

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

Johanna Ahonen

SÄÄTÖOJITUKSEN JA POHJAVESIKASTELUN
KÄYTTÖ JA SOVELTUVUUS SUOMESSA

Diplomityö, joka on tehty opinnäytteeksi
Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja
maanmittaustekniikan osastolla profes-
sori Pertti Vakkilaisen valvonnassa
vuosina 1990-1991.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratoriossa professori Pertti Vakkilaisen valvonnassa. Ohjaajana toimi tekn.tri. Tuomo Karvonen Helsingin Yliopiston kasvinviljelytieteen laitoksesta. Työn alullepanija oli toimitusjohtaja Jussi Saavalainen Salaojakeskus ry:stä. Rahoittajana tutkimuksessa oli Salaojituksen tukisäätiö. Pohjavesikastelua koskevissa käytännön kysymyksissä olen saanut arvokkaita neuvoja maanviljelijä agronomi Markku Holmalta. Hänen järjestelynsä mahdollistivat myös kenttäkokeiden suorituksen. Esitän kiitokseni hänelle sekä kaikille vesitalouden laboratoriossa työskennelleille työn valmistumista edistävästä neuvoista ja avusta. Erityisesti kiitän vanhempiani ja ystäviäni käytännön avusta, jota olen saanut työni aikana.

Espoossa 22.3.1991

Johanna Ahonen

Tekijä: Johanna Ahonen

Diplomityö: Pohjavesikastelun ja säätöojituksen käyttö
ja soveltuvuus Suomessa

Päivämäärä: 22.3.1991

Sivumäärä: 63

Professuuri: Vesitalous

Koodi: Yhd.-25

Valvoja: Professori Pertti Vakkilainen

Ohjaaja: Tekn.tri Tuomo Karvonen

Pohjavesikastelua ja säätöojitusta koskevalla tutkimuksella selvitettiin, onko niiden käyttö Suomen olosuhteissa mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa. Niiden käytön edullisuutta tarkasteltiin myös ympäristön kannalta.

Koska Suomessa aikaisemmin tehty, tätä asiaa koskevat tutkimukset ovat hyvin vanhoja, käytettiin vertailumateriaalina Pohjois-Karoliinassa Yhdysvalloissa tehtyjen kokeiden tuloksia. Niiden perusteella on kirjallisuuskatsauksessa esitetty lyhyesti, mitkä ovat pohjavesikastelun ja säätöojituksen vaikutukset satoon ja ravinnehuuhtoumiin. Kokeellisessa osassa on selvitetty vastaavat asiat Holman pellolla Pohjois-Pohjanmaalla tehtyjen kenttäkokeiden ja vesitalouden laboratoriossa tehtyjen kokeellisten ja teoreettisten määritysten perusteella. Kenttätutkimukset suoritettiin perunaviljelyksellä, jossa pohjavesikastelu on käytössä avo-ojitetulla pellolla. Tutkimuksessa selvitettiin myös, olisiko kyseisellä pellolla salaojitukseen siirtyminen taloudellisesti kannattavaa.

Pohjavesikastelulla oli huomattava vaikutus sadon määrään ja varsinkin laatuun. Käytetyn satomallin mukaan saatiin sadonlisäystä noin 10% pohjavesikastelun avulla. Perunapellolla todellisuudessa saatu lisäys oli saman suuruinen. Sadon laatu parani niin, että rupisten perunoiden määrä väheni yli 50% kastelemattomaan alueeseen verrattuna. Kyseisen pellon salaojittaminen lisäisi satoa edelleen noin 10%:lla. Suurin lisäys saataisiin 10metrin ojavälillä. Salaojitus olisi pitkällä aikavälillä kannattavaa. Edullisin ojaväli on hyöty-kustannus-tarkastelun kannalta 14 metriä.

Typpimallilla saatujen tulosten mukaan kokonaistyyppihuuhtoumat pohjavesikastellulta pellolta vähenevät 15-35%. Vähennys johtuu kasvaneesta denitrifikaatitasosta ja padotuksesta, minkä avulla virtaamaa pellolta pystytään vähentämään. Huuhtoumat kasvavat ojituksen tiheydessä. Määrä on myös riippuvainen pohjavedenpinnan korkeudesta. Mitä korkeammalla pohjavedenpinta luonnostaan on, sitä suurempi on padotuksella saatu huuhtoumien väheneminen. Säätöojituksella saavutettava huuhtoumien väheneminen reagoi pohjavedenpinnan korkeuteen päinvastaisesti.

Author: Johanna Ahonen.

Thesis: Application of Controlled Drainage and
Subirrigation in Finland

Date: 22.3.1991

Hydrology and Water

Number of pages: 63

Professorship: Resources Engineering

Code: Yhd-25

Supervisor: Prof. Pertti Vakkilainen

Instructor: Dr. Tech. Tuomo Karvonen

This research about the subirrigation and controlled drainage is done to find out, if these water management systems are practically and economically useful in Finland. Their effect was investigated also by the environmental point of view.

Researches of these subjects, made earlier in Finland, are quite old. That is why the results were compared with the experiences from North-Carolina, the United States. In the literature survey, they are also used to give a short introduction to the influences that the controlled drainage and the subirrigation has on the transport of nutrients and the yields. In the experimental part, the same things are examined through the field experiments made in Holma's field, northern East Bothnia, Finland and the practical and theoretical experiments made in the Laboratory of Hydrology and Water Resources Management in Helsinki, Finland. Field experiments are made in a potato field with open ditches, which is managed by subirrigation. In this work, it was also examined, if it was economically profitable to install subsurface drainage into the field.

Subirrigation had a remarkable influence on the potato yield's quantity and quality. After the yield model used in field evaluations, the improvement in the quantity was approximately 10%. In the potato field, in reality, that was of the same size. Installation of the subsurface tiles would increase the yield with another 10%. The improvement in the quality of the yield was seen in the reduction of the number of potatoes having scales. With a long time period, the subsurface irrigation would be economically profitable. The best tile spacing, regarding to the benefit-cost-comparisons, is 14 meters.

After the model used in the work, controlled drainage reduced the transport of total nitrogen by 15-35%. This is due to increase in denitrification and the control operations which reduce total outflow from the field. The transport of nitrogen increases when the drain spacing becomes larger. The amount of nitrogen losses also depends on the natural water table depth. The higher the water table is, the greater is the reduction achieved by the control practices in subirrigation. If only controlled drainage is in use, the water table depth effects conversely.

Kuva 1 Kaavakuva Pyyhtiänpellon alueesta ja tutkimuspisteiden sijainti.	19
Kuva 2 Vakiopainekorkeusmenetelmällä määritetyt vedenjohtavuusarvot tutkimuspisteessä K1 kesä-, heinä- ja syyskuussa.	22
Kuva 3 Vakiopainekorkeusmenetelmällä määritetyt vedenjohtavuusarvot tutkimuspisteessä K2 kesä-, heinä- ja syyskuussa.	23
Kuva 4 Vakiopainekorkeusmenetelmällä määritetyt vedenjohtavuusarvot tutkimuspisteessä VRT kesä-, heinä- ja syyskuussa.	23
Kuva 5 Valokuva eri alueiden perunoiden kehitysasteesta 18.7.1990.	26
Kuva 6 Profiilin K1 johtavuusarvojen keskiarvo ja 90%:n vaihteluvälit.	35
Kuva 7 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona mitoitusvaluman arvojen vaihdellessa. Sadanta 50mm.	37
Kuva 8 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona mitoitusvaluman arvojen vaihdellessa. Sadanta 82mm.	38
Kuva 9 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona mitoitusvaluman ja ojavälin vaihdellessa. Sade-ennuste on saatu vuorokautta ennen sateen alkua.	38
Kuva 10 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona eri ojaväleillä. Ei sade-ennustetta.	39
Kuva 11 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona eri ojasyvyyksillä. Ei sade-ennustetta.	39
Kuva 12 Pohjavedenpinnan käyttäytyminen vedennostokokeen aikana. Kuvassa on vertailtu tilannetta, jossa kokeen aikana sataa 44mm tilanteeseen, jossa sadetta ei tule.	42
Kuva 13 Pohjavedenpinnan käyttäytyminen, kun alkukorkeus on 100cm.	43
Kuvat 14 Katetuoton parannus siirryttäessä avo-ojitetusta pohjavesikastelusta salaojitettuun pohjavesikasteluun.	48
Kuvat 15 Katetuoton parannus siirryttäessä perinteisestä salaojituksesta pohjavesikasteluun.	49
Kuvat 16 Katetuoton parannus siirryttäessä perinteisesti kuivatetulla pellolla salaojitukseen ja pohjavesikasteluun.	50

Taulukko 1 Hydraulisen johtavuuden raja-arvot maalajeittain (Kauranne 1979).	4
Taulukko 2 Laboratoriossa määritetyt kyllästyskosteudet tutkimus- pisteiden K1 ja VRT maanäytteistä.	24
Taulukko 3 Pohjavedepinnan korkeudet putkissa vedenpinnan nostokokeen aikana.	28
Taulukko 4 Sademäärät (mm) eri toistumisajoilla ja jaksonpituuksilla (Kuusisto 1986).	35
Taulukko 5 Simuloidut ja mitatut pohjavedenpinnan arvot saran puolessa välissä avo-ojitetulla pellolla.	42
Taulukko 6 Eri ojitustavoilla saavutetut sadot suhteellisina lukuina.	47
Taulukko 7 Typpihäviöiden suhteelliset määrät a) pohjavesikastellulla, b) säädellyllä salaojitetulla pellolla.	51
Taulukko 8 Eri maalajien osuus Suomen peltojen pohjamaista (Kähäri ym.). ...	52

Sisällysluettelo	Sivu
ALKUSANAT	i
TIIVISTELMÄ	ii
ABSTRACT	iii
KUVALUETTELO	iv
TAULUKKOLUETTELO	v
1. JOHDANTO	1
2. KIRJALLISUUSTUTKIMUS	
2.1 Yleistä	3
2.2 Säättöajituksen käyttöedellytykset	
2.2.1 Hydraulinen johtavuus	4
2.2.2 Muut tekijät	5
2.3 Säättöajituksen suunnittelu ja käyttö	
2.3.1 Suunnittelu	5
2.3.2 Toiminta ennen kasvukautta	7
2.3.3 Toiminta kasvukaudella	7
2.3.4 Käyttö kastelutarpeen yhteydessä	8
2.3.5 Säätelyn vaikutus satoon	9
2.3.6 Säätelyn vaikutus ravinnehuuhtoumiin	10
2.4 Tutkimus sadantaennusteiden käytöstä säättöajituksessa	11
2.4.1 Menetelmä	12
2.4.2 Tulokset	13
2.5 Typen liikkeistä maassa	14
2.5.1 Typen muodot	14
2.5.2 Nitrifikaatio	15
2.5.3 Denitrifikaatio	16
2.5.4 Mineralisaatio ja immobilisaatio	17
2.5.5 Toimenpiteitä haittojen ehkäisemiseksi	17
3. AINEISTO JA LABORATORIOMENETELMÄT	
3.1 Kenttäkokeet ja aineiston hankinta	19

3.2 Laboratoriokokeet	20
3.2.1 Maalajimääritys	21
3.2.2 Hydraulisen johtavuuden määrittäminen	21
3.2.3 Kyllästyskosteus	24
3.2.4 Vedenpidätyskäyrä	25
3.2.5 Kasvustomääritykset	25
3.2.6 Vedenpinnan nostokoe	28
 4. MALLIEN KÄYTTÖ	
4.1 DRAINMOD'in toiminta	
4.1.1 Infiltraation laskeminen	29
4.1.2 Haihdunnan määrittäminen	31
4.1.3 Kuivatustilavuus	32
4.1.4 Salaojista purkautuva vesimäärä.	33
4.2 Sovellukset	
4.2.1 Kuivatustehokkuus	34
4.2.2 Suoritus	36
4.2.3 Tulokset	36
4.2.4 Hydraulisen johtavuuden merkityksen tarkastelu	40
4.2.5 Tulokset	41
4.2.6 Pohjavedenpinnan liikkeiden tarkastelu	41
4.2.7 Tulokset	41
4.3 Sato- ja typpimalli	43
4.4 Sovellukset	
4.4.1 Parametrit	44
4.4.2 Säättöojituksen ja pohjavesikastelun kustannukset	45
4.4.3 Suoritus	46
4.4.4 Sato-osan tulokset	46
4.4.5 Typpiosan tulokset	51
4.5 Pohjavesikastelun käyttömahdollisuudet Suomessa	52
 5. TULOSTEN TARKASTELU	54
 6. YHTEENVETO	58
 LÄHDELUETTELO	59
 LIITTEET	

1. JOHDANTO

Säätöojitustutkimus aloitettiin Pohjois-Karoliinan yliopistossa Yhdysvalloissa 1970-luvun lopussa. Syynä tutkimukseen oli, ettei kasvukauden aikainen sadanta riittänyt maksimituotokseen. Sen vuoksi etsittiin keinoja ojituksen käyttämiseksi myös kasteluun. Pellolta ulos virtaavan veden määrää säädeltiin patoamalla ja lisävettä johdettiin pellolle salaojien kautta (Skaggs, 1990).

Tutkimusten aikana havaittiin pellolta huuhtoutuvien ravinteiden määrän vähenevän virtaaman säätelyn myötä huomattavasti. Tämän jälkeen tutkimus painottui selvittämään, miten säätely olisi järjestettävä, että maanviljelyn aiheuttamat ympäristöhaitat saataisiin pienenevän.

Suomessa on säätöojitusta tutkittu jo 1930-luvulla (Kaitera, 1942). Vihtin Maasojalle järjestettiin koekenttä, jossa vuosina 1939-41 tutkittiin padotuskastelulla saatavaa sadonparannusta suhteessa pohjavedenpinnan korkeuteen (Wäre, 1947).

1980-luvun alussa maanviljelijä agronomi Markku Holma (1990) päätyi Pohjois-Pohjanmaan tilallaan padotuskasteluun. Tähän johti havainto, ettei sadanta riitä perunan viljelyyn hietamaalla. Neljän vuoden kokemus avo-ojitetulla pellolla sai hänet vakuuttuneeksi padotuskastelun hyödyistä. Tehokkuuden lisäämiseksi hän päätti salaojittaa pellon.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, millainen salaojitus kyseisellä perunaviljelyksellä olisi pohjavesikastelun kannalta tehokas ja taloudellinen. Toisena päämääränä oli tutkia teoreettisesti, kuinka paljon ravinnehuuhtoumia voidaan vähentää säätöojitusta käyttämällä.

Työ on kaksiosainen. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan kirjallisuuden perusteella tutkimuksia, joita Yhdysvalloissa on tehty säätöojituksesta ja pohjavesikastelusta. Siinä on pyritty selvittämään menetelmän avulla saatava parannus kasvuoloissa ja sen vaikutus satoon sekä ravinnehuuhtoumiin. Siinä on myös esitetty kirjallisuudesta löytyviä ohjeita, kuinka kuivatusta ja kastelua tulisi kasvukaudella hoitaa parhaan tuloksen saamiseksi.

Toisessa osassa tutkitaan menetelmän soveltuvuutta Suomen oloihin. Siinä tarkastellaan padotuskastelun vaikutusta satoon Holman tilalla saatujen kokemusten perusteella ja tietokonemallien avulla. Lisäksi tarkastellaan vaikutusta typpihuuhtoumiin typpimallin avulla. Kokeellinen tutkimus suoritettiin Holman perunaviljelyksellä ja vesitalouden laboratoriossa kesällä 1990. Malleilla suoritettut ajot on tehty vesitalouden laboratoriossa syksyllä 1990.

2. KIRJALLISUUSTUTKIMUS

2.1 Yleistä

Salaojitusta käytetään huonosti kuivuvilla mailla vähentämään veden haittavaikutuksia kasveille. Salaojitus ei aina yksin riitä ylläpitämään kasveille edullisia kosteusoloja peltomaassa, vaan voi aiheuttaa veden puutetta kuivina jaksoina (Evans et al., 1985). Usein luonnollisten sateiden lisäksi tarvitaan myös kastelua vähentämään kuivuusstressiä.

Salaojitus vähentää pellon pintavaluntaa ja lisää sen pohjavaluntaa. Pintavalunnan vähenemisen seurauksena eroosioherkkyys ja sedimenttien kulkeutuminen vähenee. Samoin vähenevät fosforihuuhtoumat ympäröiviin vesiin, sillä fosfori kulkeutuu vesistöön enimmäkseen maahiukkasiin sitoutuneena. Typpihuuhtoutumat kasvavat pohjavesivalunnan lisääntyessä, sillä typpi huuhtoutuu veteen liuenneena nitraattityppinä (Skaggs et al., 1981).

Yhdysvalloissa saatujen tulosten mukaan liikakosteuden ja kuivuuden kasveille aiheuttamaa stressiä ja ravinnehuuhtoutumia voidaan vähentää maan vesipitoisuutta säätelemällä. Tämä voidaan suorittaa tehokkaimmin seuraavilla kolmella tavalla:

- (1) Kosteina kausina ojitus toimii maan **kuivattajana** perinteisellä tavalla. Kuivatusvedet laskevat salaojista avo-ojiin, mistä ne saavat vapaasti kuivua laskuojia myöten.
- (2) Kasvukauden aikana voidaan kuivatusta säädellä padon avulla. Salaojista purkautuvien kuivatusvesien poistuminen avo-ojista estetään laskuojan suulle rakennetun padon avulla. Tätä kutsutaan **säätöojitukseksi**.
- (3) Kuivina aikoina kasvukaudella voidaan ojitusta käyttää **pohjavesi-kasteluun**. Tällöin salaojaputkistoon pumpataan vettä ulkopuolisesta lähteestä kokoojaojien kautta ja nostetaan pohjavedenpinnan tasoa pellolla.

Säätöojitusta voidaan käyttää myös avo-ojitetulla pellolla. Tällöin veden liikkuminen sekä kuivatus- että kastelusuunnassa on hitaampaa kuin salaojitetulla pellolla. Samoin systeemi on paljon jäykempi reagoimaan vesitilanteen muutoksiin.

Säätöojituksen käyttömahdollisuutta on tutkittu aikaisemmin Pohjois-Karoliinan yliopistossa (Skaggs et Evans, 1980), jossa on myös kehitetty simulointimalli DRAINMOD (Skaggs, 1980). Sen avulla voidaan helpottaa mm. tarvittavan salaojavälin määrittämistä. DRAINMOD ei kuitenkaan ole kaikilta osin suoraan käyttökelpoinen Suomen olosuhteissa, sillä se on kalibroitu lähinnä maissipellolle sopivaksi. Sen muuntaminen Suomen oloja vastaavaksi vaatisi suurehkot kalibrointi- ja muutostyöt (Karvonen, 1986).

2.2 Säätöojituksen käyttöedellytykset

2.2.1 Hydraulinen johtavuus

Tärkein säätöojituksen soveltuvuuteen vaikuttava tekijä on maan hydraulinen johtavuus. Evans & Skaggs'in (1980) mukaan hydraulisen johtavuuden arvon, K -arvon, on oltava vähintään 0.5m/vrk, jotta salaojituksella saataisiin riittävä kuivatus- ja kastelutehokkuus.

Taulukko 1 Hydraulisen johtavuuden raja-arvot maalajeittain (Kauranne 1979, Päivänen 1973).

Maalaji	K -arvo m/s
Sora	$0.04 \cdot 10^{-3}$
Hiekka	$4 \cdot 10^{-3} - 1.5 \cdot 10^{-5}$
Hieta	$5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-7}$
Hiesu	$10^{-6} - 10^{-9}$
Savi	$5 \cdot 10^{-9} - 10^{-11}$
Turve	$6 \cdot 10^{-12} - 1.1 \cdot 10^{-4}$

Hydraulinen johtavuus vaihtelee runsaasti rakeisuuden mukaan. Maalajeille on määritetty raja-arvot, joiden sisällä K -arvo todennäköisimmin on. Kauranteen (1979) mukaan eri maalajien K -arvot vaihtelevat taulukon 1 mukaisesti. Esitettyjen K -arvojen perusteella säätöojitukseen näyttäisivät soveltuvan hiekka, hieta ja karkeimmat hiesumaat. Sen sijaan aitosaven hydraulinen johtavuus on siihen liian pieni. Koska

hydraulisen johtavuuden arvot ovat puhtaille lajitteille määritettyjä, voivat eräät savimaat kuitenkin soveltua säätöojitukseen. Turpeen johtavuusarvot voivat vaihdella jopa 40% samassakin kerroksessa, joten turvemaan soveltuvuutta säätöojitukseen on vaikea arvioida.

2.2.2 Muut tekijät

Säätöojituksen toimivuuden kannalta muita tärkeitä pellon ominaisuuksia ovat pellon tasaisuus ja luonnollinen pohjavedenpinnan korkeus. Säätöojitukseen käytettävien peltojen tulisi olla melko tasaisia, kaltevuudeltaan korkeintaan 1% (Evans & Skaggs, 1980). Suomessa pellot sijaitsevat harvoin jyrkissä rinteissä, joten kaltevuus tuskin rajoittaa säätöojituksen käyttöä.

Ojitettavalla pellolla pohjavedenpinnan tulisi luonnostaan olla korkealla tai pellon pitäisi sijaita alueella, jossa vettä huonosti läpäisevä maakerros (kallio tms.) on lähellä. Tämän kerroksen olisi sijaittava 3-8 m:n syvyydellä maanpinnasta (Evans & Skaggs, 1980).

Tärkeä edellytys pohjavesikastelun järjestämiselle on myös veden hankintamahdollisuus. Paras vaihtoehto on pellon lähellä sijaitseva joki tai järvi, josta vettä voidaan pumpata pellolle. Jos alueen pohjavesivarat ovat riittävät, voidaan myös pohjavettä käyttää.

2.3 Säätöojituksen suunnittelu ja käyttö

2.3.1 Suunnittelu

Pohjavesikastelun ja pohjavedenpinnan säätelyn yhdistäminen kuivatukseen on huomioitava jo ojitusta suunniteltaessa. Keväällä tai kasvukauden aikana sateista varastoitu vesi vähentää ja siirtää kastelutarvetta. Samalla säästetään veden pumppauskustannuksissa. Vesi pidätetään maaprofiilissa padotuksen avulla, eikä ulosvirtausta anneta tapahtua vähäsateisina aikoina lainkaan.

Kun pohjavedenpintaa pidetään kasvukaudella normaalia tasoa korkeammalla, on sateiden sattuessa pystyttävä nopeaan vedenpinnan laskuun, jotteivät juuret joudu kärsimään liiasta kosteudesta. Parhaiten se onnistuu tiheän salaojituksen avulla.

Sateen voimakkuuden mukaan kuivatus voidaan suorittaa pysäyttämällä pumppaus sateen ajaksi. Tehokkaampaa kuivatusta tarvittaessa voidaan myös padotuskorkeutta alentaa (Fouss et al.,1986).

Ojaväli ja -syvyys määräytyvät paikallisten tekijöiden mukaan (topografia, maalaji ym.). Niiden puitteissa suositeltava ojasyvyys on 1.0-1.5m (Evans et al.,1989). Sopivan ojavälin löytämiseksi voidaan padotuskastelun ja säätöojituksen suunnitteluun käyttää jo mainittua simulointimallia DRAINMOD (Evans et al., 1989). Sen käyttö edellyttää mm. tarkasteltavan pellon vedenpidätyskäyrän määrittämistä. Sitä tai muita alkuarvoja ei kuitenkaan aina ole saatavissa. Tällöin ojavälin ja syvyyden arvioimiseen on mahdollista käyttää yksinkertaisempia menetelmiä.

Skaggs ja Tabrizi(1986) ovat esittäneet ojavälin laskemiseksi seuraavan kaavan (Evans et al.,1989)(kaava 1):

$$S_d = 0.63 * [4K_e m (2d_e + m) 0.5 / q_{mit}], \quad (1)$$

missä:

S_d = ojaväli (m),

K_e = ekvivalentti hydraulinen johtavuus (m/d),

d_e = ekvivalentti etäisyys salaojasta läpäisemättömään kerrokseen (m),

m = pohjavedenpinnan korkeus ojien puolivälissä (m),

q_{mit} = mitoitusvalunta (m/d).

Ekvivalentti hydraulinen johtavuus (K_e) tarkoittaa kullekin alueelle määritettyjen K -arvojen aritmeettista keskiarvoa. Kaava, jolla ekvivalentti etäisyys läpäisemättömään kerrokseen lasketaan, on esitetty luvussa 4.1.4. Kaavan (1) perusteella ojaväliin vaikuttaa merkittävästi haluttu veden liikkumisnopeus eli mitoitusvalunta. Skaggs ja Tabrizi ovat esittäneet sille estimaatteja. Ne on kuitenkin laskettu maissipellolle Pohjois-Karoliinan olosuhteissa, eikä niiden käyttö ole mahdollista muualla. Mitoitusvalunta onkin estimoitava kunkin alueen oloissa erikseen. Kerroin 0.63 selittyy sillä, että kastelua varten tehtävässä ojituksessa on ojavälin oltava tiheämpi kuin pelkän kuivatuksen suunnittelussa.

2.3.2 Toiminta ennen kasvukautta

Kokonaisvirtaaman ja siten myös ravinnehuuhtoumien pienentäminen minimiin vaatii, että säätelyä ylläpidetään läpi vuoden (Skaggs, 1990). Suomen olosuhteissa tämä tarkoittaa sitä, että virtaamaa säädelään lumen sulamisen alusta seuraavan talven alkuun. Myös lämpiminä talvina voi säätely ajoittain olla välttämätöntä. Jos pellolla ei viljellä syysviljaa, ei talviaikaisesta märkyydestä ole haittaa. Niinpä lämpiminä talvina padotustaso voidaan nostaa lähelle maan pintaa ja näin vähentää virtaamaa.

Lumen ja roudan sulamisen aikana keväällä ravinnehuuhtoumat pellolta ovat suuret. Syysviljalle annetaan alkulannoitus jo syksyllä, jotta orastuminen syksyllä ja kasvu keväällä nopeutuisivat. Ennen maan jäätymistä kasvi ei käytä hyväkseen kaikkia ravinteita, vaan osa jää maahan. Ne, sekä maan luonnolliset ravinnevarat ja edellisen kasvukauden jäänteet, ovat vaarassa huuhtoutua sulamisvesien mukana pellolta.

