syntymisen. Samalla se asettaa kyseenalaiseksi jauhe- ja maanäytteistä määritettyjen sorptiotietojen soveltamisen kenttämittakaavassa. Halkeamien seinämien todettiin kuitenkin Lintupajun näytteillä olevan yhtä tehokkaita fosforin pidättämisessä kuin bulkkimaa. Halkeamien seinämiin ei ollut myöskään kertynyt fosforia, vaikka muokkauskerroksen desorboituvan fosforin pitoisuus ja tasapainopitoisuus olivat kasvaneet melko korkeiksi. Tämä viittaa siihen, että kontaktin syntymisen halkeaman pinnalla on estänyt valumaveden nopea virtaus –tai tutkitut halkeamat eivät ole olleet ns. oikovirtauskanavia. Bergen Jensenin ym. (1998) mukaan suuret pohjamaan biohuokokset (>3 mm) voivat toimia liukoisen fosforin kuljetuskanavina suuren valunnan aikana. Heidän kokeessaan yhtenä pulssina lisätty fosfaattifosfori kulkeutui vanhoissa liero- ja juurikanavissa noin 15 cm:n matkan muokkauskerroksen alapinnalta alaspäin ja pidättyi kanavien seinämille. Pysyvissä makrohuukosissa voisi siis olettaa näkyvän vuosien tai kymmenien vuosien huuhtoutumisen jäljet. Lintupajun kohteella tutkittujen halkeamien voidaan olettaa olevan melko pysyviä, sillä niiden seinämät olivat hioutuneet toisiaan vasten ja kiillottuneet pinnaltaan. Halkeamien pintoihin oli lisäksi kertynyt orgaanista ainesta, mikä näkyi orgaanisen hiilen mittauksen lisäksi bulkkimaata selvästi tummempana värinä. Profilissa oli näytteenottohetkellä useita suuria halkeamia: 5 kappaletta 60 cm leveydellä. Halkeamat ulottuivat B-horisontin pohjalle asti ja niiden leveys 50 cm:n syvyydellä oli noin 3 mm. Halkeilu lienee ollut näytteenottokesänä 1999 poikkeuksellisen voimakasta erittäin kuivan ja lämpimän sään vuoksi. Halkeamien lisäksi muita mahdollisia oikovirtauskanavia, kuten vanhoja juurikanavia tai lierojen käytäviä, ei profilissa havaittu.

VUOROKAUDEN KONTAKTI RIITTÄÄ LIUKOISEN FOSFORIN PIDÄTTYMISEEN, JOS GEOMETRISIÄ ESTEITÄ EI OLE

Vähintään noin vuorokauden kestävä kontakti vaikuttaa sekä padotuskokeen että Q/I-kokeiden tulosten perusteella riittävältä ajalta varmistamaan fosforin pidättyminen maanesteestä pohjamaahan, jos geometriset tekijät eivät rajoita pidättymistä eli jos

käytettyä näytteenottomenetelmää tulee kehittää ja sisällyttää tutkimukseen halkeamien lisäksi juuri- ja lierokanavia.

TIIVISTELMÄ

Fosforia arvioidaan Suomessa huuhtoutuvan salaojien kautta pelloilta vesistöihin keskimäärin 0,3-0,6 kg ha⁻¹ vuodessa. Tästä osa on välittömän rehevöitymisriskin aiheuttavaa liukoista fosfaattifosforia. Fosfaattifosforin pitoisuus on salaojavedessä yleensä pieni, mutta saattaa kohota hetkellisesti korkeaksi, erityisesti jos sadantaa ja valuntaa tapahtuu pian fosforilannoituksen jälkeen.

Salaojaveden liukoisen fosforin pitoisuutta säätelee sorptio maassa oleville oksidipinnoille. Pohjamaassa näiden oksidien kyky pidättää liukoista fosforia on suuri, mistä syystä pohjamaan läpi salaojiin kulkeutuvan veden liukoisen fosforin pitoisuuden tulisi teoriassa olla hyvin alhainen. Tässä työssä tutkittujen neljän suomalaisen maannosprofiilin pohjamaissa oli laboratorioanalyysien perusteella vapaata fosforin pidätyskapasiteettia jopa tuhansia kilogrammoja hehtaaria kohti ja ne kykenivät pidättämään fosforia erittäin tehokkaasti maahan lisätystä fosforiliuoksesta. Suurin sorptiokapasiteetti maannoksissa oli alle 50 cm:n syvyydessä.

Kentällä havaitut hetkellisesti korkeat fosforipitoisuudet salaojavalunnassa johtuvat siitä, että salaojiin kulkeutuvan valumaveden fosforin ja fosforia pidättävien pintojen välille ei muodostu kunnollista kontaktia. Tutkitussa jäykässä savimaassa kontaktin muodostumisen esti maan rakenne: rakenteeltaan häiriintymättömään maahan lisätty fosforiliuos täytti maan suurimmat huokokset ja tavoitti siten vain niiden seinämissä olevat sorptiopinnat. Jauhettuna maa pidatti vastaavissa olosuhteissa fosforia erittäin tehokkaasti. Kunnollisen kontaktin muodostumisen saattaa estää myös valumaveden nopea virtaus maan läpi salaojiin. Tutkittujen maannosten pohjamaissa suurin osa maahan lisätystä liukoisesta fosforista pidättyi noin vuorokauden aikana. Liukoisen fosforin huuhtoutumista on siis teoriassa mahdollista pienentää varmistamalla valumaveden viipyminen maannosprofiilissa vähintään vuorokauden ajan, jolloin valumavedessä satunnaisesti korkeina pitoisuuksina esiintyvällä liukoisella fosforilla on riittävästi aikaa pidättyä pohjamaahan. Käytännössä viipymän sääteleminen on mahdollista esimerkiksi säätösalojituksen avulla. Valumaveden virtauksen hidastaminen parantanee kontaktia paitsi kasvattamalla kontaktiaikaa myös edistämällä valumaveden tunkeutumista maan pieniin huokosiin. Laboratoriossa tehdyn kokeen tulosten perusteella pohjamaan kyllästäminen vedellä ei alenna maan redox-potentiaalia niin paljoa, että olisi pelkoa fosforia sitovien rautaoksidien liukenemisesta ja niiden pidättämän fosforin vapautumisesta veteen.

Mikäli valumavesi kulkee maassa toistuvasti samoja kanavia pitkin, saattaa kanavien seinämiin kerääntyä fosforia ja niiden fosforinpidätysominaisuudet saattavat heikentyä. Tässä työssä verrattiin yhdessä maannoksessa mahdollisena oikovirtauskanavana toimivien halkeamien seinämien koostumusta ja niiden fosforinpidätysominaisuuksia bulkkimaahan, mutta osoitusta seinämien fosforinsitomiskyvyn heikentymisestä ei löydetty.

Lämpötilan aleneminen +25 °C:sta +5 °C:een pienensi laboratoriokokeissa hieman fosforin sorptiota ja desorptiota. Maan jäätyminen edisti fosforin pidättymistä suurista

köisesti lisättyä fosforiliuosta väkevämpään tasapainotusliuokseen ainakin hetkellisesti. Maan jäätyessä maanesteen vesimolekyylit pyrkivät muodostamaan puhtaita jääkiteitä, jolloin jäljelle jäävä maaneste muuttuu väkevämmäksi (esim. Edwards ja Cresser 1992). Maanesteen väkevöitymisen on puolestaan havaittu edistävän fosforin sorptiota (Ryden ja Syers 1975). Nämä ilmiöt selittänevät sorption tehostumista jäätyneissä maissa suurista ympäröivän liuoksen fosforipitoisuuksista. Tasapainokäsitettä ei ehkä pitäisi lainkaan käyttää jäädytyskäsittelyn yhteydessä, koska maapartikkeleja ympäröivän liuoksen pitoisuus on todennäköisesti vaihdellut käsittelyn aikana runsaasti. Jäädytyskäsittelyistä saadut havainnot sopivat kuitenkin hyvin käytettyihin Q/I-yhtälöihin, eikä kuvaajissa ole epäjatkuvuuskohtia, joten niitä voidaan käyttää ainakin tulosten tarkastelussa. Kuvaajien hyvä yhteensopivuus havaintojen kanssa viittaa siihen, että myös jäätyneissä maissa fosforin pääasiallinen pidättymismekanismi oli sorptio oksidipinnoille. Mikäli saostumista olisi tapahtunut merkittävässä määrin, havaintojen yhteensopivuus sorption kuvaamiseen kehitettyjen yhtälöiden kanssa olisi todennäköisesti ollut paljon huonompi.

KUIVATUS JA FOSFORIN PIDÄTTYMINEN

Ympäristön kannalta olisi edullista, jos pelloilta lähtevä valumavesi läpäisisi nopeasti kylmän muokkauskerroksen uuttaen mahdollisimman vähän liukoista fosforia mukaansa ja valuisi hitaasti lämpimän pohjamaan läpi, jotta vedessä oleva liukoinen fosfori pidättäisi mahdollisimman tehokkaasti maahan ennen veden kulkeutumista salaojaan. Lämpötiloja ei pelto-olosuhteissa pystytä kontrolloimaan, mutta veden virtausnopeuksien kontrollointi on mahdollista. Tehokas tavanomainen ojitus parantaa maan rakennetta ja lyhentää siten aikaa, jona muokkauskerroksen fosfori voi desorboitua veteen. Ojitetussa maassa veden virtaus on kuitenkin luonnontilaista maaprofilia nopeampaa, eikä fosfori ehdi pidäytyä tehokkaasti sorptiopinnoille suurissa valuntatapahtumissa. Fosforin pidättymistä valunnan aikana saattaa olla mahdollista tehostaa hidastamalla salaojavaluntaa pohjamaassa esimerkiksi säätösaloituksen avulla siten, että vesi viipyisi maaprofilissa vähintään vuorokauden ajan ennen purkautumistaan salaojan kautta. Näin kyettäisiin mahdollisesti leikkaamaan salaojavalunnasta pois suuret liukoisen fosforin pitoisuuden piikit, joiden aikana suuren osan liukoisesta fosforista on havaittu huuhtoutuvan (Turtola ja Jaakkola 1995, Ulén 1995).

Mahdollisuudet liukoisen fosforin huuhtoutumisen rajoittamiseen säätösaloituksen avulla ovat laboratoriokokeiden perusteella hyvät, mutta asiaa tulisi tutkia myös kenttäoloissa tai vähintään eri tyyppisiltä mailta otetuilla häiriintymättömillä maanäytteillä tehdyissä lysimetrikokeissa. Tavanomaisilla maanäytteillä määritetty sorptiokapasiteetti yliarvioi pohjamaan todellista fosforinpidätyskykyä, koska maan rakenne jätetään huomiotta. Jatkotutkimuksissa tulisi selvittää erityisesti sitä, onko tässä tutkimuksessa fosforin tehokkaaseen pidättymiseen riittävän pitkäksi arvioitu vuorokauden kontakti-aika riittävä myös rakenteeltaan luonnontilaisissa maissa, joissa valumavesi ei saavuta kaikkia sorptiopintoja. Nämä tutkimukset tulisi tehdä maillo, joilla säätösaloitus olisi käytännössä mahdollista toteuttaa maan vedenläpäisykyvyn ja pinnanmuotojen puolesta.

Makrohuokosten seinämien koostumusta ja koostumuksen poikkeavuutta samalla syvyydellä olevasta bulkkimaasta tulisi selvittää nyt tehtyjä kokeita laajemmalla tutkimuksella, koska jatkuvien huokosten on ulkomaisissa tutkimuksissa havaittu olevan merkittäviä liukoisen fosforin huuhtoutumisreittejä. Tämän tutkimuksen yhteydessä

- sorption-desorption isotherms. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 54: 245-250.
- Hartikainen, H. & Simojoki, A. 1997.** Changes in solid- and solution-phase phosphorus in soil on acidification. *European Journal of Soil Science* 48: 493-498.
- Hoffmann, M. & Ellström, S.W. 1993.** Växtnäringsförluster från JRK:s stationsnät 1993. Naturvårdsverket, Rapport 4362. 10 s.
- Kaila, A. 1963.** Phosphorus conditions at various depths in some mineral soils. *The Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 35: 69-79.
- Kivisaari, S. 1979.** Effect of moisture and freezing on some physical properties of clay soils from plough layer. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 51: 239-326.
- Lookman, R., Vanderweert, N., Merckx, R. & Vlassak, K. 1995.** Geostatistical assessment of the regional distribution of phosphate sorption capacity parameters (Fe_{ox} and Al_{ox}) in northern Belgium. *Geoderma* 66: 285-296.
- Niskanen, R. 1989.** Extractable aluminium, iron and manganese in mineral soils. II. Extractability by oxalate and pyrophosphate. *Journal of Agricultural Science in Finland* 61: 79-87.
- Peltovuori, T. 1998.** Kontaktiajan vaikutus maanesteen liukoisen fosforin pitoisuuteen pohjamaassa - alustavia tuloksia vuodelta 1997. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 23: 33-39.
- Peltovuori, T. 2000.** Maahorisonttien fosforinpidätysominaisuuksien vaikutus liukoisen fosforin huuhtoutumiseen salaojavalunnassa. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 24: 4-9.
- Pöyhönen, A., Alakukku, L. & Pitkänen, J. 1997.** Maanäytteenoton koneellistaminen ja työntutkimus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, Sarja A 22. 39 s.
- Rekolainen, S., Pitkänen, H., Bleeker, A. & Felix, S. 1995.** Nitrogen and phosphorus fluxes from Finnish agricultural areas to the Baltic Sea. *Nordic Hydrology* 26: 55-72.
- Ryden, J.C. & Syers, J.K. 1975.** Rationalization of ionic strength and cation effects on phosphate sorption by soils. *Journal of Soil Science* 26: 395-406.
- Sample, E.C., Soper, R.J. & Racz, G.J. 1980.** Reactions of phosphate fertilizers in soils. Teoksessa: Khasawneh, F.E. ym. (toim.) *The role of phosphorus in agriculture*. ASA, CSSA, SSSA, Madison. s. 263-310.
- Turtola, E. & Jaakkola, A. 1985.** Viljelykasvin ja lannoitustason vaikutus typen ja fosforin huuhtoutumiseen savimaasta. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 6. 43 s.
- Turtola, E. & Jaakkola, A. 1995.** Loss of phosphorus by surface runoff and leaching from a heavy clay soil under barley and grass ley in Finland. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B* 45: 159-165.

maanesteen fosforipitoisuuksista todennäköisesti siksi, että veden jäätyessä jääkiteiksi jäljelle jäänyt maaneste väkevöityi. Lämmön ja jäätyamisen fosforin sorptiota edistävää vaikutusta on käytännössä vaikea hyödyntää, mutta salaojavalunnassa pelloilta huuhtoutuvan liukoisen fosforin määrän pienentäminen ojitusta säätämällä on tehtyjen laboratoriokokeiden tulosten perusteella mahdollista. Laboratoriomittakaavassa saadut tulokset tulisi kuitenkin jatkossa varmentaa kenttä- tai lysimetrimittakaavassa toteutetuilla kokeilla.

KIRJALLISUUS

- Barrow, N.J. 1979.** Three effects of temperature on the reactions between inorganic phosphate and soil. *Journal of Soil Science* 30: 271-279.
- Bergen Jensen, M., Jorgensen, P.R., Hansen, H.C.B. & Nielsen, N.E. 1998.** Biopore mediated subsurface transport of dissolved orthophosphate. *Journal of Environmental Quality* 27: 1130-1137.
- Edwards, A.C. & Cresser, M.S. 1992.** Freezing and its effects on chemical properties of soil. *Advances in Soil Science* 18: 59-79.
- Elonen, P. 1971.** Particle-size analysis of soil. *Acta Agraria Fennica* 122: 1-122.
- Fitter, A.H. & Sutton, C.D. 1975.** The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *Journal of Soil Science* 26: 241-246.
- Hartikainen, H. 1982.** Relationship between phosphorus intensity and capacity parameters in Finnish soils. I. Interpretation and application of phosphorus

SUMMARY

FACTORS AFFECTING THE $\text{PO}_4\text{-P}$ CONCENTRATION IN SUBSURFACE DRAINAGE WATER

In Finland, annual phosphorus (P) losses from fields to surface waters through subsurface drainage systems are estimated to be 0.3-0.6 kg ha⁻¹. Part of the leaching losses takes place as soluble phosphates ($\text{PO}_4\text{-P}$) that are available to algae and increase the immediate eutrophication risk. The $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration in drainage water is controlled by sorption on the surfaces of short-range ordered oxides in soil. In subsoil, the ability of the oxides to sorb P is high and, theoretically, the P concentration of drainage water passing through a soil profile should be very low. The concentration may occasionally, however, reach high values, especially during runoff events following fertilizer or manure applications. In this study, the factors influencing the P sorption in soil profiles were studied to explore possibilities to enhance sorption within soil profiles to reduce the P load through subsurface drainage.

Phosphorus sorption capacity of the four soil profiles examined was high amounting to as much as thousands of kilograms of P per hectare, and all subsoil horizons effectively sorbed P from added solution in laboratory. Highest sorption capacities were measured in samples taken at 30 to 50 cm depth. The high occasional P concentrations in drainage water observed in field must thus result from a poor contact between the P in water and sorptive surfaces in soil matrix. In a well-structured heavy clay examined, P added to the soil reached the sorption components only on the surfaces of the largest pores rendering the P sorption ineffective. When the soil structure was destroyed prior to adding the P solution, P retention was efficient.

In addition to soil structure, fast flow of drainage water may limit proper contact between the P in solution and sorptive components. In various experiments carried out, most of the P added to soil samples was retained within 24 h. Thus, occasional high P concentrations in drainage water might be reduced by restraining the water within a soil profile for at least one day, e.g. with a controlled drainage system. Besides longer contact times, a slower drainage flow would increase the sorption by enhancing water penetration into small pores and their sorptive surfaces. According to the results of a 30-day incubation experiment, temporary water-logging of subsoil does not dramatically reduce the redox-potential of soil and, consequently, does not pose a risk for Fe-oxide dissolution and reduction in subsoil P sorption capacity.

Subsoils are generally cooler than surface soils. Lowering equilibration temperature from +25 °C to +5 °C in laboratory experiments decreased both sorption and desorption of P but freezing of soil suspension containing dissolved P increased sorption most likely through a concentration effect: Freezing water formed ice-crystals leaving the solutes in liquid-phase, and increasing P and ionic concentration of the soil solution enhanced P sorption. In practice, it is impossible to control soil temperature and take advantage of its effects on P sorption. Controlling the drainage flow, however, is a promising practice when trying to reduce P losses from fields. The results obtained in laboratory experiments should, however, be confirmed in field or lysimeter scale prior to adaptation of the technique on operating farms.

VESITALOUDEN SÄÄTELY PELLOILTA PINTAVESIIN JOUTUVAN FOSFORI- JA KIINTOAINESKUORMAN VÄHENTÄMISKEINONA

Risto Uusitalo
Maatalouden tutkimuskeskus

JOHDANTO

Valumaveteen liuennut fosfori (ortofosfaatti) on levien ja vesikasvien kasvuun suoraan käyttökelpoista, minkä lisäksi eroosioaineksen (veden pellolta kuljettaman maa-aineksen) sisältämästä fosforista voi osa vapautua biologisesti käyttökelpoiseen muotoon vesistöissä (Ekholm, 1998). Karkeilta mailta tulevien valumavesien (kirkkaat valumavedet) sisältämä fosfori on usein suurelta osin veteen liuennutta fosforia. Savialueilla valumavedet ovat yleensä sameita ja suurin osa pellolta kulkeutuvasta fosforista on veteen liettyneeseen kiintoainekseen sitoutunutta (Turtola ja Paajanen, 1995; Heathwaite ja Johnes, 1996; Øygarden ym., 1997).

Pienikokoiset maahiukkaset sisältävät suuriin hiukkasiin verrattuna enemmän fosforia (Syers ym., 1969). Koska maahiukkasten koon pienentyessä niiden ominaispinta-ala kasvaa, saattaa suurempi osa maahan lisäystä fosforista pidäytyä pienten hiukkasten pinnoille. Maahiukkasten pinnoille pidähtynyt fosfori voi vapautua veteen maa-ainesta ympäröivän veden fosforipitoisuuden ollessa alhainen, esimerkiksi pellolta kulkeutuvan maa-aineksen päädyttyä järveen. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että pellolta tulevat valumavedet sisältävät suhteellisesti enemmän saveslajitetta (halkaisijaltaan alle 0,002 mm:n hiukkasia) kuin pellolla oleva maa. Esimerkiksi Sharpley (1985) mittasi 1,37-1,86-kertaisia savespitoisuuksia pintavalumavesissä verrattuna pellolle jääneeseen maahan. Oletettavasti kaikkein reaktiokykyisintä (fosforipitoisinta) hienoa savesta (alle 0,001 mm:n hiukkasia) huuhtoutuu suhteellisesti tätäkin enemmän. Mitä pienempiä maahiukkaset ovat, sitä helpommin ne kulkeutuvat valumavesien mukana pois pellolta.

Maa-aineksesta vapautuvan fosforin määrittämiseksi valumavesistä on käytetty sekä biologisia testejä että kemiallisia uuttomenetelmiä. Biologisten menetelmien haittapuolena on niiden vaatima pitkä analyysiaika ja siitä seuraava korkea hinta. Kemiallisista menetelmistä on tähän tarkoitukseen käytetty mm. rautahydroksidilla kyllästettyä suodatinpaperia (Ekholm ja Yli-Halla, 1992; Sharpley, 1993) ja anioninvaihtohartsia (Hanna, 1989). Anioninvaihtohartsia näyttää soveltuvan paremmin valumavesille, jotka sisältävät runsaasti saveshiukkasia (Uusitalo ja Yli-Halla, 1999).

