



Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA)

Loppuraportti 2017

Helena Äijö, Merja Myllys, Markus Sikkilä, Heidi Salo, Jyrki Nurminen,
Olle Häggblom, Mika Turunen, Maija Paasonen-Kivekäs, Lassi Warsta,
Harri Koivusalo, Laura Alakukku ja Markku Puustinen



Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA)

Loppuraportti 2017

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 32

Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA)

Loppuraportti 2017

Helena Äijö, Merja Myllys, Markus Sikkilä, Heidi Salo, Jyrki Nurminen,
Olle Häggblom, Mika Turunen, Maija Paasonen-Kivekäs, Lassi Warsta,
Harri Koivusalo, Laura Alakukku ja Markku Puustinen

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry

Simonkatu 12 A II

00100 Helsinki

puh. (09) 694 2100

fax (09) 694 2677

Päätoimittaja Helena Äijö
Etukansi Hyvin muodostunut salaojakaivanto, Sievi.
Taitto DTPage Oy
Painopaikka Grano Oy, Helsinki 2017
Web www.salaojayhdistys.fi/julkaisut

ISBN 978-952-5345-37-7

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	5
Tiivistelmä	6
Referat.....	9
Abstract	13
I JOHDANTO.....	17
1.1 Tausta.....	17
1.2 Tavoitteet ja toteutus	18
1.3 Salaojakonetyypit ja aiemmat tutkimukset niiden toimivuudesta	19
2 TUTKIMUSMENETELMÄT	23
2.1 Nummelan koekenttä.....	23
2.2 Sievin koekenttä.....	25
2.3 Salaojien ympärysaineet.....	30
2.4 Vesitaseen ja eroosion matemaattinen mallintaminen	31
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	36
3.1 Täydennysojituksen vaikutukset Nummelan koekentällä.....	36
3.2 Eri salaojakonetyypeillä tehtyjen ojitusten toimivuus Sievin koekentällä	59
3.3 Salaojien ympärysaineet.....	67
3.4 Mallintamistulokset.....	74
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	83
Kirjallisuusviitteet.....	87
Liitteet	91
Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedotteet.....	109

Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA)

Loppuraportti 2017

Esipuhe

Vuosina 2006–2013 toteutettiin tutkimushankkeet PVO (Pellon vesitalouden optimointi) ja PVO2 (Salaojitusmekaniikat ja pellon vesitalouden optimointi). TOSKA-hankkeessa (2014–2016) hyödynnettiin ja syvennettiin näissä tutkimuksissa saatuja tuloksia. Kokonaan uutena osiona oli kaivavalla salaojakoneella ja aurasalaojakoneella tehtyjen ojitusten toimivuutta tutkiva osahanke. Tässä loppuraportissa esitetään tutkimushankkeen ”Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa” (TOSKA) lähtökohdat, tavoitteet, käytetyt tutkimusmenetelmät sekä tulokset ja johtopäätökset. Nummelan koekentän osalta esitetään myös PVO-hankkeiden tuloksia vuosilta 2007–2013.

Luvussa 1 esitetään hankkeen tausta ja tavoitteet ja luvussa 2 käsitellään neljässä osaprojektissa käytetyt tutkimusmenetelmät. Tulokset ja niiden tarkastelu on esitetty luvussa 3 ja johtopäätökset on koottu lukuun 4.

Hankkeen ohjausryhmä koostui seuraavista henkilöistä: Ville Keskinen puheenjohtaja (MMM), Sanna Koivumäki (MMM), Sini Wallenius (MMM), Airi Kulmala (MTK), Juha-Pekka Triipponen (Varsinais-Suomen ELY-keskus), Teemu Kokkonen (Aalto-yliopisto), Mika Mikkola (Maveplan Oy), Sari Peltonen (ProAgria) ja Seija Virtanen (Salaojituksen Tukisäätiö sr).

Tutkimus toteutettiin yhteistutkimushankkeena ja siitä vastasi Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry. Tutkimusryhmässä ovat toimineet Helena Äijö (Salaojayhdistys ry) tutkimuksen vastuullisena johtajana, Merja Mylly (MTT / Luonnonvarakeskus), Markus Sikkilä (Salaojayhdistys ry), Heidi Salo (Aalto-yliopisto), Jyrki Nurminen (Salaojayhdistys ry / Salaojituksen tutkimusyhdistys ry), Olle Häggblom (Aalto-yliopisto), Mika Turunen (Aalto-yliopisto), Maija Paasonen-Kivekäs (Sven Hallinin tutkimussäätiö sr), Lassi Warsta (Aalto-yliopisto / Gain Oy), Harri Koivusalo (Aalto-yliopisto), Laura Alakukku (Helsingin yliopisto) ja Markku Puustinen (Suomen ympäristökeskus).

TOSKA-hanketta ovat rahoittaneet Salaojituksen Tukisäätiö sr, maa- ja metsätalousministeriö, Maa- ja vesitekniikan tuki ry ja hankkeen toteutuksesta vastanneet laitokset: Salaojayhdistys ry, MTT/Luke, Aalto-yliopisto, SYKE, Helsingin yliopisto ja Sven Hallinin tutkimussäätiö sr.

Kiitämme kaikkia myönteisestä suhtautumisesta tutkimushankkeeseen ja hankkeen hyväksi tehdystä työstä sekä tutkimuksen rahoittajia.

Tiivistelmä

”Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa” (TOSKA) -hankkeessa tutkittiin salaojien ojavälin vaikutuksia pellon hydrologiaan, ravinnehuuhtoumiin ja satoon. Lisäksi selvitettiin kaivavalla salaojakoneella ja aurasalaojakoneella tehtyjen salaojitusten sekä eri ympärysaineiden toimivuutta. Hankkeessa kehitettiin ja sovellettiin Aalto-yliopistossa kehitettyä matemaattista FLUSH-mallia siten, että se soveltuu erilaisten ojitusten lyhyt- ja pitkäaikaisten vaikutusten arviointiin. Hanke toteutettiin vuosina 2014–2016, ja se oli jatkoa PVO- ja PVO2-hankkeille.

Nummellan koekentällä Jokioisissa ojavälin vaikutuksia savimaalla tutkittiin kahdella täydennysojitusalueella, joiden ensiojitus oli tehty 1950-luvulla. Alueista toinen oli täydennysojitettu (ojaväli 16 m → 8 m) kesäkuussa 2008. Toinen märkyydestä selvästi kärsinyt 32 metrin ojavälin alue täydennysojitettiin TOSKA-hankkeessa kesäkuussa 2014, jolloin ojaväliksi tuli 10,7 m. Molemmat täydennysojitukset tehtiin kaivavalla salaojakoneella ja ympärysaineena käytettiin soraa ja lisäksi sorasilmäkkeitä. Täydennysojitusten (16 m → 8 m ja 32 m → 10,7 m) vaikutuksia pellon kuivatustilaan arvioitiin vertaamalla ojitettujen alueiden salaojavaluntaa alkuperäisojituksen alueen (16 m) valuntaan ja pohjavedenpinnan syvyyteen. Mittauksia tehtiin myös neljännellä koealueella, joka oli uusintaojitettu kesäkuussa 2008.

Täydennysojitukset lisäsivät selvästi salaojavaluntaa. Ojavälin puolittaminen (16 m → 8 m) lisäsi vuotuista salaojavaluntaa keskimäärin 1,8-kertaiseksi (vaihteluväli 1,2–2,3) suhteessa vertailualueeseen (16 m). Harvan ojavälin tihentäminen kolmasosaan (32 m → 10,7 m) lisäsi salaojavaluntaa keskimäärin 1,4-kertaiseksi (vaihteluväli 1,2–1,5) 16 m ojavälin alueeseen verrattuna. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan yhteenlaskettu osuus sadannasta kasvoi ojitusta edeltäneeseen verrattuna molemmilla alueilla, 1,1-kertaiseksi (8 m ojitus) ja 1,4-kertaiseksi (10,7 m ojitus). Laskennallisesti pohjavesivalunnan osuus vesitaseesta oli 32 m ojavälillä 29 % ja 10,7 m ojavälillä 24 %. Pohjavesimittaukset osoittivat täydennysojituksen (32 m → 10,7 m) parantaneen märkyydestä kärsineen alueen kuivatustilaa, niin että kevään viljelytoimet olisi mahdollista aloittaa keskimäärin noin viikkoa aikaisemmin kuin 16 metrin ojavälin alueella.

Merkittävä osa koealueiden ravinne- ja kiintoainekuormituksesta valtaosaan tuli salaojien kautta niin ennen täydennysojituksia kuin niiden jälkeenkin. Mitatuista vuotuisista (salaojat+pintakerros) ravinne- ja kiintoainekuormista salaojien osuus oli 6, 8, 10,7 ja 16 metrin ojaväleillä 75–90 % ja 32 metrin ojavälillä 50–60 %. Täydennysojituksista seurannut salaojavalunnan lisääntyminen näkyi koealueilla kuormituksen kasvuna. Vertailualueeseen (16 m) nähden vuotuinen kuormitus lisääntyi 1,1–2,6-kertaiseksi. Täydennysojituksen vaikutus valumavesien ravinne- ja kiintoainepitoisuuksiin oli vähäinen. Kokonaistyyppipitoisuuden lyhytaikaista (1–2 v.) nousua lukuun ottamatta täydennysojitus ei lisännyt salaojaveden pitoisuuksia.

Nummellan koealueiden sadot olivat suhteellisen matalia. Heikko satotaso johtunee huonosta viljavuudesta, erityisesti märkyydestä kärsineellä harvan (32 m) ojavälin alueel-

la. Ojavälin tihentäminen ei näkynyt sadon määrässä tai laadussa, kun kylvöaika oli sama kaikilla koealueilla. Sadot olivat keskimäärin hieman paremmat salaojien kohdalla kuin ojien välissä.

Nummelan koekentän tutkimustulokset osoittavat, että heikkotuottoisen pellon vesitalous ja muut tuottokykyyn vaikuttavat tekijät tulee selvittää ennen ojituspäätöstä. Nykyisten suositusten mukainen 10–14 metrin ojaväli savimaille on mittaustulosten pohjalta sopiva. Liian tiheää ojaväliä tulee välttää, koska se lisää kustannuksia ja saattaa lisätä pellolta tulevia ravinne- ja kiintoainehuuhtoumia lisääntyneen salaojavalunnan myötä. Jos pellon viljavuus on huono, kannattaa ojitusten yhteydessä tehdä myös viljavuutta parantavia toimenpiteitä, sillä kuivatustilan parantaminen ei yksin riitä satotason nostamiseksi. Ojitus vaikuttaa hietaasti savimaan rakenteeseen, joten ojituksen lisäksi tarvitaan muita toimenpiteitä, kuten syväjuurisia kasveja kasvinvuorotuksessa, parantamaan maan rakennetta. On syytä kehittää toimenpiteitä salaojien kautta tulevan kuormituksen vähentämiseksi.

Sievin koekentän hieta-/hiuemaassa ojitukset toteutettiin kaivavalla salaojakoneella ja aurakoneella alkujaan avo-ojitetulle peltoalueelle. Kaivantojen leveys ja syvyys sekä täyttömateriaali vastasivat toisiaan molemmissa menetelmissä. Puolentoista vuoden mittausten mukaan kaivavalla salaojakoneella tehty salaojitus kuivatti pellon hieman aurakoneella tehtyä tehokkaammin. Aurakoneella tehdyissä salaojituksissa pohjaveden pinta oli salaojien yläpuolella olevista havainnoista keskimäärin 6–13 cm korkeammalla ja salaojavalunta oli 10 % pienempi. Ero ei näyttäisi olevan merkittävä 1,5 vuoden mittausten perusteella, sillä pohjavedenpinnan syvyyksissä esiintyi eroja myös samalla konetyypillä ojitettujen koealueiden välillä. Rehuohrasato vuonna 2016 vaihteli alueellisesti Sievin koekentällä 3500–5300 kg ha⁻¹ välillä. Sato oli keskimäärin salaojan kohdalla 6 % suurempi kuin 7,5 m etäisyydellä salaojasta. Erityyppisten salaojakoneiden ojitukset eivät aiheuttaneet eroja sadoissa tai pellon viljeltävyydessä.

Esille kaivetut kaivannot eri pelloilla (30 peltoa) antoivat viitteitä siitä, että juoksevilla ja huonosti läpäisevillä mailla salaojakaivannon vedenläpäisevyys on huono, mikäli kaivantoa ei ole täytetty läpäisevällä materiaalilla. Tämä korostuu erityisesti aurakoneella, jolla salaojakaivantoa ei kaiveta auki eikä huonosti läpäisevää maata poisteta kaivannosta. Salaojakaivannon täyttö läpäisevällä materiaalilla on koneen varustuksesta riippuen mahdollista molemmilla menetelmillä. Ojitus määrässä maassa saattaa aiheuttaa maan tiivistymistä sekä vaikeuttaa kaivannon täytön ja putkien asennuksen onnistumista.

Tutkimus osoitti, että salaojakonetyyppiin ja sen varustukseen (mm. ruokamullan pudotin) tulee kiinnittää huomiota, sillä se vaikuttaa salaojakaivannon muodostumiseen. Salaojakaivannon hyvä vedenläpäisy tulee varmistaa erityisesti ojitettaessa tiiviillä maalla, jossa on kehittymätön rakenne. Työn aikana tulee huolehtia siitä, ettei kaivanto mene heti umpeen erityisesti koheesiottomilla mailla, kuten siltillä, jotka liikkuvat herkästi veden mukana. Märän maan ojittamista tulee välttää.

Salaojien ympärysaineiden (sora, Fibrella-suodatinkangas ja kookoskuitu) toimivuutta selvitettiin kaivamalla esiin yli 10 vuotta sitten tehtyjä ojituksia. Kohteita oli 30 kpl pääosin savi- ja hietamailla. Yli puolet tutkituista esipäälysteistä oli hajonnut lähes kokonaan. Eriasteisia tukkeumia havaittiin 12 kohteessa, joista suurin osa oli niitä, joissa esipäälyste oli hajonnut. Tukkeutuneet putket sijaitsivat pääosin hienojakoisten maalajien pelloilla, joiden joukossa oli myös savimaita. Näin ollen rakeisuuskäyrien alue, joka kuvaa niitä maalajeja,

joilla salaojien suodatintarve on suuri, tulisi ulottua hienojakoisimmille maille. Orgaanisen nopeasti hajoavan ympärysaineen käyttöä tulee välttää. Ongelmallisilla maalajeilla putken tukkeutumisen estämiseksi tulee selvittää uusien esipäälysteiden, kuten geotekstiilien, soveltuvuutta salaojitukseen.

Mallinnusosahankkeessa kehitettiin ja sovellettiin kolmiulotteista FLUSH-mallia, jolla kuvataan veden virtausta, eroosiota ja aineiden kulkeutumista peltomittakaavassa. Kaksoishuokossysteemiin pohjautuva mallikuvaus mahdollistaa veden virtauksen laskennan erikseen vettä heikosti johtavassa maamatriisissa ja oikovirtausreittejä kuvaavassa makrohuokossysteemissä.

Nummelan koekentällä mallilla tutkittiin erilaisten salaojakaivantojen ja ojavälien vaikutusta veden virtausreitteihin. Mallilaskelmista saatiin esille maaperän ominaisuuksien (makrohuokokset ja hydrauliset ominaisuudet), ojavälin ja kaivannon vaikutukset pellolla tapahtuvaan valuntaan (salaoja-, pintakerros- ja pohjavesivalunta) ja pohjavedenpinnan syvyyteen. Näistä erityisen tärkeä on pohjavesivalunta, jonka määrittäminen mittaamalla on vaikeaa. Mallilla pystyttiin tuottamaan pohjavedenpinnan todennäköisiä syvyyksiä pellon viljelylle kriittisinä aikoina. Simulointien mukaan maan ominaisuuksilla (hydraulinen johtavuus ja makrohuokoston määrä) oli ojitusmenetelmää (kaivanto ja ojaväli) suurempi vaikutus syksyn kokonaisvalunnan jakaantumiseen eri komponentteihin. Pohjavedenpinnan syvyyteen salaojien välissä ojaväli vaikutti enemmän kuin maan ominaisuudet. Simulaatioiden mukaan tiheä (10,8 m) ojaväli aikaistaa kevään peltotöitä (pohjavedenpinnan syvyys > 60 cm maanpinnasta) keskimäärin viidellä vuorokaudella harvaan (32 m) ojitukseen verrattuna. Pohjavesivalunnan osuus sadannasta oli merkittävä, jopa 30 %. Käytännössä mallilaskelmia voidaan hyödyntää salaojituksen kuivatustehokkuuden (ojaväli, ojasyvyys ja kaivannon täyttömateriaali) valinnassa.

Gårdskulla Gårdin kahdella koealueella Siuntiossa määritettiin monivuotisen mittausaineiston ja FLUSH-mallin avulla veden virtausreitit ja kiintoainetaseet. Mittaus- ja mallinnustulosten mukaan salaojavalunnan mukana kulkeutui huomattavasti enemmän kiintoainetta kuin pintakerrosvalunnan mukana sekä tasaiselta (1 %) että kaltevalta (5 %) savipelloilta. Laskenta osoitti, että etenkin kaltevalla peltolohkolla kuormitusta voi muodostua myös horisontaalisen pohjavesivalunnan kautta. Tulokset osoittavat, että salaojien kautta tulevan kiintoainekuormituksen vähentämiseen tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota.

TOSKA-hankkeen ja sitä edeltäneiden hankkeiden (PVO, PVO2) yhdeksän vuoden intensiivisten mittausten ja eri koealueiden matemaattisen mallinnuksen avulla on lisätty tietoa suomalaisten savipeltojen vesitaloudesta, salaojituksista, ravinnehuuhtoutumista ja eroosiosta sekä sadoista. Pohjois-Pohjanmaalla Sievin koekentällä tehdyt mittaukset 1,5 vuoden ajalta osoittivat, että eri salaojakonetyypeillä pystytään tekemään yhtä hyvin toimivia ojituksia, kun ne tehdään huolellisesti suositusten mukaan. Kenttäselvitykset 30 peltoalueella antoivat monipuolista tietoa salaojien ympärysaineista ja kaivannon merkityksestä sekä päätöksentekoa että käytännön työtä varten.

Asiasanat: salaojitus, ojaväli, ravinnehuuhtoumat, salaojakoneet, ympärysaine, sato, matemaattinen mallintaminen, kiintoainetase

Referat

Inom ramen för projektet ”Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa” (TOSKA, på svenska effektiva täckdikningsmetoder inom växtodlingen) undersöktes dikesavståndets inverkan på åkerns hydrologi, näringsutlakning och skörd. Dessutom undersöktes funktionen hos täckdikningar som gjorts med grävande täckdikningsmaskin jämfört med diken som anlagts med täckdikningsplog, samt funktionen hos olika kringfyllnadsmaterial. I projektet utvecklades och tillämpades en matematisk FLUSH-modell som tagits fram vid Aalto-universitetet, så att metoden lämpar sig för utvärdering av kort- och långsiktiga verkningar av olika täckdikningsmetoder. Projektet förverkligades 2014–2016 och var en fortsättning på projekten PVO och PVO2.

På försöksfältet Nummela i Jockis undersöktes dikesavståndets inverkan på lerjord på två kompletteringsdikade områden som täckdikats första gången på 1950-talet. Det ena området (dikesavstånd 16 m $\rightarrow$ 8 m) hade kompletteringsdikats i juni 2008. Det andra området, där dikesavståndet var 32 m och åkern tydligt led av väta, kompletteringstäckdikades inom TOSKA-projektet i juni 2014 och dikesavståndet blev 10,7 m. Båda kompletteringsdikningarna gjordes med en grävande täckdikningsmaskin och som kringfyllnadsmaterial användes grus, och dessutom anlades grusögon. Kompletteringsdikningarnas (16 m $\rightarrow$ 8 m och 32 m $\rightarrow$ 10,7 m) inverkan på åkerns torrläggning bedömdes genom att man jämförde avrinningen från de dikade områdena med avrinningen från den ursprungliga dikningen (16 m) och grundvattennivån. Mätningar gjordes också på ett fjärde försöksområde, som hade dikats om i juni 2008.

Kompletteringsdikningarna ökade klart avrinningen från täckdikena. En halvering av dikesavståndet (16 m $\rightarrow$ 8 m) ökade den årliga avrinningen från täckdikena i medeltal 1,8 gånger (variationsintervall 1,2–2,3) i förhållande till jämförelseområdet (16 m). Då ett gles dikning gjordes tre gånger tätare (32 m $\rightarrow$ 10,7 m) ökade avrinningen från täckdikningen med i medeltal 1,4 gånger (variationsintervall 1,2–1,5) jämfört med området där dikesavståndet var 16 m. Den sammanlagda andelen av ytavrinning och avrinning via täckdiken av nederbörden ökade jämfört med situationen före dikningen på båda områdena, med 1,1 gånger (8 m dikning) och med 1,4 gånger (10,7 m dikning). Matematiskt beräknat var grundvattenavrinningens andel av vattenbalansen 29 % där dikesavståndet var 32 m och 24 % där dikesavståndet var 10,7 m. Grundvattenmätningarna visade att kompletteringsdräneringen (32 m $\rightarrow$ 10,7 m) hade förbättrat torrläggningen på det område som lidit av väta så, att vårbruket kunde inledas i medeltal ca en vecka tidigare än på det område där dikesavståndet var 16 meter.

En betydande del av näringsämnes- och partikelbelastningen i utfallsdiket kom från försöksområdena via täckdikena, både före kompletteringsdikningen och efteråt. Av de uppmätta årliga (täckdiken+ytavrinning) närings- och partikelbelastningarna var täckdikenas andel 75–90 % då dikesavståndet var 6, 8, 10,7 och 16 meter och 50–60 % där dikesavståndet var 32 meter. Den ökning av avrinningen via täckdiken som kompletteringsdikningen ledde till syntes på försöksområdena i att belastningen via täckdiken ökade. Den

årliga belastningen ökade med 1,1–2,6 gånger jämfört med jämförelseområdet (16 m). Kompletteringsdikningen hade däremot en liten inverkan på avrinningsvattnets närings- och partikelhalter. Med undantag för en kortvarig höjning av totalkvävehalten (1–2 år) ökade kompletteringsdräneringen inte dräneringsvattnets halter.

Skördarna på försöksområdena i Nummela var relativt låga. Den svaga skördenivån torde bero på dålig bördighet, särskilt på det glest dikade område (32 m) som led av väta. En tätare dikning syntes varken på skördens mängd eller skördens kvalitet när man hade sätt försöksområdena samtidigt. Skördarna var i genomsnitt något bättre vid täckdikena än mellan dikena.

Försöksresultaten från Nummela försöksfält visade, att vattenhushållningen på en åker med svag avkastning, liksom också de andra faktorer som påverkar avkastningsförmågan, bör undersökas innan man bestämmer sig för att dika. Mättningsresultaten visar, att det dikesintervall på 10–14 meter som idag rekommenderas för lerjord är lämpligt. Man bör undvika för litet dikesavstånd, eftersom det ökar kostnaderna och kan öka utlakningen av näring och partiklar från åkern i och med att avrinningen via täckdikena ökar. Om åkern har dålig bördighet lönar det att i samband med täckdikningen göra också andra åtgärder som förbättrar bördigheten, eftersom enbart en förbättring av torrläggningen inte räcker för att höja skördenivån. Dikning påverkar lerjordens struktur långsamt, så för att förbättra markstrukturen behövs förutom dikning också andra åtgärder, såsom odling av växter med djupa rötter som en del av växtföljden. Det borde utvecklas fler nya åtgärder för att minska vattendragsbelastningen via täckdikena.

Försöksområdet i Sievi består jorden av mo-/mjäla och där gjordes täckdikningarna med grävande täckdikningsmaskin, och med täckdikningsplog på en åker som tidigare varit dikad med öppna diken. Schaktens bredd och djup samt kringfyllnadsmaterialet var motsvarande i båda metoderna. Ett och ett halvt års mätningar visade, att den täckdikning som gjorts med en grävande täckdikningsmaskin torrlade åkern något effektivare än den täckdikning som gjorts med en täckdikningsplog. I de täckdikningar som gjorts med täckdikningsplog var grundvattenytan enligt observationer ovanför täckdikena i medeltal 6–13 cm högre och avrinningen från täckdikena 10 procent mindre. Enligt 1,5 års mätningar verkar skillnaden inte vara signifikant, eftersom det fanns skillnader i fråga om grundvattenytans djup också mellan försöksområden som dikats med samma metod. Foderkornskörden år 2016 varierade områdesvis på försöksfältet i Sievi mellan 3 500 – 5 300 kg ha⁻¹. Vid täckdikena var skörden i medeltal 6 procent större än 7,5 meter från täckdiket. Det fanns inga skillnader i fråga om skörd eller åkerbördighet mellan de dikningar som gjorts med grävande täckdikningsmaskin respektive täckdikningsplog.

Prov av dikesschakten som gjordes på olika åkrar (30 åkrar) visade, att täckdikesschaktets genomsläpplighet är dålig på lösa jordar och jordar med dålig genomsläpplighet om schaktet inte har fyllts med ett poröst material. Detta syns särskilt där man använt täckdikningsplog, där dikesschaktet inte grävs upp och den dåligt genomsläppliga jorden inte tas bort från schaktet. Med båda metoderna går det, beroende på maskinens utrustning, att fylla täckdikesschaktet med ett porösare material. Dikning medan marken är våt kan leda till markpackning och det är också svårt att fylla igen schaktet och lägga rören.

Undersökningen visade, att det lönar sig att fästa vikt vid vilken typ av täckdikningsmaskin och tilläggsutrustning som används (bl.a. för nerskyffling av matjord), eftersom det

påverkar täckdikesschaktets egenskaper. Man ska i synnerhet säkerställa täckdikesschaktets genomsläpplighet när man täckdika kompakt jord med dålig struktur. Under arbetet ska man se till att schaktet inte genast slaggas fast, särskilt på jordar där det inte finns kohesion, som exempel mjäla (silt), som är lätttröligt i vatten. Man bör undvika att dika när jorden är blöt.

Man undersökte hur täckdikenas kringfyllnadsmaterial (grus, Fibrella-filterduk och kokosfibrer) fungerade genom att gräva upp diken som anlagts för över 10 år sedan. Dikena grävdes upp på 30 ställen, främst på ler- och mojord. Över hälften av de rörfilter som undersöktes hade nästan helt förmultnat. På 12 ställen observerades stockningar av olika grad, de största stockningarna fanns på ställen där rörens filterlindning hade förmultnat. De tillslammade rören fanns främst på åkrar med fina jordarter, bland dem fanns också lerjordar. Följaktligen borde också de mest finkorniga jordarterna tas med i diagrammet över jordarter där behovet av filtermaterial är stort. Man bör undvika att använda organiskt kringfyllnadsmaterial som förmultnar snabbt. På besvärliga jordarter bör man undersöka möjligheten att använda nya typer av filtermaterial, bl.a. geotextil, som lindning runt täckdikningsrören för att undvika tillslamning.

I den del av projektet som gällde den matematiska modelleringen utvecklades och tillämpades en tredimensionell FLUSH-modell, som beskriver vattnets strömning, erosionen och transporten av material i en åker. Beräkningsmodellen utgår från ett dubbelporsystem, och beskriver vattnets strömning separat i jordmatrisen med dålig vattenledningsförmåga och i makroporsystemet.

På försöksfältet i Nummela studerade man med hjälp av modellen täckdikesschaktets och dikesavståndets inverkan på vattnets rörelser. Med modellen kunde man räkna fram hur jordmånens egenskaper (makroporer och hydrologiska egenskaper), dikesavståndet och dikesschaktet inverkar på avrinningen på åkern (avrinning via täckdiken, ytavrinning och grundvattenavrinning) och på grundvattenytan. Grundvattenavrinningen är särskilt viktig eftersom den är svår att mäta. Med modellen kunde man ta fram grundvattenytans sannolika djup vid de tider som är kritiska för odlingen. Enligt beräkningarna hade markens egenskaper (hydraulisk konduktivitet och andel makroporer) större inverkan än dräneringsmetoden (dikesschakt och dikesavstånd) på hur höstens totalavrinning fördelades. Dikesavståndet hade större inverkan på grundvattennivån mellan dikena än vad markens egenskaper hade. Enligt resultaten av modellen gör ett tät dikning att vårbruket kan inledas i medeltal fem dagar (grundvattennivån > 60 cm från markytan) tidigare än på åkrar med gles dikning. Grundvattenavrinningens andel av nederbörden var betydande, upp till 30 procent. I praktiken kan den matematiska modellen användas vid bestämning av dräneringssystemets torrläggningseffektivitet (dikesavstånd, dikesdjup, fyllnadsmaterial för schakten).

På två försöksområden på Gårdskulla gård räknade man med hjälp av mångåriga mätresultat och FLUSH-modellen ut vattnets strömningssvagar och partikelbalanserna. Enligt mätningarna och de simulerade resultaten bortförs en betydligt större del av partikelbelastningen via täckdikena än via ytavrinning, både på jämna och på lutande (5 %) leråkrar. Den matematiska modellen visade, att belastning särskilt på lutande skiften kan uppkomma också genom horisontell grundvattenavrinning. Resultaten visade, att man bör gå in för att minska partikelbelastningen via täckdikena ytterligare.

Under de nio år av intensiv mätungsverksamhet och matematisk modellering som utförts inom TOSKA-projektet och två tidigare projekt (PVO, PVO2), har man ökat kun-

skapen om de finländska leråkrarnas hydrologi, täckdikning, näringsutlakning och erosion samt skördar. De mätningar som gjordes på försöksfältet i Sievi i norra Österbotten under 1,5 år visade, att det går att anlägga lika välfungerande täckdikningar med båda typerna av täckdikningsmaskiner, förutsatt att dikningarna utförs ordentligt och enligt rekommendationerna. Fältundersökningar på 30 åkerområden gav mångsidig kunskap om täckdikens kringfyllnadsmaterial och om schaktets betydelse, både med tanke på beslutsfattande och praktiskt arbete.

Nyckelord: *täckdikning, dikesavstånd, täckdikningsmaskiner, kringfyllnadsmaterial, matematisk modellering, partikelbalans*

Abstract

Feasible subsurface drainage methods in crop production (TOSKA) research project investigated the effects of drain spacing on field hydrology, nutrient loads and crop yield in the clay soil. In addition, the functionality of the trenchless machines and trenching machines were examined. Also, the performance of the envelope materials was studied. The 3-D FLUSH model, developed at Aalto University, was modified and applied during the project to evaluate the short- and long-term effects of different drainage methods. The project was implemented in 2014-2016 and it was a continuation of the PVO (*Field drainage methods and optimizing water management of agricultural fields*) and PVO2 research projects.

In the Nummela experimental site, in south-western Finland, the effects of drain spacing were investigated in two supplementary drained clayey field plots that were originally subsurface drained in the 1950s. The first of the two plots was supplementary drained (16 m $\rightarrow$ 8 m) in June 2008. The second plot (drain spacing 32 m) suffered from intermittent wetness and was supplementary drained with drain spacing of 10.7 m at TOSKA project in June 2014. Both installations were made with a trenching machine using gravel as envelope material and additional gravel inlets in the trenches. The effects of the supplementary drainage (16 m $\rightarrow$ 8 m and 32 m $\rightarrow$ 10.7 m) on the soil moisture conditions were estimated by comparing the drain discharge and groundwater levels of the supplementary drained plots to those of the reference plot (16 m). Measurements were also conducted in the fourth experimental plot, where the old drainage system with 16 m spacing was renewed with a spacing of 6 m in June 2008.

The supplementary drainage clearly increased the drain discharge. Halving the drain spacing (16 m $\rightarrow$ 8 m) increased the annual drainage on average 1.8 times (range 1.2 to 2.3) compared to the reference area (16 m). Decreasing the drain spacing to one third (32 m $\rightarrow$ 10.7 m) increased the drain discharge on average by 1.4 times (range 1.2 to 1.5) compared to the area of 16 m spacing. The proportion of the total runoff (drain discharge + tillage layer runoff) from the rainfall increased compared to the pre-drainage conditions in both areas, 1.1 times (8 m drain space) and 1.4 -times (10.7 m drain space). According to the model simulations, the proportion of the groundwater outflow from the total water balance was 29% (spacing 32 m) and 24% (spacing 10.7 m), which demonstrated that the increase in the observed total runoff due to the improved drainage was likely caused by the decreased amount of groundwater outflow. Groundwater level measurements showed that the supplementary drainage (32 m $\rightarrow$ 10.7 m) decreased the soil moisture of the area that suffered from wet conditions, so that spring cultivation could begin on average about one week earlier than in the 16 m spacing area.

A significant part of the nutrient and sediment loads from the experimental plots into the main ditch was transported via subsurface drains before and after the supplementary drainage. The subsurface drains accounted for 75-90% with the 6, 8, 10.7 and 16 m drain spacings, and 50-60% with the 32 m drain spacing of the measured annual (drain discharge

+ tillage layer runoff) nutrient and sediment loads. The increased drain discharge due to the supplementary drainage increased the loading. Compared to the reference plot (16 m), the annual loads increased from 1.1 to 2.6-fold. The supplementary drainage influenced only little in the nutrient and sediment concentrations in the runoff waters. With the exception of the short-term (1-2 year) increase in the total nitrogen concentration, the supplementary drainage did not increase the concentrations in the drain discharge.

The crop yields of the Nummela experimental plots were relatively low. The low yield was probably due to the poor fertility, especially in the plot with sparse (32 m) drain spacing. Decreasing the drain spacing did not reflect in the quantity or quality of the crop yield, when the sowing date was the same for all the plots. This suggests that regarding crop yields, the main short-term benefit of improved drainage is the possibility of earlier sowing due to the improved soil moisture conditions. On average, the crop yields were slightly better at the subsurface drain locations than between them.

The results of the Nummela experimental site show that the existing drainage status and other factors affecting productivity need to be carefully examined before making the decision on drainage improvements in areas with poor crop yield. Based on the measurement results, the 10-14 m drain spacing of the current recommendations for clay soils is appropriate. A too dense drain spacing should be avoided as it increases costs and may result in higher nutrient and sediment loads with the increased drain discharge. If the soil fertility is poor, measures should also be taken to improve it, as the improvement of the drainage system alone does not inevitably increase the crop yield. Drainage affects slowly on the clay soil structure, so other measures, such as deep-rooted plants in plant rotation, are needed to improve the soil structure. There is a need to develop measures to reduce the loading through the subsurface drains into surface water bodies.

The subsurface drainage of the Sievi experimental site (loam or sandy loam soil) in north-western Finland was carried out with a trenching machine and a trenchless machine. There were four experimental plots for each drainage machine type. The field was originally drained with open ditches. The width, depth and the filling material of the excavations were similar for the both methods. The drain spacing was 15 m and the average drain depth 1 m. According to the results of the 1.5 year-long measurement campaign, the drainage with the trenching machine dried the soil slightly more efficiently than the drainage with the trenchless machine. In the plots drained with the trenchless machine, the level of the groundwater table was on average 6-13 cm higher, and the drain discharge was 10% lower. The difference does not seem to be notable, as there was also variation in the groundwater table level between the replicate (same machine) plots. The feed barley yield in 2016 varied spatially in the Sievi experimental site between 3 500 and 5 300 kg ha⁻¹. On average, the crop yield at the subsurface drain locations was 6% higher than at the 7.5 m distance from the drain. The drainage with the different types of machines did not result in systematic differences in crop yields or in field cultivation.

The functionality of drain trenches were also examined in 30 fields, mainly in clay and sandy loam soils, situated in different parts of Finland. The open excavated trenches gave indication that in poorly permeable soils the water conductivity of the excavation trench is poor if it is not filled with permeable material, e.g. a humus rich top soil or gravel. This is particularly emphasized with drainage systems installed using a trenchless machine that

does neither excavate the drain trench open nor remove the poorly permeable soil. Depending on the equipment of the machine, the filling of the excavation with permeable material is possible by both methods. Execution of subsurface drainage in a wet soil can cause soil compaction and make it difficult to install drains and fill the excavation in a proper way.

The study showed that the drainage machine type and its equipment should be carefully selected as they affect the formation of the excavation. The good permeability of the excavation should be ensured especially when draining a compacted soil with an undeveloped structure. During the drainage installation, care must be taken to ensure that the excavation is not filled immediately, especially on non-cohesive soils, such as silt that moves easily with water. Drainage installation under wet soil conditions should be avoided.

The functionality of different envelopes (gravel, Fibrella - filter fabric and coconut fiber) were investigated by digging up more than 10 years old subsurface drains. The investigations were carried out in the above mentioned 30 fields. More than half of the studied precoat-ings had almost completely decomposed. In total 12 clogging cases of different level were detected, most of in which the precoat- ing had decomposed. The clogged pipes were mainly found on fine-grained soils, including clay soils. Consequently, the area of the particle size distribution curve describing those soil types where the subsurface drains need a good filter performance should extend to the fine-grained soils. The use of organic, rapidly degradable envelope materials should be avoided. In the case of problematic soils, to prevent drain clogging, the applicability of new precoat-ings, such as geotextiles, should be investigated.

In the modelling part of the project three-dimensional (3-D) FLUSH model was modified and applied to describe water flow, erosion, and solute transport in a field and drain spacing scale. The dual-permeability model description allows the calculation of water flow separately in the low-conductive soil matrix and in the macropore system describing the preferential flow paths.

The FLUSH model with the measurement data from the Nummela experimental site was applied to investigate the effect of various drain excavations and drain spacing on water flow paths. The model simulations revealed the effects of the soil properties (macropores and hydraulic properties), drain spacing and excavation on runoff (drain discharge, surface layer runoff and groundwater outflow) and groundwater table levels. Of particular importance is the groundwater outflow, which is difficult to measure. The model was able to produce probable groundwater table levels at time periods critical for field cultivation. According to the simulations, the soil properties (hydraulic conductivity and the amount of macropores) have a greater effect on the distribution of the runoff components in autumn than the drainage method (excavation and drain spacing). Between the drains the depth of the groundwater table was more affected by the drain spacing than the soil properties. According to the simulations, the dense drain spacing (10.7 m) allows earlier sowing time (the groundwater table depth > 60 cm below the soil surface) with an average of five days compared with sparse drainage (32 m). The share of the groundwater outflow from the precipitation was significant, up to 30%. In practice, model simulations can be used in selecting the drainage efficiency (drain spacing, drain depth and filling material of excavations).

In two field plots of the Gårdskulla Gård experimental site in southern Finland, water flow paths and sediment balance were determined using several years of measurement data and the FLUSH model. According to the results, much more load was transmitted through

the subsurface drains than through the tillage layer in both gentle (1%) and steeper (5%) clay fields. The calculations showed that, especially in the steeper field section, sediment may also be transported by the lateral groundwater flow. The results show that more attention needs to be paid to reducing the load through subsurface drains.

