

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

Johanna Kankaanranta

VEDEN VIRTAAUS JA RAVINTEIDEN
HUUHTOUTUMINEN SAVIMAASSA

Diplomityö, joka on tehty opinnäytteeksi
Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja
maanmittaustekniikan osastolla
apulaisprofessori Tuomo Karvosen
valvonnassa vuosina 1995-1996

Tekijä ja työn nimi : Johanna Kankaanranta

Veden virtaus ja ravinteiden huuhtoutuminen savimaassa

Päivämäärä : 24.5.1996**Sivumäärä :** 79**Osasto :** Rakennus- ja
maanmittaustekniikan osasto**Professori :** Vesitalous ja
Vesirakennus**Työn valvoja :** Apul. prof. Tuomo Karvonen**Työn ohjaaja :** TkL. Maija Paasonen Kivekäs

Tutkimuksessa selvitettiin veden virtausta ja ravinteiden huuhtoutumista savimaassa. Erityisesti tutkittiin savipelloilla kuivumisen seurauksena syntyvien halkeamien vaikutusta veden virtaukseen. Valunnan syntymistä ja sen aiheuttamia ravinnehuuhtoumia tutkittiin Sjököllän koekentällä Kirkkonummella. Halkeamien syntymistä mallinnettiin kosteuden funktiona huokossuhteen ja kosteussuhteen avulla, minkä jälkeen vesitase laskettiin FLOCR-mallilla viljelyksessä olevalle peltoalueelle. FLOCR on profiilimalli, joka on kehitetty laskemaan veden virtausta ja halkeamien syntymistä savimailla.

Kentällä mitattiin valuntaa salaojissa ja pintavaluntapadoilla sekä sääparametreja automaattisen mittausjärjestelmän avulla. Laboratoriossa mitattiin ravinnepitoisuuksia huuhtoutuviissa vesissä ja koealueen maaperän ominaisuuksia. Tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995 sadanta oli 725 mm. Mitattu salaojavalunta jaksolla oli 71 mm/ha ja pintavalunta 120 mm/ha. Valuntahuiput keskittyivät syys-lokakuulle 1994 ja huhti-toukokuulle 1995. Typpi-huuhtouma oli 14.9 kg/ha, fosfori-huuhtouma oli 4.5 kg/ha ja kiintoaineshuuhtouma 1494 kg/ha tarkastelujaksolla. Kokonaistypen huuhtoumista 80 % tuli salaojista heti lannoituksen jälkeen toukokuussa 1995. Kokonaisfosfori-huuhtoumat jakautuivat tasan salaoja- ja pintavalunnan kesken huipun ollessa lokakuussa 1994. Kiintoaineshuuhtoumat jakautuivat suhteessa 1:3 salaoja- ja pintavalunnan kesken huipun ollessa lokakuussa 1994. Intensiivisen näytteenoton perusteella määritettiin salaojavesien lyhytaikaisen vaihtelun luonnetta syksyllä sadonkorjuun jälkeen. Tutkimusten perusteella todettiin pitoisuuden riippuvan virtaamasta tietyn virtaama-arvon jälkeen, joka tässä oli 20 l/min.

Sovellusesimerkissä käytettiin Sjököllän koekentällä vuosina 1994-1995 mitattua aineistoa. Veden virtausta maaperässä mallinnettiin FLOCR-mallilla huhti-marraskuussa 1994. Maaperän vedenpidätyskäyrää ja kyllästymättömän maan hydraulista johtavuutta kuvattiin Van Genuchtenin funktiolla. Parametrien estimointiin käytettiin laboratoriossa mitattuja pF-käyriä ja hydraulisen johtavuuden arvoja. Mallin vaatimat kuivumiskutistumiskäyrät sovitettiin laboratoriomittausten perusteella.

Mitattujen maan hydraulisten ominaisuuksien perusteella mallin laskemat ja mitatut salaoja- ja pintavalunnat sekä pohjavedenpinnan korkeudet erosivat toisistaan merkittävästi. Pohjavedenpinnan korkeudet olivat koko laskentajakson ajan huomattavasti mitattua korkeammalla, jolloin syntyneiden halkeamien määrä jäi myös todellisia arvoja paljon pienemmiksi. Haihdunnan laskennassa syntyvä virhe vaikuttaa voimakkaimmin mallin toimimattomuuteen viljellyllä pellolla. Vesitaseen virheen takia malli ei nykyisessä muodossa sovellu ravinteiden kulkeutumisen laskentaan.

Author and name of the thesis : Johanna Kankaanranta
Water flow and nutrient leaching in clay soils

Date : 24.5.1996

Number of pages : 79

Department : Faculty of Civil
Engineering and Surveying

Professorship : Water resources
Engineering

Supervisor : Ass. prof. Tuomo Karvonen

Instructor : Lic. Tech. Maija Paasonen- Kivekäs

The study dealt with water flow and nutrient leaching in clay soils. Special attention was paid on swelling and shrinkage processes in clay soils and water flow in cracking soils. Field and laboratory measurements were carried out to evaluate nutrient leaching and soil characteristics. The cracks were modeled as a function of moisture with the help of void ratio and moisture ratio. Water balance was calculated by using FLOCR model for cultivated field. It is a profile model which has been developed for calculating water flow in clay soils.

Surface and subsurface runoff, groundwater level and water quality parameters were observed in as cultivated clay field in southern Finland (Kirkkonummi, Sjököla). An automatic monitoring system was used for hydrometeorological variables. Short term variation of drainage water quality was measured by automatic sampling. Hydraulic as well as swelling and shrinkage characteristics were determined in the laboratory. FLOCR- model was applied for the period April - November 1994. The rainfall of the study period was 725 mm. Surface runoff was 120 mm/ha and subsurface runoff 71 mm/ha. Most of the runoff took place in September-October 1994 and April-May 1995. The nitrogen leaching was 14.9 kg/ha, phosphorus leaching being 4.5 kg/ha and leaching of solid phase of water being 1494 kg/ha. 80 percent of the nitrogen leaching was due to subsurface runoff right after fertilization in May 1995. Phosphorus leaching distributed evenly to both runoff fractions, having a peak in October 1994. Leaching of suspended solids was distributed in proportion 1:3 between subsurface- and surface runoff. Most of that took place in October 1994.

Van Genuchten functions were used for description of water retention curve and hydraulic conductivity of unsaturated soil. The swelling and shrinkage curve was estimated on the basis of laboratory measurements.

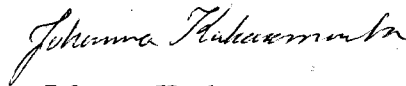
The measured and calculated runoffs and groundwater levels differed a lot from each other. The calculated ground water level during the period of calculations was higher than the measured ground water in experimental site. The cracks calculated with the model extended as far as the ground water level. Thus it is probable that the cracks extend even deeper in the site because of its deeper groundwater level. The calculation of evapotranspiration, which is limited only to the top compartment, causes problem in the usage of the model. Therefore, the model is suitable only for bare soils and shallow rooted crops and it cannot be used for modeling the water balance of grain fields in cultivated fields. Because of the inaccuracy in modeling water balance, the model can not be used in the calculations on nutrient leaching.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun vesitalouden- ja vesirakennuksen laboratoriossa apulaisprofessori Tuomo Karvosen valvonnassa. Ohjaajana toimi TkL Maija Paasonen-Kivekäs. Tutkimuksen rahoittivat Salaojituksen tukimuseydistys ry ja Maa- ja vesitekniikan tuki ry. Esitän vilpittömät kiitokseni yllämainituille henkilöille ja järjestöille työni valmistumisen mahdollistamisesta. Lisäksi haluan kiittää professori Pertti Vakkilaista arvokkaista ohjeista ja neuvoista työni eri vaiheissa sekä vesitalouden laboratorion henkilökuntaa ja muita Sjököulla-projektissa mukana olleita kaikesta avusta, mitä työni aikana olen heiltä saanut.

Erityiset kiitokset vanhemmilleni, sisaruksilleni ja Jaakolle kärsivällisyydestä ja tuesta työn eri vaiheissa.

Espoossa 30.5.1996



Johanna Kankaanranta

KUVALUETTELO

sivu

Kuva 2.1. Veden virtauksen jako mikro- ja makrohuokosvirtaukseen huokoskoon perusteella. Vedenpidätyskäyrän avulla (yhtenäinen käyrä) ja hydraulisen johtavuuden avulla (katkoviiva käyrä). (German & Beven, 1981a)	3
Kuva 2.2. Systemaattinen esitys saven ja hiekan kuivumisesta ja veden korvautumisesta ilmalla. (Bronswijk et al., 1990)	5
Kuva 2.3. Savimaiden kutistumisen eri alueet. (Bronswijk et al., 1990)	6
Kuva 2.4. Kuivumiskutistumiskäyrän yleinen muoto kolmella eri kutistumisalueella.	8
Kuva 2.5. Hydraulisen johtavuuden muuttuminen maanäytteessä kosteuden mukaan (Leeds-Harrison et al., 1986).	10
Kuva 2.6. Hydraulinen johtavuus ajan funktiona kyllästystilassa a) 10 cm syvyydellä b) 50 cm syvyydellä näytteessä (Leeds-Harrison et al., 1986).	10
Kuva 3.1. Sjäokullan koealueen sijainti.	16
Kuva 3.2. Koekentän peltolohkojen sijainti, korkeussuhteet, salaojapatojen (S), pintavaluntapatojen (P), maanäytepisteiden (m), pohjavesiputkien (pv), säätökaivojen sijainnit sekä sademittarien paikat.	18
Kuva 3.3. Vedenpidätyskäyrät a) pinta- ja b) pohjakerrokselle.	20
Kuva 3.4. Van Genuchten sovitus pintakerroksen pF-käyrälle.	21
Kuva 3.5. Van Genuchten sovitus pohjakerroksen pF-käyrälle.	21
Kuva 3.6. Hydraulisen johtavuuden muuttuminen kosteuden funktiona ja mallin syöttötietoina tarvitsemat käyräsovitukset pintakerrokselle.	23
Kuva 3.7. Hydraulisen johtavuuden muuttuminen kosteuden funktiona ja mallin syöttötietoina tarvitsemat käyräsovitukset pohjakerrokselle.	24
Kuva 3.8. Mitattu kuivumis-kutistumiskäyrä pisteessä 1 pintakerroksesta 5-10 cm syvyydeltä otetussa näytteessä.	25
Kuva 3.9. Mitattu kuivumis-kutistumiskäyrä pisteessä 1 pohjakerroksesta 40-45 cm syvyydeltä otetussa näytteessä.	25
Kuva 3.10. Kuivumis-kutistumiskäyrän sovitukset pintakerrokselle.	26
Kuva 3.11. Kuivumis-kutistumiskäyrän sovitukset pohjakerrokselle.	26
Kuva 3.12. Sadanta Sjäokullan koekentällä tutkimusjaksolla 1.6.1994- 31.5.1995. (Tähdellä merkittyjen kuukausien sadannat on mitattu Vihdin Maasojan mittausasemalla.)	29
Kuva 3.13. Ilman keskilämpötila tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995	29
Kuva 3.14. Ilman suhteellinen kosteus tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995	30
Kuva 3.15. Kokonaissäteily tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995	30
Kuva 3.16. Pohjavedenpinnan korkeudet tutkimusjaksolla pohjavesiputkessa 7.	31
Kuva 3.17. Pohjavedenpinnan korkeudet tutkimusjaksolla pohjavesiputkessa 9.	31
Kuva 4.1. Sadanta tutkimusjaksolla 1.6. -31.12.1994	33
Kuva 4.2. Salaojavalunta padolla S3 tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995	33
Kuva 4.3. Pintavalunta padolla P2 tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995	33
Kuva 4.4. Sadanta ja virtaama padolla S3 11.9.-13.10.1994.	34
Kuva 4.5. Salaojavesien ravinne ja kiintoainespitoisuuksien vuodenaikaisvaihtelut tutkimusjaksolla padolla S3. a) $\text{NH}_4\text{-Nb}$) $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ ja kok-N c) kok-P d) Kiintoainespitoisuus	36

Kuva 4.6. Typpi-, fosfori- ja kiintoainespitoisuudet pintavaluntapadolla P2, toukokuu 1994-toukokuu1995. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ ja kok-N c) kok-P d) Kiintoaines	38
Kuva 4.7. a) Salaojavalunnan ja b) pintavalunnan aiheuttamat huuhtoumat tarkastelujaksolla 1.6.1995-31.5.1995.	40
Kuva 4.8. Kokonaisfosforikuormituksen kuukausittainen jakautuminen tutkimusjaksolla 1.6.1994- 31.5.1995.a) Salaojahuuhtoumat. b) Pintavaluntahuuhtoumat	41
Kuva 4.9. Kiintoainekuormituksen kuukausittainen jakautuminen tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.6.1995. a) Salaojahuuhtoumat. b) Pintavaluntahuuhtoumat	42
Kuva 4.10. Pitoisuudet ja salaojavirtaamat tutkimusjaksolla 11.9.-13.10.1994. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ c) Kok-N d) Kiintoaines e) Kok-P	44
Kuva 4.11. Autokorrelaatorakenne padolta S3 otetuissa näytteissä 15.-23.9.1994	47
Kuva 4.12. Ravinnepitoisuuksien muuttuminen virtaaman suhteen padolla S3 15.-23.9.1994. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ c) Kok- N d) Kok-P e) pH f) Kiintoaines	49
Kuva 4.13. Ravinnepitoisuuksien ja kiintoainespitoisuuksien välinen riippuvuus. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ c) Kok-N d) Kok-P	50
Kuva 5.1. Periaate FLOCR mallin toiminnasta ja sen edeltäjän FLOWEX mallin toiminnasta.(Bronswijk et. al.,1992)	54
Kuva 5.2. Hydraulisen johtavuuden riippuvuus painekorkeudesta	56
Kuva 5.3. Todellisen haihdunnan laskenta mallille lähtötietoina syötetystä potentiaalisesta haihdunnasta.	58
Kuva 5.4. Pohjavedenpinnan syvyys laskenta-aikana.	64
Kuva 5.5. Salaoja- ja pintavalunta 1.5.-30.11.1994 alkuperäisillä hydraulisen johtavuuden arvoilla.	64
Kuva 5.6. Imeytymisen jakautuminen matriisiin ja halkeamien kesken tutkimusjaksolla.	65
Kuva 5.7. Vesimäärän muutos profiilissa.	66
Kuva 5.8. Potentiaalinen (PE)ja mallin laskema todellinen haihdunta (AE) ja sadanta (P).	67
Kuva 5.9. Salaojavalunta eri hydraulisten johtavuuksien ja kuivatustehokkuuksien arvoilla.	68
Kuva 5.10. Salaoja- ja pintavalunta kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla.	69
Kuva 5.11. Pohjaveden syvyys kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla.	70
Kuva 5.12. Haihdunta kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla. Potentiaalinen- (PE)ja mallin laskema todellinen haihdunta (AE) ja sadanta (P).	70
Kuva 5.13. Imeytymisen jakautuminen halkeamien ja maamatriisin kesken kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla.	71

TAULUKKOLUETTELO

sivu

Taulukko 2.1. Huokosten jaottelu kolmeen huokoslajiluokkaan (Luxenmore 1981).	4
Taulukko 3.1. Maakerrosten savipitoisuus, humuspitoisuus, kiintotiheys ja tilavuuspaino.	19
Taulukko 3.2. Van Genuchtenin yhtälössä käytetyt parametrit pinta- ja pohjamaalle.	21
Taulukko 3.3. Hydraulisten johtavuuksien tilastolliset tunnusluvut pisteiden 11 5-10 cm ja 17-18 65-70 cm näytteille. Yksikkö cm/d.	22
Taulukko 3.4. Hydraulisten johtavuuksien tilastolliset tunnusluvut eri kerroksille. Yksikkö cm/d.	22
Taulukko 3.5. K(h) funktion parametrit kolmelle eri käyränosalle.	23
Taulukko 3.6. Kutistumiskäyrien parametrit.	26
Taulukko 3.7. Analysoitavat suureet ja analyysimenetelmät.	28
Taulukko 4.1. Valunta ja ravinnehuuhtoumat salaojapadolta S3 ja pintavaluntapadolta P2 kuukausittain, kesäkuu 1994-toukokuu 1995.	39
Taulukko 4.2. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 15.9.-23.9.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet $\mu\text{g/l}$ ja kiintoainespitoisuudet mg/l .	44
Taulukko 4.3. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 28.9.-2.10.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet $\mu\text{g/l}$ ja kiintoainespitoisuudet mg/l .	45
Taulukko 4.4. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 4.10.-8.10.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet $\mu\text{g/l}$ ja kiintoainespitoisuudet mg/l .	45
Taulukko 4.5. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 10.10.-13.10-1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet $\mu\text{g/l}$ ja kiintoainespitoisuudet mg/l .	45
Taulukko 4.6. Riippumattomien näytteiden määrä eri näytesarjoista. Suluissa on näytemäärä, jota on käytetty ekvivalenttien riippumattomien näytteiden määrää laskettaessa.	48
Taulukko 4.7. Riippumattomien näytteiden näytteenottoväli tunteina.	48
Taulukko 4.8. Eri ravinnepitoisuuksien väliset Pearsonin korrelaatiokertoimet näytesarjalle 15.-23.9.-94. Tähdellä merkityt kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä.	50

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

KUVALUETTELO

TAULUKKOLUETTELO

	sivu
1. JOHDANTO	1
2. KIRJALLISUUSKATSAUS	2
2.1 Yleistä	2
2.2 Maan kuivumis-kutistumiskäyttäytyminen	2
2.2.1 Maan huokosrakenne	2
2.2.2 Saven fysikaalisia ominaisuuksia	4
2.2.3 Savimaan kutistumis-laajenemiskäyttäytyminen	6
2.3 Hydraulinen johtavuus savimailla	9
2.3.1 Hydraulisen johtavuuden mittaaminen	10
2.3.2 Hydraulisen johtavuuden muuttuminen ajan mukaan	13
2.4 Veden virtauksen mallintaminen	14
3. KENTTÄ- JA LABORATORIOMITTAUKSET	16
3.1 Koealueen kuvaus	16
3.2 Koejärjestelyt	17
3.3 Maaperäominaisuudet	18
3.3.1 Rakeisuus, kiintotiheys ja huokoisuus	18
3.3.2 Vedenpidätyskäyrä	19
3.3.3 Hydraulinen johtavuus	22
3.3.4 Kuivumis-kutistumiskäyrä	24
3.4 Virtaaman mittaaminen	27
3.5 Veden laadun ja huuhtoumien määrittäminen	27
3.6 Sääolosuhteet	28
4. VALUNTA JA VEDEN LAATU	32
4.1 Salaoja- ja pintavalunta	32
4.1.1 Vuodenaikainen vaihtelu	32
4.1.2 Salaojavalunnan lyhytaikainen vaihtelu	34
4.2 Vedenlaadun vuodenaikainen vaihtelu	35
4.3 Huuhtoumat	39
4.4 Veden laadun lyhytaikainen vaihtelu	42
4.4.1 Virtaama-vedenlaatuajaksisarjat	42
4.4.2 Tilastolliset tunnusluvut	44
4.4.3 Havaintojen autokorrelaatorakenne	46
4.4.4 Virtaaman ja pitoisuuden välinen riippuvuus	48
4.5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	51

5. MALLISOVELLUS	53
5.1 Yleistä	53
5.2 FLOCR-mallin toimintaperiaate	53
5.2.1 Veden virtauksen mallintaminen	54
5.2.2 Yläpinnan reunaehdot	57
5.2.3 Alapuoliset reunaehdot	60
5.3 Tulokset	64
5.4 Parametrien herkkyysanalyysi	68
5.5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	72
6. YHTEENVETO	74
7. KIRJALLISUUS	76

1. JOHDANTO

Vesistöjen vedenlaadun parantamisessa huomio on siirtynyt teollisuuden ja yhdyskuntien jätevesikuormituksesta hajakuormituksen aiheuttama vesistöjen veden laadun huononemiseen. Hajakuormituksen vaikutuksia eri vesiekosysteemeihin ja keinoja hajakuormituksen vähentämiseksi on viime vuosina tutkittu paljon. (Seuna & Kauppi, 1981, Pitkänen, 1994, Rekolainen, 1992, 1993). Suomessa peltoviljelyn osuus vesistöjen kokonaisravinnemuormasta on fosforin osalta 58% ja typen osalta 56 % (Rekolainen et al., 1992). Hajakuormituksen vaikutukset näkyvät merkittävästi kevätsulannan jälkeen ja syksyllä runsassateisten jaksojen yhteydessä, jolloin vesistöihin purkautuu suurin osa pelloilta tulevasta hajakuormituksesta. Ravinnehuuhtoumat lisäävät vesistöissä rehevöitymistä, kiintoaineksen aiheuttamia samentumisia ja näiden seurannaisvaikutuksia, kuten vesistöjen umpeenkasvua, happikatoa ja kalakuolemia.

Savipeltojen osuus Suomen peltoalasta on merkittävä. Suomen kokonaispeltoalasta noin 40 % on pohjamaalajiltaan savea ja muokkauskerros on yli puolessa Etelä- ja Länsi-Suomen pelloista savea (Kähäri et al., 1987). Kuivuessaan savimaa kutistuu, josta seuraa maan halkeilua. Halkeamissa ja maan makrohuokosissa vesi voi liikkua huomattavasti nopeammin kuin maamatriisissa. Savimaissa syntyvien oikovirtausten mukana kasveille tarkoitetut ravinteet ja torjunta-aineet voivat huuhtoutua suoraan syvälle maaperään ja salaojiin, joista ne kulkeutuvat pohja- ja pintavesiin.

Tässä työssä keskitytään salaojien kautta peltoalueelta purkautuvan valunnan ja vedenlaadun ajallisen vaihtelun tutkimiseen sekä salaojavalunnan laskennalliseen mallintamiseen halkeilevilla savipelloilla. Erityistä huomiota on suunnattu halkeamien syntymisen mallintamiseen ja maan muiden fysikaalisten ominaisuuksien määrittämiseen. Työ liittyy tutkimukseen, jossa selvitetään peltoviljelyn vesistöihin aiheuttamaa kuormitusta sekä sääätösalojituksen ja padotuskastelun soveltuvuutta Suomen oloihin. (Paasonen-Kivekäs et al., 1995, Karvonen, 1992).

Yhtenä tutkimuksen tarkoituksista on selvittää sääätösalojituksen ja padotuskastelun vaikutusta ravinnehuuhtoumiin hajakuormituksen pienentämiseksi. Tutkimuksessa sääätösalojitusta ja sen sovellusmahdollisuuksia selvitettiin normaalissaviljelyksessä olevalla savipellolla. Tämänhetkisen kokemuksen perusteella savipelloilla sääätösalojitusta voidaan lähinnä soveltaa padotuskastelun muodossa.

Työ koostuu kolmesta osasta. Kirjallisuusosassa on selvitetty savimaan ominaisuuksia, sen kutistumis-laajenemiskäyttäytymistä, halkeamien ja makrohuokosten vaikutusta pellon hydraulisiin ominaisuuksiin. Kokeellisen tutkimuksen osassa on selvitetty salaojavalunnan ja veden laadun lyhytaikaista ja vuotuista vaihtelua sekä käytetyn näytteenottotähtien järkevyyttä. Mallisovellusosassa lasketaan mitattuja maaperäominaisuuksia ja sadanta- ja haihduntatietoja käyttäen Flocc -mallilla syntyvää salaojavirtaamaa, pintavaluntaa ja syntyviä halkeamia Sjököllän koekentältä. Laskettuja tuloksia on verrattu vuonna 1994 Sjököllän koekentältä mitattuun aineistoon.

2. KIRJALLISUUSKATSAUS

2.1 Yleistä

Maan kuivuessa sen tilavuus pienenee. Savella kuivumiskutistuminen on merkittävää ja sen voi silmämääräisesti havaita. Savipellolla kutistumisesta seuraa maan halkeilua ja ns. makrohuokosten muodostumista. Veden virtauksia halkeamissa voidaan kutsua oikovirtauksiksi. Sateen jälkeen maa alkaa uudelleen kostua ja syntyneet halkeamat sulkeutuvat maan laajetessa. Halkeamien puuttuessa imeytyminen savimaahan on hyvin hidasta sen pienen vedenjohtavuuden takia.

Kutistumis-laajenemisprosessilla on merkittäviä vaikutuksia savimaiden hyödyntämiseen. Maanviljelysmailla merkittävin seuraus kutistumisesta on maan halkeilu ja veden ja siihen liuenneiden ravinteiden virtaus halkeamissa. Kun pellolla on halkeamia osa sadevesistä ja kasteluvesistä sekä niissä liuenneina olevat ravinteet kulkeutuvat suoraan halkeamia myöden syvemmälle maaperään pois kasvien juurten ulottumattomiin. Tästä saattaa seurata kuivuusvaurioita ja ravinteiden puutoksia viljelyskasveille. Lisäksi veteen liuenneiden viljelyskasveille tarkoitettujen ravinteiden ja torjunta-aineiden kulkeutuminen halkeamia myöten suoraan salaojiin ja pinta- tai pohjavesiin aiheuttaa pohjavesien pilaantumista ja vesistöjen rehevöitymistä. Kuivumiskutistumisen myönteinen seuraus on, että halkeilleelle pellolle voidaan kastelun avulla imeyttää suurempia määriä vettä kuin olisi mahdollista saada imeytymään vastaavan kosteuspitoisuuden omaavalle halkeilemattomalle pellolle.

Maan halkeilun ja maanpinnan painumisen dynamiikan tunteminen on keskeistä ennustettaessa veden virtausta ja aineiden kulkeutumista laajenevassa savimaassa. Siksi kuivumisen ja halkeilun välisen suhteen tunteminen on tärkeää. Maan suurilla huokosilla ja halkeamilla on ratkaiseva merkitys veden virtaukseen maaperässä. Huokosen kykyä johtaa vettä maaperässä kuvataan maan hydraulisella johtavuudella (K). Usein veden virtausta kuvataan Richardsin (1931) kehittämällä yhtälöllä tai sen sovelluksilla. Tällöin huokosten voidaan olettaa johtavan vettä vain, jos huokoset ovat vedellä täysin kyllästyneitä. Tämä on osittain virheellinen käsitys, sillä peltomailla vettä imeytyy maahan myös muuta kautta kun Richardsin yhtälössä ja sen sovelluksissa oletetaan. Makrohuokos- ja halkeamavirtaus on merkittävää Richardsin yhtälöstä poikkeavaa veden liikettä maaperässä (German & Beven, 1981a).

2.2 Maan kuivumis-kutistumiskäyttäytyminen

2.2.1 Maan huokosrakenne

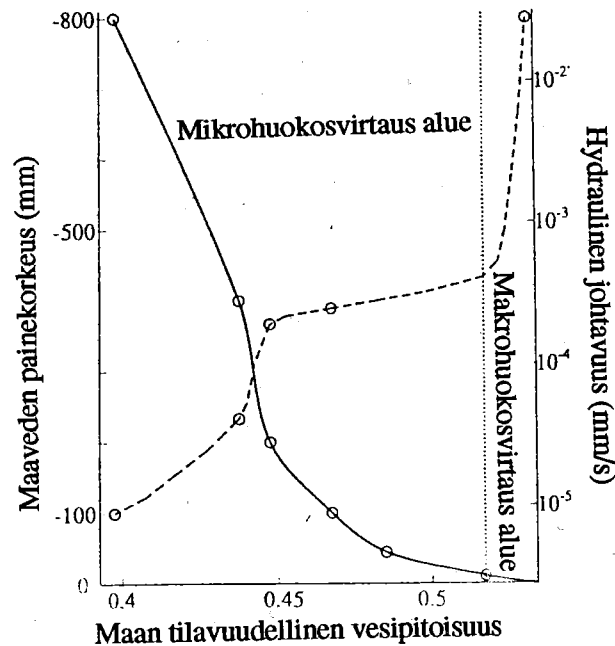
Maan huokosrakenne voidaan käyttötarkoituksen perusteella luokitella usealla eri tavalla. Huokosten jaossa eri luokkiin käytetään funktionaalista luokittelua veden virtauksen ja

kulkeutumisprosessien perusteella. Tavallisimmin mikro- ja makrohuokokset määritellään seuraavasti: Makrohuokokset ovat enimmäkseen toisiinsa liittyneitä onkaloita, joiden kautta tapahtuu haihtuminen ja veden imeytyminen maahan sekä maan ilmastuminen (Hillel, 1980). Mikrohuokokset ovat toisiinsa liittyneitä kapillaarisia huokosia, jotka lähinnä pitävät veden ja siihen liuenneet aineet maaperässä. Germann & Beven (1981) esittivät, että maaperän huokoisuus jaetaan kahteen osaan sen mukaan tapahtuuko virtaus pääasiassa makrohuokosten vai mikrohuokosten kautta. Pienin huokossäde jolla makrohuokosvirtausta voi vielä tapahtua voidaan määrittää huokossäteen R ja kapillaarisen potentiaalin avulla.

$$\psi = -\frac{2 \cdot \sigma}{R \cdot \rho_w \cdot g} \quad (2.1)$$

- σ = Ilma-vesi rajapinnan pintavastus [s/m]
 ρ_w = Veden tiheys [g/m]
 g = Putoamiskiihtyvyys [m/s²]
 ψ = Kapillaarinen potentiaali [m]

Yhtälössä (2.1) huokossäteen halkaisijaa ei ole määrätty kapillaaripotentiaalin arvolla nolla ($\psi=0$). Kapillaaripotentiaalin arvoa $\psi = -1$ cm käytetään mikro- ja makrohuokosten dominoivan virtausalueen rajana. Kun kapillaaripotentiaalin arvo on suurempi kuin -1 cm, niin virtaus tapahtuu pääasiassa makrohuokosten kautta. Makrohuukosissa virtauksen oletetaan tapahtuvan gravitaatiovoimien vaikuttaessa kapilaarivoiman ollessa merkityksetön. Mikrohuukosissa veden virtaus on riippuvaista kapilaarihuukosista.



Kuva 2.1. Veden virtauksen jako mikro- ja makrohuukosvirtaukseen huukoskoon perusteella. Vedenpidätyskäyrän avulla (yhtenäinen käyrä) ja hydraulisen johtavuuden avulla (katkoviiva käyrä). (German & Beven, 1981a)

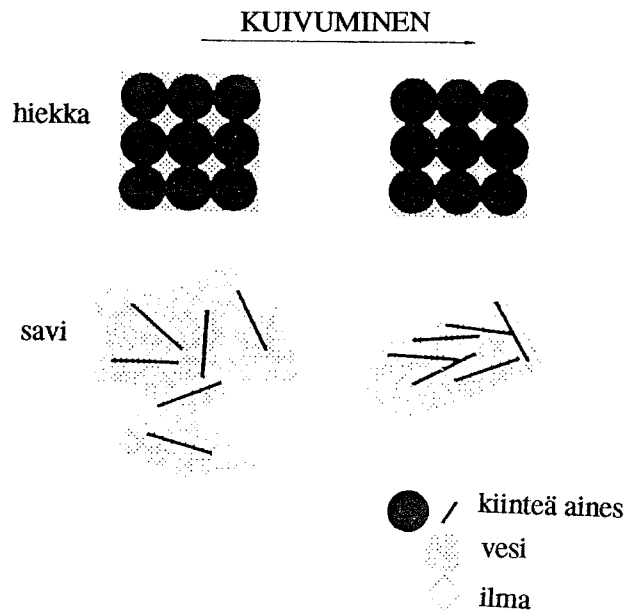
Luxenmore (1981) arvioi kirjallisuudessa esitettyjä hyvin erilaisia raja-arvoja mikro- ja makrohuokosten erottamiseen toisistaan ja esitteli samalla oman ehdotuksen huokosten jaotteluksi (taulukko 2.1). Ehdotuksessa eri huokoskokojen raja-arvot on määrätty painepotentiaalin arvon perusteella, jolla huokokset tyhjenevät ja huokosten keskimääräisten halkaisijoiden perusteella. Hän kuitenkin totesi, että ehdotus ei ole välttämättä paras vaihtoehto kaikille maalajeille, mutta on kuitenkin sopiva suurimmalle osalle maalajeista. Bouma (1982) totesi, että makrohuokosten tarkalla koolla ei ole niin suurta merkitystä kuin on yleisesti kuviteltu, koska pienet yhteen liittyneet huokokset johtavat vettä paremmin kuin suuret suljetut huokokset. Huokoskokojen erottelu ei välttämättä ole niin oleellista kuin aiemmissa tutkimuksissa on annettu ymmärtää.

Taulukko 2.1. Huokosten jaottelu kolmeen huokoslajiluokkaan (Luxenmore 1981).

Maan huokoslaji	Jakava painepotentiaalin arvo(cm)	Keskimääräinen huokosten halkaisija(μm)	Huokosten luonne
mikro-	-300	< 10	Evapotranspiraatio; painepotentiaalin vaikutus veden jakautumiseen maaperässä.
Meso-	-300 ... -3	10 ... 1000	Imeytyminen salaojiin; hystereesis; gravitaatiovoimien vaikutus veden liikkeisiin.
Makro-	> -3	>1000	Oikovirtaus maaprofiilin lävitse

2.2.2 Saven fysikaalisia ominaisuuksia

Savi vaikuttaa maan fysikaalisiin ominaisuuksiin enemmän kuin mikään muu maalaji (Hillel, 1982). Savi eroaa muista maalajeista sisältämiensä savimineraalien, kaoliitti, illiitti ja montmorilloniitti vaikutuksesta. Savimineraalit koostuvat levyn muotoisista kiteistä. Kiteet muodostuvat piioksideista ja alumiinihydroksideista. Savikiteen paksuus vaihtelee 5-10 Å. Levyjen määrä kiteessä vaihtelee siinä olevien piioksidejen ja alumiinihydroksidien sijainnista ja määrästä, Levyjä voi olla savikiteessä yhdestä (Na-montmorrolliiniitti) lähes ääretömään (kaoliitti). Savimineraalien erikoisesta rakenteesta johtuen kiteet tai kidepaketit ovat veden ympäröimiä. Maan kuivuessa vesi lähtee näistä väleistä pois ja savipartikkelit lähentyvät toisiaan (kuva 2.2). Tämä prosessi aiheuttaa savimaan kuivumiskutistumisen.



Kuva 2.2. Systemaattinen esitys saven ja hiekan kuivumisesta ja veden korvautumisesta ilmalla. (Bronswijk et al., 1990)

Kolloidisella savella on paljon ulkoista tehopintaa eli ominaispintaa tilavuusyksikköä kohden ja hiukkasten reaktiot tapahtuvat suureksi osaksi juuri pintojen välityksellä. Savipartikkelit absorboivat voimakkaasti vettä ja siksi savimaat kutistuvat ja laajenevat voimakkaasti maan vesipitoisuuden vaihdellessa.

Savimaassa partikkelit ovat liittyneet toisiinsa muodostaen ns. mururakenteen, jonka ominaisuuksiin vaikuttaa ratkaisevasti maan raekoostumus ja kolloidisen humuksen määrä. Kolloidiset ainekset sitovat maassa olevat ainekset yhteen. Mururakenteen syntymiseen ja säilymiseen vaikuttaa myös maan kosteussuhteiden muuttuminen, kolloidikomplekseissa olevat vaihtuvat ionit ja maan mikroelämä (Vakkilainen, 1986).

Savimailla vesipitoisuus on samalla imunavolla jatkuvasti hiekkamaita suurempi, joka johtuu savimaiden tasaisemmasta huokosjakaumasta. Savimailla pF-käyrän taitteet ovat huomattavasti loivempia, koska vesipitoisuus tasaisesta huokoisuudesta johtuen laskee tasaisemmin painepotentiaalin funktiona. Savimailla pienillä painepotentiaalin arvoilla maan kosteuspitoisuudet eivät juuri muutu, ja maan vesipitoisuuden aleneminen on hidasta koko kuivumisen ajan, kun karkearakeisilla maalajeilla vesipitoisuus huokosjakaumasta johtuen muuttuu hyppäyksittäin painepotentiaalin funktiona.

2.2.3 Savimaan kutistumis-laajenemiskäyttäytyminen

Tilavuuden muutokset kosteuden funktiona ovat merkittäviä savimailla. Haines (1923) ja Keen (1931) ref. Bronswijk et al. (1990) ovat määritelleet kolme kutistumisaluetta:

Normaali kutistuminen:

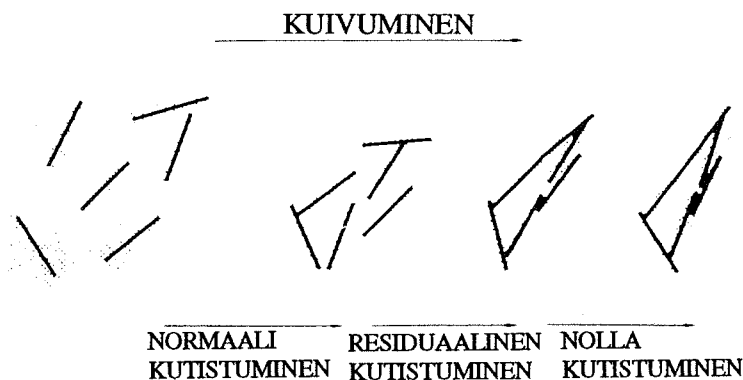
Tilavuuden pienentyminen on suoraan verrannollinen poistuneen veden määrään.

Residuaalinen kutistuminen:

Maan kuivuessa sen tilavuus pienenee edelleen, mutta vettä poistuu enemmän kuin maa kutistuu ilman täyttäessä vedestä tyhjeneviä huokosia.

Nolla kutistuminen:

Maapartikkelit ovat saavuttaneet tiiveimmän muotonsa. Veden poistuessa tilavuus ei enää muutu ja poistunut vesi korvautuu ilmalla. Ei enää tapahdu kutistumista



Kuva 2.3. Savimaiden kutistumisen eri alueet.(Bronswijk et.al.,1990)

Pellolla voidaan edellisiin kolmeen kutistumismuotoon lisätä neljäs: rakenteellinen kutistuminen. Rakenteellista kutistumista tapahtuu hyvin märillä mailla. Kun maa kuivuu joko haihtumisen tai kuivatuksen seurauksena, tyhjenevät ensin suurimmat vedellä täyttyneet huokokset, jolloin maasta tulee tiiviimpi. Tällöin tilavuus ei juurikaan muutu, mutta kosteuden muutos voi olla hyvinkin merkittävää. Tätä prosessia kutsutaan rakenteelliseksi kutistumiseksi.

Vesipitoisuuden ja tilavuuden välistä suhdetta on tutkittu sekä laboratoriossa että kentällä (Bouma,1985, Clothier & Smettem,1990, Mesing,1989, Messing & Jarvis, 1990,1993). Tutkimuksissa on käytetty erilaisia pieniä ja suuria näytteitä sekä suoria pellolla tehtyjä kokeita. Pienistä näytteistä saadut tulokset eivät usein johda merkittäviin vesipitoisuuksien muutoksiin rakenteellisella kutistumisalueella, koska rakenteellinen kutistuminen on voimakkaasti riippuvaa maan rakenteesta. Tämän takia suuria näytteitä tarvitaan, kun tutkitaan rakenteellista kutistumista. Ylempien maakerroksien paino vaikuttaa kutistumis-laajenemiskäyttäytymiseen pellolla eikä tätä voida ottaa huomioon tuotaessa näytteitä laboratorioon tutkittaviksi. Kentällä käytettyjen koealojen ja suurien näytteiden tilavuuden muutoksia on toisaalta vaikeampi arvioida kuin pienien näytteiden. Lisäksi vesipi-

toisuuden mittaaminen pellolla on hankalaa. Näiden syiden perusteella suuria näytteitä käyttämällä hallituissa ja tarkasti tunnetuissa laboratorio-olosuhteissa saadaan parhaat mittaustulokset.

Veden virtauksen ja ravinteiden huuhtoutumisen kannalta on oleellista tuntea todellinen tilavuuden muutos, johon vaikuttavat vallitsevat sääolot, pellon kuivatus ja viljelystointenpiteet. Tilavuuden muutosten mallintamisessa on tärkeää tuntea maan kutistumiskäyttäytyminen maan kosteuden funktiona. Käytetyimmät kutistumisparametrit ovat kosteussuhde v ja huokossuhde e , jotka on määritelty seuraavasti (Bronswijk et al., 1990):

v = veden tilavuus/kiinteän aineksen tilavuus

e = huokosten tilavuus/kiinteän aineksen tilavuus

Näytteen tilavuuden muutoksen perusteella voidaan kosteussuhteen v ja huokossuhteen e riippuvuus maan kosteudesta θ ja huokosuudesta ϵ määrätä.

$$\epsilon = \left(\frac{e}{1+e} \right) \quad (2.2)$$

$$\theta = \left(\frac{v}{1+e} \right) \quad (2.3)$$

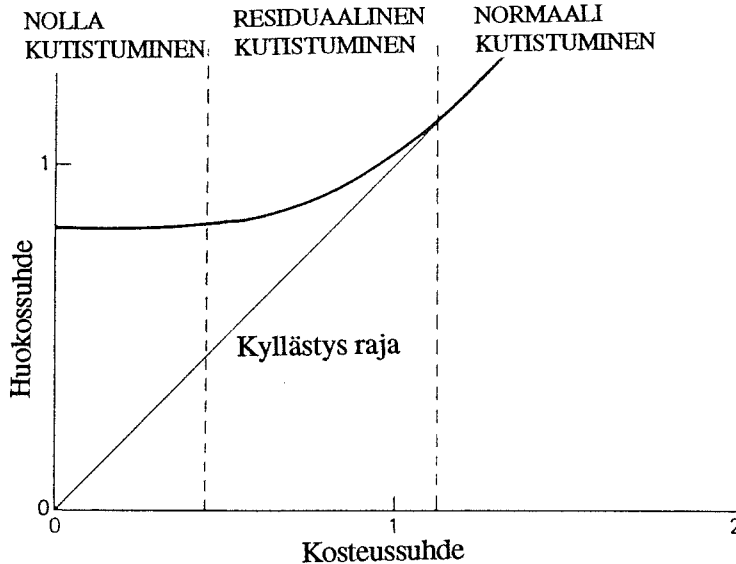
Oletetaan, että maassa ei tapahdu vertikaalista kutistumista ja maan kokonaishuokoisuus (e_t) koostuu kahdesta komponentista; stabiilista komponentista (e_s), joka muodostuu rakenteellisesta kutistumisalasta ja dynaamisesta komponentista (e_d), joka johtuu normaalista ja/tai residuaalisesta kutistumisesta maapatjassa.

$$e_t = e_s + e_d \quad (2.4)$$

, jossa

$$e_d = p(\theta_s - \theta) \quad (2.5)$$

θ_s on laajenemisraja, joka on vesipitoisuuden raja-arvo rakenteellisen ja normaalin tai residuaalisen kutistumisen välillä, θ on vallitseva maan vesipitoisuus ja p kulmakerroin kutistumismuutoksille tutkitulla kosteusalueella (McGarry & Malafant, 1987).



Kuva 2.4. Kuivumiskutistumiskäyrän yleinen muoto kolmella eri kutistumisalueella.

Kutistumisominaisuuksia voidaan määrittää myös huokossuhteen ja kosteussuhteen keskenäisen riippuvuuden avulla, jolloin p on syntyneen suoran kulmakerroin (kuva 2.4). Messing ja Jarvis (1990) ovat määrittäneet kuivumis-kutistumiskäyriä edellä esitetyllä menetelmällä, jolloin he ovat ensin laskeneet laajenemisrajan ja lakastumisrajan ja sovittaneet näiden välille silmämääräisesti suoran, jonka kulmakerroin on edellä esitetty p . Kim et al (1992) ovat sovittaneet kuivumiskutistumiskäyrän mitattujen pisteiden välille käyrän, joka sisältää eksponentiaalisen osan residuaalista kutistumista varten ja lineaarisen osan normaalikutistumista varten seuraavasti:

$$Y = \frac{a}{(e^{\alpha x})} + bX \quad (2.6)$$

- Y = Selittävä muuttuja, joka esittää huokossuhdetta
- X = Riippumaton muuttuja, joka esittää kosteussuhdetta
- a = Parametri, joka vastaa uunikuivan näytteen huokossuhdetta
- b = Kutistumiskäyrän kyllästysuoran kaltevuus
- α = Parametri, joka ilmaisee ilman sisääntulopisteen

Huokossuhteen ja kosteussuhteen avulla voidaan määrittää tilavuuden ΔV muutos kosteuden muutoksen suhteen seuraavasti (Bronswijk, 1989):

$$\Delta z = z - z \left(\frac{V - \Delta V}{V} \right)^{1/r_s} \quad (2.7)$$

$$\Delta V_{cr} = \Delta V - z^2 \cdot \Delta z \quad (2.8)$$

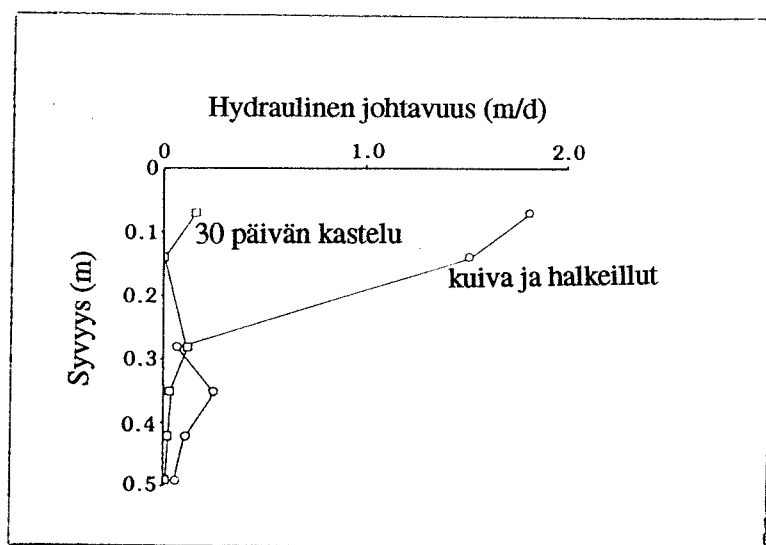
Δz	=	Kuution korkeuden muutos [m]
ΔV_{cr}	=	Halkeamatilavuuden muutos [m ³]
V	=	Maakuution tilavuus ennen kutistumista tai laajenemista [m ³]
ΔV	=	Kutistumisen aiheuttama tilavuuden muutos [m ³]
z	=	Kuution korkeus ennen kutistumista tai laajenemista [m]
r_s	=	geometrisuustekijä

Yksikötön geometrisuustekijä määrittää tilavuuden muutoksen, joka muodostuu kerroksen paksuuden muutoksesta ja halkeamatilavuuden muutoksista. Kolmedimensionaalisille isotrooppisille halkeamille $r_s = 3$. Tekijä riippuu kosteuspitoisuudesta, halkeiluasteesta ja kuormasta.

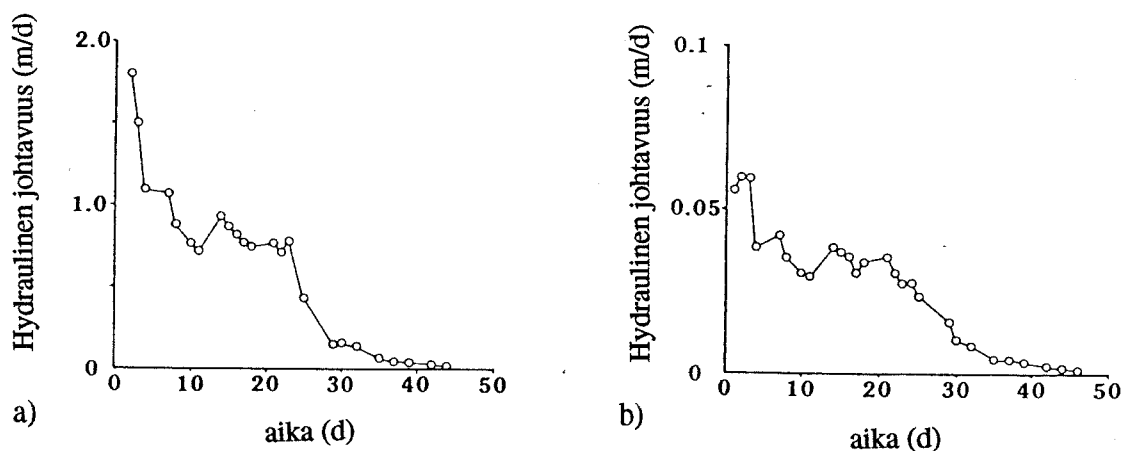
2.3 Hydraulinen johtavuus savimailla

Laajenevilla savimailla makrohuokosten liittyminen toisiinsa, niiden koko ja muoto vaihtelevat maan kosteuden mukaan. Tämä vaikuttaa myös maan hydraulisten ominaisuuksien muuttumiseen ajan suhteen. Kyllästyneessä tai lähes kyllästyneessä tilassa makrohuokosten kautta syvemmälle maaperään voi imeytyä maan pinnalle lätäköihin kerääntynyttä vettä. Tällaisessa tilassa kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus vaikuttaa sekä makrohuokosvirtaukseen että maamatriisissa tapahtuvaan virtaukseen. Peltomittakaavan virtausprosessin mallinnuksessa kyllästyneen tilan hydraulinen johtavuus on tunnettava sekä matriisille että makrohuokosille (Rasiah, 1995).