Maatalouden vesistökuormituksen vähentämiseksi on perinteisesti keskitytty pinta-valunnan ja eroosion pienentämiseen. Viime vuosina on kuitenkin kiinnitetty huomiota myös salaojien kautta mahdollisesti tulevaan ravinnekuormitukseen (Turtola ja Paajanen, 1995; Laubel ym., 1999). Salaojien kautta purkautuvan veden fosforipitoisuuden

na edistää fosforin vapautumista maahiukkasten pinnoilta. Hartsimenetelmän todettiin soveltuvan paremmin runsaasti hienorakeista maa-ainesta sisältävien valumavesien tutkimiseen (Uusitalo ja Yli-Halla, 1999).

Vesinäytteistä määritettiin liuenneen fosforin, kokonaisfosforin ja anioninvaihtohartsilla uuttuvan fosforin pitoisuudet. Liuenneen fosfori pitoisuus mitattiin suodoksesta, joka läpäisi 0,2 µm:n Nuclepore-suodattimen. Kokonaisfosforin pitoisuus mitattiin näytteestä, joka oli hapetettu autoklaavissa peroksidisulfaatin avulla. Anioninvaihtohartsilla uuttuvan fosforin määrittämiseksi valmistettiin nylonverkosta pusseja, joihin punnittiin 1 g Dowex 1X8 -anioninvaihtohartsia. Vesinäytteiden uutto tapahtui ravistelemalla tasoravistelijalla 18 tuntia 40 ml:a vesinäytettä, johon oli lisätty yksi hartsipussi. Tämän jälkeen hartsipussi poistettiin näytteestä ja pestiin, minkä jälkeen pussia ravisteltiin 4 tuntia NaCl -liuoksessa, jotta hartsin anioninvaihtopaikoille pidähtynyt fosfori saatiin syrjäytettyä kloridin avulla liuokseen. Hartsiuuttoisen fosforin pitoisuus mitattiin happamoitetusta NaCl-liuoksesta. Menetelmällä voidaan todeta fosforipitoisuus, joka ylittää 0,015 mg/l. (Tarkempi kuvaus menetelmästä viitteessä Uusitalo ja Yli-Halla, 1999).

Maa-aineksesta vapautuvan fosforin määrä laskettiin vähentämällä anioninvaihtohartsilla uuttuvasta fosforista liuenneen fosforin määrä näytteessä. Kaikkiaan hartsimenetelmällä analysoitiin seuraava kappalemäärä valumavesiä eri koekentiltä:

Hartsiuuttoisen ja leville käyttökelpoisen fosforin pitoisuuksien vertailu tehtiin yhteistyössä SYKEN kanssa. (Leville käyttökelpoisen fosforin määrittäminen menetelmällä esitetään viitteessä Ekholm, 1998). Koska menetelmien vertailu jatkuu, ovat tässä raportissa esitetyt tulokset suuntaa-antavia.

Partikkelimuotoisen fosforin pitoisuus näytteessä laskettiin vähentämällä kokonaisfosforista liuenneen fosforin pitoisuus. Vesinäytteiden maa-ainepitoisuus mitattiin punnitsemalla haihdutusjäännös 40-80 ml:n osanäytteistä.

Valumavesien sisältämän maa-aineksen lajitekoostumusta suhteessa pellolla olevaan maahan tutkittiin määrittämällä lajitejakauma laser-partikkelilaskurin avulla Turun yliopiston Maaperägeologian osastolla. Valumavesien kuljettaman maa-aineksen alkuperää tutkittiin mitattaamalla valumavesistä saostetun maa-aineksen ja pellolla olevan maan Cs-137 -pitoisuudet matalataustaisella gammaspektrometrillä. Lajitejakauma- ja Cs-137 -mittauksissa käytettiin pidemmän ajan kuluessa kerättyjä yhdistettyjä vesinäytteitä Kotkanojalta ja Sjäkullasta. Maanäytteet, joista kyseiset analyysit tehtiin otettiin eri syvyyksiltä Kotkanojan ja Sjäkullan pelloista.

Taulukko 1. Kuvaus tutkimuksessa käytettyjen koekenttien pintamaan ominaisuuksista

	Kaltevuus	Saves	Org. C	pH	Viljavuusuuton fosfori	Viite
	%	%	%		mg/l	
Aurajoki	7 - 8	63 - 74	2 - 3	6,3 - 7,0	23 - 34	Puustinen, 1994
Kotkanoja	2	43 - 79	2 - 3	5,6 - 6,1	2,4 - 5,3	Turtola ja Paajanen, 1995
Lintupaju	yli 10	56 - 60	2 - 3	5,9 - 6,2	5,4 - 7,7	Uusi-Kämpä ja Yläraanta, 1996
Sjäkulla	alareunassa keskimäärin noin 4	42 - 64	2 - 3	6,1 - 6,4	6,1 - 7,7	Paasonen-Kivekäs ja Virtanen, 1998 (*)

(*) = osittain tämän hankkeen puitteissa tehtyjä määrittämiä

on arvioitu olevan selvästi pintavalunnasta mitattuja pitoisuuksia alhaisempi, koska vesi virtaa salaojiin niukasti fosforia sisältävän pohjamaan läpi. Jos vajovesi kuitenkin pääsee kulkemaan salaojastoon nopeasti suuria huokosia pitkin, se ei pääse kosketuksiin pohjamaan kanssa. Salaojavesien mukana kulkeutuva fosfori voi tällaisessa tapauksessa muodostaa huomattavan osan pellolta purkautuvasta fosforikuormasta ja veden virtailureittien muuttuminen pintavalunnasta salaojavalunnaksi ei välttämättä vähennä fosforikuormitusta niin paljoa kuin on oletettu. Halkeamien, vanhojen juurikanavien ja madonreikien merkitys on havaittu erittäin suureksi veden ja liuenneiden aineiden kulkeutumisessa salaojitussyvyyteen (mm. Øygarden ym., 1997; Jensen ym., 1998).

Salaojavalunnan kuljettaman maa-aineksen alkuperästä on julkaistu tuloksia vasta aivan viime aikoina. Laubel ym. (1999) havaitsivat hiiuemaalla tekemässään kokeessa, että 110 cm:n syvyyteen asennettujen salaojien kautta tuleva maa-aines oli Cs-137 -analyysin perusteella peräisin pintamaasta. Koska radioaktiivisen laskeuman mukana pintamaahan tullut Cs-137 sitoutuu hyvin lujasti maahiukkasiin (Mahara ym., 1993), voidaan Cs-137 -pitoisuuden perusteella tunnistaa laskeumalle altistunut pintamaa salaojavesistä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää pelloilta valumavesien mukana poistuvan kiintoaineksen ominaisuuksia, arvioida eroavatko salaojavedet pintavalunta-vesistä rehevöittävän fosforin pitoisuuksien suhteen, sekä tarkastella suojakaistojen ja laskeutusaltaiden tehoa rehevöittävän fosforikuormituksen pienentäjinä.

AINEISTO JA KÄYTETYT MENETELMÄT

Koekenttä	Pintavalunta	Salaojavalunta
Aurajoki	212	-
Kotkanoja	87	126
Lintupaju	166	-
Sjökulla	62	65

Tutkimus toteutettiin kokonaisuudessaan savimailla. Tutkitut valumavedet olivat peräisin neljältä huuhtoutumiskoekentältä (Taulukko 1): Kotkanojan ja Lintupajun kentiltä Jokioisista (Maatalouden tutkimuskeskuksen koekenttiä), Sjökullan koekentältä Kirkkonummelta (Teknillisen korkeakoulun koekenttä) ja Aurajoen kentältä Turun lähistöltä (Suomen ympäristökeskuksen koekenttä). Kotkanojan ja Sjökullan koekentiltä kerättiin sekä pinta- että salaojavesinäytteitä, kun taas Lintupajusta ja Aurajoen kentältä saatiin ainoastaan pintavaluntanäytteitä.

Kaikkia kentiltä otettuja näytteitä ei analysoitu, koska vuosittaisen kuormituksen arviointi eri kentiltä ei ollut tämän työn tavoite. Esimerkiksi Kotkanojan eri lohkojen tutkimusjakson aikaisesta valumasta analysoitiin 39-58 %. Näytteenotto tapahtui Kotkanojan, Lintupajun ja Aurajoen kentillä automaattisesti ja virtaamapainotteisesti. Sjökullan kentän näytteenotto oli käsivaraista ja keskittyi yleensä sateiden jälkeisiin päiviin.

Maa-aineksesta vapautuvan fosforin määrittämiseksi kokeiltiin kahta menetelmää, jotka perustuvat rautahydroksidilla kyllästetyn suodatinpaperin ja anioninvaihtohartsin kykyyn sitoa liuoksesta fosforia. Liuoksen fosforipitoisuuden pitäminen hyvin alhaise-

ainesta sisältävistä valumavesistä.

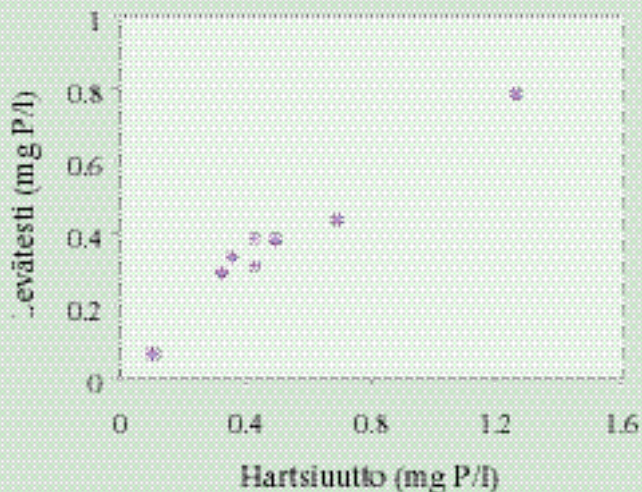
Kaikkia koekentiltä otettuja näytteitä ei analysoitu, minkä vuoksi vuosittaisen valuman keskimääräiset pitoisuudet saattavat erota tässä tutkimuksessa analysoitujen näytteiden perusteella lasketuista keskimääräisistä pitoisuuksista. Koska tärkein tutkimuskohde oli maa-aineksen fosforinluovutuskyvyn arviointi, analyysissä keskityttiin sellaisiin valumavesiin, jotka sisälsivät maa-ainesta.

SALAOJAVESIEN MUKANA PELLOLTA KULKEUTUVAN MAA-AINEKSEN ALKUPERÄ

Salaojien kautta pellolta poistuvan maa-aineksen alkuperää tutkittiin määrittämällä maan ja valumavesistä saostetun maa-aineksen Cs-137 -pitoisuus. Cs-137:n liikkuvuus maassa on hyvin pieni (Mahara, 1993), sillä se sitoutuu hyvin voimakkaasti saveshiukkasiin. Koska valumavesistä saostetun maa-aineksen Cs-137 -pitoisuus oli huomattavasti korkeampi kuin missään pellon maakerroksessa (Kuva 2), pääteltiin salaojien kautta pellolta kulkeutuvan maa-aineksen olevan lähtöisin pintamaasta.

Pintamaahan verrattuna valuntavesissä oli sekä Sjäskullassa että Kotkanojalla noin kaksinkertainen määrä Cs-137:a. Valumavesien maa-aineksen Cs-137 -pitoisuuden suurempi määrä verrattuna pintamaahan selittyy olettamalla, että valumavesien sisältämä maa-aines oli hienorakeisempaa kuin pellon maa. Hienorakeisin maa-aines on kemiallisesti kaikkein reaktiokykyisintä ja siten sillä on suurempi taipumus pidättää ioneita (kuten $^{137}\text{Cs}^+$) kuin pääosin epäreaktiivisista mineraaleista koostuvilla suurempikokoisilla maahiukkasilla.

Tämä oletamus varmistettiin partikkelien kokojakauman mittauksilla (Kuva 3.). Tutkitut valuntavedet sisälsivät jopa yli 4-kertaisesti kaikkein pienimpiä mitattuja hiukkasia (0,0004 mm:n läpimittaisia hiukkasia). Näin pienten hiukkasten osuus valumavesien sisältämästä hiukkasmassasta on kuitenkin melko pieni. Valumavesien sisältämä maa-aines sisälsi noin kaksinkertaisen määrän 0,002 mm:n hiukkasia verrat-

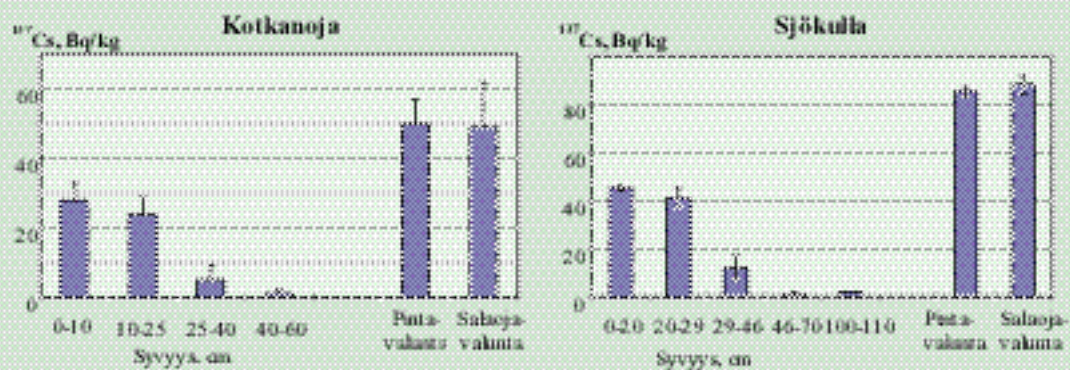


Kuva 1. Leville käyttökelpoisen ja anioninvaihtohartsilla uuttuvan fosforin pitoisuudet yhdeksässä peltovalumavesinäytteessä. (levätestit: Petri Ekholm, SYKE)

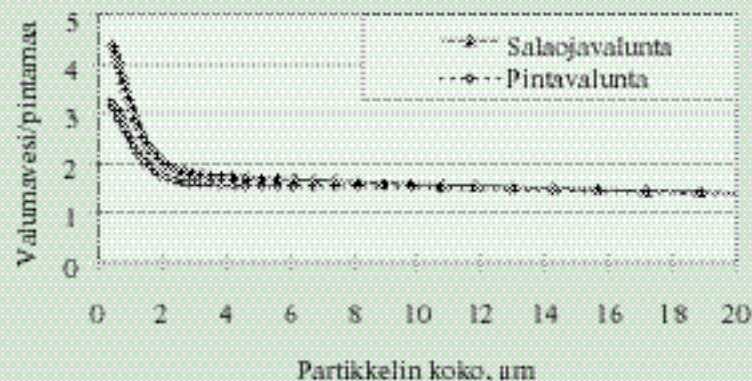
TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

MENETELMIEN JA AINEISTON TARKASTELU

Anioninvaihtohartsit uutti alustavissa kokeissa peltovalumavesistä keskimäärin 73 % leville käyttökelpoisesta fosforista (Kuva 1). Maa-ainespitoisuuden ollessa pieni on suurin osa valumaveden rehevöittävästä fosforista kuitenkin liuenneessa muodossa ja levätestit ja hartsiuutot antavat käytännöllisesti katsoen samansuuruisia tuloksia. Tässä tutkimuksessa kerätty vertailuaineisto on niin pieni, että hartsiuuton tuloksia ei voida muuntaa leville käyttökelpoisen fosforin määräksi. Hartsiuutto näyttäisi kuitenkin olevan lupaava menetelmä rehevöittävän fosforin määrittämiseksi melko runsaasti maa-



Kuva 2. Kotkanjojan ja Sjököullan maan (eri syvyydet), sekä pintavalunnan ja salaajavalunnan sisältämän maa-aineksen Cs-137 -pitoisuudet.

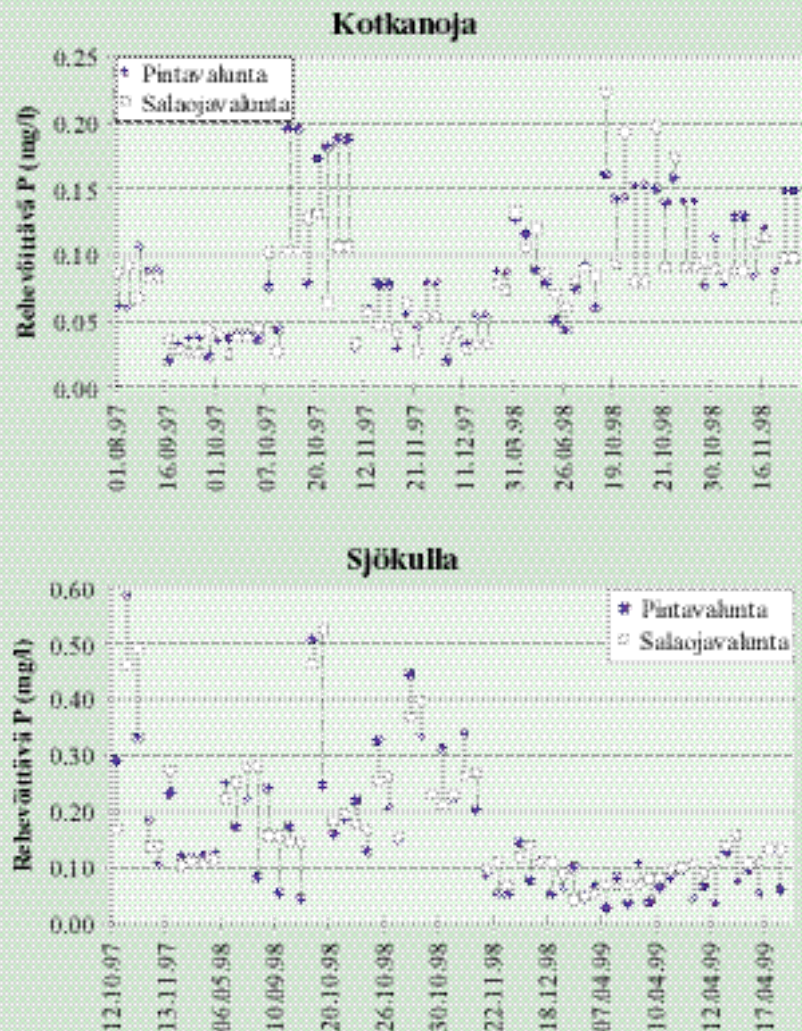


Kuva 3. Valumavesien kuljettaman maa-aineksen suhteellinen kokojakauma verrattuna pintamaan partikkelijakaumaan (1 µm = 0,001 mm; saves = alle 2 µm:n hiukkaset, hiesu = 2-20 µm:n hiukkaset). Y-akselin luku 1 vastaa samanlaista kokojakaumaa valumaveden kiintoaineksessa ja pintamaassa.

lohkojen välillä ei ollutkaan suurta vaihtelua valunnan rehevöittävän fosforin pitoisuuksissa, kun taas Sjäkullassa eri salaojalohtot erosivat toisistaan selvästi. Sjäkullan pellon toisen salaojalohtoon salaojavalunta sisälsi koko tutkimusjakson ajan enemmän veteen liuenneutta fosforia kuin pintavalunta. Toisella salaojalohtolla tilanne oli päinvastainen: liuenneen fosforin pitoisuus oli korkeampi pintavalunnassa.

Laskettuna valumavesien maa-ainekiloa kohti maa-aineksen fosforinluovutuskyky oli pinta- ja salaojavalunnassa käytännöllisesti katsoen saman suuruinen (Taulukko 2). Tämä onkin odotettava tulos, kun sekä pinta- että salaojavalunnan sisältämä maa-aines on pintamaasta peräisin.

Toimivan salaojituksen merkitys vesistökuormituksen kannalta on siinä, että sen avulla voidaan vähentää pintavaluntaa ja pintaeroosiota. Jos pellon salaojitus ei toimi, lisääntyy pintavalunnan määrä kasvattaen eroosiota ja rehevöittävää fosforikuormaa (Turtola ja Paajanen, 1995). Kun peltoviljelystä peräisin olevaa fosforikuormitusta pyritään edelleen pienentämään, kaikki merkittävät ravinteiden kulkeutumisreitit pellolta



Kuva 4. Rehevöittävän fosforin (liuenneut ja maa-aineksesta vapautuva fosfori) pitoisuuksia Kotkanojan ja Sjäkullan kenttien pinta- ja salaojavalunnassa.

tuna pintamaahan. Siten Cs-137:n ja karkeamman saveksen suhteellinen rikastuminen valumavesiin oli suunnilleen yhtä suurta.

KOTKANOJAN JA SJÖKULLAN KOEKENTTIEN PINTA- JA SALAOJAVALUNNAN FOSFORIPI- TOISUUDET

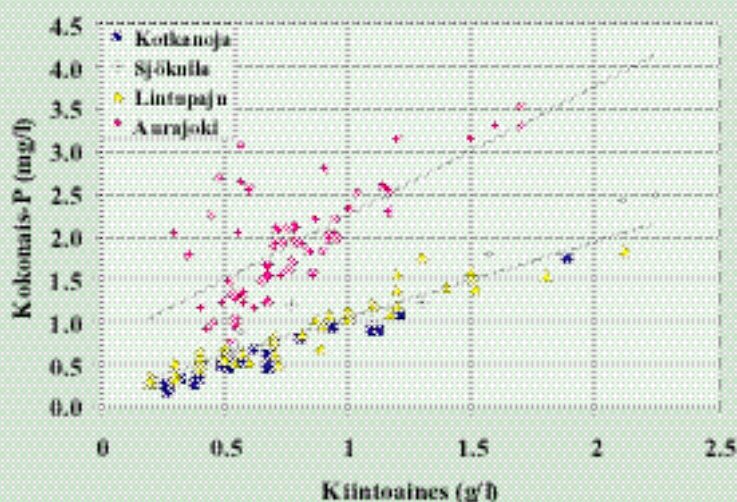
Pinta- ja salaojavesien fosforipitoisuuksien välinen vertailu tehtiin parittaisten havaintojen perusteella. Vertailuun on otettu mukaan ne pintavaluntanäytteet, joille on olemassa samanaikaisesti otettu salaojavaluntapari.