The nine years of intensive measurements and the mathematical modelling of the various experimental plots of the TOSKA project and the previous projects (PVO, PVO2) have provided new knowledge on the water management, subsurface drainage, nutrient transport, erosion and crop yield of cultivated Finnish clay fields. The measurements in north-western Finland, at the Sievi experimental site for 1.5 years showed that drains installed with both trenchless and trenching method can function well when done according to the recommendations. The field surveys in 30 field areas provided versatile knowledge on the subsurface drains envelope materials and the significance of excavation for both decision-making and practical work.

Keywords: *subsurface drainage, drain spacing, nutrient load, drainage machines, envelope material, crop yield, mathematical modelling, sediment balance*

I JOHDANTO

I.1 Tausta

Pellon vesitaloudella on keskeinen merkitys sadon määrään ja laatuun, pellolta tulevaan vesistökuormitukseen sekä maan kantavuuteen ja rakenteeseen. Valtaosalla Suomen pelloista viljely ei olisi mahdollista ilman avo- tai salaojin toteutettua maan kuivatusta. Salaojitus on nykyaikaisen viljelyn edellytys, sillä se mahdollistaa koneiden ja muiden tuotantopanosten tehokkaan käytön. Maan nopea kuivuminen ja riittävä kantavuus ovat tärkeitä varsinkin keväällä, jotta kylvötoihin päästään mahdollisimman varhain ja kasvukausi saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti. Hyvä kuivatus edistää myös savimaiden rakenteen muodostumista.

Salaojituksen mitoitusta, materiaaleja ja ojitustekniikkaa on tarvetta kehittää kasvinuotannon kannattavuuden parantamiseksi ja vesistökuormituksen vähentämiseksi. Sekä yhteiskunnallisen että yksittäisen viljelijän päätöksenteon tulisi perustua eri toimenpiteiden vaikutuksiin sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. Tutkimustietoa maankuivatuksen vaikutuksesta satoon ja ravinnehuuhtoumiin on edelleen aivan liian vähän Suomen olosuhteissa. Kansainvälisiä tutkimustuloksia esimerkiksi salaojien mitoituksesta ei voida suoraan soveltaa maamme olosuhteisiin, vaan tarvitaan omaa kokeellista tutkimusta.

TOSKA-tutkimushanketta edeltäneissä PVO- ja PVO2-hankkeissa (2006–2013) tutkittiin eri salaojitusmenetelmien vaikutuksia ravinnehuuhtoutumiin, satoon ja maan rakenteeseen. Koekenttien vesitasetta ja eroosiota tutkittiin Aalto-yliopistossa kehitetyllä FLUSH-mallilla. Hankkeiden tulokset on esitetty loppuraporteissa (Vakkilainen ym. 2010, Äijö ym. 2014). TOSKA-tutkimushankkeessa hyödynnettiin PVO-hankkeissa saatua tietoa ja kokemuksia.

Pitkäaikaisen mittausdatan saaminen on oleellista hydrologialtaan vaihtelevien vuosien vuoksi. PVO-hankkeessa vuonna 2008 täydennysojitetun alueen seurantaa jatkettiin TOSKA-hankkeessa. Lisätiedon saaminen täydennysojituksen vaikutuksista vesitaseeseen, ravinnehuuhtoumiin ja satoon koettiin tarpeelliseksi.

Suomessa suurin osa salaojituksista on tehty kaivavalla salaojakoneella. 1980-luvulla Suomessa alettiin käyttää myös aurasalaojakoneita. Siitä saakka on käyty vilkasta keskustelua eri konetyyppien hyödyistä ja haitoista, mutta tutkimustietoa asiasta on erittäin niukasti. Nykyisin konetyyppien käyttö on likimain yhtä yleistä. Kokeellisen tiedon saaminen molemmilla konetyypeillä tehtyjen ojitusten toiminnasta on tarpeen.

Suomessa ensi- ja täydennysojituksissa käytetään ympärysaineena edelleen valtaosin soraa. Soran saatavuus on monilla paikkakunnilla heikentynyt ja hinta noussut. Esipäällysteiden (esim. suojakankaat, kookoskuitu) käyttö onkin lisääntynyt. Suomen olosuhteissa muiden ympärysaineiden kuin soran toiminnasta pitkän aikavälin tietoa on saatavissa niukasti, joten lisää tutkimusta aiheesta tarvitaan.

Kokeellisen tutkimuksen rinnalla on tärkeä käyttää ja kehittää matemaattisia malleja. Mallit ovat kuivatuksen, viljelymenetelmien ja vesiensuojelun tutkimuksen ja suunnittelun keskeisiä työkaluja. Malleilla pystytään laskennallisesti määrittämään tekijöitä, kuten pohjavesivaluntaa, joiden mittaaminen on vaikeaa. PVO2-hankkeessa FLUSH-mallilla lasketusta

vesitaseesta kävi ilmi, että pohjavesivalunnan osuus vesitaseesta on verrattain suuri (Turunen ym. 2013). Viljelymaiden eroosioprosesseja, kiintoaineen kuormitusreittejä ja kiintoainetaseen komponentteja sekä eri tekijöiden vaikutuksia niiden suuruuteen ei tunneta tarkasti. Erityisesti rakenteellisissa savimaissa oikovirtausreitit mahdollistavat kiintoaineen kulkeutumisen maanpinnalta syvempiin maakerroksiin ja salaojiin (esim. Turtola ym. 2007, Äijö ym. 2014). Horisontaalisia oikovirtauksia on kuitenkin tutkittu huomattavasti vähemmän kuin vertikaalisia oikovirtausreittejä (Allaire ym. 2009). Lisäksi muiden kiintoainetasekomponenttien osuutta taseissa on tutkittu vain vähän eri olosuhteissa.

1.2 Tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa tietoa kasvintuotannon, maan kuivatuksen ja vesien suojelun suunnittelua varten siten, että turvataan satotaso ja sadon laatu ja minimoidaan vesistökuormitus. Tutkimuksen tavoitteet olivat:

1. Selvittää salaojien eri ojavälien vaikutuksia satoon, maan rakenteeseen, pellon hydrologiaan ja ravinnehuuhtoutumiin.
2. Selvittää kaivavalla ja aurasalajakoneilla tehtyjen salaojitusten toimivuutta.
3. Selvittää eri ympärysaineilla tehtyjen salaojitusten toimivuutta.
4. Kehittää FLUSH-mallia siten, että se soveltuu salaojituksen suunnitteluun ja vaikutusten arviointiin.

Tutkimushankkeessa tehtiin kokeellista tutkimusta ja matemaattista mallintamista. Hanke koostui neljästä osaprojektista: (1) Nummellan koekentän tutkimuksesta, (2) Sievin koekentän tutkimuksesta, (3) salaojien ympärysaineiden kenttätutkimuksista sekä (4) vesitaseen ja eroosion matemaattisesta mallintamisesta.

PVO-hankkeissa alkanutta kokeellista tutkimusta Nummellan koekentällä jatkettiin. Harvimman ojavälin (32 m) alue D kärsi selvästi märkyydestä, mikä myöhästytti koko pellon kylvötoita keväisin (koejärjestelyissä viljelytoimenpiteet tehtiin samaan aikaan koko koekentällä) ja heikensi sadon laatua ja määrää. Huono kuivatus näkyi myös heikosti kehittyneenä pohjamaan rakenteena. Alueelta oli seitsemän vuoden mittaustuloksia valunnan määrästä ja laadusta, pohjaveden syvyydestä ja muokkauskerroksen kosteudesta sekä sadon määrästä ja laadusta. Alue D täydennysojitettiin (32 m → 10,7 m) TOSKA-hankkeen aluksi. Täydennysojituksen vaikutuksia vesitaseeseen, ravinnehuuhtoutumiin ja satoon tutkittiin myös jatkamalla vuonna 2008 täydennysojitetun alueen C mittauksia.

TOSKA-hankkeen yhtenä osatutkimuksena selvitettiin kaivavalla salajakoneella ja aurasalajakoneella tehtyjen salaojitusten toimivuutta. Kokeellista tutkimusta varten Sieviin Pohjois-Pohjanmaalle perustettiin koekenttä, jonka ojitukset tehtiin puoliksi molemmilla konetyypeillä. Salaojien toimivuutta arvioitiin pohjaveden syvyyshavaintojen ja valuntamittausten avulla sekä tutkimalla ojituksen vaikutuksia sadon määrään ja laatuun.

Matemaattisen mallintamisen osaprojekti koostui kolmesta osasta, joissa kehitettiin ja sovellettiin Aalto-yliopistossa kehitettyä kolmiulotteista FLUSH-mallia (esim. Warsta 2011). Ensimmäisessä osassa tarkasteltiin erilaisten salaojakaivantojen sekä ojavälien vaikutusta veden virtausreitteihin. Nummellan koekentän aluetta C simuloitiin kolmiulotteisella ideaalilohkoa kuvaavalla laskentaverkolla ojavälimittakaavassa. Toisessa osassa tutkittiin mit-

taustulosten ja laskentamallin avulla täydennysojituksen vaikutusta Nummelan märkydestä kärsineen alueen (D) vesitaseeseen Nummelan koekentällä eri vuodenaikoina. Kolmannessa osassa FLUSH-mallia sovellettiin eroosion ja kiintoainetaseiden mallintamiseen Gårdskulla Gårdin (Siuntio) koekentällä.

1.3 Salaojakonetyypit ja aiemmat tutkimukset niiden toimivuudesta

Salaojitukset tehdään Suomessa kahdella salaojakonetyypillä: aurakoneella ja kaivavalla koneella. Ojituskoneet poikkeavat toisistaan salaojakaivannon kaivuutavan sekä jonkin verran koneen rakenteiden osalta. Konetyyppi vaikuttaa salaojituksessa jälkityön tarpeeseen, salaojakaivantoon (ympärysaine ja ruokamulta), ojituksen työnopeuteen ja työäljen seurantaan.

Kaivava kone tekee salaojakaivannon pyörivällä ketjulla (tai kaivupyörällä), ja se kaivaa maahan suorakaiteen muotoisen ojasyvyyden kokoisen kaivannon, johon putki ja ympärysaine välittömästi lasketaan. Aurakoneella putkelle ja ympärysaineelle tehdään tila maahan vetämällä auran terää maan sisässä, jolloin maa syrjäytyy ja kohoaa liikuttaessa eteenpäin. Salaojakaivantojen leveys on konetyypistä, valmistajasta ja rakenteesta riippuen yleensä 15–30 cm. Salaojakoneissa rakenteellisia eroja esiintyy mm. putkikourussa, suppilorakenteessa sekä ruokamullan pudotuslaitteistossa. Ympärysaine ja ruokamulta saadaan yleensä asettumaan samalla tavalla molemmilla menetelmillä, mikäli ruokamullan pudotuslaitteistoissa ei ole eroja.

Aurakonetekniikka on kaivavaa uudempaa ja se on otettu käyttöön 1980-luvulta lähtien, jonka jälkeen aurakoneiden osuus on kasvanut merkittävästi. Molemmissa salaojakonetyypeissä on käytössä laserlaitteita, jotka säätävät putken asennussyvyyden automaattisesti.

Suurin osa maamme salaojituksista on tehty kaivavilla salaojakoneilla 1960-, 70- ja 80-luvuilla, jolloin Mara-salaojakoneita oli eniten käytössä. Nykyisin yleisimmin käytössä on hollantilaisen Inter-Drain-yhtiön valmistamia salaojakoneita. Mara-koneita on kuitenkin vielä melko paljon käytössä, vaikka niiden valmistus Suomessa lopetettiin vuonna 1995. Kummallakin konetyypillä tehdään likimain yhtä paljon vuosittaisista salaojituksista.

Salaojituksen onnistumisen tärkeimpiä tekijöitä ovat salaojasuunnittelun ja urakointityön laatu, pellon maalaji, maan kosteustila salaojitettaessa ja heti ojituksen jälkeen sekä salaojakaivannon rakenne. Salaojakone vaikuttaa salaojakaivannon rakenteen muodostumiseen, ja on näin ollen yksi ojituksen toimintaan vaikuttavista tekijöistä.

Salaojien toimintaa voidaan tutkia havainnoimalla sekä pohjavedenpinnan syvyyttä että salaojavaluntaa. Pohjavedenpinnan taso maassa vaikuttaa pellon kosteustilaan, joka määrää pitkälti pellon kantavuuden. Maan kosteus- ja happitila vaikuttavat keskeisesti kasvin kasvuun ja edelleen sadon määrään. Salaojavalunnan määrä ja ajallinen jakautuminen kertovat sen, kuinka tehokkaasti salaojitus poistaa vettä pellolta. Tarkastelemalla useampaa hydrologista muuttujaa yhtäaikaaisesti, voidaan muodostaa kokonaisvaltainen kuva pellon hydrologisista prosesseista ja salaojituksen toimivuudesta pellon kuivatuksen näkökulmasta. Pohjavedenpinnan korkeuden avulla saadaan tietoa salaojituksen alueellisesta vaikutuksesta pellon sisällä.

Suomessa on keskusteltu paljon salaajien toimivuudesta ja siitä, miten eri salaajakonetypit vaikuttavat ojituksen toimintaan. Joissain heikosti toimivissa salaajituksissa on vedottu siihen, että aurakonetekniikka itsessään aiheuttaa ongelmia ojituksen toimivuudelle. Usein ongelmakohteissa syitä on ollut monia ja salaajakoneen merkitys on jäänyt epäselväksi. Tämä on johtanut siihen, että esimerkiksi urakkatarjouskilpailuissa kaivavaa konetta on suosittu.

Aiempi tutkimustieto salaajakoneista

Salaajakoneiden vaikutuksesta salaajituksen toimintaan on joitain tutkimuksia 1970- ja 80-luvulta, ja uusimmatkin julkaisut ovat 20 vuoden takaa. Salaajakoneiden toimintaperiaatteet ja rakenne ovat pysyneet lähes samana tämän ajan. Seuraavaksi on lyhyesti esitetty tutkimuksia salaajakoneista sekä salaajakaivannon merkityksestä.

Vakkilainen ja Suortti-Suominen (1982) tutkivat kaivavan ja aurasalaajakoneen toimintaa kirjallisuusselvityksin ja kenttäkokein. Kenttäkokeiden tavoitteena oli selvittää täyttääkö aurasalaajakone salaajan asennuksen tarkkuusvaatimukset Suomessa. Kirjallisuusselvityksen mukaan aurasalaajituksen kuivatusteho oli heikompi hienojakoisilla hiue- ja hiesusavimailla, ja silloin kun salaajat asennettiin tavanomaista syvemmälle. Tutkimuksen mukaan märissä olosuhteissa ojittaminen aiheutti salaajakaivannon hydraulisen johtavuuden pienenemistä ja heikensi aurasalaajituksen toimintaa. Kenttäkokeiden perusteella 44 % tutkituista 42 ojasta täytti salaajan tasaisuusvaatimuksen.

Suomen valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitoksen kokeissa tutkittiin aurasalaajakoneen ja kaivavan salaajakoneen salaajan asennustarkkuutta useilla työmailla (Olkinuora ja Esala 1982). Tulosten mukaan menetelmien asennustarkkuus oli samaa luokkaa, mutta ilman laserohjausta olleet kaivavat koneet eivät täyttäneet kaikilta osin tarkkuusvaatimuksia. Merkittävä tulos oli myös se, että kun salaajakoneen kuljettaja oli tietoinen tarkkuusmittauksista, oli salaajien asennustarkkuus todella hyvä.

Kaivavan koneen (Hoes 685) ja aurakoneen (Hoes 623) toimivuutta pellon kuivatukseen tutkittiin viiden vuoden ajan (1980–1984) Yhdysvalloissa Iowan yliopiston tutkimusasemalla, ja tutkimusta jatkettiin vuosina 1990 ja 1991 (Mirjat ja Kanwar 1992). Pellon ojitus tehtiin ilman ympärysainetta 100 mm:n salaajaputkella. Molemmilla konetyypeillä ojitetulla tutkimuslohkolla mitattiin pohjaveden pintaa 3, 6 ja 12 metrin etäisyydellä salaajista, salaajavaluntaa (vuodet 1990–1991) ja satoja. Tutkimuksessa kaivavalla koneella tehty ojitus poisti tehokkaammin vettä pellolta kuin aurakoneella tehty ojitus. Aurakoneella ojitetuilla koealueilla pohjavesi oli 5–17 cm lähempänä pellon pintaa (enimmillään 55 cm) vuosien 1980–1984 mittausjakson aikana. Erot olivat tilastollisesti merkitseviä. Vuosien kuluessa pohjavedenpinnan erot menetelmien välillä tasoittuivat. Vuosien 1990–1991 mittausjakson aikana pohjavedenpinnan syvyys oli aurakoneella ojitetulla alueella 2–4 cm korkeampi kuin kaivavalla koneella ojitetulla alueella. Salaajavalunta oli aurakoneojituksessa hieman pienempi vuosien 1990–1991 aikana. Pellolla ei esiintynyt märkyyttä tarkastelujaksoilla, ja molemmilla konetyypeillä saavutettiin riittävä kuivatusteho. Sato (maissi) oli kuitenkin hieman korkeampi kaivavan koneen alueilta, mutta tulos ei ollut tilastollisesti merkitsevää.

1970-luvulla tehtyjen tutkimusten tulokset ovat ristiriitaisia. Useassa salaajakonetutkimuksessa aurakoneella tehty salaajitus aiheutti korkeamman pohjavedenpinnan ja pienemmän salaajavalunnan hienojakoisilla maalajeilla kuin kaivavan koneen ojitus (Naarding

1979, Olesen 1979, Vittetoe ja Garner 1978). Eggelsman (1979) päätyi tutkimuksissaan Saksassa päinvastaisiin tuloksiin. Märissä olosuhteissa kookospäällysteellä ojitetussa hiesusavimaassa aurakone suoriutui kaivavaa paremmin. Kaivaminen märässä maassa aiheutti kaivannon tiivistymisen ja heikon vedenläpäisyn. (Eggelsman 1979).

Mirjat ja Kanwar (1994) tutkivat salaojakaivannon vedenjohtavuutta aurakoneella ja kaivavalla koneella (Yhdysvallat, Iowa, Nashua) tehdyistä salaojituksista. Heidän mukaansa vedellä kyllästyneen maan hydraulisen johtavuuden arvot (K_s -arvo) olivat syvyyksissä 0–15 cm ja 15–45 cm lähes samat molemmilla menetelmillä. Syvyyksissä 45–75 cm ja 75–100 cm hydraulisen johtavuuden arvot olivat 2–3-kertaiset kaivavan koneen kaivannoissa, kun käytettiin sama määrä soraa ja ruokamultatäyttöä.

Naarding (1979), Mirjat ja Kanwar (1994) sekä Zijlstra (1987) päätyivät siihen, että märissä olosuhteissa syvään ojitettaessa maa salaojan ympärillä tiivistyy ja aiheuttaa vedenjohtavuuden heikkenemisen salaojan ympärillä erityisesti aurakoneella.

Edellä mainittujen tutkimusten yhteenvetona voidaan todeta, että tulokset ovat olleet osittain ristiriitaisia. Karkeilla maalajeilla ei havaittu eroja menetelmien kesken. Erityyppisillä hiesu, hiue, hieno hieta ja juoksevilla savimailla todettiin kuivatustehon olevan heikompi aurasalaojakoneella. Heikko kuivatusteho aurakoneella liittyi suureen salaojasyvyyteen ja märkiin ojitusolosuhteisiin.

Salaojakaivannon merkitys

Salaojitukselle ongelmallisia maita ovat luonnostaan hitaasti vettä läpäisevät savimaat, mutta myös muut tiivistyneet maalajit. Huonosti vettä läpäisevillä mailla pellon riittävä kuivatus-taso saavutetaan läpäisevällä salaojakaivannolla, pienellä ojavälillä, pellon hyvällä pinnanmuotoilulla ja maan vedenläpäisevyyden parantamisella (jankkurointi) (Ritzema 1994).

Ojituksen kannalta ongelmallisia maita ovat myös koheesiottomat maat, kuten siltti, jotka liikkuvat herkästi veden mukana. Tällaisilla mailla esimerkiksi ojaluisikat sortuvat herkästi, salaojaputket voivat liikkua asennuksen aikana ja salaojakaivanto sekä putket mennä tukkoon (Cavelaars ym. 1994). Maan koheesio on riippuvainen maan kosteustilasta ja partikkelikoosta.

Tiivistyneillä mailla pintamaan vedenjohtavuus voi olla hyvä korkean multavuuden, lierokäytävien, kasvin juurien ja maan muokkauksen ansiosta (Ritzema 1994). Muokkauskerroksen alla alkaa kuitenkin heikosti vettä läpäisevä maa, minkä seurauksena vettä kertyy muokkauskerroksen ja jankon rajapintaan. Vesi saadaan ohjattua salaojiin tällaisessa maassa, jos salaojakaivanto on täytetty hyvin vettä läpäisevällä materiaalilla. Kaivannon täyttämässä käytetään yleensä salaojasoraa sekä ruokamultaa. Myös jonkin verran käytetään mursketta ja haketta. Karkeilla tasalaatuisilla mailla kaivannon merkitys on pieni, sillä maa itsessään johtaa hyvin vettä.

Salaojituksen toimivuuden arviointi

Hyvin toimiva salaojitus poistaa tehokkaasti ylimääräisen veden pellolta ja tuottaa eri aikoina hyvän kantavuuden, sekä mahdollistaa pellon maksimaalisen sadontuottokyvyn. Maanpinnalle kertyvä vesi ja korkea pohjaveden pinta maassa vaikeuttavat maatalouskoneiden kulkua ja heikentävät kasvin kasvua ja satoa. Salaojituksen toimivuutta voidaan arvioida pohjavedenpinnan korkeuksien avulla.

Maan kantavuus on yksi olennaisimmista tekijöistä peltoviljelyssä, sillä se määrittää milloin koneilla päästään pellolle ilman maan tiivistymisriskiä. Maaperän kantavuuteen vaikuttaa maan lujuus, ja se on riippuvainen maan kosteustilasta, tilavuuspainosta ja partikkelikoosta. Kosteuden lisääntyminen maassa heikentää maan lujuutta ja sen kykyä kantaa koneita.

Pohjavedenpinnan sopiva syvyys on riippuvainen viljeltävän kasvuston tarpeesta ja maatalouskoneiden kantavuusvaatimuksista. Pellon riittävä kantavuus saavutetaan savi- mailla korkeammalla pohjaveden pinnan tasolla kuin turvemailla ja muilla kivennäismailla. Yksiselitteisiä pohjaveden pinnan syvyyden raja-arvoja eri maalajeilla ei ole erilaisista tutkimuksista huolimatta määritelty.

Kantavuuden lisäksi pohjavedenpinnan syvyys vaikuttaa kasvien kasvuun siten, että se säätelee maaperän kosteutta ja happitilaa. Jos maassa ei ole riittävästi happea, kasvien veden- ja ravinteidenotto kärsivät, mikä heikentää kasvin juuriston kehittymistä ja maanpäällistä kasvua. Pitkäaikaisessa hapenpuutteessa juurten kasvu lakkaa. Juurten toimimattomuus näkyy maanpäällisen kasvuston kellastumisena ja heikkona kasvuna. Kasvusto ei pysty ylläpitämään ja rakentamaan uutta lehtivihreää juuriston hapenpuutteessa.

Kasvin kasvulle sopiva pohjavedenpinnan korkeus riippuu pellon maalajista, maan rakenteesta, viljeltävästä kasvista ja ilmastosta. Sopivaksi pohjaveden pinnan syvyydeksi on määritetty muutamia hieman toisistaan poikkeavia arvoja. Eräät ulkomaiset tutkimukset antavat karkeilla maalajeilla sopivaksi pohjaveden syvyydeksi 60–90 cm maanpinnasta. Hienommilla maalajeilla sopiva syvyys on jopa 100–150 cm (Williamson ja Carrekar 1970, Feddes 1971, Wesseling 1974). Rycroft ja Smedema (1983) esittivät sopivaksi pohjaveden syvyydeksi kosteutta kestäville ja vähätuottoisille kasveille 30–40 cm maan pinnasta. Herkimmillä kasveille vastaavat arvot olivat 50–60 cm.

Liiallinen vesi tulisi poistaa tietyssä ajassa pellolta, jotta kasvit välttyvät märkyyssstressiltä ja kasvun hidastumiselta. Kun pohjavesi nousee lähelle juuristoa (< 60 cm maanpinnasta), pohjaveden tulisi laskea kolmessa päivässä takaisin alle 60 cm:n syvyyteen, jotta kasvin kasvu ei häiriinny (Tovey 1964). Rycroft ja Smedema (1983) esittivät että pohjaveden noustessa pellon pintaan saakka sateisina aikoina, tulee pohjaveden pinnan laskea nopeasti, jotta ylempi juuristokerros saa happea. Suosituksen mukaan pohjaveden pinnan tulisi laskea kahdessa päivässä 30 cm:n ja neljässä päivässä 50 cm:n syvyyteen maapinnasta. Mikäli viljellään kosteusherkkiä ja arvokkaita kasveja, tulisi pohjaveden laskea 30 cm:n syvyyteen yhdessä päivässä ja 50 cm:n syvyyteen kahdessa päivässä.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Nummellan koekenttä

Uusinta- ja täydennysojitusten vaikutuksia satotasoon, maan rakenteeseen, pellon hydrologiaan ja ravinnehuuhtoumiin tutkittiin Lounais-Suomessa Jokioisilla sijaitsevalla Nummellan peltoalueella. Nummellan koekenttä (9 ha) on Luken hallinnoima peltoalue, jolla tehtiin 1950-luvulla maa- ja metsätalousministeriön toimesta salaojien etäisyyskoe käyttäen ojavälejä 16 ja 32 m. Alue on lievästi viettävä, ja maa on lähes kauttaaltaan aitosavea. Pinta- ja salaojavedet purkautuvat peltoalueen laidassa virtaavaan Raiskionojaan. Viljelykasvit ja -menetelmät ovat olleet koko alueella samanlaiset viime vuosikymmenet.

Nummellan koekenttä koostuu neljästä koealueesta, joista kolmella (alueet A, B ja C) oli alkujaan 16 metrin ojaväli ja yhdellä (alue D) 32 metrin ojaväli. Koealueiden salaojitetut pinta-alat ovat 2,9 ha (alue A), 1,7 ha (C), 1,3 ha (B) sekä 3,4 ha (D). Jokaisella koealueella on oma salaojaston laskuaukko ja mittausjärjestelmä pintakerrosvaluntaa varten. PVO-hankkeessa alue A uusintaohjotettiin ja alue C täydennysojitettiin kesäkuun 2008 alussa. Tätä ennen kaikkia koealueita seurattiin vuoden (kesäkuu 2007–toukokuu 2008) ajan alueiden välisen vaihtelun selvittämiseksi (kalibrointijakso).

Kesäkuun 2008 ojitukset toteutettiin PVO-hankkeessa kahdella eri menetelmällä. Menetelmässä I ojitus tehtiin alueelle C tavanomaisesti lisäämällä vanhojen imuojien väliin uusi imuoja, jolloin ojaväliksi tuli kahdeksan metriä. Ympärysaineena käytettiin soraa, ja lisäksi tehtiin sorasilmäkkeitä keskimäärin seitsemän metrin välein. Menetelmässä II alue A uusintaohjotettiin 6 m ojavälillä, ja esipäällysteena käytettiin ohutta kuitukangasta. Alueet B ja D jäivät PVO-hankkeessa vertailualueiksi. Syyskuussa 2009 alue A syväkuohkeutettiin jankkuroimalla. Alueen B pintakerrosvalunnan mittauksessa olleiden epävarmuuksien vähentämiseksi alueiden B ja A väliselle, koealueisiin kuulumattomalle, alueelle tehtiin syksyllä 2011 kolme lisäojaa. Kartta Nummellan koekentästä on liitteenä 1.

Nummellan koekentän lisäojitus

TOSKA-hankkeessa märkyydestä kärsinyt koealue D (ojaväli 32 m) täydennysojitettiin touko-kesäkuun vaihteessa 2014. Tällöin vanhojen ojien väliin asennettiin kuhunkin kaksi uutta salaojaputkea, jolloin ojaväliksi tuli 10,7 m. Ympärysaineena käytettiin runsaasti soraa ja lisäksi tehtiin sorasilmäkkeitä 10 m:n välein. Ojitus tehtiin kaivavalla salaojakoneella.

Pohjavesiputket

Ensimmäiset pohjavesiputket asennettiin Nummellan koekentälle elokuussa 2007. Kaikille alueille asennettiin kuhunkin viisi putkea ojien puoliväliin. Alueilta A (uusintaohjitus) ja C (täydennysojitus) putket poistettiin ojitustöiden tieltä toukokuussa 2008. Lokakuussa 2008 ojitetuille alueille asennettiin uudet pohjavesiputket ojien väliin (C 9 kpl ja A 12 kpl). Täydennysojitetulle alueelle D asennettiin heinäkuussa 2014 ojien puoliväliin uudet pohjavesiputket (12 kpl).

Pohjaveden syvyydestä haluttiin kattavampaa tietoa ja syksyllä 2009 eri puolille koekenttää asennettiin ns. pitkiä pohjavesiputkia, joiden syvyys maanpinnasta on 260 cm. Viisi putkista sijaitsee koealueilla ja neljä niiden ulkopuolella Raiskionjoaan viettävässä rinteessä. Niiden avulla voitiin tarkastella pohjaveden pintaa laajan koekentän eri puolilla, kaltevuudeltaan erilaisissa osissa. Mittaustuloksia on hyödynnetty pellon hydrologisessa mallintamisessa.

Viljelytoimet

Koekentän viljelytoimenpiteet olivat vuosina 2014–2016 samat kaikilla neljällä alueella. Koekentällä on koko kokeen ajan viljelty kauraa tai ohraa. Kaikki viljelytoimet tehtiin Jokioisten kartanoiden normaalin viljelykäytännön mukaisesti. Kaikki koealueet kylvettiin samaan aikaan, jotta voitiin eliminoida eri aikaan tapahtuneiden kylvöjen aiheuttamat epävarmuustekijät (mm. sääolojen muutokset). Työkoneita ei käännelty pintakerrosvalunnan keräämiseen tehtyjen maavallien takia, vaan niiden yli ajettiin. Ainoastaan pohjavesiputkia väisteltiin. Maavalleja kunnostettiin syksyisin. Viljelytoimenpiteet vuosina 2007–2016 on esitetty liitteissä 2 a ja b.

Koealueilla käytettiin kivennäislannoitteita vuosina 2007–2016. Lisäksi koko peltoalueelle levitettiin lietelantaa neljä kertaa: huhtikuussa 2007, syyskuussa 2007, huhtikuussa 2008 ja huhtikuussa 2013.

Mittausjärjestelyt

Nummelan koekentällä mitattiin vuosina 2014–2016 kaikilta neljältä koealueelta seuraavia muuttujia:

- pintakerros- ja salaojavalunta (jatkuva mittaus 15 min välein)
- kiintoaine, fosfori- ja typpipitoisuudet pintakerros- ja salaojavalunnassa (automaattinen näytteenotto virtauksen suhteen, laboratorioanalyysit)
- sadanta (jatkuva mittaus 15 min välein)
- pohjaveden syvyys (osittain manuaalinen ja osittain automaattinen mittaus 15 minuutin välein)
- pohjaveden ravinnepitoisuudet (manuaalinen näytteenotto, laboratorioanalyysit)
- maan kosteus (manuaalinen mittaus TDR-mittarilla)
- lumen syvyys ja vesiarvo (manuaalinen mittaus, lumikeppi ja lumipuntari)
- roudan syvyys (manuaalinen mittaus, metyleenisiniputket)
- sadon määrä ja laatu, jokaiselta alueelta puitiin neljä 31 m² aluetta (kuiva-aine, hehtolitraino, 1000 jyvän paino, typpipitoisuus)

Nummelan koekentän koejärjestelyt ja mittaus- ja analyysimenetelmät on kuvattu yksityiskohtaisesti julkaisuissa Vakkilainen ym. (2008, 2010).

Alueiden A ja C ojitusten jälkeinen aika on jaettu vuoden mittaisiin osiin: tutkimusjakso I (6/2008–5/2009), tutkimusjakso II (6/2009–5/2010), tutkimusjakso III (6/2010–5/2011), tutkimusjakso IV (6/2011–5/2012), tutkimusjakso V (6/2012–5/2013), tutkimusjakso VI (6/2013–5/2014), tutkimusjakso VII (6/2014–5/2015) ja tutkimusjakso VIII (6/2015–5/2016). Tutkimuskausien VI ja VII vaihteessa tehtiin alueen D täydennysojitus.

Roudan ja lumen syvyyksiä on mitattu Nummelan koekentältä talvisin noin kahden viikon välein. Aluksi joka alueella oli yksi routaputki, vuodesta 2015 alkaen kaksi. Maan kosteutta 0–30 cm:n syvyydessä on mitattu kaikilla alueilla pohjavesimittausten yhteydessä sulan maan

aikaan. Koekentällä sadantamittauksessa syntynyttä virhettä (tuulivirhe, roiskuntavirhe ym.) korjattiin korjauskertoimilla. Vesisateen korjauskerroin oli 1,05 ja lumisateen 1,3.

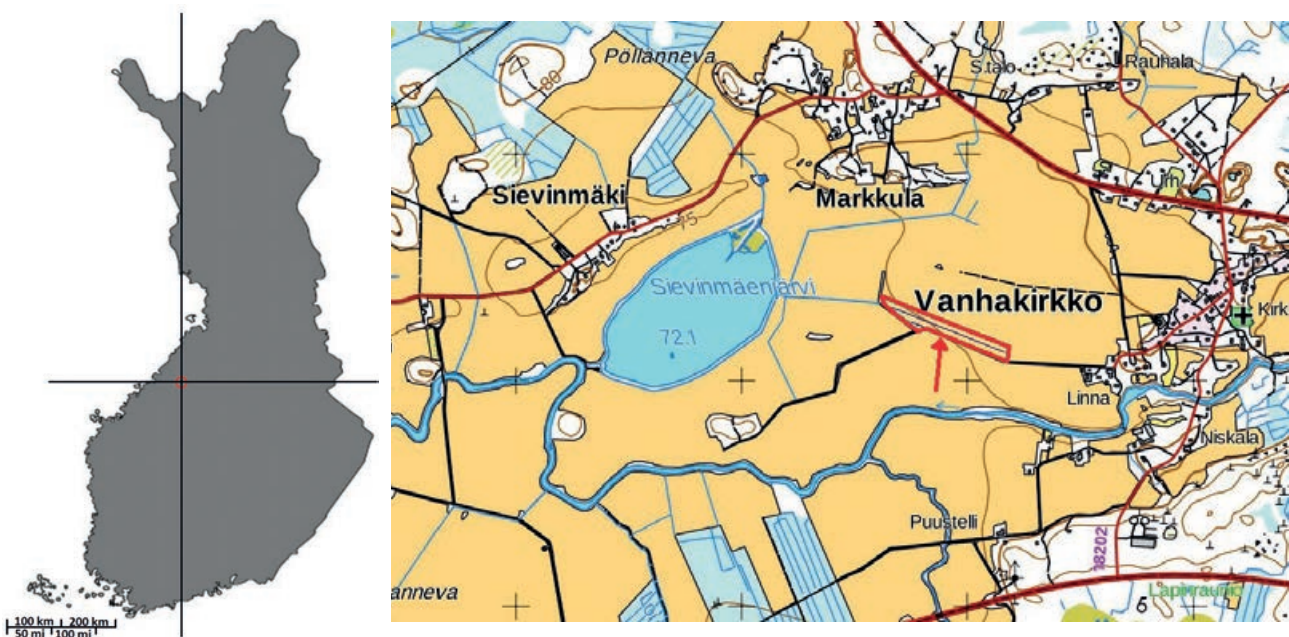
Syksyllä 2006 Nummelan koekentältä otettiin maanäytteet (20 paikasta) ja toisen kerran syksyllä 2013. Maanäytteistä (0–100 cm) määritettiin rakeisuuden ja maalajin lisäksi kemiallisia ominaisuuksia (pH, Ca, K, Mg, P, johtoluku) sekä rakennetietoja (tilavuuspaino, vedenjohtavuus, lierokanavien pinta-ala, juurikanavien määrä, huokosjakauma) 60 cm:n syvyyteen. Käytetyt analyysimenetelmät ja aluekohtaiset tulokset on esitetty julkaisuissa Vakkilainen ym. (2010) ja Äijö ym. (2014).

2.2 Sievin koekenttä

Eri salaojakoneilla tehtyjen ojitusten toimivuuden tutkimusta varten perustettiin koekenttä Pohjois-Pohjanmaalla Sievissä sijaitsevalle peltoalueelle (P 63° 55,978', I 24° 20,646', kuva 2.1). Koekentällä tutkittiin kaivavalla ja aurasalaojakoneella tehtyjen ojitusten toimintaa, erilaisia soramääriä salaojituksessa ja sorasilmäkkeiden merkitystä. Salaojien toimivuutta arvioitiin mittaamalla pohjavedenpinnan syvyyttä, veden virtausta kokoojaojista ja eri satomuuttujia.

Pelto on pinta-alaltaan 3,55 ha, suorakulmion muotoinen ja maastoltaan tasainen (keskikaltevuus alle 0,2 %). Koealuetta ympäröivät maastot ovat tasaisia ja samantyyppistä viljelysmaata. Vääräjoki virtaa 300 metrin etäisyydellä pellosta (kuva 2.1).

Tutkimus aloitettiin alustavilla pohjavesimittauksilla helmi-maaliskuussa 2015 ennen salaojitusta. Pellolle asennettiin yhteensä 22 pohjavesiputkea (PEH, polyeteeni, Ø 50 mm), jotka ulottuivat 2,5 m syvyyteen maanpinnasta. Samalla kertaa pellolta otettiin maanäytteet putkien kohdalta. Alustavat pohjavesimittaukset kestivät noin kaksi kuukautta. Maaperätutkimusten, pohjavesitulosten ja koesuunnitelman perusteella tehtiin salaojasuunnitelma pellolle. Pelto jaettiin 12 koealueeksi, jotka salaojitettiin joko kaivavalla salaojakoneella tai aurasalaojakoneella.



Kuva 2.1. Sievin koekenttä sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla Sievin Vanhallakirkolla Vääräjoen varrella (P 63° 55,978' ja I 24° 20,646').

Pellon salaojitus tehtiin 26.–27. 5.2015. Peltoalue oli avo-ojissa ennen salaojitusta. Päivä ennen salaojitusta avo-ojat kynnettiin umpeen ja pinta tasattiin traktorivetoisella tasausruuvilla. Kolmena päivänä ennen salaojitusta (23.–25.5.) satoi yhteensä 4 mm, ja pieni sadekuuro (alle 1 mm) sattui salaojitusta edeltävälle aamulle. Ensimmäisen ojituspäivän (26.5.) iltapäivällä alkoi kuuroluontoinen sade, joka kesti salaojituksen loppuun asti (yhteensä 6–8 mm). Pellon pinta kärsi märkyydestä ja oli osittain upottava salaojituksen loppuvaiheessa. Pohjavesiputket asennettiin kylvön jälkeen ja pohjavedenpinnan manuaaliset syvyysmittaukset aloitettiin 4.6. Salaojavalunnan mittaukset aloitettiin mittalaitteiden asennuksen jälkeen 16.6 ja pohjaveden automaattimittaukset 17.6.