Leeds-Harrison et al. (1986) ovat mitanneet maan hydraulisen johtavuuden muuttumista maan kosteuden mukaan. Hydraulista johtavuutta mitattiin suurista maanäytteistä silloin kun näytteet olivat kuivia ja uudelleen kun näytteitä oli kasteltu 30 päivän ajan. Suurimmat muutokset hydraulisessa johtavuudessa tapahtuivat näytteen pintakerroksessa, jossa näytteen hydraulinen johtavuus kastelun jälkeen oli pudonnut kymmenesosaan kuivan näytteen hydraulisesta johtavuudesta (Kuva 2.5). Kuvassa 2.6 on esitetty hydraulisen johtavuuden muuttuminen kyllästysajan funktiona pinnassa ja puolen metrin syvyydellä näytteessä. Näissä hydraulinen johtavuus kasteluajan funktiona pienenee, koska näyte hiljalleen laajenee ja hienoaaines täyttää suurempia huokosia.



Kuva 2.5.Hydraulisen johtavuuden muuttuminen maanäytteessä kosteuden mukaan(Leeds-Harrison et al,1986).



Kuva 2.6. Hydraulinen johtavuus ajan funktiona kyllästystilassa a) 10 cm syvyydellä b)50 cm syvyydellä näytteessä (Leeds-Harrison et al,1986).

2.3.1 Hydraulisen johtavuuden mittaaminen

Kyllästyneen maan hydraulista johtavuutta mitataan sekä kentällä että laboratoriossa. Laboratoriossa käytetään karkearakeisille maalajeille muuttumattoman painekorkeuden menetelmää ja hienorakeisille maalajeille muuttuvan painekorkeuden menetelmää, jolla hidasta mittausta saadaan jonkin verran nopeutettua. Kentällä kyllästyneen maan hydraulisen johtavuuden mittaamiseen käytetään yleisesti kahta menetelmää; kairanreikämenetelmää ja käänteistä kairanreikämenetelmää. Käänteinen kairanreikämenetelmä sopii pohjaveden pinnan yläpuolisten kerrosten hydraulisen johtavuuden määrittämiseen, jolloin se on käyt-

tökelpoinen menetelmä pintakerroksen hydraulisen johtavuuden määrittämisessä. (Vakkilainen, 1986)

Kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi on käytössä useita menetelmiä. Laboratoriomenetelmät jaetaan lyhyen- ja pitkänmaanäytteen menetelmiin. Kentällä käytetään hetkellisen kosteusprofiillin mittausta kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden määrittämiseen. (Vakkilainen, 1986)

Käytetty mittaamenetelmä vaikuttaa merkittävästi mitatun hydraulisen johtavuuden suuruuteen. Menetelmän vaikutusta ovat tutkineet mm. Messing & Jarvis (1990) ja Clothier & Smettem (1990). Clothierin ja Smettemin tutkimuksen mukaan laboratoriossa on helpompi mitata maamatriisin hydraulista johtavuutta, jolloin halkeamia ja makrohuokosia ei voida aina huomioida. Kentällä voidaan mitata paremmin maan todellista hydraulista johtavuutta, jolloin halkeamilla ja makrohuokosilla on ratkaiseva merkitys mitattuun hydrauliseen johtavuuteen. Messing ja Jarvis totesivat kyllästyneen maan hydraulisen johtavuuden olevan kesällä laboratoriomittausten perustella alle sadasosan kentällä mitattuun kyllästyneen maan hydrauliseen johtavuuteen verrattuna.

Imeytymisprosessissa ilman sisäänantulosta ja maan hitaasta laajenemisesta johtuen kentällä mitattu kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus ei ole suoraan verrattavissa laboratoriomittauksiin täysin kyllästetystä näytteestä. Tämän takia kentällä mitattu kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus (K_s) on usein paljon käyttökelpoisempi maaveden virtauksia tutkittaessa kuin laboratoriossa mitattu vastaava arvo (K_s) (Messing & Jarvis, 1990)

Samassa tutkimuksessa verrattiin myös kentällä mitattuja hydraulisen johtavuuden arvoja laboratoriomittauksiin. Kentällä auger hole menetelmässä oli käytetty kolmen tunnin esikasteluaikaa ennen varsinaista mittausta. Siinä voidaan havaita kenttämittauksen antavan pintamailla selvästi suurempia hydraulisen johtavuuden arvoja kuin laboratoriomittausten. Pohjamailla tilanne on päinvastainen. Tämän voidaan olettaa johtuvan siitä, että kentällä syvällä maaperässä makrohuokokset ovat todennäköisesti hydraulisesti passiivisia suljettuja huokosia. Hydraulisen johtavuuden laboratoriomäärittystä varten otetussa pienessä sylinterinäytteessä vesi kulkee huomattavasti nopeammin kuin pellolla syvissä maakerroksissa. Ilman esikasteluaikaa kentällä mitatut hydrauliset johtavuudet olivat yli kaksin kertaisia esikastelun jälkeen mitattuihin hydraulisiin johtavuuksiin verrattuna.

Vedenpidätyskäyrää on käytetty hydraulisen johtavuuden määrittämiseen 1950-luvun alusta, jolloin ensimmäiset menetelmät kehitettiin. Menetelmät perustuvat idealisointiin, jossa huokostilan ajatellaan muodostuvan erikokoisista kapillaariputkista. Esimerkkinä näistä menetelmistä on Mualemin menetelmä, jolla voidaan ennustaa suhteellista hydraulista johtavuutta vedenpidätyskäyrän avulla (Mualem, 1976 ref, van Genuchten, 1980). Suhteellinen hydraulinen johtavuus määritellään seuraavasti.

$$K_r(h) = \frac{K(h)}{K_s} \quad (2.9)$$

, jossa

- $K(h)_r$ = Suhteellinen hydraulinen johtavuus painekorkeudella h
- $K(h)$ = Hydraulinen johtavuus painekorkeudella h
- K_s = Kyllästyneen tilan hydraulinen johtavuus

Van Genuchtenin (1980) esittämä yhtälö, jonka parametreja muuttamalla voidaan kuvata eri maalajien vedenpidätyskäyriä.

$$\theta = \left[1 + (\alpha \cdot |h|)^\beta \right]^{-\gamma} \cdot (\phi - \theta_r) + \theta_r \quad (2.10)$$

jossa

$$\begin{aligned} \theta &= \text{vesipitoisuus} \\ h &= \text{paine korkeus} \\ \theta_r &= \text{jäännösvesipitoisuus} \\ \phi &= \text{huokoisuus} \\ \alpha, \beta &= \text{maalajikohtaisia parametreja} \\ \gamma &= 1 - \frac{1}{\beta} \end{aligned}$$

Kun Van Genuchtenin yhtälö sijoitetaan Mualemmin malliin, voidaan suhteellinen hydraulinen johtavuus laskea seuraavasti:

$$K_r = \theta^{\frac{1}{2}} \cdot \left[\frac{\int_0^\theta \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right]^2 \quad (2.11)$$

, jossa h on paine korkeus kosteuden funktiona ja yhtälössä 2.12 θ_r ja θ_s merkitsevät residuaali- ja kyllästyskosteuksia.

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.12)$$

Suhteelliselle hydrauliselle johtavuudelle saadaan seuraava yhtälö:

$$K_r(\theta_e) = \theta_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - (1 - \theta_e^{\frac{1}{2}})^m \right]^2 \quad (0 < m < 1) \quad (2.13)$$

2.3.2 Hydraulisen johtavuuden muuttuminen ajan mukaan

Suomessa maa käy läpi useita kuivumis- ja kastumisjaksoja vuoden aikana, samalla savi- maa kutistuu ja laajenee maan kosteuspitoisuuden mukaan. Tavallisimmin maa on kevät- sulannan aikaan lähes kyllästynyt, minkä jälkeen maa alkaa kuivua kesän edetessä. Lop- pukesällä tai alkusyksystä alkaa uusi kastumisjakso, kunnes maa jäätyy talvella. Tähän kiertoon aiheuttaa poikkeuksia sääoloiltaan poikkeavat vuodet ja Etelä-Suomen leudot talvet. Kesän aikana savimaa laajenee ja kutistuu sadannasta ja haihdunnasta riippuen. Syk- syllä maa lähinnä laajenee kunnes se jäätyy talvella.

Maan rakenteessa vuodenaikaisvaihtelu vaikuttaa merkittävästi maaveden liikkeisiin maaperässä. Aitosavi saattaa pitkän sadejakson jälkeen tulla lähes vettä läpäisemättömäksi, kun taas kuivina jaksoina se voi johtaa vettä kohtuullisen hyvin syntyneiden halkeamien kautta. Märässä savimaassa kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus (K_s) on läheisesti riippuvainen maan makrohuokosten tilavuudesta (Messing, 1989). Tässä tilassa vain ne makrohuokokset, jotka ovat toisiinsa liittyneitä voivat johtaa vettä. Vedellä kyllästymättö- mässä savimaassa syntyvät halkeamat edistävät veden virtausta.

Messingin ja Jarvisin (1990) Ruotsissa tekemän tutkimuksen mukaan K_s ei ole va- kio, vaan muuttuu maassa vallitsevan vesipitoisuuden mukaan. Maan hydraulinen johta- vuus kasvaa merkittävästi kesä kautena maahan syntyvien kuivumis-kutistumishalkeamien takia ja tämä muuttuminen oli voimakkainta maan pintakerroksessa. Koealueiden hydrauli- nen johtavuus kasvoi kesällä Ultunassa lähes 20 kertaiseksi ja Limstassa yli 2500 kertai- seksi noin 30 cm syvyydellä. Savipitoisuudet vaihtelivat eri kerrosten välillä Ultunassa 45- 60% ja Limstassa 65-80 % välillä.

Kyntö- ja kylvötoimenpiteet vaikuttavat merkittävästi pellon pintakerroksen hydrau- lisiin ominaisuuksiin. Pintamaalla hydraulisen johtavuuden muuttuminen ajankohdan mu- kaan on vielä nopeampaa kuin pellon muissa kerroksissa. Messing ja Jarvis (1993) ovat Ultunassa tutkineet pintamaan 5-10 cm syvyydeltä otettujen näytteiden hydraulisen johta- vuuden muuttumista vuodenajan ja pellolla tehtyjen viljelytoimenpiteiden mukaan. Tutki- muksessa todettiin kynnön vaikuttavan selvästi eniten hydrauliseen johtavuuteen. Ensini- mäiset näytteet oli otettu kesäkuun puolessa välissä, jolloin maa oli vielä hyvin märkää. Hydraulinen johtavuus oli silloin noin 5.8 mm/h. Kesän edetessä heinäkuussa hydraulinen johtavuus oli syntyneiden halkeamien johdosta kasvanut 32 mm/h. Elokuussa sään muuttu- essa jälleen kosteammaksi hydraulinen johtavuus oli laskenut noin 8.3 mm/h ja pintaker- roksen kosteus oli kasvanut lähelle 40 %. Sadonkorjuun jälkeen elokuun lopulla haihdunta pieneni voimakkaasti. Tämä kasvatti maan kosteutta myös syvemmissä maakerroksissa. Maa kynnettiin kahdesti syyskuun lopulla ja lokakuun puolessavälissä noin 10 cm syvyy- deltä, minkä jälkeen otettiin viimeiset näytteet hydraulisen johtavuuden määrittämistä var- ten. Tällöin hydraulinen johtavuus oli kasvanut arvoon 111 mm/h. Maa oli silloin lähes täy- sin kyllästynyt. Tutkimuksessa kentällä mitattu kyllästyneen tilan hydraulinen johtavuus K_s saatiin extrapoloimalla tuloksia painepotentiaalın arvoon nolla. Saatu tulos oli huomatta- vasti suurempi kuin yleensä savimailla vaihdellen 0.23...0.92 m/h välillä, jolloin maksimi arvot saatiin syksyn kynnön jälkeen. Nämä olivat yksi tai kaksi kertaa suurempia kuin sa- maan aikaan samoista paikoista otetuista näytteistä laboratoriossa mitatut hydrauliset joh- tavuudet. Näiden tulosten perusteella Messing ja Jarvis suosittelivat K_s käyttöä laboratori-

ossa mitatun K_s asemesta rakenteellisilla maalajeilla, joilla on kutistumista laajenemiskäyttäytymistä. K_s mitataan laboratoriossa täysin laajenneista kyllästetyistä näytteistä olosuhteissa jollaisia kentällä ei ole.

2.4 Veden virtauksen mallintaminen

Veden virtausta on perinteisesti mallinnettu Darcyn lakiin perustuvan Richardsin yhtälön avulla. (Richards, 1931). Tällä yhtälöllä voidaan laskea veden virtausta kyllästymättömässä vyöhykkeessä. Kuten jo aikaisemmin on todettu etenkin savimailla vesi virtaa myös makrohuokosten ja halkeamien kautta syvemmälle maaperään ja salaojiin (Beven & Germann, 1982, Leeds-Harrison et al., 1986). Veden virtauksen mallintaminen makrohuokosissa tai halkeamissa voidaan pitää vaikeana ja monimutkaisena tehtävänä. Tätä Richardsin yhtälöstä poikkeavaa virtausta on pyritty mallittamaan erityyppisillä maaperän vesitasetta laskevilla malleilla. (Kutilec & Novak, 1976, Edvards et al., 1979, Hoogmoed & Bouma, 1980, Bouma & Dekker, 1978, Germann & Beven, 1981, Jarvis, 1991, Bronswijk et al., 1992)

Beven ja Germann (1982) esittivät periaatteen, jolla makrohuokosia ja halkeamia sisältävän maan vesitasetta voidaan laskea. He esittivät, että malli jaetaan kahteen osaan, joista toinen, matriisin veden virtausta mallittava, osa perustuu Darcyn lain mukaiseen virtaukseen ja toinen makrohuokosissa syntyvään virtaukseen. Heidän mukaansa ennen mallintamista on selvitettävä eri virtauksien luonne ja makrohuokosten vaikutus virtaukseen.

1. Matriisivirtauksen luonne: Matriisissa tapahtuvaa virtausta voidaan mallintaa Darcyn lakiin perustuvan Richardsin yhtälön avulla. Makrohuokokset aiheuttavat epäjatkuvuutta matriisin alueella ja nämä tuottavat monimutkaisia reunaehtoja virtauksen mallintamiselle.

2. Makrohuokosvirtauksen luonne: Makrohuokosvirtauksesta tiedetään, että makrohuokokset voivat johtaa suuria määriä vettä olematta kyllästyneitä. Makrohuokosissa vesi voi virrata kuten pienissä "puroissa" makrohuokosten reunoilla. Makrohuokosvirtaus on usein laminaarista, mutta makrohuokosten pinta on usein epätasainen, joka saattaa aiheuttaa virtauksen muuttumisen kyllästymättömässä tilassa turbulenttiseen suuntaan.

3. Ajallisten ja alueellisten tekijöiden vaikutus makrohuokosiin: Makrohuokosten sijainti, koko ja muoto voivat muuttua ajan suhteen, aiheuttaen virtaaman muutoksia makrohuokosissa.

4. Kahden mallin osan yhteistoiminta: Mallin osien välinen yhteistoiminta riippuu makrohuokosissa olevan veden määrästä ja matriisin hydraulisesta tilasta. Vesi voi joko imeytyä makrohuokosista matriisiin, tai jos matriisi on kyllästynyt, virtaus voi kääntyä matriisista makrohuokosiin. Huokospinnat ja vallitsevat hydrauliset gradientit vaikuttavat virtauksen jakautumiseen makro- ja mikrohuokosten välillä.

5. Makrohuokosvirtauksen alkaminen: Makrohuokosten kautta imeytyvän veden määrän kasvu aiheuttaa häviöitä matriisin imeytyviin vesimääriin. Makrohuokosvirtaus alkaa useimmiten silloin, kun matriisin imeytymiskapasiteetti ylittyy. Kun maa on kasvuston

peittämää, makrohuokoset eivät välttämättä ulotu maanpintaan asti, jolloin paikallinen vaihtelu makrohuokosvirtauksen alkamiselle on suurta.

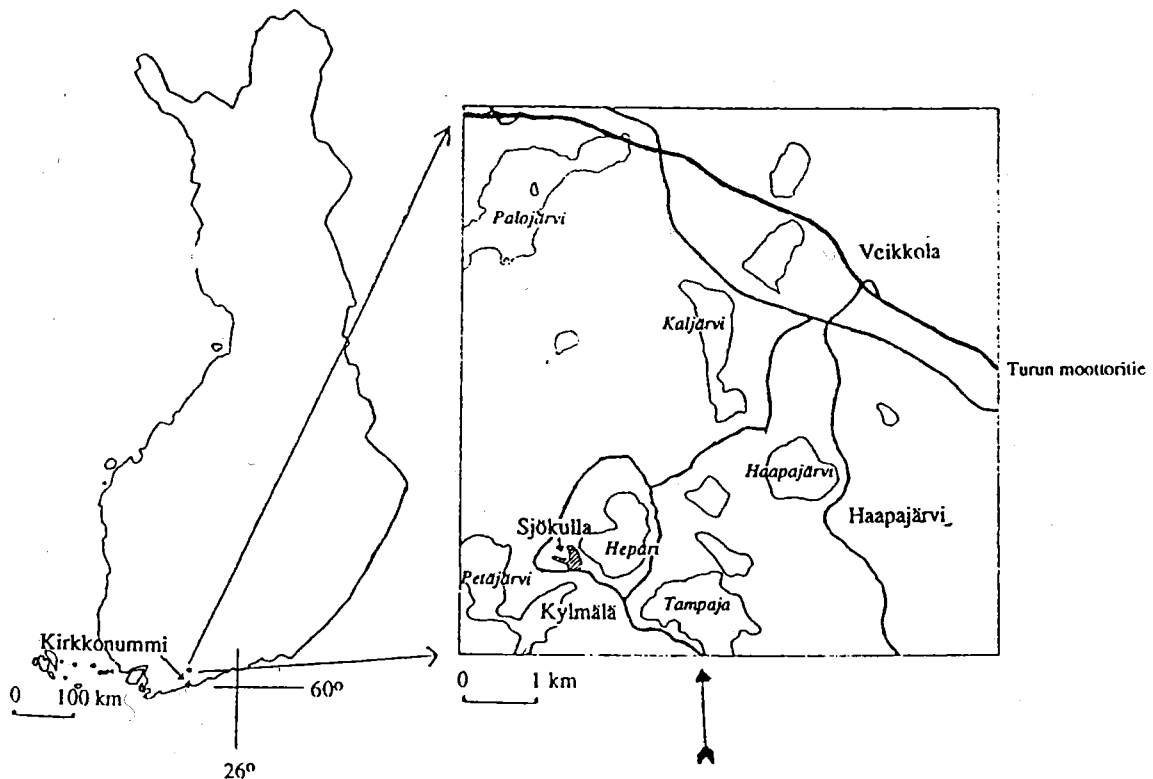
Bronswijk on ratkaissut makrohuokosvirtauksen ongelman laskemalla kuivumisen seurauksena syntyvät kutistumistilavuudet eli halkeamatilavuudet. Syntyneiden halkeamien pinta-ala lisää imeytymispintaa ja mahdollistaa veden imeytymisen myös suoraan pintakerroksen alapuolisiin kerroksiin. Tässä mallissa veden virtaus kyllästymättömässä vyöhykkeessä lasketaan ainoastaan Richardsin yhtälön perusteella. Flocr mallin toiminnan tarkka kuvaus on esitetty tämän työn viidennessä luvussa.

3. KENTTÄ- JA LABORATORIOMITTAUKSET

3.1 Koealueen kuvaus

Tutkimukseen liittyvät mittaukset tehtiin Teknillisen korkeakoulun vesitalouden laboratorion koekentällä Kirkkonummen Sjököllässä. Sjököllän kartano on Engel kiinteistöt Oy:n omistama maatila, joka on Teknillisen korkeakoulun käytössä kurssikeskuksena. Tilan noin 20 ha peltoalasta 5 ha on rakennettu koekentäksi.

Koealueiden maalaji on pääasiassa hieta- ja hiesusavea. Maalaji on erittäin huonosti vettä johtavaa, mutta kuivana aikana voimakkaasti halkeilevaa. Pintakerroksessa on jonkin verran humusta. Pellot on salaojitettu pääosin 1938 tiiliputkin. Muutamiin ojastoihin on tehty täydennys- ja muutositusta 1980-luvulla ja syksyllä 1994 rakennettiin kokonaan uusi ojasto lohkon 19a kaakkoiskulmaan pohjavesikastelun koejärjestelyjä varten. Tässä tutkimuksessa keskitytään lohkoihin 18a ja 18b, joiden maalaji on savea tai hietasavea. Pelto oli normaalissa viljelyksessä ja siellä viljeltiin ohraa tutkimuskesänä 1994. Aikaisempina kesinä siellä viljeltiin kevätvehnää, ohraa ja rypsiä. Koealueen sijainti on esitetty kuvassa 3.1. Kentältä mitattua aineistoa ovat aiemmin esitelleet Koivusalo (1993,1994,1995), Paasonen-Kivekäs et al. (1994,1995,1996), Teittinen & Kleemola (1994), Lahtinen (1995).



Kuva 3.1. Sjököllän koealueen sijainti.

Koekenttien rakentaminen aloitettiin keväällä 1992, jolloin asennettiin salaoja- ja pintavaluntapadot sekä sääasemat. Mittaukset aloitettiin kesällä 1992 ja ne jatkuvat edelleen. Kentällä kokeiltiin säättösalaoituksen toimivuutta savipelloilla, jota varten salaoituksen kokoojiin asennettiin säättökaivoja. Säättökaivoilla voidaan padottaa pohjaveden pintaa ja näin varastoida pellolle vettä kuivaa kautta varten.

3.2 Koejärjestelyt

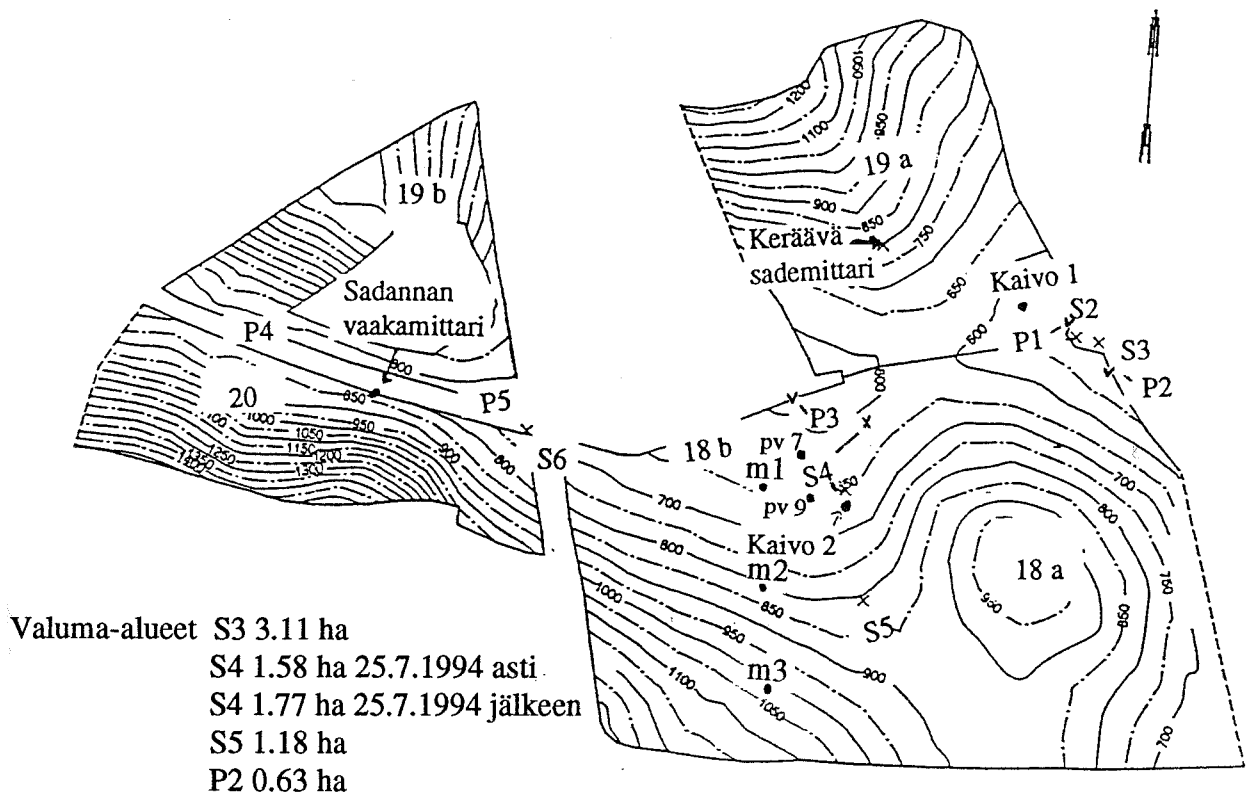
Tutkimusalueella kokeiltiin säättöojituksen soveltuvuutta savipelloille. Tutkimuskesänä pellolle kylvettiin ohraa (lajike: *H. vulgare cv*) 12.toukokuuta, jolloin lisättiin lannoitetta, joka sisälsi typpeä 120 kg/ha. Sato korjattiin 12.8. 1994. Koealueella oli säättökaivot, joissa vuoden 1994 aikana säättö toteutettiin seuraavasti: 3.5.1994 padotus poistettiin pellon kuivattamiseksi kylvötoita varten. 18.5.1994 padotus laitettiin takaisin päälle niin, että padotuskorkeus oli noin 30 cm etäisyydellä pellon pinnasta. Padotus poistettiin 5.8.1994 sadonkorjuu- ja kyntötoita varten. Kynnön jälkeen padotus asennettiin takaisin 11.10.1994 kaivossa 1 sekä uusissa mittasäättökaivoissa S3, S4, S5 kaikissa lähelle maanpintaa.

Kentällä mitattiin automaattisesti tietokonepohjaisen mittausjärjestelmän avulla meteorologisia suureita, virtaamaa salaoja- ja pintavaluntapadoilla, pohjaveden pinnankorkeuksia. Lisäksi vesinäyttenottimen ohjaus oli kytkettynä mittausjärjestelmään. Mittausjärjestelmä perustuu dataloggereiden käskyttämiin sähköisiin mittausantureihin ja keskustietokoneeseen, jolle mitattu tieto siirretään radiomodeemien avulla. Lisäksi keskustietokone on puhelinlinjan välityksellä kytketty suoraan puhelinverkkoon, jonka avulla mittausaineisto voidaan kerätä suoraan tutkijoiden käyttöön. Mittausjärjestelmä on yksityiskohtaisesti kuvattu julkaisussa Koivusalo & Hyvönen (1994).

Sadantaa mitataan kahdella erityyppisellä sademittarilla sadannan ympärivuotista seuraamista varten. Käytössä oli keräävä sademittari, jossa pinnankorkeutta mitataan ulträänianturilla, ja vaakamittarilla. Keräävä sademittari mittaa pystysuoraan putkeen sataneen veden aiheuttaman hydrostaattisen paineen lisäystä. Painonmittaus perustuu halkaisijaltaan neliönmuotoisen rautatangon päässä olevaan astian painon muutokseen, kun astiaan sataa tai sieltä haihtuu vettä. Vaakamittari soveltuu sekä lumisateen että vesisateen mittaukseen.

Pohjaveden pinnan korkeuksia mitattiin tutkimusjaksona maahan upotetuista putkissa kevät, kesä ja syksy aikaan kahden viikon välein useassa pohjavesiputkessa. Talvella pinnankorkeuksia on sääoloista riippuen mitattu kolmen tai neljän viikon välein. Muutamassa pohjavesiputkessa pohjavedenpinnan korkeutta mitattiin paineanturilla.

Maaperän fysikaaliset ominaisuudet; vedenpidätyskäyrä, hydraulinen johtavuus, kuivumis-kutistumisominaisuudet, maalaji, kiintotiheys, tilavuuspaino orgaaninen aines ja huokoisuus määritettiin näitä määrittämiä varten erikseen otetuista näytteistä. Lisäksi maaperänäytteitä otettiin kesällä 1994 säännöllisesti kahden viikon välein maankosteuden, pH:n, orgaanisen aineksen ja NO_3^- :n ja NH_4^+ :n pitoisuuksien määrittämiseksi. Muina aikoina maanäytteitä otettiin kerran kuussa ja niistä määritettiin samat suureet.



Kuva 3.2. Koekentän peltolohkojen sijainti, korkeussuhteet, salaojapatojen (S), pintavaluntapatojen (P), maanäytepisteiden (m), pohjavesiputkien (pv), säätökaivojen sijainnit sekä sademittarien paikat.

3.3 Maaperäominaisuudet

3.3.1 Rakeisuus, kiintotiheys ja huokoisuus

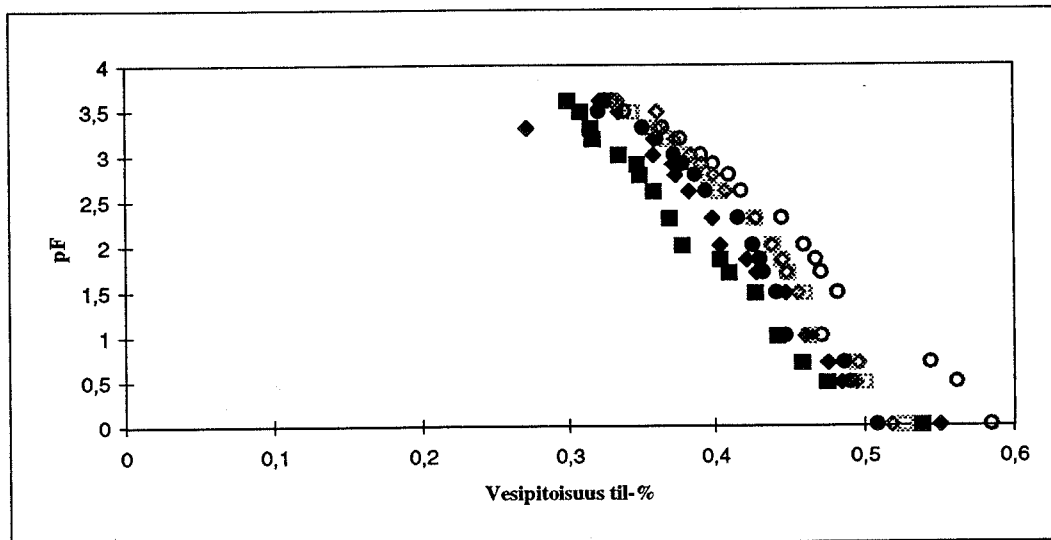
Rakeisuuskäyrät määritettiin peltolohkolta 18 ja 18b kolmesta eri pisteestä rinteiden suunnassa, jokaisesta pisteestä kolmesta eri syvyydestä (0-20 cm, 20-50 cm, 50-80 cm). Rakeisuudet on määritetty polttamattomista näytteistä areometrikokeella. Rakeisuuskäyrät on esitetty liitteessä 2. Taulukossa 3.1 on esitetty eri maalajien osuudet orgaaninen aine ja kiintotiheys ja huokoisuus. Geoteknisen maalajiluokituksen perusteella maalaji on savea tai pintakerroksessa hiesusavea. Maan kiintotiheydet määritettiin pyknometrimenetelmällä (Balke, 1965) samoista näytteistä, joista rakeisuudet oli määritetty. Kiintotiheys- ja tilavuuspainomääritysten (Balke, 1965) perusteella laskettiin näytteiden huokoisuudet (Vomocil, 1965).

Taulukko 3.1. Maakerrosten savipitoisuus, humuspitoisuus, kiintotiheys ja tilavuuspaino.

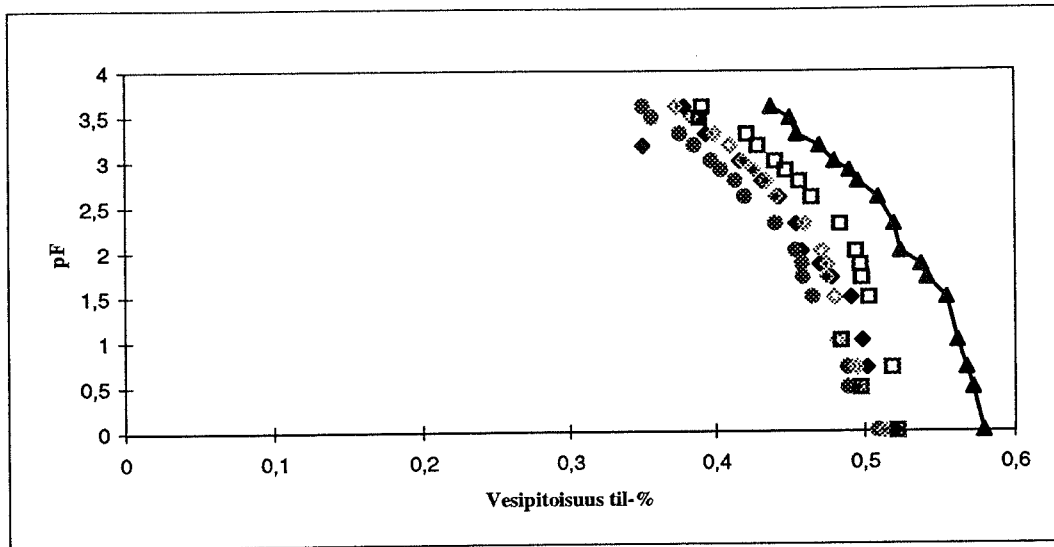
Näyte	Savi	Hiesu	Humus	Kiintotiheys	Tilavuuspaino
0-20 cm	48 %	35%	6.9 %	2.65 g/cm ³	1.18 g/cm ³
20-50 cm	48-67 %	25-35%	4.2 %	2.73 g/cm ³	1.37 g/cm ³
50-80 cm	59-85%	10-15%	3.2 %	2.75 g/cm ³	1.37 g/cm ³

3.3.2 Vedenpidätyskäyrä

Vedenpidätyskäyrä mitattiin näytteistä tutkimusalueelta kolmesta pisteestä kolmelta eri syvyydeltä. Vedenpidätyskäyrä on määritetty imua käyttäen lohkoa 18 pisteistä 2 ja 3 (kuva 3.2) 5-10 cm ja 65-70 cm syvyyksiltä sekä lohkoa 19 useasta eri pisteestä 5-10 cm, 35-40 cm, 65-70 cm syvyyksiltä. Lohkon 19 näytteiden pF-käyriä käytettiin lisänä, kun lohkon 18 pisteistä ei saatu jokaiselle pF-käyrää määritetyksi. Mitatut pF-käyrät eri kerroksille on esitetty liitteessä 3. Laskennassa käytetyt käyrät erikseen pinta ja pohjamaalle on esitetty kuvassa 3.3. Kuvista on jätetty pois selkeästi virheelliset tulokset, joissa näytteet eivät ole olleet täysin kyllästyneitä mittausten alussa.



a)



b)

Kuva 3.3. Vedenpidätyskäyrät a) pinta- ja b) pohjakerrokselle.

Mitattujen pF-käyrien pisteiden välille sovitettiin Van Genuchtenin funktio (kaava 2.10), jolloin saatiin samalla lisäpisteitä mitatulle pF-käyrälle. Yhtälön parametrit sovitettiin mitattujen pisteiden ja Karvosen (1988) esittämien kokeellisten yhtälöiden perusteella. Niistä määritettiin lakastumisraja tilavuudellisen vesipitoisuuden avulla. Yhtälöillä on mahdollista ennustaa vesipitoisuutta lakastumisrajalla -15000 cm painepotentiaalin arvolla. Käyrien perusteella on muodostettu yhtälöt vesipitoisuuden laskemiseksi pintamaalle ja pohjamaalle. Yhtälöissä vesipitoisuus lakastumisrajalla lasketaan savipitoisuuden perusteella. Sovitukset tehtiin siten, että kaikkien samalta syvyydeltä otettujen näytteiden välille sovitettiin yksi käyrä, jota käytettiin mallin maalajikerroksen pF-käyränä. pF-käyrä sovitukset on esitetty kuvissa 3.4 ja 3.5. Lakastumisrajan kosteudet laskettiin Karvonen (1988) julkaisemien pF-käyrien perusteella.

Pintamaalle yhtälö on

$$w_w = 2.3 + 0.434 \cdot \text{savi}(\%) \quad (3.1)$$

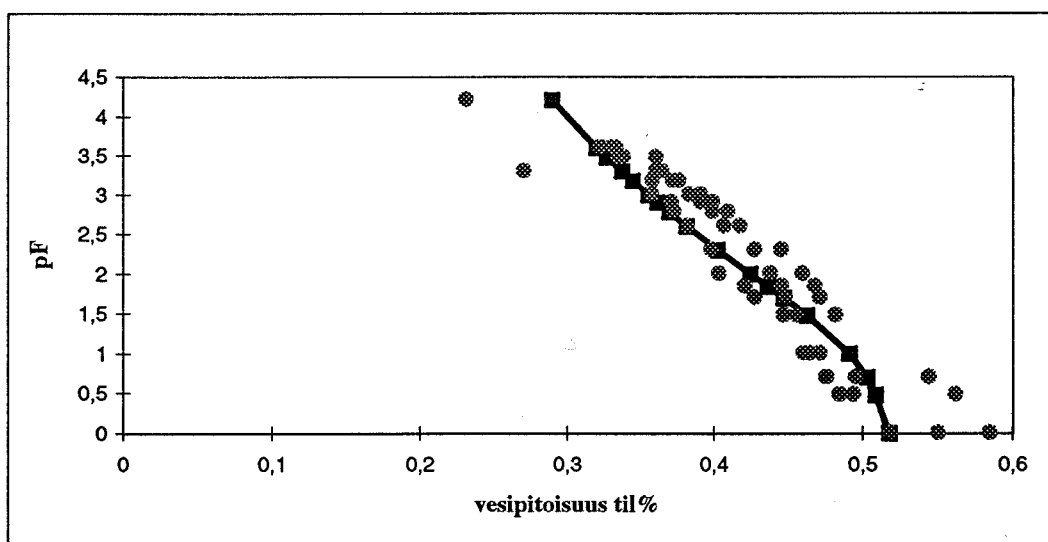
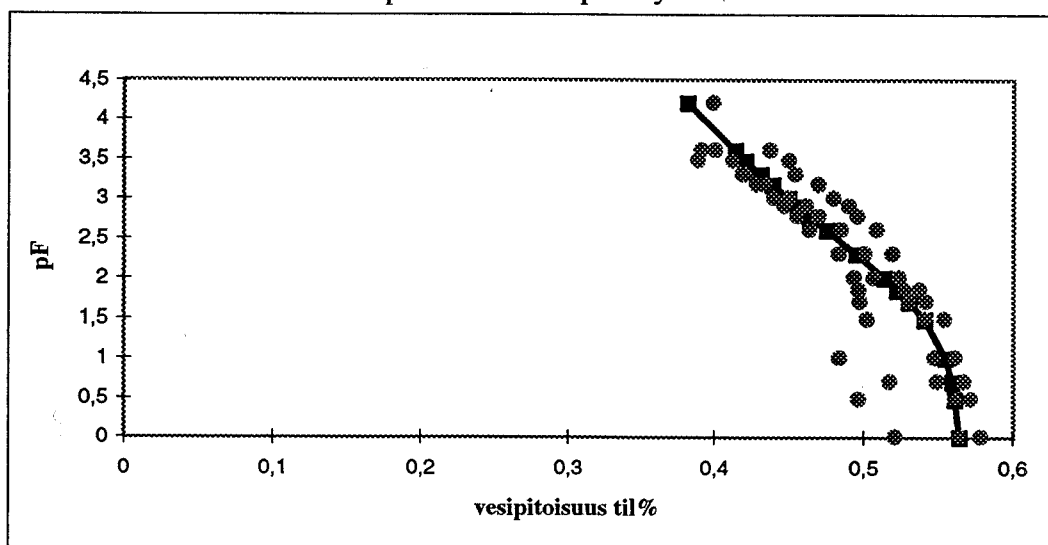
ja pohjamaalle yhtälö on

$$w_w = 4.0 + 0.423 \cdot \text{savi}(\%) \quad (3.2)$$

Rakeisuuskäyristä saatujen savipitoisuuksien mukaan kosteuspitoisuuksiksi lakastumisrajalla saatiin pintamaalle 23.13 til. % ja pohjamaalle 39.95 til. %, kun savipitoisuudet olivat pinnassa 48 % ja pohjalla 85%. Näitä pisteitä käytettiin mittauspisteinä pF-käyriä sovitettaessa, koska laboratorioissa mitatut käyrät lopuivat 4000 cm imuihin. Van Genuchtenin funktio on esitetty luvussa 2 (kaava 2.12). Sovitettujen käyrien parametrit on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2. Van Genuchtenin yhtälössä käytetyt parametrit pinta- ja pohjamaalle.

parametrit	Pintakerros	Pohjakerros
α	0.0951	0.0340
β	1.1077	1.0793
γ	0.0972	0.0754
ϕ	0.5175	0.5643
θ_r	0.1	0.1
K_{sat}	0.363	0.1920

**Kuva 3.4.** Van Genuchten sovitus pintakerroksen pF-käyrälle.**Kuva 3.5.** Van Genuchten sovitus pohjakerroksen pF-käyrille.

3.3.3 Hydraulinen johtavuus

Hydrauliset johtavuudet määritettiin vain peltolohkolta 19 useasta eri pisteestä. Kyllästyneen maan hydrauliset johtavuudet on määritetty muuttumattoman painekorkeuden menetelmällä käyttäen 75 cm ja 110 cm painekorkeuksia (Vakkilainen, 1986). Laskennassa käytettiin hydraulisten johtavuuksien keskiarvoa erikseen pintakerrokselle ja pohjakerrokselle. Taulukossa 3.4 on esitetty tilastolliset tunnusluvut kaikille kolmelle kerrokselle, joista hydraulisia johtavuuksia mitattiin. Saman kerroksen eri pisteistä otettujen näytteiden hajonnat ovat huomattavia. Variaatiokertoimet ovat suuria, vaihdellen eri kerroksissa 57 %:n ja 113 %:n välillä. Mittausten jakaumat muistuttavat normaalijakaumaa, koska mediaanit ovat lähellä keskiarvoja ja jakaumien vinoudet ja huipukkuudet ovat lähellä nollaa.

Laboratoriomittausten vaihtelua tutkittiin laskemalla samat tilastolliset tunnusluvut samasta näytteestä otettujen mittaustulosten välille. Tilastolliset tunnusluvut eri mittausten välille on esitetty taulukossa 3.3 pisteille 11 5-10 cm ja 17-18 65-70 cm. Lopuille pisteille tilastolliset tunnusluvut on esitetty liitteessä 4. Laboratoriomittausten välillä hajonta on pientä variaatiokertoimien vaihdellessa 10 - 50 %. Eri pisteiden välillä hajonta syntyy hydraulisen johtavuuden alueellisista eroista pellolla ja näytesylinterien välisistä hydraulisen johtavuuden eroista.

Taulukko 3.3. Hydraulisten johtavuuksien tilastolliset tunnusluvut pisteiden 11 5-10 cm ja 17-18 65-70 cm näytteille. Yksikkö cm/d.

Tilastollinen tunnusluku	Hydraulinen johtavuus Piste 11 5 -10 cm	Hydraulinen johtavuus Piste 17-18 65-70 cm
keskiarvo	0.190	0.137
keskihajonta	0.066	0.028
varianssi	0.004	0.001
minimi	0.074	0.074
maksimi	0.293	0.178
mediaani	0.186	0.138
variaatiokerroin	0.349	0.202
mittauksien lkm.	15	13

Taulukko 3.4. Hydraulisten johtavuuksien tilastolliset tunnusluvut eri kerroksille. Yksikkö cm/d.

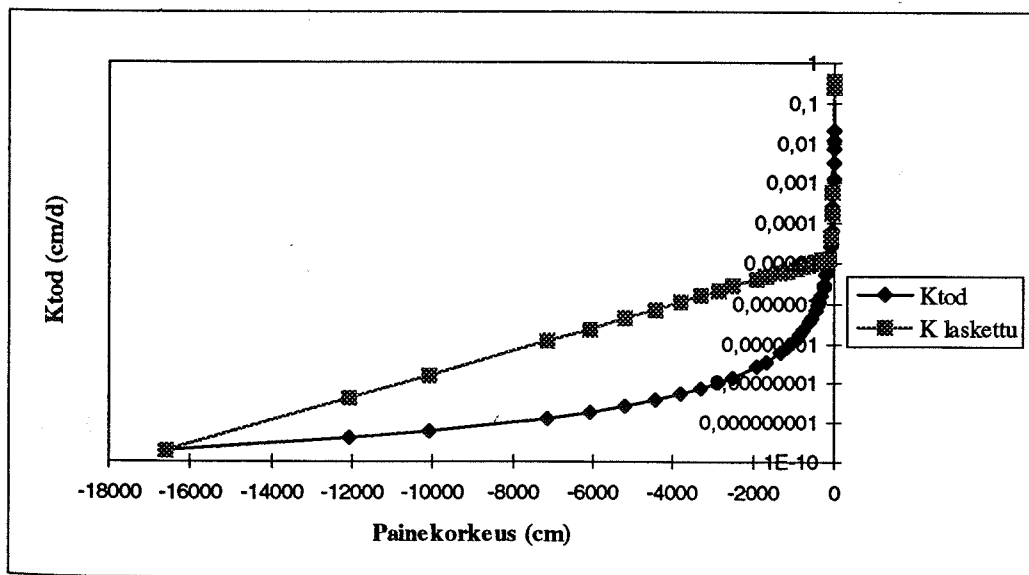
Tilastollinen tunnusluku	pinta (5-10 cm)	väli (35-40 cm)	pohja (65-70 cm)
keskiarvo	0.363	0.101	0.192
keskihajonta	0.207	0.115	0.136
varianssi	0.027	0.036	0.010
minimi	0.074	0.015	0.023
maksimi	0.915	0.332	0.518
mediaani	0.284	0.071	0.137
variaatiokerroin	0.571	1.134	0.707
mittauksien lkm.	22	29	29

Suhteelliset hydrauliset johtavuudet painekorkeudella h on laskettu Van Genuchtenin (1980) mukaan (kaava 2.20). Yhtälön parametrit on samat kuin pF-käyräsovituksissa taulukossa 3.2. Suhteellisen hydraulisen johtavuuden perusteella laskettiin kyllästyneen maan hydraulisesta johtavuudesta hydraulisen johtavuuden kosteusrippuvuus K_{tod} .

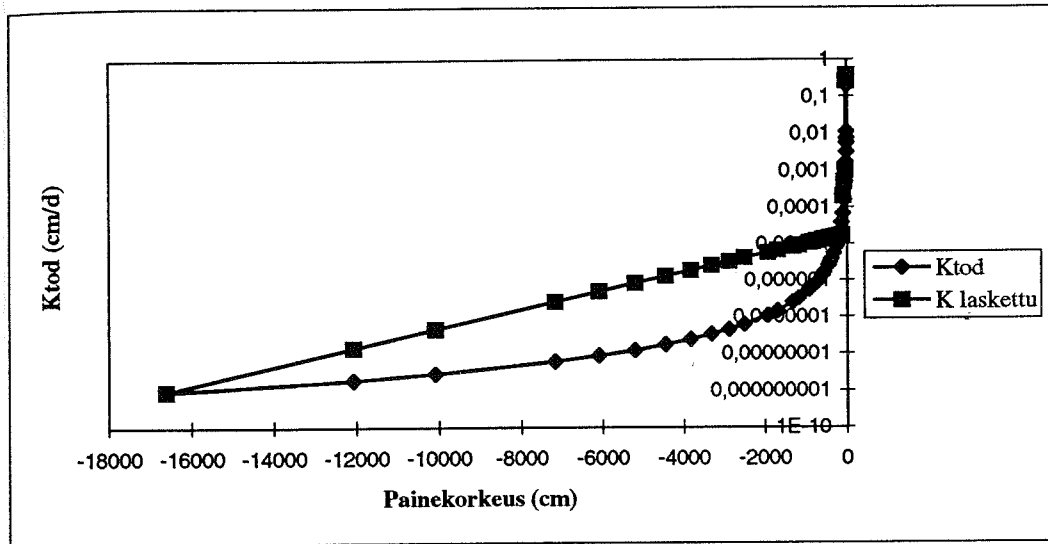
Hydraulisen johtavuuden käyrille sovitettiin eksponenttifunktio $K(h)$. Koska $K(h)$ suhde on tarkka ainoastaan kapealla painepotentiaalın arvoalueella on tässä käytetty $K(h)$ suhteen kuvaamiseen kolmea eri parametrien arvoilla laskettua $K(h)$ suhdetta. Tätä sovittusta käytettiin mallin lähtötietona kuvaamaan hydraulisen johtavuuden muuttumista maankosteuden mukaan (kaava 5.30). Koska malli rajoittaa taitepisteiden määrän kahteen, on valittava kumpaa päättää sovituksessa painotetaan. Tässä hydraulisen johtavuuden käyrän määrittäminen on korostettu ja taitepisteet on valittu siten, että määrässä päässä virhe on pieni ja kasvaa kuivaan päätä kohti. Käyrät on esitetty kuvissa 3.6 ja 3.7 ja parametrit $K(h)$ laskemiseksi taulukossa 3.5. Kuvissa 3.6 ja 3.7 $K_{laskettu}$ on mallia varten laskettu eksponenttisovitus hydraulisen johtavuuden muuttumiselle kosteuden funktiona.