Keväällä valunta on suurimmillaan. Olosuhteissa, joissa maa ei ole talvisaikaan lumen peittämä, voidaan kevään tulvahuippuja pienentää pidättämällä vettä ojissa ja maaprofiilissa (Evans et al., 1989). Tämä tapahtuu siten, että padot suljetaan sateen ajaksi. Kun kaikki vesi on imeytynyt maahan, padot avataan asteittain alimpaan tasoonsa, jossa ne pidetään seuraavaan sateeseen asti. Näin maa kuivuu tasaisesti ja tilaa seuraavan sateen varastoimiseksi muodostuu riittävästi.

2.3.3 Toiminta kasvukaudella

Kevättöiden päätyttyä padot suljetaan tai padotuskorkeutta lisätään kevätsateiden varastoimiseksi alkukesän kuivia kausia varten. Keväällä, jolloin kasvien juuret ovat vielä pieniä ja kasvit kärsivät helposti liiasta kosteudesta, on pohjavedenpinta pidettävä syvällä. Jos se on liian korkealla, märkyys estää juuriston kehittymisen täysimittaiseksi. Padotuskorkeutta vähitellen lisäämällä saadaan pohjavedenpinta nousemaan halutulle tasolle. Jottei juuristo vaurioituisi, on korkeutta lisättävä hitaasti, noin 15 cm viikossa (Evans et al., 1985). Sateisena kesänä saatetaan patoja joutua avaamaan tai padotuskorkeutta laskemaan riittävän ilmatilan takaamiseksi. Jos kesä ei ole kovin sateinen, voidaan padotuskorkeus pitää vakiona koko kesän ajan.

Juuriston kehittyessä pohjaveden korkeutta voidaan säädellä siten, että se on aina sopivalla etäisyydellä juuristovyöhykkeestä. Vedenpinta asetetaan padotuskorkeutta muuttamalla tasolle, jolta vesi kapillaari-ilmiön avulla nousee juuristovyöhykkeeseen.

Syvyys vaihtelee kasveittain ja maalajeittain. Esimerkiksi juuristoltaan täysin kehittyneellä perunalla sopiva pohjavedenpinnan syvyys on noin 50-60cm. Maalajeittain vaihtelu riippuu hiukkaskoosta: karkeammilla maalajeilla, kuten hiekalla, vedenpinnan on oltava korkeammalla kuin hienojakoisilla maalajeilla (Skaggs et al., 1985).

2.3.4 Käyttö kastelutarpeen yhteydessä

Kuivina kesinä sadevesi ei välttämättä riitä ylläpitämään pohjavedenpinnan tasoa halutulla korkeudella. Tällöin vettä joudutaan pumppaamaan järjestelmään ulkopuolisesta vesilähteestä, kuten esimerkiksi järvestä, joesta tai pohjavesikaivosta. Vesi johdetaan kokoojaojia pitkin salaojiin, joista se kapillaarisen nousun ansiosta pääsee juuriston käytettäväksi.

Kasteluvaiheessa on tärkeää, ettei maa ennen kastelun aloittamista ole päässyt liiaksi kuivumaan. Kyllästyneessä maassa vesi yleensä liikkuu ojista saran puoliväliin 2-3 päivässä. Sama matka voi viedä 2-3 viikkoa, jos maa pääsee liiaksi kuivumaan (Evans et al., 1985). Sinä aikana kasvit saattavat jo saada pysyviä kuivuusvahinkoja (perunalla rupisuutta, tyvimätää tms.). Tämän ehkäisemiseksi pohjavedenpinnan korkeutta on kuivina kesinä seurattava jatkuvasti tarkkailukaivojen avulla. Pohjavedenpinnan laskiessa alle halutun tason pumppu käynnistetään esimerkiksi automaattisen kelluntakytkimen avulla ja vedenpinta nostetaan takaisin halutulle tasolle.

Pohjavedenpinnan ollessa korkealla on maassa vain vähän tyhjää varastotilaa sadevedelle. Sateisiin onkin varauduttava mahdollisuuksien mukaan etukäteen, jotteivät juuret joutuisi pitkiksi ajoiksi vedellä kyllästyneeseen tilaan. Jos sade-ennuste saadaan jo useita päiviä etukäteen, voidaan maan kyllästyminen ehkäistä lopettamalla veden lisääminen järjestelmään. Se on tehtävä niin aikaisin, että kasvit ja haihdunta ehtivät kuluttaa tarvittavan vesimäärän varastotilan kasvattamiseksi. Jos sade alkaa yllättäen, on padot avattava, ettei vesi nouse maan pinnalle.

Syyskesällä pohjavesikastelua voidaan käyttää hallan torjuntaan. Tällä on merkitystä varsinkin Pohjois-Suomessa, missä elokuun alun halla aiheuttaa usein satotappioita. Hallan uhatessa pumpataan pellolle järvi- tai jokivettä usean päivän ajan. Loppukesällä vesi on huomattavasti yöilmaa lämpimämpää, elokuussa usein lähes 15 asteista. Maan kosteuden lisääntyminen nostaa lämmönjohtokykyä. Sen seurauksena maan

lämpöväreily mikroilmastossa kasvaa ja lämpötila kasvien korkeudella nousee. Holman mittauksien mukaan nousu on noin 2°C. Pellolle levitettävä hallaharso estää ilmavirtauksen maasta. Vesihöyry tiivistyy harson alapinnalle ja muodostaa kasveja suojaavan vaipan. Kastelun ja harson yhteisvaikutuksesta lämpötila kasvien kasvukorkeudella voi nousta jopa 6°C (Holma,1990).

2.3.5 Säätelyn vaikutus satoon

Kuivatuksen säätelyllä ja pohjavesikastelulla voidaan vaikuttaa kasviin positiivisesti kolmella tavalla. Kuivattamalla voidaan ehkäistä juuristokerroksen liiallista märkyyttä. Pohjavedenpinnan säätelyllä kosteus maassa pysyy kasville optimaalisena. Kuivina aikoina kasville johdetaan lisävettä pohjavesikastelun avulla. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta kasvulla on suotuisat olosuhteet koko kasvukauden ajan.

Hyvät kasvuedellytykset parantavat satoa. Yhdysvalloissa tehtiin vuosina 1984-86 sokerijuurikasviljelmällä tutkimus, jossa vertailtiin kahden alueen välistä sadonkehitystä (Carter et al.,1988). Alueet sijaitsivat vierekkäin ja olivat symmetrisiä. Vertailualue oli salaojitettu tavanomaista kuivatusta varten (ojaväli 30m). Toisella alueella säädeltiin pohjavedenpinnan korkeutta padoilla ja pohjavesikastelulla (ojaväli 15m). Ojien etäisyys oli laskettu kokeellisesti määritettyjen K-arvojen ja DRAINMOD-mallin avulla. Muut maanviljelystoimenpiteet olivat kummallakin alueella samat.

Tarkkaillulla kolmen vuoden jaksolla eivät kosteusolot olleet erityisen ongelmalliset. Kastelutarve oli vähäistä, paitsi vuonna -85. Silloin kesä oli erittäin kuiva, mutta alkuvuosi sateinen. Säädelyllä alueella pohjavedenpinta pysyi kuitenkin koko kostean ajan yli 90 cm:n syvyydellä, kun taas tavanomaisesti kuivatetulla alueella se nousi alle 50cm:n päähän maan pinnasta. Kesän kuivana aikana, jolloin myös kasvit tarvitsivat paljon vettä, voitiin kastelulla nostaa pohjavedenpinta juurten ulottuville. Vertailualueella se sen sijaan laski alle metriin.

Vuoden -85 satotulos antoi hyvän kuvan pohjavedenpinnan säätelyn hyödyistä. Säätelyllä ja pohjavesikastelulla juurikassato parani noin 26% ja sokerisato 29%. Säädellyn alueen sadot olivat seurannan aikana säännöllisesti vertailualueen satoja suuremmat. Juurikassato kohosi keskimäärin 15% ja sokerisato 22%.

2.3.6 Säätelyn vaikutus ravinnehuuhtoumiin

Salaojituksen vaikutuksesta pintavalunta pienenee. Sen seurauksena fosforin, kiintoaineksen ja siihen kiinnittyneiden aineiden, kuten tuholaismyrkköjen sekä muiden pintavalunnan mukana kulkeutuvien aineiden, huuhtoutuminen vähenee. Salaojituksen tehostuessa nitraatti-typpihuuhtoutumat lisääntyvät voimakkaasti ja yleensä myös huuhtoutuvan kokonaistypen määrä lisääntyy (Gilliam et al., 1986). Tämä johtuu siitä, että salaojitus lisää maan profiilin läpi virtaavan veden määrää, ja siten liukenevien aineiden, kuten typen, huuhtoutumista. Kuivatusveden typpikonsentraatio on riippuvainen maan hydraulisesta johtavuudesta ja kasvaa johtavuuden parantuessa (Evans et al., 1989).

Pohjavalunnan lisääntymisestä ja ravinteiden kulkeutumisesta aiheutuvia haittoja voidaan ehkäistä estämällä tai pienentämällä pellolta lähtevää virtaamaa. Tämä on mahdollista säätelyrakennelmien yhdistämisellä salaojitukseen. Yhdysvalloissa tehtiin vuosina 1983-84 kokeellinen tutkimus padotuksen vaikutuksista ravinnehuuhtoumiin (Evans et al., 1989). Kokeita suoritettiin viidellä tilalla Pohjois-Karoliinassa. Kuivatusjärjestelmät pelloilla olivat perinteinen avo- ja salaojitus, pohjavesikastelu avo- ja salaojitetulla pellolla sekä avo- ja salaojituksen yhdistelmä. Tutkimuksen mukaan säätöojituksella saadaan vähennettyä kokonaisvirtaamaa keskimäärin 40%. Ravinnehuuhtoumien väheneminen on lähes suoraan verrannollinen kokonaisvirtaaman pienenemiseen (Evans et al., 1989).

Huuhtoutuvan typen määrää vähentää myös denitrifikaatio, jolla tarkoitetaan nitraattitypen muuttumista kaasumaiseksi. Tämä tapahtuu hapettomissa olosuhteissa. Sitä voi esiintyä pellon laidoilla patorakennelmien lähetyvillä, missä kosteus on suuri. Lumettomat talvet muodostavat myös suotuisat olosuhteet denitrifikaatiolle. Veden seistessä kokoojaojissa voi tyyppiä denitrifioitua. Runsaimmin sitä tapahtuu veden liikkuesssa pellosta salaojiin ja suotautuessa syvempiin maakerroksiin. Suotautuminen lisääntyy säätöojituksen yhteydessä (Gilliam et al., 1986).

Edellä mainitussa tutkimuksessa salaojittaminen lisäsi kokonaistyppihuuhtoutumia avo-ojitukseen verrattuna noin 30%. Käyttämällä säätöojitusta saavutettiin jopa 46.5%:n (7 kg/ha) vähennys huuhtoutuvan kokonaistypen määrässä. Niinpä huuhtoutuvan typen määrä kuitenkin pieneni. Sama suhteellinen vähennys saatiin kaikissa tutkituissa tapauksissa, vaikka salaojituksen tehokkuus vaihtelikin. Vähennys saatiin myös säädelyllä avo-ojituksella.

Säädellyllä pellolla pohjavedenpinta pidetään kasvukaudella korkeammalla kuin tavanomaisesti salaojitetulla pellolla. Tämän voidaan olettaa lisäävän pintavaluntaa ja siten fosforihuuhtoutumia. Edellä mainitussa tutkimuksessa havaittiin, ettei pintavalunta kasva perinteisestä salaojituksesta säätöojitukseen siirryttäessä.

Fosforihuuhtoutumat vähenivät säätörakennelmien ansiosta 44% (0.19 kg/ha). Tämä johtui ilmeisesti siitä, että säädellyissä ojissa vesi seisoj pidempiä aikoja kuin perinteisissä ojissa. Tällöin kiintoaines laskeutui ojan pohjalle, eikä kulkeutunut pellolta pois. Kun otetaan huomioon, että salaojitus vähentää fosforin huuhtoutumista noin 20% avo-ojitukseen verrattuna, oli säätöojituksesta saatava hyöty fosforihuuhtoutumien vähentäjänä merkittävä.

Mainitussa tutkimuksessa ei löydetty näyttöä siitä, että pellolta lähtevän kokonaisvirtaaman väheneminen aiheuttaisi lisäystä pohjavesiin suotautuvissa ravinnemäärissä. Tutkimuksessa vertailtiin typpikonsentraatioita neljän metrin syvyisissä kaivoissa säädellyn ja säätelemättömän pelto-ojituksen alueella. Typpipitoisuudessa ei havaittu vaihtelua sen mukaan, millä alueella kaivo sijaitsi. Typpikonsentraatio vaihteli kaikissa kaivoissa pohjavedenpinnan korkeuden mukaan (Evans et al., 1989). Kuivina aikoina, jolloin pohjavesi oli yli kahden metrin syvyydessä, oli typpipitoisuus 3-4 metrin syvyydessä noin kolminkertainen kosteisiin olosuhteisiin verrattuna.

2.4 Tutkimus sadantaennusteiden käytöstä säätöojituksen yhteydessä

Säätelyllä ylläpidetty pohjavedenpinnan taso on korkeampi kuin luonnollisesti kuivuvalla maalla. Jos kasvukaudelle sattuu voimakkaita sateita, voi pohjavedenpinnan nousu aiheuttaa juuriston joutumisen hapettomaan tilaan. Kasvien sietokyky liiallista märkyyttä kohtaan on lajiominaisuus. Juuristokerroksen kyllästyessä liian pitkäksi ajaksi vedellä kärsivät kuitenkin kaikki kasvit. Lyhytaikainenkin liiallinen kosteus voi olla kasville tuhoisampaa kuin pitkähkö kuivuus (Fouss et al., 1986). Esimerkiksi peruna kuolee jo 2-3 vuorokauden kuluessa, jos sen juuristo joutuu vedellä kyllästyneeseen tilaan.

Maan vesitilanne olisi koko kasvukauden ajan pidettävä optimaalisena, eikä kyllästymistä juurikerroksessa siis saisi tapahtua. Koska maan varastotila pienenee pohjavesikastelun toimiessa, on sitä kasvatettava ennen sateita, jotta sadevesi pääsee

imeytymään juurikerroksen alapuolelle. Sen vuoksi on tulevia sateita pystyttävä ennustamaan.

Sadantaennusteiden hyödyntämistä pohjavedenpinnan tason määrittämisessä tutkittiin Yhdysvalloissa, Louisianassa (Cooper & Fouss, 1988). Tutkimus on kuvattu lyhyesti seuraavassa.

2.4.1 Menetelmä

Cooper & Fouss'in tutkimuksessa käytettiin apuna kuivatus- ja kastelutarvetta arvioitaessa simulointimallia DRAINMOD(Skaggs 1980,1982). Lähtötietoina käytettiin sadantaennusteita, joita The National Weather Service antaa neljästi päivässä. Niissä ennustetaan sadannan todennäköisyys kyseistä ajanhetkeä seuraaville kolmelle 12 tunnin jaksolle. Tutkimuksessa käytettiin aamun arvoja, joista siis saatiin ennusteet: tänään, seuraavana yönä ja huomenna.

DRAINMOD'in kalibroimiseksi määritettiin kokeellisesti paikallisten parametrien arvot, mm. K-arvo ja maalaji (Fouss et al., 1987). Haihdunnan määrittämiseen käytettiin päivittäisiä minimi- ja maksimilämpötiloja sekä tuntisadantoja seitsemän vuoden jaksolta.

Tutkimuksen tarkoituksena oli löytää parhaat käyttöparametrit, joilla sadevesi saadaan kasvukauden aikana tehokkaimmin käyttöön ja ulkopuolisen kasteluveden tarve pystytään minimoimaan. Tämän on tapahduttava siten, että juuristokerros ei kyllästy vedellä pitkiksi ajoiksi. Tätä varten DRAINMOD'iin kehitettiin takaisinkytkentä aliohjelma (Fouss, 1985), joka ohjaa eri kuivatus- ja kasteluvaihtoehtoja sen mukaan, millä tasolla pohjavedenpinta on salaojien puolivälissä. Menovirtaamaa säädeltiin kuivatusojien purkupaikkaan sijoitetun ylivirtauspadon avulla nostamalla ja laskemalla sitä tarpeen mukaan.

Takaisinkytkentäohjelman avulla pystytään sadantaennusteita käyttäen selvittämään, milloin säätörakennelmia pitää laskea, että maa kuivuu kuivatussyvyyyteen asti ennen ennustetun sateen alkua. Kun sateen todennäköisyys ylittää valitun rajan, lasketaan ylivirtauspatoa niin, että se sallii kuivatusvesien vapaan juoksun. Näin saadaan pohjavedenpinta pellolla laskemaan, eikä juuristokerros sateen aikana tai sen jälkeen kyllästy vedellä.

Sateen todennäköisyyden indeksiä (RPI, rain probability index), käytettiin kuvaamaan todennäköisyyttä sille, että tarkasteltavalle aikavälille sattuu ainakin yksi sade. Se lasketaan tarkasteltavien ajanhetkien sadetodennäköisyyksien summana (kaava 2):

$$RPI=(pf1Upf2Upf3)=1-[\{1-p(f1)\}\{1-p(f2)\}\{1-p(f3)\}], \quad (2)$$

missä

U = sadetapahtumien pf1, pf2 ja pf3 summa,

p(f1), p(f2), p(f3) = sateiden todennäköisyydet aikajaksoilla f1, f2 ja f3

Simuloinnissa käytettiin ojituksen ja kuivatussyvyyden säätelylle kuutta eri vaihtoehtoa. Periaatteellisia vaihtoehtoja oli neljä:

- (1) Vedenpinta kokoojaojissa pidettiin samalla tasolla koko ajan pumppaamalla vettä silloin, kun sadevesi ei riittänyt ylläpitämään tasaista vedenpinnan korkeutta.
- (2) Vedenpinta kokoojaojissa pidettiin samalla tasolla, kunnes vesi ojien puolivälissä nousi yli määrätyn korkeuden (esim. 20cm). Tämän jälkeen veden annettiin kuivua vapaasti, kunnes pohjaveden pinta laski tiettyyn syvyyteen (esim.50cm).
- (3) Meneteltiin kuten kohdassa (1), paitsi kun RPI ylitti tietyn (55-65%) arvon (tai RPI tietylle sademäärälle RTT, esim. 1mm, ylitti asetetun rajan), kasteluveden pumppaus lopetettiin siksi päiväksi.
- (4) Vaihtoehtojen (2) ja (3) yhdistelmä.

2.4.2 Tulokset

Simulointi suoritettiin seitsemän vuoden jaksolle (1979-1985). Tuona aikana juuristokerros kyllästyi keskimääräisesti lyhyimmäksi ajaksi vedellä, kun kuivatusta säädeltiin vaihtoehdon (4) mukaan. Lähes sama tulos saatiin vaihtoehdolla (2). Tapauksessa, jossa vedenpinta kokoojaojassa pidettiin samalla tasolla (60cm maanpinnan alapuolella) tai pumppausta säädeltiin vain sade-ennusteen mukaan, juuristokerros joutui olemaan kyllästystilassa huomattavasti pidempiä aikoja kuin edellä mainituilla.

Juuristokerroksen vesitilannetta kuvattiin päivittäin juuristokerrokseen (tässä siis <30cm maanpinnasta) kertyvän vesimäärän (cm) kumulatiivisella summalla (parametri SEW₃₀). Rajana tutkimuksessa pidettiin SEW₃₀:n arvoa 150cm-päivää. Tämä arvo ei ylittynyt kertaakaan seitsemän vuoden jaksolla vaihtoehtoissa, joissa pohjavedenpinnan korkeutta säädeltiin ojien puolivälin tarkkailulla (vaihtoehdot (2) ja (4)).

Simuloinnin avulla todettiin, että kasteluveden pumppaamistarvetta ja siten myös pumppauskustannuksia voidaan huomattavasti vähentää sade-ennusteiden käytön avulla. Kun pumppaaminen keskeytettiin ennustetun sateen todennäköisyysindeksin ylittäessä 55%, väheni vuosittain pumpattavan kasteluveden tarve 12-21%. Määrää verrattiin tilanteisiin, jossa vedenpinta kokoojaojissa pidettiin samalla tasolla koko ajan tai maan annettiin vapaasti kuivua sen jälkeen, kun pohjavedenpinta nousi yli sallitun tason. Kastelun keskeyttäminen ei kuitenkaan lisännyt huomattavasti aikaa, jonka juurikerros joutui olemaan kuivana. Keskimäärin lisäys oli vain muutamia päiviä kasvukauden aikana. Tutkimuksen tulokset on esitetty liitteessä 1.

2.5. Typen liikkeistä maassa

Typpi on yksi tärkeimmistä sadonmuodostusta säätelevistä tekijöistä. Sen määrällä voidaan vaikuttaa sadon määrään ja laatuun. Se mm. nostaa viljojen valkuaisainepitoisuutta ja siten parantaa laatua. Maan kunnon ylläpitämiseksi on typen lisääminen välttämätöntä. Nykyisin typpi annetaan lähes aina kemiallisina lannoitteina, joissa typpi esiintyy helppoliukoisessa muodossa. Kasvien juuriston kyky sitoa typpeä kasvun alkuvaiheessa on pieni. Tästä aiheutuu vaara, että typpi huuhtoutuu pinta- ja pohjavesiin ja aiheuttaa huomattavaa veden laadun huononemista.

2.5.1 Typen muodot

Typpi esiintyy maassa orgaanisina ja epäorgaanisina yhdisteinä. Epäorgaanisista muodoista vesiliukoisia ovat nitraatti- ja ammoniumtyppi. Niistä nitraattityppi on helposti liukeneva ja voi siten huuhtoutua maan veden mukana. Maan kosteudella on siksi huomattava merkitys maan typpitasapainoon.

Ammoniumtyppi ei liukene veteen helposti, mutta edullisissa olosuhteissa sitä liukenee pienissä määrissä, joka voi myös huuhtoutua varsinkin hiekkamaasta (Stevenson, 1982). Se voi myös nitrifioitua nitraattitypeksi ja muuttua helppoliukoiseksi tai sitoutua maan orgaaniseen ainekseen ja savimineraaleihin. Ammoniumtyppeä poistuu myös haihdunnan kautta.

Vesiliukoisien typen määrä maassa lisääntyy mineralisaation ja nitrifikaation kautta. Sitä poistuu denitrifikaation ja immobilisaation seurauksena. Tärkeimmät näihin reaktioihin vaikuttavat tekijät ovat maan kosteus, lämpötila ja happipitoisuus.

2.5.2 Nitrifikaatio

Nitrifikaatiolla tarkoitetaan ammoniumtypen (NH_4^+) hapettumista ensin nitriitti(NO_2^-)- ja sitten välittömästi sen jälkeen nitraatti(NO_3^-)typeksi. Reaktio tapahtuu aerobisten bakteerien läsnäollessa. Bakteerit saavat energiansa hapettamalla typpiyhdisteitä. Kaksivaiheisen reaktion ensimmäisessä vaiheessa on läsnä mm. *nitrosomonas*-bakteeri ja toisessa vaiheessa vaikuttaa *nitrobacter*.

NO_3^- :n muodostumiseen tarvitaan maaperässä suotuisat olosuhteet. Tärkeimmät nitrifikaatiotason kanssa korreloivat tekijät ovat maan kosteus, lämpötila ja happamuus sekä orgaanisen aineksen määrä maaperässä.

Nitrifikaatiobakteerit ovat aerobisia. Sen vuoksi maan happipitoisuus on tärkeä edellytys reaktiolle. Happipitoisuus riippuu maan kosteudesta. Mitä kosteampaa maa on, sitä vähemmän siellä on vapaita huokosia. Huokosten määrä riippuu myös maan rakenteesta.

Nitrifikaatiota tapahtuu lämpötilan ollessa 5-40 °C. Kyseisen lämpötila-alueen ulkopuolella se on vähäistä. Happamuuden optimiarvo on pH 6.6-8.0. Orgaanisen aineksen muodostuminen vaatii happea ja epäorgaanista typpeä eli samoja yhdisteitä kuin nitrifikaatiobakteereiden toiminta. Siksi runsas orgaanisen aineen muodostuminen vähentää nitrifikaatiota.

Nitrifikaatiotuote, nitraattityppi, on vesiliukoinen. Kasvit saavat typen käyttöönsä veteen liuenneena. Jos typpeä on maassa yli kasvien tarpeen, ne eivät pysty hyödyntämään kaikkea. Silloin osa huuhtoutuu kuivatusvesien mukana vesistöön ja lisää kuormitusta. Samalla ravinne poistuu kasvien käytöstä.

2.5.3 Denitrifikaatio

Denitrifikaatiolla tarkoitetaan nitraattitypen muuttumista välivaiheiden kautta kaasumaiseksi. Reaktiossa ovat läsnä toisenvaraiset denitrifikaatiobakteerit. Tuotteena on joko typpikaasu tai typpioksidi. Muodostuttuaan nämä yleensä haihtuvat ilmakehään.

Denitrifikaation perusedellytyksenä ovat hapettomat tai vähähappiset olosuhteet. Maan kosteuden lisääntyessä hapen diffuusio maahan vähenee ja denitrifikaatio lisääntyy. Kosteuden ollessa alle 60% kyllästyskosteudesta, on denitrifikaatiotasoa hyvin alhainen.

Nitraattitypen saatavuus on denitrifikaatiotasoa säätelevä tekijä. NO_3^- -konsentraation ollessa alle 20 mg/l riippuu denitrifikaatiotasoa lineaarisesti typen määrästä. Riippuvuus lakkaa konsentraation ylittäessä 20 mg/l.

Denitrifikaatiobakteerit ovat heterotrofisia eli toisenvaraisia bakteereja. Ne tarvitsevat energialähteekseen hiiltä. Sen saatavuus vaikuttaa siten denitrifikaatiotasoon. Bakteereiden toimintaan vaikuttavat myös maan lämpötila ja happamuus. Optimaalisin happamuustaso on lähellä neutraalia, mutta bakteerit voivat toimia pH-arvo neljään asti.

Maan lämpötilan nousu kiihdyttää bakteeritoimintaa ja denitrifikaatiota. Lämpötila vaikuttaa myös hapen diffuusion ja liukenemiseen veteen, ja siten epäsuorasti denitrifikaatiotasoon. Denitrifikaation minimilämpötila on noin 5 °C.