Maan lajitekoostumus

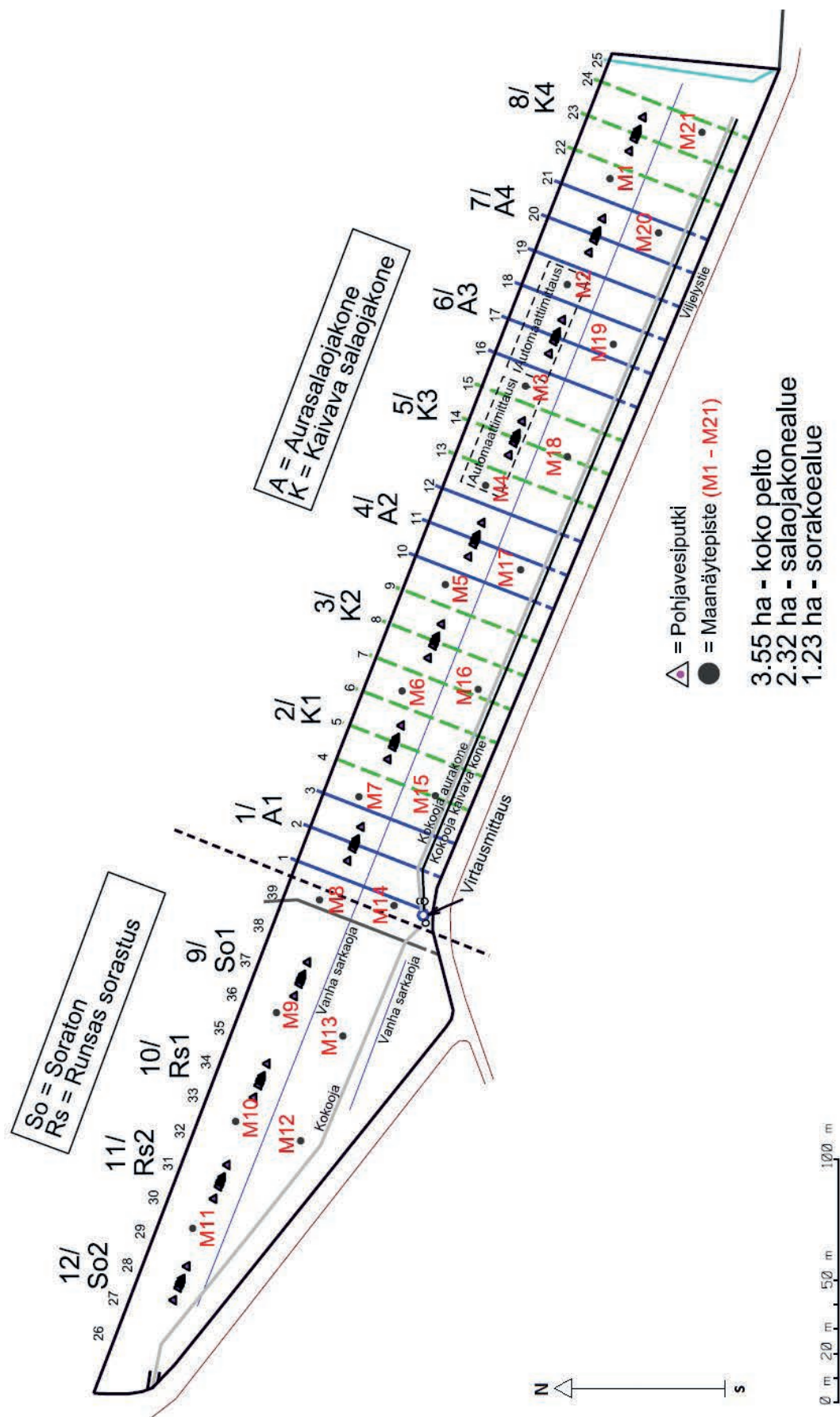
Pellon maalaji määritettiin kaikkiaan 21 pisteestä 0–20 cm, 20–50 cm, 50–80 cm ja yli 80 cm syvyydeltä otetuista näytteistä. Näytepaikat on esitetty kuvassa 2.2. Maanäytteet otettiin jatkettavalla kierrekairalla. Näytesyvyys mitattiin kairan varresta ja kaira puhdistettiin näytteenoton välillä. Rakeisuusmääritykset tehtiin Aalto-yliopiston vesiteknikan laboratoriossa. Pellon maalaji sisälsi laajasti erilaisia rakeisuuksia ja näytteet käsiteltiin tämän vuoksi areometrimenetelmällä ja pesuseulonnalla. Orgaanisen aineksen määrä määritettiin polttomenetelmällä. (SGY 1985)

Koealueet

Koekenttä jaettiin 12 koealueeseen (kuva 2.2). Kahdeksasta koealueesta neljä ojitettiin aurakoneella (Hoes Titan, kuva 2.3) ja vastaavasti neljä kaivavalla koneella (Inter-Drain 1824T, kuva 2.4). Jokaiselle alueelle asennettiin kolme salaojaa käyttäen 15 m ojaväliä ja keskimäärin 1,0 metrin ojitussyvyyttä. Imuojien pituudet olivat 60–65 metriä. Soraa laitettiin kummallakin koneella tehdyissä ojituksissa 10 cm putken päälle ja kaivantoon tiputettiin ruokamulta. Kaivuuleveys (kaivanto) oli kaivavalla koneella 24 cm ja aurakoneella 22 cm. Ruokamulta asennettiin suositusten mukaisesti ja koko salaojakaivanto täytettiin maa-aineksella. Ruokamullan pudotus tapahtui aurakoneella ojituksen aikana multaruuvilla ja kaivavalla koneen ojituksissa multa pudotettiin kaivinkoneella. Jokaiseen imuojaan tehtiin sorasilmäkkeet avo-ojien kohtiin. Kokoojaputket olivat reiätöntä putkea. Kuivatusvedet purkautuvat pellon länsiosassa olevaan avo-ojaan (kuva 2.2).

Pellon länsiosaan tehtiin kaivavalla salaojakoneella sorakoe neljälle alueelle, joista kahteen asennettiin salaojat ilman soraa ja kahteen ojat runsaalla soralla (50 cm putken päälle). Salaojakaivannoista otettiin ojitusvaiheessa digikuvia kaivannon koon ja täytön tarkastelua varten salaojituksen yhteydessä. Salaojien maaprofileja tarkasteltiin ja kuvattiin myös korjaustöiden yhteydessä syyskuussa 2015.

Koealueiden rakeisuudet ja maalajit on esitetty taulukkona liitteessä 3. Maalajit vaihtelevat salaojasyvyyydessä hiedan (Ht) ja hiueen (He) välillä. Tarkemmin määriteltynä maalajit ovat savinen hiue (sHe) pellon 12 näytekohdassa ja karkea hietä (KHt) 9 kohdassa. Koealueilla 1 ja 2 maalaji on savinen hiue (sHe). Koealueilla 3, 4, 7 ja 8 esiintyy molempia maalajeja, karkeaa hietää (KHt) sekä savista hiuetta (sHe). Koealueet 5 ja 6 ovat karkeaa hietää (KHt) kauttaaltaan. Pintamaaltaan pelto on runsasmultaista hietää (rmHt) ja ruokamultakerroksen paksuus on keskimäärin 30 cm.



Kuva 2.2. Sievin koekentän salaojasuunnitelma ja koealueet 1–8. Menetelmien koealueiden imuojat on merkitty eri väreihin, aurakoneen koealueet sinisellä (A1–A4) ja kaivavan koneen vihreällä (K1–K4). Pohjavesiputket on merkitty kolmioilla ja maanäytenpisteet numeroiduilla pisteillä. Sorakoealue näkyy koepellon länsipäässä.



Kuva 2.3. Aurasalaojakone Hoes Titan.



Kuva 2.4. Kaivava kone Inter-Drain 1824T.

Viljely- ja muokkaustoimenpiteet

Koekentällä viljeltiin kasvukausina 2015 ja 2016 ohraa (Brage). Peltoa viljeltiin normaalisti ennen ja jälkeen salaojituksen, ja muokkausketju oli perinteinen kyntö-äestys-kylvö. Viljelykiertoon ovat kuuluneet viljat (ohra ja kaura), nurmet ja rypsi ennen salaojitusta. Viljelystoimenpiteet on esitetty liitteessä 4.

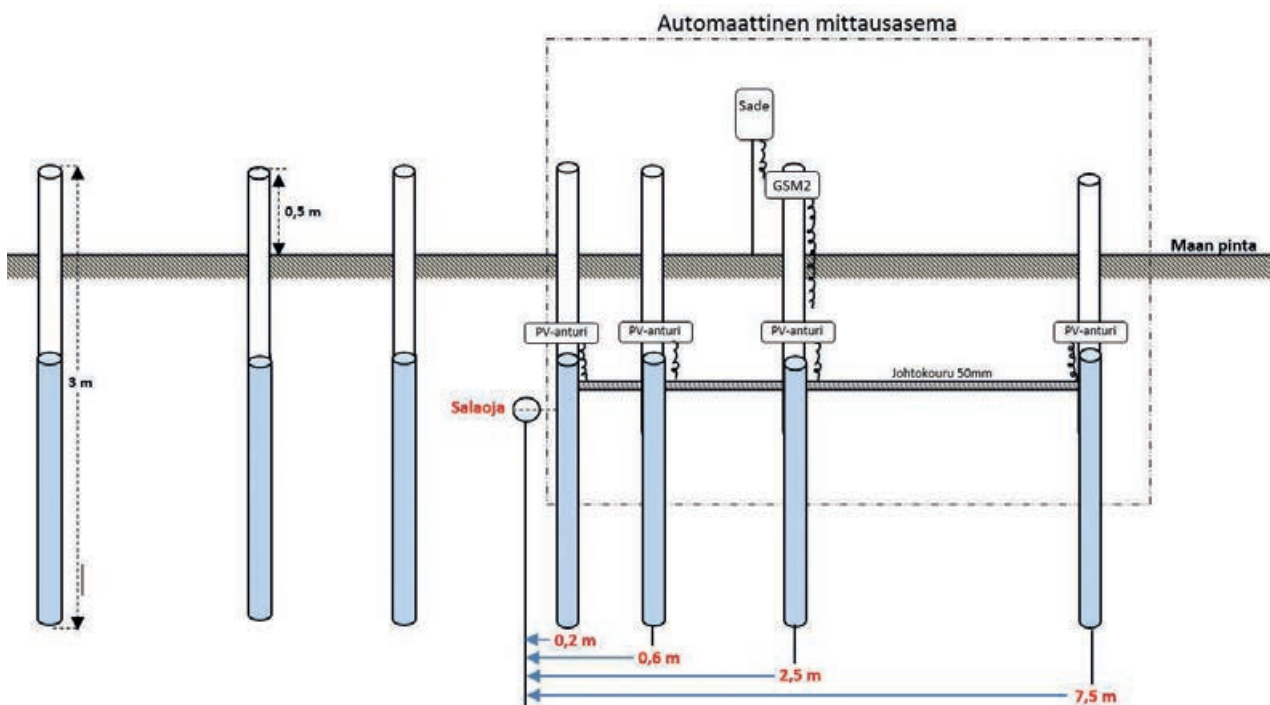
Hydrologiset mittaukset

Salaojituksen jälkeen jokaisen koealueen (12 kpl) keskimmäisen imuojan ympärille asennettiin pohjavesiputket 0,2, 0,6, 2,5 ja 7,5 m etäisyydelle molemmin puolin salaojaa (kuva 2.5). 0,2 m etäisyydelle asennettiin vain yksi putki, koska se oli lähellä salaojaa. Pohjavesiputket (PEH, polyeteeni, Ø 50 mm) olivat kolme metriä pitkiä ja niissä oli rei'itys 1,5 metrin pituudelta putken pohjasta. Putket asennettiin 2,5 m syvyyteen, joten reiätöntä putkea on maanpinnasta yhden metrin syvyyteen. Rei'ityksen ympärille asennettiin suodatinkangas.

Putket asennettiin maakairausvaunulla. Pohjavesiputkia asennettiin lisäksi vanhojen avo-ojien kohtiin sorasilmäkkeiden ympärille.

Pohjavedenpinnan syvyyttä mitattiin manuaalisesti tutkimusjakson, kesäkuu 2015 – joulukuu 2016 (19 kuukautta), aikana kevästä syksyyn (Little Dipper 0–22 m, Heron Instruments) noin kaksi kertaa viikossa, ja talvella harvemmin. Kahdelta koealueelta pohjavedenpinnan syvyydet mitattiin jatkuvatoimisilla mittareilla (PAA-36XW, Keller) 10 min välein. Jatkuvatoimiset pohjavesianturit asennettiin alueille K3 ja A3 imuojan toiselle puolelle edellä mainituille neljälle etäisyydelle.

Salaojavaluntaa mitattiin molemmissa menetelmissä kokoojaojista. Eri menetelmien salaojavedet koealueilta johdettiin omiin kokoojaputkiin, joihin asennettiin jatkuvatoimiset ultraäänivirtausmittarit (Hydrus DN50, Diehl Metering). Virtausmittarit asennettiin 1000 mm x 2500 mm salaojakaivoon. Virtausmittarien molemmin puolin asennettiin kokoojaojaan vesilukkorakenne, jolloin virtausmittarit saatiin virtaamaan jatkuvasti vedellä täytettynä. Molempiin kokoojaojiin asennettiin ennen mittauskaivoa sakkakaivot, joilla varmistettiin että salaojista kulkeutuva hienoaaines ei pääse tukkimaan virtausmittareita. Sadanta mitattiin 10 min välein jatkuvatoimisella sademittarilla (RainCatcher, Keller), joka asennettiin datan lähetyksikön (GSM2 box, Keller) yhteyteen. Sademittauksia (vesi- ja lumisade) tehtiin lisäksi ajoittain manuaalisesti. Kaivavan koneen kokoojaoja tukkeutui marras-joulukuussa 2015, ja se vaikutti sekä valuntaan että pohjaveden syvyyteen lähellä virtausmittareita. Salaojasto oli hetkittäin padotettuna tukoksen takia. Virtausmittarin tukos saatiin aukaistua pumppaamalla kaivavan koneen sakkakaivosta vettä siten, että virtausmittariin ei päässyt ojaosta vettä. Virtausmittari irrotettiin kokoojalinjasta ja puhdistettiin.



Kuva 2.5. Pohjavesiputket yhdellä Sievin koekentän koealueella etäisyyksillä 0,2, 0,6, 2,5 ja 7,5 m salaojasta. Kuvassa on esitetty automaattisen mittausaseman järjestelyt pohjavedenpinnan syvyyden mittausta varten. Automaattinen mittausasema koostui maanpäällisestä lähetyksiköstä ja neljästä pohjavesianturista sekä sademittarista. Manuaaliset mittaukset tehtiin molemmin puolin salaojaa (paitsi 0,2 metrin etäisyydellä yhdeltä puolelta) seitsemästä putkesta jokaiselta koealueelta.

Satomittaukset

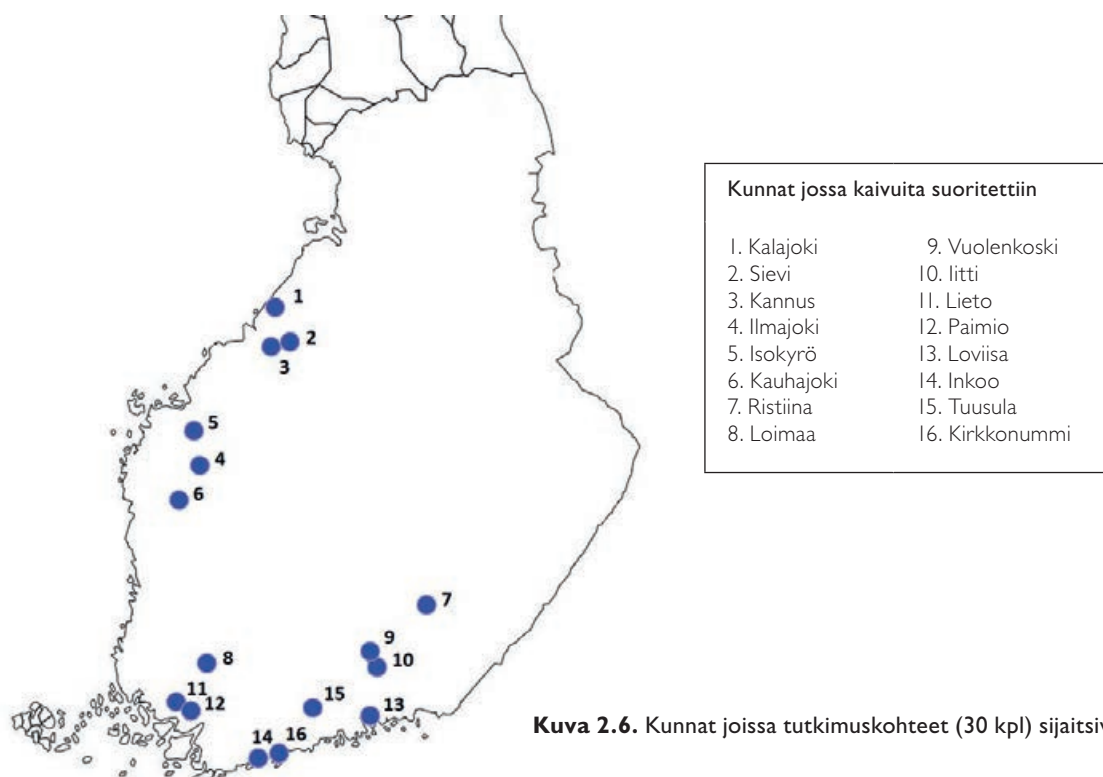
Koealueiden sadon määrä ja laatua mitattiin näytteistä, jotka otettiin ennen sadonkorjuuta 31.8.–02.09.2016 salaojan kohdalta ja 7,5 m etäisyydeltä salaojasta. Ohrakasvustosta kerättiin 0,5 m² alueelta jyväsato vihneineen käsin hehtaarisadon arvioimiseksi. Sadon keräyspisteitä oli jokaisella koealueella 5 kpl 7,5 metrin päässä salaojasta ja 5 kpl salaojan kohdalla. Kerranneita oli näin ollen 20 etäisyyttä kohti molemmilla menetelmillä ja yhteensä satomittauksia oli 80.

Satonäytteiden käsittelyssä pussiin kerätyt jyvät puitiin irti tähkistä ja jyväsato punnittiin. Sadosta määritettiin kuiva-ainepitoisuus, 1000 jyvän paino, hehtolitraino ja jyvien tyyppisato virallisten lajitekokeiden suoritusohjeiden mukaan (anon.) sekä jyvien typpipitoisuus Kjeldahl-menetelmällä Luken laboratoriossa.

2.3 Salaojien ympärysaineet

Ympärysaineiden toimivuutta selvitettiin kaivamalla vanhoja salaojia esiin eri puolella Suomea. Tutkittaviksi pelloiksi valittiin kohteita, joissa maalaji on salaojitukselle ongelmallinen ja joissa salaojituksen ikä on vähintään 10 vuotta. Lisäksi pyrittiin ottamaan mukaan peltoalueita, joissa on ilmennyt eriasteisia märkyysoongelmia, joiden epäiltiin aiheutuneen mahdollisesti ympärysaineesta.

Tutkimuskohteet (yhteensä 30) valittiin salaojasuunnittelijoille lähetetyn sähköpostikyselyn perusteella. Uusia, vuosina 2015–2016 esiin kaivettuja kohteita oli 18 kpl. Tuloksiin otettiin mukaan PVO2-hankkeen tutkimuskohteet (12 tutkimuslohkoa). Tutkimuskohteiden sijaintikunnat on esitetty kuvassa 2.6. Kaikki tutkimuskohteet on esitetty tulokset osion taulukossa 3.7.



Peltojen salaojat kaivettiin esiin kaivinkoneella kolmesta kohtaa lohkoa ja koekuoppien paikat merkittiin salaojakarttaan. Koekuopan sorasta ja maaperästä otettiin maanäytteitä sekä tehtiin peltomaan laatutestin kuoppahavainnot. Maanäytteet otettiin kuopasta 3–4 syvyydestä: 0–20, 20–50, 50–80 cm ja 80 cm syvemmältä, jos salaojat olivat syvällä. Salaojasyvyyden maanäytteiden rakeisuudet määritettiin Aalto-yliopiston vesitekniikan laboratoriossa. Myös soran rakeisuus määritettiin, mikäli edustava näyte saatiin kerättyä. Kaivannon maaprofilista, salaojaputkesta ja salaojaputken ympäryksestä otettiin valokuvia myöhempää tarkastelua varten. Koekuopista määritettiin soran määrä putken ympärillä. Lopuksi salaojaputki katkaistiin ja salaojaputken sisällöstä otettiin maanäytteet, jos putkeen oli päätynyt maata.

Peltojen maalajit määritettiin maan rakeisuuden ja orgaanisen aineksen pitoisuuden perusteella. Maaprofilin rakeisuudet määritettiin jokaisesta kohteesta salaojasyvyydestä syvyyksistä 50–80 cm tai yli 80 cm. Tutkimuskohteiden maanäytteet sisälsivät laajasti erilaisia rakeisuuksia ja näytteet käsiteltiin tämän vuoksi areometrimenetelmällä ja pesuseulonnalla. Orgaanisen aineksen määrä määritettiin polttomenetelmällä (SGY 1985).

2.4 Vesitaseen ja eroosion matemaattinen mallintaminen

FLUSH-malli

Mallinnusosahankkeissa kehitettiin ja sovellettiin kolmiulotteista (3-D) FLUSH-mallia (Warsta 2011, Warsta ym. 2013a, Warsta ym. 2013b), joka kuvaa veden virtausta (mm. Turunen ym. 2013, Turunen ym. 2015b), eroosiota (Warsta ym. 2014, Turunen ym. 2015a) ja aineiden kulkeutumista peltomittakaavassa. Kaksoishuokossysteemiin pohjautuva mallikuvaus mahdollistaa veden virtauksen simuloimisen erikseen vettä heikosti johtavassa maamatriisissa ja oikovirtausreittejä simuloivassa makrohuokostossysteemissä. Mallia on kehitetty ja testattu PVO-, PVO2- ja TOSKA-hankkeissa tuotettujen mittausaikasarjojen perusteella. Turunen ym. (2015b) kehittivät FLUSH-mallin haihdunnan laskentaa käyttäen hydrometeorologisia mittausaikasarjoja Nummelan koekentältä. Turunen ym. (2015a, 2017) kehittivät FLUSH-mallin eroosiokuvausta Siuntiossa sijaitsevan Gårdskullan Gårdin tutkimusalueen vesi- ja kiintoainemittauksia hyödyntäen. Koivusalo ym. (2017) tarkastelivat Gårdskullan seitsemän vuoden aineiston ja FLUSH-tulosten avulla valuntareittien vaihtelua leutoina ja kylminä talvina. Turunen ym. (2015a) totesivat, että merkittävä osa valunnasta kulkeutuu kaltevalta peltolohkolta pohjavesivalunnan kautta vesistöihin. Mallinnustulosten avulla Koivusalo ym. (2015, 2017) demonstroivat tarkemmin alueellisen säänvaihtelun vaikutusta pellon kaikkiin valuntakomponentteihin. TOSKA-hankkeeseen kuuluvien koekenttien lisäksi FLUSH-mallia on kehitetty ja sovellettu Kirkkonummen Sjöskullan (Warsta ym. 2013a, b) ja Vihdin Hovin (Nousiainen ym. 2015) koekentillä. Aiemmissa mallisovelluksissa FLUSH-mallin toiminta on todennettu mittauksia vastaan simuloimalla salaojitettujen savipeltojen hydrologiaa pitkällä (Turunen ym. 2013, 2015a, 2015b) ja lyhyillä (Salo ym. 2015, 2017) aikasarjoilla.

FLUSH-malliin integroitiin aineiden kulkeutumista kuvaava komponentti, jota testattiin typen prosessien simuloimiseen Nummelan koekentän koealueilla syyskausina. Osahanke pohjautui Salon (2014) diplomityöhön, joka tehtiin osana PVO2-hanketta. Tutkimusta jat-

kettiin ja tuloksista julkaistiin vertaisarvioitu artikkeli (Salo ym. 2015). Typpimallin kuvaus ja tulokset syyskausien simulaatioista (Salo 2014) on esitetty PVO2-loppuraportissa (Äijö ym. 2014). Mallisovelluksessa Salo ym. (2015) kuvasivat, miten syksyn sadanta-valuntatapahtumat säätelivät nitraatti- ja ammoniumtypen huuhtoumia pellolta. Typen reaktioita rajoittavilla tekijöillä (maan kosteus ja lämpötila) ei ollut vaikutusta huuhtoumiin. Merkittävämpi tekijä syksyn kuormitukseen oli kasvukauden jälkeinen epäorgaanisen typen varasto maaperässä. Salo ym. (2015) arvioivat epäorgaanisen typpivaraston kasvukauden typpitaseen (lannoituksen ja kasvin sadon typpimäärän erotus) avulla.

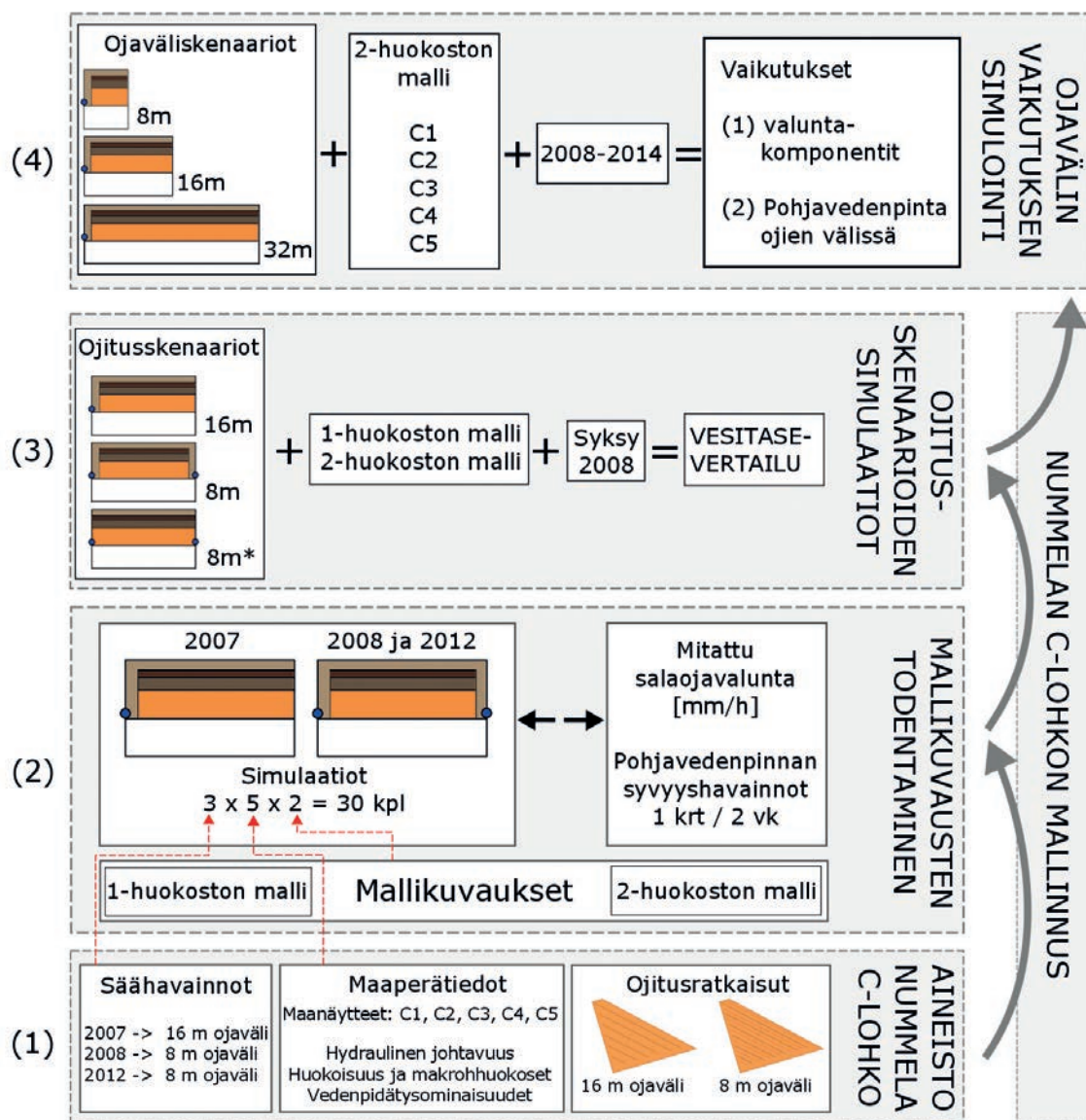
Veden virtausreitit eri tavoilla toteutetuissa salaojakaivannoissa

Osahankkeessa tarkasteltiin erilaisten kaivantojen sekä ojavälien vaikutusta veden virtausreitteihin. Nummelan aluetta C simuloitiin kolmiulotteisella ideaalilohkoa kuvaavalla laskentaverkolla ojavälimittakaavassa. Ideaalilohkolla tarkoitetaan sitä, että yksittäinen ojaväli erotettiin muusta koealueesta mallinnettavaksi alueeksi, eivätkä siihen vaikuttaneet ympäröivät alueet tai alueen hydrologiset yhteydet. Menetelmällä pyrittiin selvittämään kaivannon laskennallinen vaikutus Nummelan alueella C ennen ja jälkeen täydennysojituksen. Kuvassa 2.7 on esitetty mallinnusprosessin vaiheet sovelletusta aineistosta (1) mallin testaukseen (2) ja ojaväliskenaarioihin (3 ja 4).

Mallinnusprosessissa simuloitiin kolmea eri syysjaksoa kahdella eri mallikuvauksella ja viidellä eri maaparametrisoinnilla, jotka johdettiin suoraan koealueelta kerättyjen maanäytteiden mitatuista ominaisuuksista (liitteet 5a, b). Nummelan koekentän maaperän ominaisuudet oli määritetty vuonna 2006 otetuista maanäytteistä ennen PVO-hankkeen mittauksen alkamista (Äijö ym. 2014). Muussa parametrisoinnissa käytettiin tuloksia aiemmista mallinnustutkimuksista Nummelan koekentältä (esim. Turunen ym. 2013, Salo ym. 2015). Mallikuvauksen testaukseen valitut simulaatiojaksot olivat 2007 (ennen ojitusta), 2008 (heti ojituksen jälkeen) ja 2012 (neljä vuotta ojituksesta), millä varmennettiin mallin toiminta sekä alkuperäisessä ojituksessa (16 m ojaväli) että täydennysojituksen jälkeen (8 m ojaväli).

Todennettuja mallikuvauksia käytettiin eri ojitusskenaarioiden simuloimiseen syksyn 2008 simulointijaksolla (kuva 2.7, kohta 3). Testatut ojitusskenaariot kuvasivat tilannetta, jossa oli (1) 16 m ojaväli (alkuperäinen ojitus), (2) 8 m ojaväli (nykyinen ojitus) ja (3) 8 m ojaväli, kun kaivantoja ei toteutettu (ei soraa tai silmäkkeitä täydennysojassa). Salo ym. (2017) ovat käsitelleet tutkimuksen tulokset tarkemmin.

Viimeisessä vaiheessa (kuva 2.7, kohta 4) testattua kahden huokoston mallikuvauksia sovellettiin kuvaamaan eri ojavälien vaikutusta kuivatukseen. Simulaatiot toteutettiin vuosille 2008–2014 käyttäen kolmea eri ojaväliä (8, 16 ja 32 m) ja viittä maaparametrisointia (C1–C5). Simulaatiotuloksista arvioitiin ojitusmenetelmien vaikutusta salaojavaluntaan ja pohjavedenpinnan tasoon ojien välissä. Simulaatioiden jälkeen tutkittiin, kuinka pohjavedenpinta vaihtelee ojavälissä eri skenaarioissa keväällä ennen kasvukautta.



Kuva 2.7. Kaaviokuva Nummelan alueen C mallinnusprosessista. Mallinnusprosessin kuvaus etenee alhaalta ylös: 1-kohdassa esitellään mallinnuksessa käytetty aineisto, 2-kohdassa todennettiin yhden ja kahden huokoston mallikuvaukset vertaamalla simuloituja salaojavaluntoja mitattuun valuntaan. Mallitulosten todentamiseen käytettiin aikasarjoja ennen ja jälkeen alueen C täydennysojitusten, 3-kohdassa mallikuvauksilla simuloitiin eri ojitusten vaikutusta valuntakomponentteihin yhtenä syysjaksona (2008), ja 4-kohdassa toteutettiin simulaatioskenaariot kolmelle eri ojavälille ja viidelle maaperäparametrisoinnille seitsemän vuoden aikasarjalle. Ojavälien vaikutusta kuivatukseen tarkasteltiin simuloitujen pohjavedenpintojen avulla. Laskentaverkon pituus määräytyi ojavälin mukaan tarkastelemalla ojavälin hydrologiaan salaojakohdasta salaojavälin keskikohtaan. Laskentaverkko oli samankokoinen eri ojaväleillä kohdissa 2 ja 3, mutta vaihteli ojavälin mukaan kohdassa 4.

Kosteudesta kärsivän peltoalueen täydennysojituksen vaikutus vesitaseeseen

Osahankkeessa tutkittiin mittaustulosten ja laskentamallin avulla kaivavalla salaojituskoneella tehdyn täydennysojituksen vaikutusta kosteudesta kärsivän alueen D vesitaseeseen Nummelan koekentällä eri vuodenaikoina. Tutkimuksen laskennallinen osuus tehtiin FLUSH-mallilla, jossa simulaatiot toteutettiin 2-D laskentaverkolla alueen pysty-vaakasuuntaisesta poikkileikkauksesta. Koska poikkileikkauksessa pystytään huomioimaan alueen topografia, voidaan laskennallisesti tarkastella alueen reunalla olevan jyrkän rinteen vaikutusta vesitaseeseen ja veden virtausreitteihin. Kuvassa 2.8 on esitetty mallinnusprosessin vaiheet.

Malli kalibroitiin ja validointiin alueen D alkuperäiselle ojitukselle, jolloin ojaväli oli 32 m (2007–2014, kalibrointijakso–tutkimusjakso VI) ja täydennysojitukselle, jolloin ojaväli oli 10,7 m (2014–2016, tutkimusjaksot VII–VIII). Sovelletun mallikuvauksen maakerrosten parametrisointi johdettiin alueen D viiden maanäytteen mitatuista ominaisuuksista ja aiemmista mallisovelluksista alueelle D (Turunen ym. 2013). Mittauksiin sovitettujen vedenpidätyskäyrät salaojasyvyyden yläpuolisille maakerroksille on esitetty liitteessä 6. Mallinnuksessa käytetyt hydrauliset johtavuudet ja makrohuokoisuus eri maa kerroksille on esitetty taulukossa 2.1. Häggblom (2017) on kuvannut mallin yksityiskohtaisemman parametrisoinnin.

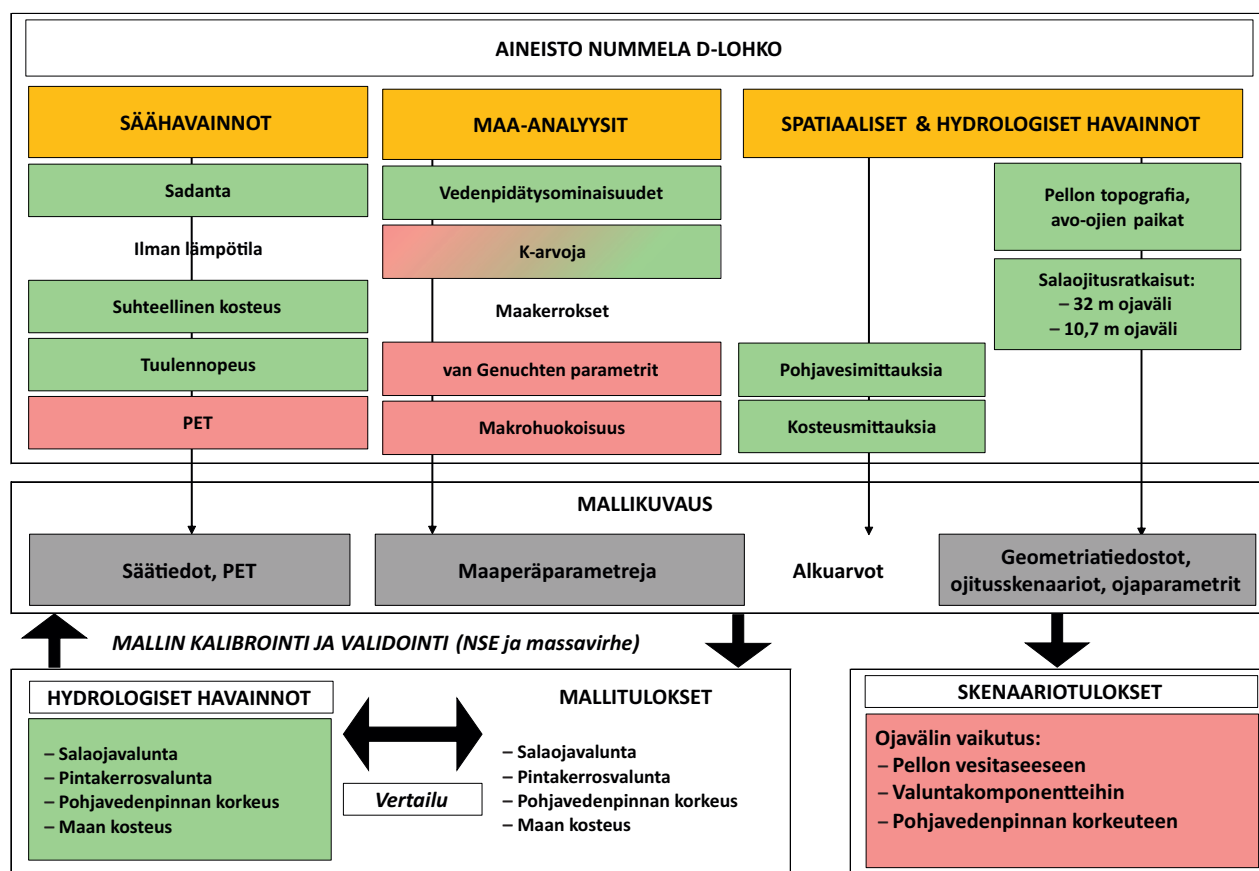
Mallin parametrit kalibroitiin käyttämällä mitattua tunnitaita salaoja- ja pintakerrosvaluntaa sekä havaintoja pohjavedenpinnan tasoista salaojien puolivälissä (kuva 2.8). Alkuperäisen ojituksen kalibrointijakso oli 1.9.2008–1.1.2009 ja validointijakso oli 1.6.2009–31.5.2014. Täydennysojituksen kalibrointijakso oli 1.6.2014–30.4.2015 ja validointijakso oli 1.6.2015–31.5.2016. Kalibrointia toteutettiin muuttamalla salaojien ja syvien maakerrosten parametreja. Mallin toimintaa kalibroinnissa ja validoinnissa arvioitiin Nash-Sutcliffen (1970) hyvyysluvulla (NSE) ja tasevirheellä. Tasevirhe laskettiin kunkin jakson mitattun ja mallinnetun valuntamäärän absoluuttisena erotuksena suhteutettuna mitattuun valuntamäärään.