Taulukko 3.5. $K(h)$ funktion parametrit kolmelle eri käyräosalle.

Pintamaa			Pohjamaa		
α	K0	taitepisteet	α	K0	taitepisteet
0.031096	0.363	-11.6325	0.016365	0.191974	-11.6325
0.042864	0.002091	-118.372	0.026875	0.002199	-182.953
0.000671	$1.42 \cdot 10^{-5}$		0.000594	$1.8 \cdot 10^{-5}$	



Kuva 3.6. Hydraulisen johtavuuden muuttuminen kosteuden funktiona ja mallin syöttötietoina tarvitsemat käyräsovitukset pintakerrokselle.



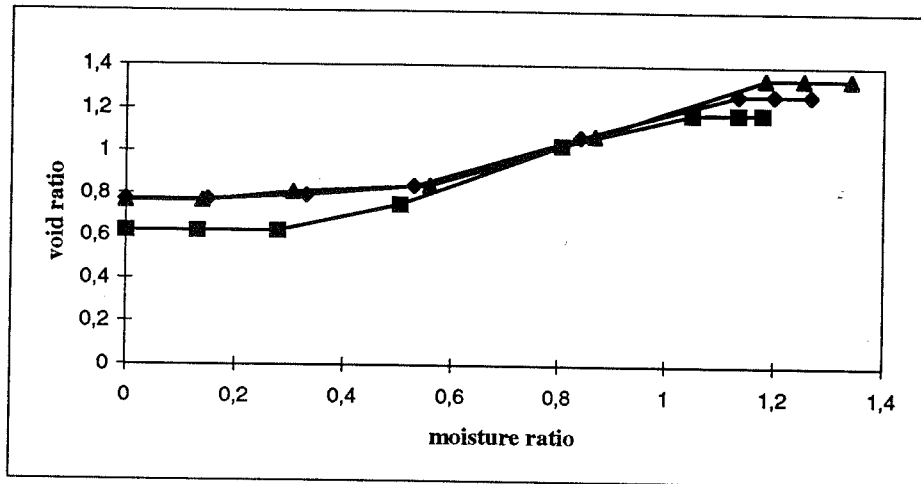
Kuva 3.7. Hydraulisen johtavuuden muuttuminen kosteuden funktiona ja mallin syöttötietoina tarvitsemat käyräsovitukset pohjakerrokselle.

3.3.4 Kuivumis-kutistumiskäyrä

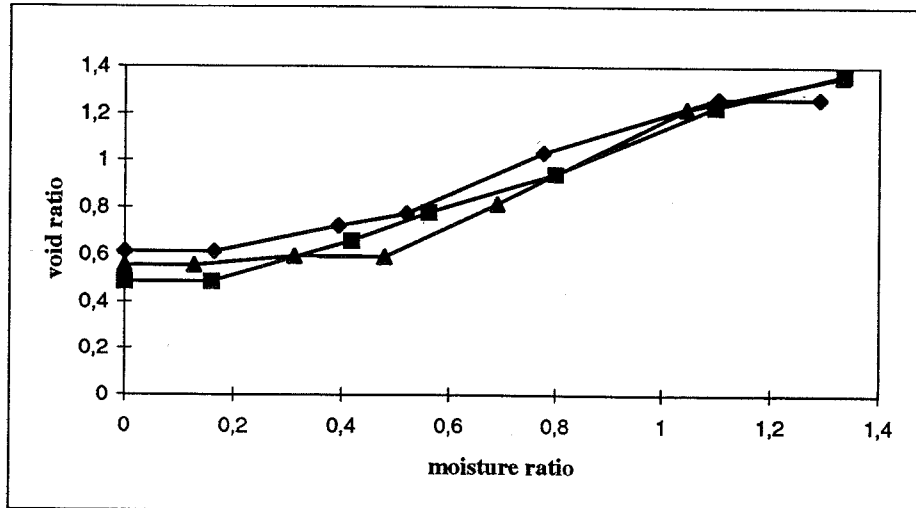
Maan kuivumisesta johtuvan kutistumisen määrittämiseksi mitattiin kuivumis-kutistumiskäyrä tutkimusalueen maalajeille. Kutistumisominaisuuksia määritettiin lohkolta 18 kolmesta pisteestä kahdelta syvyydeltä ja lohkolta 19 kahdesta pisteestä kahdelta syvyydeltä (10-15 cm, 40-45 cm) kustakin pisteestä kolmella rinnakkaisella näytteellä. Huokossuhde ja kosteussuhde laskettiin kuivumisen aiheuttaman kutistumistilavuuden perusteella. Näytelieriöt, joiden korkeus oli 3 cm ja halkaisija noin 5 cm, kasteltiin ensin märäksi vesitarjottimilla kolmen viikon ajan. Märät näytteet tasattiin ja niitä alettiin kuivata voipaperien sisällä uunissa miedolla lämmöllä (30 °C) kahden viikon ajan, jonka aikana näytteitä punnittiin ja kutistumia arvioitiin halkeamien suuruutta mittaamalla. Uunia pidettiin päällä aluksi vain muutama tunti kerrallaan mittausten välillä liian nopean kuivumisen estämiseksi. Lopuksi näytteitä kuivattiin 105 °C kolme vuorokautta.

Huokossuhde laskettiin mitattujen näytteen tilavuuksien perusteella. Laskennassa oletettiin kiintoaineksen tilavuuden säilyvän koko ajan samana, niin että kutistuminen vähensi ainoastaan kokonaishuokostilavuutta. Mittauksista laskettiin jokaiselle näytteelle erikseen huokossuhteet mitatuissa kosteuksissa. Kosteussuhde laskettiin tilavuudellisen vesipitoisuuden ja lasketun huokossuhteen perusteella kaavalla 2.3. Mallia varten sovitettiin kaikkien mitattujen saman kerroksen pisteiden kutistumiskäyrien suhteen laskennalli-

nen käyrä, jonka parametreja käytettiin kutistumisparametrien laskentaan pF-käyrän pisteille (Kim et al.,1992). Mitatut kutistumiskäyrät on esitetty pisteestä 1 kerroksille 5-10 cm ja 40-45 cm kuvissa 3.8 ja 3.9.



Kuva 3.8. Mitattu kuivumis-kutistumiskäyrä pisteessä 1 pintakerroksesta 5-10 cm syvyydeltä otetussa näytteessä.



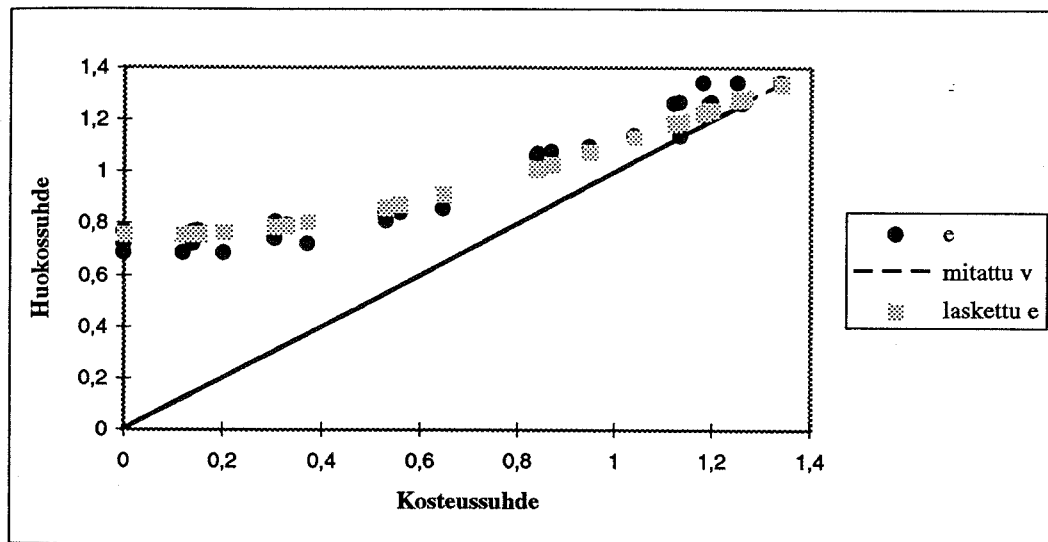
Kuva 3.9. Mitattu kuivumis-kutistumiskäyrä pisteessä 1 pohjakerroksesta 40-45 cm syvyydeltä otetussa näytteessä.

Muiden pisteiden mittaustulokset on esitetty liitteessä 5. Mitattujen kutistumiskäyrien pisteiden välille sovitettiin kaavan 2.8 mukainen käyrä Exelin SOLVER- optiota käyttäen. Sovituksissa käytettiin mittauspisteitä siten, että kaikkien pintakerrosten pisteiden välille sovitettiin yksi käyrä ja pohjakerroksen pisteiden välille vastaavasti yksi käyrä. Käyrän pa-

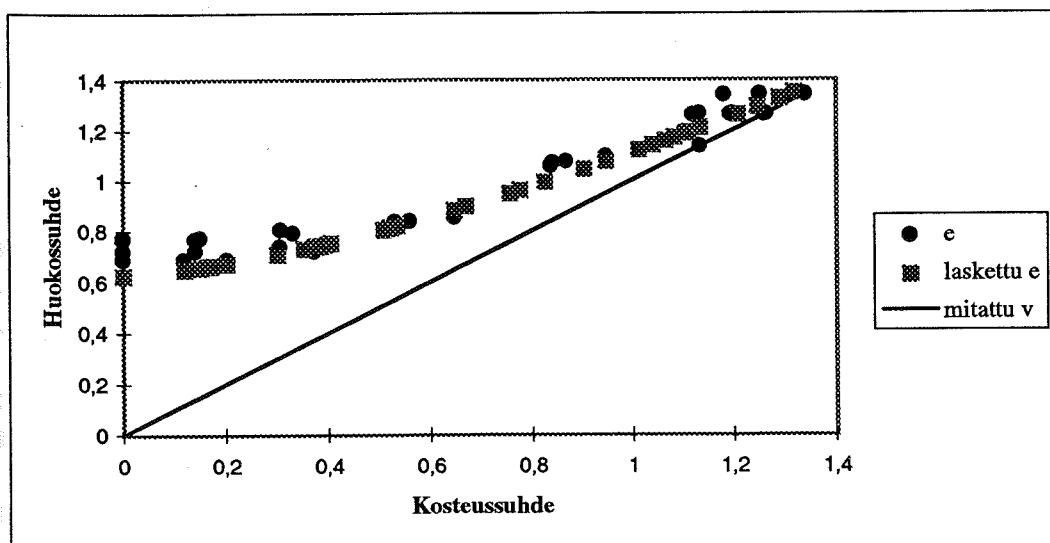
parametrit on esitetty taulukossa 3.6. Kuvissa 3.10 ja 3.11 on esitetty mittauspisteet ja sovitetut käyrät taulukon 3.6 parametreilla.

Taulukko 3.6. Kutistumiskäyrien parametrit.

Pintakerros		Pohjakerros	
a	0.743026	a	0.623564
b	0.829224	b	0.931786
α	1.305655	α	1.236871



Kuva 3.10. Kuivumis-kutistumiskäyrän sovitukset pintakerrokselle.



Kuva 3.11. Kuivumis-kutistumiskäyrän sovitukset pohjakerrokselle.

3.4 Virtaaman mittaaminen

Virtaama salaoja- ja pintavaluntapadoilla mitattiin automaattisilla mittausantureilla. Salaojavaluntaa mitattiin kolmella salaojapadolla ja pintavaluntaa kahdella pintavaluntapadolla vuoden 1994 aikana. Syksyn 1994 aikana muutettiin V-aukkoiset teräslevyistä rakennetut padot mittasäätökaivoiksi, jolloin pintavalunta ja sadevesien pääsy salaojapadoille saatiin estetyksi. Samassa yhteydessä kaivon S4 paikkaa siirrettiin rinteeseen suunnassa alaspäin. Padoilla oli automaattista virtaaman mittausta varten antureita, jotka mittasivat virtaamaa 15 minuutin välein. Lisäksi virtaamaa mitattiin satunnaisesti käsin. Valunnan mittaukseen käytettiin tutkimusjaksolla kahdenlaisia antureita, Valmet paineanturia kevään ja kesän 1994 aikana ja Jensenin paineanturia syksystä 1994 alkaen. Anturit olivat asennettuna siten että ne mittasivat vedenpinnankorkeutta V-aukon yläpuolella. Jokainen anturi oli erikseen kalibroitava riittävän useasti oikeiden mittaustulosten saamiseksi. Antureiden kalibrointia ja toiminnan tarkkailua varten näytteenoton yhteydessä mitattiin käsin pinnankorkeudet sekä salaoja- ,että pintavaluntapadoilta. Käsinmittausten perusteella antureiden mittaamia virtaamia on tarvittaessa korjattu, jos anturin mittaaman ja käsin mitatun pinnankorkeuden välinen ero oli suurempi kuin 15 %. Liitteessä 1 on esitetty purkautumiskäyrät padoille S3, S4, S5 ja P2.

Tässä tutkimuksessa on keskitytty peltolohkoon 18 ja virtaamia on mitattu tällä alueella olevilta salaojapadoilta S3, S4, ja S5 ja pintavaluntapadolta P2 (kuva 3.2). Salaojapadolla S3 virtaamaa mitattiin Valmetin paineanturilla 16.5. 1994 alkaen ja anturi vaihdettiin Jensenin paineanturiin 28.7. 1994, jonka jälkeen pinnankorkeutta padolla on mitattu jatkuvasti ilman katkoksia. Padoilla S4 ja S5 pinnankorkeutta mitattiin valmet paineanturilla 23.5. - 8.9.1994 välisenä aikana ja 13.10.1994 lähtien Jensenin paineanturilla. Pintavaluntapadolla P2 virtaamaa on mitattu Jensenin paineanturilla 23.5.1994 alkaen. Patoalasta on lämmitetty kaapelilla talviaikaan ja silloin kun on ollut riski, että pato jäätyy. Välillä anturit ovat olleet poissa padoilta kylvön ja kynnön aikana sekä talviaikana patojen ollessa jäässä, jos padolle ei ole ollut mahdollista järjestää lämmitystä.

3.5 Veden laadun ja huuhtoumien määrittäminen

Kentältä kerättiin manuaalisesti vesinäytteitä salaoja- ja pintavaluntapadoilta sekä pohjavesistä. Lisäksi salaojapadolla S3 oli automaattinen näytteenotin salaojavesien lyhytaikaisen laadunvaihtelun tutkimiseksi. Veden laatu määritykset on tehty TKK:n vesitalouden laboratoriossa. Näytteet on kerätty käsin ja niitä on otettu satunnaisesti, kun padoilla on ollut virtaamaa. Käytetyt määritysmenetelmät on esitetty taulukossa 3.7. Kaikki analyysit on tehty suodattamattomista näytteistä tutkimusjakson aikana. Myöhemmin keväällä 1995 siirryttiin käyttämään suodatettuja näytteitä nitriitin ja fosfaatin analyyseissa, koska kiintoaineen todettiin merkittävästi häiritsevän näitä määritysmenetelmiä. Nitriitin ja fosfaatin pitoisuusmäärittämisä ei tämän takia ole esitetty tässä työssä. Huuhtomat laskettiin vuotuisen vaihtelun aikasarjoista olettamalla pitoisuuksien säilyvän näytteenoton välillä vakiona. Kaikki typpipitoisuudet on esitetty typpinä ja fosforipitoisuudet fosforina.

Taulukko 3.7. Analysoitavat suureet ja analyysimenetelmät.

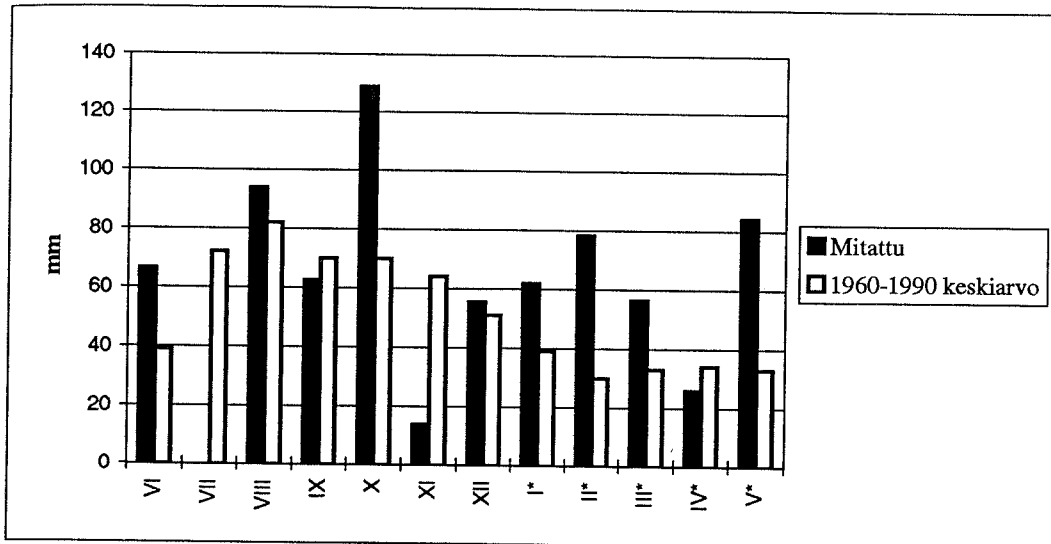
Ammoniumtyppi	Tecatorin ohje AN 50/84 ja ASN 50-01/84
Nitriitti- ja nitraattitypen summa	Kadmiumpelkistys ja sulfaniiliamidimenetelmä
Kokonaistyyppi	Standardiehdotus INSTA-VH 27 (1975)
Kokonaisfosfori	SFS 3026, 1986
Kiintoaines	SFS 3037, 1976, suodatinpaperin huokoskoko n.1 µm
pH	Orion SA520 pH anturi

Salaojavesien lyhytaikaisten laadunvaihtelujen tutkimiseksi kesän 1994 aikana automaattinen näytteenotin (Epic) oli asennettuna padolle S4, josta se siirrettiin syyskuun puolella välissä padolle S3. Näytteenotin voidaan ohjelmoida ottamaan näytteitä halutuin väliajoin sekä ajan että virtaaman mukaan. Näytteenottimella kokeiltiin vuoden 1994 aikana puolen tunnin, tunnin ja kahden tunnin näytteenottoväliä eri virtaamien raja-arvoilla, jotka vaihtelivat 10 mm ja 25 mm välillä. Näytteenotin poistettiin kentältä yöpakkasten alettua marraskuun alussa. Salaojavalunnan pitoisuuksien lyhytaikaisen vaihtelun tutkimiseen käytettiin tilastollisten tunnuslukujen laskentaa ja autokorrelaatorakenteen tarkastelua. Autokorrelaatiokertoimien avulla laskettiin ekvivalentti riippumattomien näytteiden määrä automaattisen näytteenottimen sarjoille. Laskennan periaate ja kaavat on esitetty liitteessä 7.

3.6 Sääolosuhteet

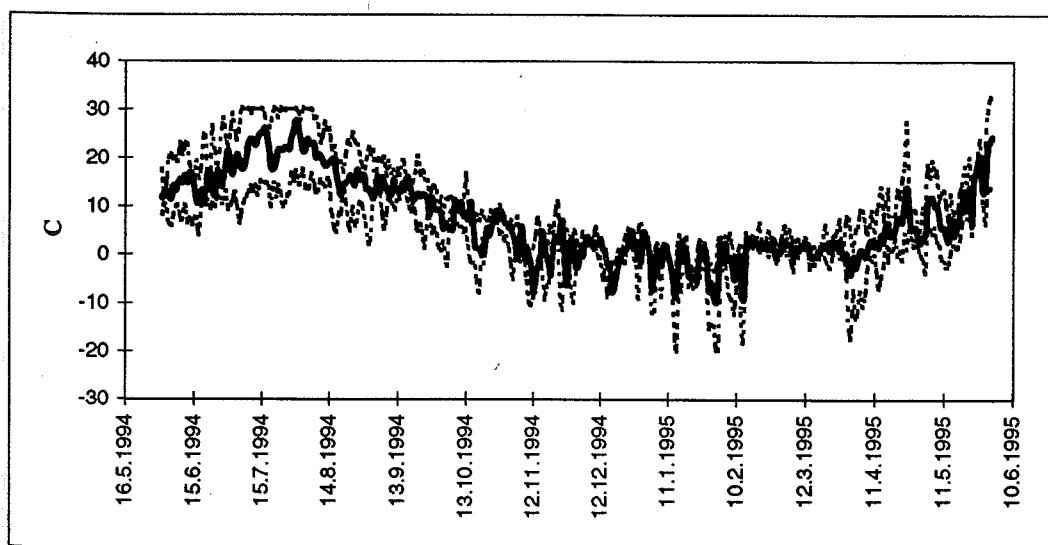
Tutkimusjaksoa voidaan lyhyesti luonnehtia kuivalla keväällä. Kesäkuu oli poikkeuksellisen sateinen ja kylmä, ja sitä seurasi sateeton ja keskimääräistä lämpimämpi heinäkuu. Elokuun keskilämpötila ja sademäärä oli lähellä pitkäaikaista 30 vuoden keskiarvoa (1960-1990). Syyskuu aloitti sateisen kauden. Tällöin satoi 40 mm enemmän kuin keskimäärin syyskuussa. Lokakuu jatkui edelleen keskimääräistä sateisempänä. Marraskuu oli keskimääräistä kuivempi. Syksyn lämpötilat olivat lähellä pitkäaikaisia keskiarvoja. Talvi oli hyvin lauha ja silloin satoi runsaasti vettä, eikä normaalin kevään tapaista sulantaa ollut ollenkaan, vaan sulantaa tapahtui lähes koko kevättalven ja kevään ajan.

Toukokuu alkoi sateettomana ja pelto kuivui hyvin sulannan jäljiltä. Touko-kesäkuun vaihteessa alkoi sateisempi kausi, joka jatkui juhannukselle saakka. Nämä sateet olivat enimmäkseen heikkoja, mutta runsassateisempia päiviäkin mahtui jaksolle. Suurin sademäärä mitattiin kesäkuun 22 päivänä, jolloin sademäärä oli 22 mm. Heinäkuu oli kuiva, silloin ei satanut ollenkaan. Elokuun alussa ja lopussa oli muutama sateinen päivä, mutta kokonaisuutena elokuu oli vielä kuiva. Syyskuun alkupäivinä alkoivat runsaammat sateet, jonka jälkeen runsassateisia päiviä oli tasaisesti lokakuun puoleen väliin saakka. Tämän jälkeen sateisia päiviä oli harvemmassa, mutta sadetta saatiin kuitenkin runsaasti. Talven 1995 aikana valuntaa ja sulantaa tapahtui vesisateiden vaikutuksesta lähes koko talven ajan. Sadanta tutkimusjaksona 1994-1995 on esitetty kuvassa 3.12. Sadannasta on poistettu mittauksessa ollut kohina laskemalla suoraan vuorokausittaiset arvot päivän viimeisen ja päivän ensimmäisen arvon erotuksena.

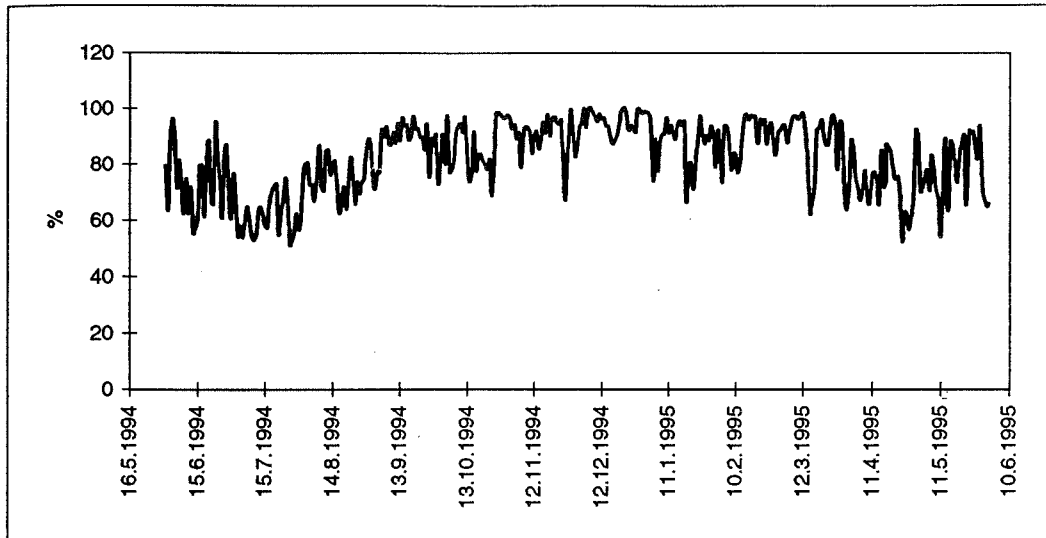


Kuva 3.12. Sadanta Sjököllan koekentällä tutkimusjaksolla 1.6.1994- 31.5.1995. (Tähdellä merkittyjen kuukausien sadannat on mitattu Vihdin Maasojan mitausasemalla.)

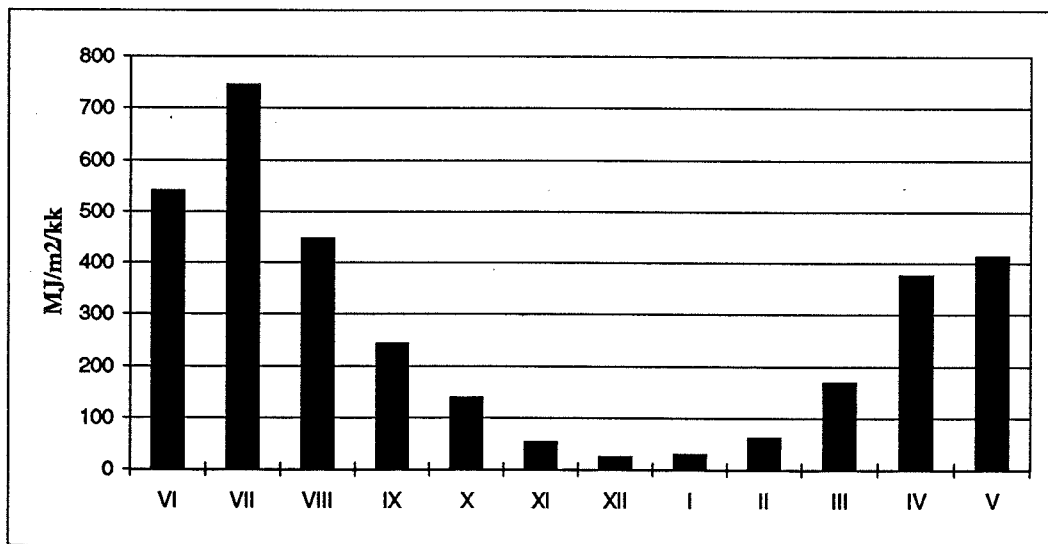
Ilman päivittäiset keskilämpötilat on esitetty kuvassa 3.13 ja ilman suhteellinen kosteus kuvassa 3.14. Haihdunnan laskennan perusteena käytetty kokonaissäteily on esitetty kuvassa 3.15. Haihdunta on mallilaskelmia varten arvioitu kuukausittaisen säteilysummien perusteella käyttäen Class-A haihdunta-astiaa. Lasketut potentiaaliset kuukausihaihdunnat jaettiin tasan kuukauden päivien kesken.



Kuva 3.13. Ilman keskilämpötila tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995



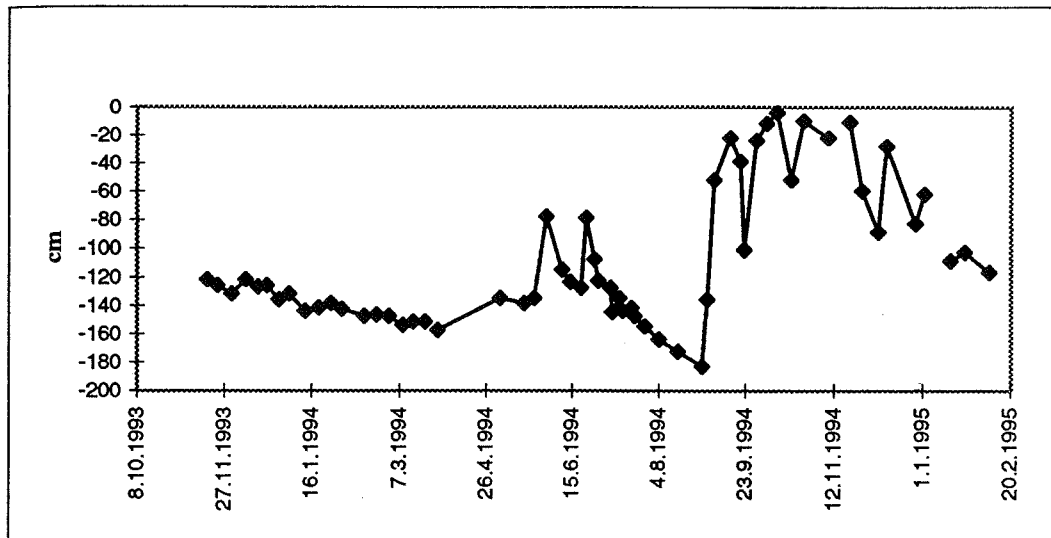
Kuva 3.14. Ilman suhteellinen kosteus tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995



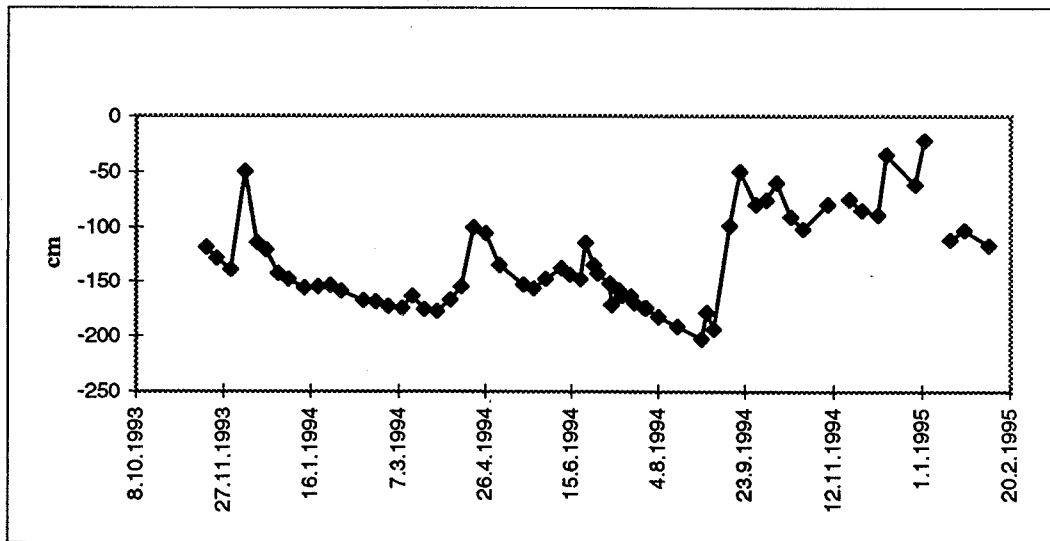
Kuva 3.15. Kokonaissäteily tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995

Tutkimusjaksolla pohjaveden pinta oli matalimmillaan elokuun puolessavälissä ja alkoi sitten nopeasti nousta ollen korkeimmillaan lokakuun alussa. Tässä työssä on käytetty kahdessa putkessa mitattuja pohjaveden pinnan korkeuksia, jotka on esitetty kuvissa 3.16 ja 3.17. Putki 9 on rinteet keskivaiheilla ja putki 7 on rinteet alaosassa. Putkessa 7 pohjaveden pinnan vaihtelut ovat nopeampia ja pohjaveden pinta nousi useasti lähelle maanpintaa.

Putkessa 9 pinnankorkeuden vaihtelut olivat hitaampia ja vähäisempiä. Rinnettä ylöspäin mentäessä pohjaveden pinnassa on havaittavissa selvää alenemista.



Kuva 3.16. Pohjavedenpinnan korkeudet tutkimusjaksolla pohjavesiputkessa 7.



Kuva 3.17. Pohjavedenpinnan korkeudet tutkimusjaksolla pohjavesiputkessa 9.

Maankosteudet eri kerroksissa pohjavesiputken 9 läheisyydessä samassa korkeustasossa on esitetty liitteessä 6. Näytepisteen sijainti on ajoittain hieman vaihdellut, mutta korkeustaso on säilynyt muuttumattomana tutkimusjakson aikana. Maa oli kuivimmillaan elokuun alussa 1994. Maankosteuksista voidaan todeta, että pohjakerroksessa 120 cm:n syvyydellä maaperä on kuivimpanakin aikana kyllästynyttä tai lähes kyllästynyttä pohjavedenpinnan ollessa useita kymmeniä senttimetrejä syvemmällä. Tämä saattaa johtua maalajin pF-käyrästä, jossa pienillä (alle 1m) painepotentiaalin arvoilla maasta ei vielä poistu juurikaan vettä. Jolloin maankosteudet voivat olla jopa metrin etäisyydellä pohjaveden pinnasta lähes samoja kyllästyskosteuden kanssa.

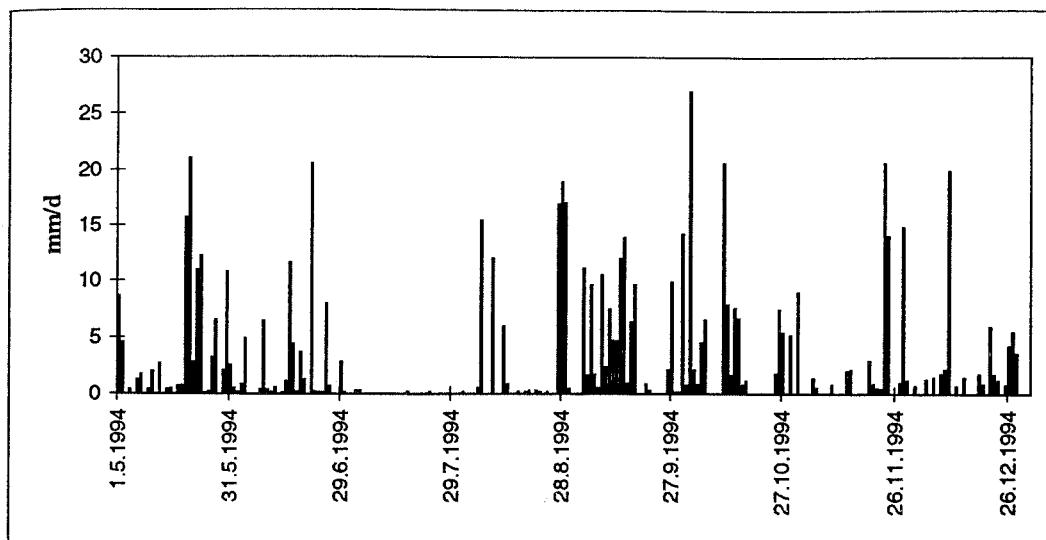
4. VALUNTA JA VEDEN LAATU

4.1 Salaoja- ja pintavalunta

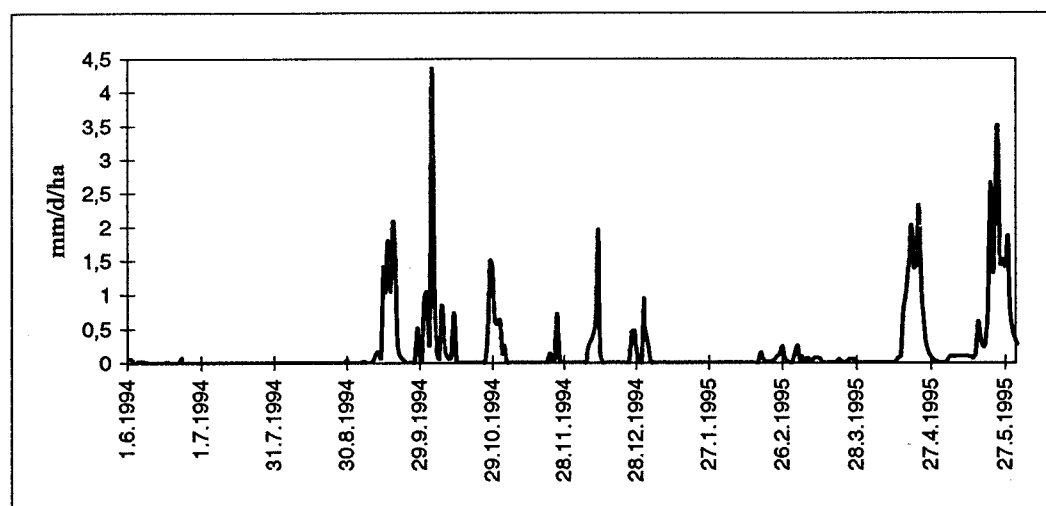
4.1.1 Vuodenaikainen vaihtelu

Valunnan kokonaismäärä tutkimusjaksolla oli 190 mm, joka jakautui salaojavalunnan ja pintavalunnan kesken. Salaojavaluntaa padolla S3 oli jaksolla 1.6.1994-31.5.1995 71 mm ja pintavalunta padolla P2 120 mm. Pintavalunnan mittauksessa oli katkos 7.12.1994-24.2.1995. Katkoksen aikana pintavaluntaa on mitattu muutaman kerran käsin. Suurimmat valuntamäärät syntyivät tutkimusjaksolla syys-lokakuussa 1994 ja huhti-toukokuussa 1995. Kaikkina muina kuukausina heinäkuuta 1994 lukuunnottamatta salaojissa oli valuntaa. Mitatut suurimmat salaojavalumat jäivät noin neljäsosaan salaojien mitoitusvalunnasta 8,64 mm/d/ha. Suurimmat hetkelliset huiput mitattiin 3.10. 1994 noin 4.5 mm/d/ha ja ke-väällä 25.5. 1995 noin 3.5 mm/d/ha. Pintavaluntaa syntyi syksyllä syyskuun lopulta alkaen, jolloin runsaimmin pintavaluntaa syntyi lokakuussa 1994. Kevätkaudella suurimmat pinta-valunnan määrät mitattiin huhtikuussa 1995.

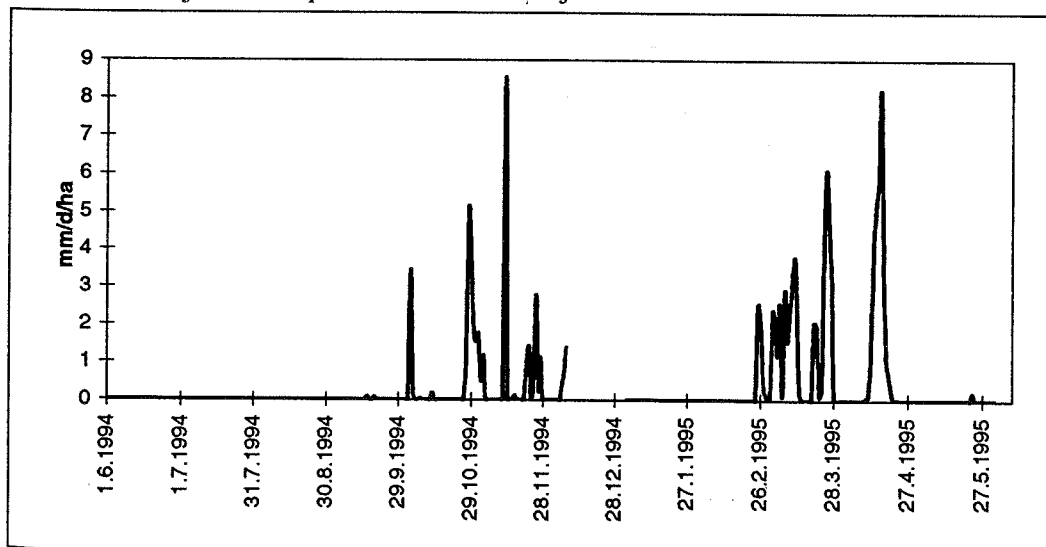
Salaojapadolla S3 oli vähäistä virtaamaa lähes koko touko- kesäkuun ajan vuonna 1994. Toukokuun alkupuolen virtaamat aiheutuivat lähinnä sulannasta. Myös padoilla S4 ja S5 oli ajoittain virtausta. Kesäkausi oli kuiva, eikä padoilla ollut virtaamaa ennen elokuun lopun sateita. Maa oli niin kuivaa, että elokuun alun noin 5-15 mm vuorokausisadanta muutaman päivän välein ei vielä aiheuttanut minkäänlaisia virtaamia salaojissa. Syyskuun 3 päivänä jälkeen alkaneet sateet kastelivat pellon, jolloin valuntaa syntyi melkein jokaisen sadetapahtuman jälkeen. Lokakuun alussa pohjavesi oli noussut 20-50 cm etäisyydelle maanpinnasta ja pintavaluntaa pääsi syntymään. Tämän jälkeen pintavaluntaa syntyi jokaisen 5 mm/d suuremman sadetapahtuman yhteydessä. Marraskuun alussa ilma kylmeni selkeästi ja pellon pinta alkoi jäätyä. Ajoittain kuitenkin satoi runsaasti vettä sulattaen jään ja aiheuttaen sekä salaoja- että pintavaluntaa. Talvi oli leuto ja salaojissa oli vähäistä virtausta useasti helmi-maaliskuussa. Vesisateista huolimatta osa pellon pinnasta säilyi lumipeitteisenä talvikautena ajan. Kuvissa 4.2-4.3 on esitetty salaoja- ja pintavalunnan ajoittuminen tutkimusjaksolla 1994-1995.



Kuva 4.1. Sadanta tutkimusjaksolla 1.6. -31.12.1994



Kuva 4.2. Salaojavalunta padolla S3 tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995

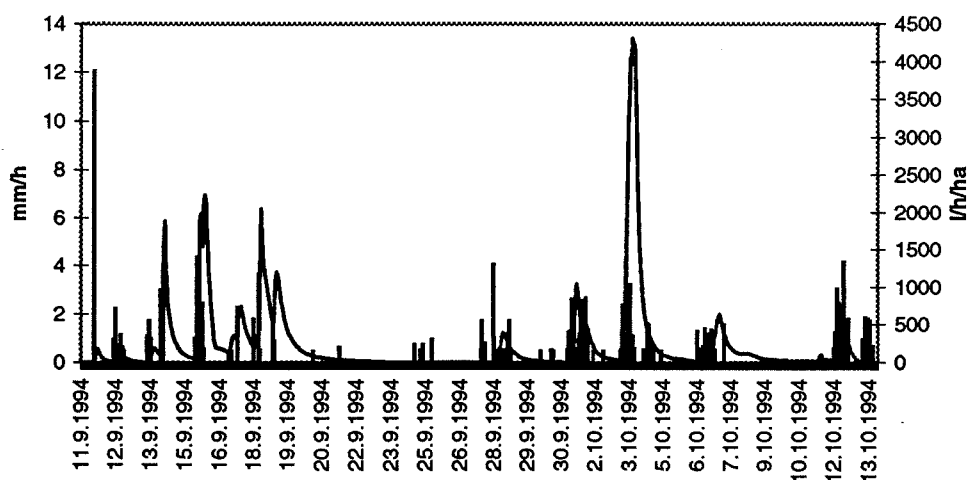


Kuva 4.3. Pintavalunta padolla P2 tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.5.1995

4.1.2 Salaojavalunnan lyhytaikainen vaihtelu

Yksittäisiä sadanta- ja valuntatapahtumia syksyllä 1994 tutkittiin 15 minuutin välein mitatuista havaintosarjoista. Näiden perustella salaojavalunta alkoi sateen alettua noin kahden tunnin viipeellä, kun maa oli lähes kyllästynyt pintaan asti. Kuvassa 4.4 on esitetty sadan-
nan ja valunnan ajoittuminen syksyn 1994 aikana.

Ennen ensimmäistä virtaama-aikasarjan 15.-23.9.1994 jaksoa pohjavedenpinta pel-
lolla oli yli metrin etäisyydellä maanpinnasta. Maa oli pinnasta märkää ja kesän aikana
syntyneet halkeamat olivat jo sulkeutuneet. Sateet olivat runsaita ja sattuivat jaksoittain
tutkimusjakson aikana aiheuttaen salaojiin useahuippuisen virtaaman. Jakson aikana sade-
määrä oli noin 60 mm, josta salaojien kautta purkautui 8.6 mm. Tämä on noin 14 % sata-
neesta vedestä. Loput varastoituivat maaperään nostaen pohjaveden pintaa ja osa valui
pintavaluntana suoraan kastelualtaaseen tai valtaojaan.



Kuva 4.4. Sadanta ja virtaama padolla S3 11.9.-13.10.1994.

Salaojavalunnassa jaksolla 28.9.-2.10.1994 esiintyi kaksi selvää huippua. Jälkimmäisen
virtaamahuippu oli edellistä jaksoa pienempi, vaikka pohjaveden pinta edellisen jakson ai-
kana oli noussut. Tämä saattaa johtua veden kulkeutumisesta enemmän maamatriisiin kuin
halkeamien ja makrohuokosten kautta. Sademäärä ko. jaksolla oli noin 31 mm, ja vastaa-
va salaojavalunta alle 2mm eli noin 6 % sadannasta. Jakson aikana pohjaveden pinta nousi
lähelle maanpintaa rinteiden ala-osaan. Rinteiden ylä-osaan ei voitu havaita pohjavedenpinnan
nousua, koska pohjavesiputket ulottuivat vain kahden metrin syvyyteen.

Jaksolla 4.-8.10.1994 mitattiin yksi valuntahuippu ja 3.10. sattuneen valuntahuipun
laskeva loppupää. Jakson alkaessa pelto oli hyvin märkä ja pohjaveden pinta rinteiden ylä-
osassakin nousi lähelle maanpintaa. Jakson aikana sadanta oli noin 40 mm, josta salaojien
kautta purkautui noin 7 mm eli noin 17 % sadannasta.

Viimeisen havaintojakson 10-13.10.1994 aikana pohjaveden pinta nousi jo lähes kaikissa
pohjavesiputkissa lähelle maanpintaa ja pelto oli hyvin märkä. Jaksolle sattui yksi valunta-

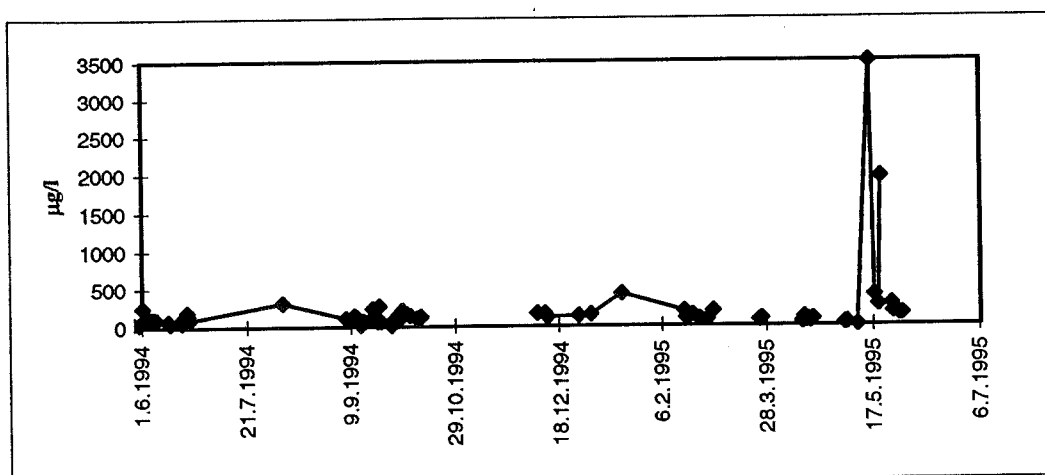
huippu, jossa virtaama oli suurimmillaan lähes 45 l/min. Jakson 24 mm:n sademäärästä noin 4 % eli noin 1mm valui salaojiin.