Denitrifikaation seurauksena typpeä siirtyy maasta ilmakehään. Sopivissa olosuhteissa maahan lisäystä lannoitetyypistä huomattava osa voi denitrifioitua ja haihtua. Reaktio on maanviljelyn kannalta epäedullinen, sillä arvokas typpi poistuu maasta ilman, että kasvit voivat käyttää sitä hyväkseen. Tämä johtaa siihen, että lannoitetyyppeä joudutaan antamaan ylimäärin, jotta typpeä olisi koko kasvukauden saatavissa. Typen poistuminen denitrifikaation seurauksena ilmakehään on kuitenkin vesiensuojelun kannalta edullista.

2.5.4 Mineralisaatio ja immobilisaatio

Mineralisaatio tarkoittaa proteiinien, aminosokereiden ja nukleinihappojen hajoamista ammoniumtypeksi. Mineralisaatioasteeseen vaikuttavat maan kosteus, pH ja happipitoisuus sekä orgaanisen typen määrä maassa.

Mineralisaation ansiosta mm. kasvijätteiden sisältämä orgaaninen typpi vapautuu uudelleen kasvien käyttöön. Jos olosuhteet ovat nitrifikaatiolle suotuisat, voi osa siitä edelleen nitrifioitua.

Immobilisaatio on mineralisaatiolle käänteinen reaktio. Siinä epäorgaaninen typpi sitoutuu orgaaniseen, liukenemattomaan muotoon.

2.5.5 Toimenpiteitä haittojen ehkäisemiseksi

Maaperälle ja ympäristölle on edullisinta, jos tarvittava lannoitetyppi lisätään orgaanisessa eli niukkaliukoisessa muodossa. Se vapautuu hitaan prosessin tuloksena pitkin kasvukautta, jolloin kasvit voivat käyttää sen heti hyväkseen. Tällöin myös huuhtoutuvan typen määrä vähenee. Koska nykyisissä lannoitteissa typpi on kuitenkin lähes aina helppoliukoisessa muodossa, on typpihuuhtoumia säädeltävä muilla keinoin.

Denitrifikaatio- ja nitrifikaationopeuteen voidaan maanviljelyssä vaikuttaa lähinnä maan kosteutta säätelemällä. Periaatteessa myös happamuutta voidaan säädellä, mutta sen optimiarvo on lähes sama denitrifikaatiobakteereille ja useimmille kasveille. Koska denitrifikaatiotuotteet eivät kuormita vesistöä, olisi olosuhteita muutettava denitrifikaatiota suosiviksi.

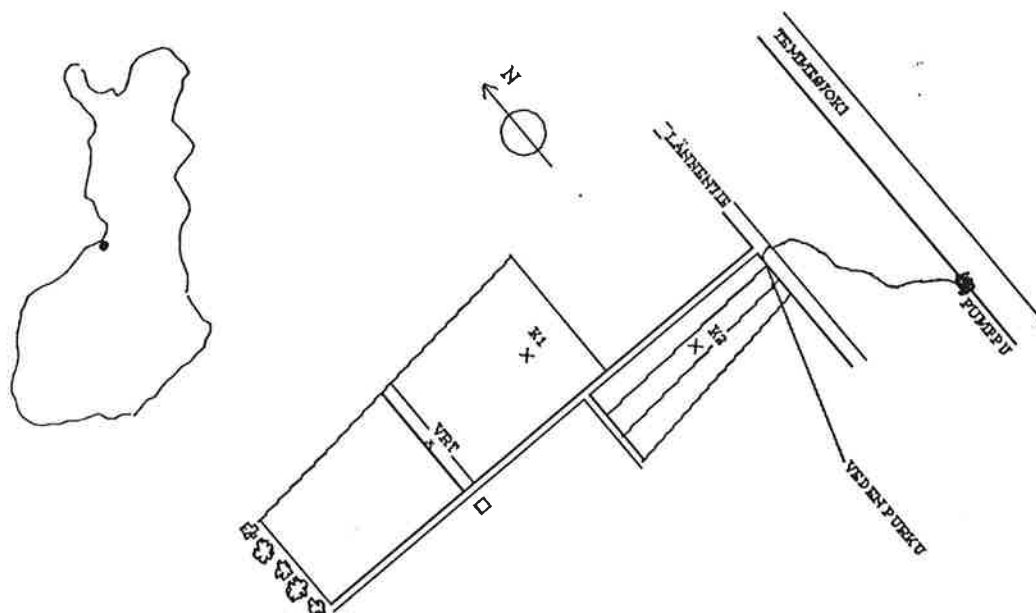
Nitrifikaationopeutta voidaan pienentää maan kosteutta lisäämällä. Tällöin samanaikaisesti denitrifikaatiotaso kasvaa. Säättöjituksen ja pohjavesikastelun avulla on mahdollista vaihdella maan kosteuspitoisuutta niin, että se suosii denitrifikaatioreaktiota. Korkea denitrifikaatiotaso ei kuitenkaan ole viljelijälle edullinen, sillä se vähentää kasveille käyttökelpoisen typen määrää. Suomen oloissa erittäin korkeisiin denitrifikaatioarvoihin ei käytännössäkään päästä. Kasvit tarvitsevat kasvukaudella ilmaa, jolloin maahan ei voida luoda hapettomia olosuhteita. Talvella meillä on lumipeite, jolloin denitrifikaatiotuotteet eivät pääse haihtumaan, eikä reaktiotakaan juuri tapahdu alhaisen lämpötilan vuoksi.

Tehokas maan kuivatus kasvattaa nitrifikaationopeutta ja lisää näin typen huuhtoutumista. Tämä on epäedullista sekä vesistölle että viljelijälle. Säättöjituksen avulla typpi voidaan pidättää pellolla. Kun pelloilta lähtevää virtaamaa pienennetään ja vesi pidätetään maaprofiilissa, pysyy myös liuennut typpi maassa. Tällöin huuhtoutuminen vähenee ja ravinne pysyy kasvin saatavilla.

3. AINEISTO JA LABORATORIOMENETELMÄT

3.1 Kenttäkokeet ja aineiston hankinta

Tutkimuskohteena oli Holman perunaviljelys Limingassa. Kokeet suoritettiin Pyyhtiänpellolla, joka sijaitsee Ala-Temmeksen kylässä, Lännentien varressa. Pyyhtiänpelto koostuu kahdesta osasta, "isosta" pellosta, joka käsittää 17 sarkaa sekä "pikkupellosta", jolla on kolme sarkaa. Niiden yhteenlaskettu pinta-ala on 5 ha (kuva 1).



Kuva 1: Kaavakuva Pyyhtiänpellon alueesta ja tutkimuspisteiden sijainti pellolla.

Pellolla on viljelty perunaa viisi peräkkäistä vuotta. Lajikkeet kesällä-90 olivat Pito, Bintje ja Puikula. Kylvö suoritettiin 11.-12.6. Kasvustomäärityksissä käytettiin Bintje-lajiketta.

Pyyhtiänpellolla tehtiin kokeita kesän-90 aikana kolme kertaa: 19.-20.6., 17.-18.7. ja 11.-12.9. Kenttäkokeiden tarkoituksena oli kerätä näytteitä laboratoriomäärityksiin ja määrittää lähtöarvoja tietokonemalleilla suoritettavia ajoja varten.

Kaikilla kolmella tutkimuskerralla näytteet kerättiin samoista pisteistä (kuva 1). Ne sijaitsivat:

- 1) Vertailualueella, joka oli "ison" pellon keskimäinen sarka. Sille ei johdettu ulkopuolista vettä,

- 2) Lännentieltä päin lukien kolmannella saralla (K1) sekä
- 3) "Pikkupellon" keskimmäisen saran puolivälissä (K2).

Kullakin kerralla pisteistä kairattiin kosteusnäytteet sekä näytteet K-arvon laboratoriomäärittystä varten. Ensimmäisellä kerralla otettiin lisäksi näytteet rakeisuuden, vedenpidätyskäyrän ja kyllästyskosteuden määrittämistä varten. Näytteitä otettiin 20 cm:n välein yhden metrin syvyydelle asti.

Saralle 3 asennettiin pohjavesiputki pohjavedenpinnan muutosten seurantaan varten. Isäntä havainnoi muutokset pohjavedenpinnan korkeudessa. Hän vastasi myös pellolle sijoitetun sademittarin tulosten kirjaamisesta.

Heinäkuun 17.-18. päivänä suoritettiin Pyyhtiänpellon 1. saralla Lännentiestä lukien vedenpinnan nostokoe, jolla haluttiin selvittää veden liikkumisnopeutta maassa. Saran toiselle puoliskolle asennettiin viisi pohjavesiputkea 1.5m:n välein siten, että viimeinen sijaitsi saran keskellä. Ojien vedenpinta nostettiin 35cm:iin maanpinnasta ja pohjavedenpinnan korkeuden vaihtelua putkissa seurattiin tietyin väliajoin. 22 tunnin kuluttua aloituksesta padot aukaistiin ja veden annettiin virrata ojista pois. Sen jälkeen mitattiin vedenpinnan lasku putkissa.

Heinä-, elo- ja syyskuussa nostettiin kasvustonäytteet vertailualueelta sekä yhdeltä kastellulta saralta. Kummaltakin otettiin tutkittaviksi viisi kasvia mukuloinen (lajike Bintje). Syyskuussa varsisto oli jo hallan vioittama ja silloin nostettiin vain mukulat. Niiden perusteella vertailtiin kastelun vaikutusta sadonkehitykseen.

Syyskuussa satoa tutkittiin myös suorittamalla koenostot kastellulla ja kastelemattomalla saralla. Kummaltakin nostettiin kaksi kylvöriviä ja sadon laatua ja määrää tarkasteltiin silmämääräisesti.

3.1.1 Sadanta, kastelu ja pohjavedenpinnan korkeus

Kasvukauden aikainen kokonaissadanta tutkimusalueella oli noin 250mm. Keväällä huhti-toukokuussa sadanta oli vähäistä. 3.6 satoi vettä noin 10mm ja 10.6. 5mm. Sen jälkeen alue oli sateeton heinäkuun 1. päivään asti. Tästä johtuen pohjavedenpinta oli kesäkuussa syvällä. 20.6 se oli yli 2m:n syvyydessä.

Heinäkuussa satoi noin 190mm. Ennen 10. päivää satoi yhteensä noin 40mm. Pohjavedenpinta oli silloin noin 60cm:n syvyydellä. Tämän jälkeen sattuneiden rankkasateiden seurauksena vedenpinta nousi väliaikaisesti noin 15cm:n etäisyydelle maanpinnasta. Elokuussa satoi noin 40mm ja syyskuussa ennen sadonkorjuuta noin 5mm.

Kasteluvettä lisättiin pellolle 22.6. alkaen. Koko kasvukauden aikana pumpattu vesimäärä oli noin 9000m³, eli 180mm 5ha:n peltoalalle jaettuna. Siitä noin 100mm käytettiin kevään kuivuuden torjumiseen. Heinä- ja elokuussa annettiin noin 65mm lisäkasteluvettä. Hallantorjuntaan pumpattiin vettä noin 16mm.

3.2 Laboratoriokokeet

3.2.1 Maalajimääritys

Rakeisuus määritettiin maanäytteistä, jotka oli noudettu 19.-20.6. Määritys suoritettiin areometri-menetelmällä (Anon., 1985) kuivatuista ja hienonnetuista näytteistä.

Maalajikolmion mukaan pellon maalaji on savinen hieta kaikissa näytteissä. 50-läpäisyprosentin mukaan maalaji oli hienoa hietaa, paitsi kuoppa 2:n maalaji oli hiesua 0-40 cm:n syvyydellä (liite 2).

Isännän ilmoituksen mukaan vuonna 1990 tehdyssä viljavuustutkimuksessa oli maalajiksi määritetty karkea hieta. Erot tuloksissa voivat johtua siitä, ettei nyt tutkittuja näytteitä seulottu ennen määritystä. Käytetyn lähteen (Anon. 1985) mukaan olisi suoritettava pesuseulonta, jos areometrimittauksessa ensimmäistä lukemaa vastaavan läpäisyprosentin arvo on pienempi kuin 90% (vrt. liite 2).

3.2.2 Hydraulisen johtavuuden määrittäminen

Kyllästyneen maan hydraulisen johtavuuden arvoja käytettiin lähtötietoina DRAINMOD-ajoissa sekä sato- ja typpimallissa. Tarkoituksena oli myös seurata K-arvon vaihtelua pellolla ajallisesti.

Hydraulinen johtavuus määritettiin laboratoriossa näytteistä, joiden halkaisija oli 5.4 cm ja korkeus 7.0 cm, vakiopainekorkeus -menetelmällä. Siinä kyllästetyn

maanäytteen läpi johdetaan vettä alhaalta ylöspäin (Klute, 1965). Kun maanäytteen paksuus, poikkipinta-ala ja sen ylä- ja alapintoihin vaikuttavien painekorkeuksien ero tunnetaan, hydraulinen johtavuus voidaan laskea Darcyn kaavalla (kaava 3):

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta h / L, \quad (3)$$

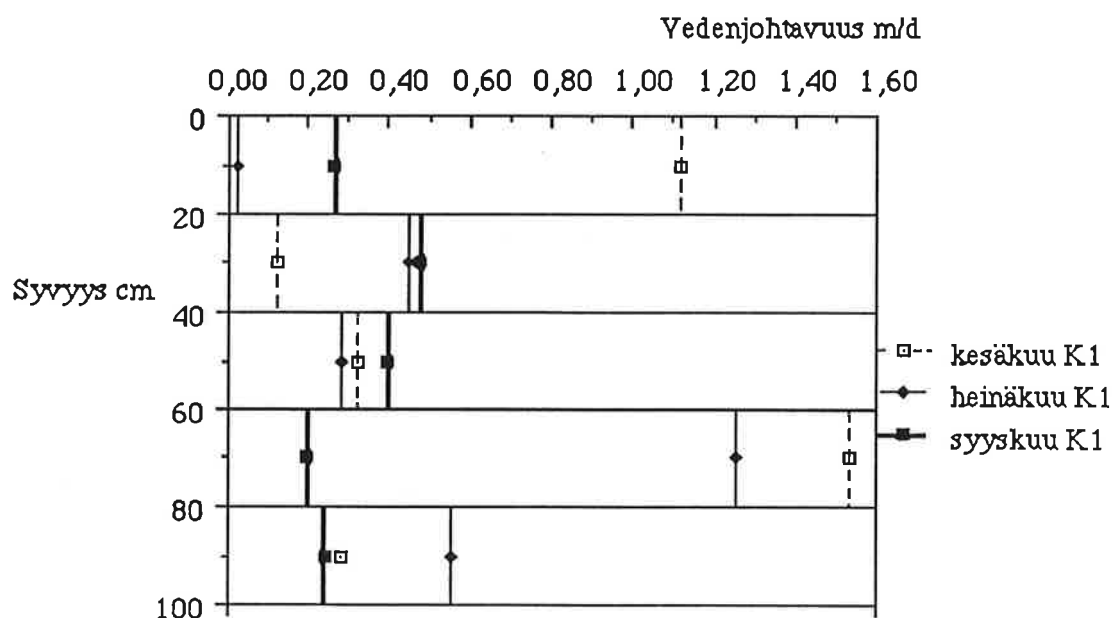
missä:

A = maanäytteen poikkipinta-ala (m^2),

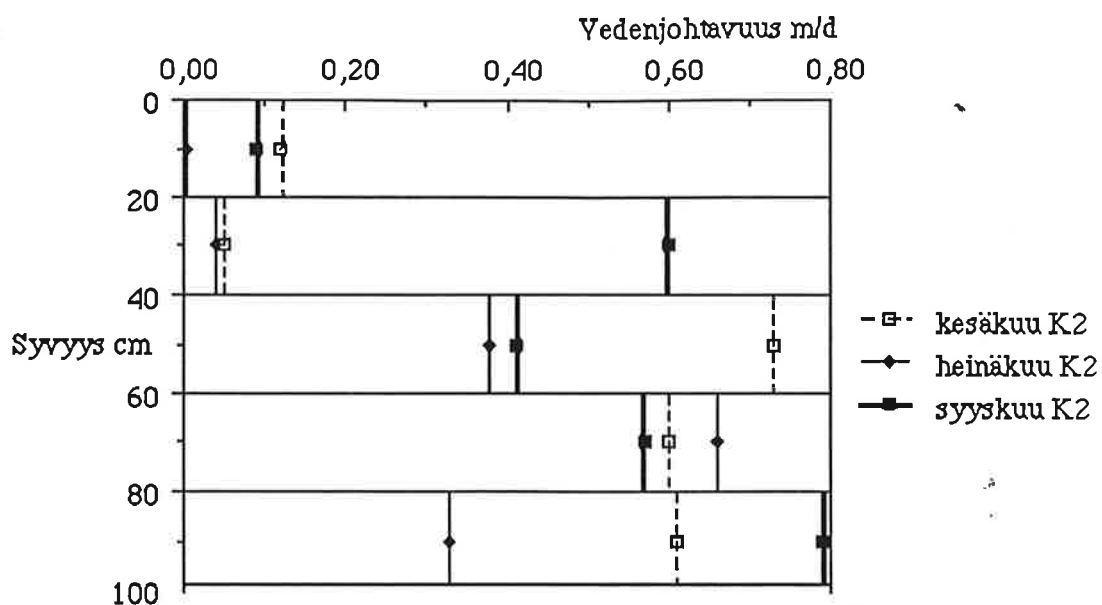
Δh = maanäytteen ylä- ja alapintoihin vaikuttavien vesipatsaiden korkeusero (m) ja

L = maanäytteen paksuus (m).

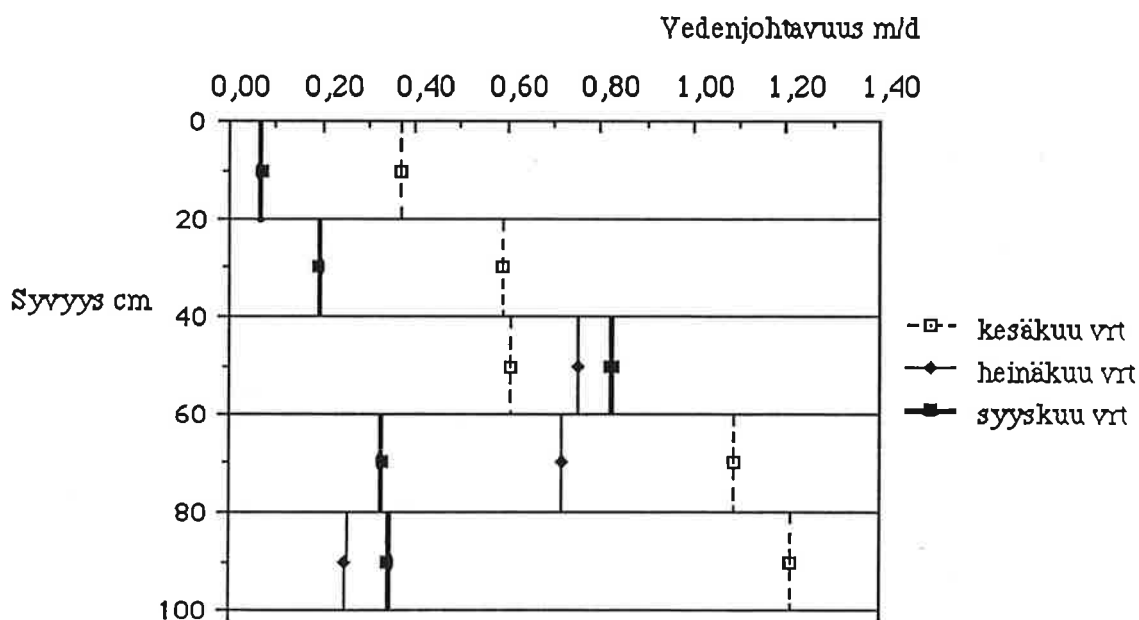
Vedenjohtavuuden vaihtelu kerrosten välillä oli suurta, 2- ja 3-kertaiset vaihtelut päällekkäisissä kerroksissa olivat yleisiä. Samassa profiilissa saattoi esiintyä jopa 10-kertaisia eroja K -arvojen välillä (kuvat 2-4). Kun huomioidaan mahdolliset mittausvirheet, voidaan todeta, että vedenjohtavuus pintakerroksessa on pieni, noin 0.2-0.3 m/d. Syvemmällä, noin 50-80 cm:n syvyydessä, on havaittavissa kerros, jossa johtavuus lähes säännöllisesti on korkea, 0.6-0.7 m/d.



Kuva 2 Vakiopainekorkeusmenetelmällä määritetyt vedenjohtavuusarvot tutkimuspisteessä K1 kesä-, heinä- ja syyskuussa, 1990.



Kuva 3 Vakiopainekorkeusmenetelmällä määritetyt vedenjohtavuusarvot tutkimuspisteessä K2 kesä-, heinä- ja syyskuussa, 1990.



Kuva 4 Vakiopainekorkeusmenetelmällä määritetyt vedenjohtavuusarvot tutkimuspisteessä VRT kesä-, heinä- ja syyskuussa, 1990.

Hydraulisen johtavuuden ajallista muuttumista selvitettiin määrittämällä tutkimuspisteiden K-arvot jokaisen käyntikerran näytteistä. Vaihtelu K-arvoissa oli suuri eri kertojen välillä. Vettä hyvin johtava kerros näkyi selvimmin kesä- ja heinäkuussa. Pintakerroksen vedenjohtavuus oli aina alhainen (kuvat 2-4). Muuten yksittäisten kerrosten K-arvot vaihtelivat toistensa suhteen sattumanvaraisesti. Karkeasti ottaen voidaan todeta, että syyskuussa vedenjohtavuus oli kesä- ja heinäkuuta pienempi. Selvimmin se havaitaan profiileista K1 ja VRT.

Mittaustuloksiin saattoi aiheuttaa virhettä näytelieriöiden koko. On mahdollista, että pienten näytteiden sisältämät huokokset päättyvät lieriön reunoihin, jolloin veden johtuminen estyy. Tämä pienentää tulosta. Toisaalta saattaa näytteen ja lieriön reunan väliin jäädä ilmatilaa, jolloin vesi pääsee esteettä virtaamaan ylöspäin, ja arvo tulee liian suureksi. Näin kävi todennäköisesti ainakin kahdessa näytteessä vertailualueella heinäkuussa. Näiden arvoja ei ole esitetty kuvissa.

3.2.3. Kyllästyskosteus

Kyllästyskosteus mitattiin malleilla suoritettujen simulointien lähtötiedoksi. Se määritettiin huokostilavuuden perusteella. Näytteet (halkaisija 5.4cm, korkeus 7.0cm) upotettiin veteen, josta happi oli poistettu keittämällä. Niiden annettiin imeä vettä 28 vuorokautta, minkä jälkeen ne kuivattiin lämpötilaltaan 105°C:ssa uunissa. Huokostilavuus laskettiin tilavuusprosentteina näytteen kokonaistilavuudesta täysin kyllästyneen ja kuivan näytteen painojen erotuksen avulla. Kyllästyskosteus määritettiin kahdesta profiilista, kuoppa 1 ja VRT (taulukko 2).

Taulukko 2 Laboratoriossa määritetyt kyllästyskosteudet tutkimuspisteiden K1 ja VRT maanäytteistä.

syvyys (cm)	kyllästyskosteus til.-%	
	K1	VRT
0-20	60.62	61.98
20-40	50.19	54.14
40-60	56.42	52.89
60-80	52.97	56.97
80-100	67.14	57.50

Koska näytelieriöt ovat pohjattomia, pakattiin ne nailonsukkaan imeytyksen ajaksi, jottei maanäyte valunut ulos. Ne punnittiin sukan kanssa sekä märkänä että kuivana.

Sukan imemä vesimäärä lisäsi todennäköisesti huokostilavuutta eli kyllästyskosteutta ja aiheutti näin virhettä.

3.2.4 Vedenpidätyskäyrä

Vedenpidätyskäyrä määritettiin kahdesta koepisteestä: K1 ja VRT. Määritys tehtiin näytteistä, joiden halkaisijat olivat 2.9 cm ja korkeus 5.4 cm. Määritys suoritettiin siten, että kipsilevyn päällä olevista näytteistä imettiin vettä vakiovoimalla tai -paineella. Kun vettä ei enää irronnut, näytteet punnittiin ja asetettiin takaisin levyille. Sen jälkeen imua tai painetta kasvatettiin. Tässä tutkimuksessa käytettiin imua 1 m:n vesipatsaan korkeutta vastaavaan imuun asti, minkä jälkeen näytteet siirrettiin painekattilaan. Vettä poistettiin paineen avulla 10 m:n imua vastaavalle painetasolle. Sen jälkeen näytteet kuivattiin uunissa. pF-käyrät määritettiin lähtöarvoiksi DRAINMOD'ia varten (liite 3).

Käytetyssä menetelmässä oli kukin näyte poistettava kipsilevyltä punnitusta varten tietyllä imuvoimakkuudella poistuvan vesimäärän määrittämiseksi. Nostettaessa lieriötä, jäi kipsilevylle aina vähän märkää maanäytettä. Tämä aiheuttaa vääristymää punnitustuloksessa ja lopullisen poistuneen vesimäärän laskemisessa. Näytteittäin virhe vaihtelee 0-15%.

3.2.5 Kasvustomääritykset

Laboratoriossa vertailtiin sadon kehitystä kuivalla ja kastellulla alueella. Näytteitä oli kustakin alueesta viisi. Mukulaluku laskettiin siten, että kaikki mukulan alut huomioitiin ilman kokorajoitusta. Kuivapainot mitattiin 60°C:een lämpötilassa kuivatuista näytteistä. Mukuloiden virheellisyystarkkailua ja raakapainon mittausta varten perunat harjattiin puhtaiksi. Tarkasteltu lajike oli Bintje.

Erot kastellun ja kuivan alueen näytteissä olivat huomattavat (kuva 5). Ensimmäisen erän näytteissä (noudettu 18.7) mukulaluku kastellulla alueella oli keskimäärin 30.6 mukulaa tainta kohden, kuivalla alueella 7 mukulaa ja 8.4 itujuurta tainta kohden. Kokonaiskuivapainojen keskiarvo kastellulla alueella oli 20.66 grammaa, mutta kuivalla vain 10.02 grammaa. Kastelulla saatu kokonaispainon parannus oli siis 106%.