Kalibroidulla ja validoidulla mallilla tuotettiin skenaarioita koealueen hydrologisista muuttujista tiheällä (10,7 m) ja harvalla (32 m) ojituksella. Skenaariotulosten avulla arvioitiin koealueen kuivatuskyvyn laskennallista muutosta sekä ojitus-skenaarioiden vaikutusta alueen vesitaseeseen (Häggblom 2017).

Taulukko 2.1 Mallinnuksessa käytetyt maaperäparametrit. K_{sat} on vedellä kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus.

Syvyys [m]	K_{sat} , makrohuokosto [l/h]	K_{sat} , maamatriisi [l/h]	Makrohuokoisuus [%]
0,00–0,25	3,60	0,0032	4,00
0,25–0,45	0,131	0,0001	0,145
0,45–1,00	0,423	0,0001	0,47
1,00–2,00	0,225*	0,0001*	0,25*
2,00–6,00	0,00*	0,00034*	0,00*

* = kalibroituja arvoja



Kuva 2.8. Prosessikaavio Nummela alueen D mallinnuksesta. Punaiset laatikot kuvaavat johdettuja/simuloituja arvoja ja vihreät laatikot mitattuja/havaittuja arvoja. Mallin syöttötiedot on merkitty harmaalla. PET=potentiaalinen evapotranspiraatio.

Erosio ja kiintoaineen kulkeutuminen rakenteellisessa salaojitetussa savimaassa

Gårdskulla Gården monivuotinen mittaussaineisto ja 3-D prosessipohjainen FLUSH-malli mahdollistivat kiintoaineen massataseiden ja kulkeutumisreittien kokonaisvaltaisen laskennallisen määrittämisen eri topografisissa ja hydrometeorologisissa olosuhteissa (Turunen ym. 2017). Analyysiin valittiin kahden vuoden ajanjakso (2008–2009). Kummankin tutkitun vuoden talvijaksot olivat vähälumisia. Salaoja- ja pintakerrosvaluntojen kiintoainekuormat laskettiin virtaamien ja virtaamapainotteisten kiintoainepitoisuuksien tulona. Mittaukset tehtiin kahdella eri kaltevuuden (1 % ja 5 %) omaavalla salaojitetulla peltoalueella.

Veden virtausmalli oli saatavissa aiemmista FLUSH-sovelluksista Gårdskulla Gården koekentällä (Turunen ym. 2015b; Koivusalo ym. 2015, 2017). Eroosioprosesseista ja kiintoaineen kulkeutumisesta laadittiin kolme erilaista mallirakennetta (mallit A–C), jotka edustivat erilaisia oletuksia kiintoaineen virtauskulkeutumisreiteistä maaperän makrohuokosissa. Malli A salli 3-D kulkeutuminen koko maaperässä. Malli B salli 3-D kulkeutuminen, mutta vain salaojasyvyyden yläpuolella. Malli C salli ainoastaan 1-D vertikaalisen kulkeutuminen. Mallit A–C kalibroitiin (2008) ja validoitiin (2009) havaittuja kiintoainekuormia ja -pitoisuuksia vasten.

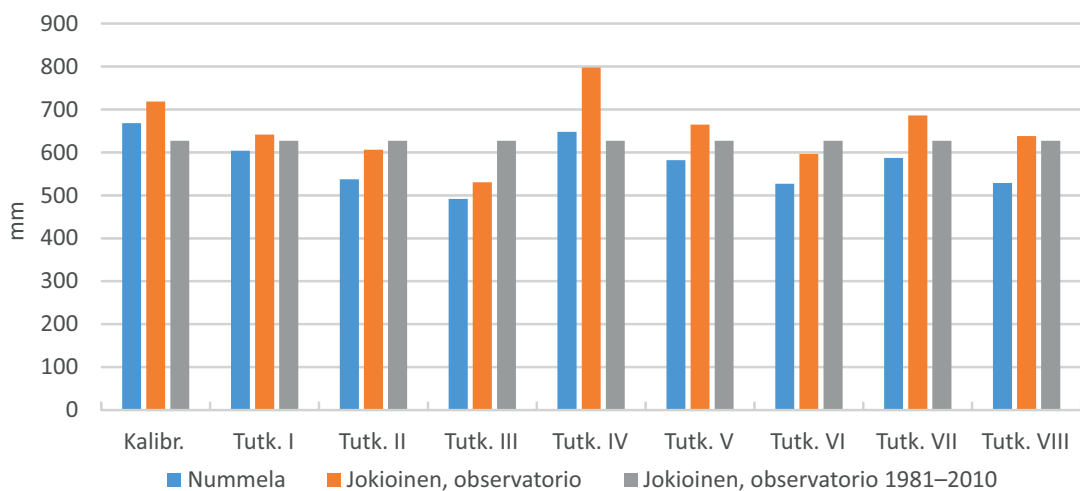
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

3.1 Täydennysojituksen vaikutukset Nummelan koekentällä

Tähän lukuun on koottu sekä TOSKA-hankkeen että Nummelan koekentän aikaisempien tutkimushankkeiden (Vakkilainen ym. 2010, Äijö ym. 2014) mittaustuloksia vuodesta 2007 lähtien, jotta vuosien vaihtelusta ja ojitustoimenpiteiden vaikutuksista saadaan mahdollisimman kattava käsitys. TOSKA-hankkeen tulokset kattavat ajanjakson kesäkuu 2014 – toukokuu 2016 (tutkimusjaksot VII ja VIII). Tulosten tarkastelussa on kiinnitetty huomiota erityisesti alueiden C ja D täydennysojitusten vaikutuksiin pellon hydrologiaan ja vesistökuormitukseen.

3.1.1 Sääolot

Kalibrointijakso oli mittausjaksoista sateisin, Nummelan koekentän korjattu sadesumma oli 715 mm (kuva 3.1). Tutkimusjaksojen sademäärät vaihtelivat välillä 526–693 mm (keskiarvo 603 mm). Koekenttää lähinnä sijaitsevalla Ilmatieteenlaitoksen mittausasemalla (Jokioisten Observatorio) sadannan pitkän ajan (1981–2010) vuosikeskiarvo (korjaamaton) on 627 mm. Jaksojen sisällä sateiden ajoittuminen vaihteli paljon, samoin lumena tulleen sateen osuus. Lumisimpia olivat tutkimusjaksojen II ja III talvet, tällöin suurimmat koekentältä mitatut lumen syvyydet olivat 45 ja 53 cm. Näiden lisäksi keskimääräistä (28 cm) enemmän lunta mitattiin jaksoiden IV ja V talvina. Verrattain lumiset talvet sattuivat siis peräkkäin. Vähälumisia (maksimisyyvyys alle 10 cm) talvia osui kalibrointijakson lisäksi jaksolle VI ja VIII.



Kuva 3.1. Nummelan koekentän sekä Ilmatieteen laitoksen Jokioisten observatorion vuotuiset (korjaamattomat) sadannat kalibrointijaksolla ja tutkimusjaksoilla sekä ajanjakson 1981–2010 keskimääräinen sadanta (Jokioisten observatorio). Vuotuinen jakso oli kesäkuu–toukokuu.

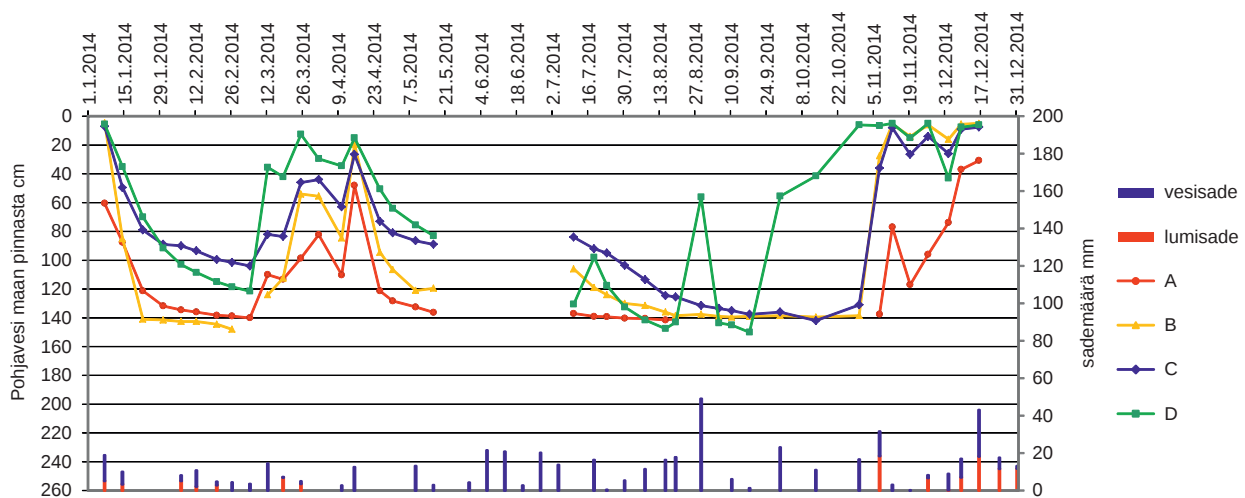
Roudan maksimisyvytydet vaihtelivat tutkimuskaudella 18 ja 62 cm:n välillä. Syvimmillään routa oli tutkimusjaksojen II ja VIII talvina. Yli puolen metrin syvyyteen routa painui lisäksi jaksoilla I, III sekä VI. Kalibrointijakson (roudan maksimisyvyys 30 cm) lisäksi tutkimusjakso VII (18 cm) oli talviolosuhteiltaan lauha. Yhteenvedo roudan syvyysmittauksista on liitteessä 7. Kasvukauden aikaisen (kylvön ja puinnin välisen ajan sadanta) sadesumman (korjattu) vaihteluväli oli 152–245 mm. Suurin kasvukauden sadesumma mitattiin kalibrointijaksolla ja pienin lumisen talven jälkeen jaksolla III. Sadesummat on esitetty liitteessä 7.

3.1.2 Pohjavedenpinnan syvyys ja maan kosteus

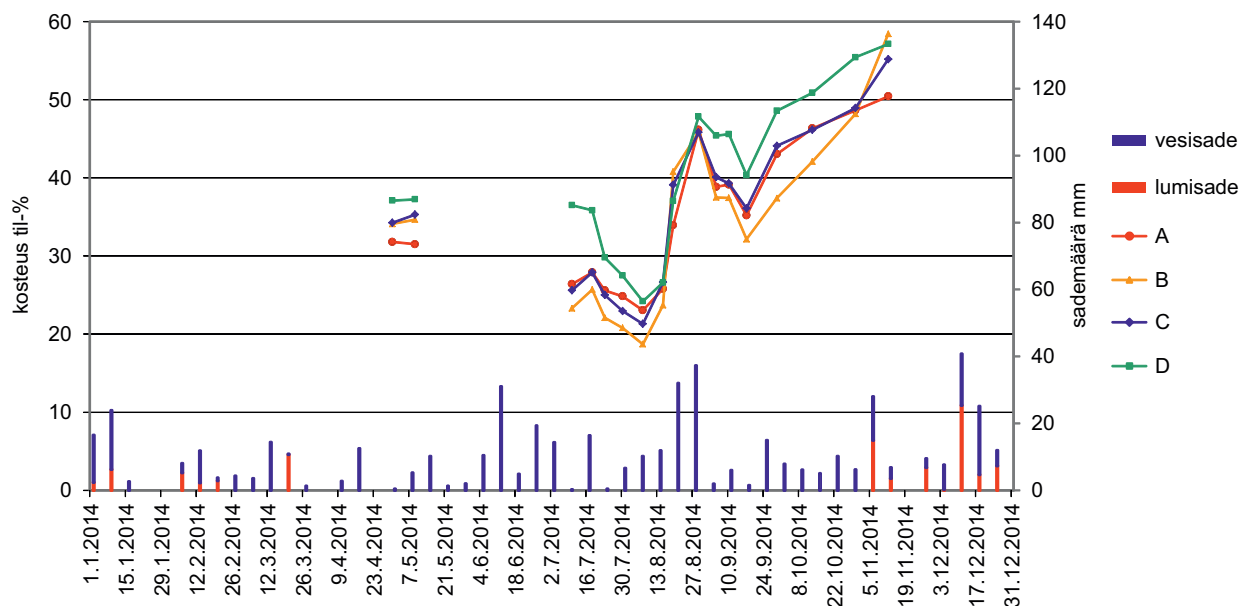
Alueella A, joka sijaitsee valtaojaan (Raiskionoja) johtavan rinteen tuntumassa, pohjavesi on luontaisesti syvemmällä kuin muualla, ja se laskee kuivina kausina selvästi salaojasyvyyden alapuolelle. Alueella C, joka sijaitsee tasaisella pellon osalla noin 300 metriä valtaojasta, pohjavesi on luontaisesti korkeammalla, ja pysyy mittausten mukaan salaojasyvyyden yläpuolella suuren osan ajasta. Vertailualueella B pohjavedenpinnan syvyys vaihteli eri vuosina suhteessa viereiseen alueeseen C, mutta pääosin se oli alempana kuin alueella C. Pohjavedenpinnan syvyydet kalibrointijaksosta vuoteen 2013 on esitetty liitteissä 8 a ja b. Lukuarvot edustavat viikon tai kahden välein tehtyjä käsimittauksia samoin kuin muutkin tässä kohdassa esitetyt tulokset.

Ennen täydennysojitustaan alueen D pohjaveden pinta oli vallitsevasti muita alueita korkeammalla. Alueen pohjavesi myös reagoi herkimmin sateisiin ja nousi märkinä aikoina lähelle maanpintaa. Touko-kesäkuun vaihteessa 2014 alueella tehty täydennysojitus (ojaväli 32 m → 10,7 m) ei näyttänyt juuri vaikuttavan alueen pohjavedenpinnan tasoon täydennysojitusta seuranneen kesän ja syksyn aikana, vaan alue D oli edelleen märin ja reagoi herkimmin sateisiin (kuva 3.2a). Vuoden 2015 mittausten mukaan ojitus oli parantanut alueen D kuivatustilaa, eikä pohjavesi noussut muita alueita korkeammalle kuin satunnaisesti runsaiden sateiden jälkeen (kuva 3.3a). Keväällä 2015 pohjavesi oli korkeimmillaan suurimman ojavälin (16 m) alueella B. Vuoden 2016 keväällä alueen D pohjavedenpinta nousi ja laski muiden alueiden tahtiin, ja lähimpänä maan pintaa pohjavedenpinta oli edellisen kevään tapaan alueella B. Kesän ja syksyn aikana pohjavedenpinta laski alimmas alueella B ja pysytteli lähimpänä maan pintaa alueella C. Alueella D pohjaveden pinta liikkui pääosin näiden välissä. Puinnin (1.9.) ja syysmuokkauksen (16.9.) aikaan pohjavedenpinta oli kaikilla alueilla salaojasyvyyden alapuolella (kuva 3.4a).

Maan kosteusmittaukset osoittivat samaa kuin pohjavedenpinnan mittaukset: vuonna 2008 ojitetuilla alueilla A (ojaväli 6 m) ja C (8 m) maan pinta pysyi märkinäkin kausina kuivempana kuin alueilla B (16 m) ja D (ennen täydennysojitusta 32 m). Alue D oli lähes poikkeuksetta muita alueita märempi, varsinkin runsaiden sateiden ja sulamisvalunnan aikaan. Maankosteudet kalibrointijaksosta vuoteen 2013 on esitetty liitteissä 9 a ja b.

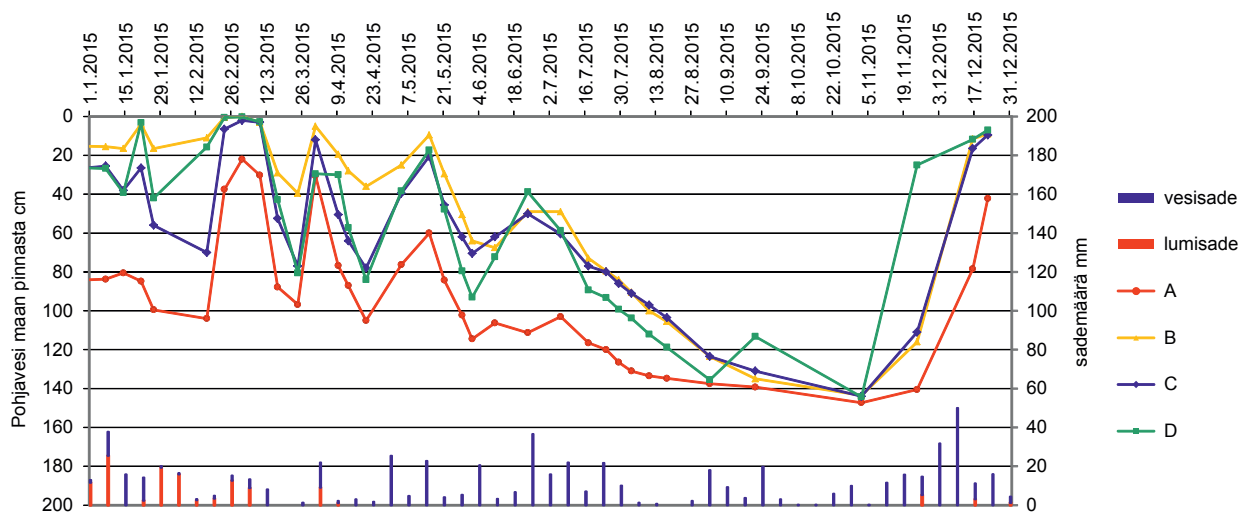


Kuva 3.2a. Pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnasta salaojien puolivälissä v. 2014 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 1950-luvulta lähtien 21.5.2014 saakka 32 m, sen jälkeen 10,7 m), (n=5–12). Katkos mittauksissa johtuu alueen D täydennysojituksesta.

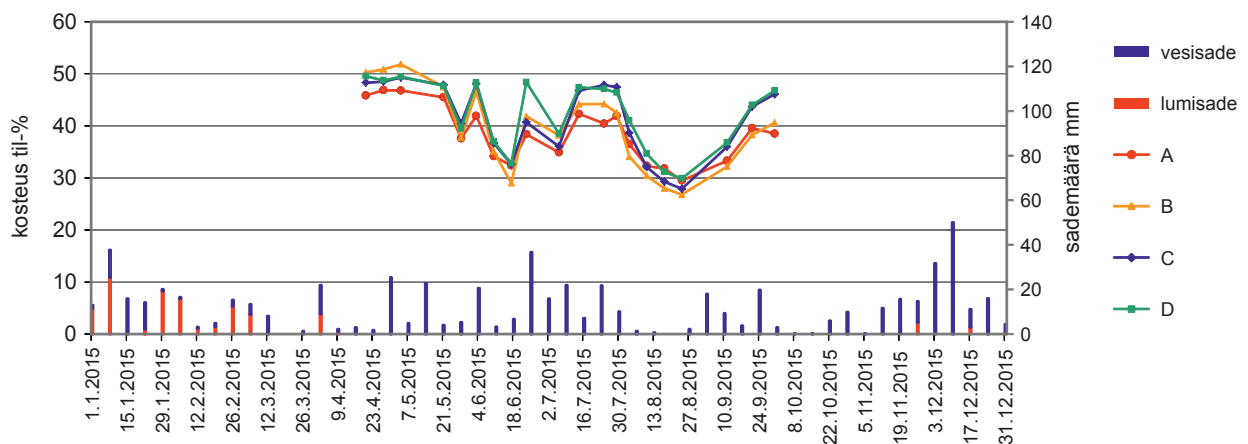


Kuva 3.2b. Maan kosteus (tilavuusprosentteina maan kokonaistilavuudesta) ojien puolivälissä 0–30 cm:n kerroksessa v. 2014 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (1950-luvulta lähtien 21.5. saakka ojaväli 32 m, sen jälkeen 10,7 m), (n=10–24). Katkos mittauksissa johtuu alueen D täydennysojituksesta.

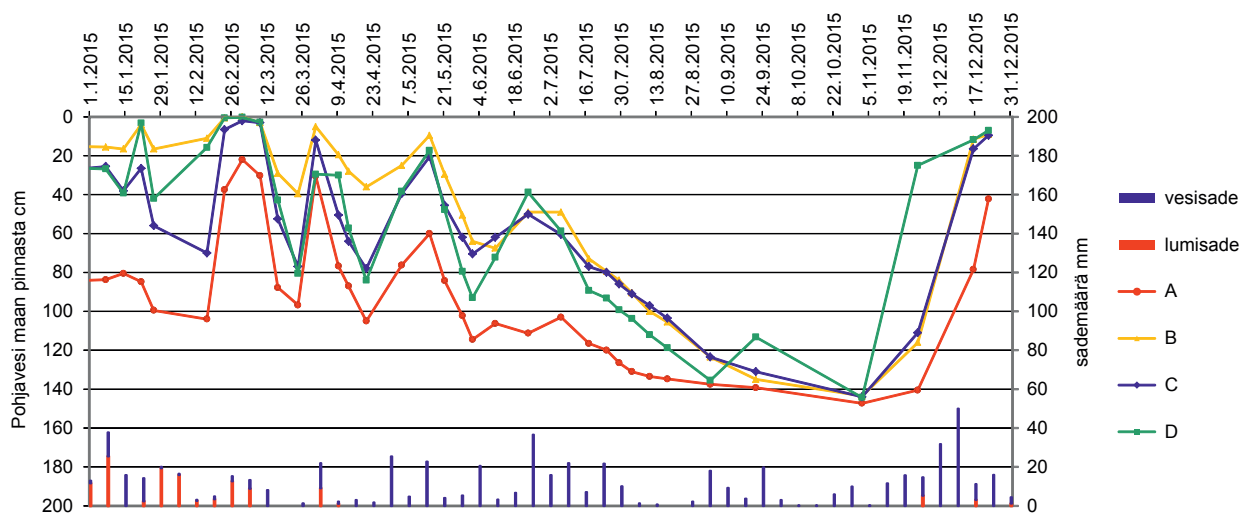
Alkukesällä 2014 tehdyn täydennysojituksen jälkeisenä syksynä alue D pysyi märkänä (kuva 3.2b), ja vuonna 2015 se oli edelleen märin alue runsaiden sateiden aikaan (kuva 3.3b). Ojituksen jälkeen alueen D kosteuspitoisuudet muistuttivat tasaisen alueen C kosteuspitoisuuksia. Vuonna 2016 alue D oli muita alueita selvästi märempi kaikkien kesä–lokakuussa tehtyjen maan kosteusmittausten mukaan, lukuun ottamatta elokuun alkua (kuva 3.4b). Alueella D maankosteuden mittauspisteet sijaitsivat vanhojen, 1950-luvulla asennettujen, salaojien (ojaväli 32 m) puolivälissä. Uusiin vuonna 2014 asennettuihin ojiin mittauspisteistä etäisyyttä oli 5,3 metriä.



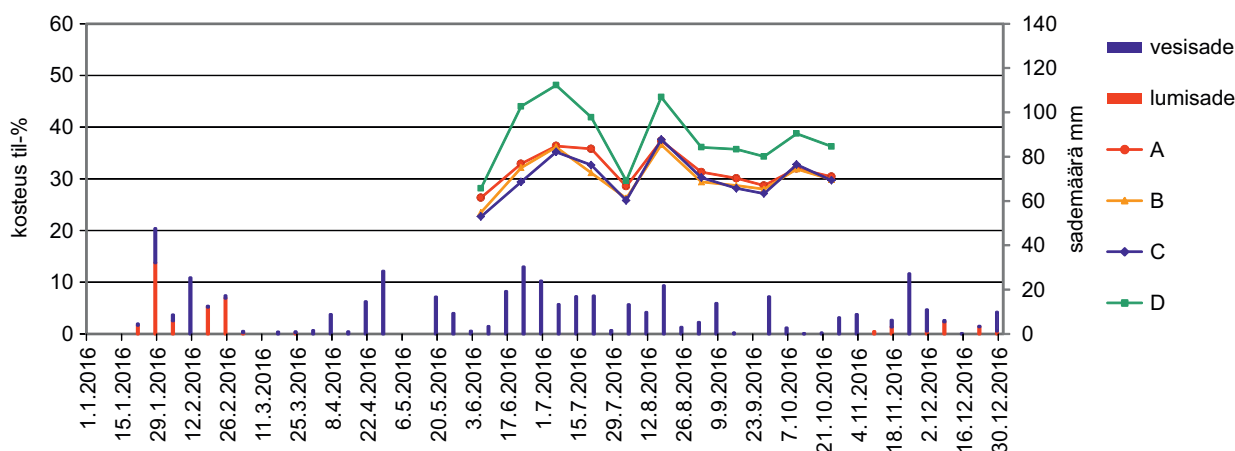
Kuva 3.3a. Pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnasta ojien puolivälissä v. 2015 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m kevästä 2014), (n=5–12).



Kuva 3.3b. Maan kosteus (tilavuusprosentteina maan kokonaistilavuudesta) ojien puolivälissä 0–30 cm:n kerroksessa v. 2015 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m kevästä 2014), (n=10–24).



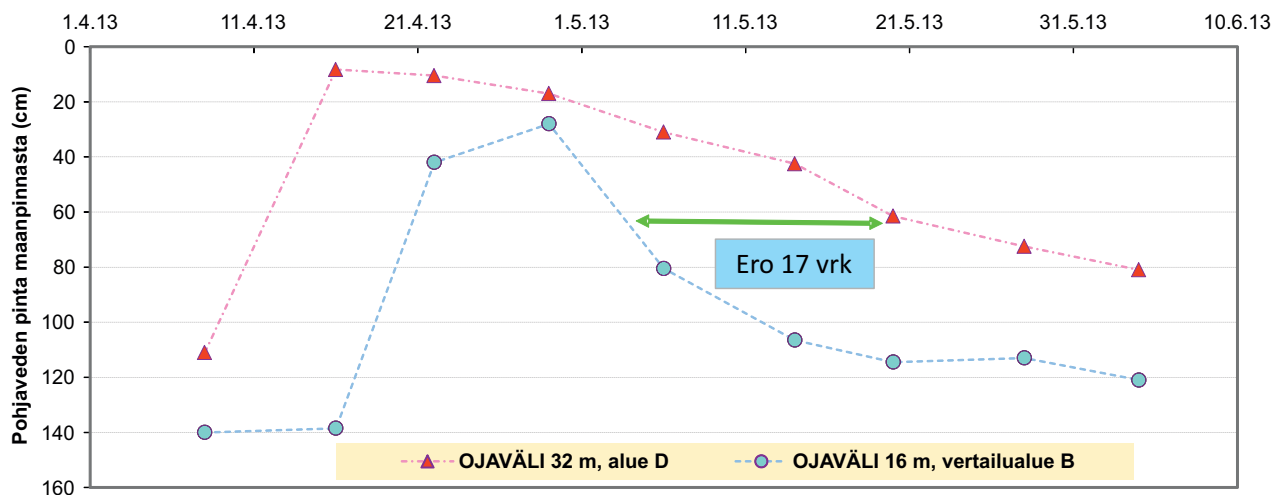
Kuva 3.4a. Pohjaveden pinnan etäisyys maan pinnasta ojien puolivälissä v. 2016 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m, kevästä 2014), (n=5–12).



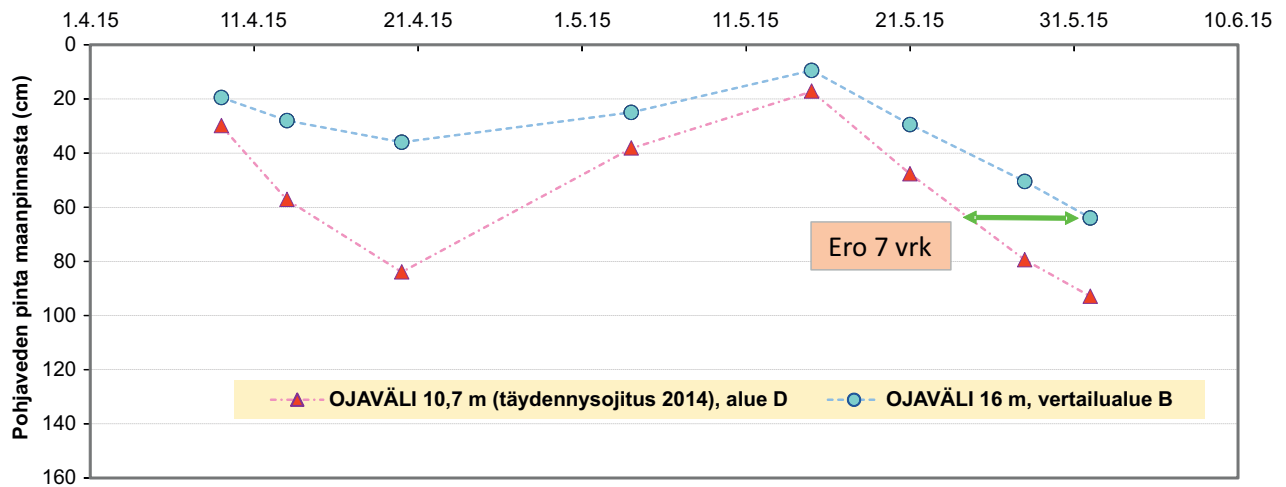
Kuva 3.4b. Maan kosteudet (tilavuusprosentteina maan kokonaistilavuudesta) ojien puolivälissä v. 2016 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m, keväästä 2014), (n=10-24).

Kuivatustilan vaikutus pohjaveden pinnan syvyyteen

Alueen D kuivatustilan paraneminen näkyy verrattaessa pohjavedenpintoja keväinä 2013 ja 2015. Ennen täydennysojitusta alueen D pohjavedenpinta laski samalle tasolle (60 cm maanpinnasta) alueen B kanssa 17 vuorokautta myöhemmin (kuva 3.5a) ja ojituksen jälkeen keväällä 2015 alueen D pohjavedenpinta laski 60 cm:n alapuolelle 7 vuorokautta aluetta B aiemmin (kuva 3.5b).



Kuva 3.5a. Nummellan koalueiden D ja B pohjaveden syvyydet ojien puolivälissä keväällä 2013. Alueen B ojaväli 16 m ja alueen D 32 m.



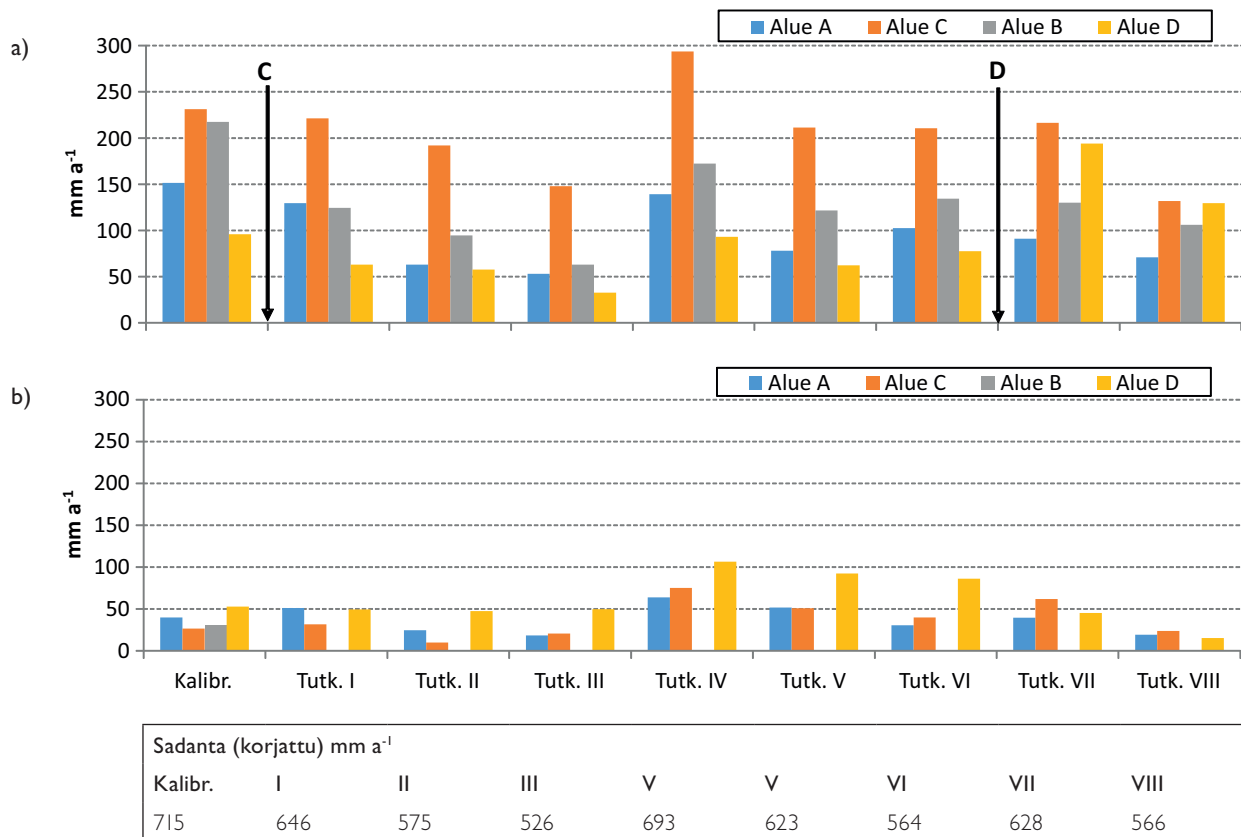
Kuva 3.5b. Nummelan koealueiden D ja B pohjaveden syvyydet ojien puolivälissä keväällä 2015. Alueen B ojaväli 16 m ja alueen D 10,7 m (täydennysojitus keväällä 2014).

3.1.3 Valunta

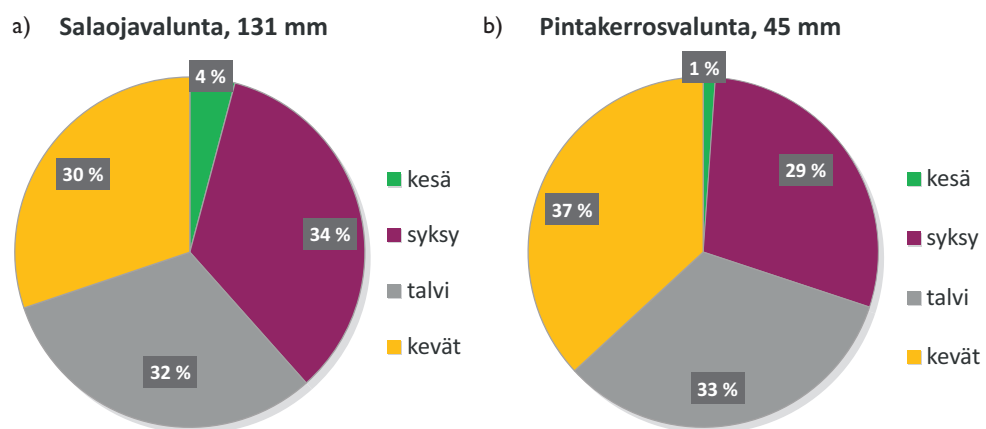
Nummelan lievästi viettävällä koekentällä salaojavalunta muodosti keskimäärin 85 % mitatusta kokonaisvalunnasta (salaojavalunnan ja pintakerrosvalunnan summa) 8 ja 16 m ojavälin alueilla. Ennen täydennysojitusta (kalibrointijakso–tutkimusjakso VI) 32 m ojavälin alueella D salaojavalunnan osuus oli noin puolet mitatusta kokonaisvalunnasta, ja täydennysojituksen jälkeisenä kahtena vuonna 80 ja 90 %. Kalibrointijakson ja kahdeksan tutkimusjakson vuotuiset salaoja- ja pintakerrosvalunnat on esitetty kuvissa 3.6a ja b. Kumulatiiviset salaoja- ja pintakerrosvalunnat samoilta jaksoilta ovat liitteessä 10. Tutkimusjaksoilla kevätulunnan aikaiset suuret vesimäärät, jäinen maa sekä veden virtailu pengerrysten yli aiheuttivat epätarkkuutta pintakerrosvalunnan mittaamisessa, varsinkin alueella B. Alueen B pintakerrosvalunnan mittaustulokset on jätetty tästä tarkastelusta pois.

Valtaosa valunnasta syntyi pohjoisille ilmasto-oloille tyypillisesti kasvukauden ulkopuolella. Valuntojen vuosien väliseen vaihteluun vaikuttivat lähinnä sademäärä sekä sateiden ajallinen jakautuminen ja rankkuus. Myös erilaiset talviolosuhteet näkyivät valunnan muodostumisessa. Kaikki alueet ja kaikki jaksot huomioon ottaen salaojavaluntaa muodostui melko tasaisesti syksyllä (syys–marraskuu), talvella (joului–helmikuu) ja keväällä (maalis–toukokuu). Kesän (kesä–elokuu) osuudeksi jäi 4 % vuotuisesta salaojavalunnasta (kuva 3.7a). Pintakerrosvalunta painottui keskimäärin hieman vähemmän syksyyn ja enemmän kevääseen (kuva 3.7b).

Kesäkuussa 2008 tehdyn täydennysojituksen jälkeen alueen C valuntasuhteet muuttuivat selvästi suhteessa vertailualueeseen B. Uusintaojitus alueella A lisäsi salaojavalunnan määrää vain ensimmäisenä ojituksen jälkeisenä vuonna. Sen jälkeen salaojavalunnan määrä suhteessa vertailualueeseen B palautui kalibrointijakson tasolle.



Kuva 3.6. Vuotuinen salaojavalunta (a) ja pintakerrosvalunta (b) Nummelan koealueilta kalibrointijaksolla ja tutkimusjaksoilla I–VIII kesäkuusta 2007 toukokuuhun 2016. Kuvien alla on vuoden pituisten jaksosten sadannat. Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat on merkitty nuolella.



Kuva 3.7. Salaojavalunnan (a) ja pintakerrosvalunnan (b) vuodenaikainen jakautuminen (kaikki alueet, kalibrointijakso–tutkimusjakso VIII). Prosenttiosuudet edustavat mittausjaksojen kaikkien alueiden salaoja- ja pintakerrosvaluntojen keskiarvoja.