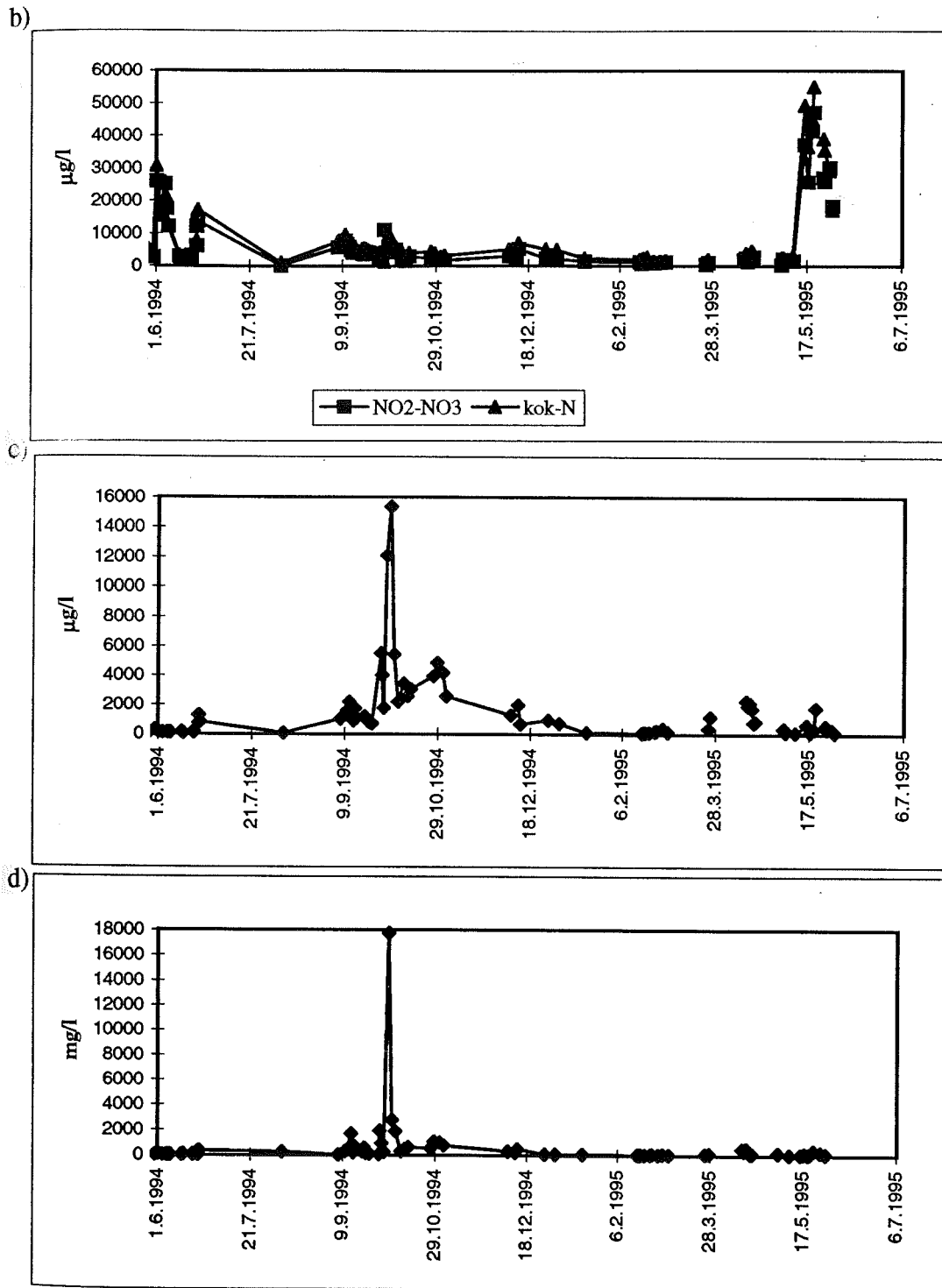
4.2 Vedenlaadun vuodenaikainen vaihtelu

Veden ravinne- ja kiintoainepitoisuudet vaihtelivat selvästi vuodenajan mukaan sekä salaojapadoilla että pintavaluntapadolla. Vuodenaikaisvaihtelut salaojavesien laadussa padolla S3 on esitetty kuvassa 4.5. Vastaavat arvot patojen S4 ja S5 osalta on esitetty liitteessä 8. Kokonaisravinteiden pitoisuudet vaihtelivat tutkimusjaksolla 1 mg/l 12 mg/l välillä. Suurimmat pitoisuudet mitattiin kesäkuun alussa 1994 ja toukokuun puolessa välissä 1995. Molemmat pitoisuushuiput johtuivat lannoituksesta kylvön yhteydessä. Nitriitin ja nitraatin pitoisuudet olivat lähes saman suuruisia kok-N pitoisuuksien kanssa eli suurin osa salaojiin huuhtoutuneesta typestä oli nitraattina. Nitriitin merkitys huuhtouman kokonaismäärässä on pieni, sillä se on välituote, joka hapettuu nopeasti nitraatiksi. Tutkimusjaksolta nitriittimäärytyksiä ei ole, mutta myöhempien nitriittimittausten perusteella sen voidaan todeta olevan lähes merkityksetön. Ammoniumtypen pitoisuudet vaihtelivat nopeasti keskimäärin 0.05 mg/l ja 0.35 mg/l välillä ja olivat suurimmillaan lähes 0.8 mg/l. Kaikilla padoilla voidaan havaita pH nousua lannoituksen jälkeen. Kesän aikana pH laskee ja lähtee uudelleen nousemaan sateiden alkaessa syksyllä. Salaojavesissä pH koejakson aikana vaihteli välillä pH 6-7.5.

Kokonaisfosforin pitoisuudet vaihtelivat voimakkaasti kiintoainepitoisuuksien mukaan 0.5 mg/l:sta ja 6 mg/l:aan. Huippupitoisuus lähes 16 mg/l mitattiin syyskuun puolesavälissä 1994 heti kynnon jälkeen samaan aikaan kiintoaineksen huippupitoisuuden 17000 mg/l kanssa. Kiintoainepitoisuudet vaihtelivat keskimäärin 50 mg/l ja 2000 mg/l välillä. Suurin osa fosforista kulkeutui salaojavesiin ja sitä kautta vesistöihin kiintoaineksen mukana.

a)



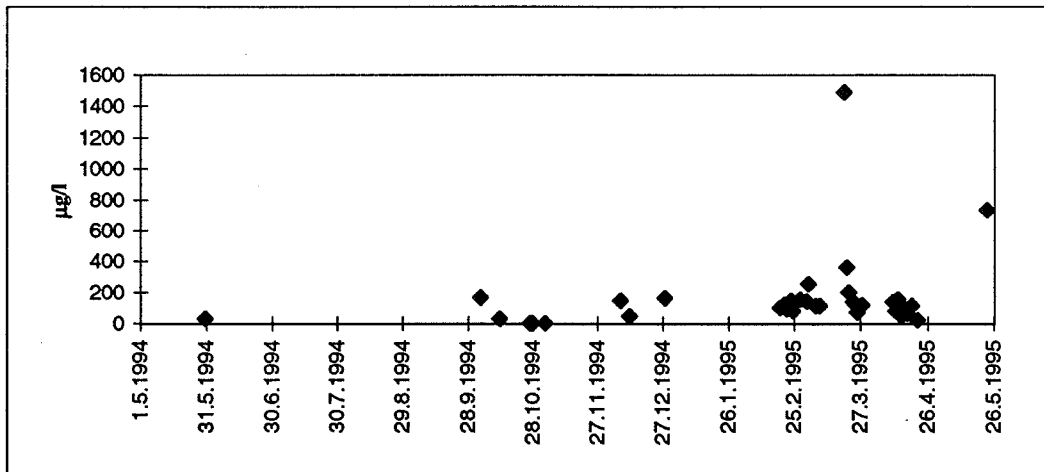


Kuva 4.5. Salaojavesien ravinne ja kiintoainespitoisuuksien vuodenaikaisvaihtelut tutkimusjaksolla padolta S3. a) NH_4 b) NO_2NO_3 ja kok-N c) kok-P d) Kiintoaines

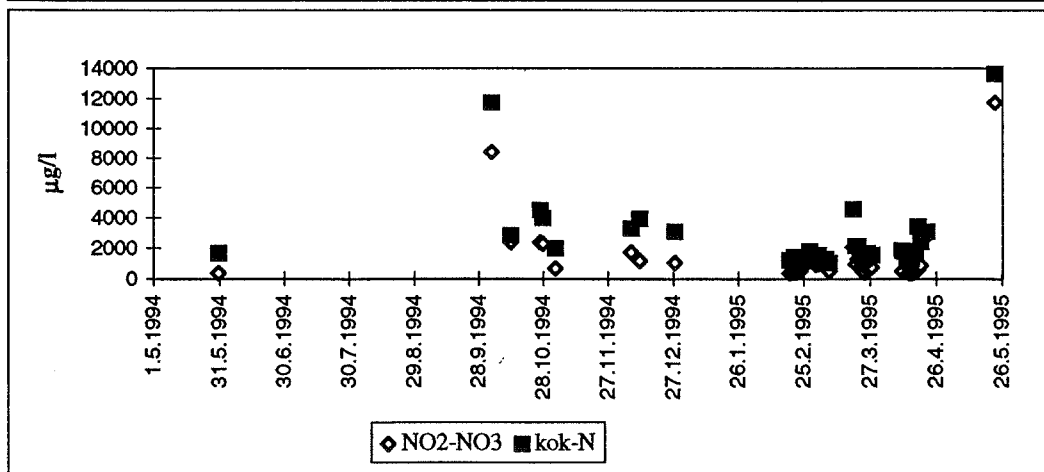
Pintavaluntavesien kokonaistyyppipitoisuudet olivat selvästi pienemmät kuin salaojavesien, mutta kokonaisfosfori- ja kiintoainespitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa salaojavesien kanssa. Kuvassa 4.9 on esitetty pintavaluntavesien pitoisuusvaihtelut padolla P2. $\text{NH}_4\text{-N}$ pitoisuudet pintavaluntavesissä olivat likimain samansuuruisia kuin salaojavesissä lukuunottamatta huhtikuun alussa mitattua ammoniumpiikkiä, jossa pitoisuus oli lähes viisinkertainen salaojavesien pitoisuuteen verrattuna. Nitriitin ja nitraatin summan sekä kokonaistyyppipitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa keskenään, mutta pitoisuudet olivat selkeästi salaojavesien pitoisuuksia pienemmät. Suurimmat pitoisuudet näillä parametreilla sattuiivat syyskuun puoleenvälin, jolloin pellon kylväminen aloitettiin.

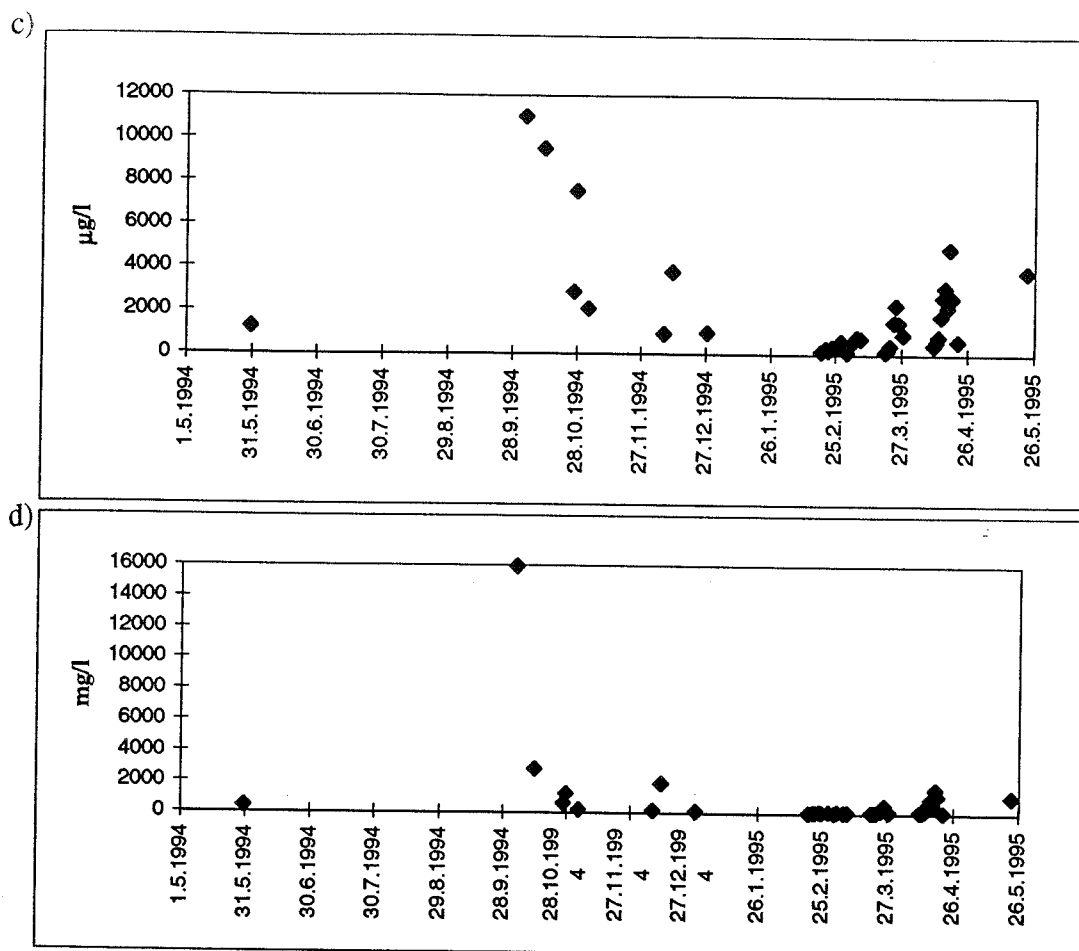
Kiintoainespitoisuudet pintavaluntavesissä ovat likimain saman suuruisia kuin salaojavesissä. Pellon kylvämisen ajankohta näkyy pintavaluntavesien kiintoainespitoisuuksissa selkeästi. pH oli likimain vakio vaihdellen pH 6 ja pH 7 välillä lukuunottamatta lumensulautavesissä mitattua pH arvoa 4 huhtikuun alussa.

a)



b)





Kuva 4.6. Typpi-, fosfori- ja kiintoainespitoisuudet pintavaluntapadolla P2, toukokuu 1994-toukokuu1995. a) NH_4 b) NO_2NO_3 ja kok-N c) kok-P d) Kiintoaines

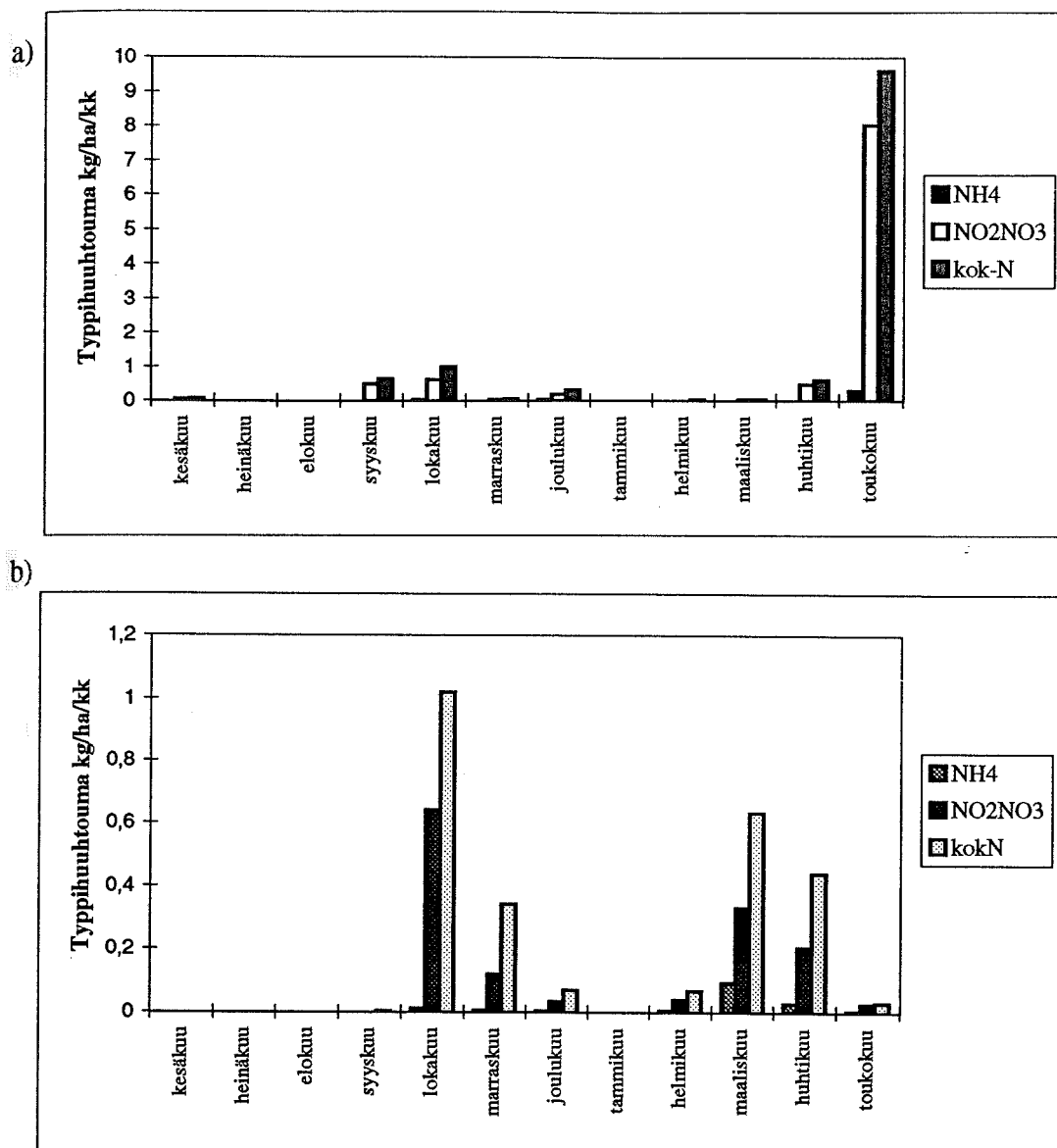
4.3 Huuhtoumat

Virtaama- ja pitoisuusmittausten perusteella laskettiin ravinne- ja kiintoainehuuhtouma salaojista ja pintavaluntapadoilta 1.6.1994-31.5.1995 väliselle ajalle. Laskennassa käytettiin kevään osalta vain vuoden 1995 havaintoja, koska salaojapadot olivat kevään 1994 aikana avopatoja, joissa virtaamaa ei voitu mitata anturilla aikana, jolloin pato saattoi jäätyä. Kokonaiskuormitus on laskettu olettamalla pitoisuuden säilyvän vakiona pitoisuusmittausten välillä. Vuorokauden aikana hehtaarilta tullut vesimäärä on kerrottu pitoisuudella ja saatu vuorokaudessa hehtaarilta tullut kuorma.

Taulukko 4.1. Valunta ja ravinnehuuhtoumat salaojapadolta S3 ja pintavaluntapadolta P2 kuukausittain, kesäkuu 1994-toukokuu 1995.

	Kumulatiivinen valunta [mm]		kok-N kg/ha		kok-P kg/ha		kiintoaines kg/ha	
	S3	P2	S3	P2	S3	P2	S3	P2
kesäkuu -94	0.9	0	0.051	0	0.001	0	0.285	0
heinäkuu -94	0.9	0	0	0	0	0	0.000	0
elokuu -94	1.0	0	0.0002	0	0	0	0.005	0
syyskuu -94	12.1	0.16	0.631	0.003	0.137	0.002	35.64	0.600
lokakuu -94	26.8	18.6	0.995	1.020	1.260	1.464	444.0	756.5
marraskuu-94	28.2	35.7	0.041	0.341	0.035	0.374	7.96	35.8
joulukuu -94	34.6	38.2	0.302	0.068	0.081	0.037	12.77	3.58
tammikuu -95	34.8	38.2	0.007	0	0.004	0	0.710	0
helmikuu -95	35.6	43.4	0.012	0.067	0.001	0.016	0.148	2.69
maaliskuu -95	36.8	88.8	0.016	0.633	0.001	0.299	0.254	31.9
huhtikuu -95	49.9	119.4	0.592	0.440	0.116	0.417	16.56	97.86
toukokuu -95	71.4	119.6	9.618	0.027	0.235	0.008	44.26	2.05
Yhteensä			12.27	2.60	1.87	2.61	562.7	931.0
Kokonais-kuorma			14.9		4.5		1493.7	

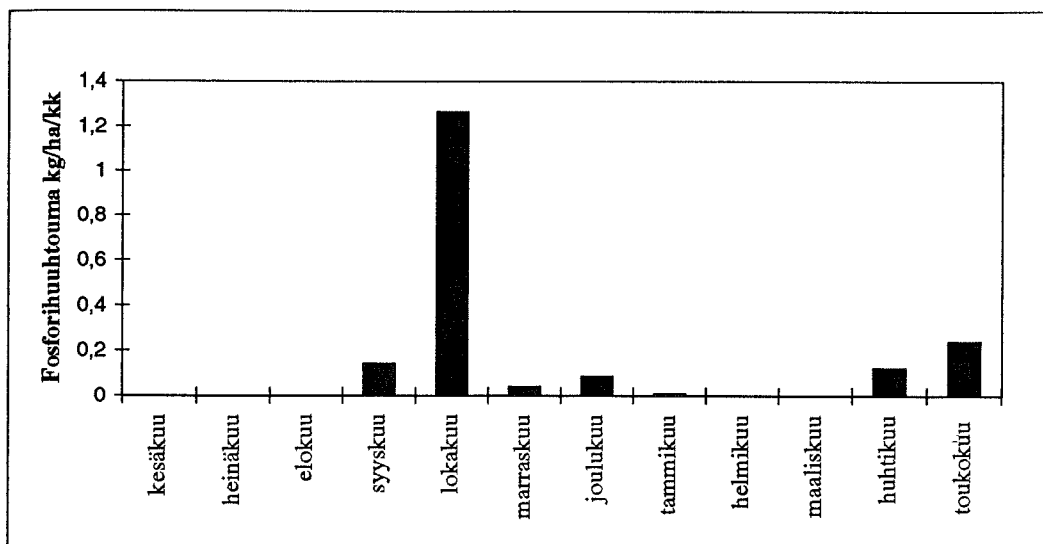
Kokonaisuudessa typpeä huuhtoutui tutkimusalueelta 14.9 kg/ha jaksolla 1.6.1994-31.5.1995, josta salaojahuuhtouma oli 12.3 kg/ha ja loput pintavalunnan aiheuttamaa kuormitusta. Laskentajakson aikana salaojien typpikuormitus painottui suurimmaksi osaksi toukokuulle 1995. Muu osa kuormituksesta syntyi syys-lokakuussa 1994 sekä huhtikuussa 1995 huuhtoutui myös vähän suurempia määriä typpeä, mutta kokonaiskuormitukseen nähden niillä ei ole juurikaan merkitystä. Pintavalunnan merkitys kokonaiskuorman kannalta on vähäinen, ja se jakautuu tasaisesti kevät- ja syyskausille. Kuvassa 4.9 nähdään typpikuormituksen kuukausittainen jakautuminen tarkastelujaksolla.



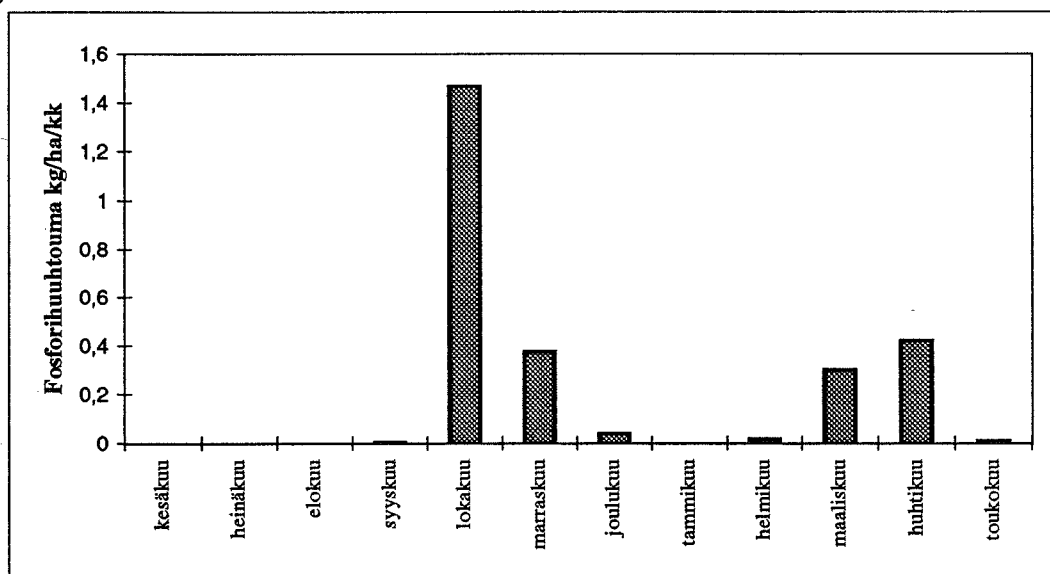
Kuva 4.7. Typpikuormituksen jakautuminen tarkastelujaksolle 1.6.1995-31.5.1995. a) Salaojahuuhtoumat b) Pintavalunta huuhtoumat

Fosfori- ja kiintoainekuormitus ajoittui pääasiassa syyskaudelle, mutta myös huhtitoukokuussa 1995 oli huuhtoutumista. Suurimmat fosfori- ja kiintoainekuormat sattuivat lokakuussa 1994, jolloin suuri osa vuosihuuhtoumasta syntyi. Yhteensä tutkimusjaksona fosforia huuhtoutui 4.5 kg/ha ja kiintoainesta 1495 kg/ha. Salaojahuuhtouma oli 1.9 kg/ha fosforia ja 563 kg/ha kiintoainesta. Fosfori ja kiintoainesta huuhtoutuivat enemmän pintavalunnan kuin salaojien kautta. Kuormitusten kuukausittainen jakautuminen on esitetty kuvissa 4.10 ja 4.11.

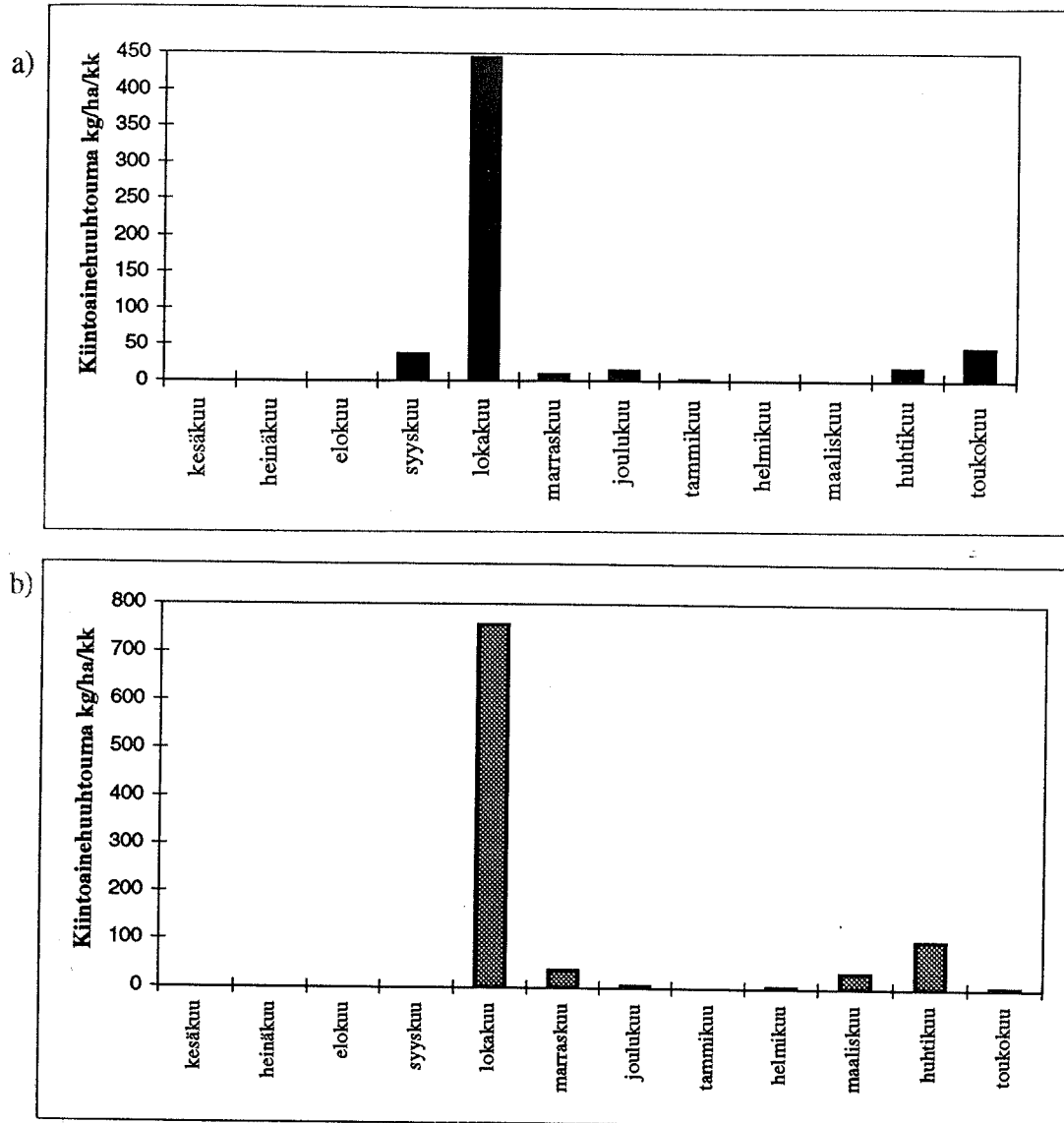
a)



b)



Kuva 4.8. Kokonaisfosforikuormituksen kuukausittainen jakautuminen tutkimusjaksolla 1.6.1994- 31.5.1995. a) Salaojahuuhtoumat. b) Pintavaluntahuuhtoumat



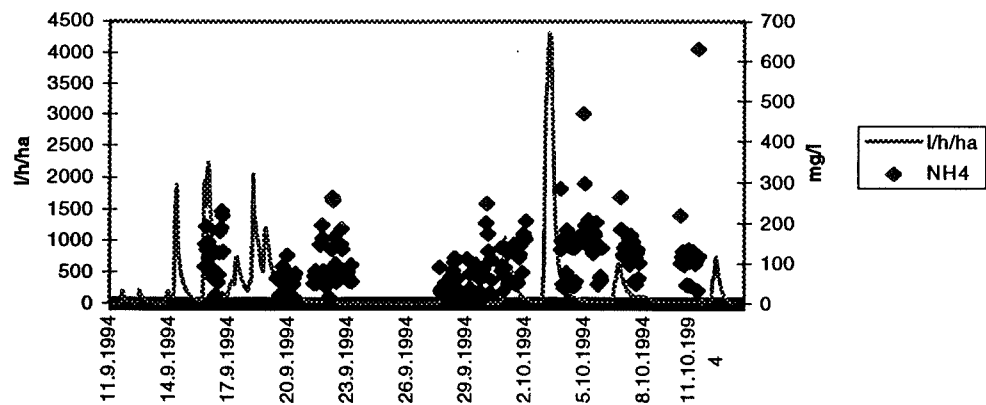
Kuva 4.9. Kiintoainekuormituksen kuukausittainen jakautuminen tutkimusjaksolla 1.6.1994-31.6.1995. a) Salaojajuuhtoumat. b) Pintavaluntajuuhtoumat

4.4 Veden laadun lyhytaikainen vaihtelu

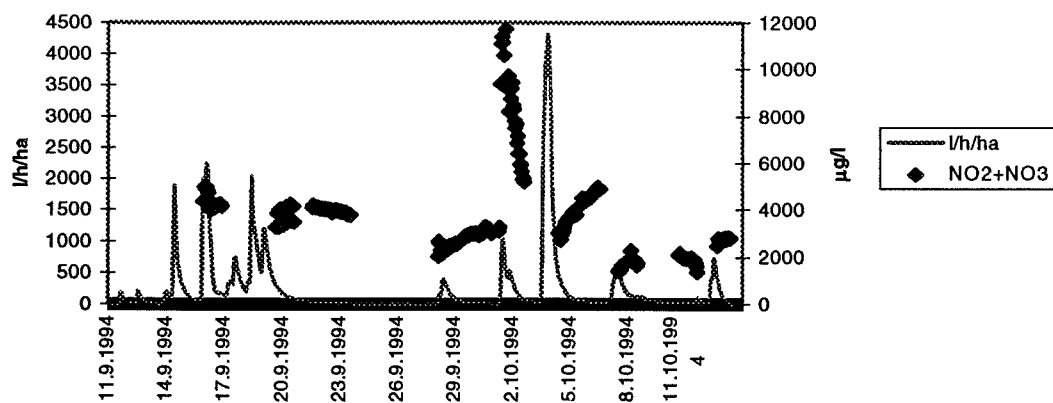
4.4.1 Virtaama vedenlaatuajasarjat

Pitoisuuksien vaihtelut automaattisen näytteenottimen sarjoista on esitetty kuvassa 4.12. Pitoisuuksien voidaan nähdä selkeästi vaihtelevan virtaamatapahtuman eri vaiheissa. pH mitauksissa ei lyhytaikaisissa näytesarjoissa voida havaita riippuvuutta virtaamasta.

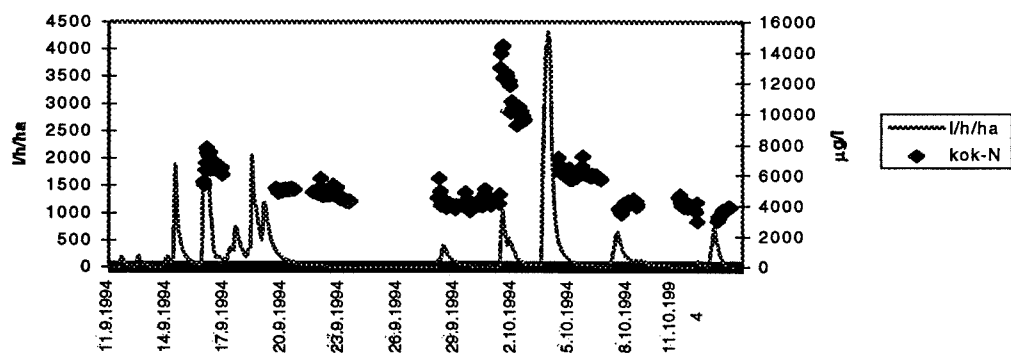
a)



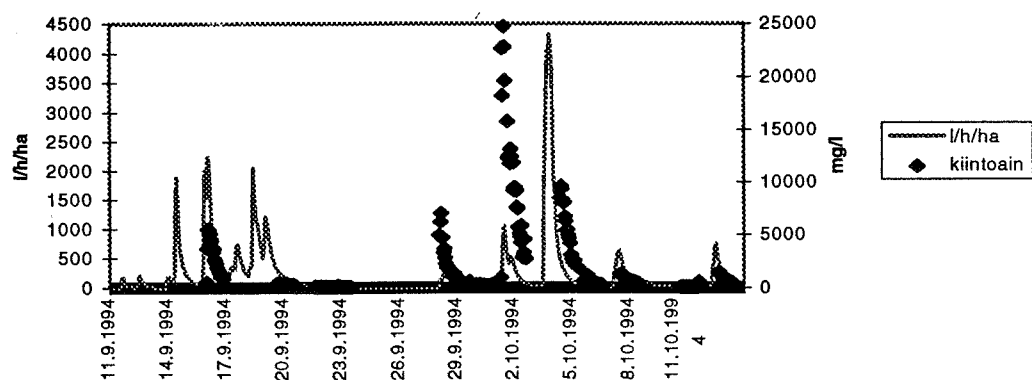
b)



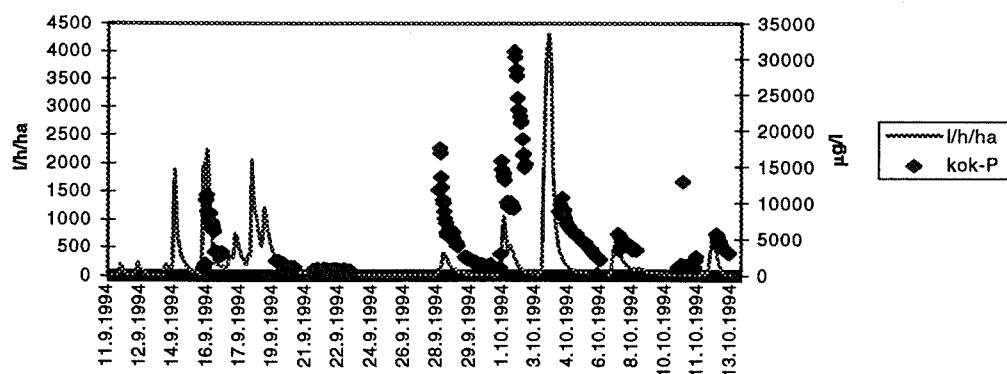
c)



d)



e)



Kuva 4.10. Pitoisuudet ja salaojavirtaamat tutkimusjaksolla 11.9.-13.10.1994. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ c) Kok-N d) Kiintoaines e) Kok-P

4.4.2 Tilastolliset tunnusluvut

Eri jaksoille lasketut tilastolliset tunnusluvut samalle muuttujalle vaihtelivat merkittävästi. Tunnusluvut on esitetty taulukoissa 4.2-4.5

Taulukko 4.2. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 15.9.-23.9.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet $\mu\text{g/l}$ ja kiintoainespitoisuudet mg/l .

	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$	kok-N	kok-P	pH	Kiintoaines
Keskiarvo	89	4055	5294	2013	6.7	765
Keskihajonta	53	286	852	2434	0.23	1329
Keskiarvon keskivirhe	5	29	87	250	0.02	136.3
CV %	59	7	16	121	3.4	174
Min	6	3263	4272	607	6.3	49
Max	263	5007	7773	11170	7.2	5550
Mediaani	69	4050	5049	863	6.7	153
Vinous	1.3	0.56	1.2	2.3	0.60	2.3
Huipukkuus	1.5	3.5	0.3	4.1	- 0.24	4.2

Taulukko 4.3. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 28.9-2.10.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet µg/l ja kiintoainespitoisuudet mg/l.

	NH ₄ -N	NO ₂ NO ₃ -N	kok-N	kok-P	pH	Kiintoaines
Keskiarvo	76	4584	6539	8459	6.8	4272
Keskihajonta	53	2814	3380	7906	0.33	5832
Keskiarvon keskivirhe	6	300	360.3	843	0.04	622
CV %	69	61	52	94	4.9	137
Min	7	2041	3674	1027	6.3	175
Max	247	11730	14430	31140	7.4	24730
Mediaani	63	3000	4440	5732	6.7	1433
Vinous	0.87	1.16	0.92	1.13	0.3	1.8
Huipukkuus	0.2	-0.13	-0.8	0.44	-1.5	2.67

Taulukko 4.4. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 4.10.-8.10.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet µg/l ja kiintoainespitoisuudet mg/l.

	NH ₄ -N	NO ₂ NO ₃ -N	kok-N	kok-P	pH	Kiintoaines
Keskiarvo	141	3867	5433	5009	6.7	2072
Keskihajonta	68	5455	1022	2026	0.31	2541
Keskiarvon keskivirhe	8	652	122	242	0.04	304
CV %	48	141	19	41	4.58	123
Min	7	1391	3511	256	5.9	265
Max	468	4775	7236	10750	7.1	9666
Mediaani	140	3547	5936	4580	6.7	739
Vinous	1.6	7.6	-0.5	0.7	-0.48	1.7
Huipukkuus	6.6	58.6	-1.25	0.34	-0.7	1.7

Taulukko 4.5. Salaojaveden pitoisuuksien tilastolliset tunnusluvut jaksolla 10.10.-13.10.1994 (pato S3). Ravinnepitoisuudet µg/l ja kiintoainespitoisuudet mg/l.

	NH ₄ -N	NO ₂ NO ₃ -N	kok-N	kok-P	pH	Kiintoaines
Keskiarvo	128	2260	3877	2779	6.95	404
Keskihajonta	113	445	371	2215	0.18	423
Keskiarvon keskivirhe	23	70	48	346	0.03	66
CV %	88	20	10	79.7	2.66	105
Min	32	1366	2994	1091	6.6	52
Max	630	2837	4744	13000	7.2	1483
Mediaani	115	2053	3908	1455	7.0	99
Vinous	3.8	0.1	-0.3	2.5	-0.12	0.91
Huipukkuus	14.5	-1.5	0.36	9.0	-1.3	-0.34

Tunnuslukujen perusteella pH-arvot olivat likimain normaalijakautuneita. Eri mittaussarjojen keskiarvot olivat lähellä toisiaan ja variaatiokertoimet pieniä tunnin välein kerätyissä näytesarjoissa. Tilastollisten tunnuslukujen perusteella pH:n mittausväliä voidaan pidentää tunnin välein kerätyistä näytteistä yhteen näytteeseen 24 näytteen mittaussarjassa.

Kokonaistyyppipitoisuudet olivat myös likimain normaalijakautuneita lukuunottamatta mittaussarjaa 28.9.-2.10.1994, jossa muutamat hyvin suuret pitoisuudet nostivat keskiarvon mediaania huomattavasti suuremmaksi. Eri mittaussarjojen kokonaistypen maksimipitoisuuksissa oli suuria eroja. Variaatiokertoimet vaihtelevat 10-60% välillä kokonaistyyppipitoisuuksissa. Koska keskihajonnat olivat kuitenkin keskiarvoa huomattavasti pienempiä, voidaan olettaa näytteiden välillä olevan ajallista riippuvuutta edellisistä havainnoista. Ammoniumtypen pitoisuuksien hajonta yksittäisessä mittaussarjassa oli merkittävää ja osoittaa ammoniumpitoisuuksien vähäistä riippuvuutta edellisistä havainnoista. Nitriitin ja nitraatin summan välillä ei vastaavaa yhtäläisyyttä voida havaita. Osassa mittaussarjoista hajonnat ovat hyvin suuria, kun taas joissain mittaussarjoissa hajontaa ei juuri ole. Tämän perusteella ei nitriitin ja nitraatin summan osalta voida näyteväliä arvioida. Ammoniumtypen pitoisuuksien vaihtelu on voimakasta jo tunninkin mittaisella näytevälillä, jolloin tiivis näyteväli tuntuu järkevältä. Kokonaiskuormituksen kannalta ammoniumilla ei kuitenkaan ole suurta merkitystä, mikä puoltaisi harvempaa näyteväliä. Kokonaistyyppipitoisuuksia ei sen sijaan kannata tilastollisten tunnuslukujen perusteella mitata tunnin välein kerätyistä näytteistä.

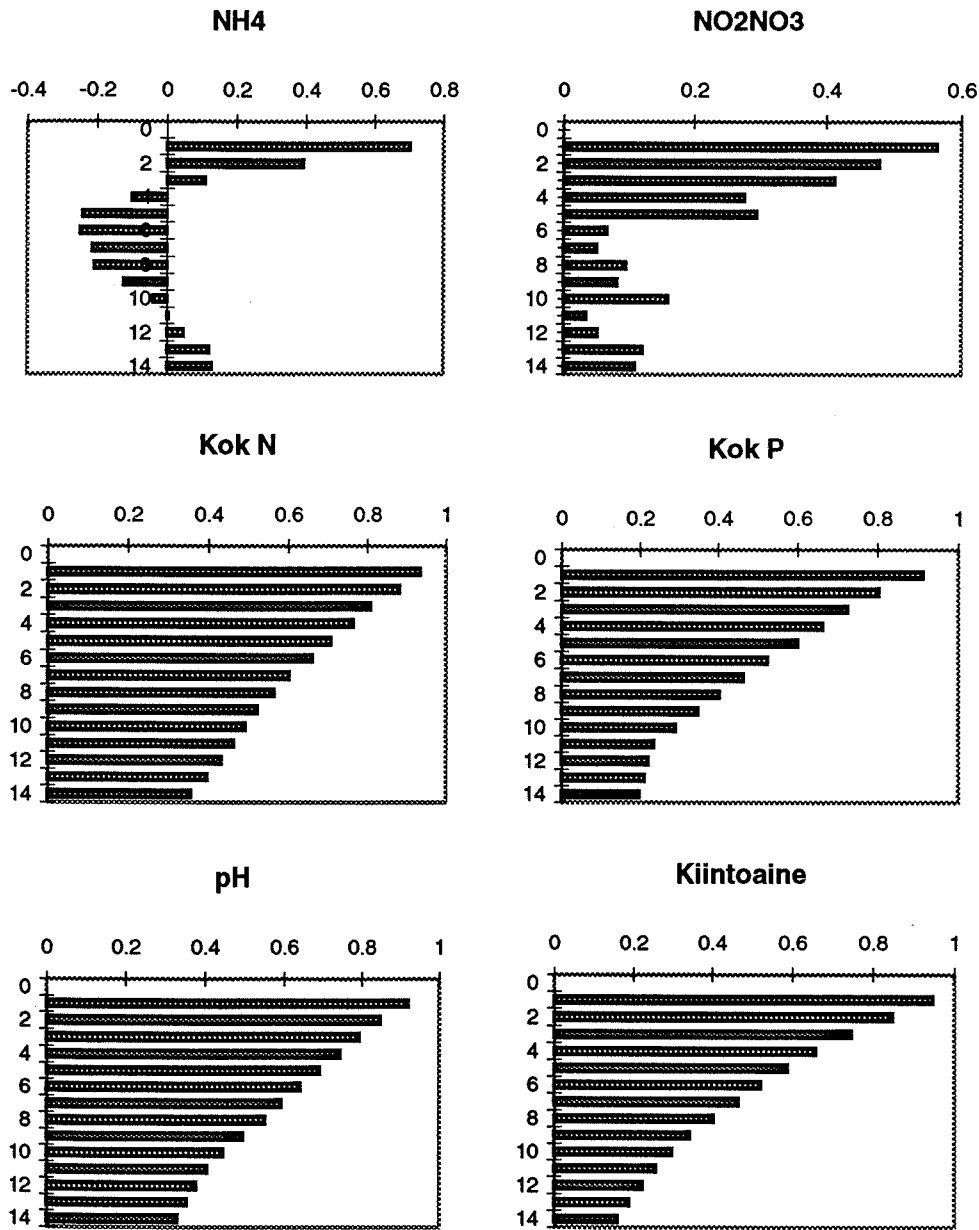
Kaikissa kokonaisfosforin mittaussarjoissa mediaani on pienempi kuin keskiarvo ja jakaumat ovat lievästi oikealle vinoja ja lievästi huipukkaita. Tämän aiheuttavat muutamat huomattavan suuret pitoisuudet, joita esiintyy jokaisessa mittaussarjassa. Maksimipitoisuus kasvaa syksyn edetessä lokakuun puoliväliin saakka ja laskee 10.-13.10. 1994 kerätyssä sarjassa.

Kiintoainespitoisuuksien välillä eri mittaussarjoissa on suuria eroja. Suurimmillaan pitoisuudet ovat syys-lokakuun vaihteen havainnoissa, joita ennen pelto oli juuri kynnetty ja runsaat ja voimakkaat sateet sattuivat. Kaikissa kiintoaineksen mittaussarjoissa variaatiokertoimet vaihtelivat yli sadan prosentin, mikä osoittaa kiintoaineksen määrän vaihtelun ajan suhteen merkittävästi. Kiintoainesta lähtee huomattavasti liikkeelle voimakkaan virtaamahuipun kohdalla ja pitoisuudet vähenevät loivasti huipun jälkeen. Tämä saa aikaan lyhyeenkin, vain vuorokauden mittaiseen näytesarjaan, suurta hajontaa. Tilastollisten tunnuslukujen perusteella kiintoaineksen mittausväliä ei merkittävästi kannata pidentää, jos maksimipitoisuudet halutaan havaita.

4.4.3 Havaintojen autokorrelaatorakenne

Tunnin välein otettujen näytteiden välillä voitiin olettaa olevan voimakasta riippuvuutta. Muuttujilla kiintoaines, kokonaistyyppi, kokonaisfosfori ja pH riippuvuus oli merkittävää viidenteen tai kuudenteen viipeeseen saakka. Nitriitin ja nitraatin summalla autokorrelaation voimakkuus vaihtelee eri näytteenottosarjoissa. Korrelaation voimakkuuden vaihtelu saattaa johtua erikokoisista näytteenottosarjoista, joille autokorrelaatioanalyysi on suori-

tettu. Kuvassa 4.13 on esitetty autokorrelaation esiintyminen 15.-23.9.-94 sarjassa. Muista sarjoista autokorrelaatiiorakenteet on esitetty julkaisussa Kankaanranta (1995).



Kuva 4.11. Autokorrelaatiiorakenne padolta S3 otetuissa näytteissä 15.-23.9.1994

Liitteessä 7 esitetyn menetämän avulla laskettiin ekvivalentti riippumattomien näytteiden määrä. Tulokset eri muuttujille ja eri näytesarjan osille riippumattomaksi näytemääräksi on esitetty taulukossa 4.5 Taulukossa 4.6 on laskettu näytteenottoväli tunteina, jolloin kerätyt näytteet eivät enää olisi keskenään autokorreloituneita. Näytteenottovälin laskennassa oletettiin riippumattomien näytteiden jakautuvan tasaisesti. Kahdessa viimeisimmässä sarjassa riippumattomien näytteiden määrä vaihtelee paljon. Se saattaa johtua liian pienestä näytemäärästä tai valuntatapahtumien luonteesta.