Kuva 5 Valokuva eri alueiden perunoiden kehitysasteesta 18.7. 1990. Vasemmalla vertailualueen, oikealla kastellun alueen näyte. Lajike Bintje (Holma, 1990).

Toisen erän kasvustonäytteet isäntä nosti 13.8. Näytteet otettiin samoin kuin edellisellä kerralla. Tällä kerralla mitattiin mukulaluvun ja koko kasvin kuivapainon lisäksi mukuloiden raaka- ja kuivapainot.

Tässä vaiheessa oli kastellun ja kuivan alueen kasvustossa vielä havaittavissa kokoeroja. Kastellulla alueella mukulat olivat tasakokoisia ja ruvettomia. Kuivan alueen mukuloissa esiintyi lievää rupisuutta ja niiden koko vaihteli huomattavasti. Kastellun alueen näytteiden keskimääräinen mukulaluku oli 27 ja kuivan 20. Mukuloiden raakapainon keskiarvo kastellulla alueella oli 784g ja kuivalla 733g. Kastelulla saatiin 34% lisäys mukulamäärään, mutta vain noin 7% lisäys mukuloiden painoon. Mukuloiden kuivapainon keskiarvo kastellulla alueella oli 170g ja kuivalla 126g. Kastelu paransi siis kuiva-ainesaantia 35%, eli suunnilleen saman verran kuin mukulaluvun perusteella.

Kokonaiskuivapainojen keskiarvo kastellun alueen näytteistä oli 230g ja kuivan alueen näytteistä 186g. Kokonaismassaan saatiin kastelulla 24%:n parannus kuivaan alueeseen verrattuna. Pelkkien varsien kuivapaino oli kuitenkin keskimääräisesti sama

sekä kastellulla että kuivalla alueella. Kastelun merkitys näkyi siis tässä vaiheessa lähinnä mukulan muodostuksessa.

Kolmas kasvustonäyte-erä nostettiin yhtä aikaa sadonkorjuun kanssa 12.9. Näytteiksi otettiin vain mukulat. Sadon laatua ja kauppakuntoisuutta arvioitiin perunoiden rupisuuden, halkeilun, ruttoisuuden ja koon mukaan.

Kastellun alueen näytteiden keskimääräinen mukulaluku oli 18, ja vertailualueen 15. Tuorepaino vertailualueen näytteillä oli noin 5% suurempi kuin kastellun alueen. Kauppakuntoisia oli kummankin alueen perunoista painon mukaan noin 85% ja mukulamäärän mukaan noin 75%. Halkeilleiden perunoiden määrä oli vertailualueella 6% ja se oli kaksinkertainen kasteltuun alueeseen verrattuna. Halkeilleet mukulat olivat suurikokoisia. Vertailualueen näytteissä esiintyi ruttoa 5%:ssa, kun kastellun alueen vastaava luku oli alle 2%.

Suurin ero alueiden perunoiden laatua vertailtaessa ilmeni rupisuudessa. Kastellun alueen perunoista oli rupisia 45%, vertailualueella lähes 95%. Kuivan alueen perunoiden rupisuus oli lisäksi paljon voimakkaampaa kuin kastellun alueen. Ruokaperuna-asetuksen mukaan (Anon., 1984) 1. laatuluokan peruna on laadultaan viallinen, jos siinä on rupea yli 25% sen kuoren pinta-alasta. Tämän ylitti vertailualueella 10% perunoista, kastellulla 1%. Vaikka suurin osa perunoista olikin kauppakuntoisia, aiheuttaa rupisuus tuottotappioita hinnanalennuksena.

Ruokaperuna-asetuksen mukaan perunaa saa myydä erikoisluokan ja 1. luokan perunana, kun sen koko on välillä 35-70mm, ja perunaerässä on korkeintaan 3 painoprosenttia laadultaan viallisia perunoita. Erikoisluokan peruna on laadultaan viallinen, jos siinä on rupea enemmän kuin 10% pinta-alasta. Vertailualueen perunanäytteistä vain 3 kpl, eli alle 4% tuorepainon mukaan, täyttää vioittumattoman erikoisluokan perunan vaatimukset. Ero oli huomattava verrattuna näytteisiin, jotka oli nostettu alueelta, jolle oli kuivana aikana johdettu ulkopuolista vettä. Niistä vioittumattomia, erikoisluokan vaatimukset täyttäviä perunoita oli lähes 80 painoprosenttia.

Lopullista satoa arvioitiin nostokokeen perusteella, joka tehtiin 12. syyskuuta. Kokeessa nostettiin perunoita 630 kg:n laatikoihin kylvöriveiltä, joiden pituus on 110m. Kastellulla alueella laatikko täyttyi 1.8-2.0:n kylvörivin ajon jälkeen. Lopulliseksi sadoksi saadaan siis, kun riviväli on 75 cm, noin 40 t/ha. Kuivalla

alueella laatikko täyttyi 2.0-2.2:n kylvörivin ajon jälkeen. Lopullinen sato siellä oli siis noin 36 t/ha.

3.2.6 Vedenpinnan nostokoe

Veden liikkumisnopeutta maaperässä tarkkailtiin 17.-18.7. tehdyllä vedenpinnan nostokokeella. Kokeen järjestely on selvitetty kappaleessa 3.1. Mitatut vedenpinnan korkeudet pohjavesiputkissa on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Pohjavedenpinnan korkeudet putkissa vedenpinnan nostokokeen aikana. Ojien vedenpinnat nostettiin korkeuteen 30 cm maanpinnasta hetkellä 0h ja padot avattiin hetkellä 22h.

Aika h	Pohjavedenpinnan korkeus cm				
	Putki 1	Putki 2	Putki 3	Putki 4	Putki 5
0	56	61	56	58	51
2	43	56	55	58	51
17	30	35	28	32	26
19	27	31	24	25	18
22	29	33	26	28	20
25	43	43	33	33	25

Luvut eivät anna luotettavaa kuvaa veden liikkeestä maassa, sillä yöllä sattunut 44mm:n sade lisäsi vedenpinnan nousua. Sade loppui samanaikaisesti kolmannen mittauksen kanssa. Neljännellä mittauksella havaittu lasku johtui todennäköisesti vedenpinnan tasaantumisesta sateen loputtua. Viimeinen mittaus on suoritettu 3 tuntia patojen aukaisemisen jälkeen. Vedenpinnan huomattava laskeutuminen johtuu edelleen sadeveden imeytymisestä.

4. MALLIEN KÄYTTÖ

4.1 DRAINMOD'in rakenne

4.1.1 Infiltraation laskeminen

Maan pinnalta tapahtuvaan veden infiltraatioon vaikuttavat Skaggs'in (1980) mukaan:

- (1) Maaperän ominaisuudet, kuten hydraulinen johtavuus, maan alkuperäinen vesipitoisuus ja pinnan tiiviys, maaprofiilin paksuus ja pohjavedenpinnan syvyys
- (2) Kasvuston tiheys ja juuristokerroksen syvyys
- (3) Ilmastolliset tekijät, kuten sateen intensiteetti, kesto aika ja aikajakauma, lämpötila ja routa.

DRAINMOD-mallin simuloinnissa käytettävän infiltraatio-komponentin määrittämiseen käytetään kaavaa, jonka ovat kehittäneet Green ja Ampt (1911). Sen olettamuksena on, että maaprofiili on homogeeninen ja sen alkuperäinen vesipitoisuus on sama koko profiilissa. Veden oletetaan tulevan maahan äkkinäisenä virtana. Sen vaikutuksesta maahan muodostuu selvä rajakerros, jonka yläpuolella maa on kostea ja alapuolella kuiva.

Laskennan perustana käytetään Darcy'n lakia, josta saadaan:

$$f = \frac{K_s H_2 - H_1}{L_f} \quad (4)$$

missä

f = infiltraatiosopeus (cm/h),

L_f = kostean kerroksen paksuus (cm),

K_s = kostean kerroksen tai rajakerroksen hydraulinen johtavuus (cm/h),

H_1 = hydraulinen paine maan pinnalla (cm) ja

H_2 = hydraulinen paine kostumisrajalla (cm).

Infiltraatiota laskettaessa oletetaan hydraulisen paineen maan pinnalla olevan saman kuin lammikoituneen vesikerroksen syvyys $H_1 = H_0$. Hydraulisena paineena kostumisrajalla (= kostean ja kuivan kerroksen raja) käytetään maaveden painekorkeuden h_f ja kostuneen kerroksen paksuuden erotusta $H_2 = h_f - L_f$. Koska

parametrin h_f arvo on negatiivinen, käytetään kaavan lopullisessa muodossa sen itseisarvoa $S_{av} (=|h_f|)$.

Kumulatiivinen infiltraatio F (cm) on minä tahansa ajanhetkenä maan vapaan huokostilan (= veden tilavuusmäärä kosteassa kerroksessa q_s - alkuperäinen vesimäärä $q_i = M$) ja kostean kerroksen paksuuden tulo eli $F = M * L_f$. q_s ei välttämättä ole kyllästyskosteus, mutta arvon on oltava vakio kyseiselle maalajille (Philips, 1954). Samoin K_s voi olla pienempi kuin kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus.

Kun oletetaan, että $H_0 \ll S_{av} + L_f$ ja käytetään kostean kerroksen paksuudelle arvoa $L_f = F/M$, voidaan Green-Ampt-kaava kirjoittaa muotoon (5):

$$f = K_s + K_s S_{av} / F \quad (5)$$

Tämä voidaan edelleen esittää muodossa (6):

$$f = A / F + B \quad (6)$$

A ja B ovat parametreja, jotka riippuvat maan ominaisuuksista, alkuperäisestä vesipitoisuudesta ja -jakaumasta sekä pinnan ominaisuuksista. Ne voidaan määrittää regressiomenetelmiä käyttäen.

Jotta kaava (5) olisi voimassa, täytyy maan pinnalla olla lätköitynyttä vettä. Silloin infiltroituminen pysyy infiltraatiokapasiteetin suuruisena. Luonnollisen sateen yhteydessä vettä ei ole aina ylimäärin ja infiltraatiotaso on kapasiteettia alhaisempi. Tällöin infiltraatio oletetaan sadannan suuruiseksi.

Mallin lähtöarvoina annetaan pohjavedenpinnan syvyyksiä vastaavat A :n ja B :n arvot taulukkomuodossa. Kun sade alkaa, A ja B interpoloidaan taulukosta pohjavedenpinnan alkukorkeutta vastaavalle tasolle. Kumulatiivisen infiltraation arvo iteroidaan tunnin aikaväleihin käyttäen yhtälöä 3.

Jos sateen voimakkuus ylittää infiltroitumiskapasiteetin, lätköityy vettä maan pinnalle pintavarastoksi. Vesitase maan pinnalla määritetään 3 minuutin aika-askelille kaavalla (7):

$$P = F + \Delta S + RO \quad (7)$$

missä:

P = sadanta (cm),

F = infiltraatio (cm),

ΔS = pintavesivaraston muutos (cm) ja

RO = pintavalunta (cm) ajanjaksolla $\Delta t (=3 \text{ min})$.

Pintavesivaraston muutos, pintavalunta ja infiltraatio ennustetaan jokaisen tunnin lopussa. Näitä arvoja lähtöarvoina käyttäen ennustetaan tuntisadannan perusteella taas seuraavan tunnin lopussa olevat arvot. Tätä toistetaan, kunnes sade on loppunut, ja koko pintavarasto on infiltroitunut.

A ja B -parametrien arvot pidetään muuttumattomina koko sademäärän infiltroitumisen ajan. Uudet arvot annetaan, kun sateen ja pintavesivaraston loppumisesta on kestänyt 2 tuntia (mielivaltaisesti valittu arvo). A:n ja B:n arvoja joudutaan kuitenkin muuttamaan kesken sateen, jos pohjavedenpinta nousee maan pinnalle. Silloin A saa arvon nolla ja B lasketaan tarkasteltavan profiilin alapuolella oleviin kerroksiin tapahtuneen suotautumisen, kuivatuksen kautta poistuneen veden ja haihdunnan summana.

4.1.2 Haihdunnan määrittäminen

Potentiaalisen haihdunnan (PET) suuruus riippuu nettosäteilystä, ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta sekä tuulen voimakkuudesta (Skaggs, 1980). PET tarkoittaa suurinta vesimäärää mikä poistuu maasta haihtumalla, kun vettä on vapaasti saatavilla.

Mallissa todellisen haihdunnan (ET) laskeminen suoritetaan kaksivaiheisesti. Ensin lasketaan potentiaalinen tuntihaihdunta säätietojen perusteella. Toisessa vaiheessa tarkistetaan, rajoittaako vedensaanti haihdunnan määrää.

PET-arvo lasketaan Makkinkin esittämällä kaavalla (8):

$$E_p = 0.7 * \Delta / (\Delta + \gamma) * R_s / \lambda \quad (8)$$

missä:

E_p = potentiaalinen haihdunta (mm/d),

Δ = höyrynpainekäyrän kaltevuus (Pa / °C),

γ = psykrometrivakio (= 66.7 Pa / °C),

R_s = tulosäteily (MJ/d),

λ = veden höyrystymislämpö (= 2.47 MJ / mm).

(Aslyng & Hansen, 1982)

PET jaetaan tasaisesti 12 tunnin ajalle (klo 6 - 18). Sateen aikana haihduntaa ei oleteta tapahtuvan, joten sadetunteina $PET=0$.

Kun PET on laskettu, tarkistetaan, täyttääkö vedensaanti potentiaalisen haihdunnan vaatimukset. Vedensaanti riippuu juuristokerroksen kosteudesta ja pohjavedenpinnan korkeudesta. Jos pohjavedenpinta on lähellä maan pintaa tai jos ylimpien maakerrosten kosteus on suuri, vedensaanti ei rajoita haihduntaa. Silloin haihdunta on yhtä suuri kuin potentiaalinen haihdunta.

Jos pohjavedenpinta on syvällä ja juuristokerros kuiva, haihdunnan vedensaanti riippuu veden kapillaarisesta noususta. Tämä taas riippuu maan hydraulisesta johtavuudesta ja pF-käyrän muodosta. Jos kapillaarinen imu on riittävä nostamaan vettä pohjavedestä maan pinnalle, tyydyttyä haihduntaan tarvittava vesimäärä tästä. Pohjaveden laskiessa osa haihduntaan tarvittavasta vedestä tulee juuristokerroksesta.

Kun juuristokerroksen kosteus saavuttaa raja-arvon, jona mallissa käytetään lakastumisrajaa, haihdunnan vedentarve voi tyydyttyä ainoastaan kapillaarisen nousun ansiosta. Tällöin todellinen haihdunta jää potentiaalista haihduntaa pienemmäksi ja on yhtä suuri kuin pintaan nouseva vesimäärä.

Lähtöarvoina vedentarpeen tyydyttymistä arvioitaessa on mallille annettava pintaan nouseva vesimäärä pohjavedenpinnan korkeuden funktiona.

4.1.3. Kuivatustilavuus

Kuivatustilavuus lasketaan mallissa ohuen maakerroksen vesitaseen muutoksen avulla. Ilman täyttämän huokostilavuuden muutos kullakin aika-askeleella esitetään seuraavasti:

$$\Delta V_a = D + ET + DS - F \quad (9)$$

missä:

$$\Delta V_a = \text{ilmatilan muutos (cm),}$$

D = salaojiin purkautuva vesimäärä (cm),

ET = haihdunta (cm),

DS = suotautuminen tarkasteltavan profiilin alapuolisiin kerroksiin (cm) ja

F = infiltraatio alueelle (cm) ajanjaksolla Δt .

Ilmatilavuuden eli kuivatustilavuuden ja pohjavedenpinnan korkeuden määrittämiseksi on monia vaihtoehtoja. Se voidaan määrittää suoraan suuresta häiriintymättömästä maanäytteestä. Toinen tapa on käyttää maan vesipitoisuuden tunnusarvoja. Tällöin kuivatustilavuus (V_d) pinta-alayksikköä kohti voidaan laskea veden kuivuessa maan pinnasta syvyyteen y_1 (kaava 10):

$$V_d = \int_0^{y_1} (q_0(y) - q(y)) dy \quad (10)$$

missä:

$q_0(y)$ = maan vesipitoisuus ennen kuivatusta ja

$q(y)$ = tasapainotilanteen vesipitoisuus.

Kerroksellisen maan tunnusarvot annetaan kerroksittain. Tietyn kerroksen kuivatustilavuus lasketaan ylempien kerrosten kuivatustilavuuksien perusteella. Jos tyhjentävä huokostilavuus tunnetaan, voidaan kuivatustilavuus määrittää graafisesti. Huokostilavuus on suoraan kulmakertoimen arvo kuivatustilavuus - pohjaveden pinnankorkeus -koordinaatistoon piirretylle suoralle.

4.1.4 Salaojista purkautuva vesimäärä

Maasta salaojiin kuivatustilanteessa ja salaojista maahan kastelutilanteessa virtaavan veden määrä lasketaan mallissa Hooghoudt'in kaavalla (11):

$$q = \frac{8Kd_{em} + 4K_m^2}{C L^2} \quad (11)$$

missä:

q = virtaama (cm/h),

K = tehokas horisontaalinen kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus (cm/h),

L = salaojien välinen etäisyys (m),

d_e = ekvivalentti syvyys vettä läpäisemättömään kerrokseen (cm),
 m = vedenpinnan korkeus ojien puolivälissä (cm).

Virtaama lasketaan tällä kaavalla silloin, kun vesi ei nouse maan pinnalle. Jos näin tapahtuu, laskemiseen käytetään Kirkham'in (1957) esittämää kaavaa (Skaggs, 1980). Kaavassa 11 esiintyvällä ekvivalentilla syvyydellä d_e pyritään korjaamaan virhettä, joka aiheutuu konversiosta salaojaputkien lähistöllä. Sen selvittämiseksi eri tilanteissa on Moody (1967) esittänyt seuraavat kaavat (kaavat 12-13):

Kun $0 < d/L < 0.3$,

$$d_e = \frac{d}{1 + d/L \{ 8/\pi * \ln(d/r) - \alpha \}} \quad (12)$$

missä:

$$\alpha = 3.55 - 1.6d/L + 2 (2/L)^2,$$

d = syvyys läpäisemättömään kerrokseen (cm),
 r = salaojaputkien säde (cm).

Kun $d/L > 0.3$,

$$d_e = \frac{L\pi}{8 \{ \ln(L/r) - 1.15 \}} \quad (13)$$

Kun virtaama on laskettu, sitä verrataan salaojien mitoitusvalumaan q_{mit} . Jos $q_{mit} > q$, virtaama saa arvon q . Jos $q_{mit} < q$, on virtaama yhtä suuri kuin mitoitusvaluma.

4.2 Sovellukset

4.2.1 Kuivatustehokkuus

DRAINMOD'in avulla tutkittiin, mitkä maaperän ja salaojituksen ominaisuudet voivat muodostua epätavallisen rankan sadannan vaikutuksesta kuivatusta rajoittaviksi. Samalla tutkittiin, millainen salaojituksen tulisi Holman pellolla olla, jotta putkisto kykenisi rankkasateen sattuessa kuivattamaan maan riittävän nopeasti. Tätä tarkasteltiin tilanteissa, joissa sade-ennustetta ei ollut käytettävissä ja silloin, kun sade-

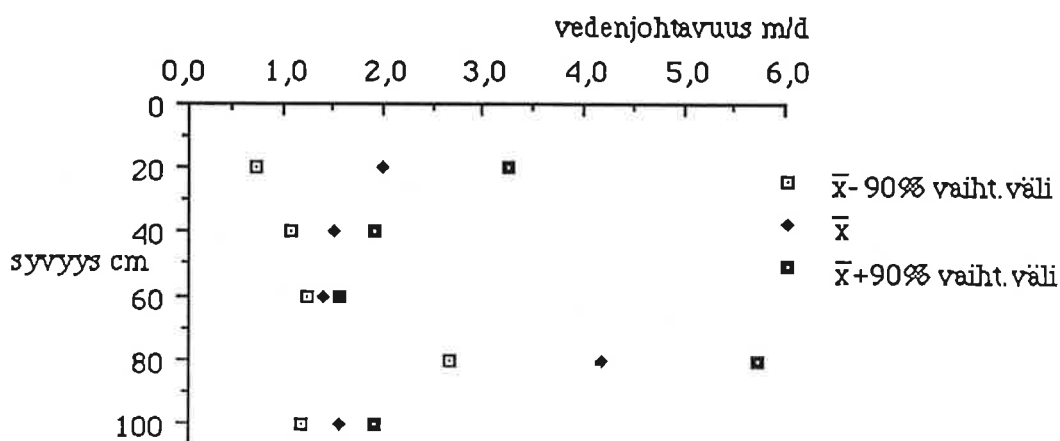
ennuste saatiin 1-2 päivää ennen sateen alkua. Riittävän voimakkaan sadannan aikaansaamiseksi käytettiin aluksi maksimisadanta-arvoja, jotka esiintyvät kerran viidessä, kymmenessä ja kahdessakymmenessä vuodessa. Sateen pituudet kullakin toistumisajalla olivat 1, 2, 5 ja 10 vuorokautta (taulukko 4):

Taulukko 4 Sademäärät (mm) eri toistumisajoilla ja jaksonpituuksilla (Kuusisto, 1986).

Jakson- pituus d	Toistumisaika a		
	5	10	20
1	41	50	20
2	58	68	82
5	76	96	113
10	98	120	150

Mitoitusvaluman q_{mit} arvoina käytettiin 0.5, 1.0, 1.5 ja 2.0 $ls^{-1}ha^{-1}$. Ojavälin arvo vaihteli 8 metristä 20 metriin. Ojasyvyyden vaikutusta kokeiltiin syvyysarvoilla 0.8 m, 1.0 m ja 1.2 m. Salaojaputkien tehoisa säde oli 2.5cm ja etäisyys läpäisemättömään kerrokseen 2m.

Vedenpidätyskäyrän arvot ja kyllästyskosteusarvot annettiin laboratoriossa tutkimuspisteelle K1 määritettyjen arvojen mukaan (luku 3.2.3 ja liite 2). Kriteerinä kuivatustehokkuutta tarkasteltaessa pidettiin sitä, että vesi saa nousta juuristokerrokseen korkeintaan yhdeksi vuorokaudeksi. Juuristokerroksen syvyydeksi perunalle arvioitiin 35 cm. Ojitustyyppinä käytettiin perinteistä salaojitusta.



Kuva 6 Profiilin K1 johtavuusarvojen keskiarvo ja 90%:n vaihteluväli.

Hydraulisen johtavuuden arvoina käytettiin laboratoriossa tutkimuspisteen K1 kullekin kerrokselle ajan funktiona määritettyjä K-arvoja. Niistä laskettiin kerroksittain keskiarvo sekä 90%:n vaihteluväli. Malliajoissa K-arvoina käytettiin joko keskiarvoa tai keskiarvoa vähennettynä tai lisättynä 90%:n vaihteluvälillä (kuva 6). Pohjavedenpinnan alkusyvyys oli 50cm.

4.2.2 Suoritus

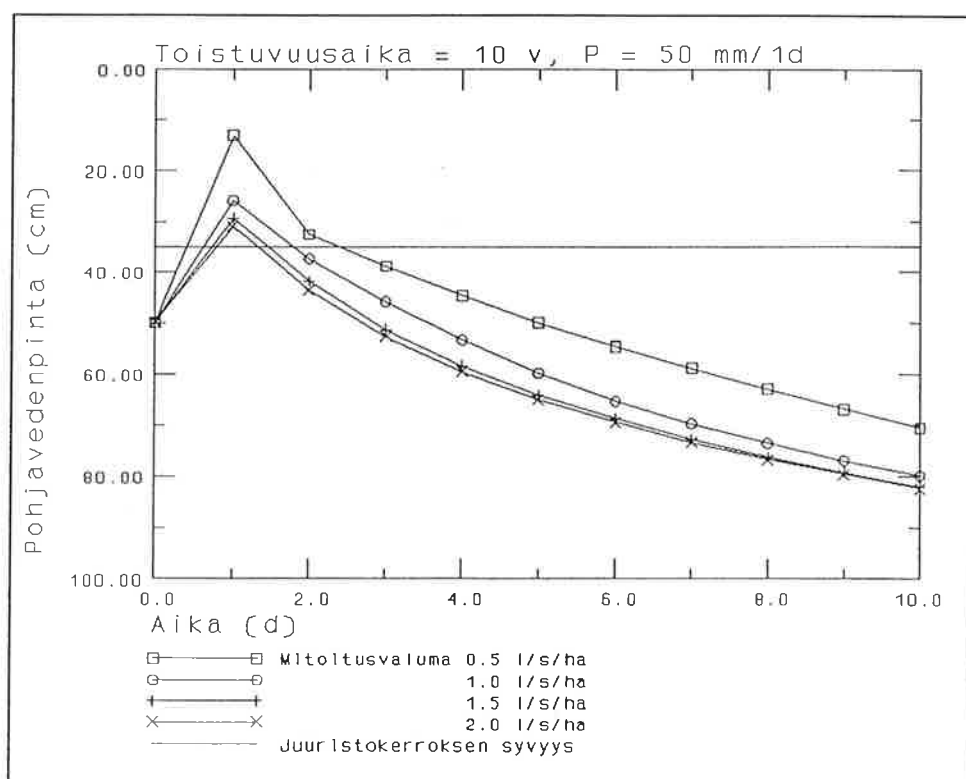
Aluksi systeemiä simuloitiin DRAIMOD mallilla noin 200 kertaa sellaisten sadanta-arvojen löytämiseksi, joilla maan kuivuminen olisi erittäin vaikeaa. Tällaisiksi osoittautuivat kerran kymmenessä vuodessa sattuva, yhden vuorokauden kestävä 50mm:n sade, sekä kerran 20 vuodessa sattuva, kaksi vuorokautta kestävä 82mm:n sade. Jatkossa sadantaparametreina käytettiin näitä arvoja.

Seuraavaksi tarkasteltiin parametrien merkitystä maan kuivumiseen. Ajo suoritettiin siten, että yhden parametrin arvoa muutettiin kerrallaan. Sen jälkeen tarkastettiin, vaikuttiko muutos kuivumisnopeuteen tai vaihtuiko kuivatusta rajoittanut parametri. Vaihteluparametrejä olivat K-arvo, q_{mit} , ojasyvyys, ojaväli ja sadanta. Sadeennusteen hyötyä tutkittiin siten, että se oletettiin saatavan ensimmäisenä tarkastelupäivänä. Pellon annettiin kuivua normaalilla ojituksella ennusteen saantipäivästä alkaen, ja sadannan arvo annettiin vasta toiselle tai kolmannelle päivälle. Jos oletettiin, ettei ennustetta ollut käytettävissä, sadannan arvo annettiin ensimmäiselle tarkastelupäivälle.