Rehevöittävän fosforin pitoisuus pinta- ja salaojavalunnassa oli keskimäärin hyvin samanlainen. Kotkanojalla salaojavesien rehevöittävän fosforin pitoisuus oli jonkin verran pienempi kuin pintavalunnassa, kun taas Sjäkulla kentällä ei voitu pinta- ja salaojavesien rehevöittävän fosforin pitoisuuksissa havaita minkäänlaista eroa. Molemmilla koekentillä oli näytepareja, joissa salaojaveden rehevöittävän fosforin pitoisuus oli suurempi kuin pintavalunnassa (Kuva 4).

Kuvassa 4 ei ole erikseen esitetty koekenttien eri lohkojen tuloksia; Kotkanojalla eri

Taulukko 2. Kiintoaineksesta vapautuneen fosforin määrä valumaveden maa-aineskiloa kohden (keskiarvo $\pm$ 95%:n luottamusväli).

Koepaikka	Vapautuva P mg/kg maa-ainesta
Kotkanoja, pintavalunta	55 $\pm$ 5
Kotkanoja, salaojavalunta	49 $\pm$ 5
Sjäkulla, pintavalunta	80 $\pm$ 9
Sjäkulla, salaojavalunta	78 $\pm$ 6



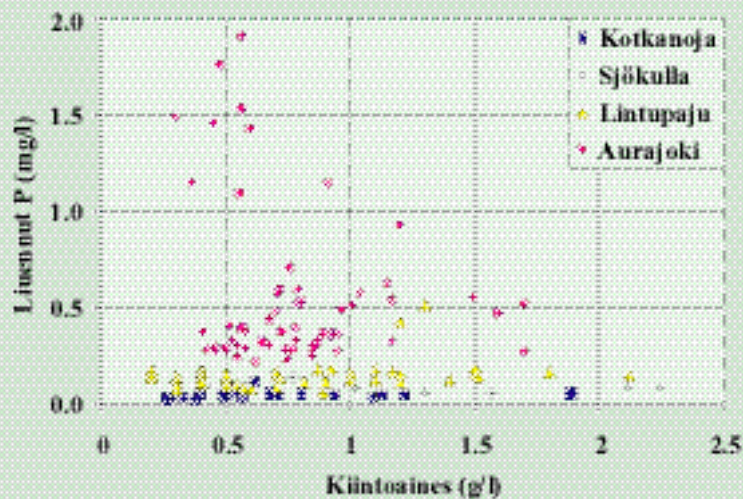
Kuva 5. Fosforin kokonaispitoisuuden ja maa-ainespitoisuuden välinen yhteys valumave-

suojakaistojen on havaittu kasvattavan jonkin verran liuenneen fosforin huuhtoumaa (Uusi-Kämpä & Ylärinta, 1996).

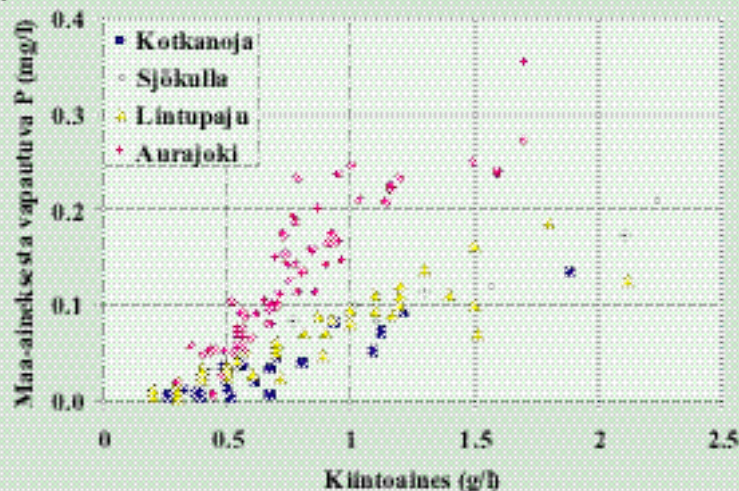
Valumavesien rehevöittävän fosforin pitoisuuden ja maa-ainespitoisuuden välinen yhteys ei ole yhtä yksiselitteinen kuin edellä esitetty kokonaisfosforin ja maa-ainespitoisuuden välinen yhteys. Tämä johtuu siitä, että liuenneen fosforin pitoisuudelle ei löytynyt selkeää yhteyttä eroosioon (Kuva 6) vaikka valumavesien sisältämästä maa-aineksesta vapautuvan fosforin pitoisuus riippuukin selkeästi vesien kiintoainespitoisuudesta (Kuva 7).

Eroosion kuljettamasta maa-aineksesta vesistöissä vapautuvan fosforin huuhtoumat voivat olla erittäin suuria. Esimerkiksi Aurajoen koekentän pintavalunnan mukana pellolta poistuvasta maa-aineksesta vapautui fosforia yli 160 mg/kg (Taulukko 3). Muilta tutkituilta koekentiltä tulevassa valumavedessä olevan maa-aineksen fosforinluovutuskyky on huomattavasti alhaisempi, koska maan fosforitila näillä koepaikoilla on alhaisempi (kts. Taulukko 1).

Puustisen (1994) tutkimuksessa eroosion mukana Aurajoen kentältä kulkeutui maa-



Kuva 6. Valumaveteen liuenneen fosforin ja valumavesien sisältämän maa-aineksen välinen yhteys.



Kuva 7. Maa-aineksesta vapautuvan fosforin ja valumavesien sisältämän maa-aineksen välinen yhteys.

tulee kuitenkin ottaa huomioon. Salaojavalunnan merkitys fosforin kulkeutumisreittinä on tiedostettu vasta viime vuosina. Kotkanojan ja Sjäokullan kaltaisilla savimailla sen merkitys on ilmeinen, koska suuri osa vuotuisesta valunnasta tapahtuu salaojien kautta.

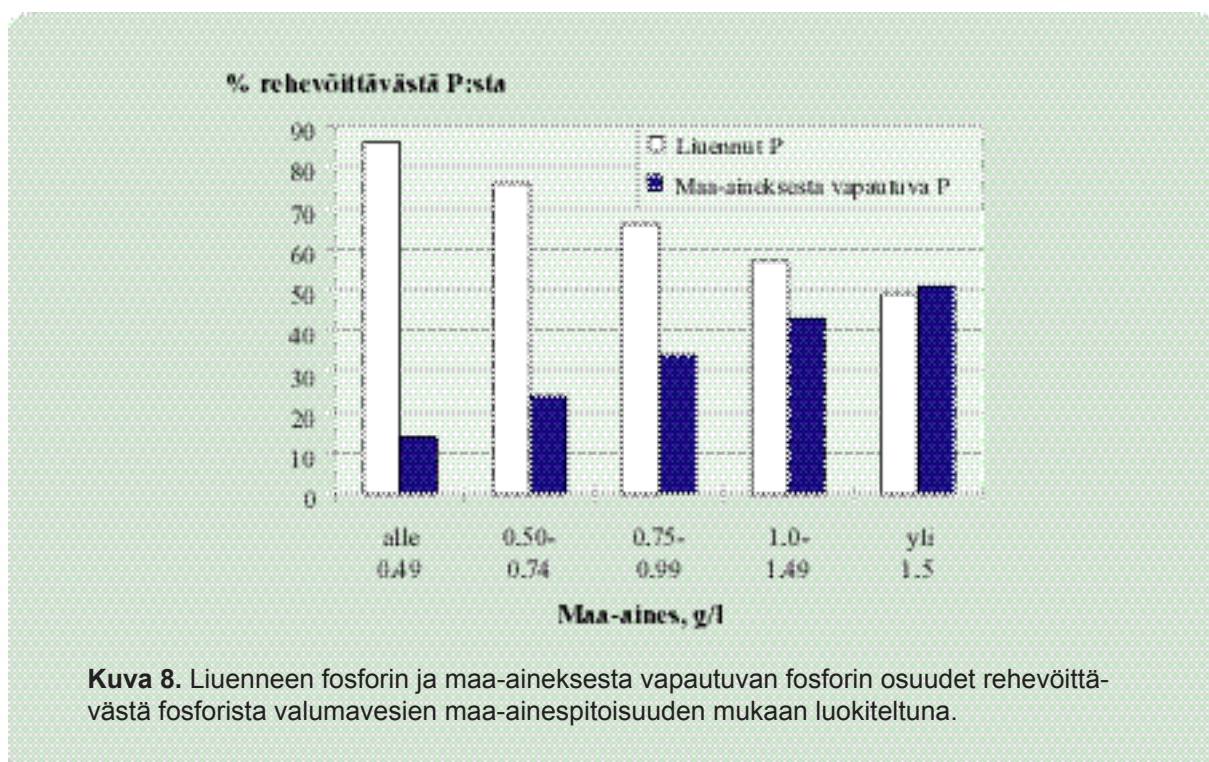
EROOSION VÄHENTÄMISEN MERKITYS REHEVÖITTÄVÄÄN FOSFORIKUORMITUKSEEN

Eroosiolla on selvä yhteys kokonaisfosforin kuormitukseen. Valumavesien maa-ainespiitoisuuden kasvaessa fosforipitoisuus valumavesissä kasvoi kaikilla tämän tutkimuksen koepaikoilla (Kuva 5). Selkeimmin tämä näkyi Aurajoen kentällä, joka sisältää huomattavasti enemmän helppoliukoista (viljavuusuuton) fosforia kuin muiden koepaikkojen maa.

Kokonaisfosfori saattaa kuitenkin olla huono mittari leville käyttökelpoisen fosforimäärän arvioinnissa (Ekholm, 1998). Eroosion torjunnan merkitystä vesistöön joutuvan rehevöittävän fosforikuormituksen pienentämiseksi onkin epäilty, koska esimerkiksi

Taulukko 3. Kiintoaineksesta vapautuneen fosforin määrä pintavalunnan maa-aineskiloa kohden (keskiarvo $\pm$ 95%:n luottamusväli).

Koepaikka	Vapautuva P mg/kg maa-ainesta
Aurajoki	161 $\pm$ 16
Lintupaju	69 $\pm$ 6
Kotkanoja	55 $\pm$ 5
Sjäokulla	80 $\pm$ 9



Kuva 8. Liunneen fosforin ja maa-aineksesta vapautuvan fosforin osuudet rehevöittävästä fosforista valumavesien maa-ainespiitoisuuden mukaan luokiteltuna.

vallitsevasta maalajista ja altaan koon suhteesta valuma-alueen pinta-alaan. Karkeat maahiukkaset laskeutuvat nopeasti ja virtauksen hidastuminen veden virratessa ojauomasta laskeutusaltaaseen usein riittää suurempien maapartikkelien laskeuttamiseksi. Saveslajitteen (kaikkein eniten ravinteita sisältävä lajite) laskeuttamiseksi vaaditaan kuitenkin hyvin pientä virtausnopeutta. Siten altaan tilavuuden suhde valuma-alueen pinta-alaan tulisi olla suuri, jotta hienompirakeiset hiukkaset ehtisivät laskeutua sinä aikana kun vesi viipyy laskeutusaltaassa.

Laskeutusaltaat saattavat hitaan virtaaman aikana kerätä runsaastikin sedimenttiä, joka virtaaman kasvaessa jälleen liettyy veteen ja poistuu altaasta. Tällaisessa tilanteessa altaaseen tulevan ja altaasta lähtevän veden laatu (maa-ainespitoisuus, fosforipitoisuus) vaihtelee paljon ja vesinäytteiden oton tulisi olla hyvin tiheää, jotta niiden perusteella voitaisiin sanoa jotain altain tehosta maa-aineksen ja ravinteiden poistajana pidemällä aikavälillä. Tämän hankkeen puitteissa tehdyssä tutkimuksessa päätettiin altain tehoa arvioida laskeutusaltaihin kertyneen sedimentin määrän ja fosforipitoisuuden perusteella. Sedimenttiä annettiin kerääntyä altaan pohjaan ankkuroituihin laatikoihin, tai sedimenttinäyte otettiin näytteenottoputkella altaan pohjalta.

Jokioisten kahteen laskeutusaltaaseen kertynyt sedimentti oli lähes yksinomaan (70-90 %) savesta (alle 0,002 mm halkaisijaltaan olevia hiukkasia), loppuosan ollessa lähinnä hiesulajitetta (0,002-0,02 mm:n hiukkasia). Tyrnävän laskeutusaltaaseen oli kerääntynyt pääosin hiesua. Altain valuma-alueet olivat Jokioisilla savimaita ja Tyrnävällä hietamaita (vallitseva hiukkaslajite halkaisijaltaan 0,02-0,2 mm). Jokioisten laskeutusaltaihin jäävän maa-aineksen määräksi arvioitiin noin 1900 kg vuodessa. Jokioisten altain pinta-ala on noin 0,01-0,02 % altain valuma-alueen peltopinta-alasta (noin 50 ja 70 ha). Arvio perustuu mitattuihin maa-aineskertymiin ja altain valuma-alueelta tulevaan kokonaisvalunnan määrään. Tyrnävän altaaseen kertyvän sedimentin määrä oli hyvin pieni (ei tarkempaa arviota).

Sedimentin kokonaisfosforin pitoisuus oli keskimäärin 1100-1500 mg/kg, joka on hieman alhaisempi kuin esimerkiksi Kotkanojan ja Sjäkullan kenttien pintamaassa (1500-1800 mg/kg). Laskeutusaltaihin kertyy myös ojauomasta liikkeelle lähtenyt aine, minkä fosforipitoisuus on selvästi alhaisempi kuin peltomaassa. Kun sedimentin fosforipitoisuus kerrotaan arvioidulla sedimentin vuosittaisella kertymällä, vuosittaiseksi kokonaisfosforin kertymäksi Jokioisten altaihin saatiin noin 2 kg. Kokonaisfosforin poistoteho olisi tällöin ainoastaan 2-3 % altaan läpi kulkevasta ainemäärästä.

Jokioisilla sedimenttinäytteet hartsiuuttoisen fosforin määrittämiseksi otettiin toisesta altaasta kolmesti kesän 1998 aikana (kesäkuussa, elokuussa ja lokakuussa) ja toisesta altaasta kahdesti (kesäkuu ja elokuu). Tyrnävän altaasta näytteenotto tehtiin kerran (elokuu). Sedimentistä hartsiuutossa vapautuneen fosforin määrät olivat Jokioisilla 32-145 mg/kg ja Tyrnävällä 17-58 mg/kg. Vaihtelu oli hyvin suurta samasta altaasta eri aikoina otettujen näytteiden välillä. Eniten sedimentistä vapautuvaa fosforia (145 mg/kg) oli lokakuussa otetuissa näytteissä. Vertailun vuoksi Kotkanojan ja Sjäkullan pintamaiden hartsiuuttoisen fosforin pitoisuudet olivat noin 43-52 mg/kg. Samojen koekenttien (pellon reunalta kerätyn) valumaveden sisältämän maa-aineksen fosforinluovutuskyky oli 50-80 mg/kg. Jokioisten altain teho rehevöittävän fosforin poistajina arvioitiin olevan noin 100 g vuodessa.

Aiemmin mm. Hartikainen (1979) on todennut veteen liettyneen maa-aineksen voivan toimia fosforin pidättäjänä tai luovuttajana maa-ainesta ympäröivän veden fosfo-

ainesta 970-3300 kg/ha vuodessa. Jos lasketaan eroosion mukana vesistöön kulkeutuvasta maa-aineksesta vapautuvan fosforin määrä Aurajoen kentällä tässä tutkimuksessa saatujen tulosten mukaisesti (161 mg/kg maa-aineksesta vapautuvaa fosforia), olisi vuosittainen eroosion mukana pellolta poistuvan maa-aineksesta vesistöissä vapautuvan fosforin määrä 160-530 g pellohehtaaria kohden. Tämä on merkittävä osa rehevöittävästä fosforikuormasta, kun se suhteutetaan liuenneen fosforin kuormitukseen, jonka suuruudeksi Aurajoen kentältä Puustinen (1994) mittasi 420-750 g/ha.

Se, kumpi rehevöittävän fosforin muoto, veteen liennut fosfori vai maa-aineksesta vapautuva fosfori, on merkittävämpi fosforin lähde vesikasveille ja leville vaihtelee sen mukaan kuinka paljon maa-ainesta vesi sisältää. Vesien kiintoainespitoisuuden kasvaessa yhä suurempi osa rehevöittävästä fosforista on maa-aineksesta vapautuvaa fosforia (Kuva 8).

Yleisesti voidaan todeta, että karkeilla mailla valumavedet sisältävät vain vähän maa-ainesta ja vesistökuormituksen pienentämiseksi tulisi keskittyä liuenneen fosforin kuormituksen pienentämiseen. Eroosio on karkeilla mailla vähäistä ja siten eroosion torjuntatoimien hyödyt ovat marginaalisia. Savimailla valumavedet ovat usein sameita ja sen vuoksi eroosion torjunta on ensiarvoisen tärkeää. Erityisesti korkean fosforipitoisuuden omaavilla savimailla eroosion mukana pellolta saattaa kulkeutua hyvin runsaasti maa-aineksesta vapautuvaa fosforia.

SUOJAVYÖHYKKEET JA LASKEUTUSALTAAT

Toukokuun 1997 ja toukokuun 1998 välisenä aikana kaikista Lintupajun suojavyöhykekokeessa kerätyistä valumavesistä määritettiin myös anioninvaihtohartsimenetelmällä uuttuva fosfori (Taulukko 4). Noin kolmannes rehevöittävästä fosforista, joka kulkeutui ilman suojavyöhykettä viljellyltä ruudulta oli maa-aineksesta vapautuvaa fosforia.

Taulukko 4. Liuenneen fosforin, rehevöittävän (liennut ja maa-aineksesta vapautuva) fosforin ja kokonaisfosforin kulkeutuminen pellolta toukokuun 1997 ja toukokuun 1998 välillä. (Tulokset julkaistu artikkelissa Uusi-Kämpä ym., 2000).

	Liennut fosfori kg/ha	Rehevöittävä fosfori kg/ha	Kokonais- fosfori kg/ha	Pintavalunta mm	Sademäärä mm
Ei suojakaistaa	0,22	0,34	1,28	150	660
Nurmikaista	0,15	0,19	0,65	100	660
Luonnonkasvikaista	0,31	0,36	0,94	120	660

Nurmea kasvava suojavyöhyke pellon jyrkässä osassa pidatti tehokkaasti sekä liennutta että maa-ainesfosforia ja pienensi huomattavasti rehevöittävää fosforikuormitusta. Sen sijaan luonnonkasveja kasvava suojavyöhyke lisäsi huuhtoutuvaa liuenneen fosforin määrää niin paljon, että rehevöittävä fosforikuormitus tältä koeruudulta oli hieman suurempi kuin ilman suojavyöhykettä viljellyltä alalta. Jos suojavyöhykkeen kasvustoa ei korjata pois, kasvien maasta ottamat ravinteet vapautuvat kasviaineksen lakastuessa pintavaluntaveteen. Suojavyöhykkeiden kasvuston ajoittainen korjaaminen pois on siten edellytys suojavyöhykkeiden tehokkaalle fosforinpidätykselle.

Laskeutusaltaiden teho fosforin poistajana on riippuvainen mm. valuma-alueen

valuma-alueen pinta-alasta ja johtamalla altaasta vesi kosteikkoon voidaan samennusta aiheuttavan maa-aineksen ja fosforin poistoa vedestä tehostaa. Sedimentin huuhtoutuminen laskeutusaltaista saattaa kuitenkin olla runsasta varsinkin kevätvalunnan aikana, minkä vuoksi erityisesti pienten laskeutusaltaiden fosforinpoistoteho saattaa jäädä vaatimattomaksi.

KIRJALLISUUS

- Ekholm, P. ja Yli-Halla, M. 1992.** Reversibly adsorbed phosphorus in agriculturally loaded rivers in southern Finland. *Aqua Fennica* 22: 35-41.
- Ekholm, P. 1998.** Algal-available phosphorus originating from agriculture and municipalities. *Monographs of the Boreal Environ.Res.* No. 11: 60 p.
- Hanna, M. 1989.** Biologically available phosphorus: estimation and prediction using an anion-exchange resin. *Can.J.Fish.Aquat.Sci.* 46: 638-643.
- Hartikainen, H. 1979.** Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments. *J.Scient.Agric.Soc.Finland* 51: 537-625.
- Heathwaite, A. L. ja Johnes, P. J. 1996.** Contribution of nitrogen species and phosphorus fractions to stream water quality in agricultural catchments. *Hydrological Processes* 10: 971-983.
- Jensen, M. B, Jørgensen, P. R., Hansen, H. C. B. ja Nielsen, N. E. 1998.** Biopore mediated subsurface transport of dissolved orthophosphate. *J.Environ.Qual.* 27: 1130-1137.
- Laubel, A., Jacobsen, O. H., Kronvang, B., Grant, R. ja Andersen, H. E. 1999.** Subsurface drainage loss of particles and phosphorus from field plot experiments and a tile-drained catchment. *J.Environ.Qual.* 28: 576-584.
- Mahara, Y. 1993.** Storage and migration of fallout strontium-90 and cesium-137 for over 40 years in the surface soil of Nagasaki. *J.Environ.Qual.* 22: 722-730.
- Paasonen-Kivekäs, M. ja Virtanen, J. 1998.** Temporal variation of runoff and nitrogen load in a clay field. *Nordic Hydrological Programme, Report No. 44, Volume I*, pp. 132-141. XX Nordic Hydrological Conference/Nordic Association of Hydrology.
- Puustinen, M. 1994.** Effects of soil tillage on erosion and nutrient transport in plough layer runoff. *Publications of the Water Research Institute* 17: 71-90. Vesi- ja ympäristöhallitus.
- Sharpley, A. N. 1985.** The selective erosion of plant nutrients. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 49: 1527-1534.
- Sharpley, A. N. 1993.** Estimating phosphorus in agricultural runoff available to several algae using iron-oxide paper strips. *J.Environ.Qual.* 22: 678-680.
- Sibbesen, E. 1978.** An investigation of the anion-exchange resin method for soil

ripitoisuudesta riippuen. Sedimentistä vapautuvan fosforin pitoisuuksien vaihtelusta voi arvailla, että laskeutusaltaan pohjalle kertynyt maa-aines pidättää fosforia valumavesien sisältäessä paljon liennutta fosforia ja sitten luovuttaa sitä valumaveden liunneen fosforin pitoisuuden ollessa alhainen. Siten laskeutusaltaat lähinnä tasaisivat pintavesiin päätyvää fosforikuormaa pidättäen väliaikaisesti liennutta fosforia.