Taulukko 4.6. Riippumattomien näytteiden määrä eri näytesarjoista. Suluissa on näytemäärä, jota on käytetty ekvivalenttien riippumattomien näytteiden määrää laskettaessa.

	NH ₄ -N	NO ₂ NO ₃ -N	kok- N	kok-P	pH	kiintoaines
15.-23.9.1994	30 (95)	24 (95)	9 (95)	11 (95)	8 (95)	11 (95)
28.9-2.10.1994	43 (88)	8 (88)	8 (88)	9 (88)	8 (88)	11 (88)
4.-8.10.1994	69 (69)	70 (70)	8 (70)	9 (70)	8 (70)	8 (70)
10.-13.10.1994	24 (24)	7 (41)	9 (41)	41 (41)	7 (41)	7 (41)

Taulukko 4.7. Riippumattomien näytteiden näytteenottoväli tunteina.

	NH ₄ -N	NO ₂ NO ₃ -N	kok- N	kok-P	pH	kiintoaines
15.-23.9.1994	3	4	10	9	12	9
28.9-2.10.1994	2	11	11	11	10	8
4.-8.10.1994	1	1	9	8	9	9
10.-13.10.1994	1	6	5	1	6	6

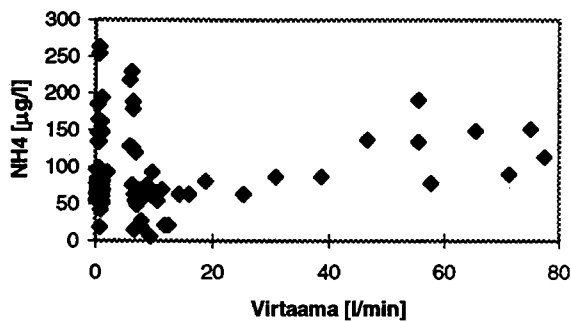
4.4.4 Virtaaman ja pitoisuuden välinen riippuvuus

Salaojissa tapahtuvalla virtauksella on suuri merkitys määritettäessä näytteenottotiheyttä lyhytaikaisten pitoisuusmuutosten seuraamiseksi. Näytteenotin voidaan säätää ottamaan näytteitä tietyin väliajoin tietyn virtaama-arvon ylittyessä. Tällöin on tärkeää tietää millaisella virtaamalla on merkitystä pitoisuuksien vaihteluun. Tätä selvitettiin piirtämällä kuvia virtaaman ja pitoisuuden välille. Kuvaajat on esitetty sarjasta 15.-23.9.-94 kuvassa 4.14. Muista sarjoista kuvaajat on esitetty julkaisussa Kankaanranta (1995).

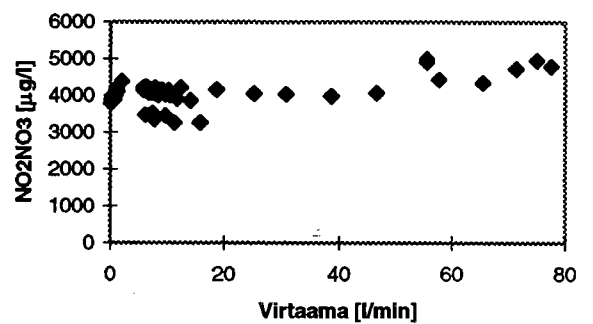
Virtaaman vaikutus ravinnepitoisuuksiin ei ole merkittävää ennen tiettyä raja-arvoa. Kiintoaineksen ja virtaaman välillä vallitsee selkeä syy-seuraussuhde. Virtaaman kasvaessa kiintoainemäärät kasvavat samassa suhteessa. Suurella virtaamalla kiintoainesta irtoaa maaperästä enemmän ja kulkeutuu salaojiin. Kiintoainekseen on puolestaan sitoutuneena runsaasti ravinteita erityisesti fosforia, jolloin virtaaman kasvaessa myös fosforipitoisuudet kasvavat. Virtaaman ylittäessä raja-arvon 20 l/min pitoisuus kasvaa lineaarisesti. Ennen

tätä pistettä pitoisuudet vaihtelevat satunnaisesti. Ammoniumtyypen pitoisuuden ja virtaaman välillä ei voida havaita mitään selkeää yhteyttä. Kokonaistypen ja nitriitin ja nitraatin -summan ja virtaaman välillä ei ole havaittavissa merkittävää yhteyttä, vaan pitoisuudet pysyvät likimain yhtä suurina virtaaman muutoksista huolimatta. Vasta hyvin suurilla virtaamilla 50 l/min kok-N ja $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ pitoisuuksien ja virtaaman välillä voidaan havaita riippuvuutta.

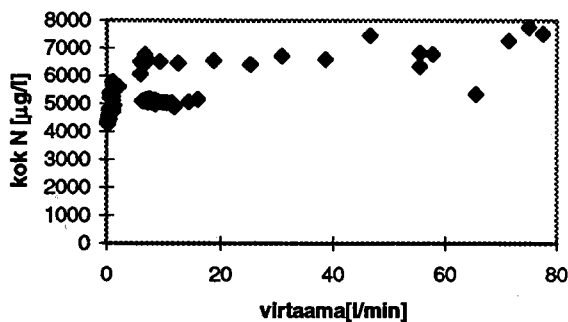
a)



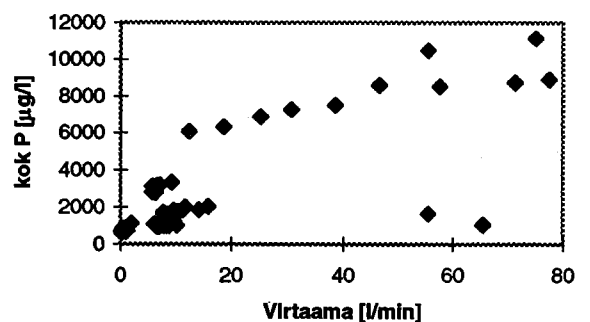
b)



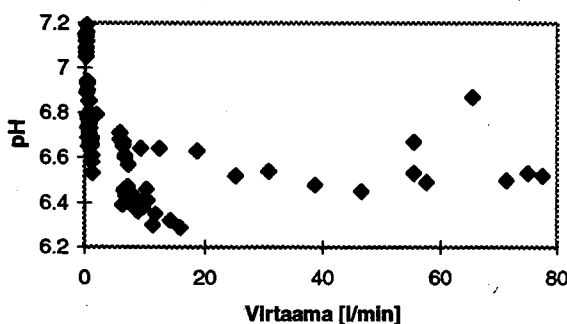
c)



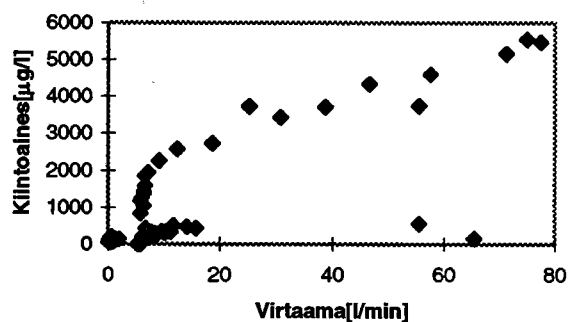
d)



e)



f)

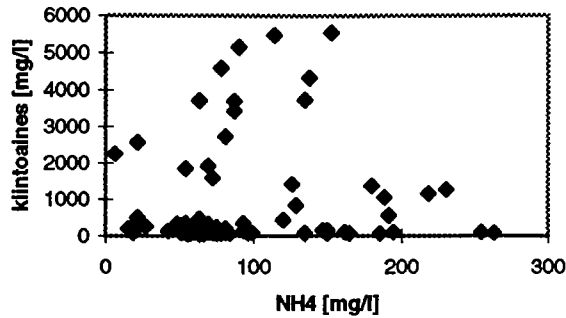


Kuva 4.12. Ravinnepitoisuuksien muuttuminen virtaaman suhteen padolla S3 15.-23.9.1994. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$ c) Kok- N d) Kok-P e) pH f) Kiintoaines

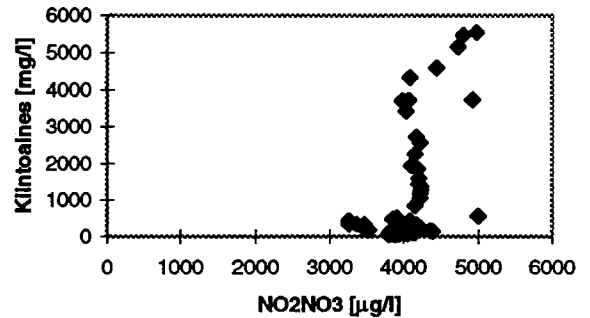
Fosforin taipumus sitoutua kiintoaineeseen pintaan näkyy kokonaisfosforin mittaustuloksissa, jotka kasvavat selkeästi kiintoainespitoisuuden kasvaessa. Kokonaistyyppipitoisuuksien

ja kiintoainespitoisuuksien välillä ei vastaavaa korrelaatiota voi havaita, johtuen siitä, että ammoniumtyppi ja nitriitti- ja nitraattitypen summan analyysi ei häiriidy kiintoaineesta eivätkä nämä ravinteet ole sitoutuneina merkittävästi kiintoaineeseen pinnalle.

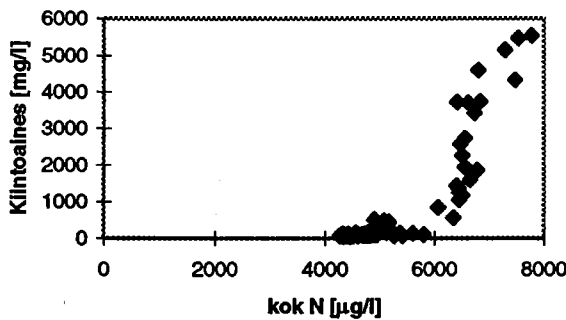
a)



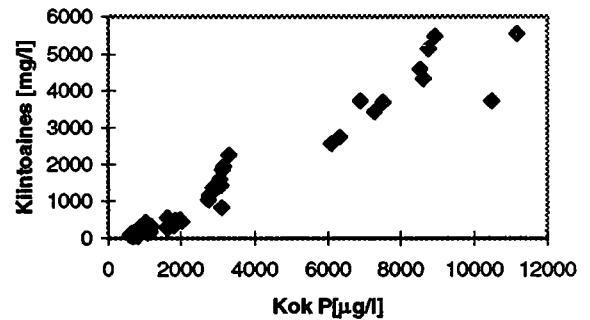
b)



c)



d)



Kuva 4.13. Ravinnepitoisuuksien ja kiintoainespitoisuuksien välinen riippuvuus. a) $\text{NH}_4\text{-N}$ b) $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ c) Kok-N d) Kok-P

Taulukko 4.8. Eri ravinnepitoisuuksien väliset Pearsonin korrelaatiokertoimet näytesarjalle 15.-23.9.-94. Tähdellä merkityt kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä.

	Kiintoaine	Kok N	Kok P	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$
Kok N	0.8781*				
Kok P	0.9781*	0.8626*			
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.1024	0.2590	0.1166		
$\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$	0.5424	0.5955*	0.5267	0.2427	
pH	-0.2921	-0.4237	-0.3186	0.1152	-0.0938

Pearsonin korrelaatiokertoimista voidaan havaita vastaavat seikat kuin edellä esitetyistä kiintoaineen ja ravinnepitoisuuksien välisistä riippuvuuksista. Korkeista korrelaatiokertoimista kiintoainespitoisuuden ja kokonaistypen ja -fosforin välillä seuraa, että näytevälin

tulisi olla lyhytaikaisia pitoisuuden vaihteluita tutkittaessa muutaman tunnin luokkaa, koska kiintoaineksen ja virtaaman välillä on voimakas riippuvuus. Vastaavia merkittäviä riippuvuuksia on nitriitin ja nitraatin summan ja kokonaistypen pitoisuuksien ja kokonaisfosforin ja kokonaistypen pitoisuuksien välillä.

4.5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tutkimusjaksolla kevätkautena syntyi huomattavin osa kuormituksesta, vaikka pitoisuudet kesällä ja syksyllä olivat keskimäärin suuremmat kuin keväällä. Keväällä syntyi kuitenkin yli puolet vuotuisesta salaojavalunnasta. Mitattu salaojavaluma on kuitenkin pieni verrattuna kirjallisuudessa esitettyihin salaojavaluman arvoihin savimailla (Turtola & Jaakkola, 1985, 1987). Tämä voi johtua poikkeuksellisen kuivasta kesästä, mutta toisaalta poikkeuksellisen sateisen syksyn olisi pitänyt kompensoida tätä. Vertailua muiden alueiden mittauksiin on kuitenkin vaikeaa tehdä erilaisen maalajin ja muiden valunnan syntyyn vaikuttavien tekijöiden poiketessa toisistaan. Keväällä vesimäärät olivat suuria ja kun pitoisuudetkin olivat keskitasoa saatiin silloin suurimmat kuormitukset. Vuotuinen kuormitus ei ole välttämättä vertailukelpoinen muiden tutkimusten kanssa, koska tutkimusjaksolle mahtuu kahden lannoituskerran vaikutus. Ensimmäinen lannoitus tehtiin toukokuussa 1994 ja sen aiheuttama kuormitus näkyi kesäkuun salaojavirtaamien suurina pitoisuuksina. Toinen lannoitus tehtiin toukokuun puolivälissä 1995 ja silloin sattuneiden runsaiden sateiden aiheuttamat virtaamat huuhtoivat runsaasti lannoitteita jo toukokuun aikana pois pellolta. Kokonaisuudessaan typpeä huuhtoutui tutkimusalueelta 14.9 kg/ha ja fosforia 4.5 kg/ha, joka on samaa suuruusluokkaa muiden Suomessa mitattujen kuormitusarvioiden kanssa. (Turtola & Jaakkola 1985, 1987, Kauppi 1978, Pekkarinen, 1979).

Syksyllä 1994 kerättyjen näytteiden perusteella määritettiin optimaalista näyteväliä, jolla yksittäisen virtaamatapahtuman pitoisuusvaihtelut voidaan havaita ilman, että näytemäärä kasvaa kohtuuttoman suureksi. Pitoisuusvaihteluiden ja näytteenottotiheyden arvioinnissa käytettiin useita eri näytesarjoja, joiden väliset vaihtelut olivat suuria, mikä estää näytteenottotiheyden yksikäsitteisen määrittämisen. Vedenlaatuajaksarjojen pitoisuuksien riippuvuus virtaaman suuruudesta on selkeästi havaittavissa kokonaisfosforin ja kiintoaineksen välillä. Ammoniumin ja virtaaman välillä ei selkeää riippuvuutta havaittu. Nitriitin ja nitraatin summan ja kokonaistypen pitoisuudet vaihtelivat vain vähän yksittäisissä ajaksarjoissa, eikä pitoisuusmuutoksilla ollut selkeää yhteyttä virtaaman muutosten kanssa.

Käytettyjen tilastollisten menetelmien perusteella näytteenottotiheyttä on vaikea yksikäsitteisesti arvioida, sillä käytetyt menetelmät eivät välttämättä sovi ko. aineiston käsittelyyn ilmiön luonteesta ja näytesarjojen pienuudesta johtuen. Tilastollisten tunnuslukujen perusteella tunnin näyteväli on liian tiivis kokonaistypen muutoksia tutkittaessa. Nitriitin ja nitraatin summan näytevälistä tilastollisten tunnuslukujen perusteella on vaikea sanoa mitään, koska hajonta eri näytesarjojen välillä on voimakasta, eikä sarjoista saada yksiselitteisiä tuloksia. Ammoniumtyypelle tilastolliset tunnusluvut puoltaisivat tiivistä näytteenottoa, mutta ammoniumtypen vähäinen merkitsevyys kokonaiskuormituksen kannalta ei puolla tiivistä näytteenottoa. pH:n mittausväli tunnin välein tilastollisten tunnuslukujen perusteella

on liian tiivis. Tilastollisten tunnuslukujen perusteella kokonaisfosforin ja kiintoaineksen mittausväli tunnin välein on perusteltua.

Ekvivalentti riippumattomien näytteiden määrä antaa näytemäärän, joka lasketuissa sarjoissa olisi riittänyt saman informaation saamiseen. Menetelmä ei kuitenkaan auta mittausajankohdan valinnassa, koska saatu näyteväli on laskettu jakamalla alkuperäinen näytemäärä riippumattomien näytteiden määrällä. Tällä menetelmällä näytteenotto tapahtuu tasavälein, jolloin virtaama-pitoisuusaikasarjan alkupään nopeat muutokset saattavat jäädä pois liian harvaa näyteväliä käytettäessä. Aikasarjan loppupäästä tällä menetelmällä otetaan usein liian tiiviisti näytteitä, sillä silloin virtaama ja pitoisuus ei enää muutu niin nopeasti kuin sarjan alkupäässä.

Kaikkien mitattujen muuttujien autokorrelaatio oli voimakasta lukuunottamatta ammoniumtyyppiä, jolla riippumattomien näytteiden näyteväli oli vain 2-3 tuntia. Muilla muuttujilla riippumattomia näytteitä voitiin saada vasta kymmenen tunnin näytevälillä. Nitriitin ja nitraatin summan riippumattomien näytteiden näyteväli ja näytesarjojen sisäinen hajonta vaihtelivat runsaasti. Tämä saattaa johtua nitraattityypen määrän muutoksista maa-perässä ja sen huuhtoutumisherkkyydestä. Korkeat autokorrelaation arvot eri näytesarjoissa puoltavat pitkää näyteväliä, mutta silloin saattaa jäädä nopeiden pitoisuusvaihteluiden huippuarvot havaitsematta. Ideaalinen tilanne olisi sellainen, jolloin näyteväli saataisiin tiiviiksi virtaamatapahtuman alussa ja sitä voitaisiin harventaa virtauksen ohitettua huippuarvon. Lyhytaikaisia pitoisuusmuutoksia tutkittaessa näyteväli näiden tutkimusten perusteella tulisi asettaa kolmeen tai neljään tuntiin. Virtaama ja pitoisuuden välillä voimakas korrelaatio näkyy selkeästi vasta 10-15 l/min virtaamilla, jolloin 40 mm virtaamakriteeri tuntuisi järkevältä. Jos kuitenkin halutaan tutkia lyhytaikaisia pitoisuuden muutoksia kriteeriä tulisi alentaa, jotta virtaamatapahtuman alussa pienillä virtaamilla suuret pitoisuudet saataisiin kiinni. Näyteväliä on määritetty vain syksyn mittauksista, eikä esitetyt näytevälit välttämättä sovi suoraan esimerkiksi sulannan tai lannoituksen jälkeisten huuhtoumien tarkasteluun.

5. MALLISOVELLUS

5.1 Yleistä

Pellon vesitasetta mallinnettiin simulointimallilla FLOCR, jonka Oostindie ja Bronswijk (1992) ovat kehittäneet. Malli sovitettiin Sjöskullan koekentältä kerättyyn aineistoon ja laskettiin vesitase sulalle kaudelle 1994. Rinnepellon vesitasetta laskettaessa profiilimallin tuloksia olisi parasta verrata rinteeseen keskiosan mittauksiin, koska silloin rinteeseen vaikutus olisi mahdollisimman pieni valuntaan ja pohjavedenpinnankorkeuksiin. Vertailuaineistona käytettiin tässä tutkimuksessa rinteeseen alaosan valuntoja padoilta S3 ja P2 (kuva 3.2). Pohjavedenpinnankorkeudet on mitattu pojavesiputkessa 7 (kuva 3.2), joka on lähellä salaojapatoa S4 ja pintavaluntapatoa P3. Näitä patoja ei kuitenkaan voitu käyttää vertailuaineistona, koska padoilla pinnankorkeuksia ei ole mitattu jatkuvasti antureilla.

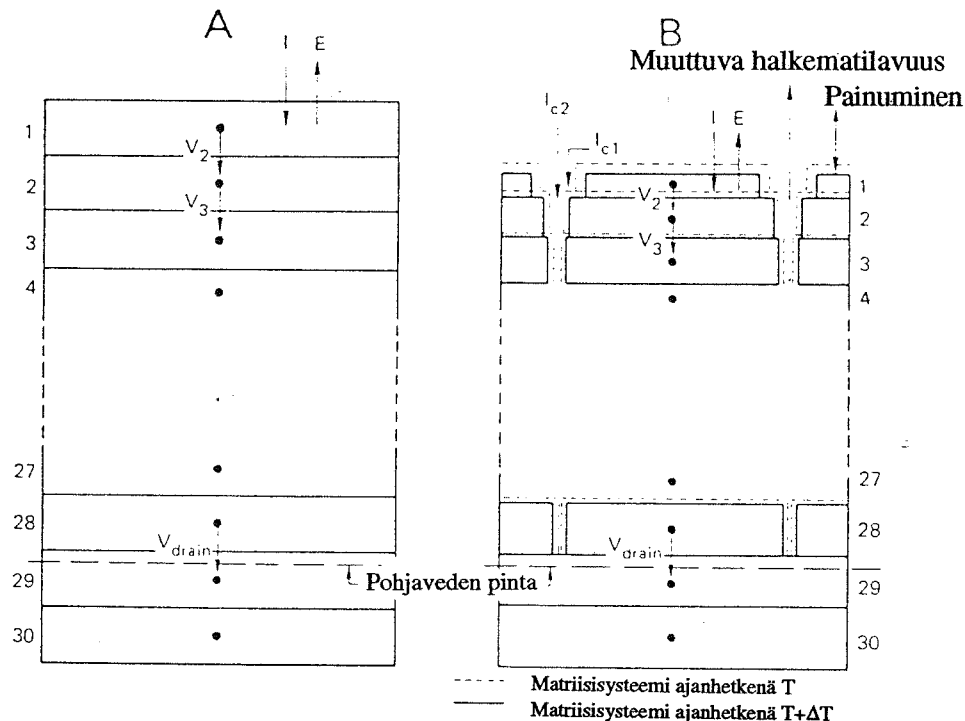
5.2 FLOCR-mallin toimintaperiaate

FLOCR on kehitetty vedenvirtauksen mallintamiseen savimaassa. Siinä otetaan huomioon kuivumiskutistumisen aiheuttamat halkeamat, joilla on ratkaiseva merkitys veden virtaukseen maaperässä. Malli toimii yhdessä dimensiossa ja mallintaa veden liikettä matriisissa ja halkeamien aiheuttamaa oikovirtausta kyllästymättömässä vyöhykkeessä.

Veden virtausta voidaan mallintaa maaprofiilissa, jossa on enintään viisi erilaista maalajivyöhykettä. Profiili on lisäksi jaettu laskentaa varten enintään kolmeen kymmeneen kerrokseen, joille jokaiselle malli laskee tulevan ja lähtevän vesimäärän sekä tilavuuden muutoksen, halkeamatilavuuden, kerrospaksuuden muutoksen, painekorkeuden ja vesipitoisuuden. Maaprofiilille malli laskee halkeamien kokonaistilavuuden, maanpinnan painumisen, pintavalunnan, pohjaveden pinnan korkeuden, salaojavirtaaman, todellisen haihdunnan sekä ohivirtauksen. Lähtötietoina mallille annetaan maaperäominaisuudet (veden pidätyskäyrä, hydraulisen johtavuuden käyrä ja kutistumisparametrit), yläpinnan reunaehdot (sadanta ja potentiaalinen haihdunta) ja alapinnan reunaehdot (salaojien kuivatustehokkuus ja alapinnan kautta poistuva vesimäärä). Manuaalin mukaan mallille voidaan antaa myös lähtötilan pohjavedenpinnan korkeus, mutta malli olettaa pohjaveden olevan laskennan alussa aina maanpinnan tasolla riippumatta siitä mille tasolle se asetetaan mallin lähtötiedoissa.

FLOCR perustuu kutistumattomille maille rakennettuun FLOWEX (Buitendijk, 1984) malliin. FLOCR on sovellettu versio FLOWEX mallista, johon on lisätty halkeamien synty ja maan kutistuminen (kuva 5.1). FLOCR mallissa profiili jaetaan matriisiin ja halkeamiin, joiden suhteessa sadannasta johtuva imeytyminen jaetaan matriisi-infiltraatioksi ja halkeamainfiltraatioksi. Halkeamien kautta imeytynyt vesi lisää halkeamien pohjalla olevien kerroksien maamatriisin vesipitoisuutta ja matriisiin imeytynyt vesi lisää päällimmäisen kerroksen vesipitoisuutta. Kutistumisparametrien avulla lasketaan tietyn vesipitoisuuden omaavan kerroksen tilavuus. Yksikötön geometrisuuskerroin jakaa tilavuuden muutoksen halkeamiin ja kerrospaksuuden muutokseen. Vertikaalivirtaus lasketaan samalla tavalla

kuin alkuperäisessä mallissa FLOWEX painekorkeuden, kosteuspitoisuuden ja hydraulisen johtavuuden avulla Richardsin yhtälön mukaisesti (Buitendijk, 1984).



I = imeytyminen maamatriisiin (m/s)

I_{c,1} = halkeamiin imeytyvän vesimäärän osa, joka ylittää maksimaalisen imeytymisensin suoraan maamatriisiin.

I_{c,2} = halkeamiin imeytyvän vesimäärän osa, joka sataa suoraan halkeamiin.

E = todellinen haihdunta

V = Darcyn lain mukainen virtaus kahden solmupisteen välillä.

V_{drain} = salaojavirtaama (m/s)

Kuva 5.1. Periaate FLOCR mallin toiminnasta ja sen edeltäjän FLOWEX mallin toiminnasta. (Bronswijk et. al., 1992)

a) FLOWEX, yksidimensionaalinen vesitasetta laskeva malli. (Buitendijk, 1984)

b) FLOCR, FLOWEX mallin sovellus, joka laskee vesitaseen ja maan halkeilun ja painumisen savimassa.

5.2.1 Veden virtauksen mallintaminen

Veden virtauksen kuvaukseen käytetään Richardsin yhtälöä (Richards, 1931):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right], \quad (5.1)$$

jossa

θ = vesipitoisuus [til.%]

t = aika [s]

h = painekorkeus [cm]

z = etäisyys[cm]

$k(h)$ = hydraulinen johtavuus [cm/d]

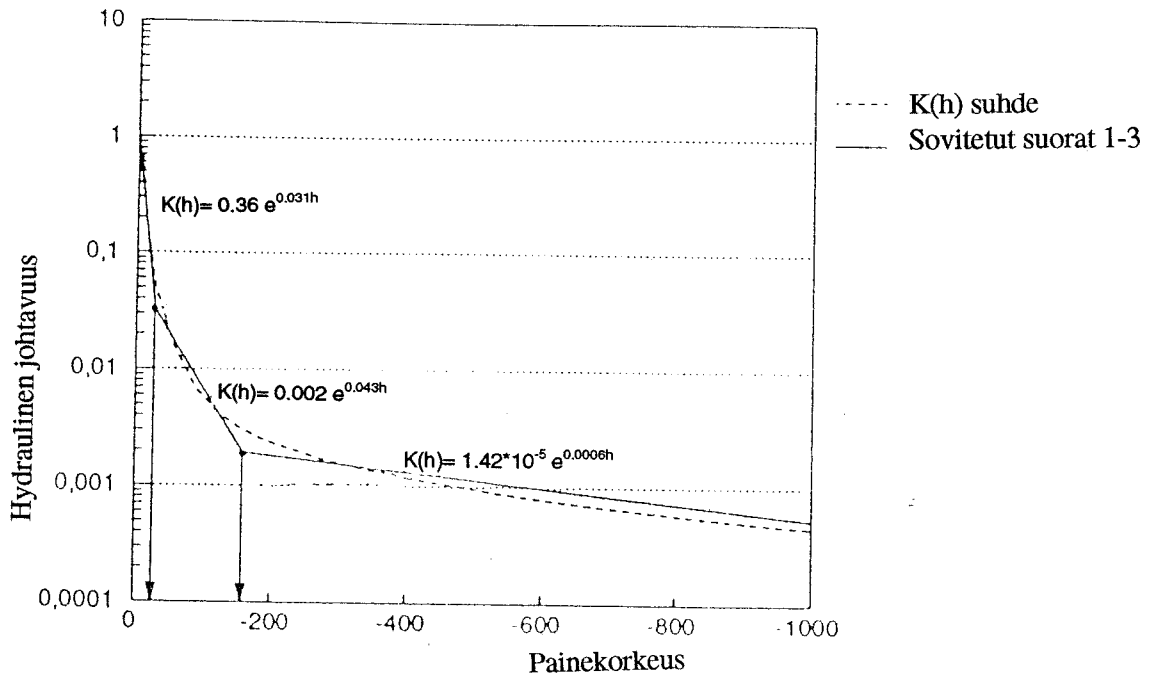
Vertikaalista veden virtausta v (cm/d) kahden pisteen i ja $i-1$ välillä kuvataan yhtälöllä:

$$v = -\frac{k_i - k_{i-1}}{e^{\alpha \Delta z} - 1} - k_{i-1} \quad (5.2)$$

Kyllästymättömän maan hydraulisen johtavuuden riippuvuus vallitsevasta painekorkeudesta

Darcyn lain analyyttinen ratkaisu on mahdollista, kun $k(h)$ riippuvuutta kuvataan eksponenttifunktiolla. Yhtälössä (5.3) k_0 on kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus ja α on maalajille ominainen vakio. Useille maalajeille eksponentiaalinen riippuvuus ei kuitenkaan sovi kuin hyvin suppeille alueille. Tällöin joudutaan yksi $k(h)$ riippuvuus esittämään usean eri eksponenttisovituksen avulla, jolloin sovitukset muodostavat lineaarisesti jatkuvan funktion. Hyvin suurilla painepotentiaalien arvoilla pitää huolehtia, siitä ettei sovitusta liian paljon oikeasta riippuvuudesta. Koska malli rajaa käytettävien taitepisteiden määrän kahteen, on tehtävä kompromissi, jossa painotetaan joko hydraulisen johtavuuden käyrän märkeä tai kuivaa päätä. Painotuksella saadaan sovitusta tarkemmaksi halutulle alueelle. Tällöin taitepisteet täytyy sijoittaa lähemmäksi painotettavaa päätä. Tässä työssä käyrän märkeä päätä on painotettu, koska sillä on merkitystä enemmän veden virtauksen kannalta. (Kuvat 3.6 ja 3.7) Kuivassa tilassa maan vedenjohtokyky on joka tapauksessa niin huono, että virhellä ei juuri laskennan kannalta ole merkitystä.

$$k(h) = k_0 e^{\alpha h} \quad (5.3)$$



Kuva 5.2. Hydraulisen johtavuuden riippuvuus painekorkeudesta

Maan painuman ja kutistumien laskenta

Kutistumisparametrit on määrätty mallissa kosteussuhteen ja huokossuhteen avulla. Kaavat on esitetty luvussa 2 kaavat (2.2) ja (2.3) Mallissa jokaiselle kerrokselle painekorkeuden arvo, hydraulinen johtavuus sekä matriisin tilavuus, jotka riippuvat kerroksen vesipitoisuudesta. Kutistumisparametrit esitetään taulukkona vesipitoisuuden funktiona(liite 10). Malli laskee vesipitoisuuden muutoksen aiheuttaman tilavuuden muutoksen kutistumisparametrien avulla. Tilavuuden muutos jaetaan sitten geometrisuuskertoimen (r_s) perusteella kerrospaksuuden muutokseen ja halkeamatilavuuden muutokseen. Kolmidimensionaalisille isotrooppisille kutistumille $r_s = 3$, yksidimensioiselle painumalle $r_s = 1$. Geometrisuustekijän arvo riippuu vesipitoisuudesta ja yläpuolisten maakerrosten paksuudesta. Useimmille hyvin kehittyneille maille geometrisuustekijän arvona käytetään arvoa 3. Kaavoissa (5.4) ja (5.5) on esitetty kutistumien laskenta.

$$\Delta z = z_1 - \left[\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{r_s}} \right] z_1 \quad (5.4)$$

$$\Delta V_{cr} = \Delta V - z_1^2 \Delta z \quad (5.5)$$

, joissa :

ΔV = maamatriisin tilavuuden muutos [m^3]

Δz = kutistumisesta aiheutuva kerrospaksuuden muutos [m]

ΔV_{cr} = halkeamien tilavuuden muutos [m^3]

V_1, V_2 = maakuution tilavuus kyllästyneessä tilassa ja kutistumisen jälkeen [m^3]

z_1 = kerrospaksuus kyllästystilassa [m]

r_s = geometrisuuskerroin

Vedenpidätyskäyrä annetaan taulukkona. Siinä on myös vastaavissa vesipitoisuuksissa kosteusuhde, huokossuhde ja kutistumien geometrisuuskerroin. Kosteussuhteen (v), huokossuhteen (e) ja tilavuudellisen vesipitoisuuden välillä tulee vallita seuraava riippuvuussuhde:

$$\theta = \frac{v}{(1+e)} \quad (5.6)$$

Mallin aika-askel

Malli laskee suurimman sallitun aika-askeleen. Aika-askeleen pituus riippuu hydraulisen johtavuuden käyrän määstä alueesta. Kriittinen arvo aika-askeleelle on Wind ja van Doornen (1975) mukaan seuraava:

$$\Delta t < \frac{\partial \theta}{\partial k} \left[\frac{e^{\alpha \Delta z} - 1}{e^{\alpha \Delta z} + 1} \right] \Delta z \quad (5.7)$$

5.2.2 Yläpinnan reunaehdot

Haihdunnan, sadannan ja imeynnän avulla määritetään vesitasetta pintakerroksessa. Vesitase maanpinnassa yhdellä aika-askeleella on siten:

$$S = (P - E) - R - V \quad (5.8)$$

,jossa

V = virtaus maanpinnan läpi: $V = V_{matir} + V_{crack}$ (m)

S = varastotilavuus pinnassa (m)

P = sadanta (m)

E = todellinen haihdunta (m)

R = pintavalunta (m)

Haihdunta

Haihduntaa tapahtuu ainoastaan profiilin päällimmäisestä kerroksesta. Malliin ei voi syöttää juuristokerroksen paksuutta. Malli sopii siten vain paljaalle maalle sekä lyhytjuuriselle kasvustolle. Kun pintakerros kuivuu, haihdunta pienenee yhtälön (5.9) mukaan.

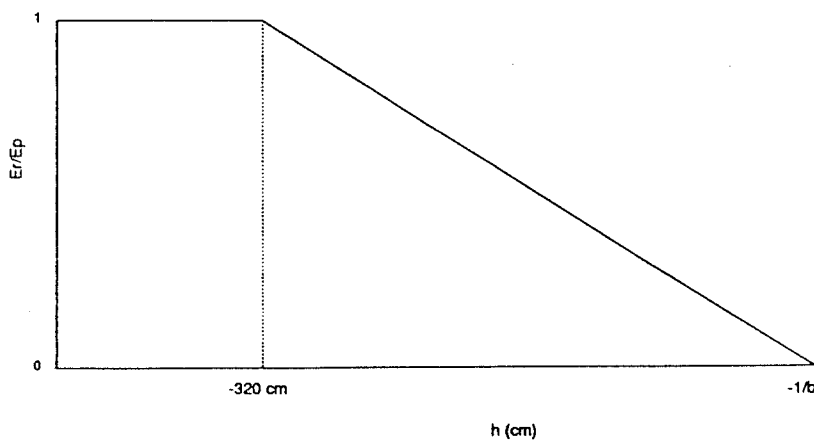
$$\text{kun } h > a \quad E_r = E_p$$

$$\text{kun } h < a \quad E_r = E_p \left(1 + \frac{h - a}{\frac{1}{b} + a} \right) \quad (5.9)$$

,jossa

- E_p = potentiaalinen haihdunta [cm/d]
- E_r = pienennetty haihdunta [cm/d]
- h = painekorkeus pintakerroksessa [cm]
- a = painekorkeus jossa $E_r = E_p$
- b = maalajiparametri [1/cm]. $1/b$ kuvaa painekorkeutta, jonka jälkeen pintakerroksesta ei enää haihtumalla poistu vettä.

Mallissa potentiaalista haihduntaa pienennetään pintakerroksessa vallitsevan painepotentiaalin mukaan lineaarisesti 320 cm painepotentiaalin arvosta 16000 cm imuun saakka, jolloin haihdunta mallissa lakkaa kokonaan. 320 cm painepotentiaalin arvoa pienemmillä imuilla haihdunta on mallissa potentiaalisella tasolla. 320 cm painepotentiaali on malliassa määrätty eikä sitä voi muuttaa. Suomessa raja-arvona on yleensä käytetty 500 cm painepotentiaalin arvoa. Kuvassa 5.3 on esitetty haihdunnan pieneminen painekorkeuden pienentyessä.



Kuva 5.3. Todellisen haihdunnan laskenta mallille lähtötietoina syötetystä potentiaalisesta haihdunnasta.

Pintavalunta

Pintavalunta on mahdollista kun halkeamia ei esiinny. Kun halkeamat ovat sulkeutuneet, pintavaluntaa syntyy tietyn suuruisen pintakerroksen vesivaraston ylityttyä. S_{max} on nk. lätköitymistekijä, joka määrää suurimman mahdollisen vesikerroksen paksuuden ennenkuin pintavaluntaa alkaa syntyä.

$$R = S - S_{max} \quad (5.10)$$

jossa

$$\begin{aligned} R &= \text{pintavalunta (cm)} \\ S &= \text{laskettu maanpinnassa oleva vesivarasto (cm)} \\ S_{max} &= \text{surin mahdollinen vesivarasto, joka maan pinnalle mahtuu (cm)} \end{aligned}$$

Imeytyminen maahan ja halkeamiin

Halkeilleessa maassa osa sateesta imeytyy maahan suoraan halkeamien kautta ja osa suoraan maamatriisiin. Pintakerroksen vesipitoisuudella on tietty raja-arvo, jonka jälkeen maa ei enää kykene imemään itseensä vettä ja syntyy pintavaluntaa. Halkeilleella maalla tätä voidaan soveltaa siten, että tietyn sateen ylittäessä suurimman imeytymisnopeuden vesi alkaa virrata halkeamien kautta, jolloin ei synny pintavaluntaa ennen halkeamien sulkeutumista. Lisäksi tietty määrä sateesta kulkeutuu aina halkeamien kautta.

$$\begin{aligned} - P < I_{max} : I &= A_m * P \\ I_c &= A_c * P \\ - P > I_{max} : I &= A_m * I_{max} \\ I_{c,1} &= A_m * (P - I_{max}) \\ I_{c,2} &= A_c * P \\ I_c &= I_{c,1} + I_{c,2} \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} P &= \text{sateen voimakkuus [m/s]} \\ I_{max} &= \text{maksimaalinen imeynnän taso [m/s]} \\ I &= \text{imeytyminen maahan [m/s]} \\ I_c &= \text{imeytyminen halkeamiin [m/s]} \\ A_m, A_c &= \text{halkeamien ja maapatjan suhteelliset alat} \\ I_{c,1} &= \text{maapatjaan enintään imeytyvä vesimäärä [m/s]} \\ I_{c,2} &= \text{sateen osa, joka imeytyy suoraan halkeamien kautta [m/s]} \end{aligned}$$

Kun maahan imeytyy vettä, maanpinnassa painekorkeus on nolla ja $K(h) = k_0$. Tässä tapauksessa I_{max} on suurin mahdollinen virtaama pinnan ja solmupisteen välillä. Virtaama lasketaan kaavan (5.3) mukaisesti.

5.2.3 Alapuoliset reunaehdot

Maaprofiilin pohjan reunaehdot on määritetty salaojavirtaamana ja virtaamana syvemmälle pohjavesivarastoon.

$$V_b = V_d + V_a \quad (5.12)$$

jossa

V_b = pohjakerroksesta tapahtuva virtaus (cm/d)

V_d = salaojavirtaus (cm/d)

V_a = virtaus pohjaveteen (cm/d)

Salaojavirtaama lasketaan seuraavasti:

$$V_d = \frac{1}{\frac{1}{k_0} + \frac{1}{Az_g}} \quad (5.13)$$

jossa

V_d = salaojavirtaus [cm/d]

A = salaojien kuivatustehokkuus [1/d]

K_0 = kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus [cm/d]

z_g = pohjaveden pinnan korkeus salaojien yläpuolella [cm]

Syntyvä salaojavalunta lasketaan salaojien kuivatustehokuuden avulla. Salaojavalunnan laskennassa ei voida ottaa huomioon halkeamien vaikutusta. Salaojien kuivatustehokkuus A on määritelty seuraavasti:

$$A = \frac{8 \cdot k_0 \cdot d}{L^2} \quad (5.14)$$

L = salaojaputkien välinen etäisyys [cm]

d = salaojien syvyys [cm]

k_0 = kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus [cm/d]

Virtaus kyllästymättömästä vyöhykkeestä pohjaveteen lasketaan seuraavasti:

$$V_b = -\bar{k} \left[\frac{h_n - h_g}{z_n - z_g} + 1 \right] \quad (5.15)$$

jossa

$\bar{k}$ = alimmaisen kyllästymättömän kerroksen ja vedellä kyllästyneen kerroksen kerroksen hydraulisten johtavuuksien keskiarvo [cm/d]

h_n, h_g = painekorkeudet pohjimmaisen kyllästymättömän kerroksen solmupisteessä ja pohjaveden pinnalla [cm]

z_n = alimmaisen kyllästymättömän solmupisteen ja salaojitustason välinen etäisyys [cm]

Jos virtaama pohjavesivarastoon on annettu mallille syöttötietona, z_g voidaan ratkaista yhdistämällä edelliset neljä yhtälöä.

$$-\bar{k} \left[\frac{h_n - h_g}{z_n - z_g} + 1 \right] = -\frac{1}{\frac{1}{k_0} + \frac{1}{Az_g}} + V_a \quad (5.16)$$

joka johtaa seuraavanlaiseen ratkaisuun:

$$b = t \left[\bar{k} \left(h_n + z_n - \frac{k_0}{A} \right) - k_0 z_n - \frac{k_0}{A} V_a + z_n V_a \right] \quad (5.17)$$

$$c = \frac{k_0}{A} t \left[\bar{k} (h_n + z_n) + z_n V_a \right] \quad (5.18)$$

$$t = \frac{1}{k_0 - \bar{k} - V_a} \quad (5.19)$$

$$A' = \frac{1}{A}$$

$$\text{Kun } t > 0 \quad z_g = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \quad (5.20)$$

$$\text{Kun } t \leq 0 \quad z_g = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \quad (5.21)$$

Kun V_a on tuntematon se voidaan laskea seuraavasti:

$$V_a = -k_0 \left[\frac{z_g + d - H_a}{z_g + d} \right] \quad (5.22)$$

jossa

H_a = painekorkeus syvän pohjaveden alueella [cm]

d = kuivatussyvyyden ja syvän pohjaveden pinnan etäisyys [cm]

Yhdistämällä yhtälöt (5.12-5.15) ja yhtälö (5.22) voidaan z_g ratkaista yhtälöstä (5.23):

$$-k \left[\frac{h_n - h_g}{z_n - z_g} + 1 \right] = -\frac{1}{\frac{1}{k_0} + \frac{1}{Az_g}} - k_0 \left[\frac{z_g + d - H_a}{z_g + d} \right] \quad (5.23)$$

Salaojituksen yläpuolella olevan pohjaveden pinta kerrostuneessa maaprofiilissa

Yhtälö (5.13) on voimassa vain silloin, kun mallinnettava profiili muodostuu ainoastaan yhdestä maalajista. Jos profiili jakautuu useampiin maalajeihin, joilla on erilaiset kyllästyneen tilan hydrauliset johtavuudet, on otettava huomioon vertikaalisuunnassa tapahtuvan virtauksen vastus kerrosten välillä. Tällöin yhtälö (5.13) saa seuraavan muodon:

$$z_g = -V_d \left[\frac{z_g}{k_0} + \frac{1}{A} \right] \quad (5.24)$$

Kaksikerroksisessa profiilissa, jossa salaojitus on alemmassa maakerroksessa ja pohjaveden pinta on päällimmäisen kerroksen syvyydellä, saa edellinen yhtälö seuraavan muodon:

$$z_g = -V_d \left[\frac{1}{A} + \frac{D}{k_{01}} + \frac{z_g - D}{k_{02}} \right] \quad (5.25)$$

tai toisin ilmaistuna

$$z_g = -V_d \left[A' + B + \frac{z_g}{k_{02}} \right] \quad (5.26)$$

$$B = \frac{D}{k_{01}} - \frac{D}{k_{02}} \quad \text{ja} \quad A' = \frac{1}{A} \quad (5.27)$$

, jossa

D = maalajin muuttumiskerroksen ja salaojitussyvyyden välinen etäisyys [cm].
 k_{01}, k_{02} = kyllästynyt hydraulinen johtavuus maalajikerroksessa 1 ja 2 [cm/d].

Ylläolevasta yhtälöstä saadaan salaojavirtaus V_d laskettua.

$$V_d = - \frac{z_g}{\frac{z_g}{k_{01}} + A' + B} \quad (5.28)$$

Pohjaveden pinta salaojitussyvyyden alapuolella

Jos pohjaveden pinta on kuivatussyvyyden alapuolella ei salaojissa tapahdu virtausta. Mallilla on mahdollista laskea myös virtausta niin kutsuttuun syvään pohjaveteen tai se voidaan antaa mallille valmiina syöttötietona. Tässä syvällä pohjavedellä tarkoitetaan vettäjohtamattoman kerroksen alapuolella olevaa pohjavesiesiintymää. Tällaisia esiintymiä ei Suomessa juuri esiinny, eikä tässä työssä ole käytetty virtausta syvään pohjaveteen. Kun V_a on annettu valmiina yhtälöt (5.12-5.15) yhdistämällä saadaan z_g :lle seuraava yhtälö:

$$z_g = \frac{V_a z_n + \bar{k} h_n + \bar{k} z_n}{V_a + \bar{k}} \quad (5.29)$$

Kun V_a on tuntematon voidaan se laskea kaavalla 5.30.

$$V_a = -k_0 \left[\frac{z'_g - H_a}{z'_g} \right] \quad (5.30)$$

, jossa

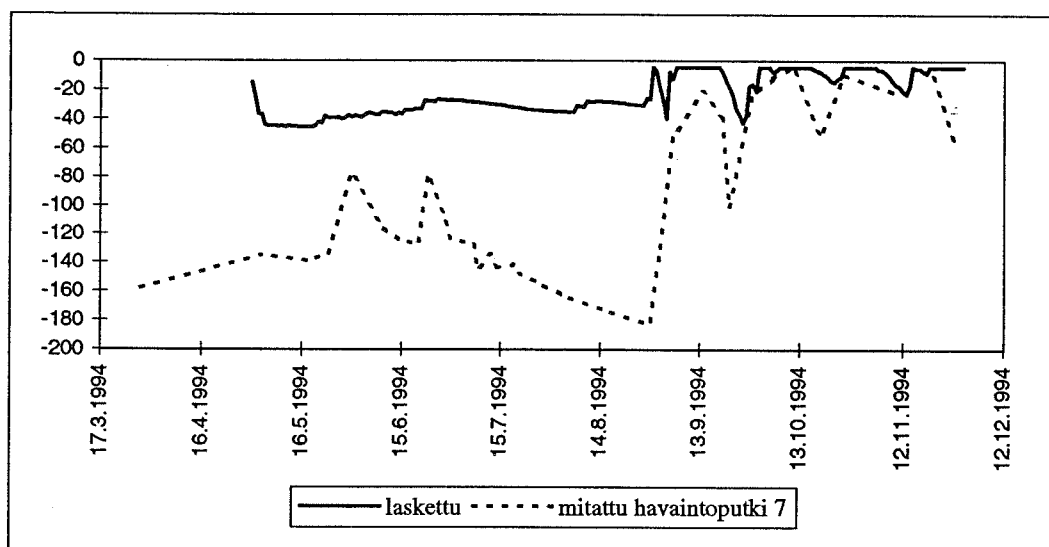
z'_g = pohjaveden pinnan korkeus syvän pohjaveden pinnan yläpuolella [cm].
 H_a = painekorkeus syvän pohjaveden pinnan tasolla [cm].