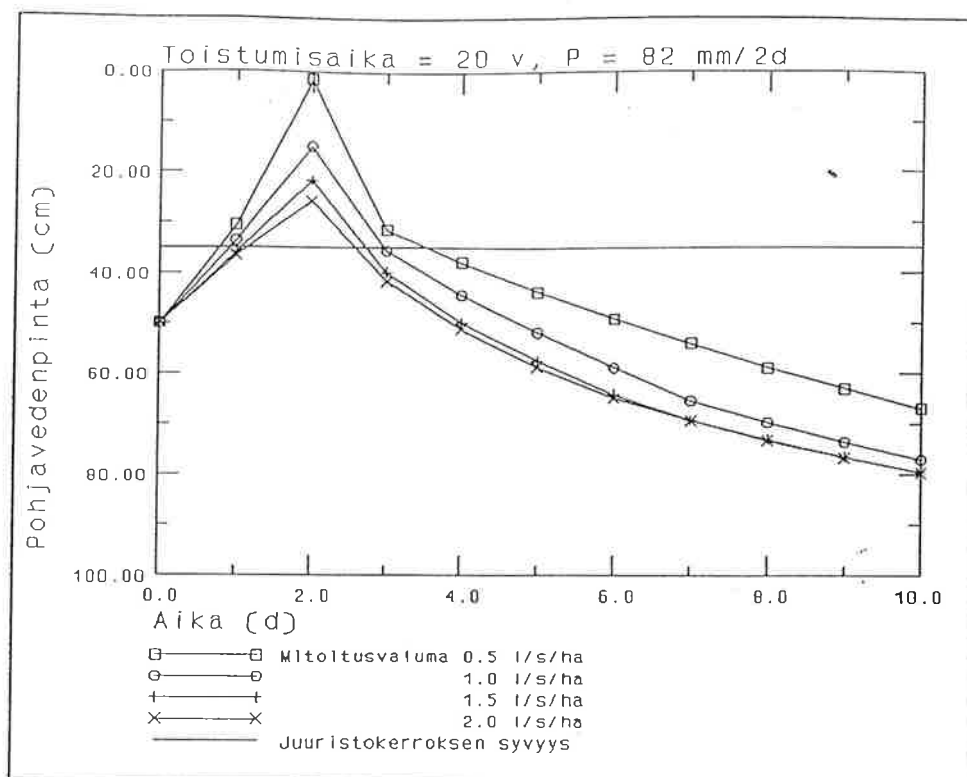
4.2.3 Tulokset

K-arvon vaihteluilla oli hyvin vähäinen merkitys maan kuivumisnopeuteen. Kyseisen pellon hydraulinen johtavuus on siis riittävän suuri sadeveden johtamiseksi salaojiin. Tällöin salaojien kyky johtaa vettä eteenpäin on kuivatuksen kannalta ratkaiseva. Kuivatusta rajoitti eniten mitoitusvaluma q_{mit} . Lisäämällä mitoitusvalumaa 0.5:sta 1.5:een $l s^{-1} ha^{-1}$, voidaan samalla ojavälillä ja -syvyydellä nopeuttaa veden poistumista juuristokerroksesta yli vuorokaudella (kuvat 7 ja 8). Mitoitusvaluman ollessa suurempi kuin $0.5 l s^{-1} ha^{-1}$ ei juuristokerros tarkastelussa käytetyillä sadannoilla joutunut koskaan täysin veden kyllästämäksi. Toisaalta kuvasta 8 nähdään, ettei maa 20 vuoden välein toistuvalla rankkasateella kuivunut juuristokerrosta syvemmälle vuorokauden kuluessa missään vaihtoehdossa.

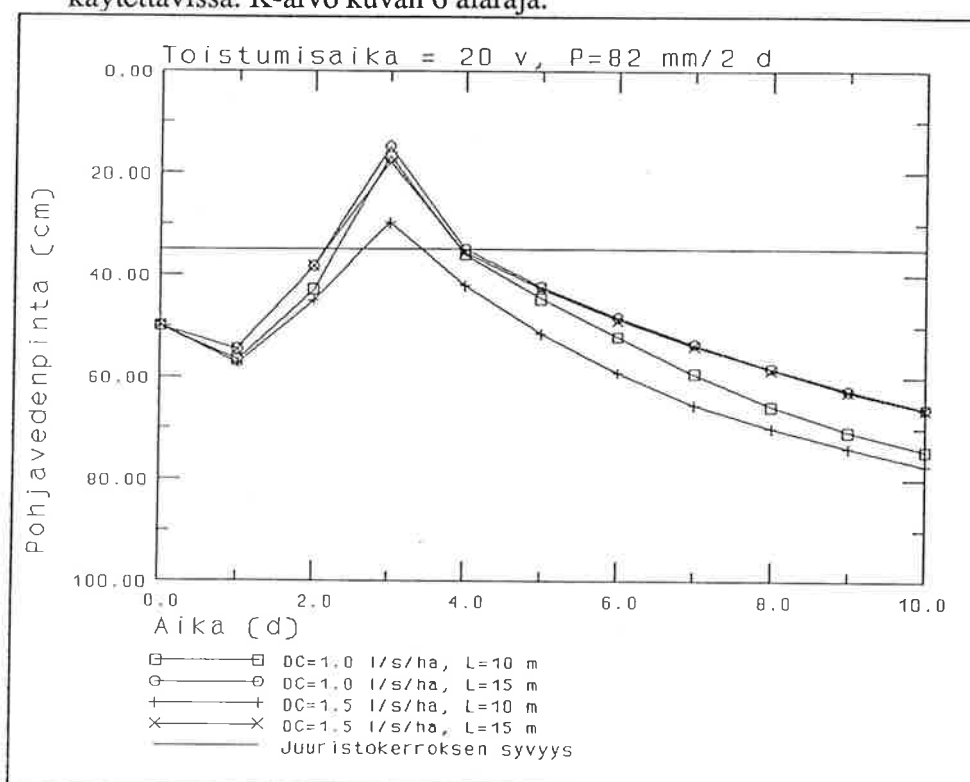
Kun sade-ennuste saatiin vuorokautta ennen sateen alkua, voitiin varastotilaa kasvattaa etukäteen (kuva 9). Näin juuristokerroksen kyllästymisaika lyheni puolesta vuorokaudesta vuorokauteen, verrattuna tilanteeseen jossa ennustetta ei ollut (vrt. kuvat 9 ja 8). Kuvasta 9 näkyy myös, että kun mitoitusvaluma oli liian pieni, tässä $1.0 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, ja sade rankka, ei ojavälin kaventamisella ollut merkitystä kuivumisnopeuteen. Kun mitoitusvalumaa kasvatettiin niin, ettei se enää rajoittanut kuivatusta ($\rightarrow 1.5 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$), voitiin ojaväliä pienentämällä nopeuttaa maan kuivumista huomattavasti.



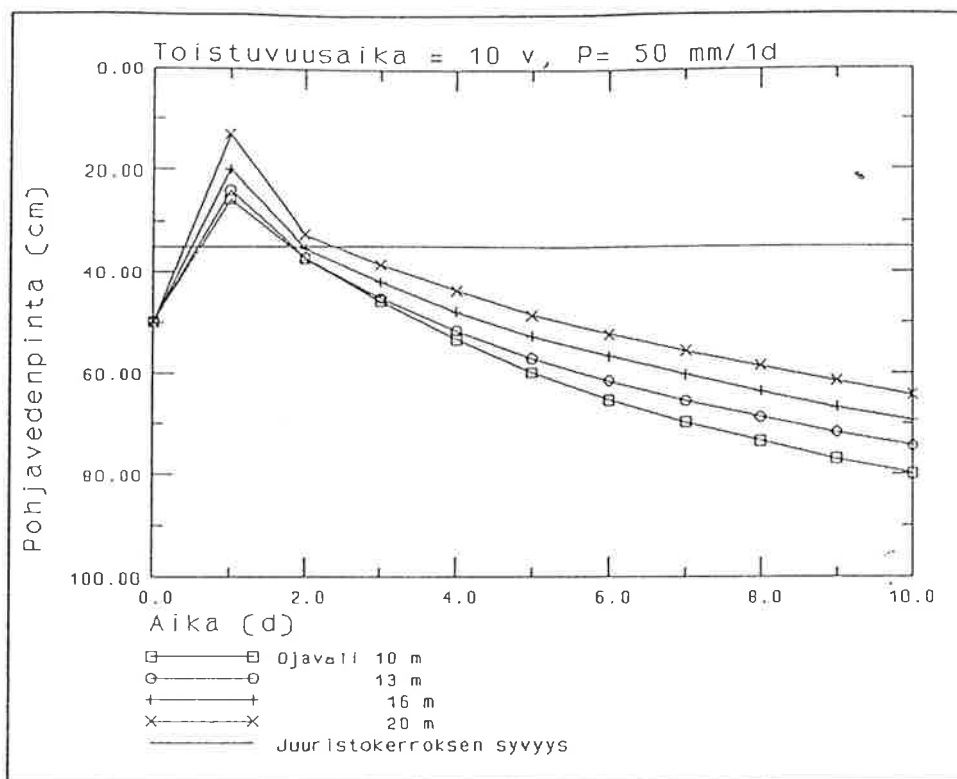
Kuva 7 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona mitoitusvaluman arvojen vaihdellessa. Ojaväli on 10m ja ojasyvyys 1.0m. Sade-ennustetta ei ole käytettävissä. K-arvo kuvan 6 alaraja.



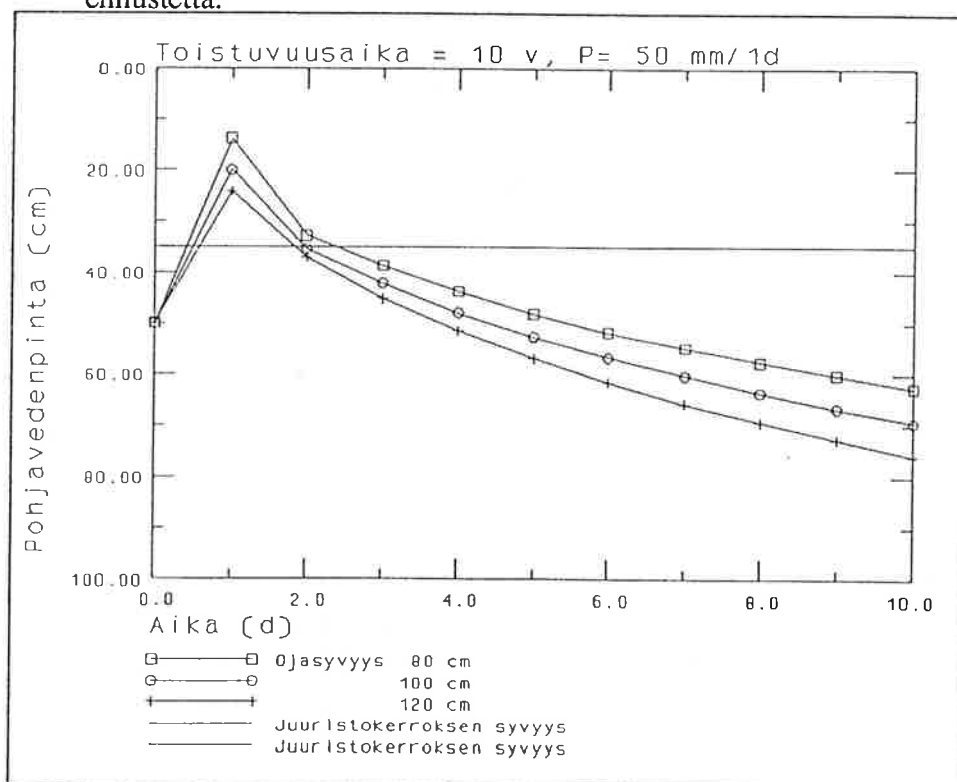
Kuva 8 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona mitoitusvaluman arvojen vaihdellessa. Ojaväli on 10m ja ojasyvyys 1.0m. Sade-ennustetta ei ole käytettävissä. K-arvo kuvan 6 alaraja.



Kuva 9 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona mitoitusvaluman ja ojavälin vaihdellessa. Sade-ennuste on saatu vuorokautta ennen sateen alkua. K-arvona kuvassa 6 esitetty alaraja. Ojasyvyys on 1m.



Kuva 10 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona eri ojaväleillä. Mitoitusvaluma on 1.0 l/s/ha ja ojasyyvyys 1.0 m . K-arvona kuvassa 6 esitetty alaraja. Ei sade-ennustetta.



Kuva 11 Pohjavedenpinnan korkeus ajan funktiona eri ojasyyvyksillä. Ojaväli on 16 m ja mitoitusvaluma 1.0 l/s/ha . K-arvona kuvan 6 alaraja. Ei sade-ennustetta.

Ojavälin vaikutusta pohjavedenpinnan korkeuteen tarkasteltiin myös silloin, kun sadanta oli yhden vuorokauden aikana 50mm (kuva 10). Pienillä ojavälin muutoksilla ei ollut juuristokerroksen kuivumisen eikä pohjavedenpinnan korkeuden kannalta merkitystä. Kaksinkertaistamalla ojaväliä 10m:stä 20m:iin hidastui juuristokerroksen kuivuminen lähes vuorokaudella. Samalla pohjavedenpinta nousi sateen vaikutuksesta yli 10cm korkeammalle. Ojitussyvyyden vaihtelulla oli ojaväliä vähäisempi merkitys kuivumisnopeuteen (kuva 11). Ojitussyvyyttä lisäämällä saatiin pohjavedenpintaa laskettua, mutta juuristokerroksen kuivuminen sateen jälkeen ei silti huomattavasti nopeutunut. Pohjavedenpinnan korkeuden laskukin oli vain 10cm silloin, kun ojitussyvyyttä lisättiin 40cm.

Jos sallitaan juuristokerroksen kyllästymisen korkeintaan yhdeksi vuorokauksi, on 50mm:n sadantaa mitoittamiseen käytettäessä salaojavälin oltava 10m ja mitoitusvaluman 1.5l/s/ha. Jos mitoittavana sadantana käytetään 82mm:n sadetta, ei pohjavedenpinta laske alle vuorokaudessa juuristokerroksen alapuolelle, paitsi jos saadaan ennuste vuorokautta aikaisemmin. Tällöin ojitukseksi riittää edellä mainittu.

4.2.4 Hydraulisen johtavuuden merkityksen tarkastelu

DRAINMOD'in avulla pyrittiin selvittämään maan hydrauliselle johtavuudelle vähimmäisarvo, jolla maa kuivuisi vaaditun ajan kuluessa. Aikaisemmista ajoista todettiin, että mitoitusvalumalla on merkittävin osuus pellon kuivumisnopeudelle. Sen vuoksi kriteerinä riittävälle K-arvolle pidettiin sitä, ettei se rajoita kuivumista.

Vedenpidätyskäyränä käytettiin Rijtema'n tyyppikäyrää nro 3 (loamy sand), jonka mukaan annettiin alkuparametrit (liite 4). Mitoitussateeksi valittiin yhden vuorokauden kestävä, 10 vuoden väliajoin toistuva 50mm:n sade. Ojaväli oli 10m ja ojasyvyys 1m. q_{mit} ja tehoisa säde olivat kuten kohdassa 3.4.1.

Ajo suoritettiin siten, että aluksi hydrauliselle johtavuudelle annettiin arvo 0.4m/d. Sitä pienennettiin, kunnes salaojista purkautuva vesimäärä ei enää ollut yhtä suuri kuin mitoitusvaluma. Tällöin oletettiin maan vedenjohtokyvyn rajoittavan veden johtumista putkiin.

4.2.5 Johtavuuden raja-arvo

Raja-arvoksi, jolla hydraulinen johtavuus alkoi rajoittaa kuivatusta, saatiin ajossa käytetyllä maalajilla 0.25m/d. Jos kriteerinä pidetään sitä, ettei juuristokerros kyllästy vedellä yli vuorokaudeksi, voidaan K-arvoa vieläkin pienentää. Tällöin raja-arvoksi saatiin 0.2m/d.

4.2.6 Pohjavedenpinnan liikkeiden tarkastelu

Pellolla tehdyn vedenpinnan nostokokeen tulosten arvioimiseksi tehtiin DRAINMOD'illa vastaava simulointikoe. Siinä arvioitiin ensin laboratoriossa määritettyjen K-arvojen oikeellisuutta siten, että alkutilanne, ennen kuin vettä alettiin lisätä järjestelmään, asetettiin samaksi kuin pellolla. Saran keskiosan pohjavedenpinnan alkukorkeus oli pellolla 51cm. Padotuskorkeudeksi annettiin vedenpinnan korkeus ojissa kokeen aikana eli 35cm maanpinnan alapuolella. Alkuarvoina annettiin myös sademäärä 44mm, joka mitattiin pellolla koeyönä. Sade jaettiin tasan kymmenen tunnin osalle siten, että se loppui seuraavana päivänä kello 12. Ojien syvyys oli 70cm ja niiden tehoisa säde 10cm.

Seuraavaksi selvitettiin, kuinka pohjavedenpinta olisi käyttäytynyt salaojitetulla pellolla. Sitä simuloitiin tilanteissa, joissa sadannan arvot olivat 44mm ja 0mm. Salaojien syvyydeksi annettiin 1m ja ojaväleinä käytettiin arvoja 10m ja 15m. Tehoisa säde oli 2.5cm ja alkuvedenpinnan korkeus 51cm. Kolmanneksi tutkittiin, kuinka nopeasti pohjavedenpinta saran puolivälissä nousee, kun pohjavesikastelu aloitetaan. Nousunopeutta tarkasteltiin ojaväleillä 10m, 12m ja 15m. Pohjavedenpinnan alkusyvyyydeksi asetettiin 100cm. Padotuskorkeus oli sama kuin edellä. Mitoitusvaluman arvona käytettiin 1.5l/s/ha kaikissa ajoissa ja ojitustapana pohjavesikastelua. pF-käyrän arvot sekä kyllästyskosteudet olivat samat kuin luvussa 3.4.1, K-arvot olivat em. luvussa esitetyt keskiarvot.

4.2.7 Tulokset

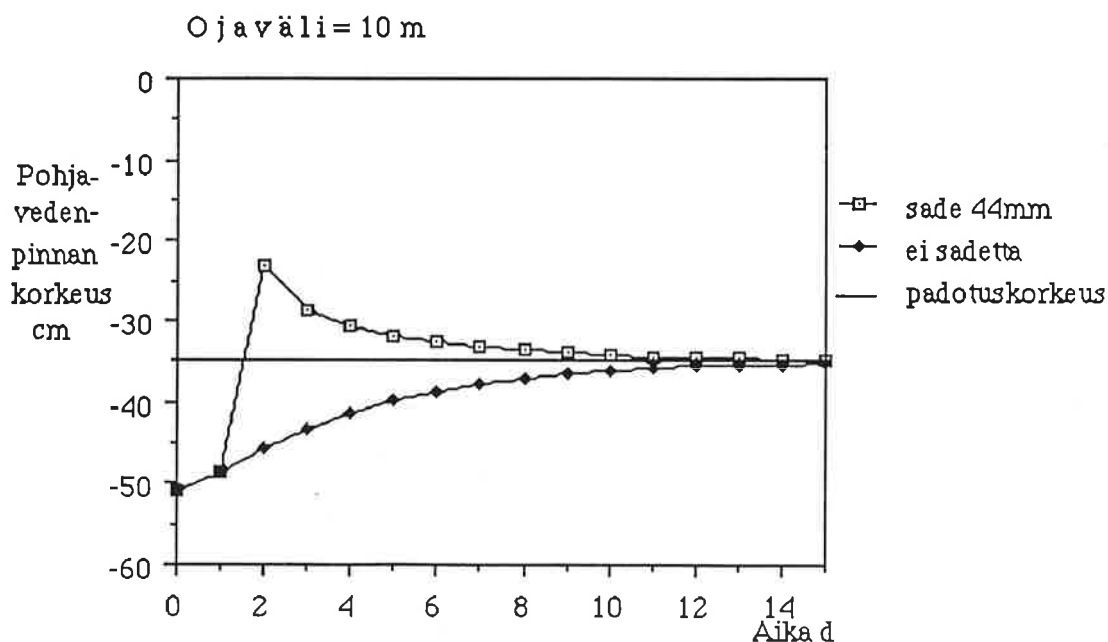
Pohjavedenpinnan liikkeiden simulointituloksia verrattiin kenttäkokeista saatuihin tuloksiin. Saran puolella välissä mitatut ja DRAINMOD'illa saadut vedenpinnan korkeusarvot on esitetty taulukossa 5. Niiden perusteella todetaan, että koska mallin lähtöarvoina käytettiin laboratoriossa määritettyjä K-arvoja, ja molemmilla

menetelmillä saatiin näin samankaltaiset tulokset, ovat määritetyt johtavuusarvot hyvin lähellä todellisia.

Taulukko 5 Simuloidut ja mitatut pohjavedenpinnan arvot saran puolella välissä avo-ojitetulla pellolla. Simuloinnissa ojaväli 15 m ja sade 44mm.

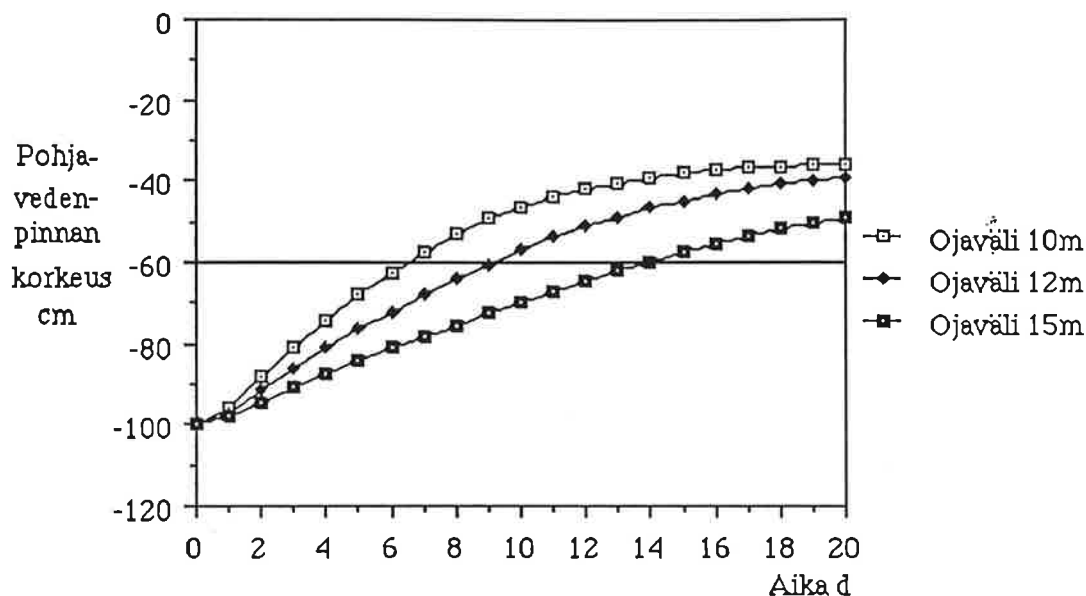
Aika h	Pohjavedenpinnan korkeus cm	
	DRAINMOD	Kenttäkoe
0	51	51
2	52	51
17	28	26
19	20	18
21	22	20
25	25	25

Pellolla tehdyssä nostokokeessa pohjavedenpinta oli sateen loppuessa 18cm:n etäisyydellä maanpinnasta. Mallilla suoritetuissa ajoissa pohjavedenpinta oli noin 20cm:n syvyydellä. Jos sadetta ei olisi tullut, olisi mallin mukaan vedenpinta noussut kahdessa vuorokaudessa noin 5cm. Vedenpinnan nousemiseen 35cm:n etäisyydelle maanpinnasta kuluisi 10m:n ojavälillä noin 14 päivää. Ojavälillä 15m aikaa kuluisi noin 30 vuorokautta. Vedenpinnan tasoittuminen padotuskorkeudelle tapahtuisi likimain samaan aikaan riippumatta siitä satoiko alussa vai ei (kuva 12).



Kuva 12 Pohjavedenpinnan käyttäytyminen vedennostokokeen aikana. Kuvassa on vertailtu tilannetta, jossa kokeen aikana sataa 44mm tilanteeseen, jossa sadetta ei tule.

Kastelua aloitettaessa vedenpinta nousi aluksi nopeasti, mutta padotuskorkeutta lähestyttäessä se hidastui. Perunalle sopiva pohjavedenpinnan syvyys, 60cm, saavutettiin 10m:n ojavälillä kuudessa vuorokaudessa. 12m:n ojavälillä aikaa kului yhdeksän ja 15m:n ojavälillä 14 vuorokautta (kuva 13).



Kuva 13 Pohjavedenpinnan käyttäytyminen, kun alkukorkeus on 100cm.

Kullakin ojavälillä on tällä maalajilla mahdollista nostaa pohjavedenpintaa 15cm viikossa, jos padotuskorkeus on riittävä. Tämä on suositeltava nostonopeus keväällä. Padotuskorkeuden alentaminen hidastaa kuitenkin nousunopeutta.

4.3 Sato- ja typpimalli

Satotason ja huuhtoutuvan typen tarkasteluun käytettiin Tuomo Karvosen (1990) kehittämää sato- ja typpimallia VESINIT. Malli laskee kuiva-ainesadon hehtaaria kohti päivittäisinä arvoina. Kuiva-ainemäärän laskemista ovat kuvanneet Karvonen ym. (1989a). Satoa rajoittaa käytettävissä olevan veden määrä. Todellinen päivittäinen sato lasketaan kaavasta

$$P_{\text{act}} = \frac{E_{\text{act}}}{E_{\text{pot}}} * P_{\text{pot}} \quad (14)$$

missä

P_{act} = todellinen kuiva-ainesato (kg/ha/d),

P_{pot} = potentiaalinen kuiva-ainesato (kg/ha/d),

E_{act} = todellinen haihdunta (mm/d),

E_{pot} = potentiaalinen haihdunta (mm/d).