TIIVISTELMÄ

Valumaveteen liennut ja maa-aineksesta vesistöissä vapautuva fosfori ovat levien ja vesikasvien kasvuun käyttökelpoisia fosforin muotoja. Liunneen fosforin määrittäminen on ollut jo vuosikymmenten ajan rutiinimäärittäminen, kun taas maa-aineksesta vapautuvan fosforin määrittämiseksi ei ole ollut luotettavaa rutiinikäyttöön soveltuvaa menetelmää. Tässä työssä käytettiin valumavesien sisältämästä maa-aineksesta vapautuvan fosforin määrittämiseen suhteellisen helppoa ioninvaihtohartsin käyttöön perustuvaa menetelmää ja kehitettiin sitä vesinäytteiden tutkimiseen soveltuvaksi. Tämän menetelmän ja levätestien tuloksia vertailtiin käyttäen eri lähteistä kerättyjä näytteitä. Vertailussa tähän mennessä saatujen tulosten mukaan anioninvaihtohartsuutto on lupaava menetelmä levillä käyttökelpoisen fosforin määrän arvioimiseksi vesinäytteistä.

Savimaalla salaojavalunnan kuljettama kiintoaines oli pääosin pintamaasta peräisin olevaa hienorakeista maa-ainesta. Tämä tulos oli hyvin sopusoinnussa sen havainnon kanssa, että valumavesien kuljettaman maa-aineksen fosforinluovutuskyky oli suunnilleen samansuuruinen sekä pinta- että salaojavalunnassa. Savimailla suuri osa veden virtauksesta salaojiin tapahtunee salaojakaivantoon muodostuneita halkeamia pitkin. Halkeamat muodostavat veden ja maahiukkasten virtaukselle nopean kulkutien, eikä vajovesi ehdi reagoida suuren fosforinpidätyskapasiteetin omaavien syvempien maakerrosten kanssa.

Rehevöittävä fosfori oli vähän maa-ainesta sisältävissä kirkkaissa valumavesissä lähes yksinomaan veteen liennutta fosforia. Valumaveden sameuden lisääntyessä maa-aineksesta vapautuvan fosforin osuus rehevöittävästä fosforista kuitenkin kasvoi. Yli 1 g/l maa-ainesta sisältävissä valumavesinäytteissä maa-aineksesta vapautuva fosfori oli yhtä merkittävä tai suurempi rehevöittävän fosforin lähde kuin vedessä liunneessa muodossa oleva fosfori. Eroosiontorjunta on siten erittäin merkittävä vesiensuojelutoimi. Erityisesti runsaasti helppoliukoista fosforia sisältävillä mailla tulee pintavalunta ja eroosio pyrkiä minimoimaan.

Suojavyöhykkeet vähensivät pellolta kulkeutuvan rehevöittävän fosforin pitoisuuksia pintavalunnassa. Ne vähensivät eroosiota ja maa-aineksesta vapautuvan fosforin pitoisuuksia vaikka liunneen fosforin pitoisuus olikin jonkin verran suurempi suojavyöhykkeiltä valuvissa vesissä kuin ilman suojavyöhykettä viljellyiltä ruuduilta tulevassa valunnassa. Eroosioherkillä alueilla suojavyöhykkeet pienentävät rehevöittävän fosforin kuormitusta selvästi.

Tässä työssä tutkittuihin laskeutusaltaisiin sedimentoituneen kokonaisfosforin määräksi arvioitiin 2-3 % altaan läpi kulkevasta kokonaisfosforin määrästä. Altaiden sedimentteihin kertyneestä fosforista noin 5-8 % oli rehevöittävä. Altaaseen sedimentoitumattoman (altaan vedessä olevan) rehevöittävän fosforin osuus veden kokonaisfosforista oli tätä huomattavasti suurempi, noin 30 %. Kasvattamalla altaan koon osuutta

phosphate extraction. *Plant Soil* 50: 305-321.

Syers, J. K., Shah, R. ja Walker, T. W. 1969. Fractionation of phosphorus in two alluvial soils and particle-size separates. *Soil Sci.* 108: 283-289.

Turtola, E. ja Paajanen, A. 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management* 28: 295-310.

Uusi-Kämppä, J. ja Ylärinta, T. 1996. Effect of buffer strips on controlling soil erosion and nutrient losses in southern Finland. Teoksessa: G. Mulamoottil ym. (toim.): *Wetlands: Environmental Gradients, Boundaries and Buffers*, s. 221-235.

Uusi-Kämppä, J., Braskerud, B., Jansson, H. Syversen, N. ja Uusitalo, R. 2000. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29: 151-158.

SUMMARY

In agricultural runoff waters, dissolved orthophosphate and desorbable particulate phosphorus (P) are the P forms that may accelerate eutrophication. In this work, totally 718 surface and subsurface runoff water samples from clayey soils were analysed for P and suspended sediment. Phosphorus analysis included determinations of dissolved molybdate reactive P (DRP), total P (TP), and anion exchange resin-extractable P (AER-P). An anion exchange resin extraction method, developed for soil analysis, was modified to apply for the determination of desorbable particulate P in water samples. The origin of the suspended sediment carried by subsurface drainage waters was studied by analysing the activity of Cs-137 in soils and runoff sediments. In these clayey soils of southwestern Finland, concentrations of desorbable particulate P and Cs-137 were equally high in surface runoff and subsurface drain flow sediments. Suspended sediment found in drainage water samples must therefore originate from topsoil. Most probably, translocation of topsoil material occurs in macropores formed in drainage excavations. In the samples containing little suspended soil, DRP was the major fraction of potentially bioavailable P (assumed to equal AER-P). In the samples containing more than 1 g/l suspended sediment, desorbable particulate P was, however, as important a contributor to bioavailable P as was DRP. Especially in soils rich in plant-available P, erosion should be minimised as the concentration of desorbable particulate P of the runoff sediment was found to positively correlate with soil test P. Due to reduction of desorbable particulate P in runoff, buffer strips were found to decrease potentially bioavailable P load, even though vegetated buffers tended to increase DRP load. Small sedimentation ponds were a less effective way of mitigating agricultural P load, as they only retained 2-3 % of the P mass passing through the ponds.

HUUHTOUTUMISHERKKYYSKARTTA

Helsingin yliopisto

Maa- ja kotitalousteknologian laitos

Liisa Pesonen, Hannu Haapala, Jussi Uusi-Rauva, Kalle Lindell

JOHDANTO

Maan rakenne ja siten sen vesitalous voi vaihdella suuresti peltolohkon eri osissa. Liukoisten ravinteiden huuhtoutumista tapahtuu valunnan mukana. Kokonaisvalunta jakaantuu pinta-valuntaan, pintakerrosvaluntaan ja pohjavesivaluntaan, joiden suhteet riippuvat maalajista, maaprofiilin läpäisevyysominaisuuksista, kaltevuussuhteista ja kasvillisuudesta (Puustinen 1999). Maaperän vesitalouden ja huuhtoutumisherkkyyden paikkakohtainen tunteminen on tärkeää tarkennettaessa peltoviljelyn ravinteidenkäyttöä ja parannettaessa sadon laatua. Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää menetelmä huuhtoutumisherkkyyškartan laatimiseksi peltolohkolle.

MENETELMÄ

Koealueeksi valittiin 6,5 ha:n suuruinen osa Porvoossa sijaitsevan Kiialan kartanon peltolohkosta nro. 32. Työ koostui kolmesta osasta: maatutkauksesta, lieriömittauksista ja korkeusmallinnuksesta. Maatutkauksen perusteella koealue jaettiin maaperän rakenteen perusteella osa-alueisiin. Kultakin osa-alueelta otettiin maanäyteliერიöt, joille tehtiin laboratoriossa perkolaation kautta tapahtuvaa ravinteiden huuhtoutumisherkkyyttä kuvaavat suolapulssin läpäisevyytestit. Lisäksi koealueelle laadittiin korkeusmalli kahdella eri mittausmenetelmällä kerätystä datasta. Tutkimuksen eri osissa kerätty informaatio yhdistettiin paikkatietokannassa huuhtoutumisherkkyyškartaksi.

MAATUTKAUS

Maatutka on sähköä heikosti johtavien väliaineiden tutkimuksiin soveltuva sähkömagneettinen mittauslaite, jonka antenni lähettää väliaineeseen (maahan) lyhytkestoisen sähkömagneettisen pulssin radiotaajuuksilla. Tutka-antennilla mitataan takaisin heijastuneen aallon lähtöhetkestä paluuhetkeen kulunut aika ja amplitudi. Heijastumisajasta tehdään päätelmiä rajapinnan sijainnista. Tutkalaitteen lähettämän pulssin kulkua ja heijastuksia kontrolloi taajuuden lisäksi lähinnä väliaineen huokosten vesi-ilma-suhde. (Hänninen et al. 1991)

todellinen paksuus. Kuvalta nähtävä paksuus vaihtelee, koska signaalin kulkunopeus on riippuvainen kerroksen ominaisuuksista.

Lohkon 32 tutkausten jälkeen tutkattiin myös lohko 30, joka on n. 32 ha:n suuruinen. Mittauksessa käytettiin matkapyörää, koska lohko oli varsin pitkä ja matkavirhe olisi saattanut muodostua suureksi ilman matkan mittausta. Tutkalinjat paikannettiin lisäksi muutamien paikannuspisteiden avulla. Näiden pisteiden koordinaatit mitattiin 2 metrin tarkkuuteen pystyvällä DGPS-vastaanottimella. (Kuva 2)

Tutkaustulokset tulkittiin tulostetulta kuvalta. Tulkinassa käytettiin avuksi alueelta aiemmin otettua ilmakuvaa ja pelloilta mitattuja satokarttoja. Lisäksi peltolohkolla 32 oli käyty useita kertoja paikanpäällä tarkistamassa tilannetta muiden mittausten, mm. maaperän vedenläpäisevyyden, kasvuston lehtivihreäpitoisuuden, maaperän ja kasvuston tyyppipitoisuuden sekä viljavuuden määritysten yhteydessä. Tästä syystä lohko tunnettiin tavanomaista paremmin, ja tulkinassa voitiin löytää varsin pienistäkin kuvan eroista oleellista informaatiota. (Kuva 3)

Tutkauslinjoille paikannettiin kohdat, joissa maaperän luonne muuttuu ja samankaltaiset linjojen osat yhdistettiin yhtenäisiksi alueiksi (kuva 4). Alueita muodostui kaikkiaan kahdeksan. Jokaiselta alueelta valittiin paikka, josta otettiin lieriönäytteet maan huuhtoutumisherkkyyksimittauksia varten. Näytteenottopaikat paikanneet DGPS-mittauksella. Näytteenottopisteen numero 4 sijainti alueen reunalla johtuu paikannusvirheestä (kuva 4).



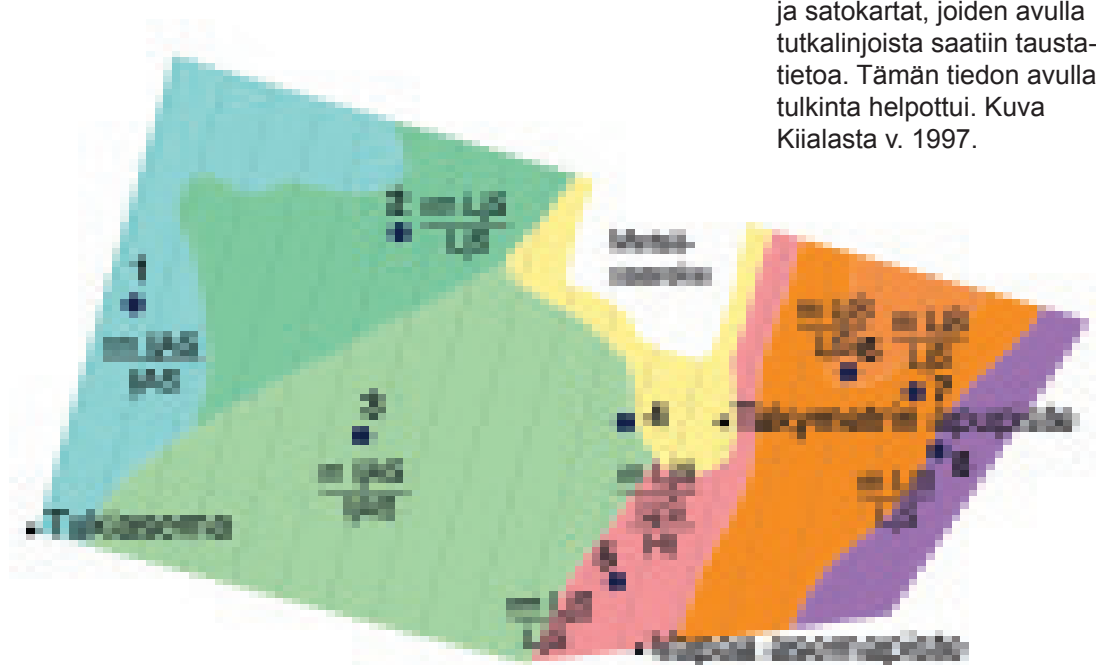
Kuva 1. SIR-2 tutkauskajärjestelmän keskusyksikkö, jossa näkyy tutkauksen aikana reaaliaikainen tutkakuva. Keskusyksikössä on signaaliprosessori (Motorola DSP 56002), PC (486DX, 16 MB RAM, 450 MB HD), TFT-näyttö ja tarvittavat liittimet (antenni, matkapyörä, kirjoitin, käyttöjännite, merkinantolaite, RS 232, VGA, näppäimistö). Järjestelmään saa myös ulkop. videoliitäntän ja kenttäkelpoisen kirjoittimen.



Kuva 2. Tutkan kiinnitys ajoneuvoon. Tutkan antenni on kiinnitetty ajoneuvon eteen, keskusyksikkö on sisällä, samoin paikannuslaitteet. Auton katolla näkyy DGPS:n antennit.

Tutka kiinnitettiin autoon siten, että antenni kulki maan pinnan yläpuolella n. 20 cm:n korkeudella (kuva 2). Mittauksessa ei käytetty matkapyörää, joten pyrittiin ajamaan tasaista nopeutta (n. 5 km/h). Tutkalinjojen paikat mitattiin mittapyörän avulla siten, että ensimmäinen linja otettiin pellon itäpäässä olleesta tiestä 20 metrin päähän. Linjat olivat suoria ja niitä mitattiin 20 metrin välein, yhteensä 18 kpl (kuva 4). Linjojen suunta oli lähes pohjois-etelä -suunta. Tällä järjestelyllä saatiin katetuksi koko koealue.

Kuva 3. Tutkatuilta alueilta oli käytävissä mm. ilmakuvat ja satokartat, joiden avulla tutkalinjoista saatiin taustatietoa. Tämän tiedon avulla tulkinta helpottui. Kuva Kiialasta v. 1997.

**HUUHTOUTUMISHERKKYYSKARTTA**

tiivistä savea salaojan päältä (Jokioinen 1) ja kahden salaojan välistä (Jokioinen 2).

Maanäytteet kairattiin Maatalouden tutkimuskeskuksessa kehitetyn koneellisen kairan avulla (kuva 5). Kaira oli kolmipistekiinnitteinen ja hydraulikäyttöinen. Näytteet otettiin PVC -putkiin, joiden korkeus oli 600 mm ja sisähalkaisija 152 mm. Itse maanäyte pyrittiin saamaan 550 mm syvyyteen.

Kairauksen jälkeen maanäyteliერიöt käsiteltiin 0,25% formaliiniliuoksella. Liuosta kaadettiin 0,5 litraa jokaiseen lieriöön lierojen poistamiseksi. Näyteputkien päät suljettiin muovilla, ja maa-näytteet siirrettiin viileään varastoon.

MITTAUKSET

Mittauslaitteisto koostui maanäyteliერიöstä, kahdesta lasikuulalieriöstä, kaapelitutkasta (=TDR) (Tektronix 1502B), koaksiaalikytkimestä (multiplekseristä), antureista, tietokoneesta ja mittausohjelmasta (tdraut97.exe) (Heimovaara ja Water 1993). Maanäyteliერიö asetettiin lasikuulalla täytetyn matalamman lieriön päälle. Lasikuulalieriössä oli kaulus, joka erotti reunalta valuvan veden, ja ohjasi sen toiseen lasikuulalieriöön. Molemmissa lasikuulalieriöissä oli TDR -anturit. Kaapelitutka mittasi vuorollaan eri antureita, ja mittautietokone ohjasi mittausjärjestystä ja tallensi mittautiedot. (Kuva 6) Mittauslaitteisto on esitelty tarkemmin edellisessä tiedotteessa. (Lehtinen ja Pesonen 2000)

Tähän aiemmin kehitettyyn mittausjärjestelmään lisättiin virtausmittaus, joka mittasi maanäyte-lieriöstä poistunutta vettä sekä keskeltä että reunalta. Virtausmittaus toteutettiin kippilaskureilla (kuva 7), jotka antoivat pulssin tietyn vesimäärän kertyessä säiliöön. Pulssin havaitsemiseksi käytettiin induktiivista anturia. Kippilaskureilta tulevat pulssit kerättiin toiselle mittautieto-koneelle Picolog -mittausohjelman avulla (Pico Technology Limited version 2.0 rev 3).



Kuva 5. Maanäyteliერიoiden kairauksessa käytetty koneellinen kaira. Traktorin eteen on rakennettu lieriöiden kuljetusteline.

LIERIÖMITTAUKSET

MAANÄYTTEET

Maanäytteet otettiin Kiialan koealalta toukokuussa 1999, kynnökseltä ennen kylvömuokkausta. Kyseisenä ajankohtana pellon pinta kanto traktorin, mutta savimaat olivat vielä kevään valunнан jäljeltä turvonneessa tilassa. Kiialan jokaisesta kahdeksasta kasvupaikasta otettiin viisi näytettä. Näytteet kairattiin jonossa, kahden metrin välein, kasvupaikan keskialueelta. Kairauslinja oli kohtisuorassa suunnassa salaojaan nähden ja keskimmainen näyte pyrittiin saamaan mahdollisimman lähelle salaojan kohtaa. Paikannustarkkuus ei ollut kuitenkaan riittävä, joten salaojien tarkkaa kohtaa ei voitu määrittää. Kasvupaikkojen maalajit olivat liejuista savea, ja muokkauskerroksen multavuus vaihteli multavasta runsasmultaiseen. Sekä Viikistä että Jokioisista otettiin lisäksi kahden kasvupaikan näytteet huuhtoutumisherkkyyssluokittelun kehittämistä varten. Viikin näytteet edustivat hienoa (Viikki 1) ja karkeaa hietaa (Viikki 2) ja Jokioisten



Kuva 6. Lieriömittauksissa käytetty laitteisto. A. maanäytelieriö, B. lasikuulalieriö, C. mariotti-astia, D. lasikuulalieriö maanäytelieriön reunavesille, E. kippilaskuri, F. kaapelitutka (TDR), G. multiplekseri, H. releistö, I. TDR-mittausta ohjaava tietokone, J. virtalähde, K. virtausmittausta ohjaava tietokone.



Kuva 7. Virtausnopeuden mittaamisessa käytetty kippilaskuri. A. kippi, B. pulssi-anturi, C. veden tulotietku, D. TDR-anturi lasikuulalieriössä.

vuotuinen valunta huuhtoo vähintään 66% maaveden ravinteista. Lisäksi oman luokan muodostavat maat, jotka ovat hyvin tiiviitä. Tällaisten kasvupaikkojen maanäytteistä ei yksikään läpäissyt vettä kostutusvaiheessa.

Edellä mainittujen ominaisuuksien perusteella voitiin tehdä seuraava luokittelu:

Luokka 1: suotautuva,	vesimäärä <200 mm
Luokka 2: ohivirtaus,	vesimäärä <200 mm
Luokka 3: suotautuva,	vesimäärä >200 mm
Luokka 4: ohivirtaus,	vesimäärä >200 mm
Luokka 5. läpäisemätön	

Ravinteiden huuhtoutumisen kannalta herkin on luokka 1, ja parhaiten ravinteita ovat suojassa huuhtoutumiselta luokassa 5. Luokittelutapa on samalla sekä määrällinen että laadullinen. Huuhteluveden määrä kuvaa, kuinka helposti vesiliukoiset ravinteet kulkeutuvat veden mukana, tai kuinka hyvin ne ovat suojassa. Huuhtoutumistapa taas kertoo maan rakenteesta ja veden liiketavasta sen sisällä. Kaltevuus todennäköisesti lisää infiltraation määrää etenkin luokassa 2. Infiltraation määrä saattaa olla moninkertainen rinteiden alaosissa ja notkopaikoissa, verrattuna tasamaahan, jossa ei välttämättä tapahdu voimakasta, vaakasuuntaista veden liikettä.