Yhtälöt (5.12-5.15) ja (5.30) yhdistämällä saadaan :

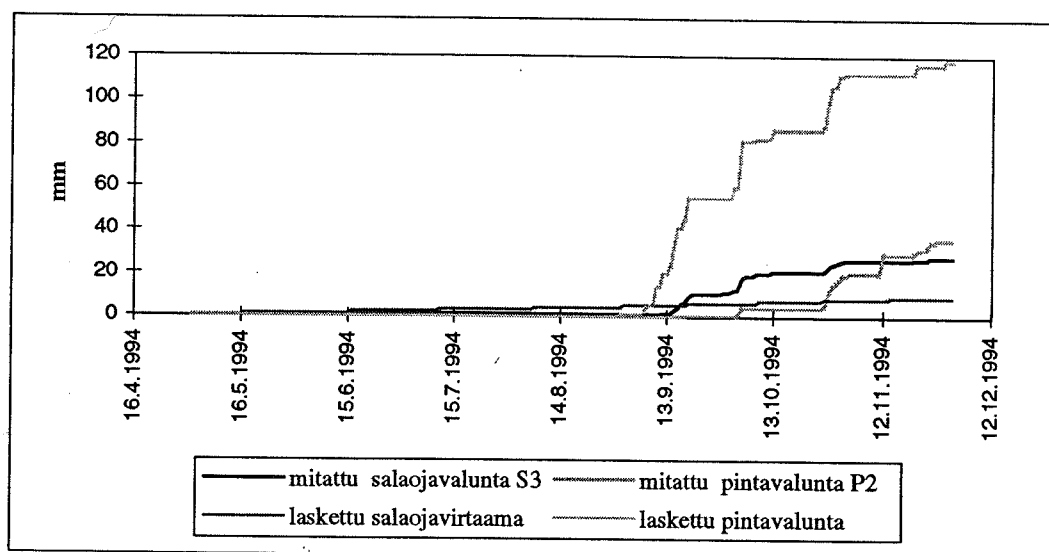
$$-\bar{k} \left[\frac{h_n - h_g}{z_n - z_g} + 1 \right] = -k_0 \left[\frac{z'_g - H_a}{z_g} \right] \quad (5.31)$$

5.3 Tulokset

Laskettu pohjavedenpinnan korkeus poikkeaa merkittävästi mitatusta. Se ei painu laskentajakson aikana 45 cm syvemmälle. Korkeusvaihtelut osuvat kuitenkin suunnilleen samoille ajankohdille kuin mitatut pinnan korkeus arvot. Pohjavedenpinnan syvyydet on esitetty kuvassa 5.4.

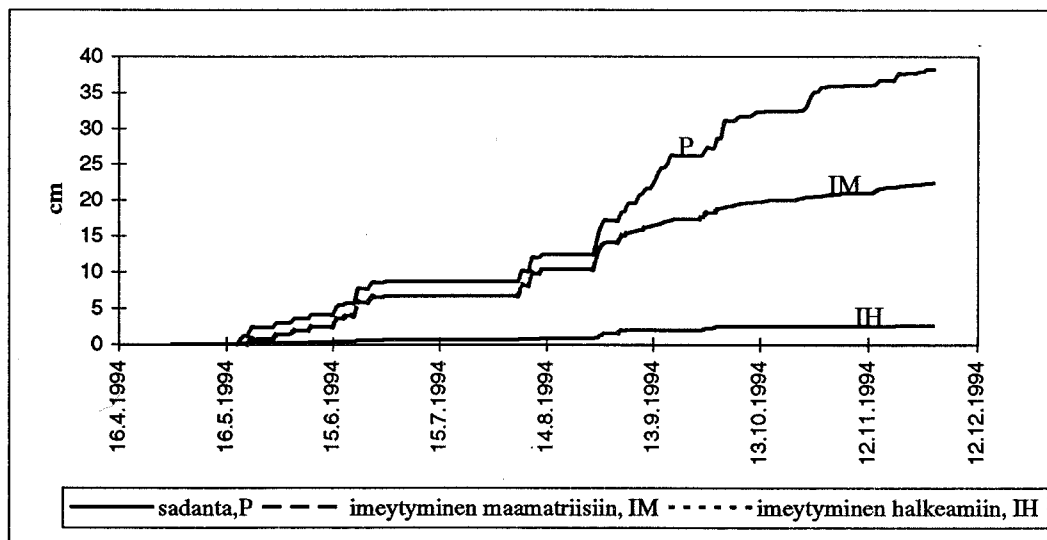


Kuva 5.4. Pohjavedenpinnan syvyys laskenta-aikana.



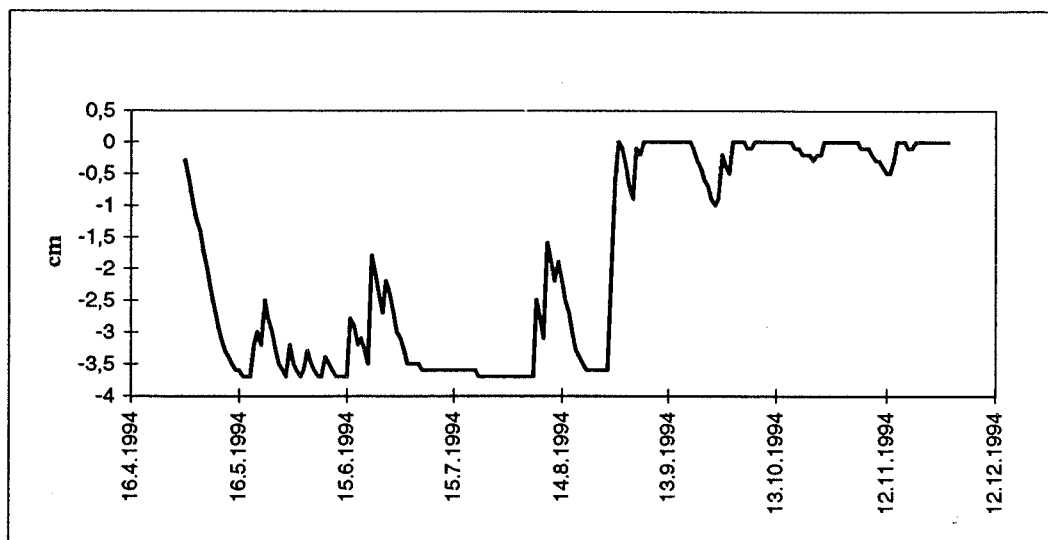
Kuva 5.5. Salaoja- ja pintavalunta 1.5.-30.11.1994 alkuperäisillä hydraulisen johtavuuden arvoilla.

Mitatuilla hydraulisen johtavuuden arvoilla tutkimusjakson aikana 1.5.-30.11.1994 laskettu kumulatiivinen salaojavirtaama oli 9 mm eli noin kolmasosa mitatusta salaojavirtaamasta. Salaojavirtaama oli tällöin tasainen porrasmainen, jossa ei näy sade- tai kuivajaksojen vaihteluita, eikä laskettu käyrä muistuta lainkaan mitattua salaojavaluntaa. Malli laskee samalle jaksolle pintavaluntaa noin 120 mm, joka on mitattuja pintavaluntoja noin kuusi kertaa suurempi. Pintavaluntaa alkaa syntyä heti syyskuun alun sateiden seurauksena, minkä jälkeen pintavaluntaa syntyy lähes jokaisen sadetapahtuman yhteydessä. Pintavalunta osui ensimmäistä pintavalunta tapahtumaa lukuunottamatta suunnilleen samalle ajankohdalle kuin pintavaluntaa on mitattu kentällä. Mitatut pintavalunnat olivat jokaisen sadetapahtuman yhteydessä pienempiä kuin mallin laskemat pintavalunnat. Pintavaluntojen kohdalla lasketun ja mitatun pintavalunnan käyrät olivat kuitenkin muodoltaan samanlaisia. Mallissa pohjaveden pinnan korkeudella ei ollut mitään vaikutusta pintavalunnan syntyyn, vaan siihen vaikutti ainoastaan sateen synnyttämät lätäköt. Mallin lätäköitymistekijän arvona on käytetty 2 mm. Pintavalunta on mahdollista silloin kuin kaikki halkeamat ovat sulkeutuneita. Lätäköitymistekijää kasvattamalla saadaan suurempi osa sadannasta imeytymään maahan ja pintavaluntaa lähestyy mitattuja arvoja.



Kuva 5.6. Imeytymisen jakautuminen matriisiin ja halkeamien kesken tutkimusjaksolla.

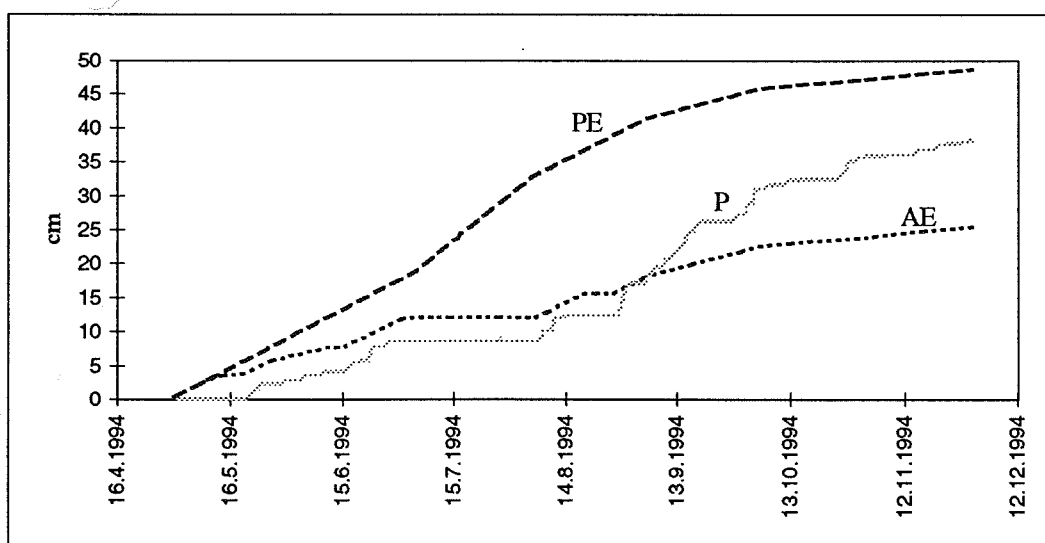
Imeyntä jakautuu halkeamien ja maamatriisin kesken suhteellisten pinta-alojen mukaan. Tutkimusjaksona laskettu imeyntä on noin 250 mm, josta 25 mm imeytyy maahan halkeamien kautta. Imeytynyt vesi siis lähinnä kasvattaa maavesivarastoa, koska salaojavirtaama on vain kolmaskymmenesosa imeynnästä. Koska salaojavirtaama syntyy vain salaojien kuivatustehokkuuden kautta ja kuivatustehokkuus riippuu ainoastaan hydraulisesta johtavuudesta, jää salaojavirtaama todellista pienemmäksi. Koska kyllästyneessä tilassa hydraulinen johtavuus on ainoastaan noin 0.2 cm/d, vain pieni osa imeytyneestä vedestä ehtii tutkimusjakson aikana salaojasyvyydelle asti aiheuttaen virtaamaa salaojissa.



Kuva 5.7. Vesimäärän muutos profilissa.

Vesipitoisuuden muutos maaprofilissa (0-300 cm) on esitetty kuvassa 5.7. Vesipitoisuuden muutos on annettu senttimetreinä laskennan alkutilasta. Maankosteuden muutoksesta tutkimusjakson aikana voidaan selkeästi havaita kuiva kesäkausi, jolloin vesipitoisuus oli lähes 40 mm pienempi kuin syksyllä, jolloin profiili oli jälleen lähes täysin kyllästynyt. Maankosteuksien muuttuminen mallinnusjaksolla on esitetty liitteessä 11 ja mitatut maankosteudet on esitetty liitteessä 6.

Haihdunta jää todellista pienemmäksi kuivan heinäkuun aikana, jolloin malli ei laske juuri ollenkaan haihduntaa, kun pintakerros on kuivunut lähes lakastumisrajalle saakka. Todellisuudessa pellolla ollut kasvusto pystyi silloinkin haihduttamaan vettä ottamalla sen kuivuneen pintakerroksen alapuolelta. Muina ajankohtina mallin laskema haihdunta on likimain todellisella tasolla.

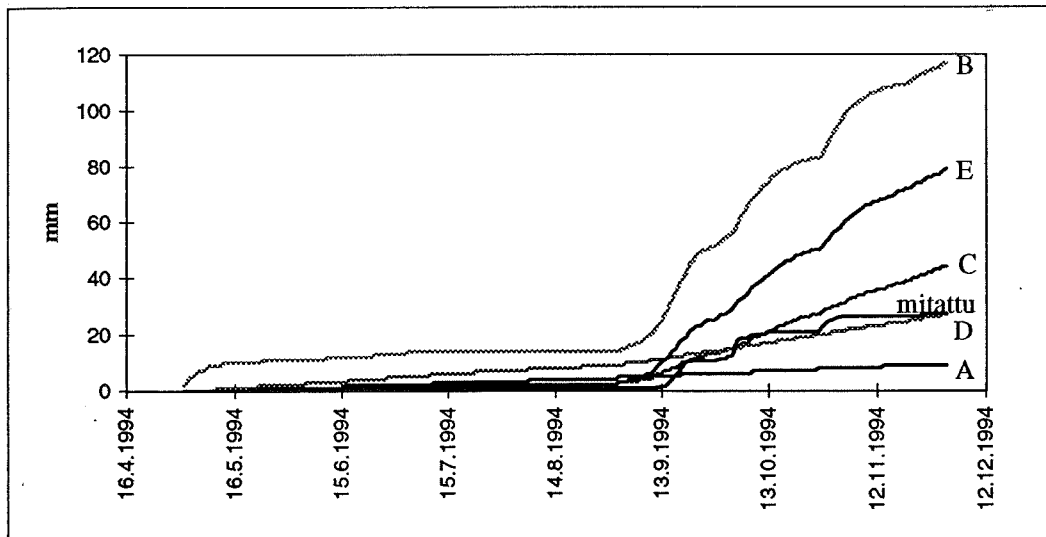


Kuva 5.8. Potentiaalinen (PE)ja mallin laskema todellinen haihdunta (AE) ja sadanta (P).

Halkeamia ei ole kentällä arvioitu, joten laskettuja tuloksia ei voi verrata todellisiin arvoihin. Hydraulisen johtavuuden arvoilla 0.36 cm/d pintamaassa ja 0.2 cm/d pohjamaassa laskettaessa halkeamat ulottuvat syvimmillään noin 50 cm syvyydelle saakka heinäkuun loppuun. Silloin kerrokset olivat enimmillään kutistuneet 4.1 %. Syksyllä halkeamat ovat ensimmäisen kerran kaikki ummessa elokuun lopussa, jonka jälkeen alkaa sateiden vaikutuksesta syntyä myös pintavaluntaa. Liitteessä 12 on esitetty mallin laskemat halkeamatilavuudet eri kerroksissa. Silmämääräisesti halkeamia oli kuitenkin vielä havaittavissa pellolla aina syyskuun alkupäiviin saakka, jonka jälkeen kyntö aloitettiin 15.9. 1994. Kyntö rikkoi pellon pinnan ja vielä jäljellä olleet halkeamat katosivat. Tämän jälkeen ei halkeamia pellolla havaittu, mutta malli laskee vielä muutamien kuivempien jaksojen päiville muutaman kymmenen sentimetrin syvyisiä halkeamia. Mallissa halkeamia syntyy heti kun kerroksen vesipitoisuus on alhaisempi kuin kyllästyspitoisuus, joten halkeamia syntyy myös syksyllä sadejaksojen välillä maan ollessa hyvinkin märkää.

5.4 Parametrien herkkyysanalyysi

Mittausten perusteella saatujen parametriarvojen lisäksi mallia kokeiltiin 5, 10, 25 ja 50 kertaisia arvoja alkuperäisiin arvoihin verrattuna. Lisäksi mallia ajettiin uudella säätiedostolla, jossa varsinaisen säätiedoston alkuun lisättiin ylimääräisiä sateettomia päiviä, jolloin ei ollut ollenkaan haihduntaa. Täten saatiin pohjavedenpinta laskemaan lähelle mitattuja arvoja laskennan alussa. Tämän seurauksena myös salaojavirtaaman alkamisajankohta sattuu samaan aikaan mitattujen salaojavirtaamien kanssa.



A: $K = K(h)$ ja kuivatustehokkuus alkuperäinen.

B: $K = 10x K(h)$ ja $5x$ kuivatustehokkuus.

C: $K = 10x K(h)$.

D: $K = 5x K(h)$.

E: $K = 10 \times K(h)$ ja $2.5x$ kuivatustehokkuus.

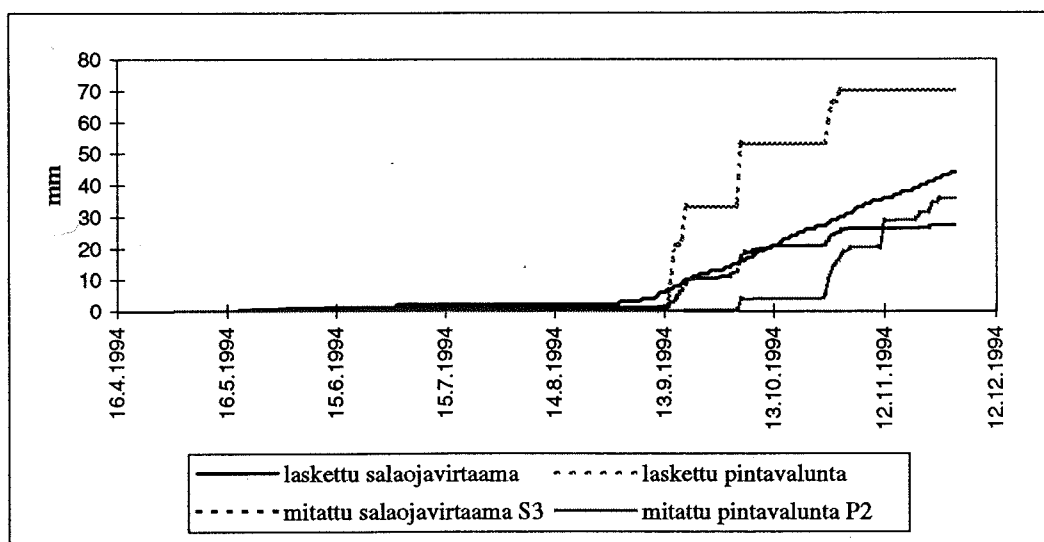
Kuva 5.9. Salaojavalunta eri hydraulisten johtavuuksien ja kuivatustehokkuuksien arvoilla.

Viisinkertaisilla hydraulisen johtavuuden ja kuivatustehokkuuden arvoilla päästiin likimain yhtäsuureen kumulatiiviseen salaojavirtaamaan kuin kentällä on mitattu. Pintavalunta oli näillä arvoilla nelinkertainen mitattuun pintavaluntaan verrattuna ja pohjaveden pinta ei laskenut alimmillaan kuin noin 75 cm syvyydelle. Näillä parametriarvoilla salaojavirtaamaa syntyi jatkuvasti pohjavedenpinnan ollessa kokoajan salaojitussyvyyden yläpuolella. Haihdunta lakkaa heinäkuussa kokonaan pintakerroksen kuivuttua lähes täysin ja hydraulisen

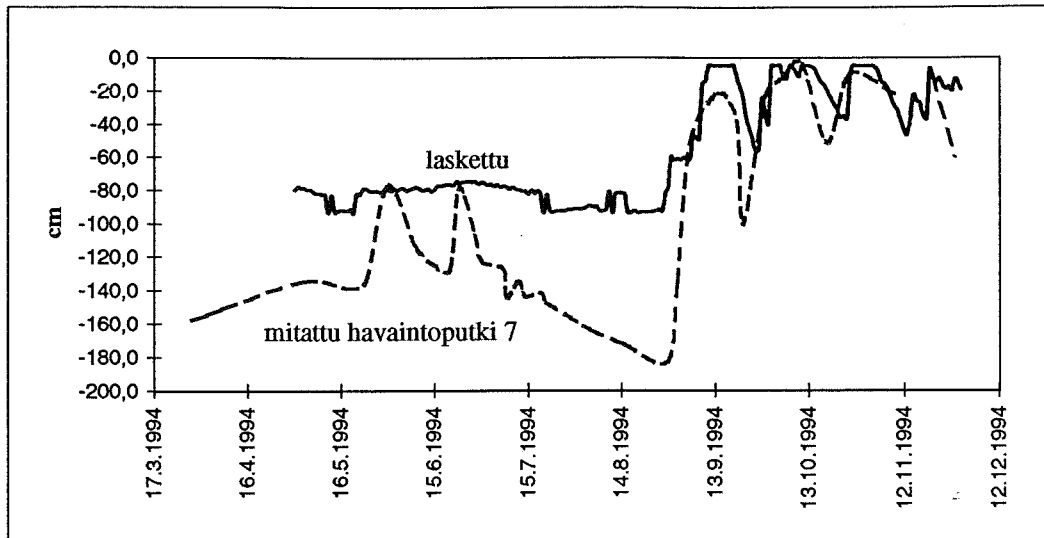
johtavuuden arvojen ollessa niin pieniä, että alemmista maakerroksista ei pääse kulkeutumaan korvaavaa kosteutta tilalle. Pienen hydraulisen johtavuuden takia laskettu pintavalunta on mitattua huomattavasti suurempaa. Tämä johtuu siitä, että mallissa imeytyminen tapahtuu lähinnä maamatriisiin ja halkeamat ovat lähesmerkityksettömiä sadannan osuessa ajalle, jolloin halkeamia ei ole.

Kun kasvatetaan kuivatustehokkuuden arvoa alkuperäisestä kymmenkertaiseksi ja pidetään muut parametriarvot alkuperäisinä, kasvaa laskettu salaojavirtaama lähes kaksinkertaiseksi verrattuna mitattuun. Tämä tarkoittaisi alkuperäisen noin 14 m ojavälin tihentämistä 10 metriin. Näillä arvoilla lasketun salaojavirtaaman ajoittuminen verrattuna todelliseen on edelleen huono, koska salaojissa tapahtuu virtausta koko simulointijakson ajan. Pohjavedenpinnankorkeudet olivat näillä parametreilla edellisten luokkaa, matalimmillaan pohjavesi on noin 80 cm syvyydessä. Tällöin käytettiin 240 ylimääräistä sateetonta ja nolalahaihduntaista päivää, jolla päästään pohjaveden pinnassa 80 cm tasolle, joka toukokuun alussa kentällä on mitattu.

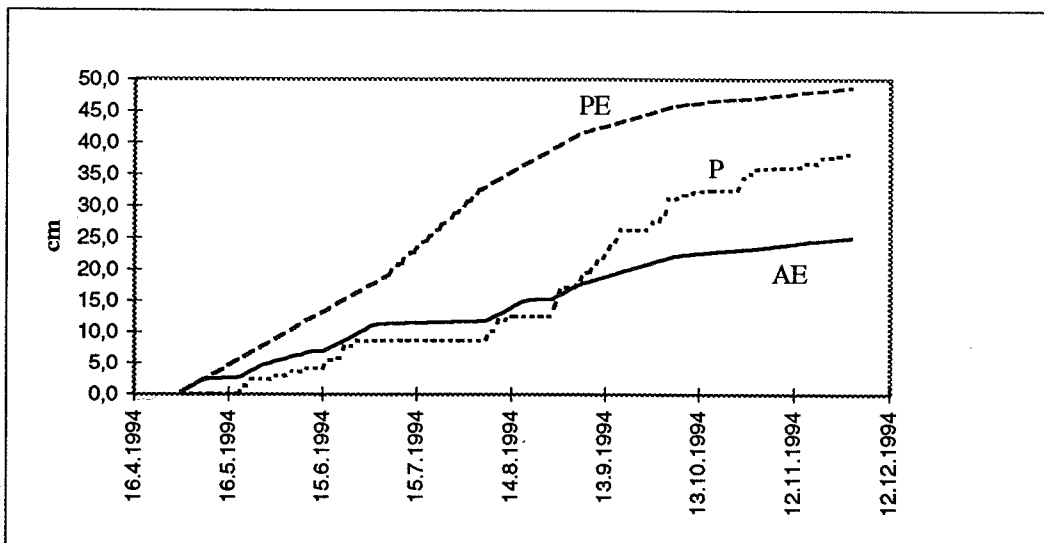
Kun hydraulisen johtavuuden arvo kasvatettiin kymmenkertaiseksi ja lisättiin simuloinnin alkuun 120 lisäpäivää, saatiin salaojavirtaama alkamaan likimäärin samaan aikaan, kun kentällä on mitattu. Laskettu salaojavirtaama kasvoi 45 mm:iin, joka on noin 20 mm suurempi kuin mitattu virtaama. Näillä parametreilla pohjaveden pinta laski ajoittain salaojitusvyöhyteen 95 cm heinäkuun lopulla. Samana aikana pohjaveden pinta putkessa 7 oli noin 180 cm syvyydellä. Kuvissa 5.13-5.16 ja liitteissä 11 ja 12 on esitetty kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla laskettu vesitase, maankosteudet ja halkeamatilavuudet.



Kuva 5.10. Salaoja- ja pintavalunta kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla.



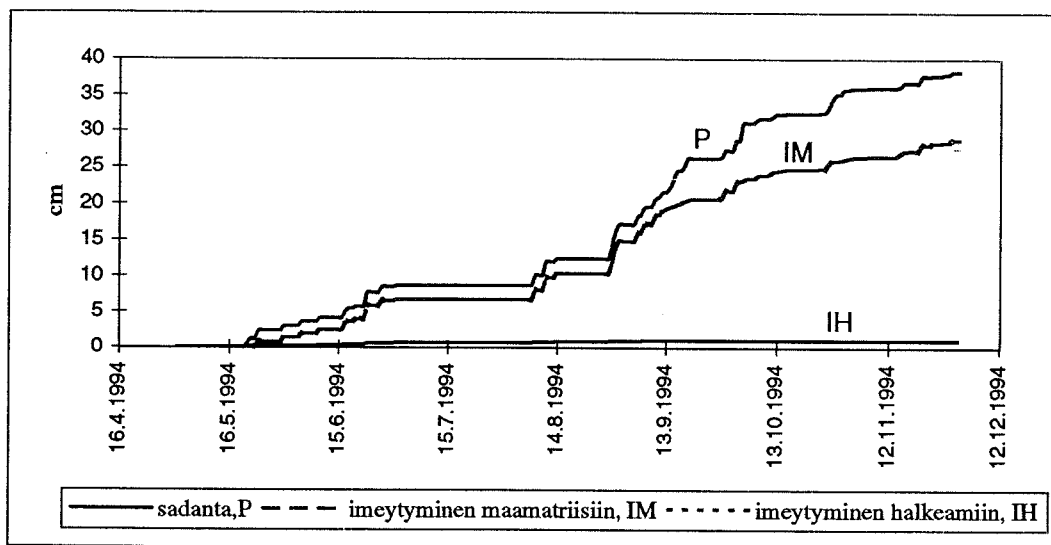
Kuva 5.11. Pohjaveden syvyys kymmenenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla.



Kuva 5.12. Haihdunta kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla. Potentiaalinen- (PE) ja mallin laskema todellinen haihdunta (AE) ja sadanta (P).

Käyttämällä kymmenkertaisia hydraulisen johtavuuden arvoja ja nostamalla kuivatustehokkuus 2.5 kertaiseksi kasvoi salaojavirtaama tutkimusjaksona lähelle 80 mm. Lasketut salaojavirtaamat eri sadetapahtumien yhteydessä alkoivat näillä parametriarvoilla suunnitteen samaan aikaan kuin kentällä mitattiin ja virtaamatapahtumat alkoivat erottua toisistaan. Näillä arvoilla virtaamatapahtumat jatkuvat kuitenkin hyvin paljon kauemmin sadetapahtuman jälkeen kuin mitattu salaojavirtaama. Kuivatustehokkuuden kasvatettiin alkupe-
räisestä arvosta 2.5- kertaiseksi hydrauliseen johtavuuteen verrattuna, joka tarkoittaa las-

kennallisen ojavälin pienentämistä alkuperäisestä neljästätoista metristä noin yhdeksään metriin. Näillä arvoilla pohjavesi ei laske salaojasyvyyttä syvemmälle, mutta muutokset pinnankorkeuksissa olivat kuitenkin huomattavasti nopeampia ja suurempia kuin pienemmillä hydraulisen johtavuuden ja kuivatustehokkuuden arvoilla. Kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden ja 2.5- kertaisella kuivatustehokkuuden arvoilla pintavalunta on laskenut noin 30 mm:iin, joka on noin 10 mm:iin vähemmän kun kentällä padolla P2 on mitattu. Haihduntaan hydraulisen johtavuuden kasvattaminen ei vielä tässä vaiheessa vaikuta, vaan sateettomana aikana pintakerrokseen muodostuu haihdunnan estävä kuivakuorikerros.



Kuva 5.13. Imeytymisen jakautuminen halkeamien ja maamatriisin kesken kymmenkertaisilla hydraulisen johtavuuden arvoilla.

Tapauksessa, jossa kuivatustehokkuus on 50- kertainen ja hydraulinen johtavuus kymmenkertainen alkuperäisiin arvoihin verrattuna, kasvaa salaojavalunta lähelle 120 mm. Tämä parametriarvojen yhdistelmä vastaa noin kuuden metrin ojaväliä. Pintavalunta pienenee näillä arvoilla noin 25 mm:iin, joka on huomattavasti mitattuja pintavalunnan määriä vähäisempi. Viisikymmenkertaisella kuivatustehokkuuden arvolla saadaan salaojavirtaaman kumulatiivinen käyrä muistuttamaan mitatun salaojavirtaaman kumulatiivista porrasmaista käyrä, jossa sadetapahtumien välillä virtaus salaojissa lakkaa kuivempina kausina. Tällöin salaojista virtaa kuitenkin vettä yli 100 mm, joka on noin kolminkertainen mitattuun salaojavirtaamaan verrattuna. Suuremmilla hydraulisen johtavuuden ja kuivatustehokkuuden arvoilla malli ei enää toimi, koska hydraulisen johtavuuden aiheutamat kosteusmuutokset menevät syötetyn pF-käyrän kosteuksien ulkopuolelle.

5.5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Sjökullan mittausaineistoon sovellettu FLOCR-malli ei laske mitatuilla hydraulisen johtavuuden arvoilla syntyvää salaoja- ja pintavalunnan määrää ja haihduntaa todellisuutta vastaavasti. Hydraulista johtavuutta ja kuivatustehokkuutta kasvattamalla saadaan salaoja- ja pintavalunnan määrät lähestymään mitattuja arvoja. Paras sovitus saatiin, kun käytettiin kymmenkertaista hydraulisen johtavuuden arvoa mitattuun verrattuna. Ojaväli voitiin tällöin säilyttää alkuperäisenä. Virtaamatapahtumien ajoittuminen mittausten kanssa samoihin aikoihin vaatii hydraulisen johtavuuden kasvattamisen kymmenkertaiseksi ja laskennallisen ojavälin tiivistämisen kuuteen metriin alkuperäisestä 14 metristä, koska hydraulisen johtavuuden kasvattaminen kymmenkertaista suurempiin arvoihin ei pF-käyrän takia onnistu.

Pohjaveden pinnankorkeutta alkutilassa ei voi muuttaa, vaan malli olettaa sen olevan maanpinnan tasossa laskennan alussa. Tämän vuoksi simulointijakson alussa tapahtuu salaojavaluntaa, vaikka sadantaa ei esiinny. Ongelma yritettiin ratkaista siten, että meteorologisten suureiden syöttötiedostossa oli varsinaisen aineiston alkuun asetettu lisäpäiviä, jolloin ei ollut haihduntaa eikä sadantaa. Tällöin pohjaveden pinta on saatu laskettua lähelle todellista pohjaveden pinnankorkeutta tkoealueella tutkimusjakson alkaessa. Lisäpäivien asettaminen laskennan alkuun aiheutti kuitenkin sen, että pohjaveden pinta ei enää pudonnut yhtä alhaalle kuin laskentakierroksella, jossa lisäpäiviä ei käytetty. Tämä saattaa johtua mallin ominaisuudesta synnyttää halkeamia heti, kun kosteus maassa laskee kyllästyskosteuden alapuolelle.

Salaojavirtaama syntyy mallissa ainoastaan salaojien kuivatustehokkuuden kautta, jolloin halkeamien vaikutusta salaojavalumien syntymiseen ei voida huomioida. Mallin laskema salaojavirtaama on tämän takia aivan liian pieni eikä se osu ajankohtiin, jolloin salaojissa on kentällä mitattu virtaamaa. Jotta laskettu salaojavirtaama saadaan lähestymään todellista, on hydraulisen johtavuuden arvoja kerrottava kymmenellä.

Hydraulisen johtavuuden suuruus on riippuvainen mittausmenetelmästä. Käytetty laboratoriomenetelmä mittaa hyvin näytesylinterin hydraulisen johtavuuden, mutta saatu hydraulinen johtavuus poikkeaa luonnontilaisen maan arvosta todennäköisesti hyvinkin merkittävästi. Näytteenotossa näyte varovaisuudesta huolimatta saattaa tiivistyä ja samalla muutoinkin häiriintyä. Useissa tutkimuksissa on havaittu kenttämittausten antavan suurempia hydraulisen johtavuuden arvoja kuin laboratoriomittaukset. Luonnossa pellon hydraulisiin ominaisuuksiin vaikuttavat maaperän eliöstö, viljelytoimenpiteet, vuodenaika ja pellon kosteusolot. Näitä vaikutuksia ei laboratorioon tuodussa näytteessä enää ole. Lisäksi on todettu hydraulisen johtavuuden olevan suurempi kuivassa näytteessä kuin kyllästyneessä näytteessä (Leeds-Harrison et al., 1986). Mallilaskennassa käytetään perinteistä oletusta hydraulisen johtavuuden muuttumisesta kosteuden funktiona pienemmäksi maan kuivuessa. Näiden perusteella on mitattuja hydraulisen johtavuuden arvoja muutettu ja kokeiltu mallin toimivuutta muutetuilla arvoilla.

Laskettu haihdunta jäi todellista pienemmäksi kautena, jolloin pellolla oli kasvustoa, joka juurien avulla pystyi ottamaan vettä myös pintakerroksen alapuolisista kerroksista. Haihdunnan laskennan takia mallia ei periaatteessa voida soveltaa kuin paljaille ja lyhytjuurisia kasveja kasvaville maille. Koska mallissa haihdunta tapahtuu ainoastaan pintakerroksesta ja hydraulisen johtavuuden arvot ovat hyvin pieniä, pintakerroksen alapuolella olevat

kerrokset kuivuivat hyvin hitaasti. Haihdunnan laskentatavasta johtuen pintakerros kuivuu kokonaan heinäkuussa ja haihdunta lakkaa, jolloin laskettu haihdunta jää todellista pienemmäksi. Maaperän kuivumiseen vaikuttaa lisäksi kuivan pintakerroksen ja sen alapuolisen hyvin määrän kerroksen välille syntyvä lähes vettä johtamaton kerros, jolloin kyllästyneistä kerroksista siirtyy vain vähän vettä ylempiin maakerroksiin. Tämä vaikuttaa myös syntyneiden halkeamien määrään ja syvyyteen, joten näillä perusteilla voidaan olettaa halkeamien todellisuudessa olevan laskettuja syvempiä ja suurempia. Imeynnän jakautuminen matriisiin ja halkeamien kesken puoltaa myös lasketun halkeamatilavuuden olevan pienempi kuin todellisuudessa, koska suurin osa imeytyvästä vedestä mallissa kulkee matriisin kautta. Kentällä tehtyjen mittausten perusteella voidaan olettaa, että savimaassa suurin osa vedestä kulkeutuu salaojiin ja syvemmälle pohjaveteen makrohuokosten ja halkeamien kautta oikovirtauksena.

Halkeamien ja makrohuokosten vaikutus savipelloilla veden virtaukseen on merkittävää saven pienen hydraulisen johtavuuden takia. Käytännössä suurin osa salaojavalmista kulkeutuu salaojiin jotakin muuta kautta kuin maamatriisin läpi Richardsin yhtälön mukaisesti. Tämä voidaan havaita sadetapahtuman ja virtaamatapahtuman välisestä lyhyestä viipeestä kentällä tehdyissä intensiivisissä mittauksissa. Halkeamien syntyminen riippuu maan kuivumiskutistumisen voimakkuudesta ja kuivan ajan kestosta. Pitkän kuivan kauden jälkeen halkeamat säilyvät hyvinkin kauan, jos peltoon ei kohdistu sen rakennetta muuttavia toimintoja kuten kyntämistä tai kylvöä. Mallilaskelmista voidaan havaita halkeamien ulottuvan aina pohjavedenpinnan tasolle asti. Lasketun pohjaveden pinnan ollessa aina mitattua selkeästi korkeammalla voidaan olettaa halkeamia olevan pellolla huomattavasti enemmän kuin malli laskee. Kyntö rikkoo pellonpinnan noin 15 cm syvyydelle saakka, jolloin siinä olevat halkeamat sulkeutuvat. Pellon pintakerros muuttuu kuohkeaksi ja vettä hyvin johtavaksi, tämän jälkeen tilanne alkaa vähitellen muuttua pienemmän hydraulisen johtavuuden suuntaan maan tiivistyessä sateiden vaikutuksesta. Kyntö- ja kylvötoimenpiteitä ei mallissa voida ottaa huomioon, joten laskettujen tulosten ei voidakkaan olettaa täysin vastaavan mitattuja arvoja.

Halkeamien kautta imeytyy mallissa vain vähän alle 10 % kokonaisimeyynnästä. Tämä on osoitus mallin sopimattomuudesta normaaliviljelyksessä olevan pellon vesitaseen laskentaan. Halkeamavirtauksen pienuuteen vaikuttavat myös mallinnusjakson sääolosuhteet. Hyvin kuivan kesän jälkeen tuli sateinen syksy, jolloin pohjavesi kohosi nopeasti ja halkeamat sulkeutuivat nopeasti. Tällöin halkeamien kautta imeytyvä vesi jäi vähäiseksi todelliseen verrattuna, koska käytännössä halkeamat kyntökerroksen alapuolella saattavat säilyä ympäri vuoden.

Jotta malli vastaisi koeolosuhteita paremmin, malliin kannattaisi lisätä kasvipeite. Tämä mahdollistaisi haihtumisen myös ohuen pintakerroksen alapuolelta, jolloin mallia olisi järkevämpi käyttää viljelyksessä olevan pellon vesitaseen mallinnuksessa. Samalla mallin kannattaisi lisätä osa, joka laskee oikovirtauksia ja mahdollistaa veden kulkeutumisen suoraan halkeamien kautta salaojiin ilman, että sen ensin täytyy imeytyä maamatriisiin. Pohjaveden pinnan alentumista sateettomina jaksoina edistäisi haihdunnan virheen korjaaminen, jolloin maanpinnalle ei syntyisi täysinkuivaa haihdunnan estävää kuorikerrosta. Näiden muutosten jälkeen mallista saataisiin käyttökelpoinen työkalu halkeilun vaikutuksen ravinteiden ja torjunta-aineiden huuhtoutumisen tutkimiseen.

6. YHTEENVETO

Sjökullan koekentällä normaaliviljelyksessä olevalla pellolla tutkittiin salaoja- ja pintavalunnan määrää ja laatua. Tutkimuksessa keskityttiin jakson 1.6.1994-31.5.1995 valunnan tutkimiseen. Koekentällä mitattiin valuntaa salaojissa ja pintavaluntapadoilla sekä sadantaa ja haihduntaan vaikuttavia suureita 15 minuutin välein automaattisilla mittausantureilla ja mittareilla. Lisäksi valumavesistä kerättiin vesinäytteitä käsin ja automaattisesti ravinteiden ja kiintoaineksen huuhtoutumisen määrittämiseksi. Vesinäytteiden lisäksi pellolta otettiin useita näytteitä maaperäominaisuuksien kuten rakeisuuden, vedenpidätyskyvyn, hydraulisen johtavuuden ja saven kutistumisominaisuuksien määrittämiseksi.

Kesästä kevääseen ajoittuvalla tutkimusjaksolla pintavaluntaa syntyi 120 mm/ha ja salaojavaluntaa 71 mm/ha. Jakson sademäärä oli 725 mm. Jaksolla lokakuu 1994 ja toukokuu 1995 olivat poikkeuksellisen sateisia. Pintavalunta painottui tutkimusjaksolla lokamarraskuulle 1994 ja maaliskuulle 1995. Salaojavalunta painottui syys-lokakuulle 1994 ja huhti-toukokuulle 1995. Näinä aikoina syntyi 85 % salaojavalunnasta ja 93 % pintavalunnasta. Tutkimusjaksolla salaojista huuhtoutui 12.3 kg/ha/a tyypeä ja pintavalunnan mukana 2.6 kg/ha/a tyypeä. Salaojien typpikuormitus painottui voimakkaasti lannoituksen jälkeiseen ajankohtaan toukokuulle. Pintavalunnan aiheuttama typpikuormitus sen sijaan jakautui tasaisesti. Fosfori- ja kiintoainehuuhtoumat painottuivat lokakuulle 1994. Salaojien fosforihuuhtouma oli 1.9 kg/ha/a ja kiintoaineshuuhtouma 563 kg/ha/a. Pintavalunnan fosforihuuhtouma oli 2.6 kg/ha/a ja kiintoaineshuuhtouma 931 kg/ha/a. Tutkimusjaksolle sattui kaksi lannoituskertaa, minkä vuoksi vuosihuuhtouma-arvot eivät ole vertailukelpoisia muiden tutkimustulosten kanssa.

Intensiivisen näytteenoton sarjojen perusteella tutkittiin salaojavalunnan ravinnepitoisuusvaihteluja yksittäisen virtaamatapahtuman aikana. Ravinnepitoisuuksien todettiin olevan virtaamasta riippuvaisia 20 l/min virtaamaraja-arvon jälkeen. Näytteenottotiheys on siten voimakkaasti riippuvainen virtaamasta. Näytteenottotiheyden määrää nopeimmin muuttuva vedenlaatuparametri ja muita parametreja ei mitata jokaisesta näytteestä. Tilastollisten menetelmien ja virtaaman ja pitoisuuksien välisen riippuvuuden perusteella kolmen tai neljän tunnin näytteenottoväli salaojavirtaamien lyhytaikaisten pitoisuusvaihteluiden tutkimiseksi on sopiva.

Mallilaskelmissa käytettiin FLOCR maavesimallia, jolla vesitasetta laskettiin Sjökullan koekentälle. FLOCR-malli laskee kuivumiskutistumien seurauksena syntyvät halkeamat ja painumat. Halkeamat voivat kasvattaa imeytyvän veden määrää kasvattamalla pintakerroksen imeytymispinta-alaa. Veden virtausta mallissa lasketaan Richardsin yhtälön perusteella.

Mallilla lasketut tulokset, joissa hydrauliset parametrit estimoitiin mittausaineistosta, poikkeavat kentällä mitatuista arvoista voimakkaasti. Mallin hydraulista johtavuutta kasvattamalla päästään lähemmäksi mitattuja arvoja. Parhaiten mallin laskemat tulokset kuvaavat mittauksia, kun hydraulinen johtavuus kerrotaan kymmenellä. Mallissa ei voida ottaa huomioon hydraulisten ominaisuuksien muuttumista viljelystoimenpiteiden seurauksena, jotka aiheuttavat merkittäviä muutoksia veden imeytymiseen maaperään. Pellon kaltevuus, jota profiilimallissa ei ole otettu huomioon, aiheuttaa valunnan laskentaan virhettä.

Mallin suurin puutos on haihdunnan laskennassa, jossa ei oteta huomioon kasvuston vaikutusta. Kasvusto kykenee ottamaan haihduttamansa veden juurien avulla myös pintakerrosta syvemmällä olevista maakerroksista. Tällöin mallin laskema haihdunta jää todellista pienemmäksi aiheuttaen virhettä pohjaveden pinnan korkeuteen ja syntyvään salaojavalunnan määrään. Toinen merkittävä mallin heikkous on salaojavirtaaman laskennan rajaaminen ainoastaan maamatriisin osalle jättämällä halkeamat huomioimatta. Niillä on kuitenkin huomattava osuus myös itse salaojavirtaaman synnyssä. Näitä seikkoja korjaamalla malli kuvaaisi paremmin viljelyksessä olevaa peltoa.

Mallin soveltamisen tarkoituksena oli ravinnehuuhtoumien laskeminen kuivumisen seurauksena halkeilevilla viljelysmailla. Kun vesitastetta ei mallissa saatu toimimaan, mallin käyttö ravinteiden kulkeutumisen kuvauksessa ei ole perusteltua. Malli kuvaa tarkasti kuivumiskutistumisen. Sen lisäksi vaaditaan kasvusto ja halkeamien huomioiminen salaojavirtaaman laskennassa, jotta malli toimisi viljelyksessä olevalla peltoalueella.

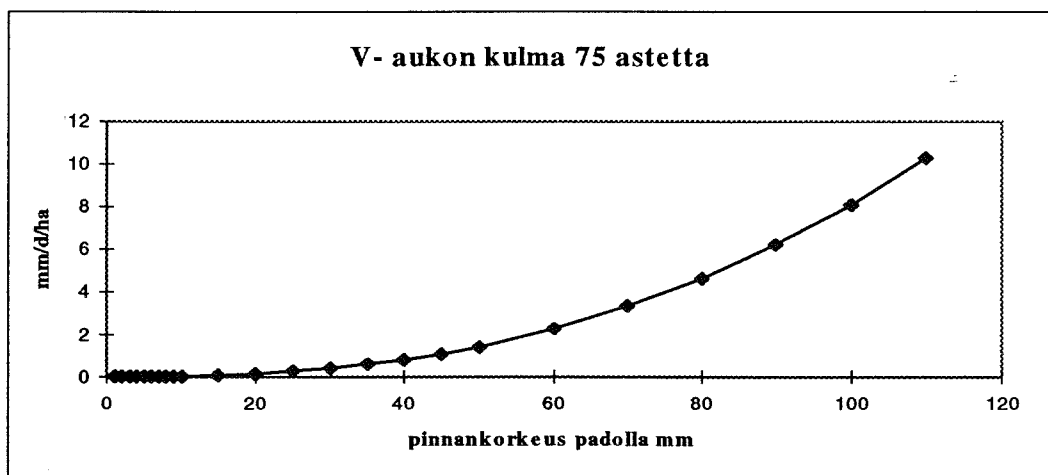
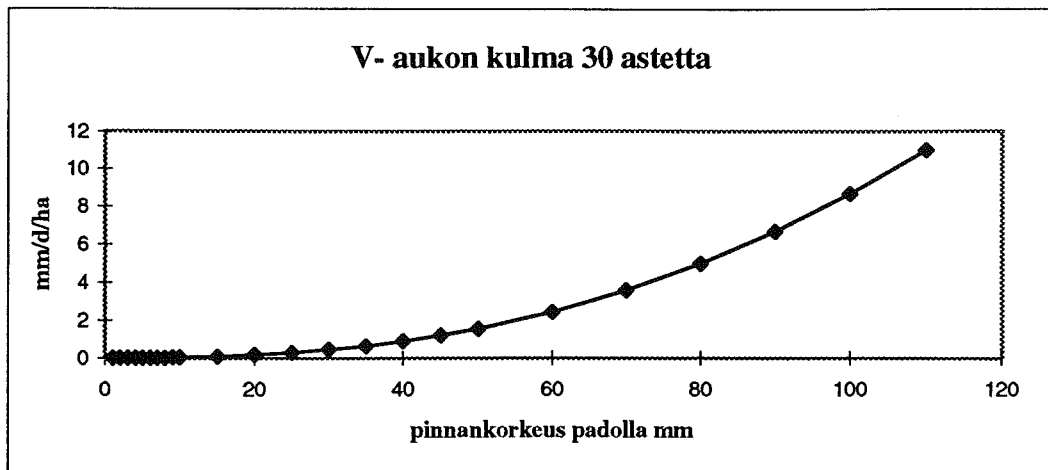
7. KIRJALLISUUS

- Ahuja, L. R., Naney, J. W., Green, R. E. & Nielsen, D. R. 1984. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society America Journal*, vol. 48(4): Pp. 699- 702.
- Asuja, L. R. & Williams, R. D. 1991. Scaling water characteristic and hydraulic conductivity based on Gregson- Hector- McGowan approach. *Soil Science Society America Journal*, vol 55. Pp. 308-319.
- Balke, G.R. 1965. Bulk density. In: Black, C.A. (Edit.) 1965 Methods of soil analysis: Pp. 374-390.
- Balke, G.R. 1965. Particle density. In: Black, C.A. (Edit.) 1965 Methods of soil analysis. Pp. 371-375.
- Beven, K. & Germann, P. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, vol. 18(5). Pp. 1311-1325.
- Beven, K. 1981. Micro,-meso,-macroporosity and channeling flow phenomena in soils; Comments and letters to the editor. *Soil Science Society America Journal*, vol. 45. Pp. 1245.
- Bouma, J. & Dekker, L. W. 1978. A case study on infiltration into dry clay soil, 1, Morphological observations. *Geoderma*, vol. 20. Pp. 27-40.
- Bouma, J. 1981. Comment on " Micro,- meso,- and macroporosity of soil " ;Comments and letters to the editor. *Soil Science Society America Journal*, vol. 45. Pp. 1244-1245.
- Bouma, J. 1982. Measuring the hydraulic conductivity of soil horizons with continuous macropores. *Soil Science Society America Journal*, vol. 46. Pp. 438-441.
- Bronswijk, J. J. B. & Evers-Vermeer, J. J. 1990. Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, vol. 38. Pp. 175-194.
- Bronswijk, J. J. B. 1988. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils. *Journal of Hydrology*, vol. 97(3/4). Pp. 200-211.
- Bronswijk, J. J. B. 1989. Prediction of actual cracking and subsidence in clay soils. *Soil Science*, vol. 148(2). Pp. 87-93.
- Bronswijk, J. J. B. 1991. Drying, cracking and subsidence of a clay soil in a lysimeter. *Soil Science*, vol. 152(2). Pp. 92-99.
- Bronswijk, J. J. B., Hamminga, W. & Oostindie, K. 1995. Field-scale solute transport in heavy clay soil. *Water Resources Research*, vol. 31(3).Pp. 517-526.
- Bronswijk, J. J. B.1991. Magnitude, modeling and significance of swelling and shrinkage processes in clay soils.
- Clothier, B. E. & Smettem, K. R. J. 1990. Combining laboratory and field measurements to define the hydraulic properties of soil. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 54(2). Pp. 299-304.
- Edwards, W. M., Van der Ploeg, R. R. & Ehlers, W. 1979. A numerical study of effects of noncapillary-sized pores upon infiltration. *Soil*, vol. 43. Pp. 851-856.