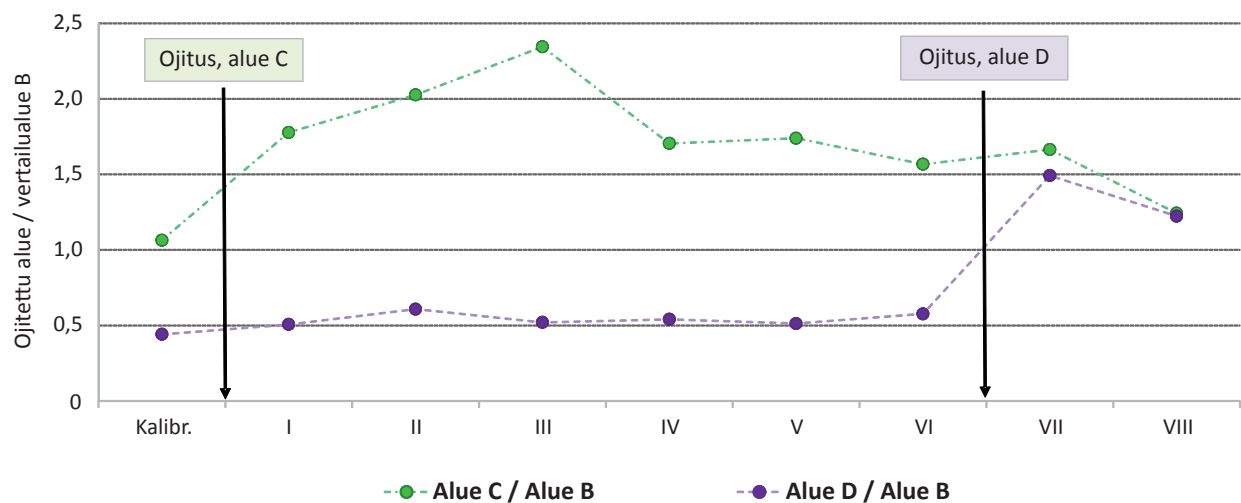
Vuotuisen salaoja- ja pintakerrosvalunnan summan osuus vuosisadannasta (valuntakerroin) vaihteli alueella C välillä 0,28–0,53. Ennen alueen D täydennysojitusta alueen valuntakerroin oli keskimäärin 0,22, mikä viittaa siihen, että alueelta D saattoi tulla verrattain paljon pohjavesivaluntaa. FLUSH-mallilla saatujen tulosten mukaan pohjavesivalunnan osuus oli 12–15 % koko tutkimusalueen vesitaseesta runsaan puolentoista vuoden pituisella laskentajaksolla (Turunen ym. 2013). Kahdeksan vuoden simulointitulosten perusteella pohjavesivalunnan osuus vuotuisesta vesitaseesta alueella D oli keskimäärin 29 % (ojaväli 32 m) ja 24 % (10,7 m). Nummelaan koekentän mittausaineistoa hyödyntäviä mallinnustuloksia veden virtausreiteistä salaojakaivannoissa ja täydennysojituksen vaikutuksesta vesitaseeseen on esitetty kohdassa 3.4.

Täydennysojituksen vaikutus valuntaan

Täydennysojitus lisäsi salaojavaluntaa molemmilla koealueilla. Ojavälin puolittaminen (16 m → 8 m) alueella C lisäsi vuotuista salaojavaluntaa keskimäärin 1,8-kertaiseksi 16 metrin ojavälin alueeseen (B) verrattuna. Valuntojen suhdeluku (C/B) vaihteli ojituksen jälkeen verrattain laajasti, välillä 1,2–2,3. Alueen D ojavälin pienentäminen kolmannekseen (32 m → 10,7 m) lisäsi salaojavaluntaa vertailualueeseen B nähden ensimmäisenä täydennysojituksen jälkeisenä vuonna 1,5- ja toisena vuonna 1,2-kertaiseksi. Ennen täydennysojitusta salaojavaluntojen suhde (D/B) oli keskimäärin 0,5 ja sen vaihtelu pientä (0,4–0,6). Valuntojen suhdeluvut mittausjaksoilla on esitetty kuvassa 3.8.

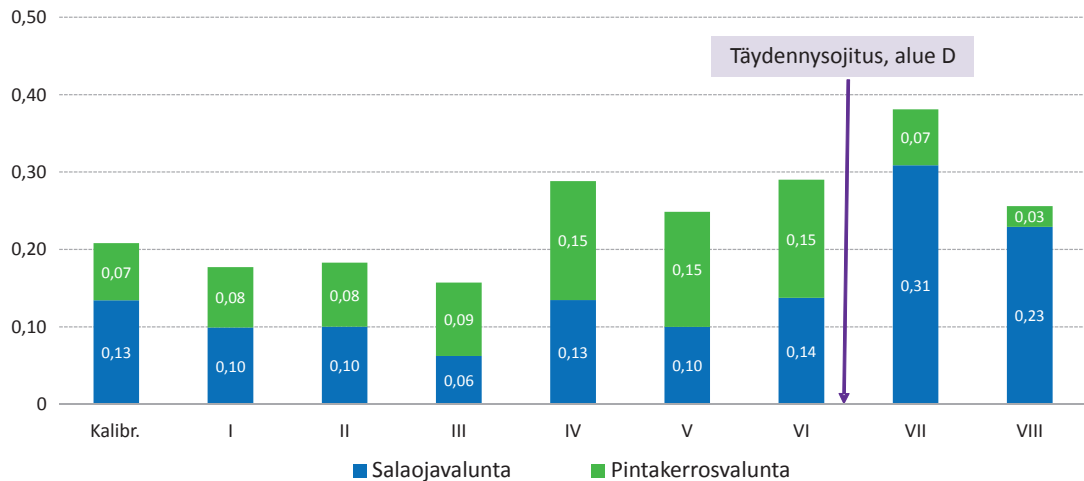
Kalibrointijakso (6/2007–5/2008) oli sääolosuhteiltaan keskimääräisestä poikkeava: runsas vuosisadanta (715 mm) sekä leuto ja vähäluminen talvi. Valuntaa muodostui käytännössä läpi talvikuukausien. Kalibrointijaksolla salaojavalunnan osuus vuosisadannasta oli alueella C 32 % ja pintakerrosvalunnan 4 %. Kalibrointijakson jälkeisillä kahdeksalla tutkimusjaksolla sekä salaojavalunnan että pintakerrosvalunnan osuudet olivat keskimäärin hieman kalibrointijaksoa suurempia, 33 % ja 6 %.

Alueella D salaojavalunnan osuus sadannasta lisääntyi kahtena täydennysojitusta seuranneena vuonna yli kaksinkertaiseksi, ja pintakerrosvalunnan osuus väheni keskimäärin



Kuva 3.8. Alueiden C (ojaväli 1950-luvulta 16 m, kesäkuusta 2008 lähtien 8 m) ja D (ojaväli 1950-luvulta 32 m, kesäkuusta 2014 lähtien 10,7 m), vuotuisen salaojavalunnon suhde vertailualueeseen B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m) salaojavaluntoihin mittausjaksoilla (06/2007–05/2016).

alle puoleen ojitusta edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan summa kasvoi 1,4-kertaiseksi. Alueen D valuntakertoimet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty kuvassa 3.9.



Kuva 3.9. Vuotuisten salaojavaluntojen ja pintakerrosvaluntojen osuudet vuosisadannasta (korjattu arvo) ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen alueella D mittausjaksoilla.

3.1.4 Ravinne- ja kiintoainepitoisuudet sekä ainekuormat

Nummelan koekentältä valumavesien mukana kulkeutuneille ravinne- ja kiintoainehuuhtoumille valtaosaan oli tyypillistä suuret vaihtelut eri vuosien ja koealueiden välillä pääosin valuntamäärien vaihtelun vuoksi, mutta myös valumavesien pitoisuudet vaihtelivat jonkin verran. Kuormitushuiput ajoittuivat kasvukauden ulkopuolelle keväällä lumen ja roudan sulamiseen sekä syksyn sateisiin, mikä on tyypillistä pohjoisille ilmasto-oloille.

Huomattava osa ravinne- ja kiintoainekuormituksesta 8 ja 16 m ojavälin alueilta (B ja C) tuli salaojien kautta. Ennen täydennysojitusta 32 m ojavälin alueelta (D) myös pintakerrosvalunnan mukana tuli merkittävää kuormitusta. Täydennysojituksen jälkeen tilanne muuttui niin, että valtaosa kuormituksesta tuli salaojien kautta. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan summa kasvoi jonkin verran täydennysojituksen jälkeen ja sitä myötä myös ravinne- ja kiintoainekuormitus.

Kokonaistyyppi

Kokonaistyyppipitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (koko yhdeksän vuoden mittausaineistosta) on esitetty taulukossa 3.1. Valumavesien pitoisuuksissa oli eroja eri vuodenaikojen ja vuosien välillä. Mittauksissa tuli selvästi esille valumavesien tyyppipitoisuuksien nousu lannoituksen ja maan muokkauksen jälkeen. Kalibrointijakson ja kahdeksan tutkimusjakson (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 2,3–15,4 mg l⁻¹ ja pintakerrosvalunnan välillä 1,8–12,2 mg l⁻¹.

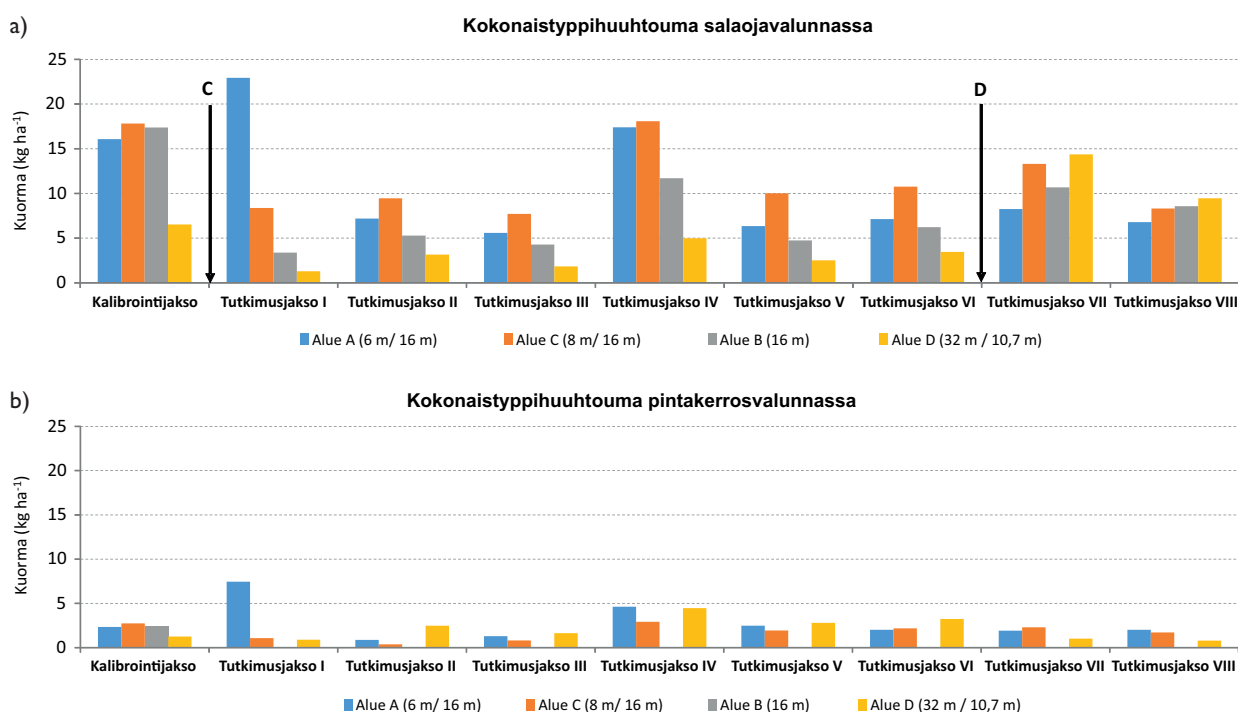
Taulukko 3.1. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi- arvot (mg l⁻¹) Nummellan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2016. Ojavälit, alue A 16 m / 6 m, alue C 16 m / 8 m, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

	Kokonaistyyppipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	1,9 / 9,5 / 52,5	1,4 / 5,1 / 27,5	1,3 / 4,9 / 33,6	1,4 / 4,5 / 30,3
Painotettu pitoisuus	11,1	5,6	6,2	5,9
Pintakerrosvalunta min/Md/max	1,0 / 7,0 / 65,2	0,8 / 4,4 / 55,5	1,2 / 5,0 / 53,8	0,9 / 3,4 / 61,5
Painotettu pitoisuus	7,0	4,4	5,0	3,4

Kokonaistypen pitoisuudet olivat keskimäärin melko samansuuruisia koko tutkimuksen aikana eri alueiden salaoja- ja pintakerrosvalunnassa, joskin alueittain lasketut valunnalla painotetut pitoisuudet olivat salaojavalunnassa pintakerrosvaluntaa korkeampia.

Typpihuuhtoumat

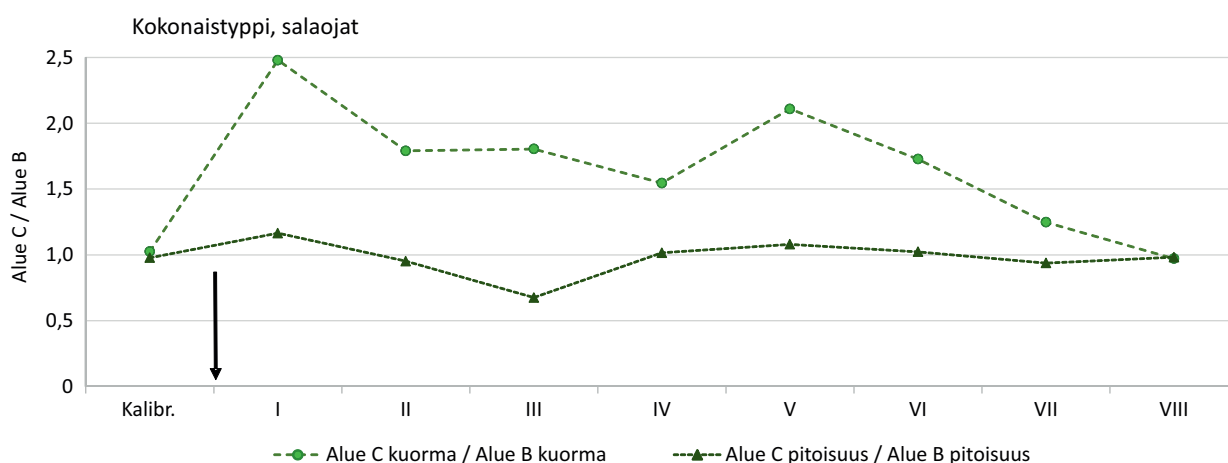
Mitatusta kokonaistyyppikuormasta salaojista tuli 8, 10,7 ja 16 m ojavälin alueilla 80–90 % ja 32 m ojavälillä osuus oli keskimäärin 60 %. Vuotuiset typpihuuhtoumat salaojavedessä vaihtelivat välillä 1,3–18 kg ha⁻¹ ja pintakerrosvalunnassa 1,0–4,5 kg ha⁻¹ (kuva 3.10). Valtaosa huuhtoutuneesta tyypestä oli nitraattityyppiä.



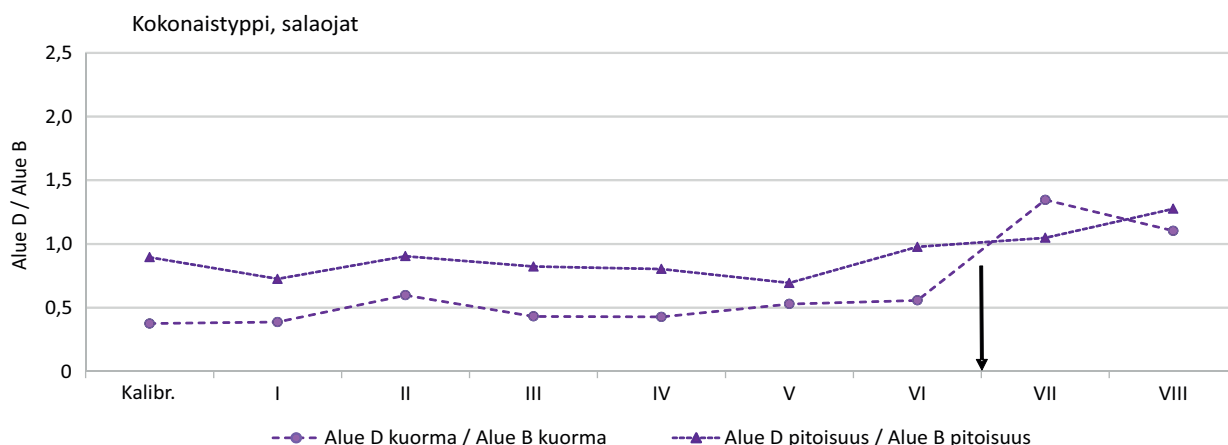
Kuva 3.10. Kokonaistypen vuotuiset huuhtoumat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat on merkitty nuolella.

Täydennysojituksen vaikutus typen huuhtoutumiseen

Täydennysojituksen vaikutuksia salaojavalumavesien mukana kulkeutuneisiin huuhtoumiin arvioitiin vertaamalla alueiden C ja D ainepitoisuuksia ja -määriä alueen B (ojaväli 16 m) arvoihin. Alueen C salaojavalunnan typpipitoisuus nousi jonkin verran täydennysojituksen jälkeisenä vuonna, sen jälkeen pitoisuus kääntyi laskuun ja palasi vähitellen likimain ojitusta edeltäneelle tasolle (kuva 3.11). Typpipitoisuudet alueelta D olivat täydennysojituksen jälkeisillä jaksoilla (suhteessa vertailualueeseen) ojitusta edeltäneiden jaksosten keskiarvoa hieman korkeampia (kuva 3.12). Täydennysojituksen jälkeinen salaojien kautta tullut typikuormituksen kasvu selittyy lähinnä valunnan lisääntymisellä (kuvat 3.8).



Kuva 3.11. Alueiden C ja B vuotuisten salaojavaluntojen kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaistyyppikuormien suhde kalibrointijaksolla ja kahdeksalla tutkimusjaksolla. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



Kuva 3.12. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntojen kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaistyyppikuormien suhde seitsemällä jaksolla ennen täydennysojitusta ja kahdella sen jälkeen. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

Kokonaisfosfori

Kokonaisfosforipitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforipitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (yhdeksän mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.2. Kalibrointijakson ja kahdeksan tutkimusjakson (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 0,13–1,42 mg l⁻¹ ja pintakerrosvalunnan 0,36–1,94 mg l⁻¹.

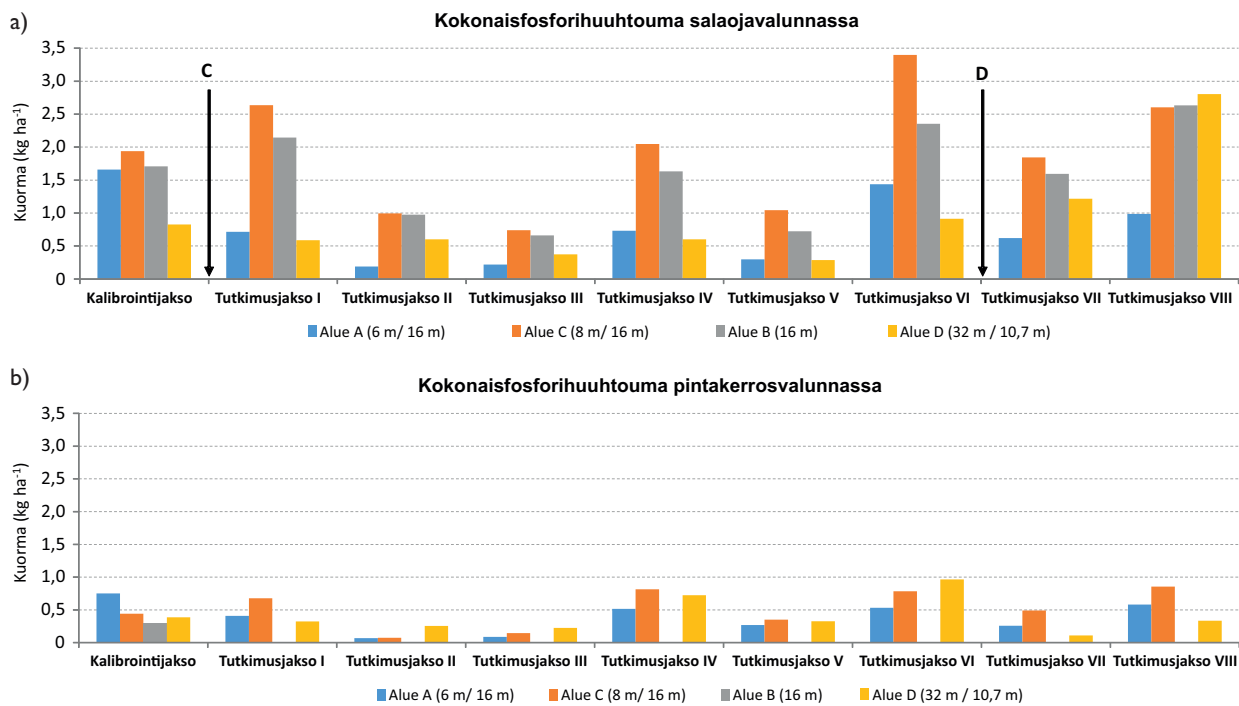
Taulukko 3.2. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot (mg l⁻¹) Nummellan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2016.

	Kokonaisfosforipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	0,04 / 0,39 / 4,08	0,03 / 0,43 / 4,69	0,05 / 0,64 / 5,27	0,03 / 0,53 / 4,32
Painotettu pitoisuus	0,78	0,93	1,27	1,02
Pintakerrosvalunta min/Md/max	0,06 / 0,75 / 4,94	0,15 / 0,88 / 4,79	0,05 / 0,78 / 5,29	0,06 / 0,46 / 4,54
Painotettu pitoisuus	1,02	1,36	0,56	0,67

Kokonaisfosforipitoisuudet olivat keskimäärin melko samansuuruisia koko tutkimuksen aikana eri alueiden salaoja- ja pintakerrosvalunnassa. Alueiden välillä oli kuitenkin pieniä eroja. Alueella C salaojavalunnan pitoisuudet olivat pintakerrosvaluntaa pienempiä, mutta alueella D suurempia. Kokonaisfosforin pitoisuudet noudattivat pitkälti kiintoaineen pitoisuuksia.

Kokonaisfosforihuuhtoumat

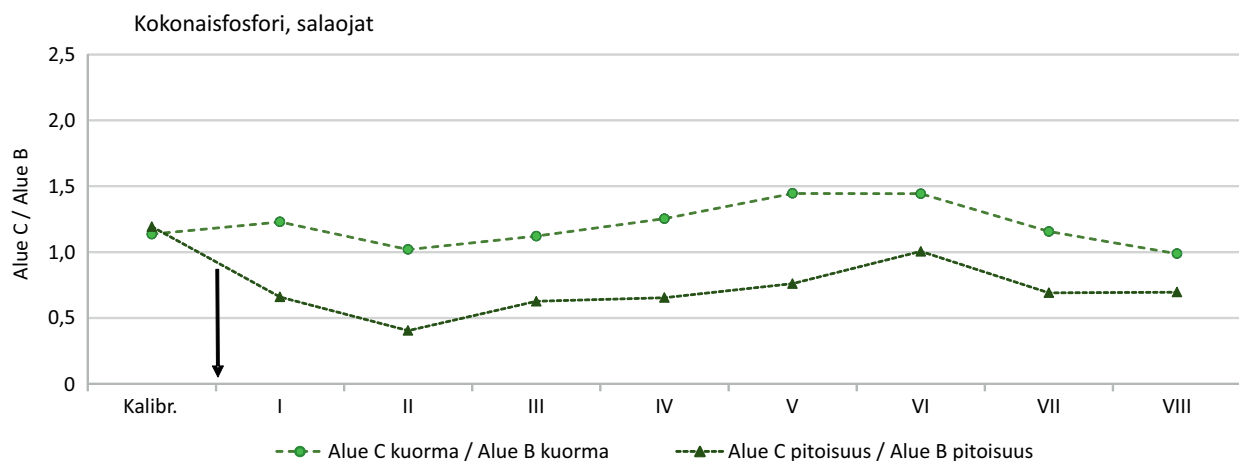
Vuotuiset kokonaisfosforin huuhtoumat Nummellan koealueiden salaojista vaihtelivat välillä 0,3–3,4 kg ha⁻¹ (kuva 3.13a). Pintakerrosvalunnan mukana kokonaisfosforia huuhtoutui selvästi vähemmän, 0,1–1,0 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.13b), lähinnä pienten valuntojen takia. Kuorimituksesta tuli 8, 10,7 ja 16 m:n ojaväleillä salaojista keskimäärin 80–90 %. Kokonaistypen tapaan 32 m ojavälillä salaojien osuus oli noin 60 %.



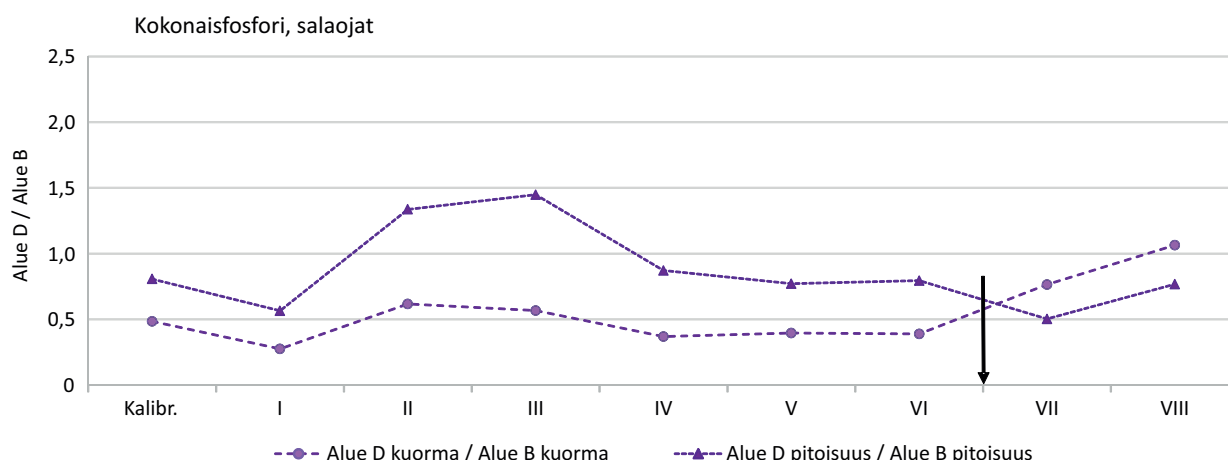
Kuva 3.13. Kokonaisfosforin vuotuiset huuhtoumat (kg ha^{-1}) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat on merkitty nuolella.

Täydennysojituksen vaikutus kokonaisfosforin huuhtoutumiseen

Salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuden suhde (alueen C pitoisuus / alueen B pitoisuus) oli kaikilla kahdeksalla tutkimusjaksolla keskimäärin pienempi kuin ennen ojitusta (kuva 3.14). Kahden täydennysojituksen jälkeisen tutkimusjakson tulokset alueelta D ovat samanlaisia kuin alueella C, ojituksen jälkeen salaojaveden fosforipitoisuudet ovat olleet edeltänyttä tilannetta alempia (kuva 3.15). Alueen C lievä ja alueen D selvä kokonaisfosforikuorman kasvu selittyvät salaojavalunnan lisääntymisellä täydennysojituksen jälkeen (kuvat 3.14 ja 3.15).



Kuva 3.14. Alueiden C ja B vuotuisen salaojavalunton kokonaisfosforipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaisfosforikuormien suhde kalibrointijaksolla ja kahdeksalla tutkimusjaksolla. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



Kuva 3.15. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntojen kokonaisfosforipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaisfosforikuormien suhde seitsemällä jaksolla ennen täydennysojitusta ja kahdella sen jälkeen. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

Liukoinen fosfori

Liukoisen fosforin pitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen epäorgaanisen fosfaattifosforin (liukoisen fosforin) pitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (yhdeksän mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.3. Kalibroitijakson ja kahdeksan tutkimusjakson (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan liukoisen fosforin pitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 16–114 $\mu\text{g l}^{-1}$ ja pintakerrosvalunnan 16–158 $\mu\text{g l}^{-1}$.

Liukoisen fosforin pitoisuudet olivat keskimäärin melko samanlaisia koko tutkimuksen aikana eri alueiden salaoja- ja pintakerrosvalunnassa. Kokonaisfosforin tapaan salaojavalunnan liukoisen fosforin pitoisuudet olivat alueella C hieman pintakerrosvaluntaa pienempiä, ja alueella D suurempia.

Maan heppoliukoisen fosforin määrä (kasveille käyttökelpoinen fosfori, viljavuusfosfori) vaihteli vuonna 2013 tehdyn määrittelyn mukaan keskimäärin välillä 2,8–9,5 mg l^{-1} maata, vaikka alueiden viljelykäytäntö oli ollut samanlainen vuosikymmeniä. Suurin fosforiluku oli alueella C ja pienin alueella D, mikä näkyi alueiden valumavesien erilaisina liukoisen fosforin pitoisuuksina.

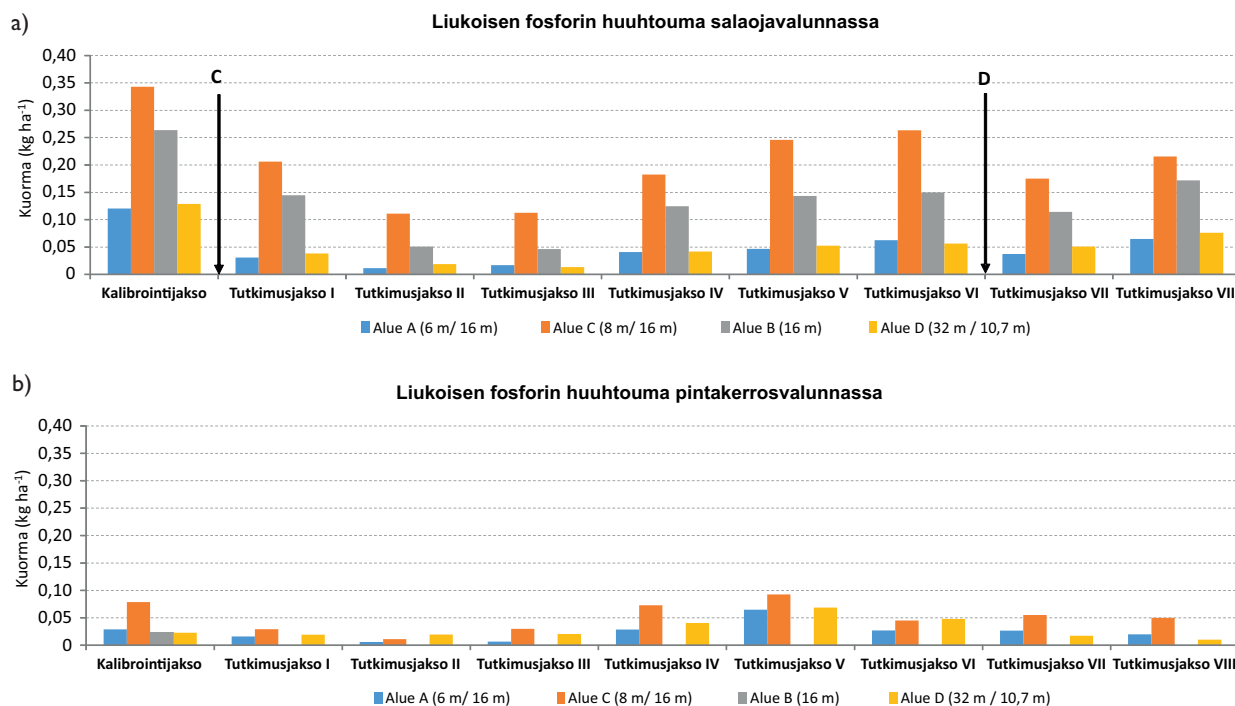
Taulukko 3.3. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen epäorgaanisen fosforin pitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot ($\mu\text{g l}^{-1}$) Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2016.

	Liukoisen fosforin pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	10 / 37 / 1040	7 / 68 / 881	3 / 70 / 547	10 / 44 / 1348
Painotettu pitoisuus	50	100	100	60
Pintakerrosvalunta min/Md/max	9 / 53 / 622	9 / 91 / 1364	5 / 84 / 456	3 / 39 / 198
Painotettu pitoisuus	66	130	120	50

Liukoisen fosforin huuhtoumat

Suurin osa valtaajaan kulkeutuneesta fosforista oli kiintoaineeseen sitoutunutta partikkelimaista fosforia. Liukoisen epäorgaanisen fosfaattifosforin (liukoisen fosforin), joka on suoraan leville käyttökelpoisesta, osuus kokonaisfosforihuuhtoumasta oli 3–26 % koealueesta ja jaksosta riippuen.

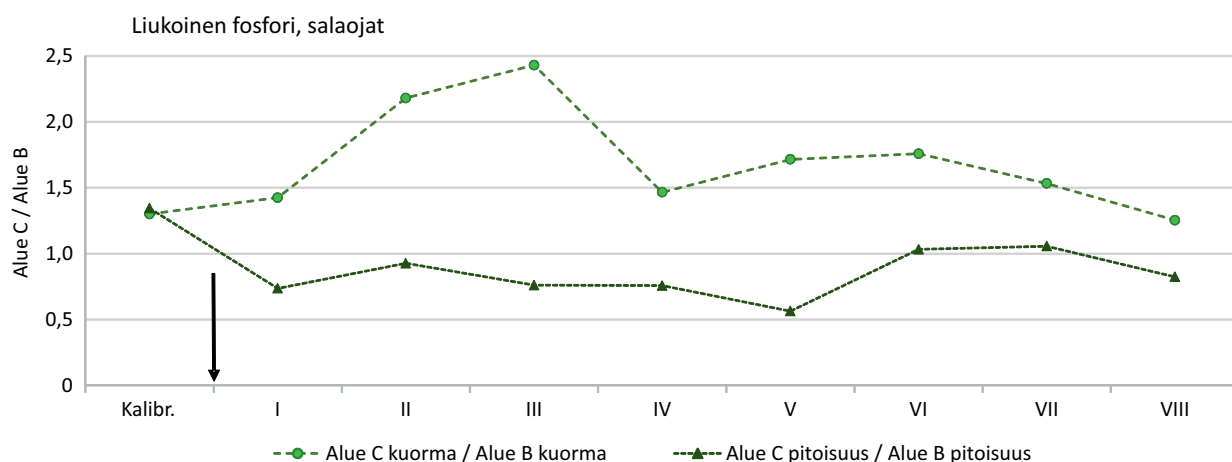
Nummellan koealueilla liukoisen fosforin huuhtoumat salaojavalunnassa vaihtelivat välillä 0,01–0,34 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.16a). Pintakerrosvalunnan mukana huuhtoutui 0,01–0,09 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.16b). Kuormituksesta 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä tuli salaojien kautta keskimäärin noin 75 % ja 32 m ojavälillä noin 55 %.



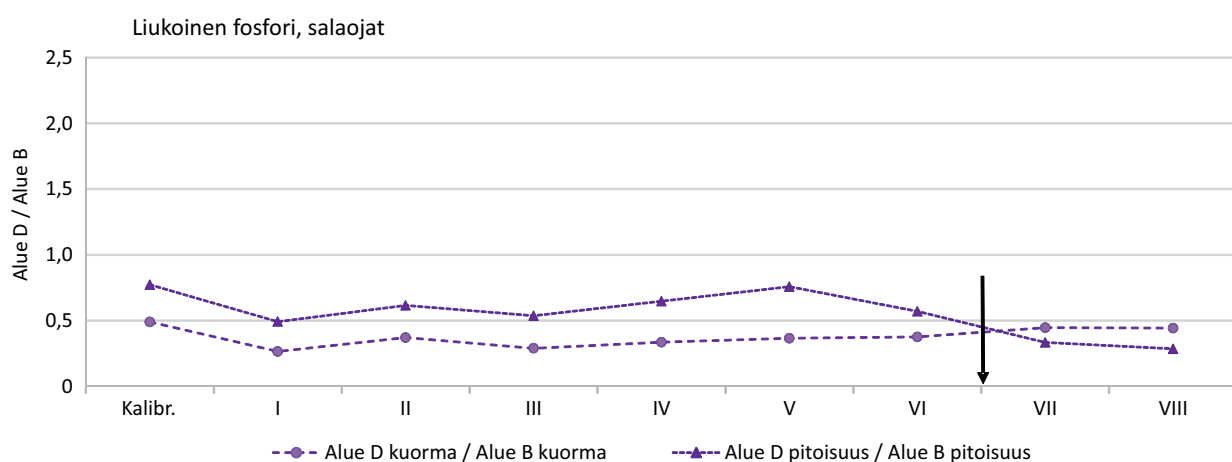
Kuva 3.16. Liukoisen fosforin vuotuiset huuhtoumat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat on merkitty nuolella.

Täydennysojituksen vaikutus liukoisen fosforin huuhtoutumiseen

Kalibrointijaksoa seuranneilla tutkimusjaksoilla alueen C salaojaveden liukoisen fosforin pitoisuudet, suhteessa vertailualueeseen B, käyttäytyivät samaan tapaan kuin kokonaisfosforipitoisuudet. Täydennysojituksen jälkeisinä vuosina pitoisuudet olivat keskimäärin kalibrointijaksoa alempia (kuva 3.17). Alueella D pitoisuuksien muutos kahtena ojituksen jälkeisenä vuonna oli samaan suuntaan (kuva 3.18). Alueen C salaojien liukoisen fosforin suhteellisissa kuormissa oli tutkimusjaksojen aikana kokonaisravinteita ja kiintoainetta suurempaa vaihtelua, mutta suhde oli samantyyppinen, täydennysojituksen jälkeiset jaksot olivat kalibrointijaksoa kuormittavampia (kuva 3.17). Alueella D ojituksen jälkeiset liukoisen fosforin huuhtoumat olivat hieman suurempia kuin täydennysojitusta edeltäneillä jaksoilla keskimäärin (kuva 3.18).