Taulukko 1. Eri kasvupaikkojen mittaustulokset. "kostutus" ja "huuhtelu" sarakkeissa on luku, joka ilmaisee, kuinka moni kasvupaikan viidestä lieriöstä on läpäissyt vettä. "Valunta" on 66% perkolaation määrästä. "luokka" tarkoittaa huuhtoutumisherkkyydenluokkaa.

Paikka	Kostutus (-/5)	Huuhtelu (-/5)	Valunta (mm)	Infilt. nopeus (ml/min)	Suuret huokokset (%)	Luokka
Kiiala 1	5	3	358	5	3,8	4
Kiiala 2	5	3	353	4	5,9	4
Kiiala 3	3	0	369	0	0,7	4
Kiiala 4	0	0	369	0	-	5
Kiiala 5	1	1	319	8	2,4	4
Kiiala 6	0	0	369	0	-	5
Kiiala 7	3	0	369	0	4	4
Kiiala 8	3	2	318	105	3,8	4
Viikki 1	5	4	369	4	3,3	4
Viikki 2	5	5	170	26	7,8	1
Jokioinen 1	0	0	0	0	-	5
Jokioinen 2	0	0	0	0	-	5

MENETELMÄ

Mittaus aloitettiin asettamalla maanäytelieriö mittausjalustan päälle. Jalustan ja PVC-putken välinen sauma tiivistettiin silikonimassalla. Kun silikonin oli kuivunut riittävästi, maanäytelieriö kostutettiin tislattulla vedellä alta päin. Kostutus tapahtui mariotti-astian avulla siten, että vedenpinnan taso asetettiin maanäytteen pinnan korkeudelle. Kostutus-aika vaihteli yhdestä kahteen vuorokautta, riippuen siitä, kuinka läpäisevä maan rakenne oli. Mikäli maanäyte ei kostunut läpi kahdessa vuorokaudessa, sille ei tehty varsinaista huuhtoutumismittausta, vaan näyte katsottiin vettä läpäisemättömäksi.

Kun kostutusvesi oli noussut maanäytteen pinnan korkeudelle ja tasoittunut, kylläisen maanäytteen vedenpinta laskettiin pohjan tasolle. Valutuksessa poistuneen veden perusteella voitiin laskea maanäytteestä suurimpien huokosten osuus.

Varsinaisessa mittauksessa nestemäinen suolapulssi lisättiin injektioruiskulla 5 cm:n syvyyteen pintamaahan sijoitetun lannoitteen tapaan. Suolapulssina käytettiin 14 ml 2 M KCl:a ja se injektioitiin 2 ml:n erissä tasaisin välein seitsemään eri kohtaan lieriön poikki-piunta-alalle. Suolan lisäyksen jälkeen käynnistettiin mittaustietokoneet ja maanäytettä alettiin huuhtoa tislattulla vedellä. Vettä laskettiin maanäytteen pinnalle siten, että vesipinta pysyi 1 cm maapatsaan pinnan yläpuolella koko mittauksen ajan. Huuhteluveden määrä vaihteli 0-25 litraa, riippuen maanäytteen läpäisy nopeudesta ja mm. lieriön reunojen tiivyydestä.

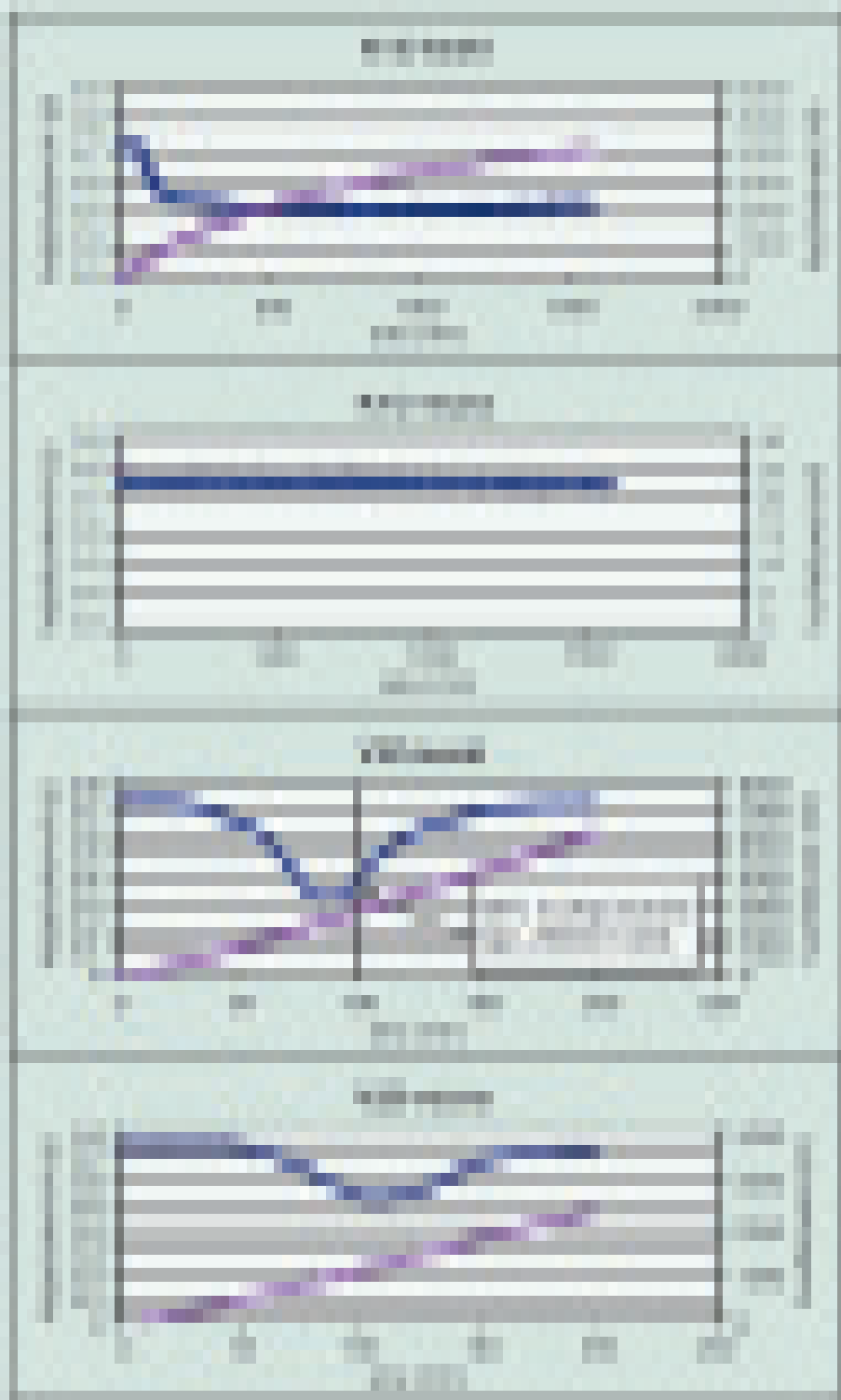
TULOKSET

Kaapelitutkamittausten tuloksena saatiin aikasarja heijastuskertoimen kehittymisestä. (Kuva 8) Heijastuskertoimen alenemisesta voidaan havaita suolan läpitulo. Virtausmittausdatasta voitiin laskea vesimäärän kertyminen ja virtausnopeus sekä keski- että reunavedestä. Tunnuslukuna kuvaamaan mitatun maanäytteen huuhtoutumisherkkyyttä käytettiin vesimäärää, joka tarvitaan huuhtomaan 66% suolapulssista. Läpäisemättömille näytteille on annettu arvo 369 mm, koska kyseinen määrä (6,6 litraa = 66% 10 litrasta) pystyy huuhtomaan 66% suolapulssista, vaikka maan vedenläpäisy olisi hyvin hidasta, ja huuhtoutuminen tapahtuisi suodautumalla (Lehtinen ja Pesonen 2000). Infiltraationopeus on laskettu vettä läpäisseiden lieriöiden keskiarvona. Tuloksiin huomioitiin ainoastaan lieriön keskeltä tullut suolapulssi ja huuhteluvesi.

LUOKITTELU

Huuhtoutumisherkkyyshuokat jaettiin sen mukaan, kuinka vesi läpäisi maanäytteet. Mikäli kasvupaikan kaikki viisi näytettä läpäisivät huuhteluveden, voitiin kasvupaikan maan rakenne olettaa suodautuvaksi. Suodautuvissa maissa vesi läpäisee maakerroksen tasaisesti koko poikkipinnaltaan. Jos taas yksi tai useampi maanäyte ei läpäissyt huuhtelu-/kostutusvettä, voitiin sen kasvupaikan huuhtoutumistapa olettaa ohivirtaustyyppiseksi. Ohivirtausmaissa vesi kulkeutuu satunnaisesti halkeamien, juurikanavien tai lieronreikien kautta maanäytteen läpi.

Toinen huuhtoutumisherkkyyttä erotteleva tekijä on vesimäärä, joka tarvittiin suolapulssin huuhtomiseen. Vuosivalunta Suomessa vaihtelee keskimäärin 200-400 mm:n välillä (Solantie ja Ekholm 1985). Tämän perusteella voitiin jakaa luokat, jossa huuhtoutumiseen tarvittava vesimäärä on alle 200 mm ja yli 200 mm. Eli herkimmissä luokissa



Kuva 8. Heijastuskertoimen muuttuminen ja vesimäärän kertyminen yhdestä Viikin maanäytelieryöstä, (V2D) joka oli karkeaa hietaa sekä Kiialan kasvupaikan 1 lieryöstä (K1C), joka oli savea. Viikin maanäytelieryö läpäisi nopeasti vettä ja samalla suolapulssin. Osa vedestä ja suolapulssista tuli reunalta. Kiialan näyte läpäisi vettä huomattavasti hitaammin eikä suolapulssi ollut tullut kokonaan läpi, kun mittaus lopetettiin. Kiialan näytetteessä suola oli hyvin suojassa huuhtoutumiselta. Reunalta ei tullut lainkaan vettä. Reunavesien lähtötason heijastuskertoimen on korkeampi kuin keskivesien, koska anturit ovat mittauksen alussa puhtaassa vedessä. Keskivesien lasikuulalieryöstä on puolestaan laskettu kostutusvesi läpi ennen mittauksen alkua.

KORKEUSMALLI

Koelohkolle laadittiin myös korkeusmalli. Tutkimuksessa selvitettiin, soveltuuko maa-tutkauksen yhteydessä RTK (Real-Time-Kinematic) -tarkkuisella OTF (On-the-Fly) GPS-laitteistolla kerätty korkeusdata korkeusmallin laatimiseen peltolohkolle. Vertailudatana käytettiin takymetrimittauksella kerättyä dataa. Mittaukset tehtiin elokuussa 1999 puinnin jälkeen pellon pinnan ollessa sänkipeitteinen. Työ aloitettiin mittamalla pellon kulmaan (kuva 4) kiintopiste DGPS:llä (Differential-Global-Positioning-System) RTK-laitteiston tukiasemaa varten (kuva 9). Kiintopisteen määrittystä varten DGPS-dataa kerättiin kolme tuntia, minkä jälkeen 3D-koordinaatit määritettiin mitattujen koordinaattiarvojen keskiarvona. Kiintopisteen määrittystarkkuudeksi saatiin kerätyn datan keskihajontojen mukaan $\pm 0,3$ m tasossa ja $\pm 0,5$ m korkeudessa. Korkeuden virhe merkitsee off set -virhettä, mikäli korkeusmalli sovitetaan johonkin toiseen karttakoordinaatistoon. Tässä tutkimuksessa tällä virheellä ei ole merkitystä, sillä samaa tukipisteen korkeusarvoa on käytetty lähtökohtana molemmissa korkeusmalleissa. Tasossa oleva virhe on niin pieni, että sillä ei ole korkeusmallin tarkkuuteen käytännössä vaikutusta. Varsinaista pellon korkeusdatan keräämistä varten RTK-laitteiston tukiasemalaite (base station) asetettiin kiintopisteelle. Mittauksessa tukiasemalaite lähetetti modeemin välityksellä referenssisanomaa "mönkijään" sijoitetulle liikkuvalla GPS-laitteelle (rover receiver) (kuva 10).

Kuva 9. RTK-mittauksessa tarvitun tukiasemapisteen (A) sijainnin mittaamisessa käytetty laitteisto. Etualalla differentiaalivas-taanotin Trimble Pro Beacon (D = antenni, E = RTCM-radio) ja taaempana GPS-laitte Trimble 7400 series (B = antenni, C = GPS). Mittauksen ohjaamiseen ja datan tallennukseen käytetty kannettava tietokone (F).



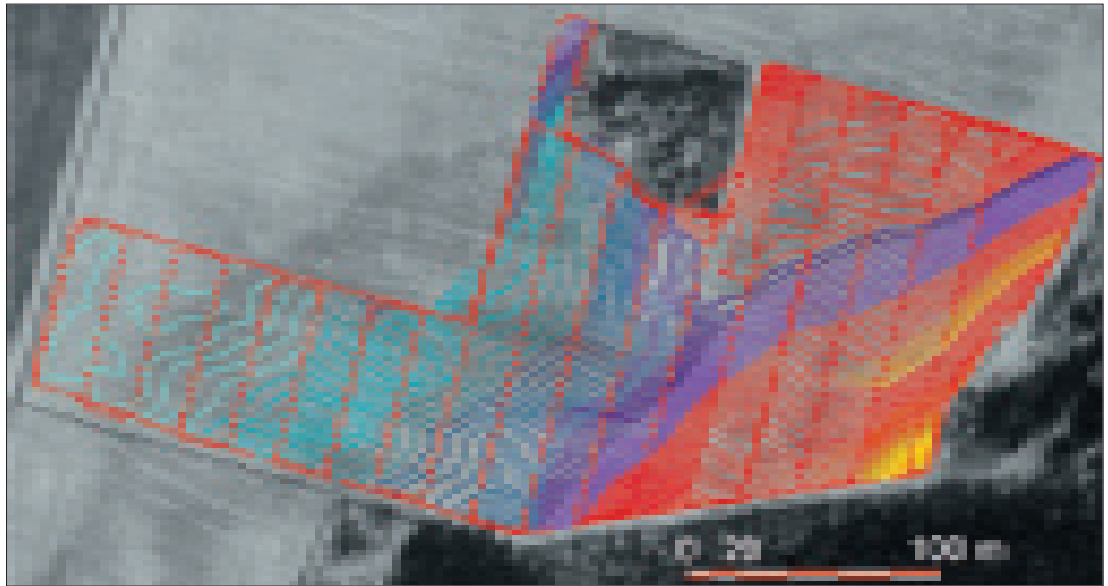


Kuva 10. RTK-tarkkuisen GPS-korkeusdatan keräämisessä käytetty laitteisto. A. kiintopiste, B. tukiaseman antenni, C. ajoneuvoantenni, D. GPS + modeemi, E. mittauksen ohjaamiseen ja datan tallennukseen käytetty tietokone.

on nimenomaan kerätä dataa enemmän mielenkiintoisilta alueilta, esimerkiksi kumpuilevalta alueelta ja harventaa tiedonkeruuta tasaisemmillä alueilla. Korkeusprofiililtaan hyvin vaihtelevissa paikoissa liian harvaa mittaustiheys “tasoittaa” maastonmuotoja. Liian tiheästä mittauksesta ei puolestaan saada enää riittävää lisäarvoa tehdylle työlle.

Rasterimuotoisesta takymetrikorkeusmallista vähennettiin paikkatietokannassa vektorimuotoinen GPS-korkeusmalli. Tuloksena saatu erokartta on esitetty kuvassa 14. GPS-laitteistolla tutkauslinjojen mukaisesti mitatusta datasta tehty korkeusmalli ei poikkea oleellisesti takymetrillä gridimittauksena tehdystä. GPS-mittauksen korkeusarvot ovat yhteneväiset takymetrimittauksen kanssa noin 6 cm:n tarkkuudella. Maatutkauksen yhteydessä yhdensuuntaisina linjoina kerätty GPS-korkeusdata on siten käyttökelpoista korkeusmallinnuksessa. Vaatimuksena on kuitenkin, että maatutkauslinjat sijaitsevat riittävän tiheästi toisiinsa nähden ja mielellään siten, että linjat kulkevat maaston laakso- ja huippupaikkojen kautta.

Tutkimuksen tavoitteena olleesta huuhtoutumisherkkyysskartasta on esitetty versio kuvassa 15. Tähän karttaan on yhdistetty korkeusmalli contour-kuviona, alueiden huuhtoutumis-herkkyyssluokittelu väritettyinä alueina, vettäläpäisseiden lieriöiden osuus paikan kaikista lieriöistä “piirakkakuviona” sekä vettäläpäisseiden lieriöiden virtausnopeuksien kasvupaikkakohtaiset keskiarvot numeerisesti (ml/min). Korkeusmallissa contour-viivojen välinen korkeusero on 10 cm. Kartassa vihreä alue edustaa huuhtoutumisherkkyyssluokkaa 4 ja keltainen luokkaa 5. Tässä kartassa korkeusmallina on käytetty takymetrillä mitattua mallia, koska se kattaa koko koealueen.



Kuva 11. GPS-korkeusmittauksen havaintopisteet (punaiset pisteet) sekä contour-korkeusmalli ilmakuvan päällä.

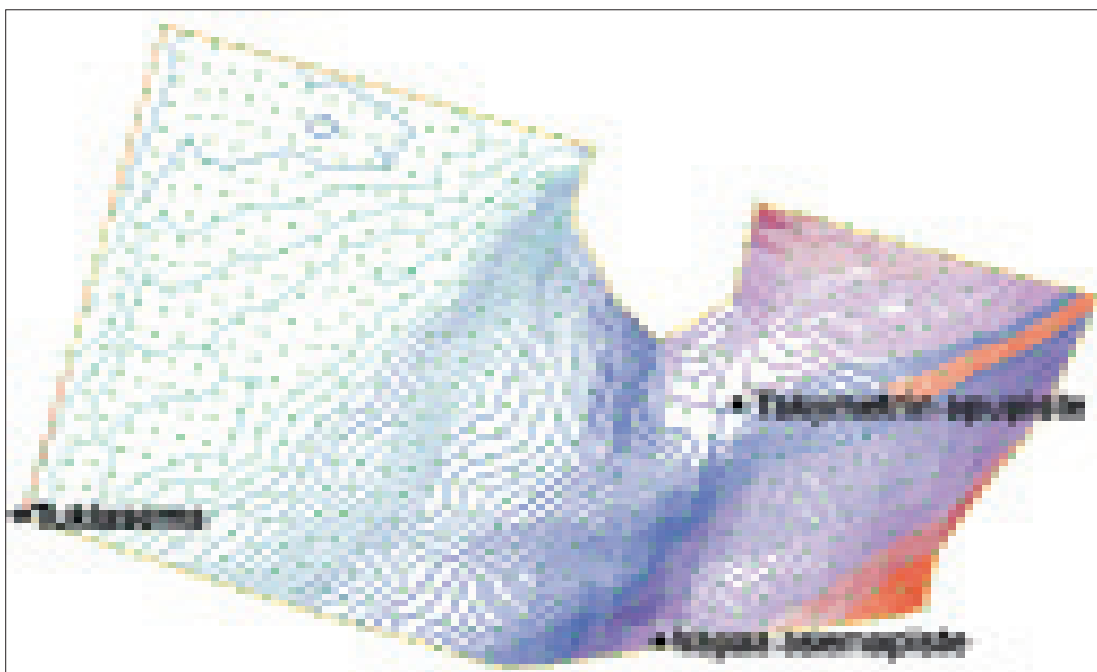
3D-dataa kerättiin ajamalla mönkijällä maatutkauslinjoja pitkin pyrkien pitämään ajonopeus vakiona. Paikan määrittäminen ja tallennus tapahtui 2 sekunnin välein. Mittauksen lopuksi laitteistolla ajettiin vielä peltolohkon reunat. Havaintopisteet on esitetty kuvassa 10. Mitattu data siirrettiin paikkatietokantaohjelmaan (Microimages TNT Mips v 6.2), jossa datasta muodostettiin TIN (Triangulated Irregular Network) -korkeusmalli (Gold 1989). Korkeusmalli on esitetty kuvassa 11 contour-kuviona. Osa lohkoista on mittamatta, koska mittaushetkellä alueella oli sokerijuurikaskasvusto eikä alueella voitu siten ajaa mönkijällä.

GPS-datasta muodostettua korkeusmallia verrattiin takymetrillä (Geodimeter 460, kuva 12) mitatusta datasta muodostettuun korkeusmalliin. Takymetrimittaukset tehtiin vapaata asemapistettä käyttäen. Mittausta varten tarvittiin kaksi tunnettua pistettä. Ensimmäisenä tunnettuna pisteenä käytettiin GPS-mittauksissa käytettyä tukiasemapistettä. Tällä tavalla takymetrimittaukset sidottiin GPS-mittausten kanssa samaan koordinaatistoon. Myös toinen tunnettu piste määritettiin samalla DGPS-menetelmällä kuin ensimmäinen. Koska keskiarvoistukseen perustuva mittaustulos sisältää virhettä, toisen tunnetun pisteen koordinaatit tarkennettiin takymetrimittauksella käyttäen GPS-mittauksen perusteella määritettyä suuntakulmaa. Huolellisella tähtäys ja prismatyökentelyllä takymetrimittauksissa päästään ± 1 cm:n tarkkuuteen.