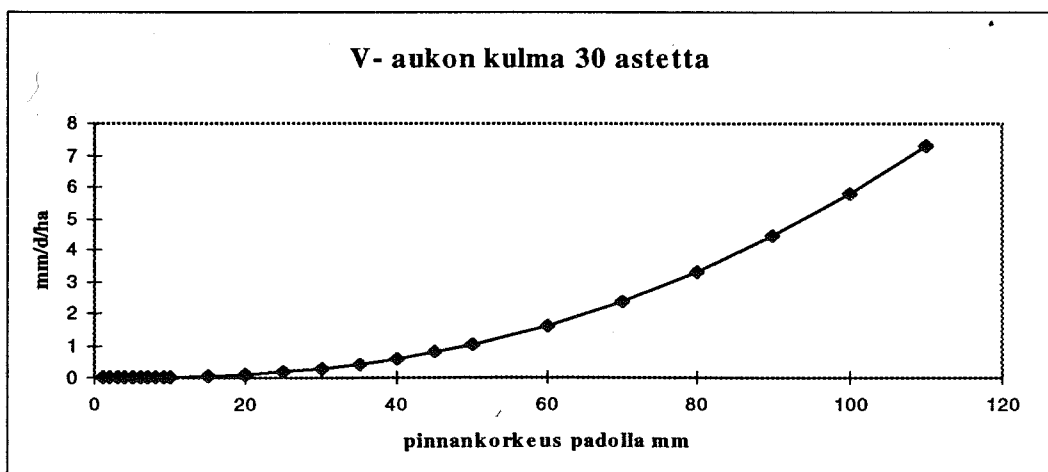
- Erkomaa, K., Mäkinen, I. & Sandman, O. 1977. Vesiviranomaisten ja julkisen valvonnan alaisten vesientutkimuslaitosten fysikaaliset ja kemialliset analyysimenetelmät. Vesihallitus 121.
- Franszmer, D.P. & Ross, S. J. 1968. Soil swelling: laboratory measurement and relation to other soil properties. *Soil Science Society America Proc*, vol. 32. Pp. 573-577.
- Germann, P. & Beven, K. 1981. Water flow in soil macropores I. An experimental approach. *Journal of Soil Science*, vol. 32. Pp. 1-13.
- Hillel, D. 1971. Soil and water, physical principles and processes.
- Hillel, D. 1980. Application of Soil Physics.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics.
- Hogland, W. 1994. Hydrological and environmental effects of agricultural and urban activities in small Swedish river basin, *Nordic Hydrology*, vol. 25. Pp. 247-265.
- Hoogmoed, W. D. & Bouma, J. 1980. A simulation model for predicting infiltration into cracked clay soil. *Soil Science Society America Journal*, vol. 44. Pp. 458-461.
- Jarvis, N. 1994. The MACRO model (version 3.1), Technical description and sample simulations. Department of soil sciences reports and dissertations 19.
- Karvonen, T. 1988. A model for predicting the effect of drainage on soil moisture, soil temperature and crop yield. Helsinki university of technology publications of laboratory of hydrology and water resources engineering.
- Karvonen, T. 1992. Säättösalaojitus, koekenttien perustaminen. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 16. S. 9-17.
- Kim, D. J., Vereecker, H., Feyen, J., Boels, D. & Bronswijk, J. J. B. 1992. On the characterization of properties of an unripe marine clay soil I. Shrinkage processes of an unripe marine clay soil in relation to physical ripening. *Soil Science*, vol. 153(6). Pp. 471-481.
- Koivusalo, H. & Hyvönen, P. 1994. Säättösalaojitus ja padotuskastelututkimusten koekenttien mittausjärjestelyt ja tiedonkeruu- ja siirto-ohjelmisto. Vesitalouden laboratorion monistesarja 1994:6.
- Koivusalo, H. 1994. Säättösalaojitus, Tutkimustuloksia vuosilta 1992-1993. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 18. S.32-51
- Kutilek, M. & Novak, V. 1976. The influence of soil cracks upon infiltration and ponding time. *Proc. Bratislava Symp. Water Heavy Soils*, 1, Pp. 126-134, 1976.
- Lahtinen, M. 1995. Pohjaveden korkeuden ja typpipitoisuuden vaihtelu peltoalueella. Julkaisussa: Paasonen-Kivekäs, M. & Karvonen, T. (Toim) 1995. Säättöojitus- ja valumavesien kierrätystutkimuksen mittausaineiston käsittelyä - Vesitalouden seminaari 1995.
- Leeds-Harrison, P. B., Shipway, C. J. P., Jarvis, N. J. & Youngs, E. G. 1986. The influence of soil macroporosity on water retention, transmission and drainage in clay soil. *Soil Use and Management*, vol. 2(2). Pp. 47-50.
- Lima, L. A. & Grismer, M. E. 1992. *Soil Science*, vol. 153(2). Pp. 149-153.
- Logsdon, S. D. 1995. Flow mechanisms through continuous and buried macropores. *Soil Science*, vol. 160(4). Pp. 237-242.
- Luxmoore, R.J. 1981. Micro-, meso-, and macroporosity of soil; Comments and letters to the editor. *Soil Science Society America Journal*, vol. 45. Pp. 671-672.

- Mahmood, H. N. 1995. Estimating Hydraulic Conductivity for models of soils with macropores. *Journal of irrigation and drainage engineering*, vol. 121(1). Pp. 95-102.
- McGarry, D. & Malafant, K. W. J. 1987. The analysis of volume changes in unconfined units of soil. *Soil Science Society America Journal*, vol. 51. Pp. 290-297.
- Messing, I. & Jarvis, N. J. 1993. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. *Journal of Soil Science*, vol. 44. Pp. 11-24.
- Messing, I. 1993. Saturated and near-saturated hydraulic conductivity in clay soils, measurement and prediction in field and laboratory, Ph D Thesis.
- Oostindie, K. & Bronswijk, J. J. B. 1992. FLOCR- A simulation model for the calculation of water balance, cracking and surface subsidence of clay soils. The Winand Staring Center for Integrated Land, Soil and Water Research. Report 47.
- Othmer, H., Diekkrüger, B. & Kutilek, M. 1991. Bimodal porosity and unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science*, vol. 152(3). Pp. 139-150.
- Paasonen-Kivekäs, M & Vakkilainen, P. 1989. Salaojitus ja pohjaveden laatu. *Vesitalous* 1/1989. S. 21-25.
- Paasonen-Kivekäs, M. 1993. A study on leaching and storage of nitrogen in the soil-plant-system.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T., Vakkilainen, P., Sepahi, N., Kleemola, J., ja Teittinen, M. 1995. Field studies on controlled drainage and recycling irrigation drainage for reduction of nutrient loading from arable land. *Proceeding of Second International IAWQ Specialized Conference and Symposia on Diffuse Pollution*, Bruno & Prague, August 13-18, 1995, Pp. 281-286.
- Pekkarinen, M. 1979. Ravinteiden huuhtoutuminen Siuntionjoen vesistöalueella. *Diplomityö*, Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja Maanmittaustekniikan osasto. 205 s.
- Pitkänen, H. 1994. Eutrophication of the Finnish coastal waters: Origin, fate and effects of riverine nutrient fluxes. . National Board of Waters and the Environment, Finland.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1989. *Biometria, Tilastotiedettä ekologeille*.
- Rasiah, V. 1995. Fractal dimension of surface-connected macropores count-size distributions. *Soil Science*, vol. 159(2). Pp. 105-108.
- Rekolainen, S. 1993. Assessment and mitigation of agricultural water pollution. National Board of Waters and the Environment, Finland.
- Sanders, T. G., Ward, R. C., Loftis, J. C., Steele, T. D., Adrian, D. D. & Yevjevich, V. 1983. Design of networks for monitoring water quality. Inc., Chelsea, Michigan, U.S.A. Pp. 328.
- Seuna, P. & Kauppi, L. 1981. Influence of sub-drainage on water quantity quality in cultivated area in Finland. Publication of the water research institute 43.
- Shaw, E. M. 1984. *Hydrology in practice*.
- Skopp, J. 1981. Comment on " Micro-, meso-, and macroporosity of soil " ;Comments and letters to the editor. *Soil Science Society America Journal*, vol. 45. Pp. 1246.
- Taskinen, A. & Koivusalo, H 1994. Säättösalaojitus, Tutkimustuloksia vuosilta 1992-1993. Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 18. ss.15-31.

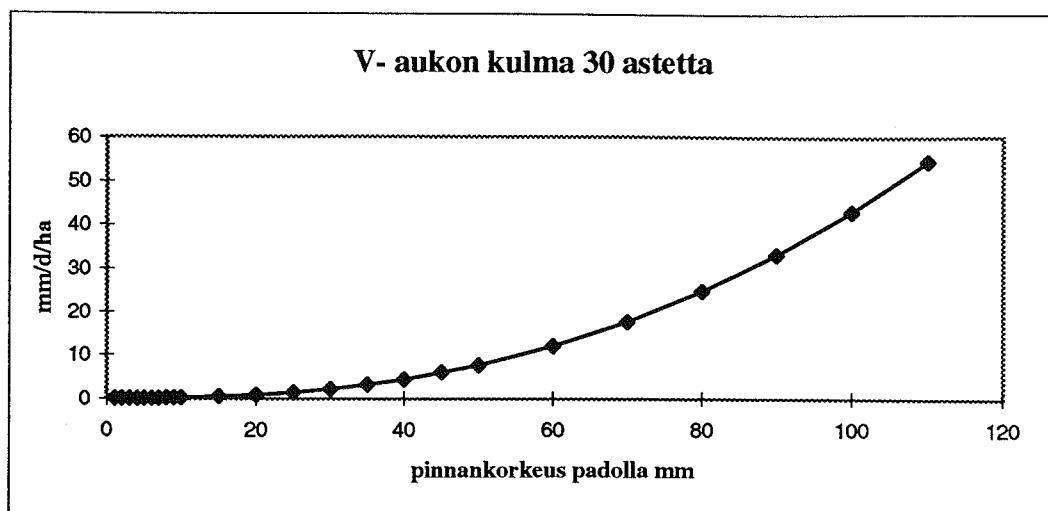
- Turtola, E. & Jaakkola, A. 1985. Viljelyskasvin ja lannoitustason vaikutus typen ja fosforin huuhtoutumiseen savimaasta. Maatalouden tutkimuskeskus 6/85.
- Turtola, E. & Jaakkola, A. 1987. Viljelyskasvin vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen savimaassa Jokioisten huuhtoutumiskentällä v. 1983-1986. Maatalouden tutkimuskeskus 22/87.
- Vakkilainen, P. 1986. Maavedet. Teoksessa: Mustonen, S. (Toim) 1986. Sovellettu Hydrologia. Vesiyhdistys ry. Helsinki. S. 82-100.
- Waller, P. M. & Wallender, W. W. 1993. Changes in cracking, water content and bulk density of salinized swelling clay field soils. *Soil Science*, vol. 156(6). Pp. 414-423.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal*, vol. 44. Pp. 892-898.
- Vepraskas, M.J., Hoover, M. T. & Bouma, J. 1991. Sampling strategies for assessing hydraulic conductivity and water-conducting voids in saprolite. *Soil Science Society America Journal*, vol. 55. Pp. 165-170.
- Vomocil, J. A. 1965. Porosity. In: Black, C.A. (Edit.) 1965 *Methods of soil analysis*. Pp. 299- 314.
- Zhang, R. & Van Genuchten, M. T. 1994 New models for unsaturated soil hydraulic properties. *Soil Science* vol. 158(2). Pp. 77-85.



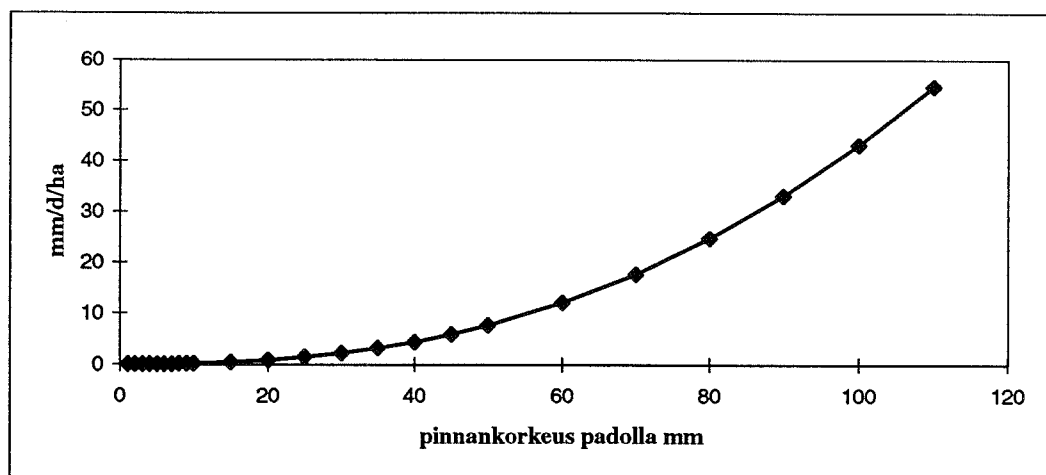
S3 valuma-alueelle



S4 Valuma-alueelle

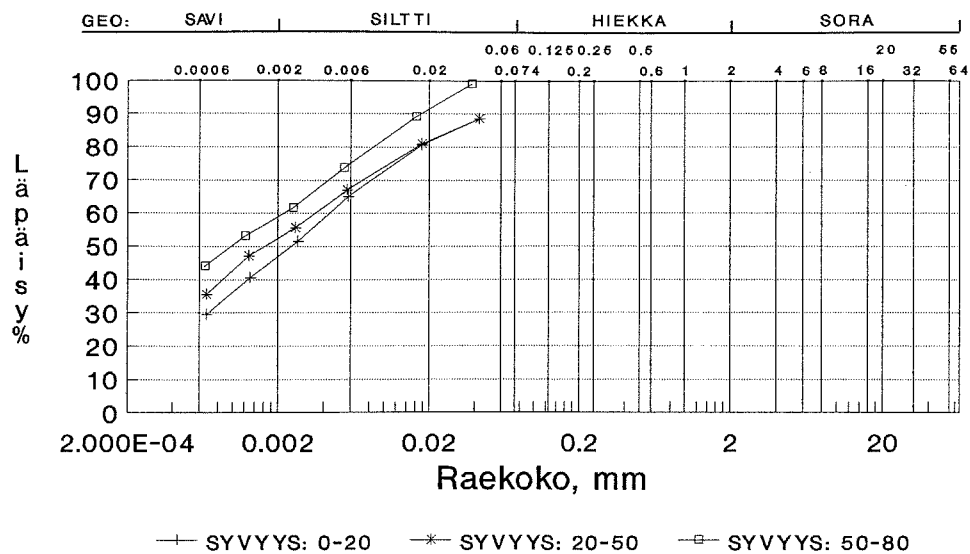


S5 Valuma-alue

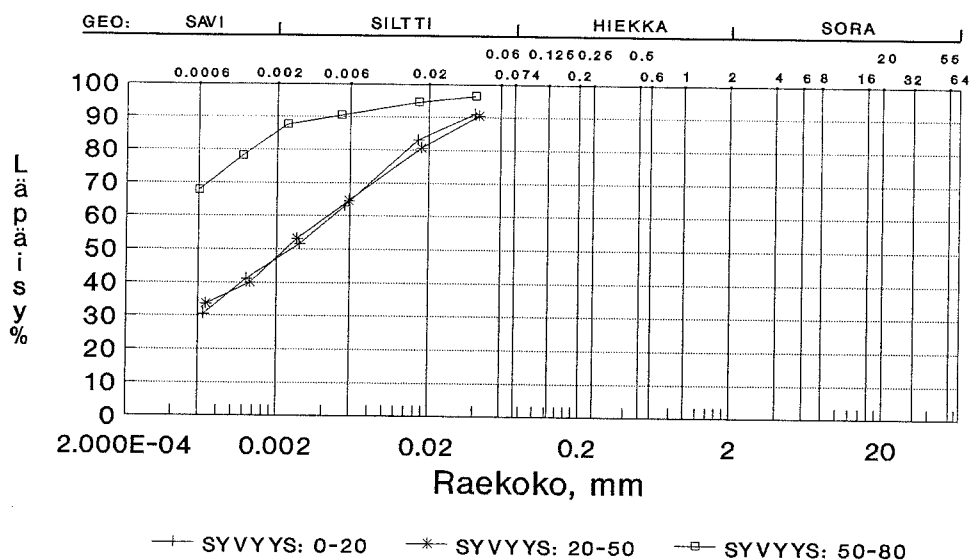


P2 Valuma-alue

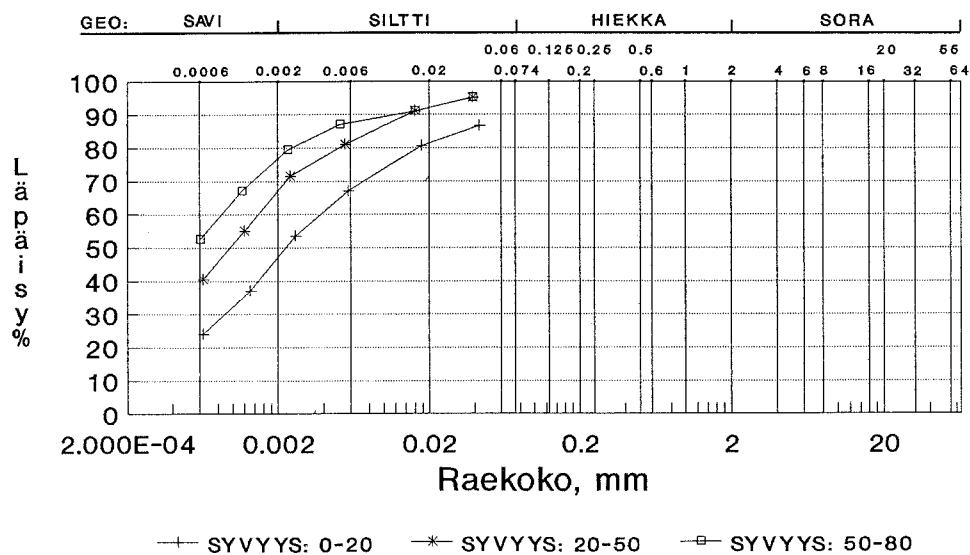
LIITE 2: Rakeisuuskäyrät Sjököllan maille



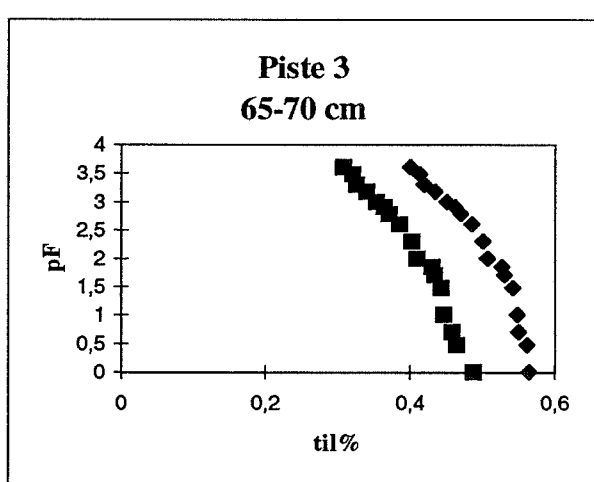
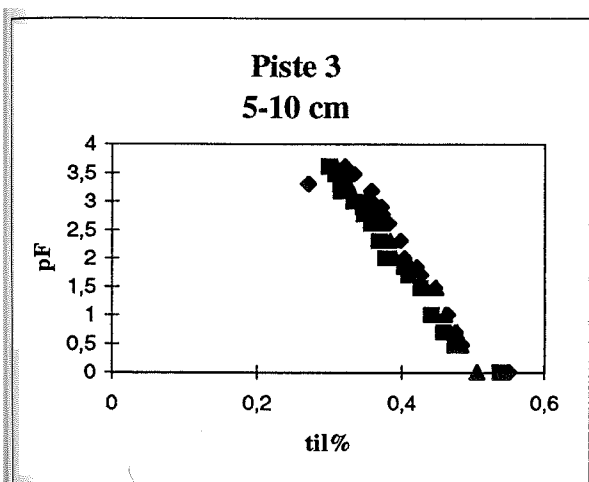
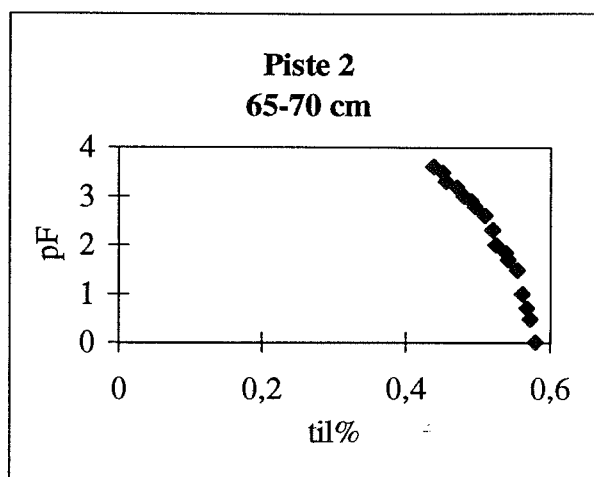
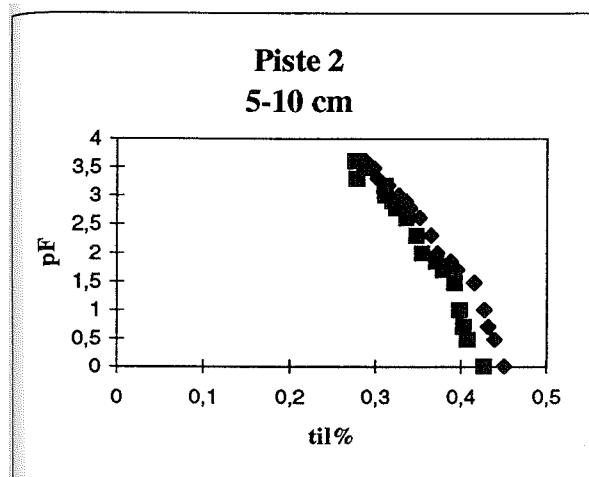
SJÖKULLA, POLTTAMATTOMAT NÄYTTEET, PAALU1



SJÖKULLA, POLTTAMATTOMAT NÄYTTEET, PAALU2



LIITE 3: Mitatut pF-käyrät Sjökullan koekentältä peltolohkolta 18a



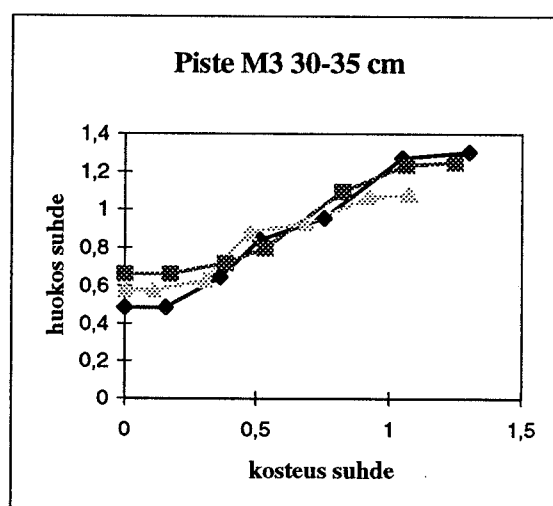
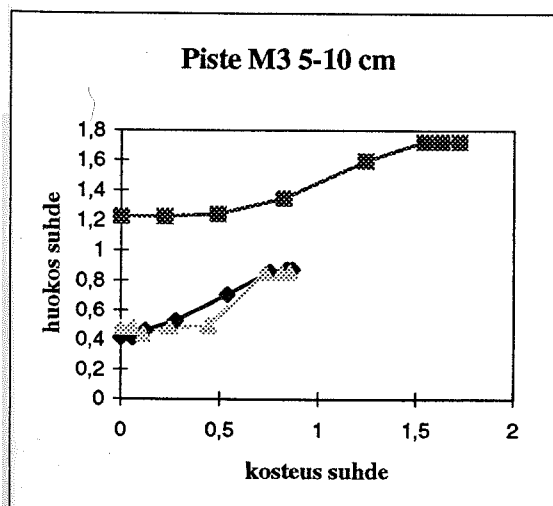
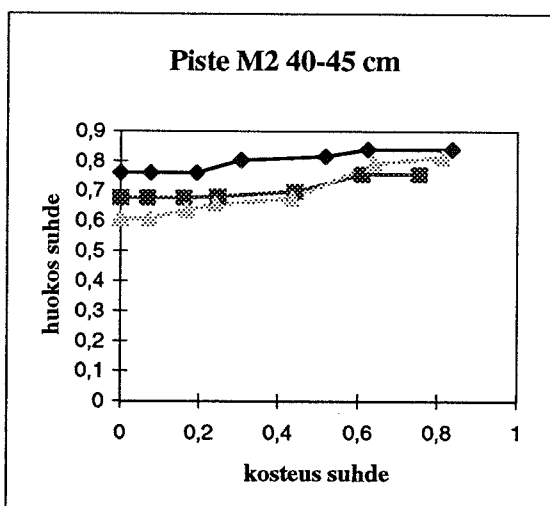
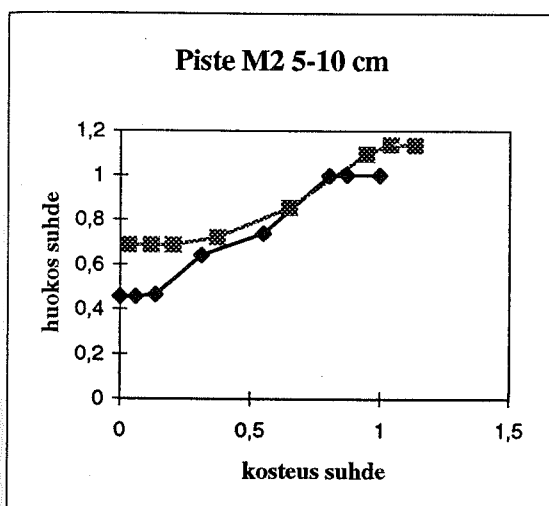
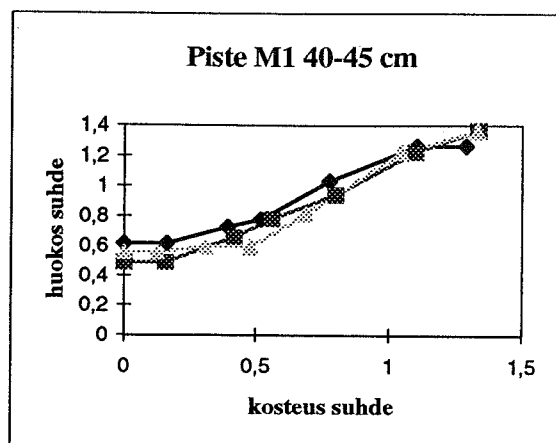
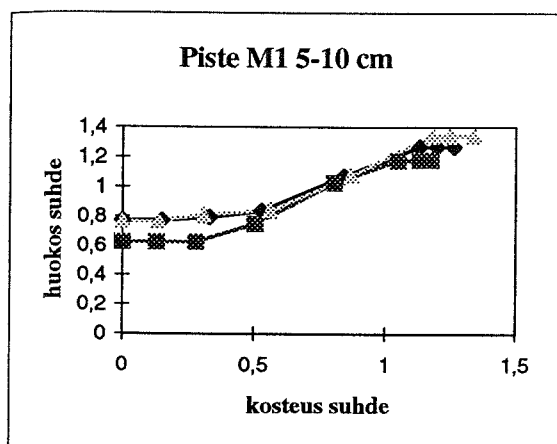
LIITE 4: Hydraulisen johtavuuden mittausarvoille lasketut tilastolliset tunnusluvut

	Piste 13-15 5-10cm	Piste 13-15 35-40cm	Piste 13-15 65-70cm
keskiarvo	0,54	0,04	0,37
keskihajonta	0,15	0,01	0,05
max	0,91	0,07	0,52
min	0,32	0,02	0,30
median	0,54	0,03	0,37
N	13,00	12,00	13,00
Varianssi	0,02	0,00	0,00
Variaatikerroin	0,28	0,39	0,14

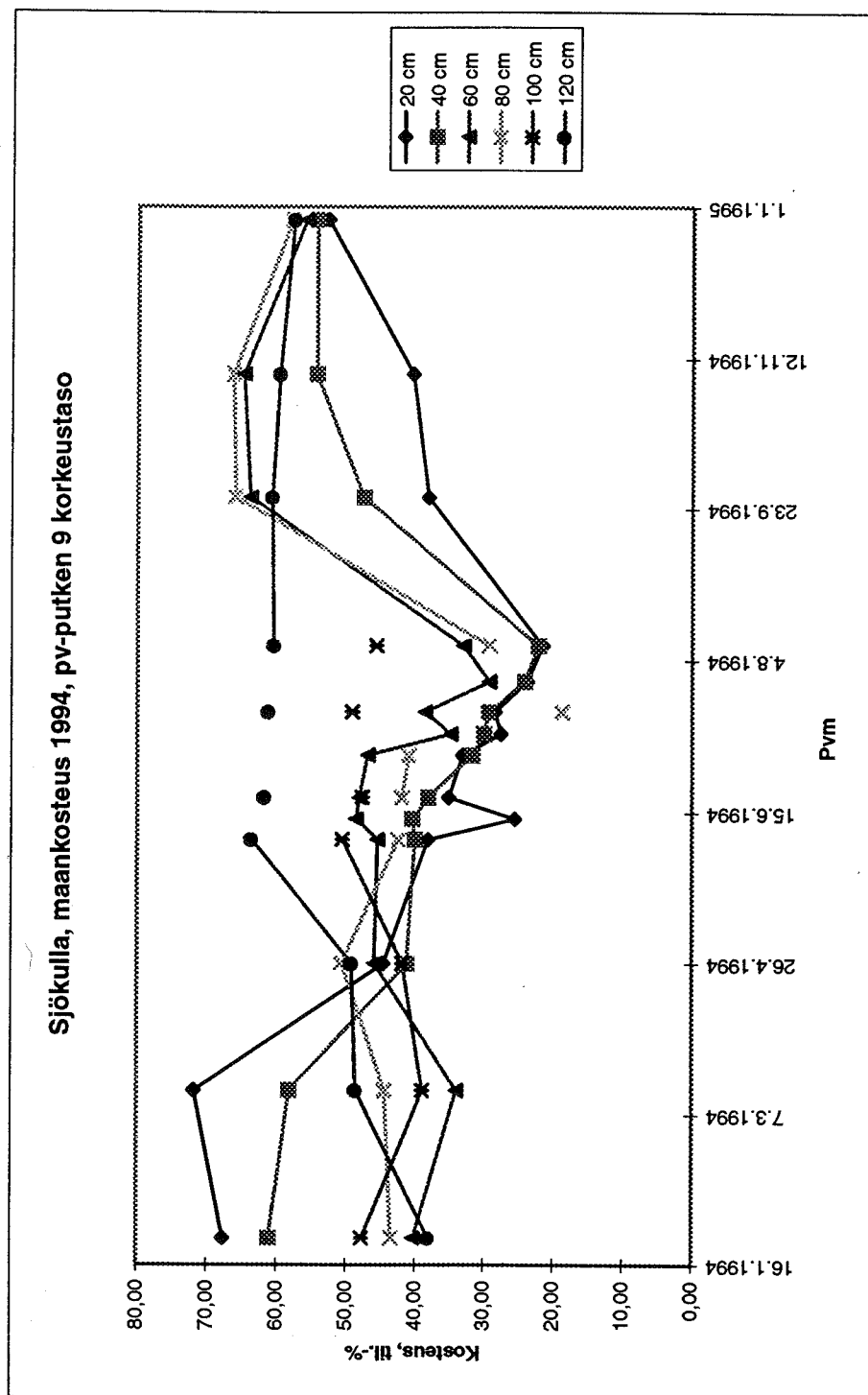
	Piste 11 5-10cm	Piste 11 35-40cm	Piste 11 65-70cm
keskiarvo	0,19	0,01	0,07
keskihajonta	0,07	0,01	0,03
max	0,29	0,02	0,11
min	0,07	0,01	0,02
median	0,19	0,01	0,07
N	15,00	3,00	12,00
Varianssi	0,00	0,00	0,00
Variaatikerroin	0,35	0,43	0,38

	Piste 18+ 35-40cm	Piste 17-18 35-40cm	Piste 17-18 65-70cm
keskiarvo	0,29	0,07	0,14
keskihajonta	0,03	0,03	0,03
max	0,33	0,11	0,18
min	0,22	0,02	0,07
median	0,29	0,07	0,14
N	13,00	14,00	13,00
Varianssi	0,00	0,00	0,00
Variaatikerroin	0,09	0,48	0,20

LIITE 5: Mitattujen pisteiden perusteella piirretyt kuivumiskutistumiskäyrät



LIITE 6: Maankosteuksien muuttuminen tutkimusjakson aikana 1994-1995.



Tässä on mitatut maankosteudet, eikä niistä ole poistettu pF-käyrän ulkopuolelle menneitä mittauspisteitä.

LIITE 7: Autokorrelaatio ja riippumattomien näytteriden näytemäärä

Tärkeä apuväline aikasarjoja tarkasteltaessa on aikasarjan autokorrelaatorakenne, joka kuvaa peräkkäisten havaintojen riippuvuutta toisistaan. Aikasarjan N :stä havainnosta muodostetaan $(N-1)$ paria kaikkia pareja ei tarvitse muodostaa, jolloin pareja voi olla myös vähemmän kuin $(N-1)$. Parien välinen korrelaatio kerroin lasketaan seuraavasti:

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{N-1} (x_t - x_{(1)})(x_{t+1} - x_{(2)})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-1} (x_t - x_{(1)})^2 \sum_{t=1}^{N-1} (x_{t+1} - x_{(2)})^2}} \quad (1)$$

jossa

$$x_{(1)} = \sum_{t=1}^{N-1} \frac{x_t}{(N-1)} \quad (2)$$

$$x_{(2)} = \sum_{t=2}^N \frac{x_t}{(N-2)} \quad (3)$$

$x_{(1)}$ ja $x_{(2)}$ ovat yleensä likimain samansuuruisia, jolloin $x_{(1)}$ ja $x_{(2)}$ tilalla voidaan käyttää aikasarjan keskiarvoa $\bar{x}$, jolloin kaava voidaan yksinkertaistaa seuraavanlaiseksi.

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x})(x_{t+1} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2} \quad (5)$$

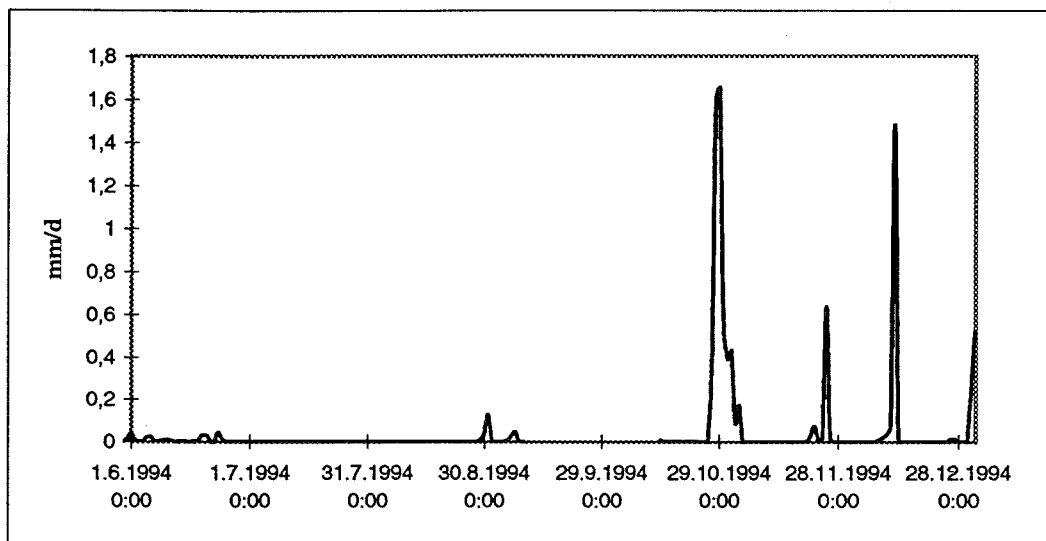
Korrelaatiokertoimien tulkintaa helpottaa korrelogrammin piirtäminen. Korrelogrammissa kertoimet piirretään viiveen k mukaan. Korrelaatiokertoimien perusteella voidaan määrittää ekvivalentti riippumattomien näytteiden määrä heikosti stationäärisille aikasarjoille. Kaava on esitetty yleisessä muodossa eikä vaadi oletuksia sarjan riippuvuuden muodosta (Lettenmaier, 1976):

$$1/n_b^* = 1/n + 2/n^2 \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) r(jt) \quad (6)$$

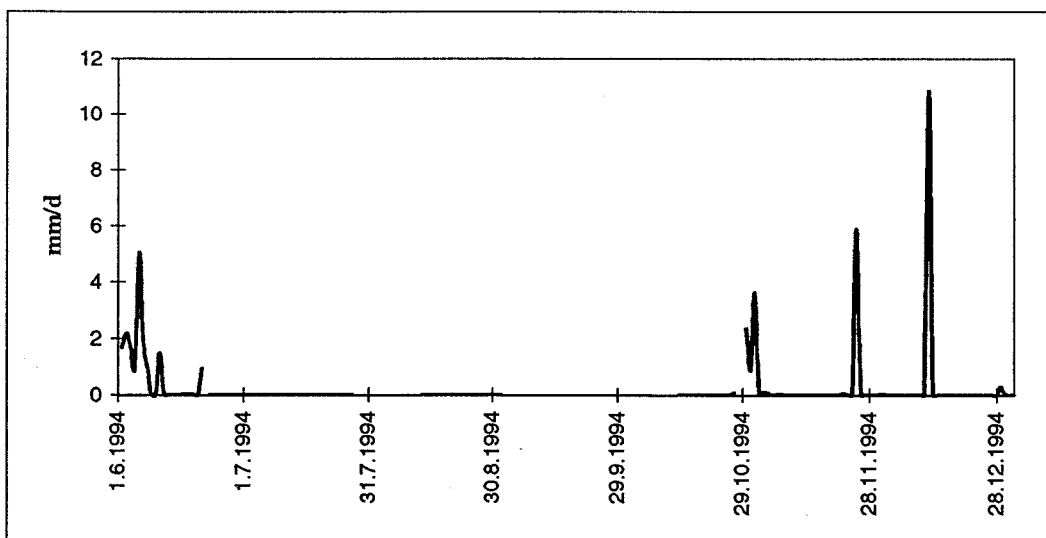
missä n_b^* on ekvivalentti riippumattomien näytteiden määrä, t on näytteenottoväli ja $r(jt)$ on jt -kertaluvun viiveen korrelaatiokerroin ja n otoskoko.

Ekvivalentti riippumattomien näytteiden määrä kertoo käsiteltävästä aikasarjasta sen havaintomäärän, joka antaa yhtäpaljon informaatiota kuin aikasarja josta analyysi on suoritettu. Sen perusteella voidaan määrittää näytteenottoväli, kun tiedetään analysoitavan aikasarjan näyteväli.

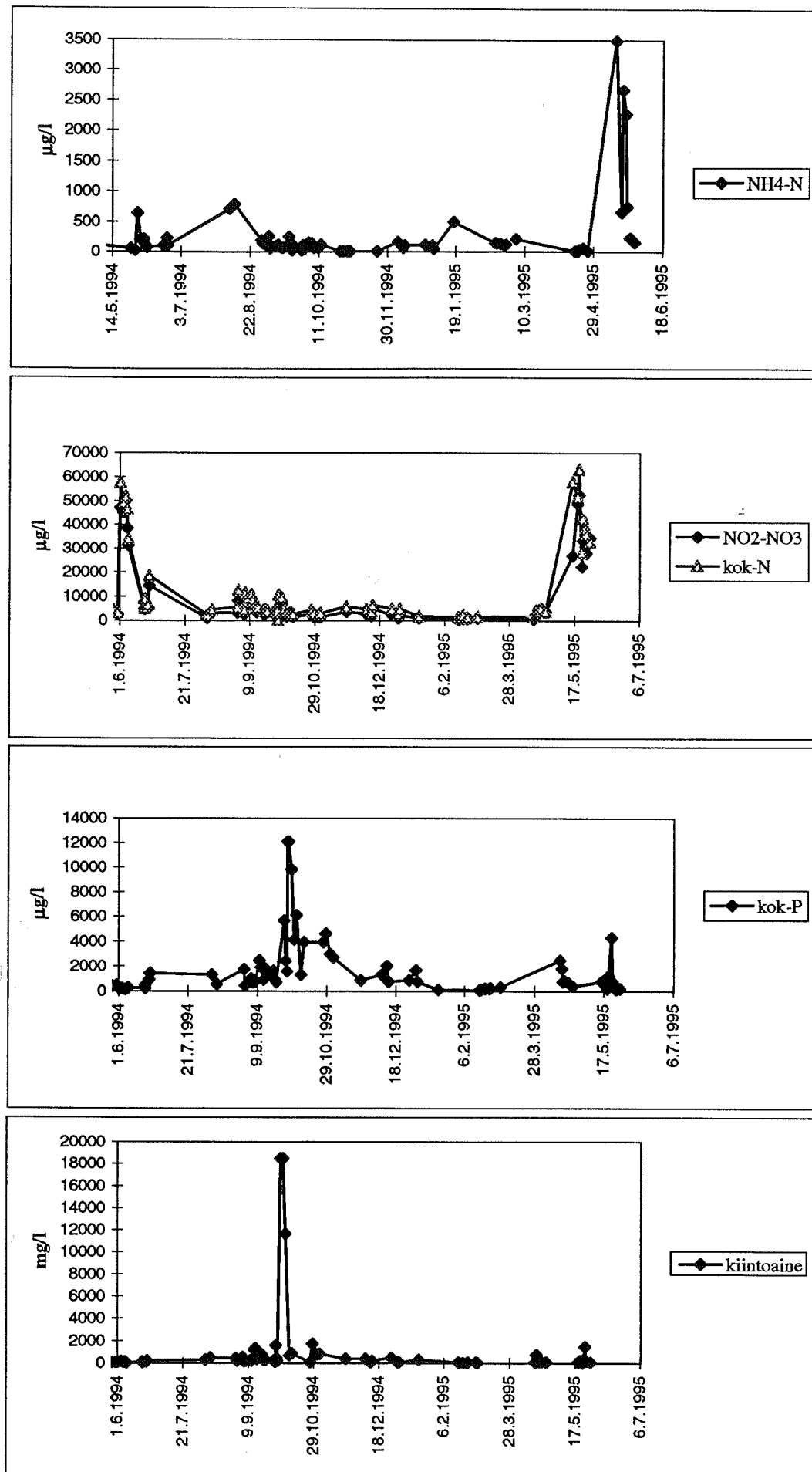
Liite 8: Virtaamat salaojapadoilla S4 ja S5 ajalla 1.6.-31.12.1994



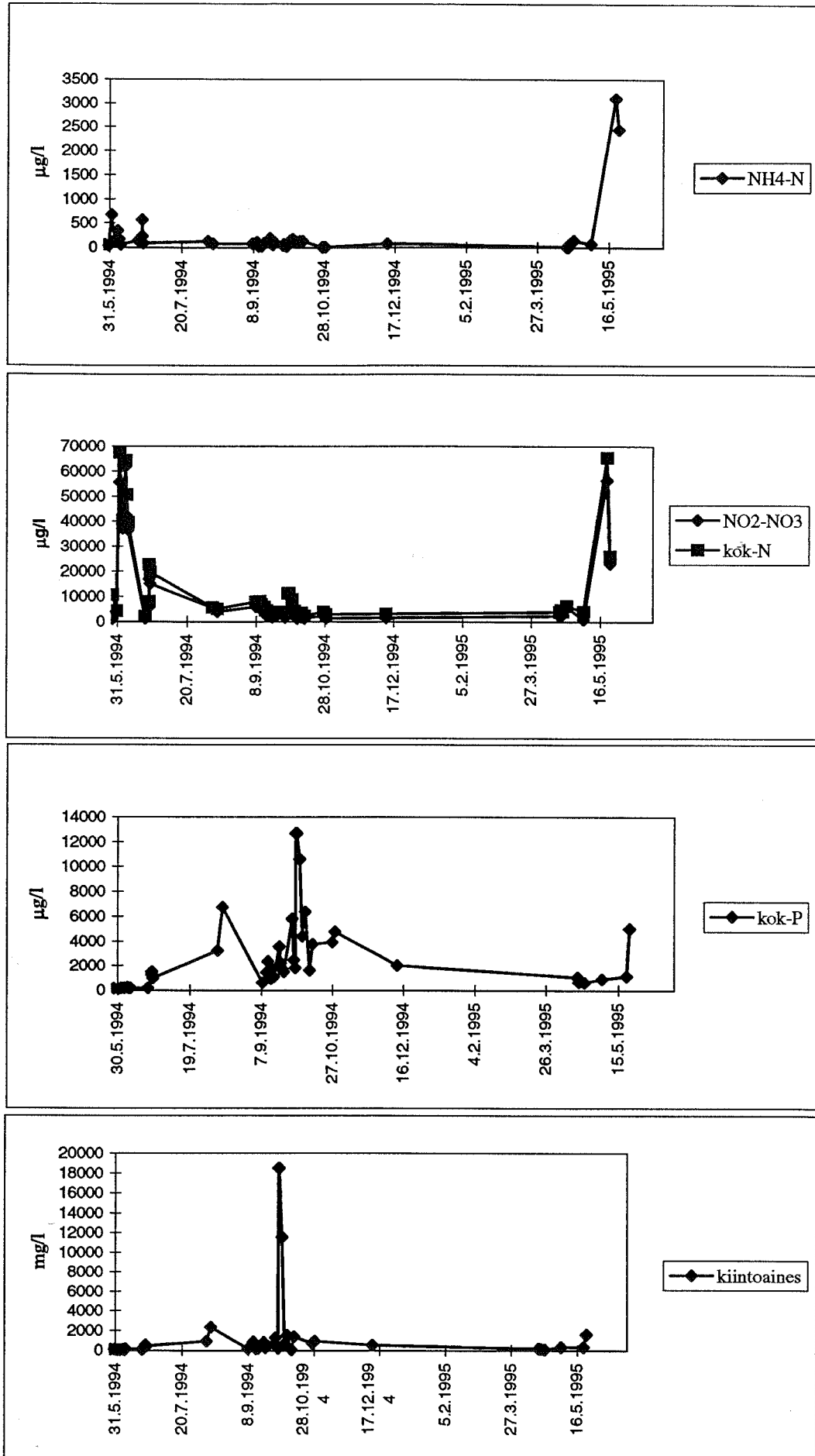
Virtaama padolla S4



Virtaama padolla S5



Kuva 1 : Salaojavesien pitoisuusvaihtelut padolla S4



Kuva 2 Salaojavesien pitopisuusvaihtelut padolla S5

LIITE 10a : Mallin lähtötiedot. Mitatulilla K-arvoilla

1/2

```

-- Header for simulation ----- 01 -- 0.517 0 1.070393 1.070393 3.
Simulation example report 47 -1 -1 -1 -1 -1
-- Number of: years, drain depths, drain intensities ----- 02 --
-- K0 values for three line segments ----- 08 --
0.363 0.002091 0.0000142
-- ALFA values for three line segments ----- 09 --
0.031096 0.042864 0.000696
-- Start.day,drainl_comp,nr of prof,nr of comp. per prof.,day parts ---- 03 --
-- INTERSECTIONS ----- 10 --
-11.6325 -118.372
0.0 9 2 2 28 1
-- LAAGNR LAAGD. TETA ----- 04 -- wat. cont., pres. head, void ratio, moisture ratio, geometry fact -- 07 --
1 10.0000 0.585 0.429 -16000. 1.005 0.860 3.
2 10.0000 0.585 0.433 -13392. 1.011 0.870 3.
3 10.0000 0.585 0.436 -10833. 1.018 0.880 3.
4 10.0000 0.580 0.440 -8798. 1.024 0.890 3.
5 10.0000 0.580 0.443 -7173. 1.031 0.900 3.
6 10.0000 0.580 0.447 -5870. 1.038 0.910 3.
7 10.0000 0.580 0.450 -4821. 1.044 0.920 3.
8 10.0000 0.580 0.454 -3973. 1.051 0.930 3.
9 10.0000 0.580 0.457 -3286. 1.058 0.940 3.
10 10.0000 0.580 0.460 -2726. 1.065 0.950 3.
11 10.0000 0.580 0.464 -2269. 1.071 0.960 3.
12 10.0000 0.580 0.467 -1895. 1.078 0.970 3.
13 10.0000 0.580 0.470 -1587. 1.085 0.980 3.
14 10.0000 0.580 0.473 -1333. 1.092 0.990 3.
15 10.0000 0.580 0.477 -1123. 1.099 1.000 3.
16 10.0000 0.580 0.480 -948. 1.106 1.010 3.
17 10.0000 0.580 0.483 -803. 1.113 1.020 3.
18 10.0000 0.580 0.486 -682. 1.120 1.030 3.
19 10.0000 0.580 0.489 -580. 1.127 1.040 3.
20 10.0000 0.580 0.492 -495. 1.134 1.050 3.
21 10.0000 0.580 0.495 -423. 1.141 1.060 3.
22 10.0000 0.580 0.498 -362. 1.148 1.070 3.
23 10.0000 0.580 0.501 -311. 1.156 1.080 3.
24 10.0000 0.580 0.504 -267. 1.163 1.090 3.
25 10.0000 0.580 0.507 -230. 1.170 1.100 3.
26 10.0000 0.580 0.510 -199. 1.177 1.110 3.
27 10.0000 0.580 0.513 -172. 1.184 1.120 3.
28 10.0000 0.580 0.516 -149. 1.192 1.130 3.
29 10.0000 0.580 0.519 -129. 1.199 1.140 3.
30 10.0000 0.580 0.521 -112. 1.206 1.150 3.
POOLMX POOL BFACTOR ----- 05 -- 0.527 -84. 1.221 1.170 3.
-0.2 0.0 0.0000625 0.535 -55. 1.243 1.200 3.
DRAIN.D. INTENS. GRWL Depth of aquifer, indicator ----- 06 -- 0.548 -27. 1.281 1.250 3.
-95.0 0.000074438 -80. -250. 0 0.561 -12. 1.319 1.300 3.
wat. cont., pres. head, void ratio, moisture ratio, geometry fact ---- 07 --
0.289 -16000. 0.809 0.523 3. 0.568 -6. 1.342 1.330 3.
0.294 -13042. 0.812 0.533 3. 0.575 -2. 1.365 1.360 3.
0.299 -10322. 0.816 0.543 3. 0.578 -1. 1.373 1.370 3.
0.304 -8227. 0.819 0.553 3. 0.580 0 1.380952 1.380952 3.
0.309 -6601. 0.823 0.563 3. -1 -1 -1 -1 -1
-- K0 values for three line segments ----- 08 --
0.191974 0.002199 0.000018
-- ALFA values for three line segments ----- 09 --
0.0116365 0.026875 0.000594
-- INTERSECTIONS ----- 10 --
-11.6325 -182.953
-- FIRST INPUT METEO FILE NAAM ----- 11 --
r94.dat
-- OUTPUT IDENTIFICATION ----- 12 --
her1
--WAT_BAL, WAT_CNT, PRES_HD, LAYER_THICK, CR_VOL, SUBS, IN
(0=NO,1=YES)--
1 1 1 1 1 1 1
-- OUTPUT FREQUENCY (1=PER FIFTH OF A DAY, 2= DAYLY, 3= WEI
---- 14 --
1
-- COMPUTE TIMESTEP [Y/N] ? ----- 15 --
Y
-- DELTAT ----- 16 --
0.00001 DAYS

```

LIITE 10b: Mallin Lähtötiedot: Kymmenkertaisilla K-arvoilla

2/2

-- Header for simulation ----- 01

Simulation example report 47

-- Number of: years, drain depths, drain intensities ----- 02 --

1 1 1
-- Start.day, drain_comp, nr of prof, nr of comp. per prof., day parts ---
03 -

0.0 9 2 2 28 1
-- LAAGNR LAAGD. TETA ----- 04

1 10.0000 0.585
2 10.0000 0.585
3 10.0000 0.585
4 10.0000 0.580
5 10.0000 0.580
6 10.0000 0.580
7 10.0000 0.580
8 10.0000 0.580
9 10.0000 0.580
10 10.0000 0.580
11 10.0000 0.580
12 10.0000 0.580
13 10.0000 0.580
14 10.0000 0.580
15 10.0000 0.580
16 10.0000 0.580
17 10.0000 0.580
18 10.0000 0.580
19 10.0000 0.580
20 10.0000 0.580
21 10.0000 0.580
22 10.0000 0.580
23 10.0000 0.580
24 10.0000 0.580
25 10.0000 0.580
26 10.0000 0.580
27 10.0000 0.580
28 10.0000 0.580
29 10.0000 0.580
30 10.0000 0.580

POLMX POOL BFACTOR ----- 05 --
-0.5 0.0 0.0000625

DRAIN.D. INTENS. GRWL Depth of aquifer, indicator ----- 06 -

-95.0 0.000744388 -50. -250. 0
wat. cont., pres. head, void ratio, moisture ratio, geometry fact ---- 07 -

0.289 -16000. 0.809 0.523 3.
0.294 -13042. 0.812 0.533 3.
0.299 -10322. 0.816 0.543 3.
0.304 -8227. 0.819 0.553 3.
0.309 -6601. 0.823 0.563 3.
0.313 -5331. 0.827 0.573 3.
0.318 -4330. 0.830 0.583 3.
0.323 -3538. 0.834 0.593 3.
0.328 -2907. 0.838 0.603 3.
0.333 -2401. 0.842 0.613 3.
0.337 -1992. 0.846 0.623 3.
0.342 -1661. 0.850 0.633 3.
0.347 -1391. 0.854 0.643 3.
0.351 -1171. 0.858 0.653 3.
0.356 -989. 0.862 0.663 3.
0.360 -838. 0.866 0.773 3.
0.365 -714. 0.871 0.683 3.
0.369 -610. 0.875 0.693 3.
0.374 -522. 0.879 0.703 3.
0.378 -449. 0.884 0.713 3.
0.383 -387. 0.888 0.723 3.
0.391 -291. 0.898 0.743 3.
0.396 -253. 0.902 0.753 3.
0.400 -220. 0.907 0.763 3.
0.404 -192. 0.912 0.773 3.
0.413 -148. 0.921 0.793 3.
0.421 -114. 0.931 0.813 3.
0.429 -89. 0.941 0.833 3.