Kuva 3.17. Alueiden C ja B vuotuisten liukoisen fosforin pitoisuuksien mediaanien sekä liukoisen fosforin kuormien suhde kalibrointijaksolla ja kahdeksalla tutkimusjaksolla. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



Kuva 3.18. Alueiden D ja B vuotuisten liukoisen fosforin pitoisuuksien mediaanien sekä liukoisen fosforin kuormien suhde seitsemällä jaksolla ennen täydennysojitusta ja kahdella sen jälkeen. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

Kiintoaine

Kiintoainepitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (yhdeksän mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.4. Kalibrointijakson ja kahdeksan tutkimusjakson (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kiintoainepitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 260–860 mg l⁻¹ ja pintakerrosvalunnan 210–1480 mg l⁻¹.

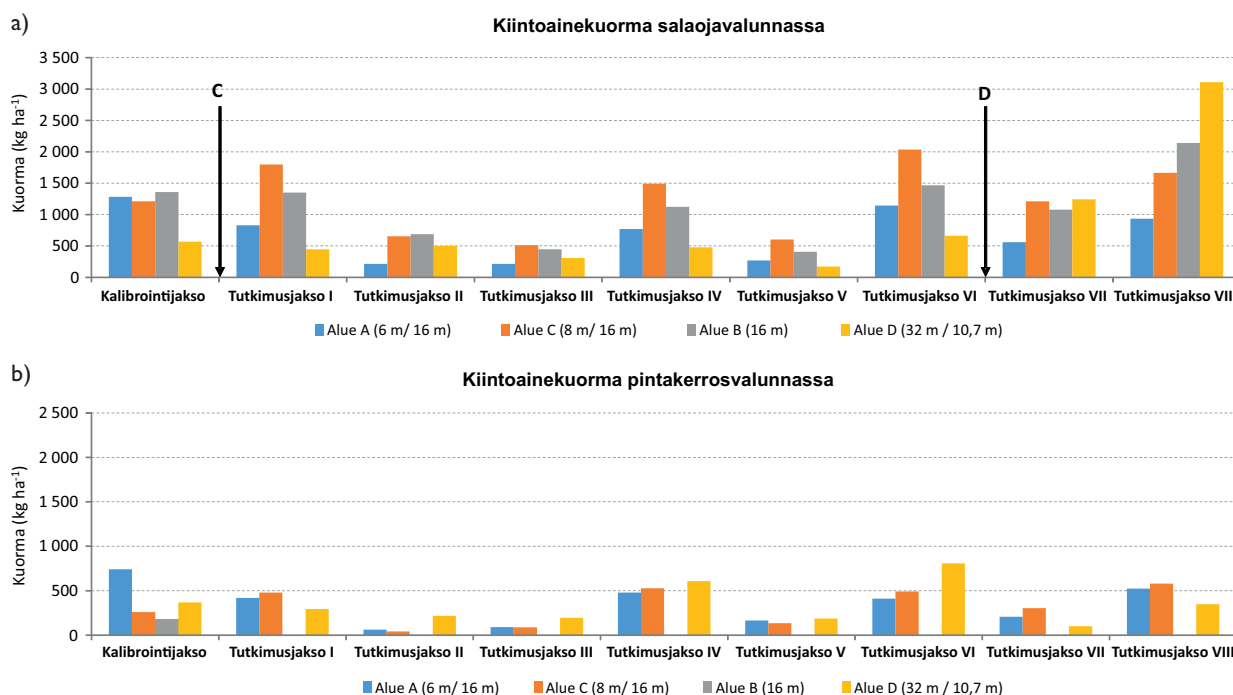
Taulukko 3.4. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot (mg l⁻¹) Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2016.

	Liukoisen fosforin pitoisuus (mg l ⁻¹)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	20 / 380 / 3310	24 / 360 / 2710	80 / 440 / 4640	60 / 420 / 4430
Painotettu pitoisuus	710	600	860	930
Pintakerrosvalunta min/Md/max	20 / 680 / 4490	0 / 740 / 3240	20 / 570 / 4140	10 / 440 / 4730
Painotettu pitoisuus	910	850	310	570

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuudet olivat keskimäärin melko lähellä toisiaan koko tutkimuksen aikana. Erilaisten ja eri-ikäisten ojitusten kiintoainepitoisuuksissa ei näyttänyt olevan eroja, vaan korkeita pitoisuuksia mitattiin sekä yli 60 vuotta vanhan ojaston että 2–8 vuotta vanhojen täydennysojitettujen ojastojen salaojavesissä. Vanhat ojat oli tehty tiiliputkin vähäisellä soralla, kun taas täydennysojitettujen alueiden uusissa ojissa käytettiin muoviputkia ja reilusti soraa sekä erillisiä sorasilmäkkeitä.

Kiintoainekuormat

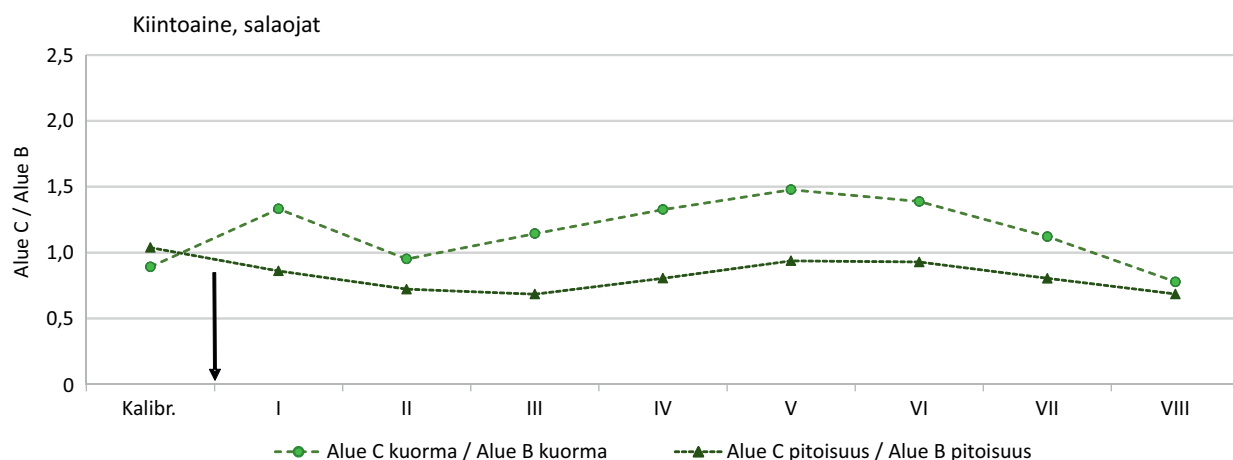
Salaojavesien mukana kulkeutuneen maa-aineksen määrä vaihteli paljon eri vuosien välillä. Maa-ainesta kulkeutui salaojavalunnassa vuosittain 170–3220 kg ha⁻¹ a⁻¹ ja pintakerrosvalunnassa 40–810 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.19). Salaojien osuus mitatusta kokonaiskuormituksesta 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä oli 80–95 %. Ojavälin olleessa 32 m vastaava osuus oli noin puolet eli saman verran kuin pintakerrosvalunnan.



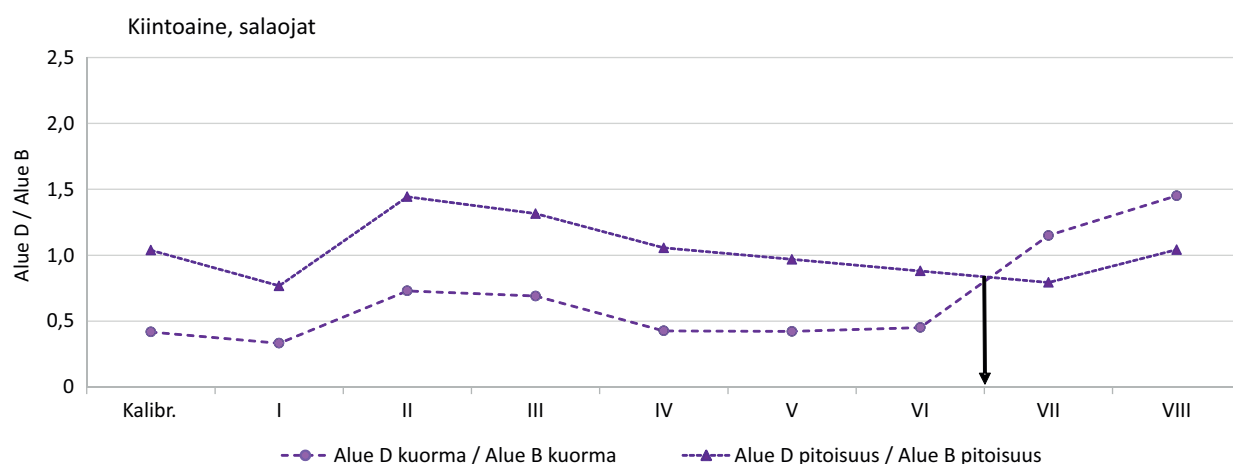
Kuva 3.19. Vuotuiset kiintoainekuormat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat on merkitty nuolella.

Täydennysojituksen vaikutus kiintoaineen huuhtoutumiseen

Täydennysojituksen jälkeen alueen C salaojavalunnan kiintoainepitoisuudet erosivat vain vähän kalibrointijaksosta. Verrattaessa alueeseen B suhde oli kuitenkin kaikilla jaksoilla hieman pienempi (kuva 3.20). Myös alueella D kahden ojituksen jälkeisen jakson kiintoainepitoisuudet olivat aikaisempaa alempia (kuva 3.21). Lisääntyneet salaojavalunnat nostivat kiintoainekuormaa ojituksen jälkeen alueella D (kuva 3.21).



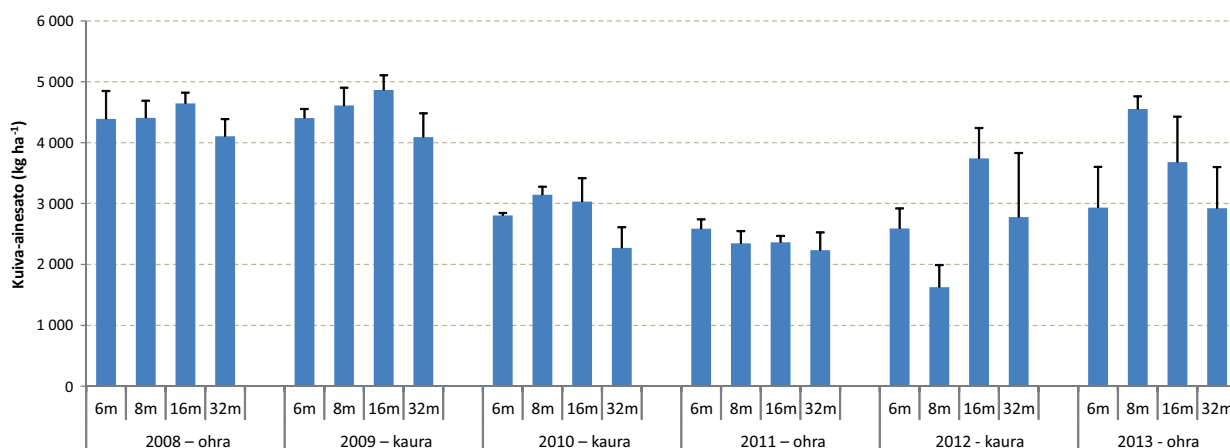
Kuva 3.20. Alueiden C ja B vuotuisten salaojavaluntojen kiintoainepitoisuuksien mediaanien sekä kiintoainekuormien suhde kalibrointijaksolla ja kahdeksalla tutkimusjaksolla. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



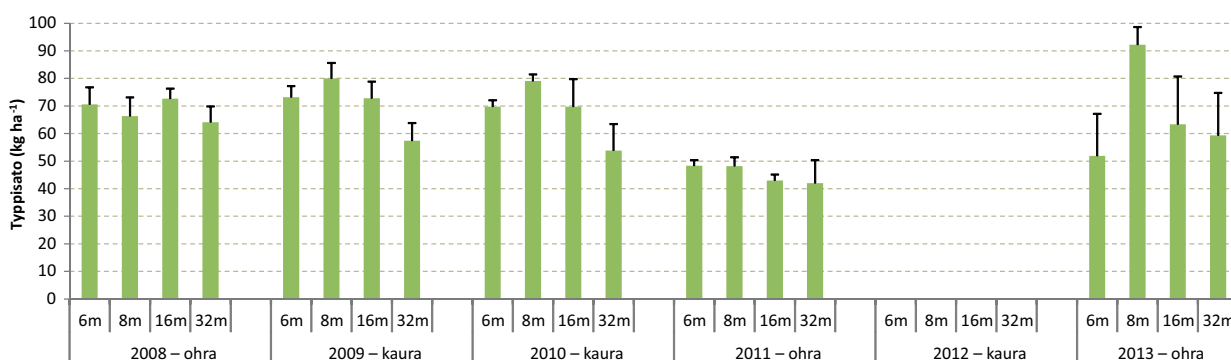
Kuva 3.21. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntojen kiintoainepitoisuuksien mediaanien sekä kiintoainekuormien suhde seitsemällä jaksolla ennen täydennysojitusta ja kahdella sen jälkeen. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

3.1.5 Sato

Vuosina 2008–2013 Nummelan koekentän sadon määrässä tai laadussa ei havaittu selkeitä eroja 6, 8 ja 16 m ojavälin alueiden välillä. Sadon määrä ja laatu olivat keskimäärin huonoimpia 32 m ojavälillä. Vuosien 2012 ja 2013 vaihtelu johtuu poikkeuksellisen huonoista korjuuoloista vuonna 2012 ja siitä, että silloin korjaamatta jäänyt sato häiritsi seuraavan vuoden kasvua. Kuiva-ainesadon määrät vuosilta 2008–2013 on esitetty kuvassa 3.22 ja typpisato kuvassa 3.23. Laatumittausten tulokset on koottu liitteeseen 11.



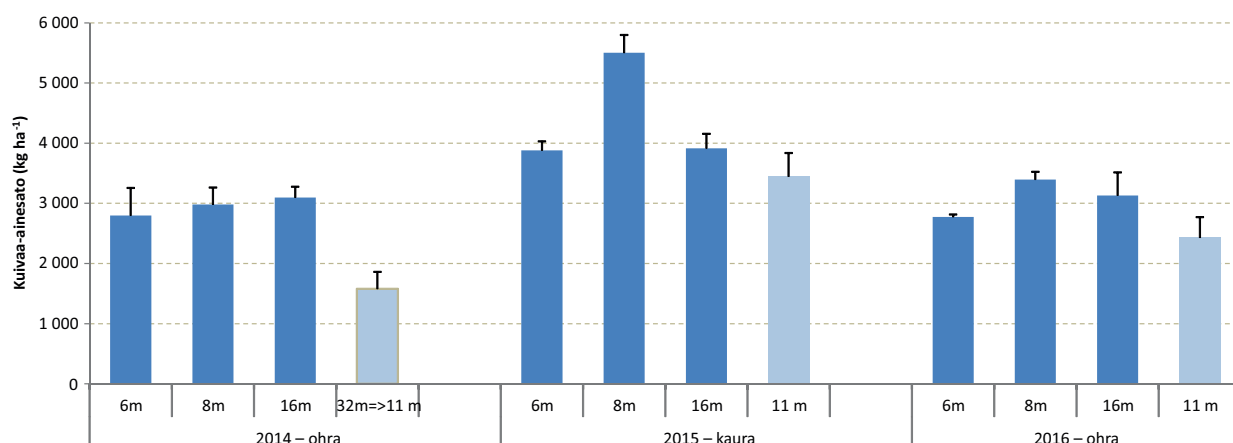
Kuva 3.22. Kuiva-ainesato (ohra, kaura) Nummelan koalueilta A (6 m), C (8 m), B (16 m) ja D (32 m). Jokainen pylväs esittää neljän näytteen keskiarvoa ja virhepalkki kuvaa keskihajontaa.



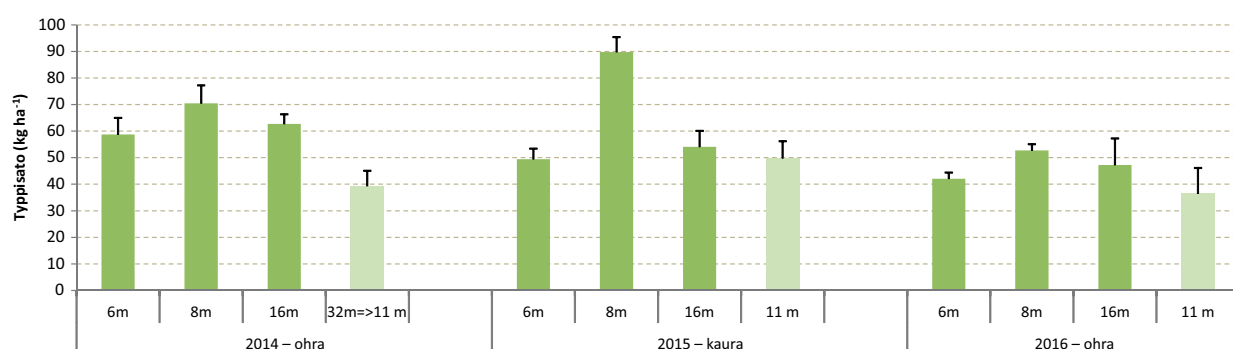
Kuva 3.23. Typpisato (kg ha⁻¹) alueilta A (ojaväli 6 m), C (8 m), B (16 m) ja D (32 m). Poikkeuksellisen huonojen korjuulojen vuoksi määrittystä ei tehty vuoden 2012 sadosta.

Sato täydennysojituksen jälkeen

Alueen D täydennysojituksen jälkeen satomittauksia oli käytettävissä Nummelan koe-kentältä kolmelta vuodelta. Eri alueiden satotulokset olivat vuosina 2014, 2015 ja 2016 samanlaiset kuin kentältä aiemminkin määritetyt tulokset; alueiden A, C ja B (ojavälit 6, 8 ja 16 m) välillä ei ollut selkeitä eroja sadon määrän eikä laadun suhteen, mutta alueella D sekä määrä että laatu olivat muita huonommat (kuvat 3.24 ja 3.25, liite 11). Keväällä 2014 alueella D tehty täydennysojitus (32 m → 10,7 m) ei siis muuttanut tilannetta. Osaltaan eroa sadoissa selittää vaihtelu alueiden kasvuolosuhteissa, alueen D fosforiluku on koe-kentän pienin ($< 3 \text{ mg l}^{-1}$ maata). Maan rakenne oli alkujaan heikompi kuin muilla alueilla ja kui-vatustilan paraneminen näkyi siinä todennäköisesti hyvin hitaasti.



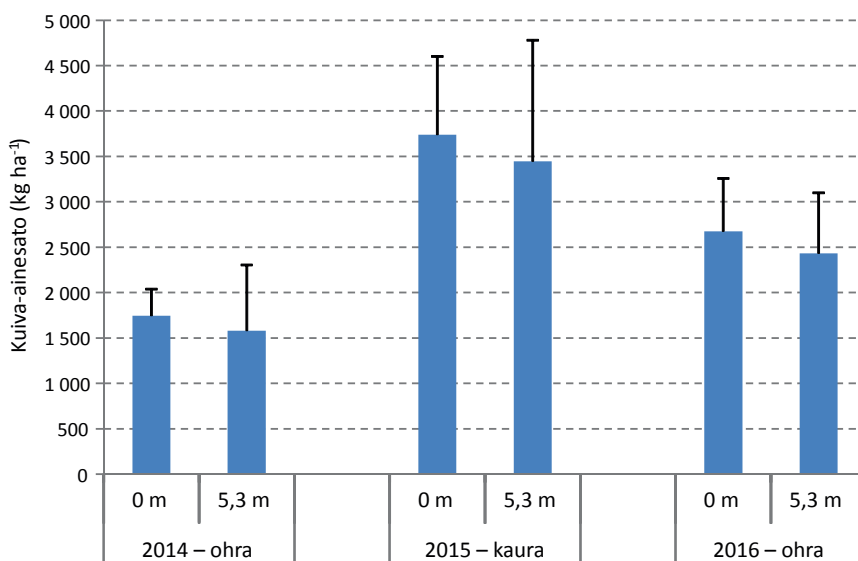
Kuva 3.24. Kuiva-ainesato (ohra, kaura) Nummelan eri koealueilla alueella D tehdyn täydennysojituksen (32 m → 10,7 m) jälkeen. Jokainen pylväs esittää neljän näytteen keskiarvoa ja virhepalkki kuvaa keskihajontaa. 6 m ojaväli on alueella A, 8 m alueella C ja 16 m alueella B.



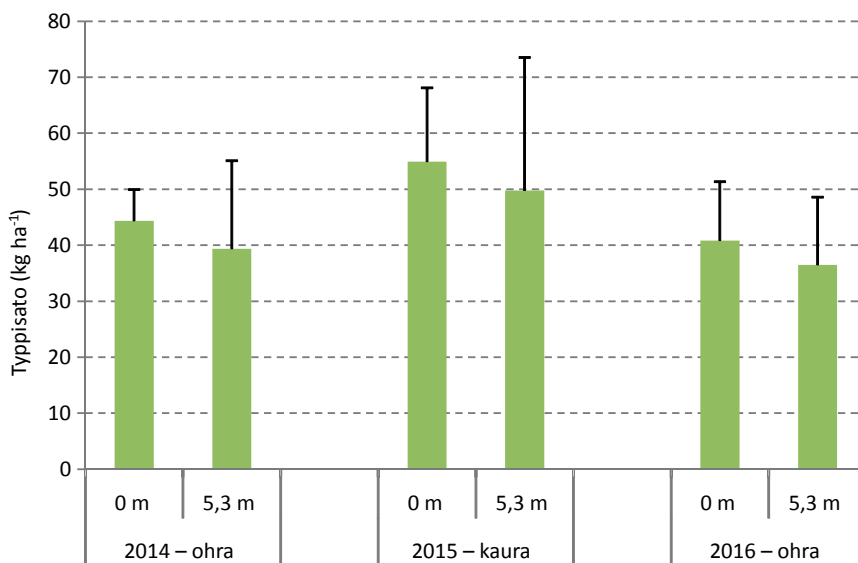
Kuva 3.25. Typpisato (kg ha^{-1}) Nummelan koealueilta vuosina 2014–2016. Jokainen pylväs esittää neljän näytteen keskiarvoa ja virhepalkki kuvaa keskihajontaa.

Sato eri etäisyyksillä salaojasta

Vuosina 2008–2016 Nummelan kaikkien koealueiden sadot on määritetty salaojien puolivälistä otetuista näytteistä. Täydennysojituksen jälkeen vuosina 2014–2016 alueelta D otettiin satonäytteet lisäksi myös ojien kohdalta. Paikkojen välillä ei ollut merkitsevää eroa, mutta salaojan kohdalla kuiva-ainesato (kuva 3.26) ja typpisato (kuva 3.27) olivat keskimäärin hieman paremmat kuin ojien välissä, ja näytteiden väliset hajonnat olivat pienemmät.



Kuva 3.26. Viljan kuiva-ainesadot (kg ha^{-1}) alueella D ojien puolivälissä ja ojien kohdalla vuosina 2014–2016, ($n=6-14$). Jokainen pylväs esittää näytteiden keskiarvoa ja virhepalkki kuvaa keskihajontaa.



Kuva 3.27. Viljan typpisadot (kg ha^{-1}) alueella D ojien puolivälissä ja ojien kohdalla vuosina 2014–2016, ($n=6-14$). Jokainen pylväs esittää näytteiden keskiarvoa ja virhepalkki kuvaa keskihajontaa.

3.1.6 Nummelan koekentän tulosten tarkastelu

TOSKA-projektissa Nummelan koekentällä tutkittiin erityisesti täydennysojituksen vaikutuksia kahdella koealueella, joista toinen (alue C, ojaväli 16 m → 8 m) oli täydennysojitettu alkukesällä 2008 ja toinen (alue D ojaväli 32 m → 10,7 m) alkukesällä 2014. Ojituksen toimintaa arvioitiin vertaamalla alueiden C ja D tuloksia koealueeseen B, jossa oli alkuperäinen 16 metrin ojaväli 1950-luvulta. Täydennysojitus paransi selvästi varsinkin märkyydestä kärsineen alueen D kuivatustilaa, kun ojaväliä pienennettiin noin 1/3 osaan. Tiheämpi ojitus lisäsi salaojavaluntaa, minkä myötä kuormitus salaojista valtaojaan kasvoi. Pintakerrosvalunta ja sen mukana tullut kuormitus vähenivät parantuneen kuivatuksen seurauksena, mutta vähenemä oli pienempi kuin salaojavalunnan kuormituksen kasvu. Satotuloksissa ei näkynyt selviä eroja eri ojitusalueiden välillä kahdeksan vuoden aikana alueen C täydennysojituksesta eikä kolmen vuoden aikana alueen D täydennysojituksesta.

Ennen vuonna 2014 tehtyä täydennysojitusta koekentän märin ja sateisiin selvimmin reagoanut osa oli suurimman ojavälin (32 m) alue D sekä pohjavedenpinnan syvyyden että pintamaan (0–30 cm:n kerros) maankosteuden mittaustulosten perusteella kesäkuusta 2007 lähtien. Pohjavesimittausten mukaan täydennysojituksen jälkeen pohjavedenpinta ei noussut muita alueita korkeammalle kuin satunnaisesti runsaiden sateiden jälkeen. Keväisin pohjavesi laski 10,7 metrin ojavälillä keskimäärin viikkoa nopeammin kuin 16 metrin ojavälillä. Parantunut kuivatustila näytti vaikuttavan suhteellisen vähän pintakerroksen (0–30 cm) kosteuspitoisuuteen, eivätkä muutokset olleet yhtä yksikäsitteisiä kuin pohjavedenpinnan syvyydessä.

Täydennysojitus lisäsi salaojavaluntaa molemmilla koealueilla (C ja D), mikä oli odotettua. Ojituksen jälkeisellä kahdeksalla tutkimusjaksolla alueiden C ja B salaojavaluntojen suhde oli kalibrointijaksoon verrattuna keskimäärin 1,7-kertainen. Alueen D ja B salaojavaluntojen suhde oli kahtena ojituksen jälkeisenä vuotena keskimäärin 2,6-kertainen kuuden ojitusta edeltäneen vuoden keskiarvoon verrattuna.

Varsinkin alueella D tehostunut salaojitus näkyi pienentyneenä pintakerrosvalunnan osuutena. Ennen ojitusta sekä salaojavalunnan että pintakerrosvalunnan osuus sadannasta oli keskimäärin 0,11 ja ojituksen jälkeen salaojien osuus oli 0,27 ja pintakerroksen 0,05. Alueella D täydennysojituksen vaikutusten arviointiin on vankka pohja, koska ojitusta edelsi seitsemän vuoden pituista mittausjaksoa, jotka poikkesivat toisistaan hydrometeorologisilta olosuhteiltaan hyvinkin paljon. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan yhteenlaskettu osuus sadannasta lisääntyi täydennysojitusta edeltäneeseen verrattuna, alueella C 1,1-kertaiseksi ja alueella D 1,4-kertaiseksi.

Nummelan koealueilla pintakerrosvalunnan ja salaojavalunnan valunnalla painotetut pitoisuudet olivat keskimäärin melko samansuuruisia. Salaojavesien pitoisuuksissa ei ollut selviä eroja ennen täydennysojitusta eikä sen jälkeen, ojituksen jälkeisinä vuosina nousseita typpipitoisuuksia lukuun ottamatta. Pitoisuuseroihin vaikuttivat todennäköisesti enemmän mm. sääolosuhteet ja viljelytoimenpiteet kuin uudet ojitukset.

Merkittävä osa Nummelan koekentältä valtaojaan purkautuneiden valumavesien mukana tulleesta ravinne- ja kiintoainekuormituksesta tuli salaojien kautta, johtuen suhteellisen suuresta salaojavalunnasta. Mitatuista kuormista (kokonaistyyppi, kokonaisfosfori, kiintoaine) salaojien osuus oli 6, 8, 10,7 ja 16 metrin ojaväleillä 80–95 % ja 32 metrin ojavälillä 50–60 %.

Liukoisen epäorgaanisen fosforin kuormista tuli 8–16 metrin ojavälin alueilta salaojien kautta keskimäärin 75 % ja 32 metrin ojavälillä 55 %.

Nummelan tulokset osoittavat, että suhteellisen tasaiseltakin (keskimääräinen kaltevuus noin 1 %) savipelloilta voi kulkeutua vesistöihin paljon sekä kiintoainetta että maahiukkasiin sitoutunutta fosforia runsaasta salaojavalunnasta johtuen. Kuormitushuiput ovat yhteydessä syysmuokkauksen jälkeisiin rankkasateisiin tai pitkiin sadekausiin ja leutoihin talviin.

Ainekuormat Nummelan koekentällä vaihtelivat paljon sekä eri mittausjaksojen (vuosi) että koealueiden välillä, mikä on tyypillistä peltoalueilta tulevalle kuormitukselle muun muassa vaihtelevista sää- ja maaperäolosuhteista johtuen. Vuotuinen salaoja- ja pintakerrosvalunnan mukana tullut kokonaistypen huuhtouma Nummelan koealueilta oli samaa suuruusluokkaa kuin muilta savipelloilta ja pieniltä valuma-alueilta mitatut arvot (esim. Tattari ym. 2015, Tattari ym. 2017). Samoin Nummelan kokonaisfosforin huuhtoumat olivat samaa suuruusluokkaa kuin aiemmat mittaustulokset eteläsuomalaisilta savipelloilta (Puustinen ym. 2007, Paasonen-Kivekäs 2008, Tattari ym. 2015, Tattari ym. 2017). Jokioissa sijaitsevalta Kotkanojan koekentältä mitatut kiintoainehuuhtoumat ovat Nummelan arvoja pienempiä, mutta sielläkin pääosa kuormasta on tullut salaojien kautta (Turtola ym. 2007). Suuria salaojavalunnan kiintoainekuormia on mitattu esimerkiksi Sjököllän (Kirkkonummi) ja Gårdskulla Gården (Siuntio) savisilta koekentiltä (Paasonen-Kivekäs 2008, Äijö ym. 2014).

Täydennysojituksista seurannut salaojavalunnan lisääntyminen näkyi myös kuormituksen kasvuna. Alueen C (ojaväli 16 → 8 m) vuotuisen kokonaistyyppihuuhtouman suhde vertailualueen B (16 m) huuhtoumaan oli täydennysojituksen jälkeen (8 v.) keskimäärin 1,7-kertainen ojitusta edeltävään kalibrointijaksoon (1 v.) verrattuna. Salaojien kokonaisfosforihuuhtoumaan täydennysojitus ei juurikaan vaikuttanut, vastaava suhdeluku oli 1,1-kertainen. Tämä selittyy sillä, että kuormituksen kasvu johtui alueella C pääosin salaojavalunnan lisääntymisestä, ja että kokonaisfosforipitoisuudet laskivat täydennysojituksen jälkeen. Liukoisen epäorgaanisen fosforin kuorma lisääntyi alueen C salaojavalunnassa suhteessa vertailualueeseen B kokonaisfosforia enemmän, niiden huuhtoumien suhdeluku oli kalibrointijaksoon verrattuna 1,3-kertainen, samoin kuin kiintoainekuormien.

Märkyydestä selvästi kärsineellä alueella D täydennysojittaminen (ojaväli 32 m → 10,7 m) lisäsi salaojavalunnan mukana tullut kuormitusta selvästi enemmän kuin alueella C (16 m → 8 m), lukuun ottamatta liukoista fosforia. Alueen D (10,7 m) ja vertailualueen B (16 m) vuotuisten kokonaistyyppikuormien suhdeluku oli täydennysojituksen jälkeen (2 v.) keskimäärin 2,6-kertainen täydennysojitusta edeltävän ajanjakson (7 v.) keskimääräiseen suhdelukuun verrattuna. Kiintoainekuormien suhdeluku oli myös 2,6-kertainen, kokonaisfosforin kaksinkertainen ja liukoisen fosforin 1,2-kertainen.

Eroja alueiden C ja D kuormituksissa ja niiden muutoksissa selittävät osaltaan erot täydennysojitusta edeltäneessä tilanteessa. Alueen C täydennysojitusta edelsi yksi vuoden mittainen kalibrointijakso, alueelta D oli ennen ojitusta mittaustietoa seitsemältä vuodelta. Myös ojavälit ja niiden muutokset olivat erilaiset. Alueella C ojaväli oli ollut vuosikymmenten ajan 16 metriä, joka puolitettiin ojituksessa. Alueella D alkuperäinen ojaväli, 32 m, jaettiin kolmeen ojaan. Ojituksen jälkeen alueella C salaojista uusia oli siis puolet, ja alueella D niitä oli 2/3.

Täydennysojituksen vaikutuksista pellon hydrologiaan ja ainehuuhtoumiin ei ole ennen Nummelan koekentän mittauksia tehty kokeellista tutkimusta Suomessa. Uusintaajitusta

on tutkittu Kotkanojan koekentällä Jokioisilla (Turtola ja Paajanen 1995, Turtola 2000). Siellä typpihuuhtouma kasvoi selvästi lisääntyneen salaojavalunnan ja myös sen korkeampien pitoisuuksien vuoksi. Kotkanojalla maahiukkasiin kiinnittyneen fosforin huuhtouma väheni kaikkiaan 15 % ja liukoisen fosfaattifosforin huuhtouma neljänneksen yhdeksän vuoden aikana uusintaosituksesta, kun salaojakaivanto oli täytetty pintamaalla. Muutokset typpikuormituksen osalta olivat samanlaisia kuin Nummelan täydennysojitusalueilla, mutta Nummelassa fosforikuormitus lisääntyi. Kotkanojalla salaojavalunnan osuus kokonaisvalunnasta oli ennen uusintaositusta 10–40 % ja sen jälkeen 50–90 %.

TOSKA-hankkeen aikana (2014–2016) satotulokset olivat aikaisempien vuosien kaltaisia; 6–16 metrin ojavälin alueiden välillä ei ollut selkeitä eroja. Ennen vuoden 2014 kylvöä toteutettu alueen D täydennysojitus (32 m → 10,7 m) ei näkynyt alueen sadossa, se oli määrältään ja laadultaan edelleen muita huonompi. Satoon vaikuttavat kasvuolosuhteet olivat erilaiset koekentän eri osissa, esimerkiksi maan helppoliukoisen fosforin määrä vaihteli koealueiden välillä. Alueen D täydennysojitukseen jälkeen on tähän mennessä saatu kolme satoa. Ojituksen maan rakennetta parantava vaikutus ojien puolivälissä, mistä satonäytteet on otettu, on hidasta (Äijö ym. 2014). Lisäksi jos kylvöt olisi tehty kullekin koealueelle maan kuivumisen ja kantavuuden suhteen optimaaliseen aikaan, ojavälin vaikutus satotasoon olisi tullut mahdollisesti selvemmin esille. Vuosina 2014–2016 otettiin alueelta D näytteitä myös ojien kohdalla. Näiden näytteiden mukaan sadon laatu ja määrä olivat ojan kohdalla paremmat kuin ojien välissä. Tilastollista käsittelyä vuosien 2014–2016 satotuloksille ei ole toistaiseksi tehty.

3.2 Eri salaojakonetyypeillä tehtyjen ojitusten toimivuus Sievin koekentällä

3.2.1 Sääolot

Sadesummat (korjaamattomat arvot) olivat kesä–joulukuussa 2015 441 mm ja tammi–joulukuussa 2016 553 mm. Koekenttää lähimmät Ilmatieteenlaitoksen sääasemat ovat 18 km päässä oleva Toholammin Oravala ja 21 km päässä oleva Ylivieskan Vähäkangas. Vuoden 2015 vastaavat sadesummat olivat Toholammilla 458 mm ja Ylivieskassa 469 mm. Vuoden 2016 sadesumma oli Toholammilla 632 mm ja Ylivieskassa 627 mm. Sadannan pitkän ajan (1981–2010) vuosikeskiarvo (korjaamaton) Toholammin sääasemalla on 615 mm ja Ylivieskan 10 vuoden (2001–2011) vuosikeskiarvo 581 mm.

Vuonna 2015 sadetta kertyi hieman alueen pitkän ajan keskiarvoa enemmän. Kesäkuu oli tavanomaista märempi, sadantaa kertyi kaksinkertainen määrä alueen keskimääräiseen sademäärään verrattuna. Loppuvuoden sademäärät olivat lähellä keskimääräisiä. Jaksolla esiintyi joitain yksittäisiä rankkasadetapahtumia (20–30 mm d⁻¹), 28.8, 18.9 ja 5.12. Vuonna 2016 sadetta kertyi alueen pitkän ajan keskiarvoa vähemmän. Heinäkuu oli keskimääräistä sateisempi, ja syksy tavallista kuivempi.

Lumen syvyyttä ei koekentällä mitattu. Vuonna 2015 lähiasemien, Toholammin ja Ylivieskan, suurimmat lumen syvyydet olivat helmikuussa mitatut 46 ja 52 cm. Keväällä 2016 oli lauhjoja jaksoja ja lumen sulantaa tapahtui tasaisesti pitkin kevättä. Routaa ei kentällä mitattu.

3.2.2 Salaojakaivannot

Toukokuussa tehtyjä salaojakaivantoja tarkasteltiin heti kasvukauden jälkeen syyskuussa 2015. Sekä aurakoneella että kaivavalla koneella tehdyt kaivannot olivat täynnä ruokamultaa ja poikkileikkaukset suorakulmion muotoisia (kuva 3.28). Salaojasoraa oli käytetty sama määrä (10 cm). Kahdessa havaintopisteessä kaivettu perusmaa oli lyhyeltä matkalta painunut osittain putken päälle. Tämä johtui oletettavasti märkien ojitusolosuhteiden aiheuttamasta maan valumisesta.



Kuva 3.28. Salaojakaivannon rakenne oli hyvä aurakoneella (vas.) ja kaivavalla koneella (oik.) tehdyissä ojituksissa Sievin koekentällä. Kaivannot aukaistiin noin neljä kuukautta ojituksen jälkeen.