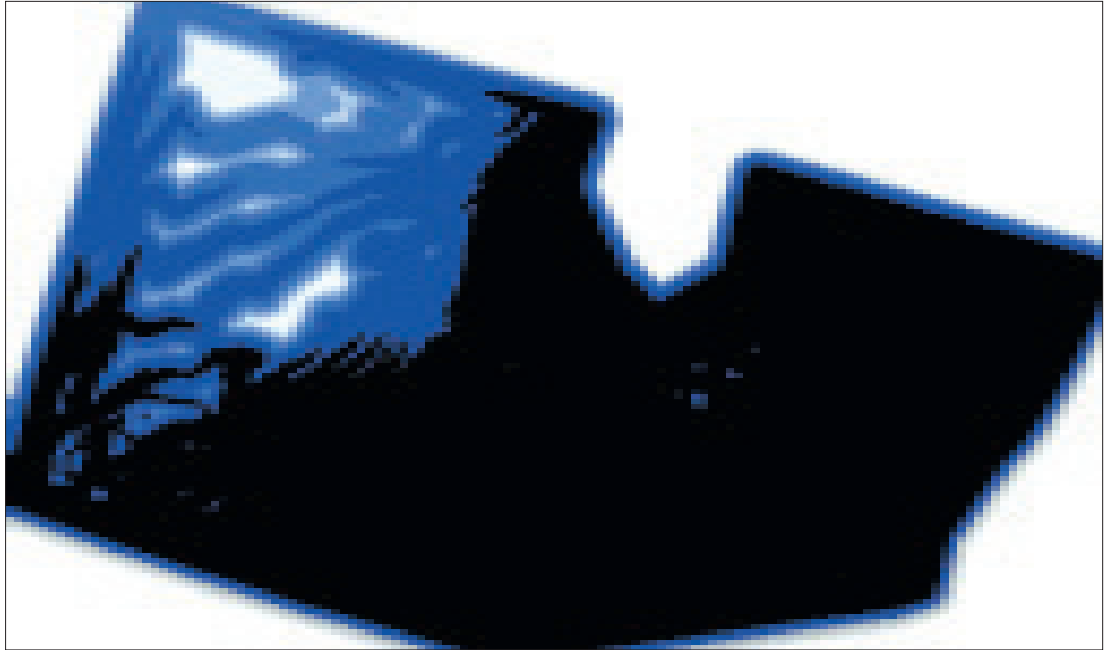
Tässä mitattu lohko oli pinnanmuodostukseltaan loivasti kumpuileva ilman äkkijyrkänheitä tai teräviä taitoskohtia. Jyrkimmissäkin taitekohdissa "laakson" syvyys tai huipun korkeus 10 metrillä on luokkaa 10 cm, mikä vastaa RTK-mittauksen mittaus-tarkkuutta ja siten tavoitetarkkuutta. Niinpä vertailumittaus takymetrillä päätettiin tehdä 10 metrin hilavälillä. Kuvasta 13. nähdään, että hilavälin tarkkuus vaihteli noin ± 1 m. Tutkauslinjojen suuntaisesti havaintoja oli siten noin puolet vähemmän, mutta kohtisuoraan tutkauslinjoihin nähden kaksinkertaisesti verrattuna tehtyyn GPS-mittaukseen. Takymetridatasta muodostettiin TIN-korkeusmalli (kuva 13) samalla menetelmällä kuin GPS-datasta. Molemmista korkeusmallista käytetty data on kerätty epäsäännöllisellä hilavälillä. TIN-malli ei vaadi laskennan perustaksi tasavälistä dataa, vaan sen ideana



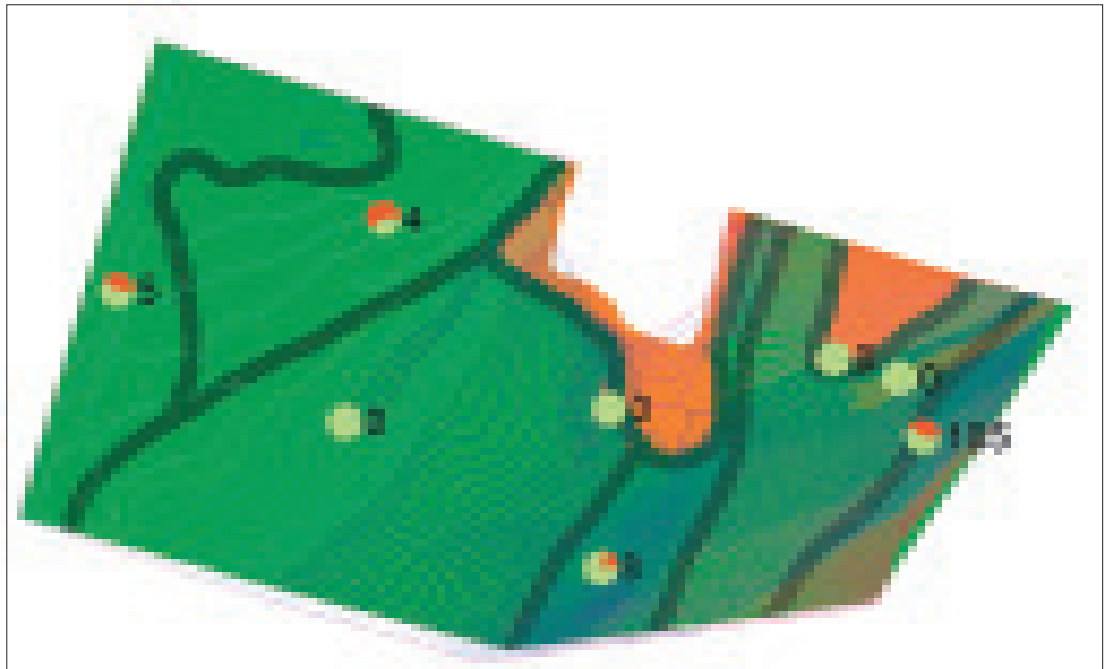
Kuva 12. Takymetrimittauksissa käytetty Geodimeter 460, prisma sekä tiedonsiirto-ohjelma.



Kuva 13. Takymetrimittauksessa käytetyt tunnetut pisteet, havaintopisteet, sekä mitatusta datasta muodostettu contour-korkeusmalli. Korkeusero pellon matalimman ja korkeimman kohdan välillä on 9,3 m.



Kuva 14. Korkeusmallien erotuksena saatu erokartta. Mustilla alueilla ero on 0 cm. Kartan koilliskulmassa oleva vaalea alue johtuu siitä, että GPS-korkeusmalli ei kattanut kyseistä alaa. Erokohtat ovat paikoissa, joissa pellolla on "laakso tai "kukkulan "huippu". Eron suuruus on suurimmillaan n. 6 cm.



Kuva 15. Huuhtoutumisherkyyskartta Kiialan koalueesta.

sopivien tutka-asetusten ja maan kosteustilan kombinaatioiden etsimistä. Tutkauslinjojen suunnittelussa voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi salaojakarttojen korkeuskäyriä. Tutkaustiheyttä voidaan muuttaa maastonmuotojen mukaan siten, että kumpuilevassa maastossa mitataan tiheämmin. Mahdollisia satokarttoja voidaan hyödyntää paitsi aluerajojen hahmottamisessa, myös ns. poutivien alueiden määrittämisessä. Poutivat alueet ovat usein myös huuhtoutumisherkkiä eli kuuluvat todennäköisesti luokkiin 1 ja 2. Lieriömittaukset voidaan kohdentaa tällaisille epäilyksen alaisille alueille. Ennen lieriömittauksia alueella kannattaa tehdä koekairauksia maan rakenteen ja kerrostumien selvittämiseksi, sillä poutimisen syynä voi olla myös maan liiallinen tiivistyminen, mikä puolestaan estää perkolaatiovalunnan. Täsmäviljelyssä huuhtoutumisherkkiä alueita tulee lannoittaa varovaisesti tai huolehtia lannoitteen tehokas hyväksikäyttö kasvukauden aikana. Luokkiin 1 ja 2 kuuluvat alueet hyötyisivät todennäköisesti eniten säätösalaajituksesta.

Huuhtoutumisherkkyysskarttaa voi hyödyntää esimerkiksi päätettäessä alueen säätösalaajituksesta, kertosadetusmäärästä, lannoituksen jakamisesta useampaan erään sekä turvallisesta lannoitemäärästä sadon laadun ja huuhtoutumariskin suhteen. Maaperäkartta korkeusmalleineen on kertaluontoinen investointi, jota voidaan hyödyntää viljelyn eri osa-alueilla. Tekniikka on tällä hetkellä jo varsin kehittynyttä ja soveltuvaa laajamittaiseenkin käytännön työhön. Lieriömittauksia tulisi sen sijaan kehittää edelleen, lähinnä laboratoriolaitteiston osalta, jotta menetelmän laajamittainen käyttö olisi mahdollista.

TIIVISTELMÄ

Maaperän vesitalouden ja huuhtoutumisherkkyyden paikkakohtainen tunteminen on tärkeää tarkennettaessa peltoviljelyn ravinteidenkäyttöä ja parannettaessa sadon laatua. Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää menetelmä huuhtoutumisherkkyysskartan laatimiseksi peltolohkolle. Työ koostui kolmesta osasta: maatutkauksesta, lieriömittauksista ja korkeusmallinnuksesta. Koalueeksi valittiin 6,5 hehtaarin suuruinen peltolohko, jonka maalajina on pääosin savi. Muokkaukerroksen paksuus vaihteli 20 - 30 cm:iin.

Koelohko tutkattiin maatutkalla 20 m välein sijaitsevia linjoja pitkin, minkä perusteella lohko jaettiin kahdeksaan osa-alueeseen. Aluerajojen sijainnin määrittämisessä käytettiin hyväksi tutkimuksen yhteydessä laaditun korkeusmallin contour -käyriä. Aineisto korkeusmallia varten kerättiin RTK-OTF-GPS -laitteistolla maatutkauslinjoilta. Tutkimuksessa haluttiin selvittää, voidaanko korkeusmalliaineiston keruu yhdistää maatutkaukseen. Vertailuaineistoksi sama alue mitattiin takymetrillä noin 10 metrin hilavälillä. Aineistoista tehdyt TIN-mallit erosivat toisistaan vähemmän kuin 10 cm:ä.

Alueiden huuhtoutumisherkkyyden määrittämiseksi jokaiselta alueelta valittiin piste maanäytteiden ottamista varten. Pisteiden sijainti määritettiin DGPS -mittauksella. Jokaisesta pisteestä otettiin viisi häiriintymätöntä maanäyteliieriötä, pituudeltaan 600 mm ja halkaisijaltaan 160 mm, linjassa kahden metrin välein. Linjojen suunta valittiin kohtisuoraan salaojiin nähden. Maanäytteet testattiin laboratoriossa. Testin aluksi maanäyteliieriöt kyllästettiin vedellä alakautta kastelemalla, minkä jälkeen kylläisen veden pinta laskettiin lieriön alareunan tasolle. Tämän jälkeen 5 cm:n syvyydelle lieriön pintamaahan injektointiin suolapulssi, joka huuhdeltiin lieriön läpi pitämällä

Huuhtoutumisherkkyysskartan aluerajoissa on aina virhettä. Tutkauslinjojen tiheydestä johtuva virhe on suurimmillaan 20 m ja se on mahdollinen silloin, kun alueraja on tutkauslinjan suuntainen ja maan ominaisuudet vaihtuvat jyrkästi. Poikittain tutkauslinjaan nähden virhe on tässä tapauksessa ± 5 m johtuen tulkintakuvien kutistamisesta mittakaavaan, jossa 1 cm vastaa 5 metriä. Tämä edellyttää, että ajonopeus tutkattaessa on pysynyt vakiona. Käytettäessä paikannuslaitetta kyseinen virheen suuruus on riippuvainen paikannuslaitteen tarkkuudesta. Tässä tutkimuksessa tutkakuvien tulkinnassa on tyydytty määrittämään kohdat, joissa maaperän sähkömagneettisen aallon heijastusominaisuudet jollakin tavoin muuttuvat, mikä vähentää tulkinnan aiheuttamaa virhettä. Koska aluerajat on piirretty mukailemaan korkeusmallin contour-käyriä, korkeusmallin virhe vaikuttaa myös aluerajoihin. Tässä virheen suuruusluokka on kuitenkin piempi kuin tutkaustiheydestä johtuva virhe. Kuvassa 15 aluerajojen virhemarginaali ± 5 m on esitetty paksuna aluerajana.

TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Laboratoriossa tehtävät lieriömittaukset ovat tässä tutkimuksessa käytetyllä menetelmällä varsin työläitä ja aikaa vieviä. Näytteiden keruu pellolta sujuu kuitenkin käytetyllä laitteistolla joutuisasti. Kiialan lohkon 40 näytelieriön kairaamiseen kului aikaa n. 10 tuntia. Työtä helpotti maan suuri kosteuspitoisuus varhain keväällä, jolloin maan kairalle aiheuttama vastus oli savimailla pienimmillään.

Laboratoriomittausmenetelmää ja -laitteistoa tulisi kehittää edelleen, jotta työn eri vaiheet yksinkertaistuisivat ja nopeutuisivat. Tiedonkeruulaitteistot ohjelmistoinen toimivat hyvin nykyiselläänkin. Ohivirtausmailla sekä otoskoon että näytteiden otostiheyden kasvattaminen saattaisi antaa paremman kuvan paikan huuhtoutumisominaisuuksista. Nyt käytetty menetelmä sopii hyvin suotautuville maille, joilla näytelieriöiden välinen hajonta on pienempää. Edellä esitetty huuhtoutumisherkkyyssluokittelu on karkea, sillä tähän mennessä kerätty aineisto ei oikeuta tarkempaan luokitteluun. Kartan luokitus vedenläpäisyneopeuksineen ja kaltevuuksineen auttaa kuitenkin muodostamaan käsityksen kyseisellä koealalla toteutuvista huuhtoutumismekanismeista. Jatkotutkimuksin tulisi selvittää, voitaisiko lieriömittauksin saatavia huuhtoutumiskäyriä yhdessä korkeusmallin kanssa käyttää todennäköisen toteutuneen ravinnehuuhtoutuman arvioimiseen paikkakohtaisesti.

Tässä esitetty menetelmä olisi käyttökelpoinen todennettaessa huuhtoutumisherkkyyksi eli luokkiin 1 ja 2 kuuluviksi oletettujen maiden todellinen käyttäytyminen. Tehdyissä mittauksissa havaittiin, kuinka kasvupaikka (Viikki 1), jonka pintamaa oli hietaa, osoittautui kuuluvaksi huuhtoutumisherkkyyssluokkaan 4. Ennakko-oletuksena oli, että maa kuuluisi luokkaan 1. Vesi kulkeutuu tämän kasvupaikan maassa suotautumalla noin 50 cm:n syvyyteen saakka, missä alkaa tiiviimpi, savesta sisältävä maakerros. Tämän kerroksen läpi vesi virtaa satunnaisten halkeamien ja juurikanavien kautta. Kerroksen yläpuolinen tila muodostaa suuren varastotilan ravinnepitoiselle vedelle, jota ohivirtaava vesi ottaa mukaansa vain osin. Näin ravinteet osittain välttänevät huuhtoutumisen.

Lieriömittausten kohdentamista tarkempaa selvitystä vaativiin kohteisiin maatutkausten avulla tulisi kehittää. Tähänastisen kokemuksen perusteella tämä edellyttäisi

SUMMARY

LEACHING SENSITIVITY MAP

The knowledge of site-specific water management and leaching sensitivity is important when adjusting nutrient management and improving the quality of the yield. The object of the study was to develop a method for determining a leaching sensitivity map to a field block. The work consisted of three parts: soil radar measurements, laboratory tests for soil cylinders and soil surface modelling. The area of the test field was 6,5 ha, main soil type being clay. The depth of the top soil layer varied between 20 - 30 cm.

The field block was measured with the ground penetrating radar in lines at intervals of 20 m, in which base the field block was divided into eight subblocks. The contour curves of surface model were used to determine boundary lines of subblocks. The data for surface modelling were measured by RTK-OTF-GPS device along the lines used for the ground penetrating radar measurements. This was to investigate whether the data collection for surface modelling is able to integrate with ground penetrating radar measurements. The control data were measured by tachymeter in 10 m grid. The TIN-models made from both data differed from each other less than 10 cm.

One point from each subblock was chosen for soil sampling. The points were located by DGPS measurements. Five undisturbed soil cylinders, diameter of 160 mm and length of 600 mm, were taken in a line with two meter spacing from each subblock point and taken to the laboratory in order to determine their leaching sensitivity. In the beginning of the test, soil cylinders were saturated from underneath with water after which water was drained out by gravity. Then, to the depth of 5 cm injected salt pulse was flushed out of soil cylinder by maintaining constant 1 cm high water column on the top of the soil. Changes in electroconductivity of outcoming water caused by salt pulse were measured by TDR-method as a time serie. The amount of water needed to flush 66 % of injected salt pulse out of soil cylinder was used to describe one of the criteria for leaching sensitivity of the soil. Another criterion used was the way the water passed through the soil. On this base leaching sensitivity was described as five classes as follows:

- class 1: water passed by percolation, < 200 mm water needed to flush 66 % of the salt pulse
- class 2: water passed by bypass flow, < 200 mm water needed to flush 66 % of the salt pulse
- class 3: water passed by percolation, > 200 mm water needed to flush 66 % of the salt pulse
- class 4: water passed by bypass flow, > 200 mm water needed to flush 66 % of the salt pulse
- class 5: no water passed through

The subblock was classified to pass water by percolation if all five soil cylinders passed water when flushing salt pulse. Bypass flow was determined when from one to four soil cylinders did not pass water. Class 5 was determined when none of the soil cylinders passed water through when watering from underneath. The amount of water needed to flush 66 % of salt pulse was calculated as an average of soil cylinders which passed water. The subblocks of the tested field were determined to belong in classes 4 and 5.

yhden senttimetrin korkuinen vesipatsas lieriön pinnalla. Lieriöstä ulostulleen veden sähkönjohtavuuden muutoksia mitattiin TDR -menetelmällä aikasarjana. Yhtenä maan huuhtoutumisherkkyyttä kuvaavana tekijänä pidettiin vesimäärää, joka tarvittiin huuhtomaan 66 %:a suolapulssista ulos lieriöstä. Toisena kuvaava tekijä oli suolapulssin huuhtoutumistapa. Tällä perusteella huuhtoutumisherkkyyttä kuvaamaan määriteltiin viisi luokkaa:

Luokka 1: suotautuva, vesimäärä < 200 mm

Luokka 2: ohivirtaus, vesimäärä < 200 mm

Luokka 3: suotautuva, vesimäärä > 200 mm

Luokka 4: ohivirtaus, vesimäärä > 200 mm

Luokka 5: läpäisemätön

Alue luokiteltiin suotautuvaksi, jos kaikki viisi maaliieriötä läpäisivät vettä huuhteltaessa. Ohivirtaus todettiin silloin, jos 1 - 4 lieriötä ei läpäissyt vettä. Luokassa viisi yksikään lieriöistä ei läpäissyt vettä edes kostutusvaiheessa. 66 %:n vesimäärä laskettiin vettä läpäisseiden lieriöiden keskiarvona. Koelohkon alueet määritettiin kuuluviksi luokkiin 4 ja 5.

KIRJALLISUUS

Gold, C. M., 1989. Surface interpolation, spatial adjacency and GIS. In: Raper, J. (ed.). Three dimensional applications in Geographical Information Systems. London. Taylor & Francis. p. 21-35.

Heimovaara, T. J. & Water, E. de. 1993. A computer controlled TDR system for measuring water content and bulk electrical conductivity of soils. Laboratory of physical geography and soil science University of Amsterdam. Report 41.

Hänninen, P., Hänninen, P., Koponen, L., Koskiahde, A., Pollari, R., Saarenketo, T. & Sutinen, R. 1991. Maatutkaluotaus. Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry. p. 68.

Lehtinen, R., Pesonen, L. 2000. Kaapelitutkaan ja maanäyteliieriöihin perustuva maan huuhtoutumisherkkyyden mittaaminen. Peltoviljelyn ravinnehuuhtoutumien vähentäminen pellon vesitaloutta säättämällä. Vuoden 1998 väliraportti. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote n:o 24. p. 10-18.

Pico Technology Limited. Picolog data logging software user manual. Hardwick. United Kingdom.

Puustinen, M., 1999. Viljelymenetelmien vaikutus pintaeroosioon ja ravinteiden huuhtoutumiseen. Suomen ympäristö 285. Suomen ympäristökeskus. p. 116.

Solantie, R., Ekholm, M. 1985. Water balance in Finland during the period 1961-1975 as compared to 1931-1930. Publ. Water res. Inst. 59: 24-53

Fosforia ja typpeä kulkeutuu pintavesiin pinta- ja salaojavalunnan mukana. Eri ojitusjärjestelyillä on mahdollista tehostaa pellon vesi- ja ravinnetaloutta ja saada näin sato-tasoa nousemaan ja ravinnehuuhtoumia pienemmiksi. Säättösalaajituksessa kuivatuksen tehokkuutta säädellään padotuksen avulla, minkä seurauksena salaojavalunta ja sen mukana huuhtoutuvat ravinnemäärät vähenevät. Salaojakastelussa ei pelkästään säädetä pellolla jo olevia vesivaroja vaan tarvittaessa ojastoon pumpataan lisävetä. Tässä työssä arvioidaan ensin säättöojituksen ja salaojakastelun talousvaikutukset tilatasolla ja tämän jälkeen säättösalaajituksen osalta myös aluetason kannattavuus ympäristöhyödyt huomioon ottaen.¹

Salaojitusinvestoinnissa vuosittaisia kustannuksia muodostuu poistoista, koroista sekä kunnossapitokustannuksista. Salaojituksen hyödyt tulevat pääasiassa kahta kautta: tuottoja lisäävät hyödyt ja kustannuksia pienentävät hyödyt. Merkittävimpinä etuina on pidetty avo-ojien poisjääntiä, jolloin tuottava pinta-ala on kasvanut, konetyö on tehostunut ja rikkakasvien ja kasvitautien hallinta on helpottunut.