0.445 -54. 0.961 0.873 3.
0.464 -29. 0.988 0.923 3.
0.490 -11. 1.026 0.993 3.
0.500 -6. 1.043 1.023 3.
0.507 -3. 1.055 1.043 3.
0.511 -2. 1.061 1.053 3.
0.514 -1. 1.067 1.063 3.
0.517 0 1.070393 1.070393 3.
-1 -1 -1 -1 -1

-- KO values for three line segments ----- 08 --

3.63 0.02091 0.000142

-- ALFA values for three line segments ----- 09 --

0.031096 0.042864 0.000696

-- INTERSECTIONS ----- 10 --

-11.6325 -118.372

wat. cont., pres. head, void ratio, moisture ratio, geometry fact ---- 07 --

0.429 -16000. 1.005 0.860 3.
0.433 -13392. 1.011 0.870 3.
0.436 -10833. 1.018 0.880 3.
0.440 -8798. 1.024 0.890 3.
0.443 -7173. 1.031 0.900 3.
0.447 -5870. 1.038 0.910 3.
0.450 -4821. 1.044 0.920 3.
0.454 -3973. 1.051 0.930 3.
0.457 -3286. 1.058 0.940 3.
0.460 -2726. 1.065 0.950 3.
0.464 -2269. 1.071 0.960 3.
0.467 -1895. 1.078 0.970 3.
0.470 -1587. 1.085 0.980 3.
0.473 -1333. 1.092 0.990 3.
0.477 -1123. 1.099 1.000 3.
0.480 -948. 1.106 1.010 3.
0.483 -803. 1.113 1.020 3.
0.486 -682. 1.120 1.030 3.
0.489 -580. 1.127 1.040 3.
0.492 -495. 1.134 1.050 3.
0.495 -423. 1.141 1.060 3.
0.498 -362. 1.148 1.070 3.
0.501 -311. 1.156 1.080 3.
0.504 -267. 1.163 1.090 3.
0.507 -230. 1.170 1.100 3.
0.510 -199. 1.177 1.110 3.
0.513 -172. 1.184 1.120 3.
0.516 -149. 1.192 1.130 3.
0.519 -129. 1.199 1.140 3.
0.521 -112. 1.206 1.150 3.
0.527 -84. 1.221 1.170 3.
0.535 -55. 1.243 1.200 3.
0.548 -27. 1.281 1.250 3.
0.561 -12. 1.319 1.300 3.
0.568 -6. 1.342 1.330 3.
0.575 -2. 1.365 1.360 3.
0.578 -1. 1.373 1.370 3.
0.580 0 1.380952 1.380952 3.

-1 -1 -1 -1 -1

-- KO values for three line segments ----- 08 --

1.91974 0.02199 0.00018

-- ALFA values for three line segments ----- 09 --

0.0116365 0.026875 0.000594

-- INTERSECTIONS ----- 10 --

-11.6325 -182.953

-- FIRST INPUT METEO FILE NAAM ----- 11 --

r94.dat

-- OUTPUT IDENTIFICATION ----- 12 --

koe2

--WAT_BAL, WAT_CNT, PRES_HD, LAYER_THICK, CR_VOL, SI
INPUT (0=NO,1=YES)--

1 1 1 1 1 1 1

-- OUTPUT FREQUENCY (1= PER FIFTH OF A DAY, 2= DAYLY,
WEEKLY) ---- 14 --

1

-- COMPUTE TIMESTEP [Y/N] ? ----- 15 --

Y

-- DELTAT ----- 16 --

0.01 DAYS

1.5.1994	49.1				11.8.1994	45.2	41.7	57.2
2.5.1994	48.9	49.3			12.8.1994	42.6	41.7	57.2
3.5.1994	48.8	49	56.4	57.5	13.8.1994	45	41.7	57.3
4.5.1994	46.8	48.7	56.1	57.5	14.8.1994	42.4	41.7	57.3
5.5.1994	45.3	48.6	56.3	56.2	15.8.1994	39.7	41.7	57.2
6.5.1994	42.6	48.5	56.1	56.4	16.8.1994	37.3	41.7	57.2
7.5.1994	40	48.5	56.2	56.4	17.8.1994	34.5	41.7	57.1
8.5.1994	37.6	48.3	56.2	56.3	18.8.1994	32.1	41.7	57.1
9.5.1994	35.1	48	56.4	56.3	19.8.1994	30.4	41.7	57
10.5.1994	33	47.5	56.2	56.4	20.8.1994	29.4	41.7	57
11.5.1994	31.6	46.7	56.3	56.5	21.8.1994	29.1	41.7	57
12.5.1994	30.7	45.9	56.3	56.2	22.8.1994	29	41.7	56.9
13.5.1994	30	45.2	56.2	56.4	23.8.1994	28.9	41.7	56.9
14.5.1994	29.6	44.7	56.4	56.2	24.8.1994	28.9	41.7	56.8
15.5.1994	29.4	44.3	56.2	56.5	25.8.1994	28.9	41.7	56.8
16.5.1994	29.3	44	56.4	56.3	26.8.1994	28.9	41.7	56.7
17.5.1994	29.2	43.7	56.3	56.4	27.8.1994	28.9	41.7	56.7
18.5.1994	29.1	43.5	56.1	56.5	28.8.1994	42.5	41.7	57.6
19.5.1994	29.1	43.4	56.2	56.3	29.8.1994	49.5	49.2	57.6
20.5.1994	33.7	43.2	56.3	56.3	30.8.1994	51.7		
21.5.1994	36.1	43.2	56.2	56.6	31.8.1994	50.9		
22.5.1994	33.4	43.1	56.3	56.5	1.9.1994	49.2	50.8	
23.5.1994	40.3	43.1	56.3	57	2.9.1994	49	49.2	57.3
24.5.1994	37.8	43.1	56.3	57	3.9.1994	48.9	49.2	56.2
25.5.1994	35	43.1	56.3	57	4.9.1994	50.7		56.8
26.5.1994	32.5	43	56.3	57	5.9.1994	49.6		
27.5.1994	30.6	42.9	56.2	57	6.9.1994	51.7		
28.5.1994	29.6	42.8	56.4	56.8	7.9.1994	51.7		
29.5.1994	29.2	42.7	56.2	56.9	8.9.1994	51.7		
30.5.1994	33.4	42.7	56.2	57.3	9.9.1994	51.7		
31.5.1994	31.2	42.6	56.4	57.1	10.9.1994	51.7		
1.6.1994	29.9	42.6	56.2	57.2	11.9.1994	51.7		
2.6.1994	29.3	42.5	56.3	57.1	12.9.1994	51.7		
3.6.1994	29.6	42.4	56.4	57	13.9.1994	51.7		
4.6.1994	32.9	42.4	56.4	57.4	14.9.1994	51.7		
5.6.1994	30.9	42.3	56.2	57.5	15.9.1994	51.7		
6.6.1994	29.7	42.3	56.2	57.4	16.9.1994	51.7		
7.6.1994	29.2	42.2	56.3	57.4	17.9.1994	51.7		
8.6.1994	29	42.2	56.3	57.3	18.9.1994	51.7		
9.6.1994	32.1	42.1	56.2	57.7	19.9.1994	51.7		
10.6.1994	30.4	42.1	56.2	57.7	20.9.1994	50.7		
11.6.1994	28.5	42.1	56.2	57.6	21.9.1994	49.4		
12.6.1994	29.1	42	56.2	57.6	22.9.1994	49.1	50.6	
13.6.1994	29	42	56.4	57.3	23.9.1994	48.9	49.5	
14.6.1994	28.9	42	56.2	57.5	24.9.1994	49.1	49.4	56.6
15.6.1994	28.9	42	56.2	57.4	25.9.1994	49	49	56.5
16.6.1994	37.1	42	56.3	58	26.9.1994	48.8	48.9	56.2
17.6.1994	36.3	42	56.4		27.9.1994	48.8	48.8	56.3
18.6.1994	33.6	42	56.3	58	28.9.1994	50.7	50.9	57.2
19.6.1994	34.1	42	56.5		29.9.1994	49	51.2	
20.6.1994	32.3	42	56.5		30.9.1994	48.9	49.9	
21.6.1994	30.5	42	56.4		1.10.1994	51.7		
22.6.1994	45.7	42	57.3		2.10.1994	51.7		
23.6.1994	43	42	57.3		3.10.1994	51.7		
24.6.1994	40.4	42	57.2		4.10.1994	51.7		
25.6.1994	38	42	57.2		5.10.1994	50.7		
26.6.1994	42.1	42	57.5		6.10.1994	51		
27.6.1994	39.5	42	57.4		7.10.1994	51.7		
28.6.1994	37	42	57.4		8.10.1994	51.7		
29.6.1994	34.2	42	57.3		9.10.1994	51.7		
30.6.1994	33.1	42	57.4		10.10.1994	51.7		
1.7.1994	31	42	57.3		11.10.1994	51.7		
2.7.1994	29.7	42	57.3		12.10.1994	51.7		
3.7.1994	29.2	42	57.3		13.10.1994	51.7		
4.7.1994	29	42	57.2		14.10.1994	51.7		
5.7.1994	28.9	41.9	57.2		15.10.1994	51.7		
6.7.1994	28.9	41.9	57.1		16.10.1994	51.7		
7.7.1994	28.9	41.9	57.1		17.10.1994	51.5		
8.7.1994	28.9	41.9	57		18.10.1994	51.1		
9.7.1994	28.9	41.9	57		19.10.1994	50.7		
10.7.1994	28.9	41.9	57		20.10.1994	50.3		
11.7.1994	28.9	41.9	56.9		21.10.1994	50		
12.7.1994	28.9	41.9	56.9		22.10.1994	49.5		
13.7.1994	28.9	41.9	56.8		23.10.1994	49	51.6	
14.7.1994	28.9	41.9	56.8		24.10.1994	49.7		
15.7.1994	28.9	41.9	56.8		25.10.1994	49.9		
16.7.1994	28.9	41.8	56.7		26.10.1994	51.7		
17.7.1994	28.9	41.8	56.7		27.10.1994	51.7		
18.7.1994	28.9	41.8	56.6		28.10.1994	51.7		
19.7.1994	28.9	41.8	56.6		29.10.1994	51.7		
20.7.1994	28.9	41.8	56.5		30.10.1994	51.7		
21.7.1994	28.9	41.8	56.5		31.10.1994	51.7		
22.7.1994	28.9	41.8	56.5		1.11.1994	51.7		
23.7.1994	28.9	41.8	56.4		2.11.1994	51.7		
24.7.1994	28.9	41.8	56.4		3.11.1994	51.7		
25.7.1994	28.9	41.8	56.4	58	4.11.1994	51.7		
26.7.1994	28.9	41.7	56.3	58	5.11.1994	51.2		
27.7.1994	28.9	41.7	56.3	58	6.11.1994	51.1		
28.7.1994	28.9	41.7	56.3	57.9	7.11.1994	50.5		
29.7.1994	28.9	41.7	56.3	57.9	8.11.1994	50		
30.7.1994	28.9	41.7	56.3	57.9	9.11.1994	49.4		
31.7.1994	28.9	41.7	56.3	57.9	10.11.1994	49.3	51.1	
1.8.1994	28.9	41.7	56.2	57.8	11.11.1994	49	50.7	
2.8.1994	28.9	41.7	56.2	57.8	12.11.1994	49.1	50	
3.8.1994	28.9	41.7	56.2	57.8	13.11.1994	48.9	49.6	
4.8.1994	28.9	41.6	56.2	57.8	14.11.1994	49.6	50.8	
5.8.1994	28.9	41.6	56.2	57.7	15.11.1994	51.7		
6.8.1994	29.3	41.6	56.2	57.8	16.11.1994	51.5		
7.8.1994	39.9	41.6	56.7		17.11.1994	51.5		
8.8.1994	37.4	41.6	56.7		18.11.1994	51		
9.8.1994	34.7	41.6	56.6		19.11.1994	50.5		
10.8.1994	47.8	41.6	57.3		20.11.1994	51.7		
					21.11.1994	51.7		
					22.11.1994	51.7		
					23.11.1994	51.7		
					24.11.1994	51.7		
					25.11.1994	51.7		
					26.11.1994	51.7		
					27.11.1994	51.7		
					28.11.1994	51.7		
					29.11.1994	51.7		
					30.11.1994	51.7		

1.5.1994	43.8	47.6	56.2	56.1	56.2	56.5	56.3	56.9	11.8.1994	43.8	37.9	56.1	56.1	56.2	56.3	56.4	56.4	58
2.5.1994	41.3	47.4	56.2	56.2	56.1	56.3	56.2	57.1	12.8.1994	41.1	38.1	56.1	56.2	56	56.6	56.2	56.4	
3.5.1994	39.2	46.8	56.2	56.2	56.1	56.3	56.3	57	13.8.1994	43.4	38.2	56	56.1	56.2	56.5	56.2	56.5	
4.5.1994	37.6	46	56.3	56	56.2	56.2	56.3	57	14.8.1994	40.7	36.3	56	56.2	56.1	56.2	56.4	56.6	
5.5.1994	36	45	56.1	56.1	56.3	56.2	56.3	56.8	15.8.1994	38.3	36.4	56.2	56	56.3	56.2	56.3	56.5	
6.5.1994	34.4	43.9	56	56.1	56.3	56.3	56.2	56.8	16.8.1994	35.5	36.4	56.2	56.1	56.2	56.4	56.2	56.3	58
7.5.1994	32.8	43.1	56.1	56.2	56.4	56	56.4	56.7	17.8.1994	33	36.4	56.1	56.3	56.1	56.2	56.5	56.2	58
8.5.1994	31.4	42.4	56.2	56.3	56	56.2	56.4	56.5	18.8.1994	31.1	36.3	56.1	56.1	56.3	56.2	56.3	56.5	57.8
9.5.1994	30.3	42	56.2	56.1	56.2	56.2	56.4	56.5	19.8.1994	29.9	36.1	56	56.1	56.2	56.3	56.2	56.4	58
10.5.1994	29.5	41.9	56.1	56.2	56	56.5	56.2	56.4	20.8.1994	29.3	36	56.1	56.2	56.1	56.2	56.3	56.5	57.9
11.5.1994	29.2	41.8	56	56.1	56.4	56.2	56.2	56.4	21.8.1994	29.1	37.9	56.1	55.9	56.6	56	56.2	56.5	58
12.5.1994	29.1	41.7	56	56.2	56.2	56.2	56.4	56.4	22.8.1994	29.1	37.8	56	56.3	56.1	56.2	56.2	56.5	57.9
13.5.1994	29.1	41.6	56	56.3	55.9	56.6	56	56.4	23.8.1994	29.1	37.7	56	56.3	56	56.4	56.2	56.3	57.9
14.5.1994	29.1	41.5	56.2	55.9	56.3	56.1	56.4	56.3	24.8.1994	29	37.6	56.1	56.1	56.3	56.1	56.2	56.3	57.9
15.5.1994	29.1	41.3	56.1	56.1	56.3	56.3	56.2	56.5	25.8.1994	29	37.5	56	56.2	56.2	56.3	56.2	56.3	57.8
16.5.1994	29.1	41.2	56	56.1	56.2	56.2	56.4	56.5	26.8.1994	29	37.4	56.1	56.3	56	56.4	56.2	56.5	57.5
17.5.1994	29.1	41.1	56.1	56.1	56.1	56.2	56.3	56.4	27.8.1994	29	37.3	56	56.1	56.1	56.4	56.2	56.3	57.7
18.5.1994	29.1	41	56.1	55.9	56.4	56.2	56.6	56.1	28.8.1994	42.6	37.3	56.2	56.1	56.2	56.4	56.3	56.6	
19.5.1994	29.1	40.9	56.2	56	56.3	56.2	56.5	56.5	29.8.1994	48.9	45.4	56.2	56.2	56.1	56.4	56.2	57	
20.5.1994	33.7	40.8	56.1	56.2	56.1	56.2	56.4	56.4	30.8.1994	48.9	48.8	56.4	56.1	56.4	56.9			
21.5.1994	36.2	40.7	56.1	56.3	56	56.3	56.4	56.5	31.8.1994	46.8	48.3	56.4	56	56.7	56.6			
22.5.1994	33.5	40.7	56.2	56.2	55.9	56.4	56.4	56.4	1.9.1994	44.3	48.2	56.1	56.2	56.5	56.7			
23.5.1994	40.4	40.7	56.1	56.2	56.1	56.5	56.2	56.9	2.9.1994	41.9	48	56.2	56.3	56.4	56.6			
24.5.1994	37.9	40.7	56.1	56.1	56.2	56.5	56.1	56.8	3.9.1994	39.8	47.4	56.2	56.2	56.2	56.7			
25.5.1994	35.1	40.7	56.1	56.2	56	56.6	56.2	56.7	4.9.1994	47.5	47.3	56.2	56.4	56.3	56.6			
26.5.1994	32.6	40.7	56.1	56.2	56.1	56.3	56.4	56.7	5.9.1994	46.3	47.3	56.2	56.3	56.2	56.7			
27.5.1994	30.8	40.5	56.1	56.3	56	56.5	56.2	56.6	6.9.1994	49	49	56.5	56.3	57.3				
28.5.1994	29.7	40.4	56.1	56.1	56.3	56.2	56.3	56.7	7.9.1994	48.9	49	56.3	56.7	57.2				
29.5.1994	29.3	40.3	56.1	56.2	56.1	56.2	56.3	56.8	8.9.1994	48.9	48.7	56.2	56.4	57				
30.5.1994	33.5	40.2	56.1	56.2	56	56.6	56.2	56.9	9.9.1994	49.3	51.3							
31.5.1994	31.4	40.1	56.2	56.1	56.3	56.3	56.2	56.8	10.9.1994	49.4								
1.6.1994	30	39.9	56.1	56.1	56.2	56.3	56.4	56.7	11.9.1994	51.7								
2.6.1994	29.4	39.8	56.2	56.2	56.1	56.3	56.2	56.8	12.9.1994	51.7								
3.6.1994	29.7	39.6	56.2	56.1	56.4	56.2	56.2	56.7	13.9.1994	51.7								
4.6.1994	33.1	39.5	56.2	56.2	56.1	56.2	56.5	56.9	14.9.1994	51.7								
5.6.1994	31.1	39.4	56	56.3	56.1	56.2	56.4	56.9	15.9.1994	51.7								
6.6.1994	29.9	39.3	56.2	56.2	56.4	56.2	56.3	56.7	16.9.1994	51.7								
7.6.1994	29.4	39.1	56.1	56.2	56.2	56.3	56.3	56.8	17.9.1994	51.7								
8.6.1994	29.2	39	56.2	56.1	56.3	56.1	56.3	56.9	18.9.1994	51.7								
9.6.1994	32.3	38.9	56	56.2	56.2	56.4	56.3	57	19.9.1994	51.7								
10.6.1994	30.6	38.7	56.2	56.2	56.1	56.2	56.4	56.9	20.9.1994	49.8								
11.6.1994	29.6	38.6	56.4	56	56.3	56.2	56.5	56.7	21.9.1994	49.1	50.7							
12.6.1994	29.3	38.5	56.3	56	56.3	56.3	56.3	56.8	22.9.1994	48.9	49.2	57.9						
13.6.1994	29.1	38.4	56.2	56	56.3	56.3	56.2	56.9	23.9.1994	48.9	49.6	56.2	57.8					
14.6.1994	29.1	38.6	56.2	56.1	56.2	56.3	56.4	56.8	24.9.1994	49.1	48.9	56.2	56.7					
15.6.1994	29.1	38.5	56	56.5	56	56.2	56.2	56.8	25.9.1994	48.8	48.9	56.1	56.5	57.1				
16.6.1994	37.3	38.4	56.1	56.3	56.1	56.4	56.3	57.2	26.9.1994	48.8	48.9	56.2	56.2	56.4	57.5			
17.6.1994	36.5	38.4	56.1	56.1	56.1	56.4	56.5	57.2	27.9.1994	49.1	48.3	56.5	56.3	56.4	57.7			
18.6.1994	33.8	38.4	56.1	56.2	56.3	56.1	56.3	57.3	28.9.1994	49.1	49.5	58						
19.6.1994	34.3	38.3	56	56.5	56	56.3	56.3	57.3	29.9.1994	49.2	49.2	56.5						
20.6.1994	32.6	38.2	56.2	56.1	56.1	56.4	56.2	57.3	30.9.1994	48.9	49.4	56.2	56.9					
21.6.1994	30.8	38.1	56.1	56.1	56.3	56.3	56.2	57.2	1.10.1994	51.7								
22.6.1994	45.9	38.3	56.1	56.2	56.4	56.3	56.4	57.8	2.10.1994	51.7								
23.6.1994	42.9	38.4	56.2	56.1	56.3	56.4	56.5	57.6	3.10.1994	51.7								
24.6.1994	40.2	38.5	56.2	56	56.5	56.2	56.3	57.7	4.10.1994	51.7								
25.6.1994	37.7	38.5	56.1	56.2	56.3	56.2	56.4	57.7	5.10.1994	49.8								
26.6.1994	41.9	38.6	56.1	56.3	56.1	56.3	56.5	57.8	6.10.1994	49.7								
27.6.1994	39.2	38.6	56.2	56.2	56.2	56.3	56.4	57.7	7.10.1994	51.7								
28.6.1994	36.7	38.7	56.3	56.1	56.2	56.4	56.2	57.8	8.10.1994	51.4								
29.6.1994	34	38.7	56.3	55.8	56.6	56.2	56.5	57.4	9.10.1994	50.3								
30.6.1994	33	38.6	56.3	55.9	56.3	56.2	56.5	57.7	10.10.1994	49.9								
1.7.1994	31.1	38.5	56	56.5	56.1	56.2	56.4	57.6	11.10.1994	51.7								
2.7.1994	29.9	38.4	56.2	56.2	56.3	56.2	56.6	57.3	12.10.1994	51.7								
3.7.1994	29.3	38.5	56.2	56.4	56.1	56.2	56.3	57.4	13.10.1994	51.7								
4.7.1994	29.2	38.4	56.1	56.3	56.2	56.4	56.5	57.1	14.10.1994	51.4								
5.7.1994	29.1	38.3	56.4	56	56.4	56.1	56.3	57.3	15.10.1994	50.9								
6.7.1994	29	38.2	56	56.4	56.2	56.2	56.4	57.1	16.10.1994	49.9								
7.7.1994	29	38.1	56.1	56.3	56.2	56.2	56.4	57.2	17.10.1994	49.2	51.6							
8.7.1994	29	37.9	56.2	56.1	56.2	56.3	56.3	57	18.10.1994	48.9	51							
9.7.1994	29	37.8	56.1	56.2	56.1	56.6	56.2	56.9	19.10.1994	48.9	50.2							
10.7.1994	29	37.7	56.2	56	56.3	56.1	56.4	57	20.10.1994	49	49.5							
11.7.1994	29	37.6	56.2	56	56.3	56.2	56.4	56.8	21.10.1994	49	49.5	57.4						
12.7.1994	29	37.5	56.2	56	56.4	56.1	56.4	56.8	22.10.1994	48.9	49.3	56.8						
13.7.1994	29	37.4	56.2	56.1	56.2	56.2	56.4	56.7	23.10.1994	48.9	49.1	56.5	57.7					
14.7.1994	29	37.3	56.2	56	56.2	56.4	56.3	56.7	24.10.1994	49.2	49.1	56.6	58					
15.7.1994	29	37.2	56.2	56.1	56.1	56.3	56.4	56.5	25.10.1994	49.1	49.6	56.5	57.5					
16.7.1994	29	37.2	56.1	56.2	56.1	56.2	56.2	56.7	26.10.1994	50.1								
17.7.1994</																		

1.5.1994	0.11					11.8.1994	0.26	0.39	0.05	
2.5.1994	0.12	0.1				12.8.1994	0.36	0.39	0.05	
3.5.1994	0.12	0.11	0.1	0.03		13.8.1994	0.27	0.39	0.04	
4.5.1994	0.2	0.13	0.11	0.03		14.8.1994	0.37	0.39	0.04	
5.5.1994	0.26	0.13	0.1	0.11	0	15.8.1994	0.46	0.39	0.05	
6.5.1994	0.36	0.13	0.11	0.09	0	16.8.1994	0.65	0.39	0.05	
7.5.1994	0.45	0.14	0.11	0.1	0	17.8.1994	0.66	0.39	0.05	
8.5.1994	0.65	0.14	0.11	0.1	0	18.8.1994	0.69	0.39	0.05	
9.5.1994	0.65	0.15	0.1	0.1	0.01	19.8.1994	0.73	0.39	0.06	
10.5.1994	0.66	0.18	0.11	0.1	0.01	20.8.1994	0.76	0.39	0.06	
11.5.1994	0.7	0.21	0.1	0.09	0.02	21.8.1994	0.76	0.39	0.06	
12.5.1994	0.72	0.24	0.1	0.1	0.01	22.8.1994	0.76	0.39	0.06	
13.5.1994	0.74	0.26	0.11	0.09	0.01	23.8.1994	0.77	0.39	0.07	
14.5.1994	0.75	0.28	0.1	0.1	0.02	24.8.1994	0.77	0.39	0.07	
15.5.1994	0.76	0.3	0.11	0.09	0.02	25.8.1994	0.77	0.39	0.07	
16.5.1994	0.76	0.31	0.1	0.1	0.02	26.8.1994	0.77	0.39	0.07	
17.5.1994	0.76	0.32	0.1	0.1	0.02	27.8.1994	0.77	0.39	0.08	
18.5.1994	0.76	0.33	0.11	0.09	0.02	28.8.1994	0.36	0.39	0.02	
19.5.1994	0.76	0.33	0.1	0.1	0.02	29.8.1994	0.09	0.1	0.02	
20.5.1994	0.66	0.34	0.1	0.1	0	30.8.1994	0			
21.5.1994	0.65	0.34	0.11	0.08		31.8.1994	0.03			
22.5.1994	0.66	0.34	0.1	0.09		1.9.1994	0.11	0.03		
23.5.1994	0.44	0.34	0.1	0.06		2.9.1994	0.12	0.11	0.04	
24.5.1994	0.65	0.34	0.1	0.06		3.9.1994	0.12	0.1	0.11	0.07
25.5.1994	0.65	0.34	0.1	0.06		4.9.1994	0.04			
26.5.1994	0.68	0.35	0.1	0.06		5.9.1994	0.09			
27.5.1994	0.73	0.35	0.11	0.06		6.9.1994	0			
28.5.1994	0.75	0.35	0.1	0.07		7.9.1994	0			
29.5.1994	0.76	0.36	0.11	0.06		8.9.1994	0			
30.5.1994	0.66	0.36	0.11	0.04		9.9.1994	0			
31.5.1994	0.71	0.36	0.09	0.06		10.9.1994	0			
1.6.1994	0.74	0.36	0.11	0.05		11.9.1994	0			
2.6.1994	0.76	0.36	0.1	0.05		12.9.1994	0			
3.6.1994	0.75	0.37	0.1	0.06		13.9.1994	0			
4.6.1994	0.67	0.37	0.1	0.04		14.9.1994	0			
5.6.1994	0.72	0.37	0.11	0.03		15.9.1994	0			
6.6.1994	0.75	0.37	0.11	0.03		16.9.1994	0			
7.6.1994	0.76	0.37	0.1	0.04		17.9.1994	0			
8.6.1994	0.76	0.37	0.1	0.04		18.9.1994	0			
9.6.1994	0.69	0.38	0.11	0.02		19.9.1994	0			
10.6.1994	0.73	0.38	0.11	0.02		20.9.1994	0.04			
11.6.1994	0.75	0.38	0.11	0.02		21.9.1994	0.1			
12.6.1994	0.76	0.38	0.11	0.02		22.9.1994	0.11	0.05		
13.6.1994	0.76	0.38	0.09	0.04		23.9.1994	0.12	0.09		
14.6.1994	0.77	0.38	0.11	0.03		24.9.1994	0.11	0.1	0.08	
15.6.1994	0.77	0.38	0.11	0.03		25.9.1994	0.12	0.11	0.09	0.04
16.6.1994	0.65	0.38	0.1	0		26.9.1994	0.12	0.12	0.11	0.09
17.6.1994	0.65	0.38	0.1			27.9.1994	0.12	0.12	0.1	0.05
18.6.1994	0.66	0.38	0.1	0		28.9.1994	0.04	0.03		
19.6.1994	0.66	0.38	0.09			29.9.1994	0.11	0.02		
20.6.1994	0.68	0.38	0.09			30.9.1994	0.12	0.07		
21.6.1994	0.73	0.38	0.09			1.10.1994	0			
22.6.1994	0.24	0.38	0.04			2.10.1994	0			
23.6.1994	0.34	0.38	0.04			3.10.1994	0			
24.6.1994	0.44	0.38	0.05			4.10.1994	0			
25.6.1994	0.65	0.38	0.05			5.10.1994	0.04			
26.6.1994	0.38	0.38	0.03			6.10.1994	0.03			
27.6.1994	0.47	0.38	0.03			7.10.1994	0			
28.6.1994	0.65	0.38	0.04			8.10.1994	0			
29.6.1994	0.66	0.38	0.04			9.10.1994	0			
30.6.1994	0.66	0.38	0.04			10.10.1994	0			
1.7.1994	0.72	0.38	0.04			11.10.1994	0			
2.7.1994	0.75	0.38	0.04			12.10.1994	0			
3.7.1994	0.76	0.38	0.04			13.10.1994	0			
4.7.1994	0.76	0.38	0.05			14.10.1994	0			
5.7.1994	0.77	0.38	0.05			15.10.1994	0			
6.7.1994	0.77	0.38	0.05			16.10.1994	0			
7.7.1994	0.77	0.38	0.05			17.10.1994	0.01			
8.7.1994	0.77	0.38	0.06			18.10.1994	0.02			
9.7.1994	0.77	0.38	0.06			19.10.1994	0.04			
10.7.1994	0.77	0.38	0.06			20.10.1994	0.06			
11.7.1994	0.77	0.39	0.06			21.10.1994	0.07			
12.7.1994	0.77	0.39	0.07			22.10.1994	0.09			
13.7.1994	0.77	0.39	0.07			23.10.1994	0.11	0		
14.7.1994	0.77	0.39	0.07			24.10.1994	0.08			
15.7.1994	0.77	0.39	0.07			25.10.1994	0.08			
16.7.1994	0.77	0.39	0.08			26.10.1994	0			
17.7.1994	0.77	0.39	0.08			27.10.1994	0			
18.7.1994	0.77	0.39	0.08			28.10.1994	0			
19.7.1994	0.77	0.39	0.08			29.10.1994	0			
20.7.1994	0.77	0.39	0.09			30.10.1994	0			
21.7.1994	0.77	0.39	0.09			31.10.1994	0			
22.7.1994	0.77	0.39	0.09			1.11.1994	0			
23.7.1994	0.77	0.39	0.09			2.11.1994	0			
24.7.1994	0.77	0.39	0.1			3.11.1994	0			
25.7.1994	0.77	0.39	0.1	0		4.11.1994	0			
26.7.1994	0.77	0.39	0.1	0		5.11.1994	0.02			
27.7.1994	0.77	0.39	0.1	0		6.11.1994	0.02			
28.7.1994	0.77	0.39	0.1	0		7.11.1994	0.05			
29.7.1994	0.77	0.39	0.1	0		8.11.1994	0.07			
30.7.1994	0.77	0.39	0.1	0.01		9.11.1994	0.1			
31.7.1994	0.77	0.39	0.1	0.01		10.11.1994	0.1	0.02		
1.8.1994	0.77	0.39	0.1	0.01		11.11.1994	0.11	0.04		
2.8.1994	0.77	0.39	0.1	0.01		12.11.1994	0.11	0.07		
3.8.1994	0.77	0.39	0.11	0.01		13.11.1994	0.12	0.09		
4.8.1994	0.77	0.39	0.11	0.01		14.11.1994	0.09	0.04		
5.8.1994	0.77	0.39	0.11	0.01		15.11.1994	0			
6.8.1994	0.76	0.39	0.11	0.01		16.11.1994	0.01			
7.8.1994	0.45	0.39	0.08			17.11.1994	0.01			
8.8.1994	0.65	0.39	0.08			18.11.1994	0.03			
9.8.1994	0.66	0.39	0.08			19.11.1994	0.05			
10.8.1994	0.16	0.39	0.04			20.11.1994	0			
						21.11.1994	0			
						22.11.1994	0			
						23.11.1994	0			
						24.11.1994	0			
						25.11.1994	0			
						26.11.1994	0			
						27.11.1994	0			
						28.11.1994	0			
						29.11.1994	0			
						30.11.1994	0			

Kerrostien halkeamatilavuudet alkuperäisillä K-arvoillalaskettuna

1.5.1994	0,31	0,17	0,11	0,11	0,11	0,09	0,10	0,07	11.8.1994	0,32	0,65	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	-
2.5.1994	0,40	0,18	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,05	12.8.1994	0,41	0,65	0,11	0,11	0,12	0,08	0,11	0,09	-
3.5.1994	0,48	0,20	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,06	13.8.1994	0,43	0,65	0,12	0,11	0,11	0,09	0,11	0,09	-
4.5.1994	0,65	0,23	0,10	0,12	0,11	0,11	0,10	0,06	14.8.1994	0,43	0,65	0,12	0,10	0,11	0,10	0,10	0,09	-
5.5.1994	0,65	0,27	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,07	15.8.1994	0,65	0,65	0,11	0,12	0,10	0,11	0,10	0,09	-
6.5.1994	0,66	0,31	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,07	16.8.1994	0,65	0,65	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	-
7.5.1994	0,67	0,34	0,12	0,10	0,10	0,12	0,10	0,08	17.8.1994	0,66	0,65	0,11	0,10	0,11	0,11	0,10	0,09	0,01
8.5.1994	0,71	0,37	0,11	0,10	0,12	0,11	0,09	0,09	18.8.1994	0,71	0,65	0,11	0,12	0,10	0,11	0,11	0,09	-
9.5.1994	0,73	0,38	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	19.8.1994	0,74	0,65	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	-
10.5.1994	0,75	0,39	0,11	0,11	0,12	0,09	0,11	0,09	20.8.1994	0,76	0,65	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,09	-
11.5.1994	0,76	0,39	0,12	0,11	0,10	0,11	0,10	0,09	21.8.1994	0,76	0,65	0,11	0,13	0,09	0,12	0,11	0,09	-
12.5.1994	0,76	0,39	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	22.8.1994	0,76	0,65	0,12	0,10	0,12	0,11	0,11	0,09	-
13.5.1994	0,76	0,40	0,12	0,10	0,13	0,08	0,12	0,10	23.8.1994	0,76	0,65	0,12	0,10	0,12	0,10	0,10	0,10	0,01
14.5.1994	0,76	0,40	0,10	0,12	0,10	0,12	0,09	0,10	24.8.1994	0,76	0,65	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,10	0,01
15.5.1994	0,76	0,40	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,09	25.8.1994	0,76	0,65	0,12	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,01
16.5.1994	0,76	0,41	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	26.8.1994	0,76	0,65	0,11	0,10	0,12	0,10	0,11	0,09	0,03
17.5.1994	0,76	0,41	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	27.8.1994	0,76	0,65	0,12	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,01
18.5.1994	0,76	0,42	0,11	0,12	0,10	0,11	0,08	0,11	28.8.1994	0,36	0,65	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08	-
19.5.1994	0,76	0,42	0,11	0,12	0,10	0,11	0,09	0,09	29.8.1994	0,12	0,25	0,11	0,11	0,11	0,09	0,10	0,06	-
20.5.1994	0,66	0,42	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	30.8.1994	0,12	0,12	0,10	0,11	0,09	0,07	-	-	-
21.5.1994	0,65	0,43	0,11	0,10	0,12	0,10	0,10	0,09	31.8.1994	0,20	0,14	0,10	0,12	0,08	0,08	-	-	-
22.5.1994	0,66	0,43	0,11	0,11	0,12	0,09	0,10	0,09	1.9.1994	0,30	0,15	0,11	0,11	0,09	0,08	-	-	-
23.5.1994	0,44	0,43	0,11	0,11	0,11	0,09	0,11	0,07	2.9.1994	0,39	0,16	0,11	0,10	0,10	0,08	-	-	-
24.5.1994	0,65	0,43	0,11	0,11	0,11	0,09	0,11	0,07	3.9.1994	0,46	0,18	0,11	0,11	0,11	0,08	-	-	-
25.5.1994	0,65	0,43	0,11	0,11	0,12	0,08	0,10	0,08	4.9.1994	0,18	0,18	0,11	0,10	0,10	0,08	-	-	-
26.5.1994	0,67	0,43	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,08	5.9.1994	0,22	0,18	0,11	0,10	0,10	0,11	-	-	-
27.5.1994	0,72	0,43	0,11	0,10	0,12	0,09	0,11	0,08	6.9.1994	0,11	0,11	0,09	0,10	0,04	-	-	-	-
28.5.1994	0,75	0,44	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,08	7.9.1994	0,12	0,12	0,10	0,08	0,05	-	-	-	-
29.5.1994	0,76	0,44	0,11	0,11	0,12	0,10	0,10	0,08	8.9.1994	0,12	0,13	0,11	0,10	0,06	-	-	-	-
30.5.1994	0,66	0,44	0,11	0,11	0,12	0,08	0,11	0,07	9.9.1994	0,10	0,01	-	-	-	-	-	-	-
31.5.1994	0,71	0,45	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,07	10.9.1994	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-
1.6.1994	0,74	0,45	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08	11.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.6.1994	0,76	0,46	0,11	0,11	0,12	0,10	0,11	0,07	12.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.6.1994	0,75	0,46	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,07	13.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.6.1994	0,66	0,47	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,06	14.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.6.1994	0,71	0,47	0,12	0,10	0,11	0,10	0,10	0,06	15.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.6.1994	0,74	0,48	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,08	16.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.6.1994	0,76	0,48	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,07	17.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8.6.1994	0,76	0,48	0,11	0,12	0,10	0,11	0,10	0,07	18.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.6.1994	0,68	0,49	0,12	0,11	0,11	0,09	0,10	0,06	19.9.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.6.1994	0,73	0,49	0,11	0,10	0,11	0,11	0,09	0,06	20.9.1994	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-
11.6.1994	0,75	0,49	0,10	0,12	0,10	0,11	0,09	0,07	21.9.1994	0,11	0,04	-	-	-	-	-	-	-
12.6.1994	0,76	0,50	0,10	0,12	0,10	0,10	0,10	0,07	22.9.1994	0,12	0,11	-	-	-	-	-	-	-
13.6.1994	0,76	0,50	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,07	23.9.1994	0,12	0,09	0,11	0,01	-	-	-	-	-
14.6.1994	0,76	0,65	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	24.9.1994	0,11	0,12	0,11	0,08	-	-	-	-	-
15.6.1994	0,76	0,65	0,12	0,09	0,12	0,11	0,11	0,07	25.9.1994	0,12	0,12	0,11	0,09	0,05	-	-	-	-
16.6.1994	0,65	0,65	0,11	0,10	0,11	0,09	0,10	0,05	26.9.1994	0,12	0,12	0,11	0,11	0,09	0,03	-	-	-
17.6.1994	0,65	0,65	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,05	27.9.1994	0,11	0,14	0,09	0,10	0,09	0,02	-	-	-
18.6.1994	0,66	0,65	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,04	28.9.1994	0,11	0,09	-	-	-	-	-	-	-
19.6.1994	0,66	0,65	0,12	0,09	0,12	0,10	0,10	0,04	29.9.1994	0,11	0,11	0,09	-	-	-	-	-	-
20.6.1994	0,67	0,65	0,11	0,11	0,11	0,09	0,11	0,04	30.9.1994	0,12	0,10	0,11	0,06	-	-	-	-	-
21.6.1994	0,72	0,65	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,05	1.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22.6.1994	0,24	0,65	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,01	2.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23.6.1994	0,35	0,50	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,03	3.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24.6.1994	0,44	0,50	0,11	0,12	0,09	0,11	0,10	0,02	4.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.6.1994	0,65	0,50	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,02	5.10.1994	0,08	-	-	-	-	-	-	-	-
26.6.1994	0,38	0,50	0,11	0,10	0,11	0,10	0,09	0,01	6.10.1994	0,09	-	-	-	-	-	-	-	-
27.6.1994	0,48	0,49	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,02	7.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28.6.1994	0,65	0,49	0,10	0,12	0,11	0,10	0,11	0,01	8.10.1994	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
29.6.1994	0,66	0,49	0,10	0,13	0,09	0,11	0,09	0,04	9.10.1994	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-
30.6.1994	0,66	0,50	0,10	0,12	0,10	0,11	0,09	0,02	10.10.1994	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-
1.7.1994	0,71	0,50	0,12	0,09	0,11	0,11	0,10	0,03	11.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.7.1994	0,74	0,50	0,11	0,11	0,10	0,11	0,09	0,04	12.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,04	13.10.1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,10	0,11	0,10	0,09	0,05	14.10.1994	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
5.7.1994	0,76	0,65	0,10	0,12	0,10	0,11	0,10	0,04	15.10.1994	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
6.7.1994	0,76	0,65	0,12	0,09	0,11	0,11	0,09	0,06	16.10.1994	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-
7.7.1994	0,76	0,65	0,12	0,10	0,11	0,11	0,10	0,05	17.10.1994	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-
8.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,06	18.10.1994	0,12	0,03	-	-	-	-	-	-	-
9.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,11	0,11	0,08	0,10	0,07	19.10.1994	0,12	0,06	-	-	-	-	-	-	-
10.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,12	0,10	0,11	0,10	0,06	20.10.1994	0,11	0,09	-	-	-	-	-	-	-
11.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,12	0,10	0,11	0,10	0,07	21.10.1994	0,11	0,09	0,04	-	-	-	-	-	-
12.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,12	0,10	0,11	0,09	0,07	22.10.1994	0,12	0,10	0,07	-	-	-	-	-	-
13.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,08	23.10.1994	0,12	0,11	0,09	0,02	-	-	-	-	-
14.7.1994	0,76	0,65	0,11	0,12	0,11	0,10	0,10	0,08	24.10.1994	0,11	0,							