Malli on kytketty DRAINMOD:iin siten, että todellisen ja potentiaalisen haihdunnan suhde lasketaan DRAINMOD:illa, minkä jälkeen luku siirretään VESINIT-ohjelmaan. Jos suhde on yhdestä poikkeava luku, rajoittaa veden määrä sadon kehitystä.

Mallin typpiosuus laskee huuhtoutuvan ammonium- ja nitraattitypen määrän, sekä mineralisoituneen typen ja kasvien ottaman typen määrät. Laskenta perustuu Karvosen ym.(1989b) esittämään tapaan. Typpimalli on myös kytketty haihdunnan laskennan kautta DRAINMOD:iin.

4.4 Sovellukset

4.4.1 Parametrit

Laskennassa käytettiin 15 vuoden säähavaintoja, joina annettiin Jyväskylässä vuosina 1974-1987 ja Oulunsalossa 1990 mitatut arvot. Juuristokerroksen syvyys ilman kasvustoa oli 5cm ja kasvukauden maksimisyvyys 30cm. Kylvöpäivä oli 1.6. K-arvot, pF-käyrä ja kyllästyskosteus sekä etäisyys läpäisemättömään kerrokseen olivat samat kuin kohdassa 3.4.1. Lannoitetaso oli 70 kg/ha typpeä. Typpimallissa tarvittavat maalajiominaisuudet annettiin Frissel & Veen'in (1981) esittämien arvojen mukaan. Pohjavedenpinnan korkeus keväällä oli 180cm.

Sadon kehitystä tarkasteltiin seuraavissa vaihtoehtoissa:

- 1) Perinteinen avo-ojitus,
- 2) pohjavesikastelu avo-ojitetulla pellolla,
- 3) perinteinen salaojitus,
- 4) pohjavesikastelu salaojitetulla pellolla ja
- 5) säätojitus salaojitetulla pellolla.

Lisäksi vertailtiin pohjavesikastelun ja perinteisen kuivatuksen vaikutusta ravinnehuuhtoumiin salaojitetulla pellolla tilanteessa, jossa pohjavedenpinnan alkukorkeus keväällä oli 100cm. Tehoisana säteenä käytettiin avo-ojituksessa 10cm ja salaojituksessa 2.5cm. Ojien syvyydet olivat vastaavasti 70cm ja 100cm. Ojavälin

vaikutusta satotasoon ja typpihuuhtoumiin tarkasteltiin vaihtelemalla etäisyyttä kymmenestä kahteenkymmeneen metriin.

4.4.2 Säättöjituksen ja pohjavesikastelun kustannukset

Pelkkää säättöjitusta harkittaessa suurimmat kustannukset aiheutuvat salaojituksesta eli putkista, työstä, laskuaukoista ja maan tasauksesta. Salaojitus on tehtävä normaalia tiheämmäksi, mikä lisää kustannuksia tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna. Vuonna 1989 salaojittaminen maksoi Oulun alueella keskimäärin 17.20 mk/m, kun mitoitusvaluma oli 1l/s/ha. Kymmenen metrin ojavälillä kustannus on 17200 mk/ha. Maan tasaus on suoritettava säättöjitetuilla pelloilla huolellisesti. Arvion mukaan (Holma, 1991) tasauksen kustannus on 3000-5000mk/ha. Laskuaukkoina toimivat kaivon renkaat maksavat noin 60mk/kpl. Lisäkustannuksia aiheuttavat patorakennelmat. Ne voidaan rakentaa osittain maa-aineksesta.

Pohjavesikastelua käytettäessä patojen on oltava helppokäyttöisiä, sillä ne on voitava avata ja sulkea sateiden yhteydessä. Tällaiset patoluukut maksavat 400-500mk/kpl. Pohjavedenpinnan korkeuden tarkkailua varten tarvitaan tarkkailukaivoja. Jos tarkkailu on automaattista, aiheutuu mm. kelluntakytkimistä lisäkustannuksia.

Pohjavesikastelua suunniteltaessa on salaojituksen lisäksi investoitava vedenhankintaan. Halvinta on pintaveden käyttö. Jos sitä voidaan johtaa pelloille painovoiman avulla, tarvitaan riittävän suuret putket ja laskuaukot veden johtamiseen. Esimerkiksi 4":n putki maksaa noin 40mk/m. Järvi- ja jokivettä käytettäessä on veden mukana kulkeutuvien sedimenttien joutuminen salaojaputkistoon estettävä. Tätä varten on rakennettava saostusallas pellon lähetyville.

Jos vesi joudutaan pumppaamaan, pumpun hankinta ja vuotuiset käyttö- ja kunnossapitokustannukset aiheuttavat kuluja. Holman tilalla käytössä oleva Mamek LL80-jätevesipumppu maksaa noin 12000mk. Sähkökeskukseen ja liittymän hankintaan liittyvät kustannukset ovat Oulun alueella noin 18000mk. Kunnossapito- ja käyttökustannukset ovat noin 6000mk vuodessa kumpikin. Sähkön osuus käyttökustannuksista on noin 300mk/a.

Edellä esitettyjen kustannusten perusteella on laskennassa käytetty säättöjituskustannuksina arvoa 1200mk/ha. Pohjavesikastelun vedenhankintaan tarvittavat välineet maksavat noin 6000mk/ha ja vuotuiset käyttö- ja

kunnossapitokustannukset ovat noin 700mk/ha. Käyttökustannuksissa ei ole huomioitu ojavälin vaikutusta tarvittavan kasteluveden määrään. Salaojituskustannukset on laskettu edelläesitetyn arvion mukaan, joten esimerkiksi 14 metrin ojavälillä ne ovat noin 12300mk/ha.

4.4.3 Suoritustapa

Tutkimuksessa selvitettiin, kuinka suuri katetuoton parannus voidaan saavuttaa pohjavesikastelua käyttämällä. Lähtökohtana käytettiin mallin antamia kuiva-ainesadon määriä eri ojaväleillä ja ojitustavoilla. Sen jälkeen laskettiin eri vaihtoehdoilla saatujen satomäärien suhde Holman pellon nykytilanteeseen, eli pohjavesikasteltuun avo- ojitukseen. Tämän jälkeen muutettiin suhteelliset kuiva-ainemäärät satomääriksi, jossa nykytilanteena käytettiin 35tha⁻¹ ja 40tha⁻¹.

Tuotto, joka saadaan siirtymällä pohjavesikasteluun, laskettiin siten, että vuotuiset sadonparannuksesta saatavat lisätulot sekä kastelun käyttökustannukset diskontattiin nykyaikaan. Laskentakorkoina käytettiin 8% ja 6%. Tuotoista vähennettiin vuotuiset kustannukset sekä pohjavesikasteluun siirtymisestä aiheutuvat kustannukset nykytilanne huomioiden. Kustannukset on laskettu luvun 4.4.2 mukaan. Laskenta-aikana käytettiin 50 vuotta ja 15 vuotta. Saponparannuksesta saatavat lisätulot laskettiin julkaistujen (1990) katetuottolaskelmien mukaan.

Mallin avulla arvioitiin myös pohjavesikastelun ja ojavälin vaikutusta typpihuuhtoumiin. Typpihuuhtoumia tarkasteltiin samoissa tilanteissa kuin kuivasadon kehitystäkin. Sen lisäksi vertailtiin pelkän säätöojituksen ja perinteisen salaojituksen vaikutusta huuhtoumiin silloin, kun pohjavedenpinta on keväällä korkealla. Huuhtoumille laskettiin suhteelliset luvut perinteiseen salaojitukseen verrattuna.

4.4.4 Sato-osan tulokset

Mallilla saaduista kuiva-ainesaannoista lasketut suhteelliset satomäärät on esitetty taulukossa 6. Sadot on laskettu 15 vuoden tulosten keskiarvoista. Suurin sato saadaan pohjavesikastellulla, salaojitetulla pellolla, kun ojaväli on 10m. Tämä on noin 10% parempi kuin sato, joka saadaan pohjavesikastellulta, avo- ojitetulta pellolta. Parannus

saavutetaan yksinomaan sillä, että pellon hyötypinta-ala kasvaa avo-ojituksesta salaojitukseen siirryttäessä.

Maalajilla, jota tarkastelussa käytettiin, ei pelkkä kuivatuksen sääteleminen antanut sadonparannusta (taulukko 6). Perinteisesti salaojitettun ja sääätösalojitettun pellon suhteelliset sadot ovat mallin antamien tulosten perusteella samat. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että maan rakenne on sellainen, että se kykenee varastoimaan lähes kaiken sadeveden ilman padotustakin. Jos sademäärät olisivat suurempia tai maa olisi muuten kosteampaa, säätelyllä saataisiin parannus satoon. Tilanteessa, jossa pohjavedenpinnan alkukorkeus keväällä oli 100cm, säätely paransi salaojitetulla pellolla satoa noin 0.5%. Pohjavedenpinnan pienempi alkukorkeus ei siis vaikuta oleellisesti suhteellisiin satoihin.

Taulukko 6 Eri ojitustavoilla saavutetut sadot suhteellisina lukuina. Satoja on verrattu Holman pellolta nykytilanteessa saataviin satoihin. 100 = sato avo-ojitetulla pellolla, jossa on pohjavesikastelu, ojaväli = 16m. Pohjavedenpinnankorkeus keväällä 180cm.

Ojaväli m	O J I T U S T Y Y P P I				
	Pohjavesikastelu		Perinteinen		Säädely
	Avo	Sala	Avo	Sala	Sala
8		109.3			
10	96.5	109.6	85.8	97.5	97.5
12	98.6	109.5	87.8	97.5	97.5
14	99.7	109.0	89.2	97.5	97.5
16	100.0	108.2	90.2	97.5	97.5
18	99.8	107.1	91.1	97.5	97.5
20	99.4	105.9	91.7	97.5	97.5

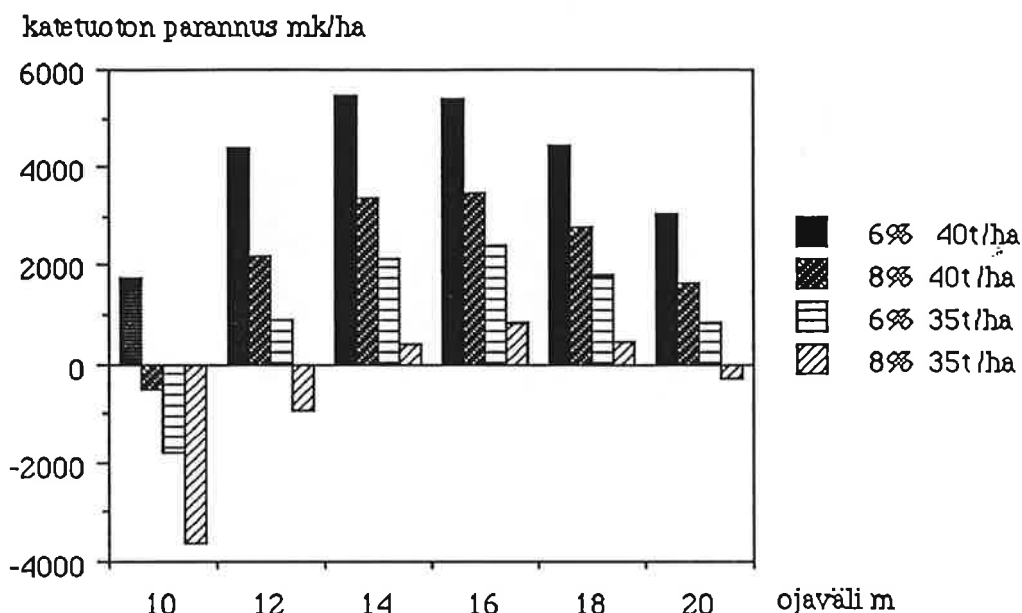
Parannus, joka saadaan katetuottoon siirryttäessä pohjavesikasteluun, on esitetty kuvissa 14-16. Avo-ojitettun pohjavesikastelupellon muuttaminen salaojitetuksi antaa vähiten tuoton lisäystä sekä 15 vuoden että 50 vuoden aikajaksoa tarkasteltaessa. Edullisin vaihtoehto tässä tapauksessa on 14m:n ojaväli (kuvat 14 a ja b).

Perinteisen salaojituksen muuttaminen pohjavesikasteluksi kannattaa lyhyellä aikavälillä parhaiten. 15 vuoden kuluttua se on maksanut itsensä takaisin kaikilla tarkastelluilla vaihtoehtoilta (kuva 15 a). Ojavälillä 10m sadaan suurin parannus katetuottoon molemmilla tarkasteluajaväleillä (kuvat 15a ja b). Tämä johtuu siitä, että

pelto on alunperin salaojitettu ja muut pohjavesikastelusta aiheutuvat kustannukset eivät riipu ojavälistä. Tällöin suurin sadonparannus antaa myös suurimman tuoton.

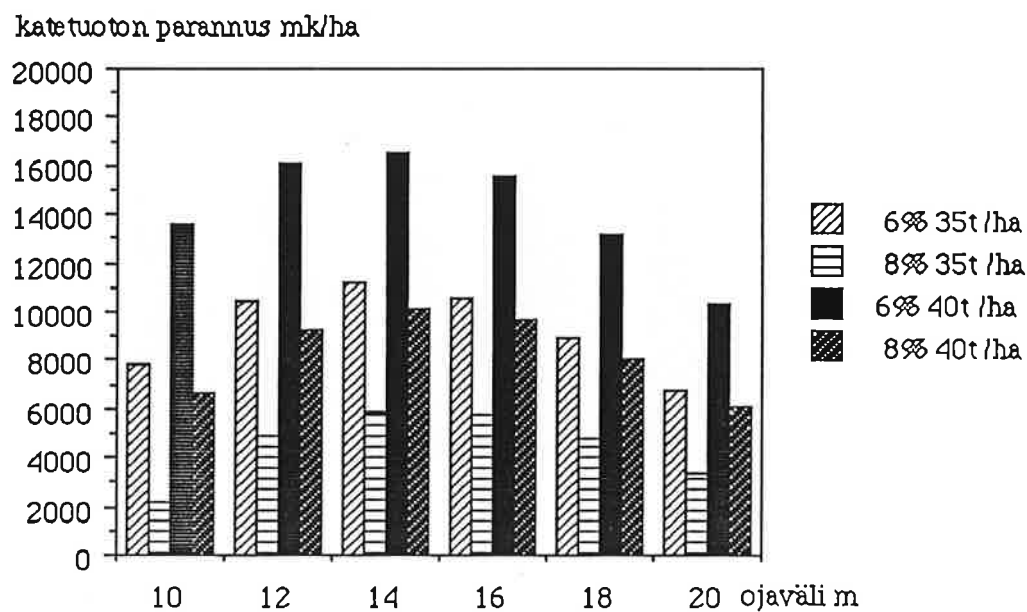
14a)

Tarkasteluaika 15 v



14b)

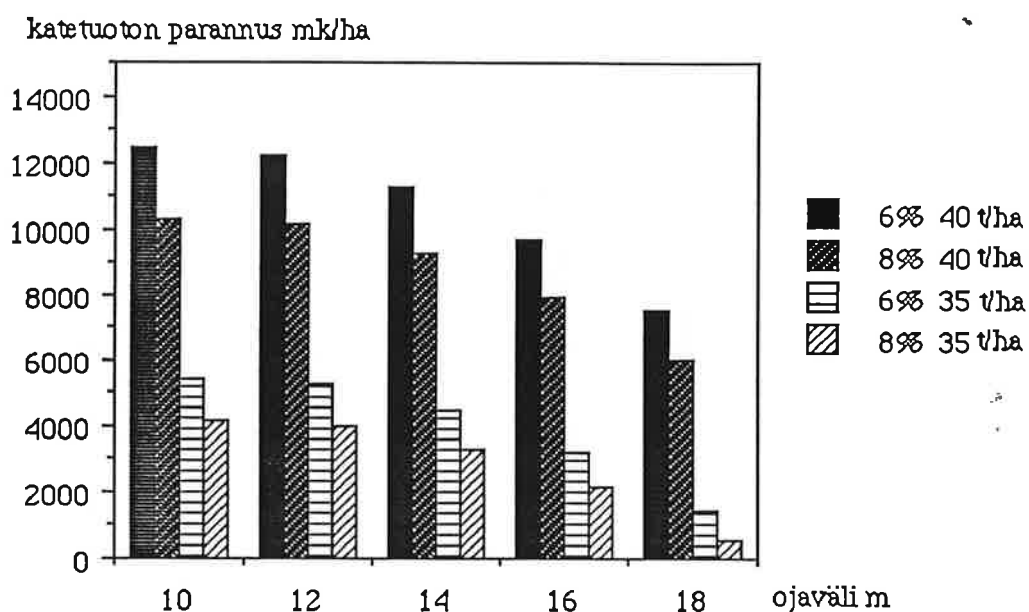
Tarkasteluaika 50 v



Kuva 14 Katetuoton parannus siirryttäessä avo-ojitetusta pohjavesikastelusta salaojitettuun pohjavesikasteluun. Vertailutilanteen avo-ojituksen ojaväli 16m. Laskenta-aika a) 15v, b) 50v.

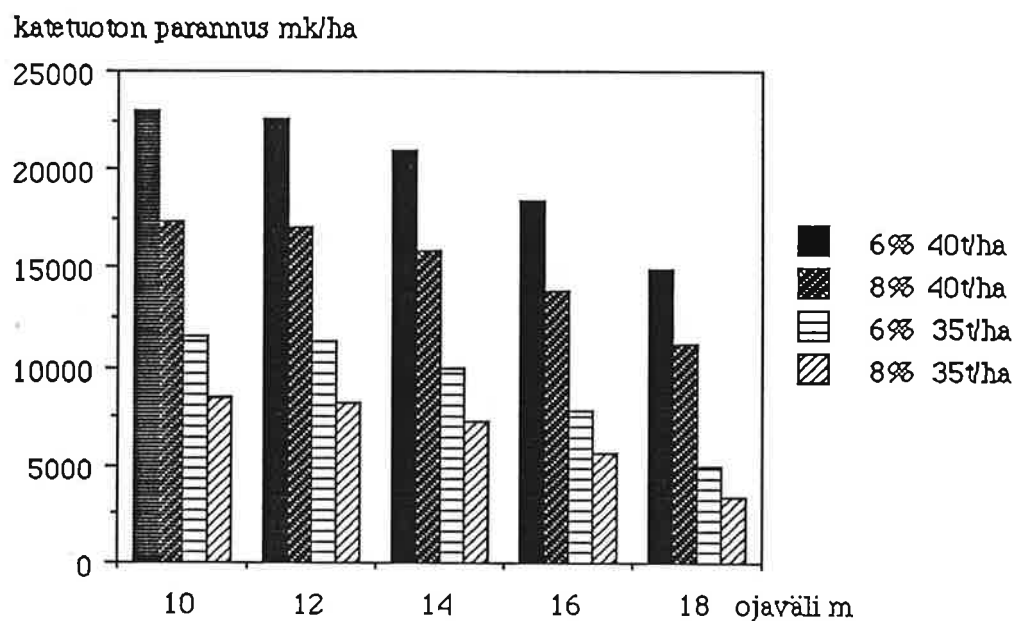
15a)

Tarkasteluaika 15 v



15b)

Tarkasteluaika 50 v

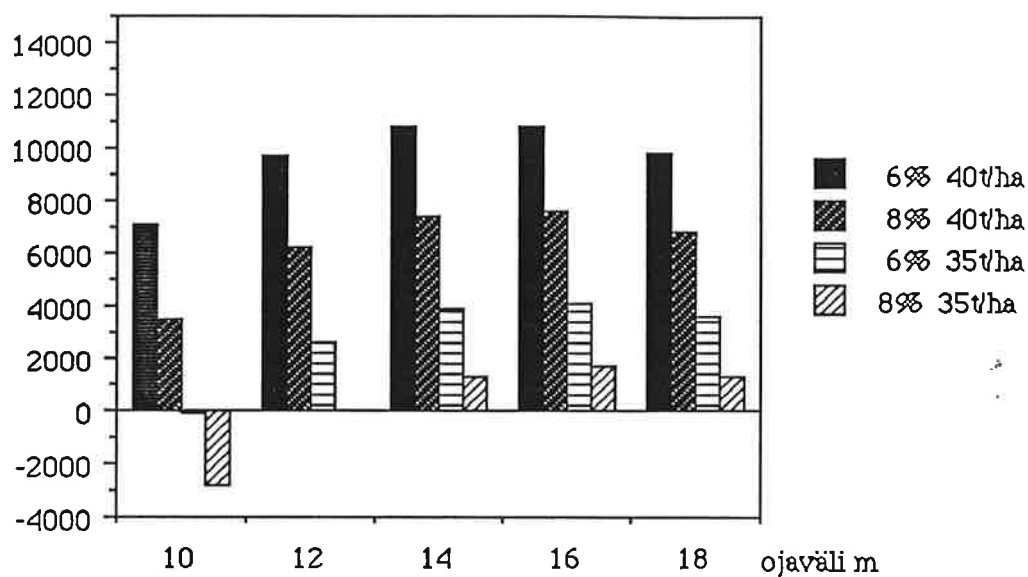


Kuva 15 Katetuoton parannus siirryttäessä perinteisestä salaojituksesta pohja-vesikasteluun. Vertailu suoritettu kullakin ojavälillä erikseen. Laskenta-aika a) 15v, b) 50v.

16a)

Tarkasteluaika 15 v

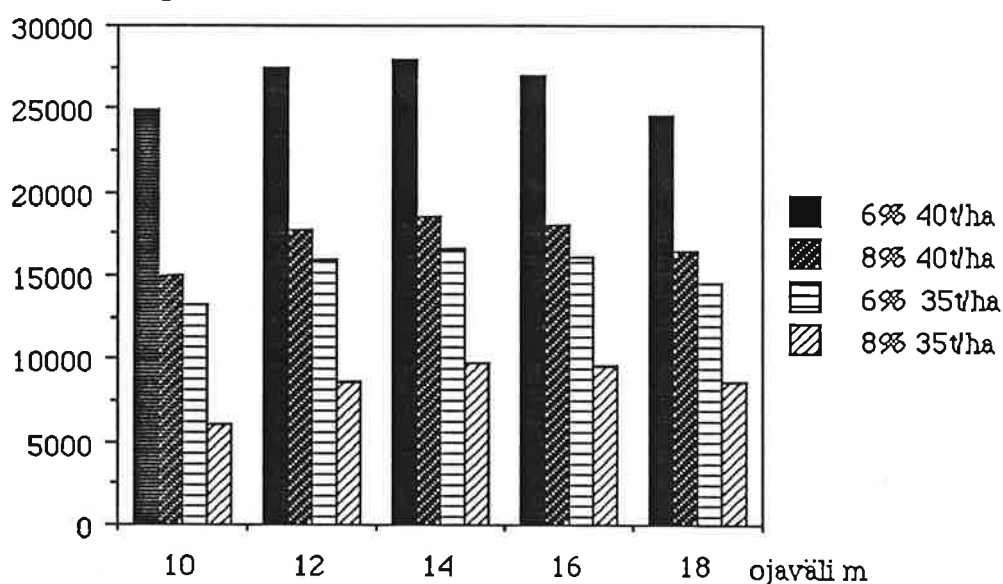
katetuoton parannus mk/ha



16b)

Tarkasteluaika 50 v

katetuoton parannus mk/ha



Kuva 16 Katetuoton parannus siirryttäessä perinteisesti kuivatetulla avo-ojitetulla pellolla salaojitukseen ja pohjavesikasteluun. Tuottoa verrattu satotasoon avo-ojitetulla pellolla, jossa ojaväli 16m. Laskenta-aika a) 15v, b) 50v.

Pitkän aikavälin tarkastelussa perinteisen avo-ojituksen muuttaminen salaojitetuksi pohjavesikasteluksi on kannattavinta (kuva 16b). Se antaa suurimman tuoton lähes kaikissa vaihtoehtoissa. Paras vaihtoehto on kuitenkin 14m:n ojaväli. Tällöin sadonparannus suhteessa ojituskustannuksiin on edullisin. Lyhyemmällä aikavälillä on edullisempaa panostaa ojituskustannuksiin vähemmän, eli käyttää leveämpää ojaväliä. 15 vuoden tarkastelussa on 16m:n ojavälillä paras tuotto (kuva 16a).

4.4.5 Typpiosan tulokset

Typpihuuhtoumat pienenivät merkittävästi pohjavesikastelua käyttämällä silloin, kun pohjavedenpinta oli keväällä korkealla. Typeä huuhtoutui tarkastellulla maalajilla keskimäärin 2.1kg ha^{-1} vuodessa. Ammoniumtypen osuus oli tästä kolmannes. Huuhtoutuneen nitraattitypen määrä väheni 6-25 % (taulukko 7a). Kokonaistyyppi-huuhtoumat vähenivät 15-35%. Vähennys kasvoi ojavälin leventyessä. Tapauksessa, jossa vedenpinta keväällä oli syvällä (180cm), olivat huuhtoumat hyvin vähäisiä, keskimäärin 0.1kg ha^{-1} vuodessa, sillä kokonaisvirtaamakin oli vähäinen. Tässä tapauksessa kuivatuksen säätelyllä salaojituksen yhteydessä voitiin eliminoida huuhtoumat kokonaan. Tilanteessa, jossa pohjavedenpinta on korkeammalla (taulukko 7b), on kokonaistyyppihuuhtoumien vähennys vain 3-10%. Säättöojituksella saatava vähennys on siis kosteusoloista riippuen 3-100%. Denitrifikaatiotasoa nousi pohjavesikastelun vaikutuksesta moninkertaiseksi (taulukko 7a). Tämä johtui lisääntyneestä maan kosteudesta, jonka seurauksena happipitoisuus vähenee.

Taulukko 7 Typpihäviöiden suhteelliset määrät a) pohjavesikastellulla ja b) säädellyllä salaojitetulla pellolla. 100 = määrä perinteisessä salaojituksessa vastaavalla ojavälillä. Pohjavedenpinnan alkukorkeus keväällä 100cm. Padotuskorkeus 60cm.

a)

Ojaväli	Huuhtoutuva typpi		Denitri- fioituva
	NO3	NH4	
10	94	55	410
15	83	54	340
20	75	50	270

b)

Ojaväli	Huuhtoutuva typpi		Denitri- fioituva
	NO ₃	NH ₄	
10	94	100	126
15	95	100	115
20	86	99	123

Korkean denitrifikaatioasteen johdosta typen kokonaishäviöt maassa lisääntyivät pohjavesikastelun vaikutuksesta. Lisääntynyt denitrifikaatio ei kuitenkaan lisää ympäristöhaittoja, joten vesistöjen kannalta on edullista suosia denitrifikaatioprosessia.