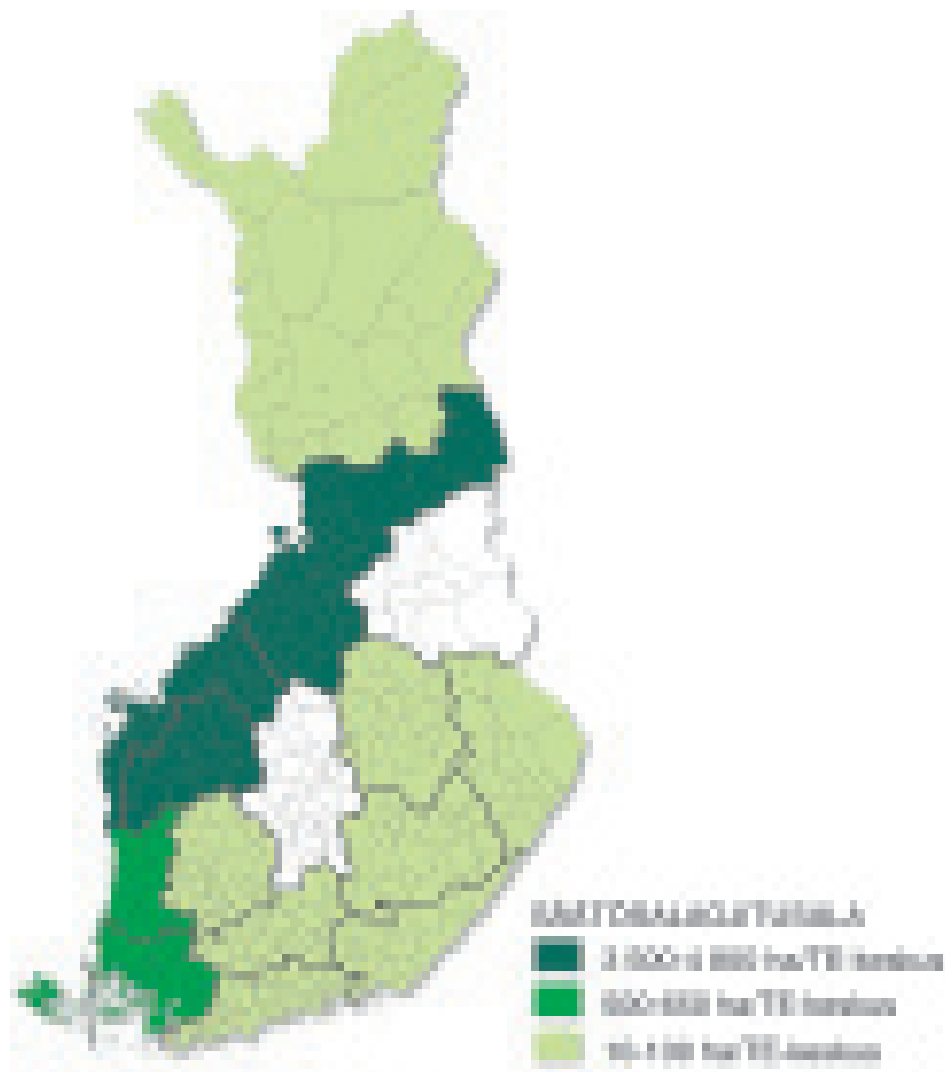
Normaaliin salaojitukseen verrattuna säättösalaajituksella ja salaojakastelulla saavutetaan lisähyötyjä vesitalouden säätelymahdollisuudella. Vesitalouden säätelyn hyödyt ilmenevät satotekijöiden (sadon määrä ja laatu) ja ravinnehävikkien muutoksina. Salaojakastelun varastoaltailla ja niihin mahdollisesti liittyvillä kosteikoilla on merkitystä myös alueen luonnon monimuotoisuuteen.

SÄÄTÖSALAOJITUKSEN YRITYSTALOUELLISET LASKELMAT

Säättösalaajitusmenetelmän käyttöönottoa on edistänyt sille maksettavat tuet. Säättösalaajitus liitettiin mukaan maatalouden ympäristötuen erityistukiin vuonna 1995. Säättösalaajitus soveltuu parhaiten tasaisille pelloille ja maalajeista sopivimmat ovat hiekka- ja hietapitoiset kivennäismaat. Sopimukset ovat 5-vuotisia ja tuki on ollut enintään 1 748 mk/ha/v (MMM 1997). Vuosina 1995-1998 sopimuksia tehtiin 940 kappaletta noin 14 000 hehtaarille. Sopimusalaista 90 % on kolmen Pohjanmaan TE-keskuksen alueella (kuvio 1). Varsinais-Suomen ja Satakunnan alueilla tehtiin ojituksista yhteensä 8 %. Säättösalaajitus sisältyy myös nykyiseen maatalouden ympäristöohjelmaan vuosille 2000-2006 (MMM 1999a). Uudessa ohjelmassa säättösalaajituksesta voidaan edelleen tehdä 5-vuotisia sopimuksia, ja enimmäistukimäärä on 930 mk/ha/v (MMM 1999b).

Säättösalaajituksesta aiheutuu lisäinvestointikustannuksia säättöjärjestelmästä, esimerkiksi säättökaivoista ja mahdollisesti tihennetystä salaojituksesta sekä käyttökustannuksia kaivojen hoito- ja säättötöistä. Seuraavat säättösalaajituksen kustannukset ovat Oulun eteläpuolelta Tyrnävältä. Tyrnävän alue sopii peltojen tasaisuuden ja maalajin perusteella hyvin säättöojitukseen. Yleisemmin säättösalaajituksia on tehty tällä alueella erikoisviljelyyn ja jo ojitetuille alueille. Lisäämällä kokoojaojien putkitukset, säättökai-vot ja tapauksittain myös joitakin uusia ojalinjoja investoinnin kokonaiskustannukset työ mukaan lukien ovat olleet noin 4 000-6 000 mk/ha. Säättösalaajituskustannukset vaihtelevat hankkeen mukaan (ks. taulukko 1) (Arola 1998).

¹ Laajemmin työ on käsitelty julkaisussa: Haataja, K. 2000. Säättösalaajituksen kustannukset ja hyödyt. Maatalouden taloudellisen tutkimuslaitoksen selvityksiä 5/2000.



Kuvio 1. Vuosina 1995-1998 tehdyt säätösalaajitukset TE-keskuksittain. Lähde: MMM 1999c.

SÄÄTÖSALAOJITUKSEN JA SALAOJAKASTELUN KUSTANNUKSET JA HYÖDYT

Kaisu Haataja
Maatalouden taloudellinen tutkimuslaitos

JOHDANTO

Peltoviljelyn ravinnekuormitus on merkittävä vesistöjemme laatuun vaikuttava tekijä.

varastoaltaaseen kerätään talteen pellon kuivatusvesiä, joita käytetään myöhemmin kasteluun. Tarvittavan lisäkasteluveden hankinta on myös järjestettävä.

Salaojakastelun kustannukset vaihtelevat tapauskohtaisesti. Kustannustietoja on saatavilla mm. Tyrnävän koekentästä (Mattila 1996 ym.) (taulukko 3). Tyrnävän koekentän (8 ha) ojitusinvestoinnit toteutettiin vuonna 1993. Pumppujen ja varastoaltaan rakennuskustannukset jaettiin eri ojituksille pinta-alojen suhteessa.

Taulukko 3. Investointikustannukset Tyrnävän salaojakasteluhankkeissa (Mattila ym. 1996)

	Kaksoisputkisto (2,47 ha)	Normaaliputkisto (5,53 ha)	Yhteensä
Ojituskustannukset	35.100	55.800	
Pumppaamo	13.100	29.400	42.500
Pumppaamoallas	3.600	8.000	11.600
Yhteensä, mk	51.800	93.200	
Yhteensä, mk/ha	21.000	16.900	

Salaojakastelun toteuttamiseksi tarkasteltiin kolmea vaihtoehtoa: 1) kahdessa kerroksessa oleva salaojitus, 2) sama kuin edellä, mutta kasteluojasto on varustettu ympärysaineellisella putkella, ja 3) normaalisalaojitus tiheämmällä ojituksella. Salaojakastelun kustannukset ovat mahdollista kattaa lähinnä erikoiskasveja kuten perunaa viljeltäessä (taulukko 4).

Taulukko 4. Salaojakastelun kustannukset ja tuottovaatimukset.

Taulukko 2. Säättösalojituksen lisäinvestointikustannukset ja vähimmäissadonlisäykset. Huom. erityistuki ei vielä mukana

Lisäinvestointikustannus, mk/ha		2000		4000	
Pääomakustannukset	(10 v, 5 %)	260		520	
mk/ha/v	(15 v, 5 %)	190		390	
Korko- ja poistokustannukset					
+ työkustannukset 500 mk/ha/v		760		1020	
= yhteensä, mk/ha/v		690		890	
Sato-odotukset, kg/ha:					
(lähtösatotasoa)					
ohra	0,74 mk/kg	1030	(34 %)	1.380	(46 %)
	(3 000 kg/ha)	940	(31 %)	1.200	(40 %)
kaura	0,70 mk/kg	1080	(35 %)	1.970	(63 %)
	(3 100 kg/ha)	990	(32 %)	1.260	(41 %)
peruna	1,00 mk/kg	760	(3 %)	1.020	(3 %)
	(30 tn/ha)	690	(2 %)	890	(3 %)
sokerijuurikas	0,34 mk/kg	2230	(7 %)	2.990	(10 %)
	(31 tn/ha)	2040	(7 %)	2.600	(8 %)

Taulukko 1. Säättösalaajituksen investointikustannukset Tyrnävän alueella.

	Investointikustannukset töineen, mk/ha (ilman alv)
Pelkkien säättökaivojen lisäys	1.500 - 2.000
Säättökaivot + kokoojaojien putkitus + lisäojia	4.000 - 6.000
Täysin uusi säättösalaajitus	10.000 - 12.500
Vertaa normaali salaajitus	8.000 - 10.000

Säättösalaajituksen hoitoon ja tarkkailuun on arvioitu tarvittavan 0,5 tunnin työpanos/kaivo/viikko. Jos työtunnin hintana käytetään 45 markkaa ja säättökaivoja on yksi hehtaarilla, niin työkustannuksia kunnossapidosta aiheutuu kasvukauden (24 viikkoa) aikana noin 540 markkaa/ hehtaari.

Seuraavassa esimerkissä on laskettu säättösalaajituksen vuosittaiset korko-, poisto- ja työkustannukset. Vuosittainen pääomasta aiheutuva kustannus on laskettu annuiteetimenetelmällä, jossa laskentakorkokantana on 5 % ja poisto-aika on 10 tai 15 vuotta. Lisäinvestointikustannus normaaliin salaajitukseen verrattuna on ollut 2 000 tai 4 000 markkaa. Sato-odotukset kuvaavat eri viljelykasvien vähimmäissadonlisäyksiä, joilla vuotuiskustannukset tulee katettua (taulukko 2).

Jos säättösalaajitukseen kuuluu esimerkiksi säättökaivo ja lisäojia, josta aiheutuu 4 000 markan investointikustannukset, aiheutuu 15 vuoden poistoajalla korko- ja poistokustannuksia 390 mk/v. Mikäli säättökaivojen hoitotöistä työkustannus on 500 markkaa, kustannuksia muodostuu yhteensä 890 mk/ha/v. Kustannusten kattamiseksi perunasadon tulisi 1,00 markan tuottajahinnalla nousta noin 1 020 kiloa eli 30 tonnin satotasolla 3 %.

Sadonlisäysvaatimukset ovat realistisia perunalla ja mahdollisesti sokerijuurikkaalla, mutta viljakasveilla aivan liian korkeita näitä poisto-aikoja käytettäessä. Koko maan keskisatoihin (20 tn/ha) verrattuna perunaan erikoistuneilla tiloilla satotasot saattavat olla kaksinkertaisia ja jopa 50 tn/ha, joten näillä tiloilla pienempikin suhteellinen sato-tason nousu kattaa lisäkustannukset. Viljasadoissakin on esimerkkinä olevan C2-alueen sisällä paljon eroja. Oulun eteläpuoleisella Lakeuden alueella viljatililla keskisadoissa on päästy 5 000 kg/ha. Säättösalaajitusalueella viljellään viljelykierron mukaan vuorollaan eri kasveja, esimerkiksi 2 vuotta perunaa ja 3 vuotta viljaa. Siten perunalta vaaditaan edellä laskettuja sato-odotuksia suurempia sadonlisäyksiä, jotta viljavuodet saadaan katetuiksi. Ympäristötuen erityistuella on merkittävä vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Se on kattanut pääosin säättöjärjestelmästä aiheutuvat lisäkustannukset.

SALAOJAKASTELUN YRITYSTALOUDELLISET LASKELMAT

Salaojakastelussa lisäkustannuksia säättösalaajitukseen verrattuna aiheutuu lisäojituksista tai erityisputkista, pumppaamosta ja mahdollisesta varastoaltaasta. Keväällä

1999a). Näistä toimenpiteistä voidaan ohjelman mukaan tehdä 5-vuotisia sopimuksia, ja enimmäistuen määrä on 930 mk/ha/vuosi (MMM 1999b).

SÄÄTÖSALAOJITUKSEN YHTEISKUNNALLINEN KANNATTAVUUS

Aluetason kustannus-hyöty -laskelmassa säätösalaajituksen kannattavuus arvioitiin sen yhteiskunnalle tuottamien hyötyjen ja kustannusten perusteella. Yhteiskunnallisia hyötyjä muodostuu ravinnehuuhtoutumien vähenemisestä ja yhteiskunnan tuotantotoiminnan tehostumisesta. Tässä säätösalaajitusinvestoinnin tuottoihin lasketaan typpihuutouman pienenemisestä saatava hyöty, joka arvotettiin käyttäen jätevesipuhdistamon typenpoiston tehostamiskustannuksia. Tuottoja tuovat myös sadonlisäykset. Hyötyjen ja kustannuksien jakautumista eri osapuolille ei otettu huomioon.

Tutkimusalueena oli Oulun eteläpuolelta Liminganlahden valuma-alue, joka on maalajin ja tasaisuutensa suhteen edullista säätösalaajitukselle. Liminganlahteen laskevan valuma-alueen peltolakeudella pellon osuus on yli 50 % alueen kokonaisalasta. Peltoviljelyn on arvioitu aiheuttavan 74 % ihmisen aiheuttamasta kokonaisfosforikuormituksesta ja 76 % typpikuormituksesta (Viikinkoski ja Hynninen 1995).

Tarkemmin tutkittiin alueen Tyrnävän, Limingan ja Lumijoen kuntia, jotka muodostavat yhteensä noin 84 % valuma-alueen peltoalasta (noin 26 700 ha). Alueen peltopinta-ala on jakautunut keskimäärin siten, että viljalla on reilut puolet, nurmella vajaa kolmannes ja perunalla ja kesannolla alle kymmenesosa peltoalasta. Vuosina 1995-1998 alueella tehtiin yhteensä 138 säätösalaajitussopimusta kaikkiaan noin 3 000 hehtaarin alalle (taulukko 5 ja kuvio 2). Säätösalaajitukselle maksettiin alueella vuonna 1998 neljänä ensimmäisenä vuotena tehdyille sopimuksille yhteensä 3,52 miljoonaa markkaa. Vuonna 1998 tehdyt uudet sopimukset ovat maksussa vuoteen 2002 asti.

Aluetason kustannus-hyötylaskelmassa laskentamenetelmänä käytettiin nykyarvomenetelmää, jossa investoinnista eri vuosina aiheutuvat kustannukset ja tuotot tehdään vertailukelpoisiksi diskonttaamalla erät samaan ajankohtaan. Jos tuottojen nykyarvojen summa on suurempi kuin investoinnin ja vuotuisten kustannusten nykyarvojen summa, voidaan toimenpidettä pitää kannattavana. Aikajänteenä tässä oli 10-50 vuotta ja laskentakorkona 5 %.

Taulukko 5. Keskimääräinen säätösalaajitushankkeiden koko ja maksettu tuen määrä Tyrnävällä, Limingalla ja Lumijoella vuonna 1998.

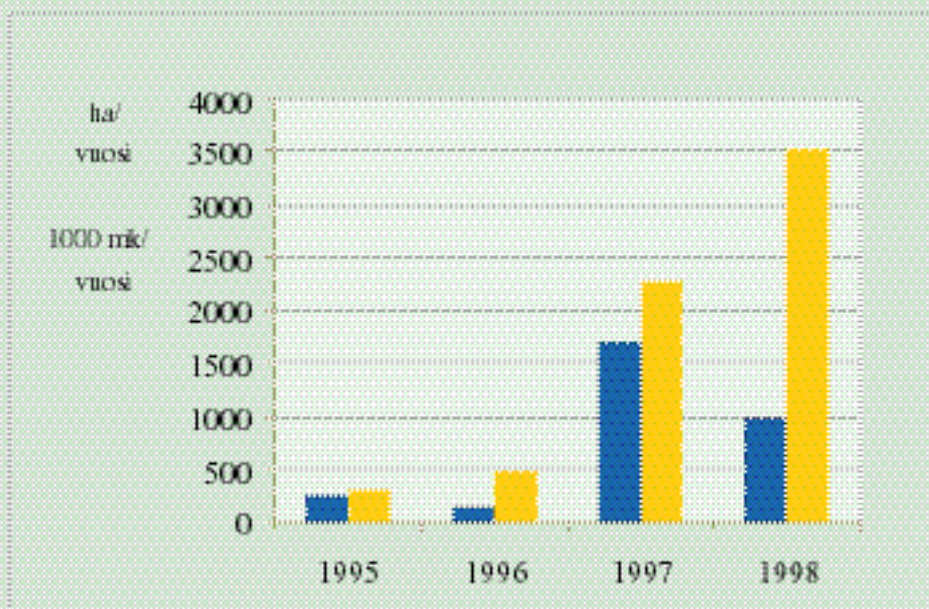
	Säätösalaajitusala ha/tila	Maksettu tuki mk/ha/v
Tyrnävä	28	1.180
Liminka	14	1.030
Lumijoki	14	1.390

Investoinnin kustannukset olivat säätösalaajituksen investointikustannukset ja säätyöstä vuosittain aiheutuvat kustannukset. Sopimuskauden kustannukset olivat samat kuin säätösalaajitukselle myönnetyn ympäristötuen erityistuen määrä. Sopimuskauden

	2-kerros (huuhtelu)	2-kerros (ympärysaine)	1-kerros (tihennetty)
Investointikustannukset:			
Ojitus	14.200	18.400	10.100
Pumppaamo + allas	6.800	6.800	6.800 mk/ha
Vuotuis kustannukset:			
Korko- ja poisto (15 v ja 5 %)	2.000	2.400	1.600
Käyttö- ja kunnossapito	1.500	1.300	900
Yhteensä	3.500	3.400	2.500 mk/ha/vuosi
Tuotto-odotukset:			
Kaura (0,70 mk/kg)	5.000	4.800	3.700 kg
(3 100 kg/ha)	+161	+155	+118 %
Peruna (1,00 mk/kg)	3.500	3.400	2.500 kg
(40 tn/ha)	+9	+9	+6 %

Salaojakastelua voidaan pitää vaihtoehtoisena kastelumenetelmänä sadetukselle, ja saada näin vastaavia sadon määrän ja laadun parannuksia. Ojituksen kautta tapahtuva kastelu edellyttää kuitenkin tiettyä maan läpäisykykyä eli maalajeja ja pellon tasaisuutta, jotta näillä menetelmillä voidaan saavuttaa riittävä kuivatus- ja kastelutehokkuus.

Salaojakastelulla on kenttäkokeissa ja maataloilla saatu lupaavia sadonlisäyksiä. Säätsalaojituksen tapaan salaojakastelu ja siihen liittyvä valumavesien varastointi ovat mukana maatalouden ympäristöohjelman erityistuissa vuosille 2000-2006 (MMM



Kuvio 2. Tyrnävän, Limingan ja Lumijoen alueen uudet säätsalaojitusalat (ha/vuosi) ja säätsalaojitukselle maksetut erityiset yhteensä (mk/vuosi).

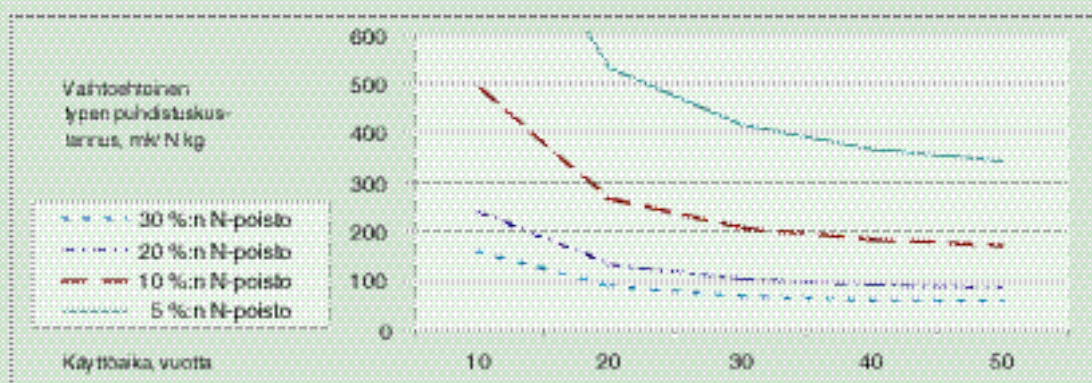
säätösalaajitus ei pysty tehokkaimmallakaan 30 %:n typpihuuhtoumien pienenemisellä kattamaan erityistuen määrää.