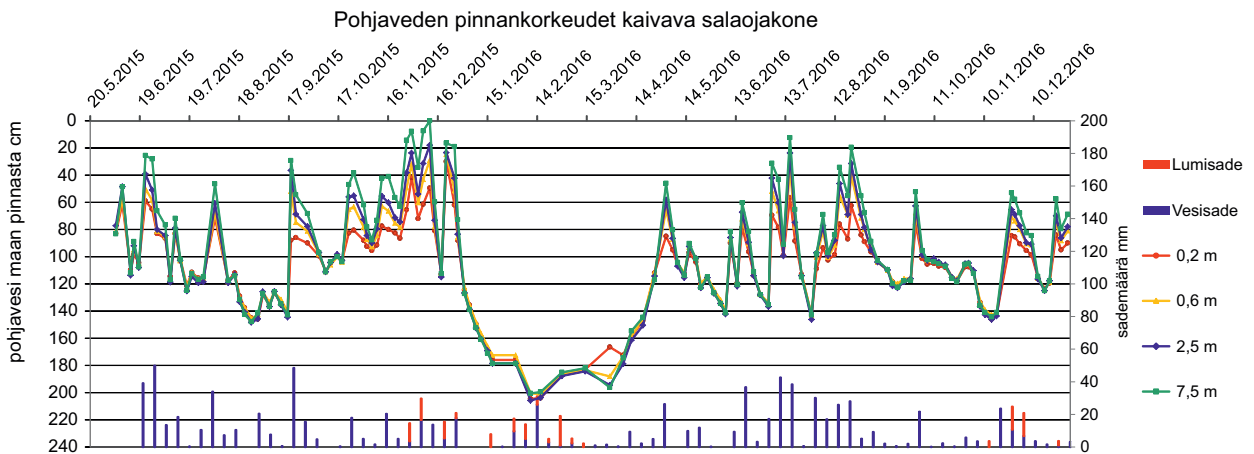
3.2.3 Pohjavedenpinnan syvyys koekentällä

Pohjavedenpinnan syvyydet maanpinnasta mittausjaksolla kesäkuu 2015 – joulukuu 2016 on esitetty liitteessä 12. Manuaalisista mittauksista on laskettu koko mittausjakson tunnuslukuja kaikista havainnoista sekä suodatetuista havainnoista. Suodatetusta aineistosta oli poistettu havainnot, joissa pohjaveden pinta oli mittaushetkellä yli 100 cm:n syvyydessä jokaisessa havaintopisteessä. Kun pohjavedenpinta on myös imuojien puolivälissä sala-ojasyvyyden alapuolella, salaojien vaikutus pohjaveden käyttäytymiseen lakkaa, jolloin sala-ojasyvyyden alapuoliset pohjavesiolosuhteet ja haihdunnan tai jäätymisen aiheuttamat painekorkeuden vaihtelut ja veden liikkeet maaperässä nousevat vallitseviksi pohjaveden syvyyteen vaikuttaviksi tekijöiksi.

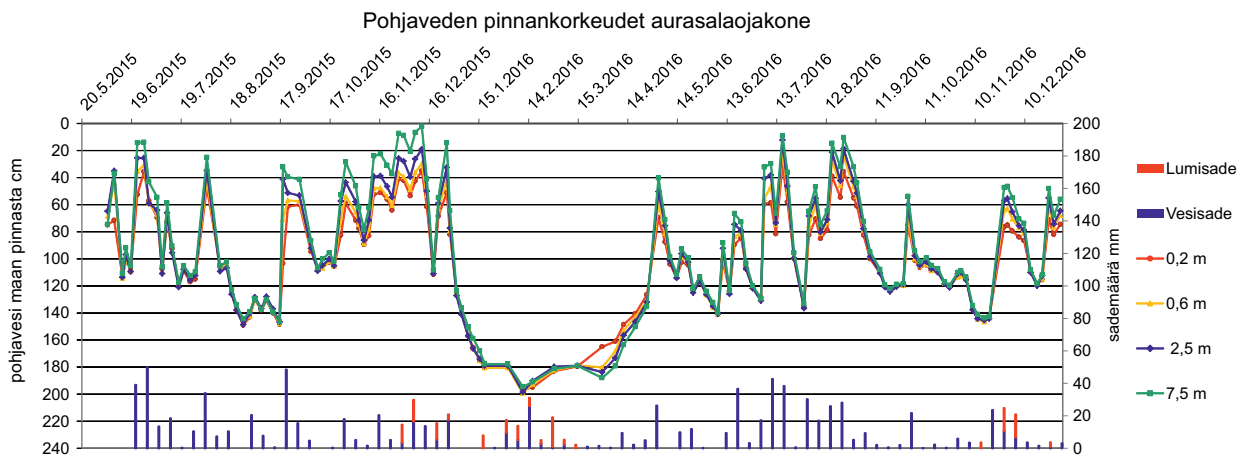
Pohjaveden pinta laski mittausjakson aikana talvella hieman yli kahden metrin syvyyteen maanpinnasta, ja nousi sateisina aikoina pellon pintaan asti. Pohjaveden pinta vaihteli jonkin verran koekentän eri osien välillä. Vedenpinta reagoi sadetapahtumiin nopeasti, mikä on pellon maalajille tyypillistä. Pohjavesitulokset on laskettu jokaiselle mittausetäisyydelle (0,2 m, 0,6 m, 2,5 m ja 7,5 m) salaojaputkesta yhden mittausajankohdan kerranteista mediaanina eli kutakin mittausajankohtaa ja etäisyyttä edustaa kahdeksan mittausta. Koealueiden välinen pohjavedenpinnan syvyyden vaihtelu oli suurta.

3.2.4 Pohjavedenpinnan syvyydet eri etäisyyksillä salaojasta

Pohjavesi nousi sitä lähemmäksi pellon pintaa mitä kauempana oltiin salaojasta (kuvat 3.29 ja 3.30), mikä oli odotettua. Märkinä aikoina, pohjaveden ollessa 50–80 cm:n syvyydellä maanpinnasta, pohjavesi nousi 7,5 m päässä salaojasta hetkittäin 50 cm korkeammalle kuin 0,2 m:n etäisyydellä salaojasta (yksittäiset huippupisteet). Pohjavesiputkien äärietäisyyksien välinen keskimääräinen ero oli koko mittausjakson aikana 11 cm, kun salaojasyvyyden alapuoliset pohjavesiarvot olivat mukana laskennassa (keskiarvo, molemmat 7,5 m etäisyydet ja menetelmät). Suodattamalla salaojasyvyyden alapuoliset arvot pois (kun pohjavesipinta laski ojen puolivälissä alle salaojasyvyyden), ero oli 17 cm (keskiarvo, molemmat 7,5 m etäisyydet ja menetelmät). Välietäisyyksillä (0,6 m, 2,5 m) pohjavedenpinnat olivat tältä väliltä. Pohjavesipintojen erot etäisyyksien kesken tasoittuivat silloin, kun oli kuivempaa ja pohjaveden taso oli lähellä salaojasyvyyttä. Kuivina aikoina pohjaveden painuessa salaojasyvyyden alapuolelle ei eroja etäisyyksien kesken ollut.



Kuva 3.29. Pohjaveden pinnankorkeudet (mediaani) kaivavalla salaojakoneella tehdyissä salaojissa eri etäisyyksillä salaojasta. Sadanta (vesi ja lumi, korjaamaton) on esitetty viikkoarvoina.

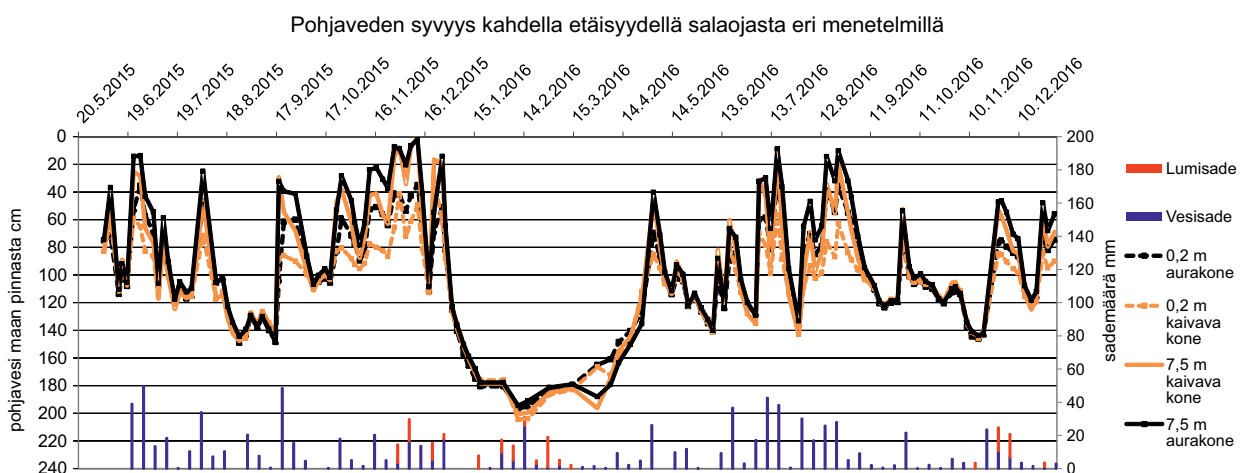


Kuva 3.30. Pohjaveden pinnankorkeudet (mediaani) aurasalaojakoneella tehdyissä salaojissa eri etäisyyksillä salaojasta. Sadanta (vesi ja lumi, korjaamaton) on esitetty viikkoarvoina.

3.2.5 Pohjavedenpinnan syvyydet eri kaivumenetelmien ojituksissa

Pohjavedenpinnan syvyydet eri menetelmillä tehdyissä ojituksissa ja eri etäisyyksillä sala-ojasta on esitetty kuvissa 3.29 ja 3.30. Kuvaan 3.31 on koottu äärietaisyuksien 0,2 ja 7,5 m sala-ojasta pohjavesiarvot. Menetelmien pohjavesien keskiarvot etäisyksittäin on esitetty taulukossa 3.5. Tuloksista on laskettu keskiarvot koko datasta ja lisäksi on laskettu suodatetut keskiarvot, joista yli sala-ojasyvyyden (1 m) arvot on jätetty pois.

Tulosten mukaan pohjavesi oli suurimman osan mittausjaksosta korkeammalla aurakoneella tehdyissä ojituksissa kuin kaivavalla koneella tehdyissä ojituksissa. Pohjaveden pinta oli 3–8 cm lähempänä maan pintaa aurakoneella ojitetuilla koealueilla kuin kaivavalla koneella ojitetuilla alueilla (taulukko 3.5). Pienimmät erot mitattiin 0,2 m etäisyydellä sala-ojasta ja suurimmat 7,5 m etäisyydellä. Kun ajankohdat, jolloin pohjaveden pinta oli yli metrin syvyydessä, jätettiin huomioimatta, oli ero etäisyyden mukaan vastaavas-



Kuva 3.31. Pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnasta (manuaaliset mittaukset, keskiarvo) etäisyyksillä 0,2 m ja 7,5 m sala-ojasta molemmilla ojitusmenetelmillä tutkimusjaksolla toukokuu 2015–joulukuu 2016. Sadanta (vesi ja lumi, korjaamaton) on esitetty viikkoarvoina.

Taulukko 3.5. Pohjaveden syvyydet maanpinnasta eri etäisyyksillä salaojasta. Jokaisen mittaushetken arvoista on laskettu mediaani ja tästä koko mittausjaksolle keskiarvo.

	Etäisyys salaojasta (m)						
	-7,5	-2,5	-0,6	0,2	0,6	2,5	7,5
Pohjaveden syvyys maanpinnasta (cm), koko mittausjakso							
Aurakone							
Keskiarvo	91	96	100	102	97	96	90
Keskihajonta	47	44	40	37	40	42	48
Kaivava kone							
Keskiarvo	97	101	103	108	104	104	98
Keskihajonta	45	39	36	31	35	39	42
Menetelmien ero	5	5	3	6	7	7	8
Pohjaveden syvyys maanpinnasta (cm), yli 1 m arvot poistettu							
Aurakone							
Keskiarvo	67	73	79	82	75	74	65
Keskihajonta	34	32	27	25	28	30	35
Kaivava kone							
Keskiarvo	74	82	85	93	86	84	78
Keskihajonta	34	27	24	19	24	28	33
Menetelmien ero	7	9	6	11	11	11	13

ti 6–13 cm. Suurimmat erot menetelmien välille syntyivät runsaiden sadetapahtumien aikana. Tällöin 0,2 m etäisyydellä salaojasta suurin hetkellinen ero oli 37 cm ja 7,5 m etäisyydellä 39 cm.

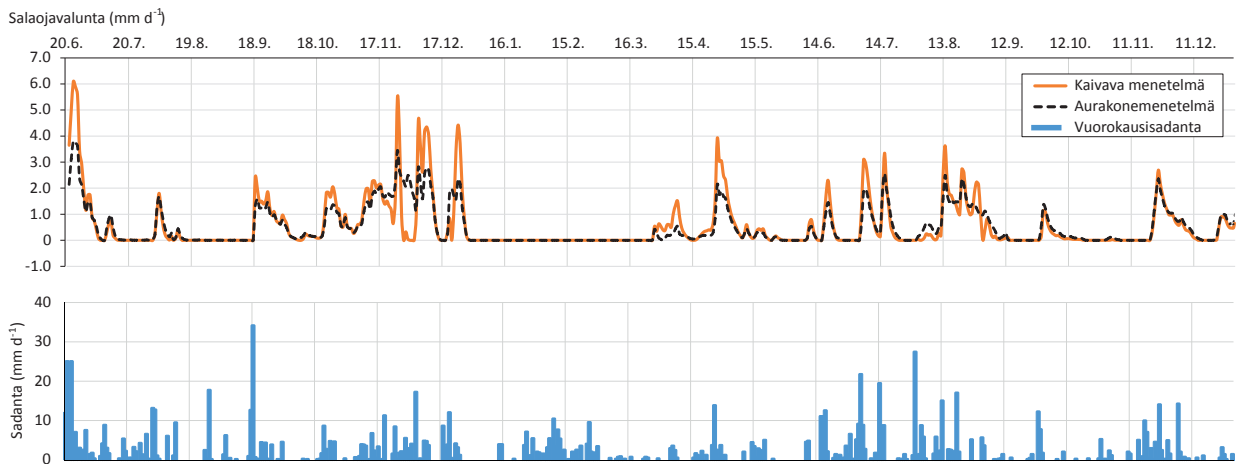
Pohjavesimittausten hajonta/vaihtelu oli salaojan kohdalla aurakonealueilla suurempaa kuin kaivavan koneen alueilla. Pohjaveden pinta painui kuivina aikoina syvemmälle koealueiden 4 (kaivava kone) ja 8 (aurakone) kohdalla. Tämän selittää koealueen 8 vanha pellon päässä ollut avo-oja, joka kuivattaa peltoa peittämisen jälkeenkin. Koealueella 4 maalaji on pääosin karkeampaa kuin muilla koealueilla salaojasyvytydessä. Pohjavesi oli lähempänä maan pintaa aurakoneella runsaiden sadetapahtumien jälkeen, kun korkealla ollut pohjavesi lähti laskemaan kaivavalla koneella nopeammin. Tämä tapahtui erityisesti salaojakaivannon kohdalla.

Pohjavesi nousi lähelle maanpintaa useasti mittausjakson aikana. Ajankohtia, jolloin pohjavesi oli lähempänä kuin 50 cm maanpinnasta kaikilla etäisyyksillä ja kauemmin kuin kaksi päivää, esiintyi kesäkuussa 2015 ja elokuussa 2016. Näinä ajankohtina pohjavesi oli salaojen puolivälissä (7,5 m) yli kaksi päivää 20 cm maan pinnasta. Kirjallisuuden perusteella pellon kasvusto on voinut kärsiä näinä ajankohtina hapen puutteesta ja märkyyssstressistä. Vaikutusta ohrakasvustoon ei pystytty kuitenkaan todentamaan koealueilla.

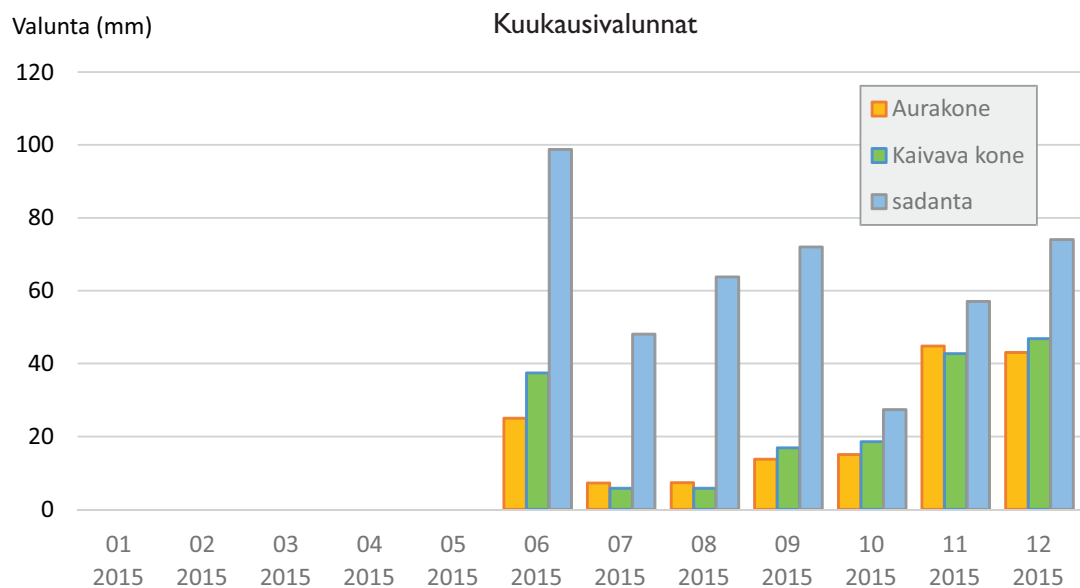
3.2.6 Salaojavalunnat

Mittausjakson salaojavalunnan vuorokausiartot menetelmittain on esitetty kuvassa 3.32. Kuukausittaiset salaojavalunnat menetelmittain on esitetty kuvissa 3.33 ja 3.34. Valunnan mittaukset onnistuivat hyvin lukuun ottamatta marras-joulukuun 2015 kokoojaojan tukosta, joka aiheutti epävarmuutta valuntamäärissä.

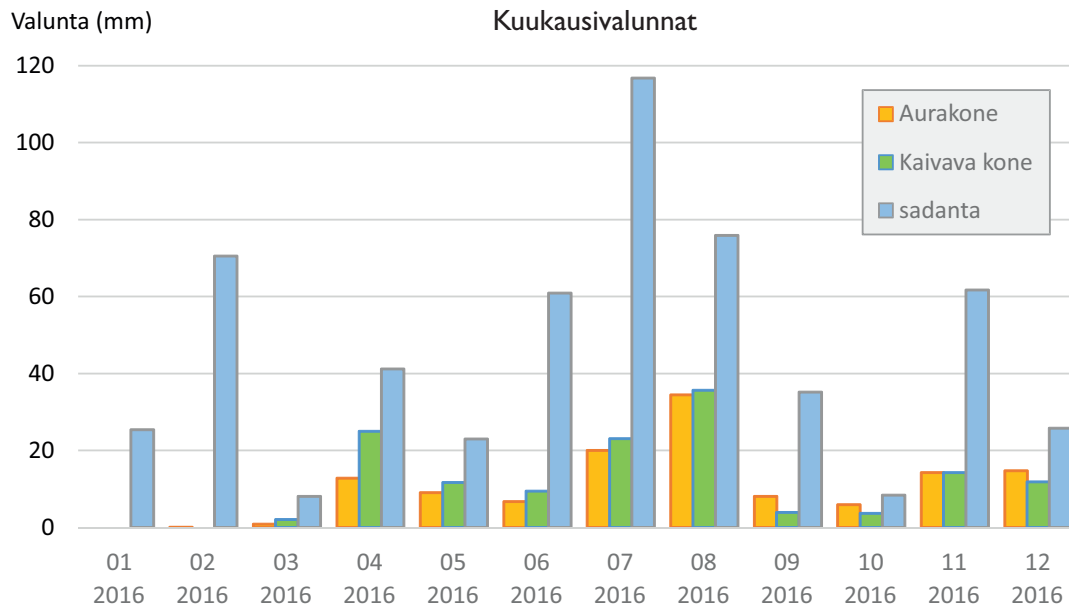
Salaojavaluntaa kertyi kaivavalla koneella tehdyistä salaojista 315 mm ja aurakoneella tehdyistä salaojista 283 mm toukokuusta 2015 joulukuun loppuun 2016. Valuntasumma oli 11 % suurempi kaivavalla koneella kuin aurasalaojakoneella. Aurakoneella tehdyistä ojaistoista tuli vähemmän valuntaa lähes joka kuukausi. Valuntamäärät olivat kaivavalla koneella tehdyistä ojaistoista suuremmat runsaiden ja pitkien sadetapahtumien aikana. Suurimpien sadetapahtumien (yli 30 mm d⁻¹) aikana salaojavalunta oli hetkellisesti kaivavalla koneella tehdyistä ojaistoista yli kaksinkertainen. Salaojavaluntaa ei muodostunut sadetapahtumien aikana kesällä, sillä pellon pohjavesipinta oli salaojasyvyyden alapuolella. Kuvassa 3.32. näkyy marras-joulukuussa 2015 tapahtuneet virtausmittarin tukkeutumiset, joissa valunta on käynyt hetkittäin nollassa.



Kuva 3.32. Aurakoneella ja kaivavalla koneella salaojitettujen alueiden salaojavalunnat (mm d⁻¹) 20.6.–31.12.2015 ja vuorokausisadanta koekentällä (korjaamaton). Valuntakäyrässä näkyy marras-joulukuun 2015 kaivavan koneen alueiden kokooajan tukos.



Kuva 3.33. Aurakoneella ja kaivavalla koneella salaojitettujen alueiden salaojavalunta ja sadanta (korjaamaton) kuukausittain 6/2015–12/2015.



Kuva 3.34. Aurakoneella ja kaivavalla koneella salaojitettujen alueiden salaojavalunta ja sadanta (korjaamaton) kuukausittain 1/2016–12/2016.

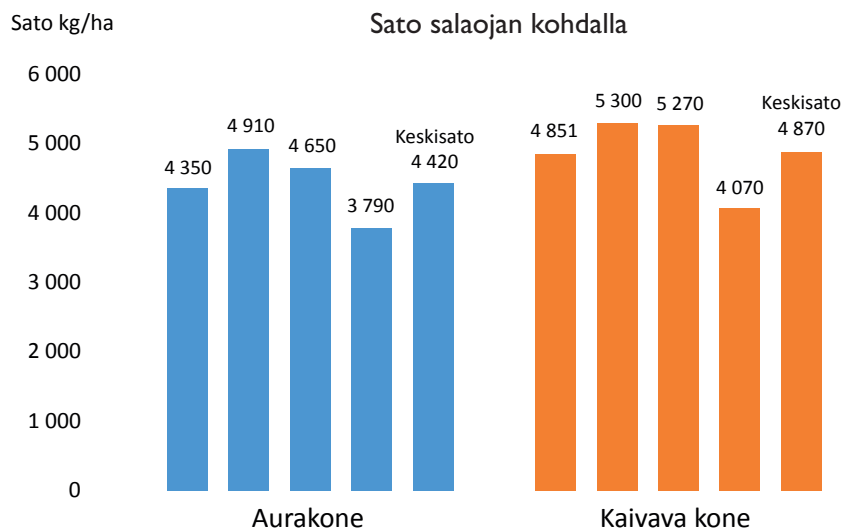
3.2.7 Sato

Koealueiden sadon määrä ja laatu vuonna 2016 on esitetty taulukossa 3.6 ja kuvissa 3.35 ja 3.36. Viljelykasvina oli rehuohra. Kasvukauden 2015 satoa ei mitattu, sillä ohrakasvusto oli hyvin vaihtelevaa, salaoituksen aiheuttamista maan muutoksista johtuen. Satovaihtelut johtuivat pellon maakerrosten ja viljavan pintamaan liikuttamisesta sekä maan rakenteen häiriintymisestä. Kasvustossa esiintyi märkyyden aiheuttamia haittoja erityisesti vanhojen avo-ojien kohdalla ja salaojien liitoskohdissa. Kasvukaudella 2016 kasvusto oli huomattavasti tasaisempaa.

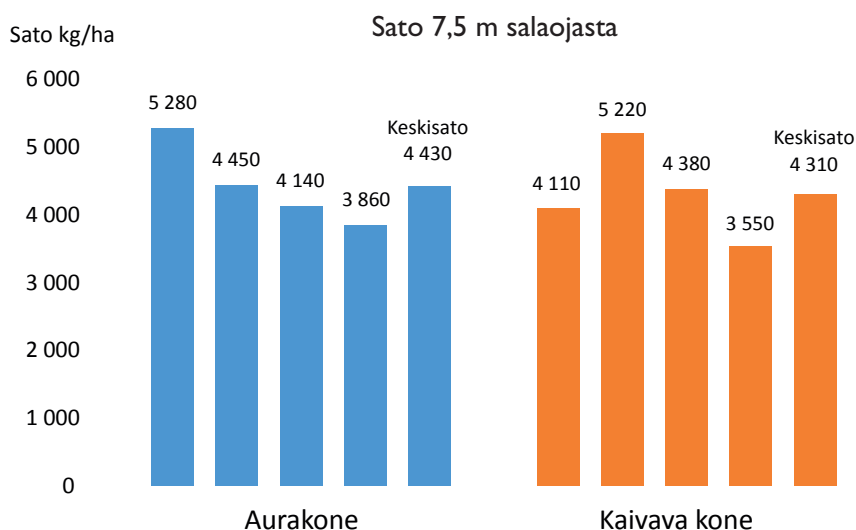
Ohran keskisato vuonna 2016 oli salaojan kohdalla kaivavalla koneella ojitetuilla alueilla 4870 kg ha⁻¹ ja aurakoneella ojitetuilla alueilla 4420 kg ha⁻¹. 7,5 m päässä salaojasta aurakoneella ojitettujen alueiden keskisato oli 4430 kg/ha ja kaivavan koneen alueiden 4310 kg ha⁻¹. Sato oli koko koekentän alalla salaojan kohdalla 6 % suurempi kuin 7,5 m etäisyydellä salaojasta. Menetelmittäin sato oli 10 % suurempi kaivavan koneen alueilla salaojan kohdalla kuin aurakoneen alueilla, kun taas salaojien puolivälissä aurakonealueiden sato oli 3 % suurempi kuin kaivavan koneen alueiden.

Taulukko 3.6. Sadon määrä (kuiva-aine) (ohra, Brage) ja laatu (1000 jyvän paino ja hehtolitrapaino) vuonna 2016. Kursiivilla olevat luvut kertovat keskihajonnan.

Koealue	Etäisyys salaojasta (m)	Sato (kg/ha)		Typpi (%)		Typpisato (kg/ha)		Tjp (g)	Hlp (kg)
1 = Aurakone	0	4350	1040	1,53	0,07	72	9	29,6	60,1
	7,5	5280	690	1,63	0,07	91	10	31,6	62,5
2 = Kaivava kone	0	4860	650	1,69	0,07	87	10	31,9	63,0
	7,5	4110	530	1,68	0,08	73	10	32,0	60,9
3 = Kaivava kone	0	5300	800	1,68	0,09	95	19	33,7	64,1
	7,5	5220	1160	1,71	0,11	99	27	33,7	65,0
4 = Aurakone	0	4910	230	1,76	0,03	86	6	31,7	65,7
	7,5	4450	310	1,77	0,17	74	5	31,8	60,7
5 = Kaivava kone	0	5270	520	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
	7,5	4380	230	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
6 = Aurakone	0	4650	580	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
	7,5	4140	430	0,00	0,00	0	0	0,0	0,0
7 = Aurakone	0	3790	1110	1,65	0,21	66	28	29,5	63,3
	7,5	3860	1260	1,48	0,18	55	27	28,1	60,3
8 = Kaivava kone	0	4070	1360	1,46	0,16	55	26	27,9	61,2
	7,5	3550	760	1,41	0,16	53	19	29,1	56,1



Kuva 3.35. Ohrasato menetelmittäin vuonna 2016 salaojan kohdalla. Jokainen pylväs esittää neljän näytteen keskiarvoa.



Kuva 3.36. Ohrasato (kuiva-aine) menetelmittain vuonna 2016 7,5 m päässä salaojasta. Jokainen pylväs esittää neljän näytteen keskiarvoa.

3.2.8 Sievin koekentän tulosten tarkastelu

Ojitusmenetelmien välinen ero pohjavedenpinnan syvyyksissä eikä runsaampi salaojavalunnan muodostuminen kaivavalla koneella toteutetussa ojituksessa vaikuttanut tutkimusjakson aikana pellolla tehtäviin viljelytoimiin. Pohjaveden nopea laskunopeus (maalajista johtuen) vaikutti siihen, että aurakoneella tehdyillä alueilla ylempänä ollut pohjavedenpinta ei ehtinyt vaikuttaa sadon muodostukseen ja satomääriin. Salaojituksesta johtuvat maan muutokset pellon pinnassa aiheuttivat paljon vaihtelua satoiin, jolloin salaojituksen roolia sadonmuodostukseen ei pystytty luotettavasti todentamaan näin lyhyellä tutkimusjaksolla.

Tulokset ovat yhdenmukaisia kirjallisuudessa esitettyihin pohjavesien pinnan arvojen eroihin menetelmien välillä (esim. Kanwar ym. 1986). Korkean pohjavedenpinnan vaikutuksia pellon kasvustoon ja sadonmuodostukseen ei ole mahdollista todentaa luotettavasti ilman kasvustosta tehtäviä mittauksia. Korkean pohjaveden vaikutuksista pellon kantavuuteen tulisi tehdä peltomittakaavan kantavuuskokeita, jotta pellon kantavuusrajoista saataisiin tarkkoja arvoja. Koekentän mittaustuloksista tehdään tilastollinen tarkastelu.

3.3 Salaojien ympärysaineet

Tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 3.7. Taulukkoon on koottu salaojituksen ja ympärysaineen toiminnan kannalta keskeisimmät tekijät: maalaji salaojasyvyydessä, salaojien ikä, maan rakenne, salaojakaivannon muodostuminen, esipäällysteen hajoamisaste, soran laatu, putkeen päätyneen maan määrä, ruostekertymien sekä märkyysongelmien esiintyminen.

Taulukko 3.7. Ympärysainetutkimuksen tulokset.

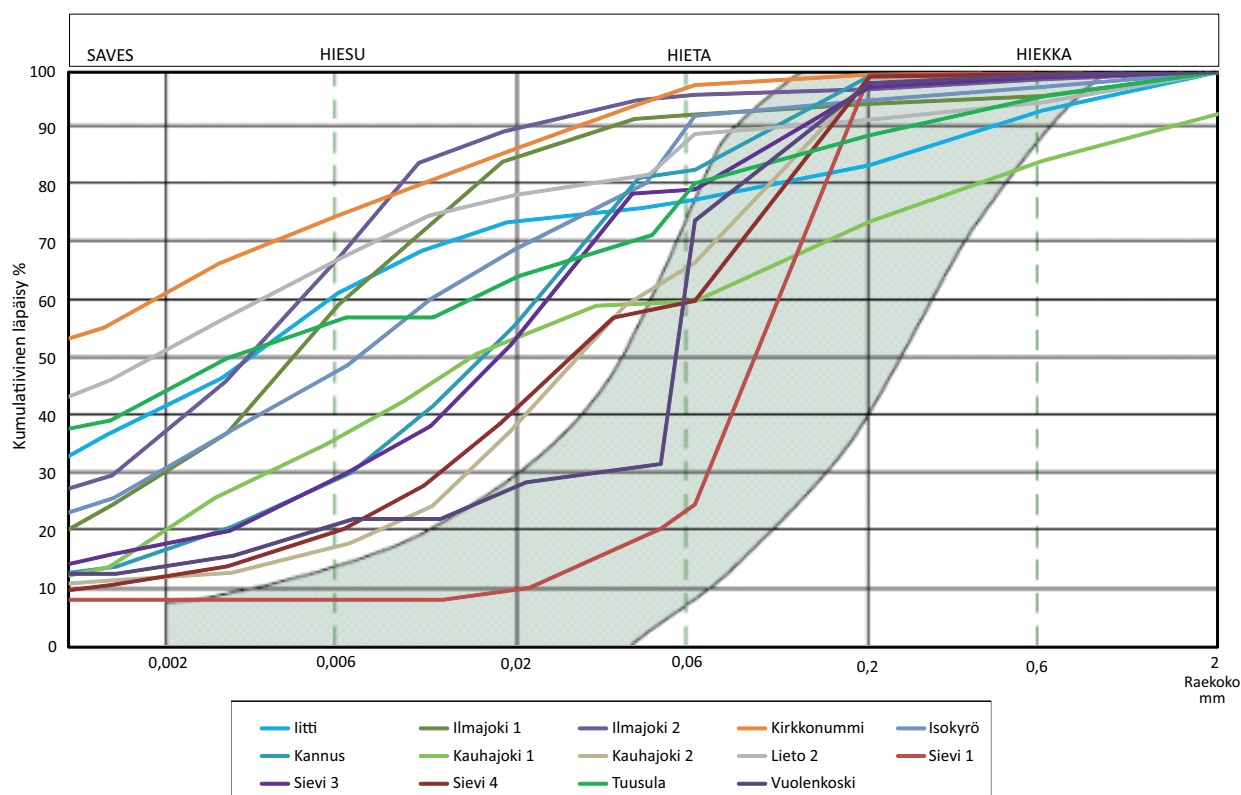
Esipäällyste	Tutkimuskohde	Maalaji	Lohkon koko, ha	Salaojien ikä, vuotta	Maan rakenne	Kaivannon muodostuminen	Esipäällysteen hajoamisaste	Soran laatu	Putken tukkeutuminen	Ruoste- kertymiä	Märkyyso- ongelmia	
Suodatinkangas	Loimaa 1	AS	5,8	13	1,2	1	1	3	3	Ei	1	
	Loimaa 2	HtS	3,2	5	1,2	1	1	3	3	Ei	1	
	Lieto	HtS, SHt	5,7	13	1	1	1	1,2	1,2	Ei	1	
	Ristiina	----	5,6	15	2	1	2	3	3	Ei	1	
	Kalajoki 1	HHk	6,4	10	3	2	1	3	3	kyllä	3	
	Kalajoki 2	HHk	9,0	10	3	1	1	3	3	kyllä	3	
	Kalajoki 3	KHt	5,1	10	3	1	2	3	3	Kyllä	2	
	litti 1a	heS	1,2	10	2,3	1	2,3	3	3	ei	3	
	Kookos	Kalajoki 4	KHt	10,0	13	2,3	2	1	3	3	Kyllä	2
		Kalajoki 5	KHt	4,7	13	2,3	2	1	3	3	Kyllä	2
Loviisa		HeS, HtS	12,2	32	2	1	1,2	1,2,3	1,2,3	Ei	1	
Inkoo		HtS, SHt	9,5	18	2,3	2	1	1/2	1/2	Ei	3	
Paimio		sHt, HHt	21,0	17	3	2	2,3	1,2,3	1,2,3	Kyllä	2	
Kirkkonummi		Hes, As	5,2	10	1,2	1,2	3	1,2,3	1,2,3	ei	1	
Sora		litti 1b	heS	4,7	10	2	2	1	3	3	ei	3
		litti 1c	heS	3,1	21	2	1	1	2	--	ei	2
		Ilmajoki 1	Hs	3,9	10	2	2	1	2	3	kyllä	3
		Ilmajoki 2	Hs	8,8	5	3	1,2	1	3	3	ei	2,3
	Isokyrö	Mm, HsS	5,7	4	1,2	1	1	2	3	kyllä	1	
	Kannus	KHt	8,0	22	3	2	2	2,3	2,3	kyllä	2	
	Kauhajoki 1	Hs, KHt	2,8	2	1,2	1	1	3	3	ei	1,2	
	Kauhajoki 2	He, KHt	9,3	6	1,2	1	1	3	3	ei	1	
	Lieto	HeS	15,6	35	3	2	2	2	1,2	ei	2,3	
	Sievi 1	KHt	8,9	8	2	1	1	2	2,3	kyllä	1,2	
Maan rakenne	Sievi 2	Mm, Ca	8,8	5	2	1	1	2	3	kyllä	1,2	
	Sievi 3	Hs, HHt	2,3	11	2	1	1	3	3	ei	1,2	
	Sievi 4a	She, He, KHt	3,6	1	1,2	2	1	1	1,2	ei	2,3	
	Sievi 4b	She, He, KHt	3,6	1	1,2	2	1	3	3	ei	2,3	
	Tuusula	Hes	7,4	20	2	1,2	1,2	3	2,3	ei	2	
	Vuolenskoski	Hs/HHt	1,9	28	1,2	1	1	2	1	ei	1	
	Suojakaivannon muodostuminen			Esipäällyste		Sora		Tukkeutuminen		Märkyysoongelmia		
	3 = hyvä 2 = keskinkertainen, kevyt jankko 1 = huono, kova jankko			3 = vähän hajonnut 2 = merkittävästi hajonnut 1 = täysin hajonnut		3 = hyvälaatuinen 2 = huono laatu / hieman tukkeutunut 1 = ilman sora		3 = lähes puhdas putki 2 = 1/3 putkesta tukkeutunut 1 = yli puolet putkesta tukkeutunut		3 = vähän 2 = märkyyshaitat havaittavissa 1 = jatkuvasti, märkyys rajoittaa kasvua		

3.3.1 Maalajit, maan rakenne ja märkyysongelmat

Tutkimuskohteiden maalajit jokaista koekuoppaa kohti on nimetty ja esitetty taulukossa 3.7. Kaikissa kohteissa käytettiin muoviputkea. Kohteiden rakeisuuskäyrät ja ongelmamaiden alue (hyvä suodatintarve) on esitetty kuvassa 3.37. Maalajit on tarkemmin esitetty liitteen 13 rakeisuustaulukossa. Salaojasyvyyden rakeisuuksien perusteella savimaita oli 12, hiuemaita 2, hiesumaita 3, hietamaita 9, turvemaita 1 ja hiekkamaita 2. Jokaisen kohteen rakeisuuskäyrä kuvaa yhden koekuopan rakeisuutta. Lähes kaikissa kohteissa oli useampaa maalajia eri koekuoppien alueilla. Maalajit olivat kaikissa kohteissa lajitejakaumaltaan sellaisia, että maa sisälsi tasaisesti useita maalajitteita. Tämä näkyi rakeisuuskäyrissä, sillä ne olivat tasaisesti kasvavia ja osuivat ongelmamaalajien alueelle vain osittain. Kahdessa kohteessa, Sievi 1:ssä ja Vuolenkoskella, maat koostuivat lähes kokonaan hienosta ja karkeasta hiedasta, ja rakeisuudet osuivat ongelmamaalajien alueelle.

Maan rakenne oli silmämääräisten havaintojen perusteella melko hyvä tai tyydyttävä valtaosassa kohteita (21/30). Tutkimukseen otettiin kohteita, joissa oli ollut märkyysongelmia. Tämä näkyi maan rakenteessa selvästi yhdeksässä kohteessa. Näissä kohteissa pellon sisällä märkyydestä kärsivillä alueilla maa oli tiivistynyttä, märkää ja pellon kantavuus huono.

Märkyysongelmia esiintyi 24 kohteessa. Jatkuvasti märkyydestä kärsiviä kohteita oli yhdeksän. Kohteita, jossa märkyysongelmat olivat havaittavissa, mutta joissa märkyys ei ollut jatkuvaa, oli kaikkiaan 11. Neljässä kohteessa märkyyttä esiintyi vain osassa peltoa.



Kuva 3.37. Tutkimuskohteiden salaojasyvyyden rakeisuuskäyrät. Kunkin kohteen käyrä edustaa yhden koekuopan rakeisuutta salaojasyvyydessä. Tummennetulla on merkitty rakeisuuksien alue, jossa ympärysaineen laadun tulee olla hyvä (suodatintarve).