4.5 Pohjavesikastelun käyttömahdollisuudet Suomessa

Viljavuuspalvelun maalajianalyysien mukaan Suomen peltöjen pohjamaat koostuvat eri maalajeista taulukon 8 mukaisesti. Esitettyjen arvojen perusteella Suomen peltomaista 41.6% on sellaisia, joilla voitaisiin käyttää ojitusta kuivatus- ja kastelutarkoituksiin. Luku on kuitenkin erittäin karkea arvio. Savimaiden, jotka eivät ole aitosavea, osuus peltomaista on yli 30% ja moreenimaiden 10.2%. Näiden soveltuvuutta ei pystytä arvioimaan ilman tarkempia tutkimuksia.

Taulukko 8 Eri maalajien osuus Suomen peltöjen pohjamaista (Kähäri ym., 1987).

Maalaji	% kok.peltoalasta
Hiekkamaat	1.3
Hietamaat	26.4
Hiesumaat	13.9
Savimaat kok. (- Aitosavi)	39.2 (7.8)
Turvemaat	6.0
Moreenimaat	10.2
Multamaat	1.9
Liejumaat	1.1
yht.	100.0

Nykyisin Suomessa on peltomaata noin 2.5 miljoonaa hehtaaria. Siitä jo salaojitettua on yli miljoona hehtaaria (Anon., 1987). On vaikea arvioida, kuinka suuri osa näistä pelloista soveltuisi pohjavesikasteluun tai tarvitsisi sitä. Niiden muuttamiseksi tähän tarkoitukseen tarvittaisiin vedenhankinnan ja patolaitteiden lisäksi usein myös tihennetty salaojitus. Sen kannattavuus riippuu ennustettavissa olevasta sadonparannuksesta. Edellämainittu, maalajiltaan pohjavesikasteluun soveltuva alue, 41.6% eli noin miljoona hehtaaria Suomen peltoalasta, ei todennäköisesti ole kokonaisuudessaan muutettavissa tähän tarkoitukseen. Jo ojitettuja peltoja vapautuu kuitenkin säästöojituksen käyttöön, kun vanhoja ojituksia joudutaan uusimaan. Uudet, raivattavat pellot ja vanhat ojittamattomat pellot ovat kuitenkin ensisijaisia pohjavesikastelukohteita.

Pelloilta vesistöön huuhtoutui Suomessa vuonna 1984 noin 1400 tonnia eli 0.57 kg ha^{-1} fosforia. Typen vastaavat luvut olivat 31000 tonnia eli 12 kg ha^{-1} (Kauppi, 1984). Jos kaikilla Suomen peltomailla olisi käytössä pohjavesikastelu, vähenisivät fosforihuuhtoumat (amerikkalaisia tuloksia käyttäen) 610 tonnilla eli 0.25 kg ha^{-1} :lla vuodessa. Typpimallilla saatujen tulosten mukaan kokonaistyyppihuuhtoumat vähenisivät keskimäärin 7800 tonnilla eli 3.0 kg ha^{-1} :lla vuodessa. Jos kastelu ulotettaisiin vain siihen soveltuviin peltoihin, vähenisivät fosfori- ja typpihuuhtoumat vastaavasti 250 tonnilla ja 2900 tonnilla vuodessa. Tälläkin olisi vesistön kuormittumista ratkaisevasti vähentävä vaikutus.

Nykyisten peltomaiden ravinnehuuhtoumia voitaisiin vähentää myös pelkällä säästöojituksella. Edellisen luvun perusteella säästöojituksella saavutettava huuhtoumien väheneminen riippuu maan kosteusoloista. Jos pohjavedenpinnan alkukorkeuden ollessa 180cm vähennys on 100%, voidaan arvioida, että keskimääräinen huuhtoumien väheneminen olisi 40% erilaisissa olosuhteissa. Tämän perusteella Suomen peltojen säästöojittaminen vähentäisi typpihuuhtoumia noin 13000 tonnilla vuodessa.

Esitetyt luvut pohjavesikasteluun soveltuvista peltoaloista ovat suuntaa antavia. Ilman kullakin pellolla suoritettuja tarkkoja tutkimuksia on vaikea tietää, soveltuuko kyseinen alue salaojitettavaksi kuivatus/kastelu tarkoitukseen. Evans & Skaggs (1989) esittävät, että alueilla, joilla hydraulinen johtavuus on keskimäärin alle 0.5 md^{-1} , olisi tehtävä vähintään yksi K-arvon määrittäminen kahden hehtaarin peltoalaa kohden. Pelto- ja maalajikohtaisten ominaisuuksien vaikutusta ravinnehuuhtoumiin olisi myös tutkittava lisää.

6. TULOSTEN TARKASTELU

Tehdessään päätöstä pohjavesikastelun sopivuudesta pellolle viljelijä joutuu kiinnittämään huomiota lähinnä vedenhankintamahdollisuuteen. Suomessa joki- tai järvivettä on useimmiten saatavilla, eikä pohjaveden hankintakaan ole vaikeaa. Sopivan vesilähteen puuttuessa lähistöltä saattaa vedenhankinnasta muodostua niin paljon kustannuksia, ettei niitä pystytä kattamaan sadonlisäyksestä saatavalla tuoton parannuksella. Muut aluekohtaiset ominaisuudet eivät rajoita pohjavesikastelua niin merkittävästi, jos mitoitusvaluma saadaan riittävän suureksi. Tällöin hydraulinen johtavuuskin voi olla melko huono vaikeuttamatta ojituksen toimivuutta. Kirjallisuudesta (Evans & Skaggs, 1980) saatu ohjeellinen arvo pienimmästä johtavuudesta, jolla pohjavesikastelu voisi toimia, on 0.5 md^{-1} . Mallissa käytetylle maalajille näyttäisi vieläkin pienempi hydraulisen johtavuuden arvo (0.2 md^{-1}) olevan mahdollinen, jos vain salaojien vetokyky pystytään nostamaan riittävän suureksi.

Satomallilla ei saatu näyttöä siitä, että perinteisen ojituksen padottaminen lisäisi satoa. Tämä johtui todennäköisesti tarkastelussa käytetystä maalajista. Sen kyky pidättää vettä on niin suuri, että salaojista purkautuvan veden määrä oli tarkastelussa erittäin vähäinen. Tällöin padotus ei lisännyt käytettävissä olevan veden määrää, eikä siten satoa. Tilanteeseen vaikutti myös kevään pohjavedenpinnan korkeus. Koska se oli syvällä, 180 cm :ssä, suuri osa sadevedestä kului huokostilan täyttämiseen, eikä sitä purkautunut salaojista.

Salaojitusta suunniteltaessa on tehtävä päätös siitä, halutaanko ojituksesta niin varma, että se kykenee kuivattamaan maksimisadannat, joita esiintyy kerran kymmenessä tai kahdessakymmenessä vuodessa. Toisena vaihtoehtona on mitoittaa ojitus suurimman katetuoton parannuksen mukaan, ja ottaa riski, että sato kärsii liiallisesta märkyydestä tietyin aikavälein. Tätä riskiä voidaan kuitenkin merkittävästi pienentää sade-ennusteita käyttämällä. Mallin pohjavesikastelu toimii vakiopadotuskorkeudella, jolloin pohjavedenpinta on aina maksimikorkeudessa. Veden lisääminen järjestelmään lopetetaan ainoastaan silloin, kun sade nostaa pohjavedenpintaa niin, että se pysyy padotuskorkeudella. Käytännössä viljelijä voi aina sade-ennusteen saadessaan lopettaa kastelun. Näin varastotila maassa kasvaa ja kuivuminen nopeutuu useilla vuorokausilla.

Cooper & Fouss'in (1988) tekemän tutkimuksen mukaan voidaan sade-ennusteita käyttämällä vähentää satotuhoja sekä kastelukustannuksia. Ennusteiden käyttöarvo määräytyy kuitenkin niiden onnistumisen mukaan (Cooper et al., 1987). Sateen todennäköisyysindeksi-menetelmää (luku 2.4.1) käytettäessä on kunkin käyttäjän tehtävä itse tiettyjä kompromisseja. Käytettäessä suurta RPI-arvoa saattaa maa kyllästyä ennusteen ulkopuolelle jääneen sateen sattuessa. Pienten RPI-arvojen vaarana on maan ylikuivuminen tapauksessa, jossa sadetta ei tule.

Sade-ennusteiden käytöllä voidaan vähentää pumpaamalla hankittavan kasteluveden tarvetta. Pumpun toiminta keskeytetään silloin, kun sateen todennäköisyys on suuri. Ennen sateen alkua tyhjenevä huokostila varastoi sadevettä, joka jää siten kasvien käyttöön. Jos kastelua pellolla jatkettaisiin sateen alkuun asti, ei maassa olisi ylimääräistä vapaata huokostilaa. Tällöin sadevesi nostaisi pohjavedenpinnan korkeutta, minkä vuoksi padotuskorkeutta jouduttaisiin laskemaan. Pumpattua vettä valuisi tällöin pellolta pois.

Cooper & Fouss'in (1988) tekemässä tutkimuksessa pumpaamalla hankitun kasteluveden tarve oli pienin silloin, kun pumpun toiminta keskeytettiin sade-ennusteen perusteella (luku 2.4.1, kohta (3)). Juuristokerroksen vedelläkyllästysaika lyheni kuitenkin huomattavasti, jos pohjavedenpinnan korkeutta tarkkailtiin sateen aikana ja padotuskorkeutta laskettiin heti, kun vesi ylitti tietyn korkeuden (luku 2.4.1, kohta (4)). Tämä ei merkittävästi lisännyt pumppaustarvetta. Koska tutkimuksen perusteella ennustettu satotaso pysyy kaikissa vaihtoehtoissa lähes samana, kannattaa parhaan käyttövaihtoehdon valitsemisessa kiinnittää huomiota nimenomaan pumppauskustannusten säästöön. Siten parhaana toimintavaihtoehtona voidaan pitää edellä kuvattua vaihtoehtoa (4). Se vaatii kuitenkin järjestelmän jatkuvaa tarkkailua.

Myös typpihuuhtoumien väheneminen riippuu siitä, kuinka tehokkaasti pohjavesikastelujärjestelmää hoidetaan. Huuhtoutuvan typen määrää voidaan todennäköisesti käytännössä vähentää enemmän, kuin typpimallilla saatu tulos osoittaa. Jos sade-ennusteita hyväksikäyttämällä ehkäistään virtaama padotuksen yli, saadaan huuhtoumat ehkäistyä. Mallin tulosten mukaan voidaan pelkällä virtaaman padotuksella ehkäistä huuhtoumat kokonaan, kun pohjavedenpinta on syvällä. Tämä olisi mahdollista myös kosteammissa olosuhteissa, jos ylivirtaus voitaisiin estää. Käytännössä esiintyy kuitenkin tilanteita, joissa sadanta on niin rankka, että se nostaa vedenpinnan padotuskorkeuden yli. Näissäkin tapauksissa huuhtoumat ovat vähäisempiä, jos varastotilaa on kasvatettu etukäteen.

Keväällä, jolloin valunta on suurimmillaan, ovat myös ravinnehuuhtoutumat korkeat. Jos pelloilta virtaavan veden määrää silloin säädeltäisiin, saataisiin keväthuuhtoumia pienennettyä. Käytännössä tämä merkitsisi lumen sulamisen aikaan ja sen jälkeen sattuneiden sateiden aiheuttamien virtaamahuippujen säätelyä luvussa 2.3.2 kuvattuun tapaan. Lumen sulamisvesien pidättäminen maaprofiilissa ja ojissa vähentäisi ravinnehuuhtoumia, mutta Suomen lyhyt kasvukausi vaatii, että maa kuivatetaan koneita kantavaksi mahdollisimman aikaisin. Sen vuoksi viljelijän on käytännössä annettava ojituksen toimia normaalina salaojituksena, kunnes maa on riittävän syvälle kuivunut.

Holman tilalla pohjavesikastelulla saatu sadonlisäys, noin 10%, oli yhtä suuri kuin mallilla ennustettu. Se oli paljon pienempi kuin Carter et al.'in (1988) tekemässä tutkimuksessa. Siinä saatu sadonlisäys oli noin 25%. Tulokset eivät kuitenkaan ole suoraan verrannollisia. Kasvuolosuhteet Pohjois-Karoliinassa ja Suomessa ovat hyvin erilaiset. Täällä kastelulla ei tarvitse torjua varsinaista kuivuutta, sillä Suomessa sataa kesälläkin runsaasti. Tarkoituksena on vain saada aikaan optimaaliset kosteusolosuhteet koko kasvukauden ajaksi. Lisäksi tutkimuksissa olleet kasvilajit ovat hyvin erilaisia. Peruna ei kenties ole yhtä arka kuivuudelle tai liialliselle kosteudelle kuin maissi.

Holman tilalla havaittu ero kastellun ja kastelemattoman alueen kasvien välillä oli suurin heinäkuussa, noin 7 viikkoa istutuksen jälkeen. Perunan mukulanmuodostus alkaa noin 5 viikkoa istutuksen jälkeen. Vedentarve kasvaa ennen tämän alkua, ja on huipussaan juuri ennen mukulanmuodostusvaiheen alkua (Loiva, 1988). Tähän aikaan sattunut kuivuus hidastaa mukulanmuodostusta ja vähentää niiden määrää. Kesäkuun lopussa ja heinäkuun alussa sademäärät olivat pieniä. Koska vertailualueelle ei johdettu ulkopuolista vettä, hidasti kuivuus mukulanmuodostusta ja varren kasvua huomattavasti kasteltuun alueeseen verrattuna.

Loppukesällä suurten mukuloiden osuus oli vertailualueella suurempi kuin kastellulla alueella. Kun peruna kärsii kuivuudesta ennen mukulanmuodostusta ja sen alussa, vähenee mukulamäärä, kuten jo edellä todettiin. Samalla suurien perunoiden osuus yleensä lisääntyy (Loiva, 1988). Lisääntymiseen vaikuttaa todennäköisesti pienempi kilpailu kasvupaikasta. Sadonkorjuun aikaan oli kuivalla alueella halkeilleita perunoita kaksinkertainen määrä kasteltuun alueeseen verrattuna. Kaikki halkeilleet perunat olivat suuria. Niiden herkkyys halkeilulle johtui todennäköisesti kuivuudesta. Kun peruna ei saa riittävästi vettä, sen tärkkelyspitoisuus jää alhaiseksi. Äkillinen vedensaanti sateen aikana aiheuttaa sen, että tärkkelystä alkaa muodostua mukulan

keskelle nopeammin kuin pinnalle. Koska pinta ei ehdi kasvaa yhtäaikaaisesti keskuksen kanssa, se halkeaa (Holma 1990). Vertailualueen perunoissa havaittiin muitakin laatuvirheitä, kuten rupisuutta ja ruttoa, enemmän kuin kastellun alueen perunoissa. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että perunoiden vastustuskyky kasvitauteja kohtaan heikkenee, jos ne kärsivät kuivuudesta.

Eri alueiden mukuloiden kuivapainoja vertailtaessa havaittiin, että kastellun alueen perunoiden kuiva-ainespitoisuus oli noin 35% korkeampi kuin vertailualueen perunoiden. Tästä voidaan päätellä, että kastelu lisää perunoiden kuiva-ainesaantoa ja tärkkelyspitoisuutta, eli parantaa niiden laatua. Tämä perustuu siihen, että kuivuudesta kärsivän perunantaimen lehtiala jää pienemmäksi kuin kosteutta saaneen. Lehtialan pieneneminen vähentää fotosynteesiä ja yhteyttämistuotteiden varastoitumista mukulaan. Myös mukuloiden kasvu alkaa kuivuutta kärsineillä mukuloilla myöhemmin. Kasvuajalla sekä tärkkelyksen ja kuiva-aineen varastoitumisella on selvä positiivinen korrelaatio (Kasurinen, 1988).

7. YHTEENVETO

Holman pellon hydraulinen johtavuus on hyvä, joten se ei aseta rajoituksia pohjavesikastelun toimivuudelle. Jos ojitus halutaan mitoittaa siten, että juuristokerros kuivuu alle vuorokaudessa äkillisen, voimakkaan sateen sattuessa, on ojavälin oltava 10m ja mitoitusvaluman $1.5 \text{ ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$. Jos sallitaan juuristokerroksen osittainen kyllästyminen pidemmäksi aikaa, voidaan käyttää leveämpää ojaväliä. Ojatiheys kannattaa valita sen mukaan, kuinka suuri parannus katetuottoon saadaan. Ojat on aina mitoitettava niin, että niiden mitoitusvaluma on suuri. Se on kuivatusta eniten rajoittava tekijä.

Siirryttäessä pohjavesikastellulla pellolla avo-ojituksesta salaojitukseen, saadaan satoon noin 10%:n lisäys käytettäessä ojavälejä 8-14 metriä. Sato kasvaa ojaväliä tihennettäessä ja saavuttaa huippunsa ojavälillä 10 metriä. Tätä tiheämmällä ojituksella ei saada enää lisäparannusta. Perussatotasolla 40 tonnia hehtaarilla saadaan 8-14 metrin ojaväleillä sadonlisäystä noin 4 tonnia hehtaarille. Ojaväliä valittaessa on satoon saatavaa parannusta verrattava kastelun ja/tai ojituksen aiheuttamiin kustannuksiin. Salaojituksen iäksi lasketaan 50 vuotta. Näin pitkän aikavälin tarkastelussa saadaan Holman tapauksessa suurin katetuoton lisäys silloin, kun käytetään ojaväliä 14 metriä. Lisäys on suurin 15 vuoden aikavälillä 14 metrin tai 16 metrin ojaväliä käytettäessä laskentakoron mukaan.

Pohjavesikastelu, joka lisätään perinteisesti salaojitetulle tai säätösalojitetulle pellolle, kasvattaa satoa noin 12% eli noin 4 tonnia hehtaarille, kun ojaväli on 10-14 metriä. Suurin sadonlisäys saadaan ojitustiheyden ollessa 10 metriä. Myös katetuoton parannus on tällä ojavälillä suurin. Suurin tuoton lisäys saadaan 15 vuoden aikavälillä perinteisestä salaojituksesta pohjavesikasteluun siirryttäessä.

Avo-ojitetun pellon salaojittaminen ja pohjavesikastelu lisää satoa eniten. Lisäys on sitä suurempi, mitä tiheämpi oli lähtötilanteen avo-ojitus. Sadonlisäys on keskimäärin 20% eli noin 8 tonnia hehtaarille ja se on suurin 10 metrin ojaväliä käytettäessä. Katetuottoon saadaan suurin parannus ojavälillä 14 metriä. Perinteisestä avo-ojituksesta pohjavesikasteltuun salaojitukseen siirtyminen aiheuttaa eniten kustannuksia. 50 vuoden aikavälillä tarkasteltaessa on katetuoton lisäys kuitenkin muihin vaihtoehtoihin verrattaessa suurin.

Typpihuuhtoumat pienevät pohjavesikasteluun siirryttäessä. Tulokset nyt tehdyn tutkimuksen ja kirjallisuusselvityksen välillä ovat hyvin yhteneviä. Kirjallisuuden mukaan typpihuuhtoumia voidaan säätelyn ansiosta vähentää noin 45%. Fosforin huuhtoutuminen vähee lähes saman verran. Huuhtoutuvan fosforin määrä pienenee ojituksen tihentyessä. Ravinnehuuhtoumien väheneminen on suoraan verrannollinen kokonaisvirtaaman pienenemiseen. Kirjallisuuden perusteella virtaama pieneni säätelyn ansiosta keskimäärin 40%.

Nyt tehdyn tutkimuksen mukaan typpihuuhtoumien vähennys on sitä suurempi, mitä kosteampaa maa on ja mitä harvempi ojitus pellolla on. Ojavälillä 15 metriä nitraattitypen huuhtoutuminen vähenee noin 17% ja ammoniumtypen noin 50% vastaavaan perinteisesti salaojitettuun peltoon verrattuna. Kuivissa olosuhteissa huuhtoutuminen on luonnostaan pientä, ja se voidaan kokonaan eliminoida pohjavesikastelun tai säätöojituksen avulla. Muissa olosuhteissa säätöojituksella saavutettava kokonaistypen huuhtoumien väheneminen on keskimäärin 40%. Säätöojituksen vaikutus huuhtoumiin on sitä merkittävämpi, mitä kuivempaa maa on. Denitrifikaatiotaso kasvaa pohjavesikastelussa kosteiden olosuhteiden seurauksena moninkertaiseksi.

Tämä tutkimus oli ensimmäinen Suomessa tehty pohjavesikastelun ja säätöojituksen vaikutuksia ravinnehuuhtoumiin käsittelevä tutkimus. Se toimii lähinnä alustavana ja suuntaa antavana tutkimuksena, jonka perusteella voidaan määritellä, mitä ja miten olisi jatkossa tutkittava. Tällä tutkimuksella saatiin myös viitteitä siitä, että maatalouden vesistöjä kuormittavaa vaikutusta voidaan huomattavasti vähentää. Säätöojitusta käyttämällä kuormituksen huomattava vähentäminen olisi mahdollista myös nykyisillä peltomailla ilman suurta panostusta.

Säätöojituksen ja pohjavesikastelun vaikutuksia ravinnehuuhtoumiin on tutkittu Suomessa vain tietokonemallin avulla. Varsinkin sade-ennusteiden käytön avulla saavutettavia huuhtoumien vähenemisiä olisi tutkittava käytännössä. Samoin olisi tutkittava, miten maalajikohtaiset ominaisuudet ja paikalliset kosteusolot vaikuttavat pohjavesikastelun toimintaan ja ravinnehuuhtoumiin. Lisätutkimuksia olisi tehtävä myös fosforihuuhtoumien vähenemisen selvittämiseksi Suomen oloissa. Ravinnehuuhtoumien vähentämiseksi mahdollisimman pian olisi selvitettävä säätöojitusmahdollisuudet nykyisillä pelloilla ilman pohjavesikastelun lisäämistä.

LÄHDELUETTELO

- Anon. 1984. Ruokaperuna-asetus. Teoksessa: Kasvinviljelytieteen harjoitustyöt 1, 1989. Helsingin Yliopisto, Kasvinviljelytieteen laitos. S. 125-128.
- Anon. 1985. Geotekniset laboratorio-ohjeet, 1. luokituskokeet. Helsinki, Suomen geoteknillinen yhdistys ry ja Rakentajain Kustannus Oy. S. 10-18.
- Anon. 1987. Yhdistyksen toiminnasta ja otteita salaojitustutkimuksesta. Helsinki, Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 1/1987. 35 s.
- Anon. 1990. Katetuottomenetelmän mukaisia mallilaskelmia. Maatalouskeskusten Liitto, Suunnitteluosaston sarja A₁₆. S. 26-27.
- Anon. 1989. Salaojakeskuksen vuosikertomus 1989. Helsinki, Salaojakeskuksen julkaisu 1/90.
- Aslyng, H.C., Hansen, S. 1982. Water balance and crop production simulation. Model WATCROS for local and regional application. Hydrotechnical Laboratory. The Royal Vet. and Agric. Univ., Copenhagen. 200 p.
- Carter, C.E., Fouss, J.L., McDaniel, V. 1988. Water Management Increases Sugarcane Yields. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASEA, Vol. 31, N:o 2. Pp. 503-507.
- Cooper, J.R., Fouss, J.L. 1988. Rainfall Probability Forecasts used to Manage a Subdrainage- Subirrigation System for Watertable Control. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., Agricultural Water Management, 15 / 1988. Pp. 47-59.
- Deal, S.C., Gilliam, J.W., Skaggs, R.W., Konyha, K.D. 1986. Prediction of Nitrogen and Phosphorus Losses as Related to Agricultural Drainage System Design. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., Agriculture, Ecosystems and Environment, 18 / 1986. Pp. 37-51.

Evans, R.O., Gilliam, J.W., Skaggs, R.W. 1989. Effects of Agricultural Water Table Management on Drainage Water Quality. Raleigh, Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, Report N:o 237. 87 p.

Evans, R., Skaggs, W. 1985. Agricultural Water Management for Coastal Plain Soils. Raleigh, The North Carolina Agricultural Extension Service, Publication AG-355. 11 p.

Evans, R.O., Skaggs, R.W. 1989. Design Guidelines for Water Table Management Systems on Coastal Plain Soils. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASEA, Vol. 5, N:o 4. Pp. 539-548.

Evans, R., Skaggs, W. 1985. Operating Controlled Drainage and Subirrigation Systems. Raleigh, The North Carolina Agricultural Extension Service, Publication AG-356. 10 p.

Evans, R.O., Sneed, R.E., Skaggs, R.W. 1988. Economics of Controlled Drainage and Subirrigation Systems. Raleigh, The North Carolina Agricultural Extension Service, Publication AG-357. 17 p.

Evans, R.O., Sneed, R.E., Skaggs, R.W. 1987. Water Supplies for Subirrigation. Raleigh, The North Carolina Agricultural Extension Service, Publication AG-389. 13 p.

Fouss, J.L., Carter, C.E., Rogers, J.S. 1986. Simulated Water table Management by Controlled-Drainage Based on Rainfall Forecasts. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASEA, Vol. 29, N:o 4. Pp. 988-994.

Fouss, J.L., Cooper, J.R. 1988. Weather Forecasts as a Control Input for Water Table Management in Coastal Areas. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASEA, Vol. 31, N:o 1. Pp. 161-167.

Frissel, M.J., van Veen, J.A.(ed.) 1981. Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems. Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 277 p.

Gilliam, J.W., Skaggs, R.W., Doty, C.W. 1986. Controlled Agricultural Drainage: an Alternative to Riparian Vegetation. In: Correll, D.L. (ed.). Watershed Research Perspectives. Washington, D.C., Smithsonian Institution. Pp. 225-242.

Holma, M. 1990. Suullisia tiedonantoja

Karvonen, T. 1986. DRAINMOD - avain optimaalisessa kuivatuksen suunnittelussa ? Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, vesitalouden laboratorio, Monistesarja 5/1986. 24 s.

Karvonen, T., Laurila H., Kleemola J., Ilola A., Poikselkä J. 1989a. Interactive simulation programs for teaching and research. Program 1, PotCropF: Computation of potential crop production on a daily basis. Helsinki, University of Helsinki, Departement of crop husbandry, Publication N:o 21. 52 p.