Vaihtoehdossa 2 säätösalaajituksen hyötyjä oletettiin muodostuvan sekä vesien-suojelu- että satohyödyistä. Kustannuksiin laskettiin sopimuskauden tuen lisäksi myös 5-vuotisajanjakson jälkeinen säätötyökustannus. Kun tuottoihin laskettiin 5 %:n sadonparannus ja typpihuuhtoumien pienenemisen arvoksi 24 mk/N kg, kustannusten kattamiseksi säätöajitukselta edellytetään edelleen korkeaa ravinnehävikkien vähentämiskykyä, pitkää käyttöikää ja lisäksi laskentakorkokannan tulee olla matala (kuvio 4).

Johtopäätöksiä muodostettaessa on muistettava, että kohdealueella olosuhteet ovat säätösalaajitukselle suotuisat ja alueella viljellään paljon perunaa. Myös viljoilla alueen keskisadot ovat olleet muuta C2-aluetta korkeammat. Toisaalta säätösalaajitusala on vielä suhteellisesti pieni. Säätösalaajitusala on noin 13 % kolmen tutkimuskunnan yhteispeltoalasta ja Liminganlahden valuma-alueen peltoalasta arviolta noin 11 %. Jos typenpoistoteho on laskelmassa käytetty yläraja eli 30 %, sillä pystyttäisiin estämään noin 15 500 typpikilon pääsy vesistöihin, joka vastaisi noin 3 % Liminganlahden peltoviljelyn aiheuttamasta typpikuormituksesta (vertailuluku on 1990-luvun alkupuolen tilanne). Jos taas typenpoistoteho on laskelman alaraja, 5 %, säätösalaajituksella talteen saama typpimäärä olisi vajaa 1 % peltoviljelyn kuormituksesta.

Laskelman viljelykierrossa typpihuuhtouma oli vuotta kohden keskimäärin 17 kiloa. Jos huuhtoumaa pystyttäisiin säätösalaajituksella pienentämään 5-30 %, niin se merkitsi 1-5 kiloa hehtaaria kohden vuodessa. Mikäli Tyrnävän, Limingan ja Lumijoen peltoalasta säätösalaajitettaisiin tämän hetkisen ojitusalun sijasta puolet kuntien peltoalasta, ojitusala kasvaisi 11 300 hehtaariin. Tässä tapauksessa 5-30 %:n typpihuuhtouman pieneneminen merkitsisi 2-13 % valuma-alueen peltoviljelyn typpikuormituksen vähenemistä. Koko peltoalan säätösalaajitus pienentäisi typpihuuhtoutumia 4-25 %.

Kun vesiensuojelun hyöty arvoitettiin hehtaaria kohden puhdistamokustannuksen (24 mk/ N kg) ja säätösalaajituksella saatavan typen huuhtouman pienenemisen (1-5 kg N/ha/v) perusteella, vuosittaiseksi tuotoksi muodostui 20-122 mk/ha/v.



Kuvio 3. Säätösalaajituksen yhteiskunnallinen kannattavuus; ympäristöhyödyt vs. erityisympäristötuki.

jälkeisenä tarkkailu- ja säätötyökustannuksena oli 540 mk/ha/v. Vuodesta 1998 lähtien säätösalaajitusalueena oli 3 039 hehtaaria.

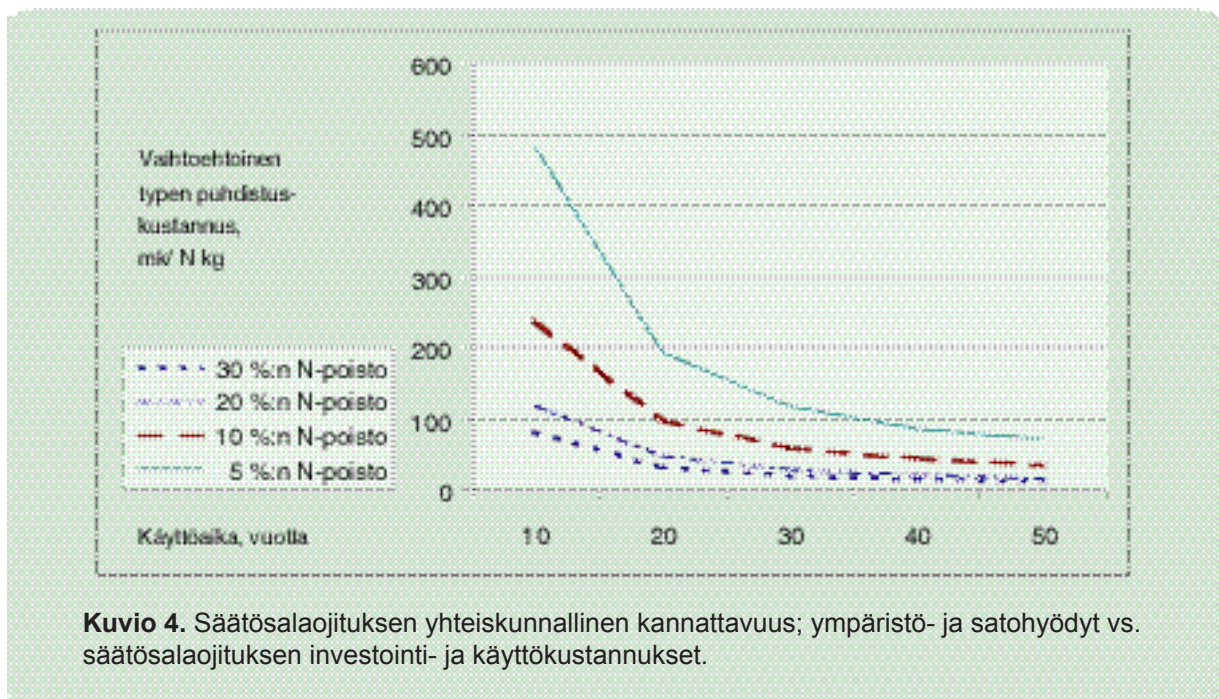
Laskelmassa oletettiin, että säätösalaajituksella on ravinnepäästöistä vaikutusta pelkästään typpihävikkeihin (taulukko 6). Säätösalaajituksen oletettiin vähentävän typpihuuhtoumaa 5-30 %. Typpihuuhtouman pienenemisen hyöty arvotettiin käyttäen vaihtoehtoiskustannuksena jätevesien puhdistamisen tehostamiskustannuksia 24 mk/N kg (ilman alv). Jätevesipuhdistamon typenpoistoa tehostettiin laskelmassa 40 %:sta 65 %:iin (Pelkonen 1999). Satohyödyt laskettiin siten, että satojen oletettiin kohoavan säädön ansiosta keskimäärin 5 %.

Säätösalaajituksen yhteiskunnallisen kannattavuuden tulokset on esitetty seuraavissa kuvioissa. Kuvioissa 3 ja 4 käyrien pisteet kuvaavat tilanteita, jolloin säätösalaajitusinvestointi on kannattavaa eli investoinnin tuottojen ja kustannusten nykyarvot ovat yhtä suuret. Vaihtoehdossa 1 laskelmaan otettiin hyötyihin mukaan pelkästään vesiensuojeluhyöty. Kustannuksena käytettiin säätösalaajitukselle maksettavaa erityistuen määrää (kuvio 3).

Taulukko 6. Säätösalaajituksen yhteiskunnallisen kannattavuuslaskelman oletukset.

	Ennen säätösalaajitusta	Säätösalaajituksen jälkeen
Typpihuuhtoumat perunalta	20 kg/ha/v	vähenee 5-30 %
Typpihuuhtoumat viljalta	15 kg/ha/v	vähenee 5-30 %
Viljelykierto	2/5 perunalla ja 3/5 viljalla	pysyy samana
Perunasadot (1 mk/kg)	30 tn/ha	kasvaa 5 %
Viljasadot (0,74 mk/kg)	3.000 kg/ha	kasvaa 5 %

Vaihtoehdossa 1 verrataan pelkän typen päästövähennyksen mahdollisuuksia kat-
taa erityistuen suuruiset kustannukset. Typen poistoteholla oli suuri merkitys siihen,
saadaanko kustannukset katettua. Jos typen päästövähennyksen arvo on 24 mk/N kg,



Kuvio 4. Säätösalaajituksen yhteiskunnallinen kannattavuus; ympäristö- ja satohyödyt vs. säätösalaajituksen investointi- ja käyttökustannukset.

tuksen tuki on kattanut merkittävän osan investointikustannuksista ja siten sillä on ollut merkittävä rooli säätösalaoitusmenetelmien käyttöönotossa ja kannattavuudessa. Tutkimuksessa käytetyllä Liminganlahden alueella alkuvuosina vain muutama viljelijä teki sopimuksen, mutta kolmantena vuonna sopimuksia tehtiin jo moninkertainen määrä.

Säätösalaoituksen tapaan, salaojakastelu on kannattavaa perunanviljelyssä, mutta viljanviljelyssä satotasojen nousulla ei pystytä kattamaan kustannuksia. Laskelmien lähtökohtana olivat Tyrnävän koekentän kustannukset. Kustannukset vaihtelevat kuitenkin paljon tapauskohtaisesti. Salaojakastelumenetelmän laajuudesta ei ollut käytettävissä vastaavaa aineistoa kuin säätösalaoituksesta. Uuden maatalouden ympäristöohjelman vaikutuksesta menetelmä yleistyneenä laajemmin käytäntöön.

Tässä työssä käytetyillä oletuksilla säätösalaoitus ei ollut yhteiskunnan näkökulmasta kannattava, mikäli tuotoiksi lasketaan pelkästään ympäristöhyödyt ja vertailukohtana on typenpoiston tehostaminen yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla. Jos mukaan laskettiin myös tuotannon tehostumisen myötä tulevat satohyödyt, tuotot kattoivat kustannukset. Säätösalaoituksella saatavat sadonlisäykset vaihtelevat luonnollisesti paljon alueittain ja vuosittain. Tässä työssä ei arvioitu säätösalaoituksen vaikutuksia fosforihuuhtoumiin. Fosforinpoisto jätevesistä on kallista. Mikäli säättöjitus vähentää fosforipäästöjä, yhteiskunnallinen kannattavuus paranisi huomattavasti. Jos jätevesien puhdistus on alueella jo tehokasta, säätösalaoituksen suhteellinen kannattavuus paranee, koska ennestään tehokkaan yhteiskuntapuhdistamon edelleen tehostaminen on kallista. Säätösalaoitus on pitkäaikainen investointi. Mitä pitempään se toimii, sitä kannattavampi investointi se on.

TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimushankkeen osiossa arvioitiin säätösalaoituksen ja salaojakastelun taloudellista merkitystä. Tilatasolla laskettiin menetelmien kannattavuutta ja valuma-alueen mittakaavassa arvioitiin yhteiskuntatason kustannuksia ja hyötyjä. Tutkimuksen mukaan säätösalaoitus ja salaojakastelu ovat kannattavampia erikoiskasvien viljelyssä, kuten perunalla. Säätösalaoitus on ollut mukana ympäristötukiohjelmassa vuodesta 1995. Tuella on ollut merkittävä vaikutus tilatason kannattavuuteen.

Tutkimuksen toisena tavoitteena oli arvioida ravinnehuuhtoutumien pienenemisen taloudellista merkitystä ja määritellä näin säätösalaoituksen yhteiskunnallinen kannattavuus. Arvio tehtiin yhdelle valuma-alueelle. Typpiuhutoutumien pienenemisen hyöty arvotettiin jätevesipuhdistamon kustannusten avulla. Laskelman mukaan säätösalaoitus on yhteiskunnalle kannattavaa, kun sekä sato- että ympäristöhyödyt lasketaan mukaan. Luonnollisesti säätösalaoituksen käyttöaika vaikuttaa paljon sekä tila- että aluetason kannattavuuteen.

KIRJALLISUUS

Vuonna 1998 maksettiin alueella säätösalaajitushehtaarille keskimäärin 1 160 markkaa erityistukea. Viiden vuoden sopimuskaudelta tuen nykyarvoksi muodostui 5 000 markkaa. Vesiensuojeluhyöty (5 % laskentakorolla) pystyisi 10 vuoden aikana kattamaan 3-19 % ja 20 vuoden toiminnan jälkeen 5-30 % tuen määrästä (taulukko 7).

Taulukko 7. Ympäristöhyödyt vs. tuki.

Laskenta-ajanjakso	Ympäristöhyötyjen nykyarvo, mk/ha	Ympäristöhyöty kattaa tuen määrästä, %
10 vuotta	160 - 950	3 - 19
15 vuotta	210 - 1.270	4 - 25
20 vuotta	250 - 1.530	5 - 30

Johtopäätöksiä muodostettaessa on myös muistettava, että alueen peltoalan salaajitusosuudet ovat keskimäärin olleet suhteellisen alhaisia. Vuonna 1998 salaajitetun peltoalan osuus oli Oulun maaseutukeskuksen alueella keskimäärin 32 % ja esimerkiksi Etelä-Pohjanmaan alueella 60 % peltoalasta (Maatilatilastollinen vuosikirja 1999). Tässä työssä oletuksena oli, että säätöjärjestelmät tehtiin jo salaajitettuun peltoalueeseen.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Säätösalaajitus saattaa olla kannattava erikoiskasvien tuottajille, esimerkiksi perunanviljelijöille ilman ympäristötukia. Perunanviljelyssä noudatetaan kuitenkin yleensä monipuolista viljelykiertoa. Kannattavan perunan on siten viljelykierrossa pystyttävä kattamaan säädöstä aiheutuvat lisäkustannukset myös muiden kasvien osalta. Säätösalaajitusta on tuettu maatalouden ympäristötukijärjestelmän erityistuilla. Säätösalaaji-

SUMMARY

COSTS AND BENEFITS OF CONTROLLED DRAINAGE AND SUBIRRIGATION

The aim of the this economic part of the research project was to estimate profitability of controlled drainage and subirrigation. The profitability analysis was done for the farm level and societal cost-benefit analysis was done on a watershed level. According to the analysis, controlled drainage and subirrigation systems are most profitable in cultivation of high-value crops, like potatoes. The controlled drainage system has been part of the Finnish Agri-environmental Supplementary Protection Scheme since the year 1995. The agri-environmental subsidy significantly affects the farm level profitability.

The second object of the study was to examine an economic significance of nutrient leaching affected by drainage and to determine societal agri-environmental benefits due to the more advanced drainage systems. The evaluation were done on a restricted area. Non-market benefits due to decreased nutrient leaching were calculated for nitrogen alone and monetarized using cost information from a local municipal waste water system. According to the evaluation, the controlled drainage system is profitable at the societal level when both environmental benefits and yield increases are accounted for. Naturally, the assumed operating time of the irrigation system strongly affects both the private and societal profitability.

- Arola, J. 1998.** Säättöojituksen kustannukset Tyrnävällä. Suomen Salaojakeskus, Oulu. Työpaperi.
- Maatilatilastollinen vuosikirja 1999.** SVT. Maa- ja metsätalous 1999:12. Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus. Helsinki. 262 s.
- Mattila, T., Paasonen-Kivekäs, M., Teittinen, M. & Kleemola, J. 1996.** Säättösala-
ojituksen ja padotuskastelun taloudellinen kannattavuus. Salaojituksen tutki-
musyhdistys ry:n tiedote n:o 2., s. 29-37.
- MMM 1997.** Kalkkisuodinojat ja säättösalaajitus. Maatalouden ympäristötuen eri-
tyistuet -esite. Helsinki. 8 s.
- MMM 1999a.** Ehdotus maatalouden ympäristöohjelmaksi 2000-2006. Työryhmä-
muistio MMM 1999:13. Helsinki. 66 s.
- MMM 1999b.** MMM tiedottaa. Agenda 2000 muuttuu vähitellen käytännöksi. Väli-
aikatietoja maatalouspolitiikan uudistuksesta -esite.
- MMM 1999c.** Ympäristötuen erityistukisopimukset 1998. Työpaperi.
- Pelkonen, M. 1999.** Jäteveden typenpoiston kustannukset. Työpaperi. Teknillinen
korkeakoulu. Vesihuoltotekniikka.
- Viikinkoski, K. & Hynninen, P. 1995.** Liminganlahden vesistöalueen vesiensuoje-
lusuunnitelma. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja A, nro 211. Vesi- ja
ympäristöhallitus, Oulun vesi- ja ympäristöpiiri. Helsinki. 128 s.

KUVAILEHTI

JULKAISIJA Salaojituksen tutkimusyhdistys ry		JULKAISUN PÄIVÄMÄÄRÄ 25.10.2000	
TEKIJÄ(T) Haataja Kaisu Paasonen Maija, Karvonen Tuomo, Vakkilainen Pertti Peltovuori Tommi Pesonen Liisa, Haapala Hannu, Lindell Kalle, Uusi-Rauva Jussi Uusitalo Risto		JULKAISUN NIMI Salaojituksen tutkimusyhdistyksen tiedote # 25 TOIMEKSIANTAJA Maa- ja metsätalousministeriö TOIMIELIMEN ASETTAMISPÄIVÄMÄÄRÄ Tutkimuksen valvojakunta 27.2.1997	
JULKAISUN NIMI Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote #25 Peltoviljelyn ravinnehuhtoutumien vähentäminen pellon vesitaloutta säättämällä –Loppuraportti			
JULKAISUN OSAT			
TIIVISTELMÄ Tutkimushankkeen päätavoitteena oli selvittää vesitalouden säätömenetelmien vaikutuksia pelloilta tulevaan ravinnekuormitukseen. Tutkimus koostui viidestä osatutkimuksesta. Säättösalojitus ja salaojakastelua koskeva tutkimus käsitteli menetelmien vaikutuksia typpihuhtoutumiin ja satotasoon sekä niiden teknistä toimivuutta peltomittakaavassa. Tämä osio perustui kenttämittauksiin ja mallintamiseen. Fosforin osalta selvitettiin pinta- ja salaojavalunnan kautta tulevaa kuormitusta savimaissa. Salaojaveden fosforipitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä tutkittiin laboratoriotutkimusten avulla. Tutkimushankkeessa kehitettiin myös menetelmä, jolla voidaan kartoittaa peltoalueen huuhtoutumisherkyys. Säädön vesiensuojelullista merkitystä arvioitiin vertaamalla säätösalaojituksen ja jätevesipuhdistamon typenpoiston kustannuksia ja hyötyjä tietyllä valuma-alueella. Lisäksi selvitettiin säätösalojituksen ja salaojakastelun taloudellista kannattavuutta tilatasolla. Mallintamistulosten perusteella säätösalojitus vähensi selvästi kesäaikaista typpikuormitusta ja siirsi huuhtoutumia loppusyksyyn. Savipelloilta purkautuvien salaojavesien rehevöittävän fosforin pitoisuudet olivat lähes yhtä suuria kuin pintavaluntavesien. Laboratoriomittausten perusteella liukoista fosforia pidättyi tehokkaasti pohjamaahan, kun veden viipymä oli yksi vuorokausi. Säättösalaojituksella on todennäköisesti mahdollista vähentää salaojien kautta tulevaa fosforikuormitusta sen lisäessä veden viipymää maaperässä. Säättösalojituksen tehokkuus ravinnekuormituksen vähentäjänä riippuu paljon pellon maalajista ja kaltevuudesta, olemassaolevasta ojituksesta, säätilasta ja säätötoimenpiteistä. Säättösalojitusta voitaisiin tehostaa padottamalla myös valtaojia. Salaojakastelu lisäsi merkittävästi satotasoa, mutta sen vaikutus ravinnehuhtoutumiin jäi epäselväksi. Makrohuokosilla on merkittävä rooli typen ja fosforin kulkeutumisessa salaojiin erityisesti savimaissa. Säättösalojituksen vesiensuojelullinen hyöty typpikuormituksen osalta jäi vähäiseksi verrattuna yhdyskuntien jätevesien käsittelyllä saatavaan hyötyyn. Fosforikuormitusta ei taloudellisuustarkastelussa otettu huomioon. Salaojakastelun edellyttämä sadonlisäys perunalla ja sokerijuurikkaalla oli realistinen (6-24 %), mutta viljakasveilla yli 100 %, jotta hanke olisi taloudellisesti kannattava. Huuhtoutumisherkyyskartta koostuu paikkatietokannasta, jossa on maatutkauksen, läpäisevyyskokeiden ja korkeusmallin antama informaatio. Karttaa voidaan käyttää hyväksi täsmäviljelyssä. The research project dealt with the impact of water table management on nutrient losses in crop production. The project consisted of five substudies: 1. Nitrogen leaching under controlled drainage and subirrigation and technical feasibility of the water table management systems in the field scale, 2. Transport of bioavailable phosphorus and suspended solids via surface runoff and subsurface drainage flow in clay fields, 3. Phosphorus sorption capacity of different soil horizons, 4. Production of a leaching sensitivity map for precision farming, and 5. Cost-benefit analysis of controlled drainage and subirrigation in the farm and watershed scale.			
AVAINASANAT (ASIASANAT) Salaojitus, säätösalojitus, salaojakastelu, fosforin huuhtoutuminen, typen huuhtoutuminen, fosforin sorptio, makrohuokokset, mallintaminen, huuhtoutumisherkyyskartta, kustannus-hyötyanalyysi			
SARJAN NIMI JA NUMERO Tiedote #25		ISSN-NUMERO	ISBN-NUMERO 952-5345-02-5
KOKONAISMAÄRÄ 500	KIELI Suomi	HINTA —	LUOTTAMUKSELLISUUS Julkinen
JAKAJA Salaojituksen tutkimusyhdistys ry Simonkatu 12 A 11 00100 Helsinki		KUSTANTAJA Salaojituksen tukisäätiö	