Karvonen, T., Paasonen-Kivekäs, M., Vakkilainen, P. 1989b. Nitrogen movement, transformation and uptake by plant roots, Exercise 2. Helsinki, University of Technology, laboratory of hydrology and water resources engineering. 21 p.

Kasurinen, O. 1988. Perunan satokomponentit ja kehitysvaiheet sadonmuodostuksen perustana. Teoksessa: Varis, E. (toim.) Peltokasvien satofysiologia. Helsinki, Yliopistopaino, Helsingin Yliopiston Kasvinviljelytieteen laitoksen julkaisuja N:o 17. S. 151-161.

Kauppi, E. 1984. Maa ja metsätalouden ympäristövaikutukset. Helsinki, Helsingin Yliopiston neuvontaopin ja täydennyskoulutuksen keskus, Monistesarja 12/88. 59 s.

Klute, A. 1965. Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Soil. In: Black, C.A. (ed.). Methods of soil analyses, Part 1. Madison, American Society of Agronomy, Inc. Pp. 210-220.

Kurki, M. 1982. Suomen peltojen viljavuudesta 3. Viljavuuspalvelu Oy:ssä vuosina 1955-1980 tehtyjen viljavuustutkimusten tuloksia. Helsinki, Pariset Oy. 181s.

Kuusisto, E. 1986. Sadanta. Teoksessa: Mustonen, S. (toim.). Sovellettu hydrologia. Helsinki, Vesiyhdistys ry. S. 29-47.

Kähäri, J. Mäntylähti, V. Rannikko, M. 1987. Suomen peltojen viljavuus 1981-1985. Helsinki, Aspekti Oy/Oy Länsi-Suomi. 105 s.

Loiva, M. 1988. Fysiologisen iän ja ympäristötekijöiden vaikutus perunan sadonmuodostukseen. Teoksessa: Varis, E. (toim.) Peltokasvien satofysiologia. Helsinki, Yliopistopaino, Helsingin Yliopiston Kasvinviljelytieteen laitoksen julkaisuja N:o 17. S. 162-171.

Skaggs, W. 1990. Drainage and Environment. Ontario, Agri-Book Magazine / Drainage Contractor. Pp.19- 25.

Skaggs, R.W. 1980. Drainmod. Reference Report. Methods for design and Evaluation of Drainage-Water Management Systems for Soils with High Water Tables. Fort Worth, United States Departement of Agriculture. 265 p.

Skaggs, R.W. Gilliam, J.W. 1981. Effect of Drainage System Design and Operation on Nitrate Transport. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural Engineers, Transactions of the ASEA, Vol. 24, N:o 4. Pp. 929-934, 940.

Skaggs, R.W. 1990. Luento. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu.

Stevenson, F.J. 1982. Origin and Distribution of Nirtogen in Soil. In: Stevenson, F.J. (ed.). Nitrogen in Agricultural Soils. Madison, American Society of Agronomy, Inc., Agronomy 22. Pp. 23.

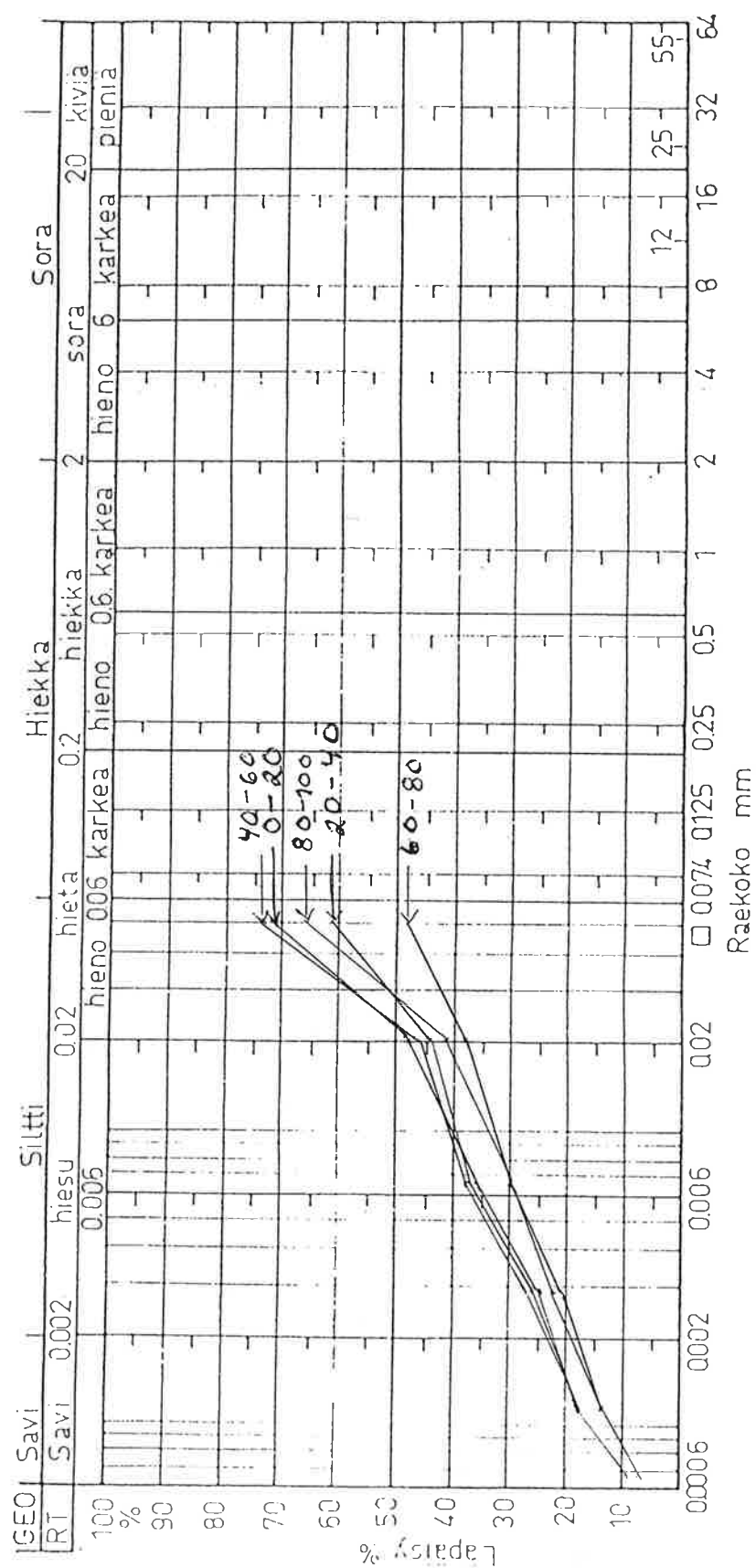
Varis, E. 1982. Peruna. Teoksessa: Köppä, P. (toim.). Kasvinviljelyoppi 2. Rauma, OY Länsi-Suomi. S.152-182.

Wäre. M. 1947. Maan vesisuhteista ja viljelyskasvien sadoista Maasojan vesitaloudellisella koekentällä vuosina 1939-44. Helsinki, Maa- ja Vesitekniiikan Tutk. 15. 240 s.

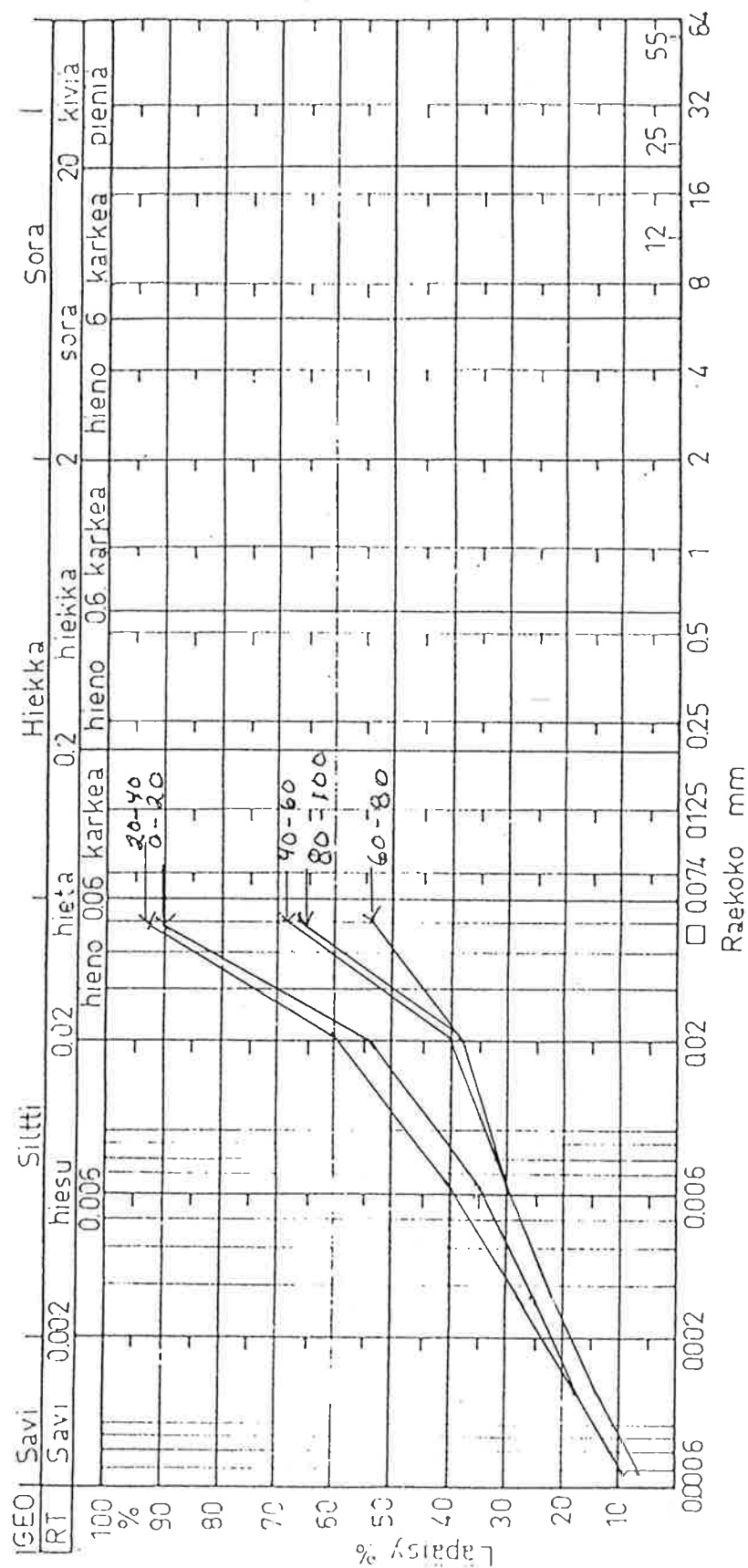
TABLE 3. SUMMARY OF SIMULATION RESULTS FOR SELECTED CONTROL SCHEMES OF WATER TABLE MANAGEMENT SYSTEMS FOR GULF COASTAL PLAINS SOIL AND CLIMATE CONDITIONS

Control mode number	Control mode description*	Years	Field WT depth, m	Excess soil-water SEW ₃₀ , cm-day	Dry days, day	Subirrig. water pumped, mm	Rel. corn yield, %
I	CD & SI w/constant outlet water level @ 0.6 m depth	1979	0.66	158	10	160	90
		1980	0.68	119	0	170	79
		1981	0.69	72	13	160	98
		1984	0.74	40	0	220	94
		1983	0.61	177	0	130	81
		1984	0.75	0	5	210	100
		1985	0.76	36	3	220	100
	7-yr. avg. $\pm$ [s.d.]†		0.70[0.60]	86[67]	4[5]	180[40]	92[9]
II	CD & SI w/override when WTD < 0.2 m Nominal Weir Depth @ 0.6 m	1979	0.69	127	10	170	91
		1980	0.70	97	0	180	83
		1981	0.71	59	13	170	99
		1982	0.75	36	0	220	95
		1983	0.64	137	0	140	86
		1984	0.75	0	5	210	100
		1985	0.76	36	3	220	100
	7-yr. avg. $\pm$ [s.d.]		0.71[0.04]	70[51]	4[5]	190[30]	93[7]
III	CD & SI w/fixed weir @ 0.55 m depth w/no irrig. pumping when RPI $\geq$ 55%	1979	0.67	166	10	140	90
		1980	0.68	125	0	160	78
		1981	0.71	78	13	140	98
		1982	0.91	40	7	140	94
		1983	0.61	182	0	110	81
		1984	0.86	0	4	160	99
		1985	0.98	13	7	160	99
	7-yr. avg. $\pm$ [s.d.]		0.77[0.14]	86[73]	6[5]	140[20]	91[9]
IV	CD & SI w/override when WTD < 0.2 m, and w/no irrig. pumping when RPI $\geq$ 55%	1979	0.70	139	10	140	91
		1980	0.69	98	0	170	83
		1981	0.73	62	13	150	98
		1982	0.92	35	8	150	95
		1983	0.64	136	0	130	86
		1984	0.86	0	4	160	99
		1985	0.98	13	7	160	99
	7-yr. avg. $\pm$ [s.d.]		0.79[0.13]	69[57]	6[5]	150[10]	93[7]
(IVa)	when RTT $\geq$ 1.0 mm	1979	0.70	134	10	150	91
		1980	0.71	94	0	160	83
		1981	0.73	61	13	150	99
		1982	0.89	35	6	160	95
		1983	0.65	133	0	120	86
		1984	0.79	0	4	200	100
		1985	0.84	33	5	210	99
	7-yr. avg. $\pm$ [s.d.]		0.76[0.09]	70[52]	5[5]	160[30]	93[7]

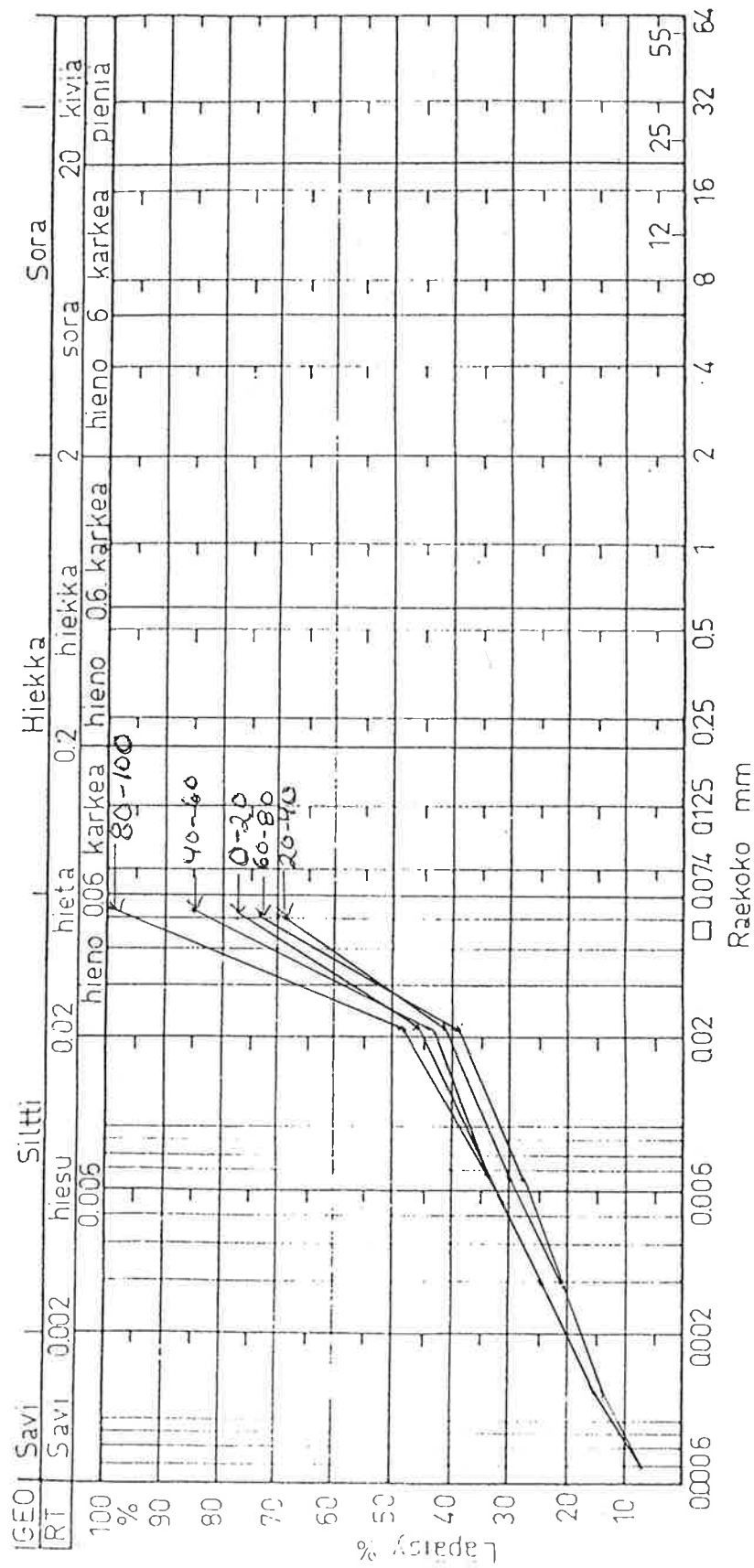
Taulukko 1 Tulokset Fouss & Cooper'in (1988) tutkimuksesta sadantaennusteiden käytöstä pohjavesikastelu- ja säätöojituksen yhteydessä.



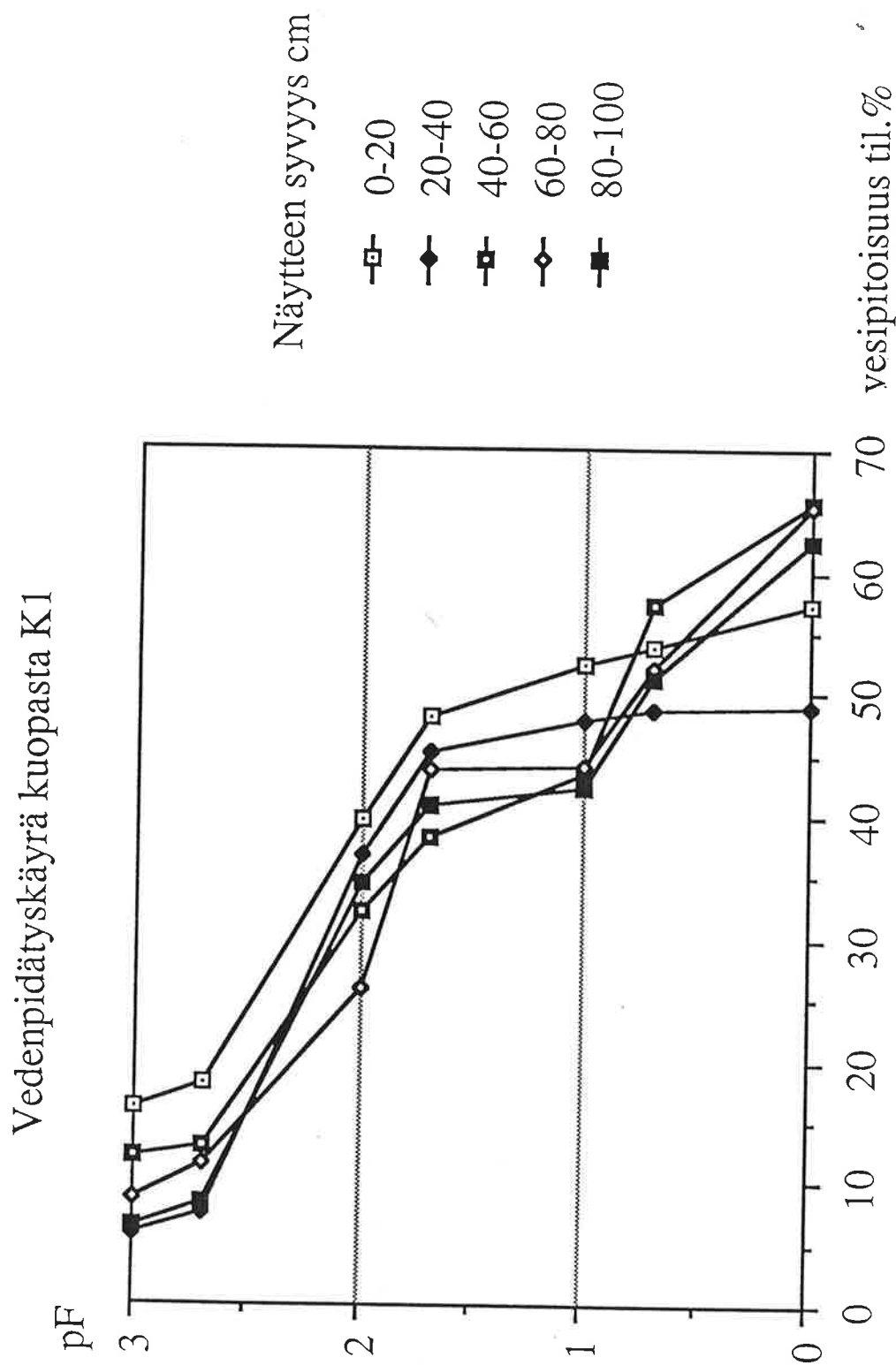
Kuva 1 Rakeisuuskäyrät Holman pellon tutkimuskuopasta K1 syvyydeltä 0-100cm.
 Käyrät on määritetty vesitalouden laboratoriossa kesällä 1990.



Kuva 2 Rakeisuuskäyrät Holman pellon tutkimuskuopasta K2 syvyydeltä 0-100cm. Käyrät on määritetty vesitalouden laboratoriossa kesällä 1990.

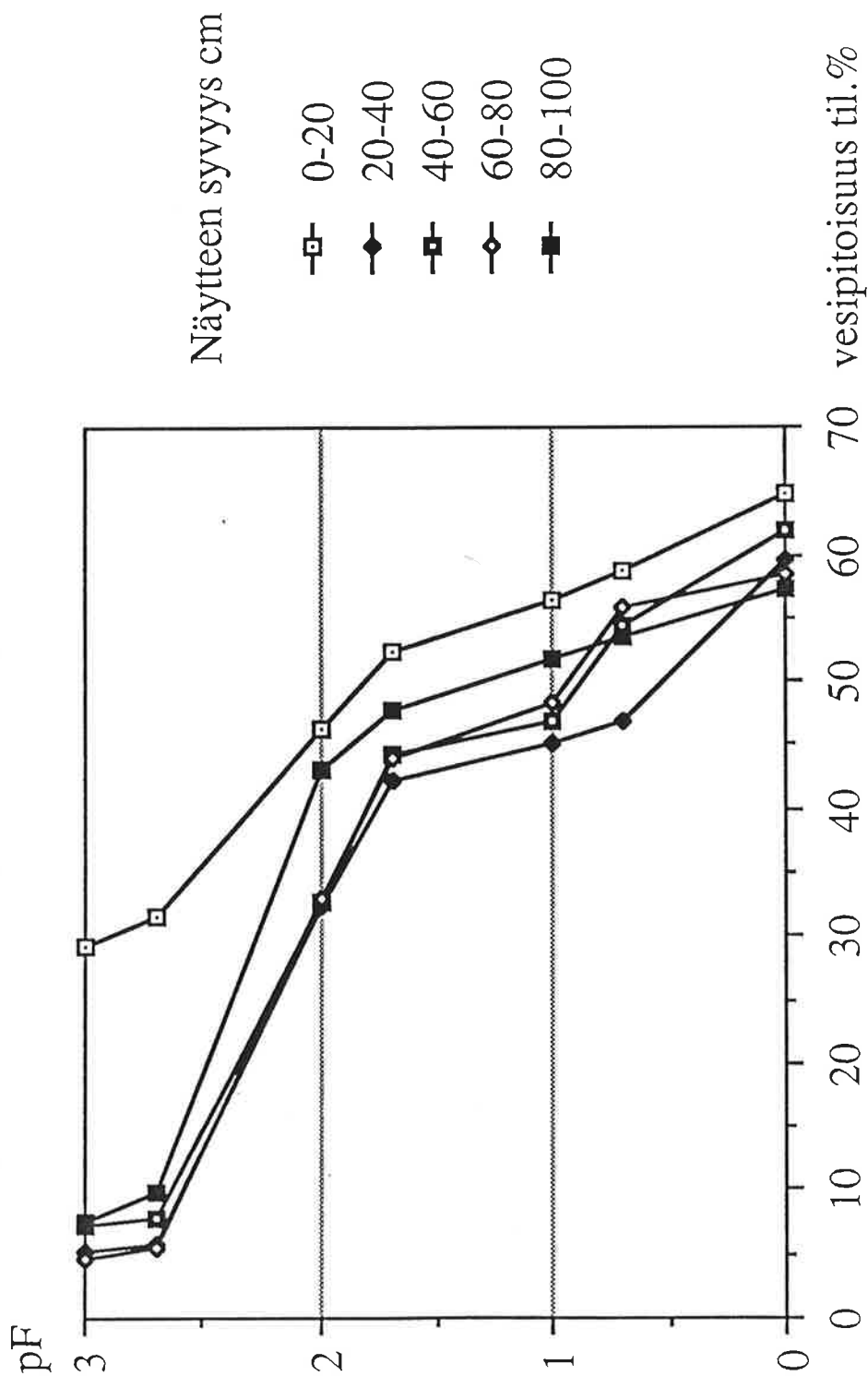


Kuva 3 Rakeisuuskäyrät Holman pellon tutkimuskuopasta VRT syvyydeltä 0-100cm.
Käyrät on määritetty vesitalouden laboratoriossa kesällä 1990.



Kuva 1 Vedenpidätyskäyrät Holman pellon tutkimuskuopasta K1 syvyydeltä 0-100cm. Käyrät on määritetty vesitalouden laboratoriossa kesällä 1990.

Vedenpidätyskäyrä kuopasta VRT



Kuva 2 Vedenpidätyskäyrät Holman pellon tutkimuskuopasta VRT syvyydeltä 0-100cm. Käyrät on määritetty vesitalouden laboratoriossa kesällä 1990.

Liite 4

Rijteman'in tyyppikäyrä nro 3 (loamy sand):

Parametrit

$$\theta_s = 0.439$$

$$\mu = 0.033$$

$$K_s = 26.5 \text{ cm/d}$$