Märkyysongelmien syitä

Salaojaputkissa oli eriasteisia tukkeumia 12 kohteessa (taulukko 3.8). Kahdeksassa kohteessa esiintyi putkia, joihin oli kertynyt maata runsaasti yli puoli putkea (kuva 3.38). Yhdessä kohteessa oli salaojitettu ilman ympärysainetta, ja siellä esiintyi runsaasti maa-ainesta putkissa. Neljässä kohteessa, joissa putket olivat merkittävästi tukossa, esiintyi myös merkittävää pellon kuivatuksen vajaatoimintaa ja märkyyttä. Lopuissa viidessä kohteessa, joissa putket olivat hieman tukkeutuneita, esiintyi vain pieniä märkyysongelmia.

Taulukko 3.8. Ympärysaineen ja maalajin vaikutus putken tukkeutumisen esiintymiseen. Maalajin kohdalla luku kuvaa tukkeutumien kokonaismäärää maalajissa. Suluissa oleva luku esittää runsaiden tukkeutumisten esiintymisen.

	Savimaat 12 kohdetta	Hiuemaat 2 kohdetta	Hiesumaat 3 kohdetta	Hietamaat 9 kohdetta	Hiekkamaat 2 kohdetta
Ympärysaine	tukkeumat kpl	tukkeumat kpl	tukkeumat kpl	tukkeumat kpl	tukkeumat kpl
Kookoskuitu	3 (3)	0	0	0	0
Suodatinkangas	1 (1)	0	0	0	0
Sora	3 (1)	1 (0)	2 (1)	2 (0)	0



Kuva 3.38. Tukkeutunut salaojaputki hiuemaassa.



Kuva 3.39. Salaojaputki, johon on kertynyt ruostetta. Myös sora putken ympärillä oli ruosteen kovettama.

Ruostesaostumia löytyi 11 kohteesta. Ruosteongelmamaista kolmessa esiintyi eriasteisia märkyysongelmia. Näistä kohteista vain yhdessä esiintyi merkittäviä ruostesakkaumia ja salaojasoran kovettumista, jotka haittasivat veden liikettä ja salaojan toimintaa.

Kaivantojen vedenläpäisy on tärkeää heikosti vettä läpäisevillä mailla, joiden perusmaa johtaa huonosti vettä. Tutkimuskohteissa (30 kpl) salaojakaivannot olivat muodostuneet vaihtelevasti. 11 kohteen salaojakaivannoissa ruokamultaa oli putken ja soran päältä pellon pintaan saakka (kuva 3.40). Kaikkiaan 17 kohteen kaivannot olivat huonosti muodostuneet, ja ruokamultaa oli hyvin vähän tai ei lainkaan (kuva 3.41). Lähes kaikissa kohteissa, joissa

suositusten mukaista salaojakaivantoa ei ollut, esiintyi jonkin asteisia märkyysongelmia. Kohteita, joissa maan rakenne oli huono tai keskinkertainen, salaojakaivantoa ei ollut, ja kohteita joissa esiintyi märkyysongelmia, oli yhteensä kuusi.



Kuva 3.40. Hyvin muodostunut salaojakaivanto, jossa ruokamultaa oli putken ja soran päältä pellon pintaan asti, Sievi 3.



Kuva 3.41. Huonosti muodostunut salaojakaivanto, jossa ei ollut ruokamultaa eikä vettä hyvin läpäisevää materiaalia, Isokyrö.

Veden nopea liike salaojaan

Veden liike salaojaa kohti oli nopeaa kuudessa kohteessa, johtuen pellon maasta (maalaji/maan rakenne) sekä salaojakaivannon täytöstä. Kahdessa kohteessa maa oli urpaantunutta ja hyvärakenteista. Kolmessa kohteessa salaojakaivannot olivat hyvin vettä läpäiseviä ja vesi pääsi nopeasti maan pinnalta salaojiin. Yhdessä kohteessa pellon maa oli pinnalta karkeaa, hyvin vettä johtavaa maalajitetta, ja salaojasyvyyydessä maalaji muuttui hiukeeksi ja hienoksi hiedaksi (ongelmamaalaji). Maaperästä ja salaojakaivannosta johtuen veden nopea liike aiheutti luultavasti salaojien tukkeutumista. Tukkeutumista tapahtui myös maassa, jossa savespitoisuus oli kirjallisuudessa annettua kriittistä rajaa suurempi, yli 30 % (3 kohdetta). Kahdessa kohteessa ympärysaineena oli kookospäällyste ja lopuissa sora.

Yhdessä kohteesta oli hyvin vettä johtava maa. Siellä ympärysainetta ei käytetty, ja tämä johti salaojien eriaistaiseen tukkeutumiseen vuosi salaojituksen jälkeen.

Esipäällysteellä ojitetut kohteet

TOSKA-hanketta edeltäneessä PVO2-hankkeessa tutkittiin esipäällysteitä 12 tutkimuskohteessa (Sikkilä 2014). Tässä tutkimuksessa jatkettiin esipäällysteiden tutkimista kahdessa uudessa kohteessa ja tulosten tarkasteluun otettiin mukaan PVO2-hankkeen tulokset. Esipäällysteellä ojitetuja kohteita oli tarkastelussa kaikkiaan 14.

Kahdesta uudesta esipäällysteellä ojitetusta kohteesta yksi oli ojitettu kookoksella ja toinen suodatinkankaalla. Kookoksella ojitetussa kohteessa kookoskuitu oli säilynyt hyvänä savimaassa (As, HeS) 10 vuoden ajan. Salaojaputkiin oli kertynyt maata koko pellon alueella, ja osassa peltoa putket olivat lähes kokonaan tukkeutuneet. Pellolla esiintyi märkyysoongelmia tukkeutuneiden putkien kohdalla. Maa sisälsi saveksen lisäksi runsaasti (noin 20 %) molempia maalajitteita: hiesua ja hienoa hietaa. Pellon salaojakaivannot oli täytetty hakkeella ja kaivannot olivat tehokkaasti vettä johtavia. Kaivannot olivat paikoitellen painuneet kiinni salaojituksen yhteydessä, ennen kuin hake oli saatu asennettua kaivantoihin. Hakkeen sekaan oli kulkeutunut paljon maa-ainesta 10 vuoden aikana.

Suodatinkankaalla ojitetussa kohteessa pellon maalaji oli savi, ja siellä salaojaputket olivat puhtaat. Kangas oli säilynyt maassa, mutta ohentunut merkittävästi. Salaojakaivantoa ei ollut muodostunut. Peltö kuivui hitaasti, mutta varsinaisia märkyysoongelmia ei ollut. Pellon hidas kuivuminen johtui luultavasti maan hitaasta vedenläpäisevyydestä, ja siitä että paremmin läpäisevää ympärysainetta ei käytetty, eikä salaojakaivantoa ollut havaittavissa.

Esipäällysteen hajoamisaste vaihteli kohteiden välillä. Yhdeksässä kohteessa esipäällyste oli hajonnut kokonaan ja kahdessa kohteessa päällysteen hajoaminen oli pitkällä. Kookoksella ojitetuista kuudesta kohteesta neljässä kookos oli hajonnut kokonaan ja yhdessä hajoamista oli tapahtunut. Kookoksen hajoamisherkkyys (täydellinen hajoaminen) oli 67 % tarkastelluista kohteista.

Suodatinkankaalla ojitetuista kahdeksasta kohteesta viidessä päällyste oli täysin hajonnut. Lopuissa kolmessa kohteessa hajoaminen oli pitkällä. Suodatinkankaan hajoamisherkkyys (täydellinen hajoaminen) oli 63 % tarkastelluista kohteista. 36 % kohteista (5/14) esiintyi putkissa maa-ainesta. Kaikissa kohteissa, joissa tukkeutumisia esiintyi, tukkeumat olivat merkittäviä vähintään yhdessä kohtaa peltolohkoa (puoli putkea tai yli). Viidestä tukkeutuneesta kohteesta kolmessa esipäällyste oli hajonnut kokonaan ja yhdessä hieman ohentunut. Kohteista joissa esipäällyste oli hajonnut ja putkiin päässyt maata, vain yhdessä oli käytetty suodatinkangasta ja lopuissa tukkeutuneista kohteista käytettiin kookosta.

Kahdessa kookoksella ojitetussa kohteessa oli käytetty haketta kaivannon täytössä. Molemmissa esiintyi kookoksen hajoamista sekä putken tukkeutumista. Kohteista toisessa myös hake oli hajonnut lähes kokonaan.

Soralla ojitetut kohteet

Salaojasora oli lähes kaikissa kohteissa silmämääräisten havaintojen perusteella rakeisuudeltaan hyvää. Soraa oli käytetty putken päällä suositusten mukaisia määriä (5–15 cm). Neljässä kohteessa oli käytetty runsasta sorastusta (15 cm tai enemmän) tai tiheämpiä sorasilmäkkeitä. Soran sekaan oli salaojituksen jälkeen sekoittunut ympäröivää maata useassa kohteessa ja tämä näkyi salaojasoran rakeisuusanalyysissä. Viidessä kohteessa soran ominaisuuksia heikensivät ruostekertymät.

Soran rakeisuuksien perusteella sorassa oli mukana hienoinesta. Verrattuna salaojajohdteiden suosittelun rakeisuuskäyrän alueeseen soran rakeisuuskäyrä leikkaa suosituskäyrän. Salaojajohdteiden rakeisuutta ja edelleen laatua ei voitu näin ollen laboratoriomittauksen perusteella arvioida.

Kuudessa soralla ojitetussa kohteessa esiintyi eri määriä maata putkissa. Näistä kohteista vain kahdessa tukkeumat olivat merkittäviä ja häiritsevät salaojituksen toimintaa. Soran aiheuttama salaojan tukkeutumisriskisyys oli 13 % tarkastelluista kohteista. Soran rakeisuutta ei pystytty näissä kohteissa määrittämään.

3.3.2 Tulosten tarkastelu

Salaojajohdteiden eriasteista tukkeutumista esiintyi 12 kohteessa 30:stä. Soralla salaojitettuja kohteita oli 16 ja niissä esiintyi salaojajohdteiden merkittävää tukkeutumista vain 13 %:ssa kohteista. Esipäällysteillä ojitettuja kohteita oli 14 ja niissä 34 %:ssa esiintyi johdteiden tukkeutuminen. 80 % näistä kohteista esipäällysteenä oli kookoskuitu.

Tukkeutuneet putket olivat lähes kaikki rakeisuudeltaan hienojakoisilla maalajeilla. Yllättäen myös savimailla esiintyi salaojajohdteiden tukkeutuminen, vaikka kirjallisuuden (Cavelaars ym. 1994) mukaan näin ei pitäisi käydä. Hyvin vettä läpäisevissä savipitoisissa maissa, joissa salaojajohdteiden läpäisevyys oli hyvä, salaojajohdteiden tukkeutuminen ei tapahtunut. Maassa sisälsi savilajitteiden lisäksi runsaasti hiesua tai hietaa. Maalajit olivat hiesu-, hiesusavi- ja aitosavimaita.

Tulosten mukaan esipäällysteet hajoavat maan olosuhteista riippuen (pH, lämpötila, mikrobit, happipitoisuus). Kookoskuitu oli kokonaan orgaanista materiaalia ja suodatinkankaan koostumuksesta sitä oli noin puolet. Kookoskuitu oli hajonnut ainakin osittain noin puolessa kohteista ja suodatinkangas lähes kaikissa kohteissa. Esipäällysteen hajoaminen ei kuitenkaan yksiselitteisesti aiheuttanut johdteiden tukkeutumista. Vaikka esipäällyste oli hajonnut, liettymistä ei aina esiintynyt. Toisaalta ehjien esipäällysteiden putkissa liettymistä esiintyi. Tukkeutumiseen näytti vaikuttavan merkittävästi pellon maalaji. Tukkeutumista esiintyi etenkin hienojakoisissa maalajeissa.

Pellon maalajista johtuen putket voivat tukkeutua, mikäli ei käytetä laadukasta ympäristösäätin. Tehokkaasti vettä johtavan salaojajohdteiden ja pellon maalajin yhteisvaikutuksesta salaojajohdteiden voivat tukkeutua, vaikka käytetään suositusten mukaista ympäristösäätin. Laadukasta ympäristösäätin ei yleensä tarvita, mikäli pellon maalaji on sellainen, että vedenläpäisevyys on hyvä, eikä maassa ole putkia tukkivia maalajitteita (hiekkamaat).

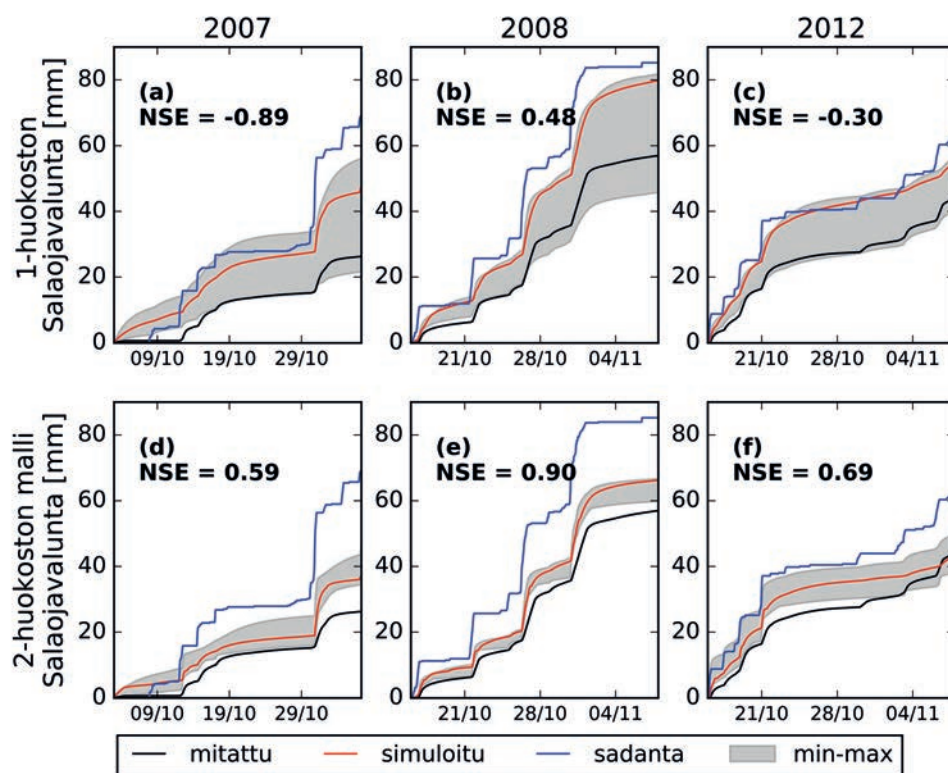
3.4 Mallintamistulokset

3.4.1 Veden virtausreitit eri tavoilla toteutetuissa salaojakaivannoissa

Salaoja- ja pintakerrosvaluntoja simuloitiin ojavälimittakaavan mallilla yhden ja kahden huokoston mallikuvauksilla. Simulointitulokset yhdeltä syysjaksolta (1.10.–3.11.2007) ennen alueen C täydennysojitusta ja kahdelta sen jälkeen (14.10.–7.11.2008 ja 14.10.–7.11.2012) on esitetty taulukossa 3.9. Vastaavalta ajalta mitatut valuntamäärät on esitetty mallinnetun valuntamäärän jälkeen suluissa. Yhden ja kahden huokoston mallien simulointitulokset on esitetty keskiarvona viidestä maaparametrisoinnista. Eri maaparametrisoinnit tuottivat simuloituille valunnoille vaihteluvälin, joka piti sisällään mitatun valuntamäärän.

Taulukko 3.9. Mitatut ja mallinnetut salaoja- ja pintakerrosvaluntamäärät (mm) ennen (2007) ja jälkeen (2008, 2012) alueen C täydennysojituksen. Mitattu valuntamäärä on esitetty suluissa.

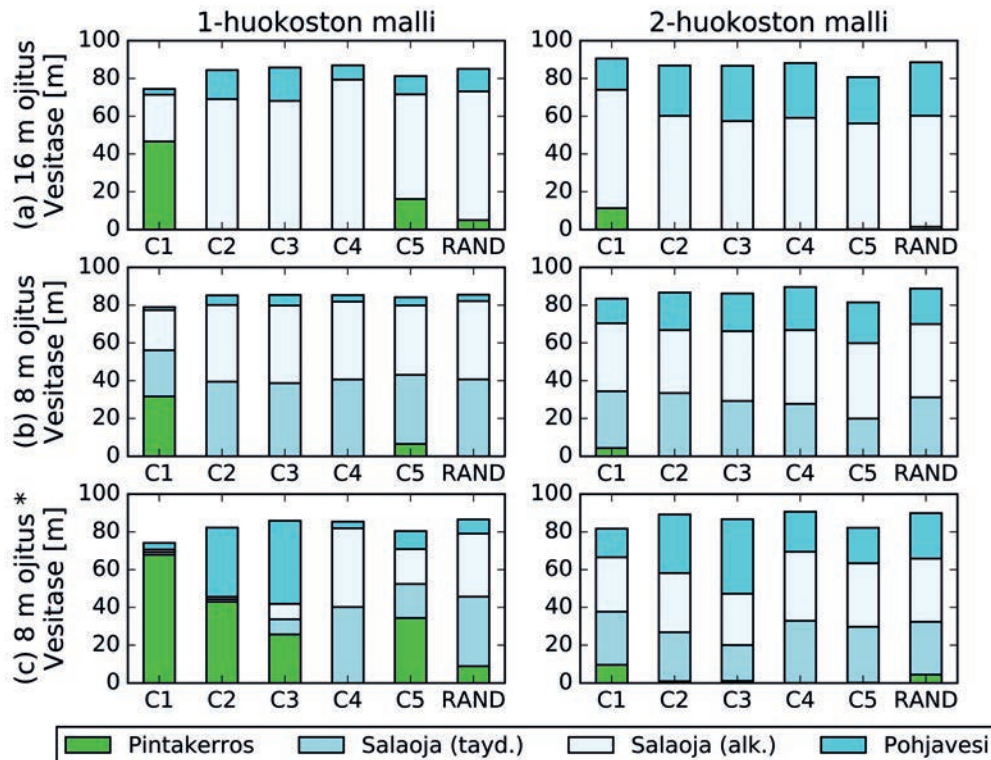
	Yhden huokoston malli		Kahden huokoston malli	
	Salaoja [mm]	Pinta [mm]	Salaoja [mm]	Pinta [mm]
2007 (16 m ojaväli)	44 (27)	8 (6)	39 (27)	2 (6)
2008 (8 m ojaväli)	72 (57)	8 (14)	65 (57)	1 (14)
2012 (8 m ojaväli)	52 (44)	4 (10)	43 (44)	1 (10)



Kuva 3.42. Mitatut ja mallinnetut kumulatiiviset salaojavalunnat alueella C ennen täydennysojitusta (2007) ja sen jälkeen (2008, 2012). Viisi mallitulosta on tuotettu parametrisoimalla malli erikseen maanäytteistä CI–C5 määritetyillä hydraulisilla ominaisuuksilla. Simulaatioissa käytettiin kahta erilaista mallikuvausta, joista ensimmäinen kuvaa virtausta yhdessä jatkuvassa huokostilassa (a, c ja e) ja toinen kuvaa virtausta erikseen maaperän suurissa ($> 300 \mu\text{m}$) ja pienissä huokosissa (b, d ja f).

Kuvassa 3.42 on esitetty kolmen syysjakson yhden ja kahden huokoston malleilla simuloidut kumulatiiviset salaojavalunnat mediaanina sekä vaihteluvälinä viidestä eri parametrisoinnista (Salo ym. 2017). Kuvan 3.42 hyvyysluvut (NSE) on laskettu kumulatiivisten salaojavalunnan aikasarjojen mediaanille. Lyhyiden syysjaksojen salaojavaluntojen hyvyysluvut ovat verrattavissa pitkien aikasarjojen simuloitujen tunnittaisten salaojavaluntojen hyvyyslukuihin samalta koealueelta: Turusen ym. (2013) FLUSH-mallilla simuloitujen tunnittaisten salaojavaluntojen hyvyysluvut olivat 0,73 (2007) ja 0,43 (2008).

Kuvassa 3.43 on esitetty kolmen eri ojitusratkaisun vesitaseiden valentakomponentit (salaoja, pintakerros ja pohjavesivalunta) vuoden 2008 syysjaksolle yhden ja kahden huokoston mallikuvauksilla ja viidellä eri maaparametrisoinnilla (C1–C5). Kuvassa 3.43 esitetyistä eri ojitusratkaisujen valentakomponenteista huomataan, vertaamalla 1-huokosto mallin kuvia b ja c, kaivannon vaikutus valuntareitteihin, kun kyseessä on homogeeninen maaperä, jossa ei ole toimivaa makrohuokostoa. Kun kyseessä on heterogeeninen savimaa (RAND) ojien välissä, ominaisuuksiltaan paremmin vettä johtavat maakohdat dominoivat maan kuivatuskykyä ja veden virtausta salaojiin.

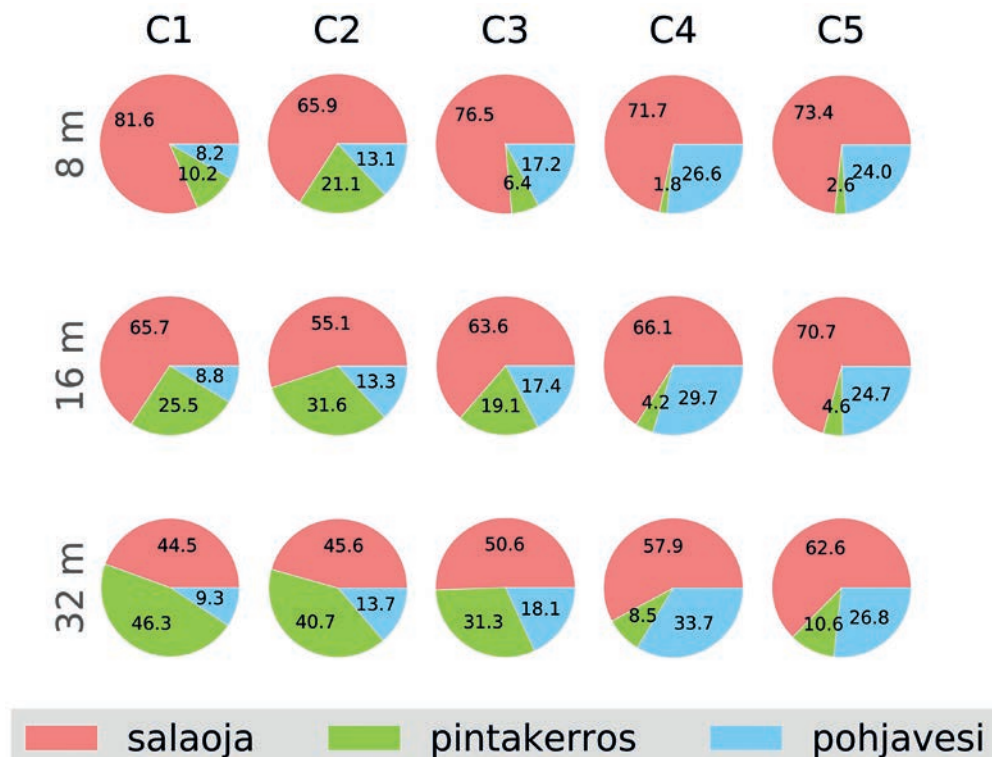


Kuva 3.43. Kolmen eri ojitusratkaisun vesitaseiden valentakomponentit yhden ja kahden huokoston malleilla sekä viidellä eri maaparametrisoinnilla perustuen koealueelta C otettujen maanäytteiden mittaustietoihin. RAND on viidestä (C1 – C5) rinnakkaisesta maanäytteestä (liite 5a) satunnaisesti määritetty maaparametrisointi. Ojitusten vesitaseiden valentakomponentit on esitetty erikseen tapauksille, joissa salaojakaivanto on mukana ojituksessa (a, b) tai ojitus on tehty ilman kaivantoa (c).

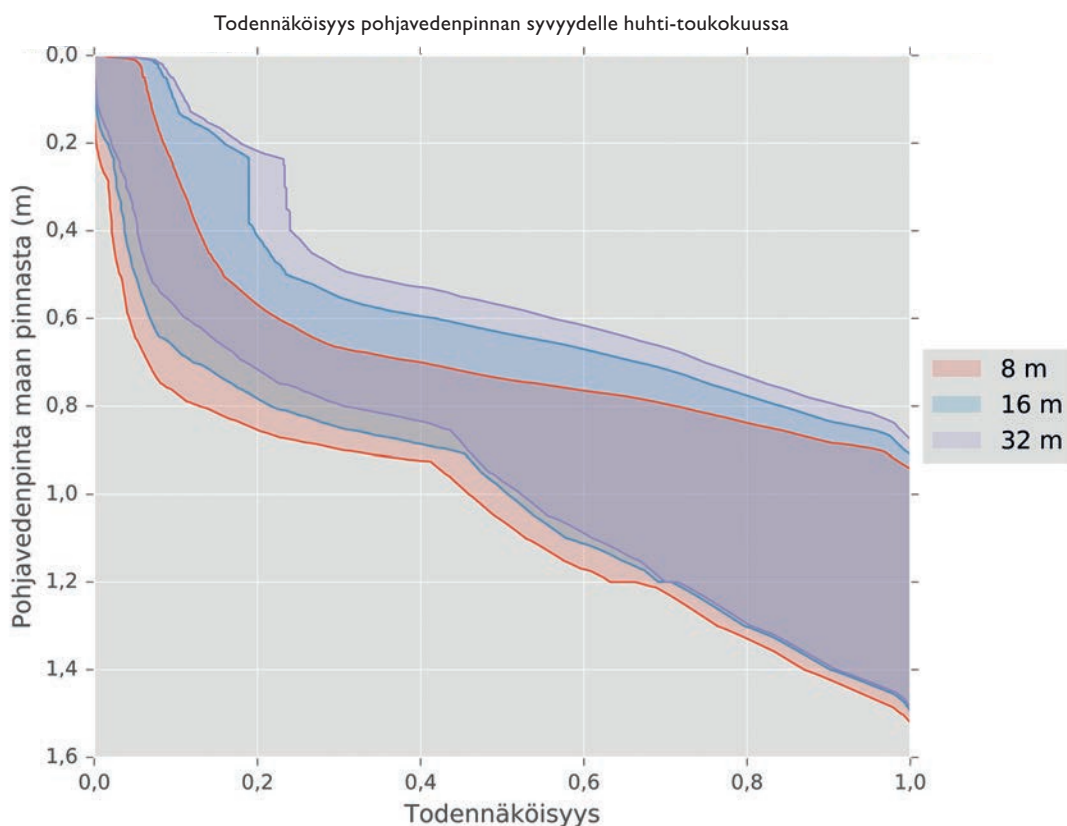
Salo ym. (2017) osoittivat, että FLUSH-malli pystyi jäljittelemään veden virtausreittejä ja kuvaamaan mitattuja salaojavaluntoja syksyllä, kun se parametrisoitiin suoraan maanäytteistä määritetyillä hydraulisilla ominaisuuksilla. Todennetulla mallikuvauksella voitiin tuottaa pitkäaikaiset simulointiaikasarjat, joita käytettiin arvioitaessa ojavälin muutoksen laskennallista vaikutusta koealueen kuivatukseen.

Kuvassa 3.44 on esitetty kolmella eri ojavälillä simuloitujen vesitaseiden valuntakomponenttien osuudet kokonaisvalunnasta ajalta 2008–2014. Tuloksista nähdään vesitaseen valuntakomponenttien muuttuminen eri ojavälien ja maan ominaisuuksien välillä. Valuntakomponenttien muutoksista ojavälien ja maaparametrisointien välillä huomataan, että ojavälin kasvattaminen pienensi salaojavalunnan osuutta, mutta maakuvauksesta riippuen siirsi valuntaa pintakerros- (esim. C1, C2, C3) tai pohjavesivaluntaan (C4 ja C5). Salaojavalunnan osuus pieneni vähiten maakuvausten C4 ja C5 tapauksissa.

Kuvassa 3.45 on esitetty mallinnettujen pohjavedenpinnan syvyyksien jakaumat huhtitoukokuussa seitsemältä vuodelta (2008–2014). Jakaumakuvaajasta nähdään eri ojavälien vaihteluvälit, jotka on saatu viiden maakuvauksen minimi- ja maksimituloksista. Pohjavedenpinnan jakauma havainnollistaa, kuinka suurella todennäköisyydellä kevään pohjavedenpinta on tietyn tason yläpuolella. Vaihteluvälin leveys kuvaa maakuvauksen vaikutusta, joka kasvaa suuremmilla ojaväleillä (16 ja 32 m).



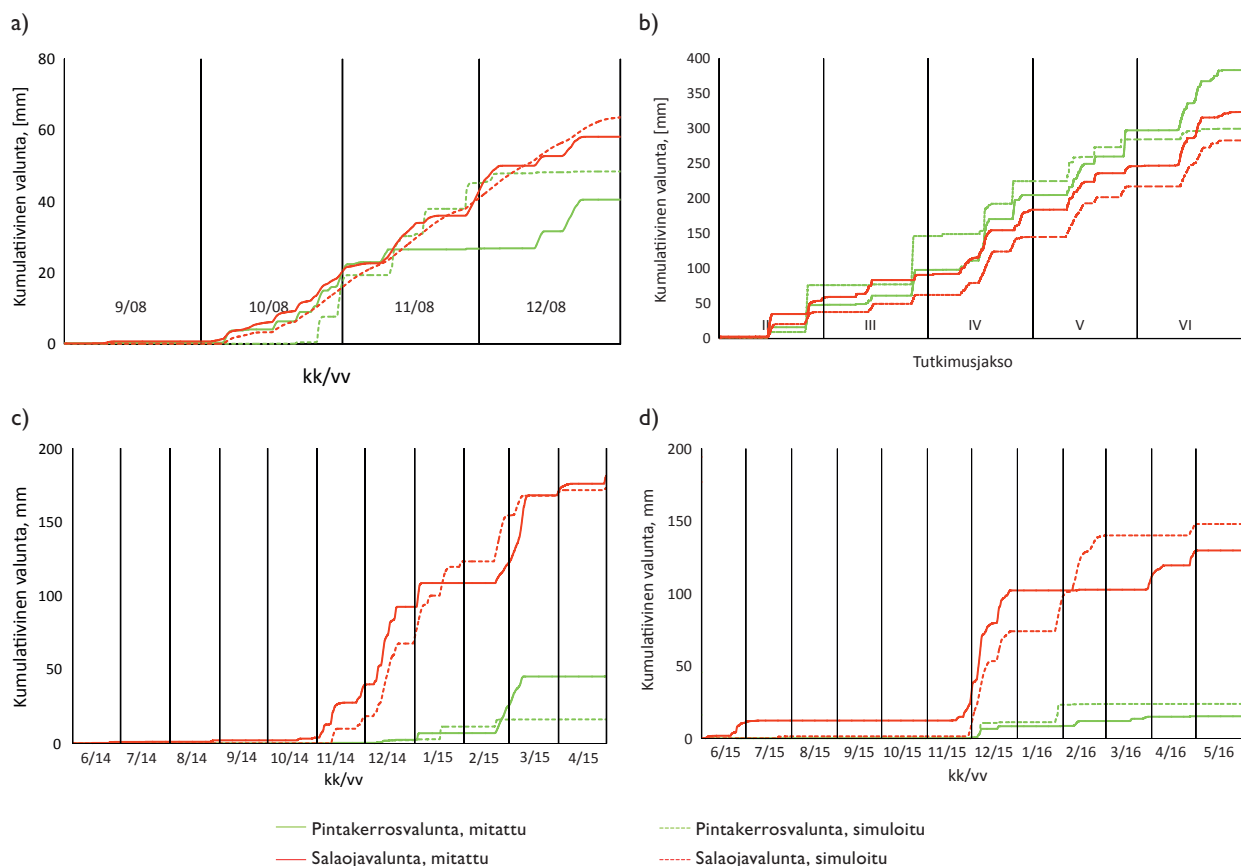
Kuva 3.44. Simuloitujen vesitaseiden valuntakomponenttien osuudet kokonaisvalunnasta kolmella ojavälillä ja viidellä maaparametrisoinnilla ajalta 2008–2014.



Kuva 3.45. Mallinnettujen pohjavedenpintojen syvyyksien (maanpinnasta) todennäköisyys keväällä (huhti-toukokuussa) kolmella ojavälillä (8, 16 ja 32 m). Jakaumien vaihteluväli kuvaa maaperäkuivauksen (C1–C5) vaikutusta pohjavedenpinnan syvyyden todennäköisyyteen.

3.4.2 Märkydestä kärsivän peltoalueen täydennysojituksen vaikutus vesitaseeseen

Mallin kalibrointi- ja validointitulokset Nummellan alueen D alkuperäiselle ojitukselle (ojaväli 32 m) ja täydennysojitukselle (ojaväli 10,7 m) on esitetty taulukossa 3.10. Taulukkoon 3.10 on laskettu hyvyysluvut (NSE) salaoja- ja pintakerrosvalunnoille käyttäen mitattuja ja mallinnettuja tunnitaisia valuntamääriä. Tasevirhe kuvaa, kuinka paljon mallinnettu valuntamäärä eroaa mitatusta valuntamäärästä (suhteellinen ero mitattuun valuntaan nähden). Alkuperäisen ojituksen ja täydennysojituksen mitatut ja simuloidut kumulatiiviset valuntamäärät on esitetty kuvassa 3.46. Kalibroitu malli kuvasi paremmin kumulatiivisia valuntamääriä kuin tunnitaisia valuntoja. Malli pystyi paremmin kuvaamaan salaojavaluntaa (NSE 0,2–0,4) kuin pintakerrosvaluntaa (NSE < 0). Pintakerrosvalunnalle lasketut suhteelliset tasevirheet olivat täydennysojituksen jälkeiselle jaksolle yli 50 % johtuen pintakerrosvalunnan pienestä kokonaismäärästä. Malli aliarvioi täydennysojituksen kalibrointijakson (30 mm) ja yliarvioi validointijakson (20 mm) pintakerrosvalunnan.



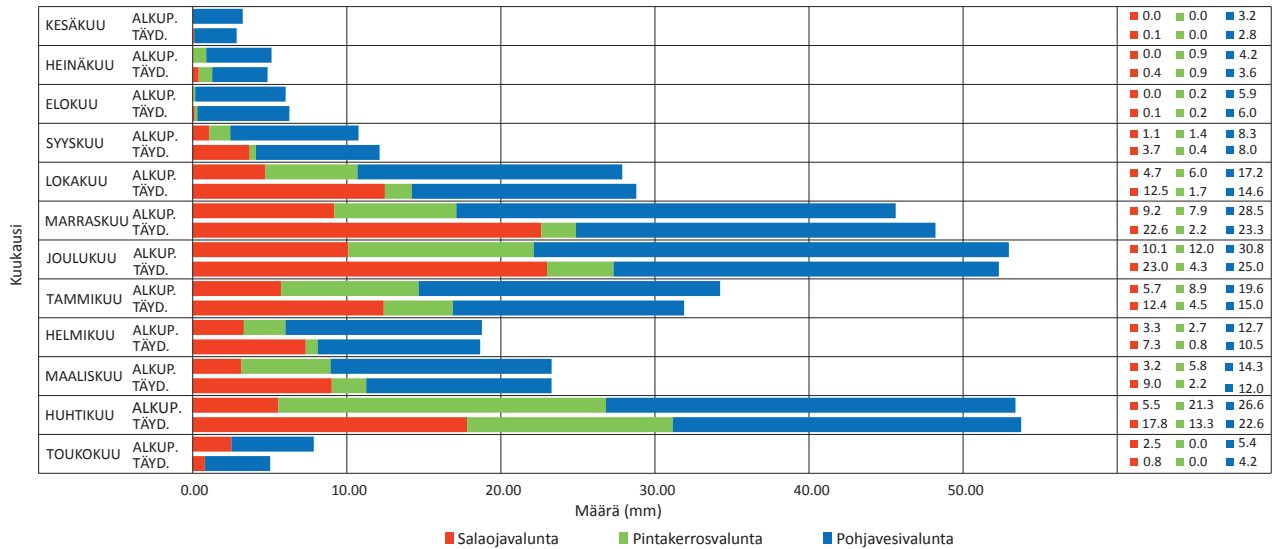
Kuva 3.46. Mitattu ja simuloitu pintakerros- ja salaojavalunta alkuperäisen ojituksen (ojaväli 32 m) kalibrointi- (a) ja validointijaksoille (b) sekä täydennysojituksen (ojaväli 10,7 m) kalibrointi- (c) ja validointijaksoille (d).

Taulukko 3.10. Hyvyyksluvut (NSE ja tasevirhe) mallin kalibroinnista ja validoinnista alkuperäiselle ojitukselle (kalibrointijakso ja validointijakso) ja täydennysojitukselle (kalibrointijakso ja validointijakso).

	Salaojavalunta	Pintakerrosvalunta
Alkuperäinen ojitus, kalibrointijakso 1.9.2008–1.1.2009	0,38 (NSE) 9,4 % (Tasevirhe)	< 0 (NSE) 19,5 % (Tasevirhe)
Alkuperäinen ojitus, validointijakso 1.6.2009–31.5.2014	0,34 (NSE) 12,6 % (Tasevirhe)	< 0 (NSE) 22,0 % (Tasevirhe)
Täydennysojitus, kalibrointijakso 1.6.2014–30.4.2015	0,26 (NSE) 4,6 % (Tasevirhe)	< 0 (NSE) 64,3 % (Tasevirhe)
Täydennysojitus, validointijakso 1.6.2015–31.5.2016	0,22 (NSE) 14,1 % (Tasevirhe)	< 0 (NSE) 56 % (Tasevirhe)

Alkuperäistä ojitusta ja täydennysojitusta kuvaavien malliparametrisointien kalibroinnin ja validoinnin jälkeen mallilla tuotettiin tiheän (ojaväli 10,7 m) ja harvan (ojaväli 32 m) ojavälin ojitusskenaariot ajalle 2008–2016 (tutkimusjaksoille I–VIII). Ojitusten vesitaseita tarkasteltiin tutkimusjaksoittain. Kuvassa 3.47 on esitetty keskiarvot kuukausittaisista valuntamääristä tutkimusjaksoilta I–VIII erikseen harvan (ALKUP.) tiheän (TÄYD.) ojavälin skenaarioille.

Kuvasta 3.47 nähdään vuoden sisäinen valuntakomponenttien (salaoja-, pintakerros- ja pohjavesivalunta) välinen vaihtelu. Harvalla ojavälillä pintakerros- ja salaojavalunnan välinen suhde oli suurimmillaan huhti- ja joulukuussa (kuva 3.47) ja tiheällä ojavälillä



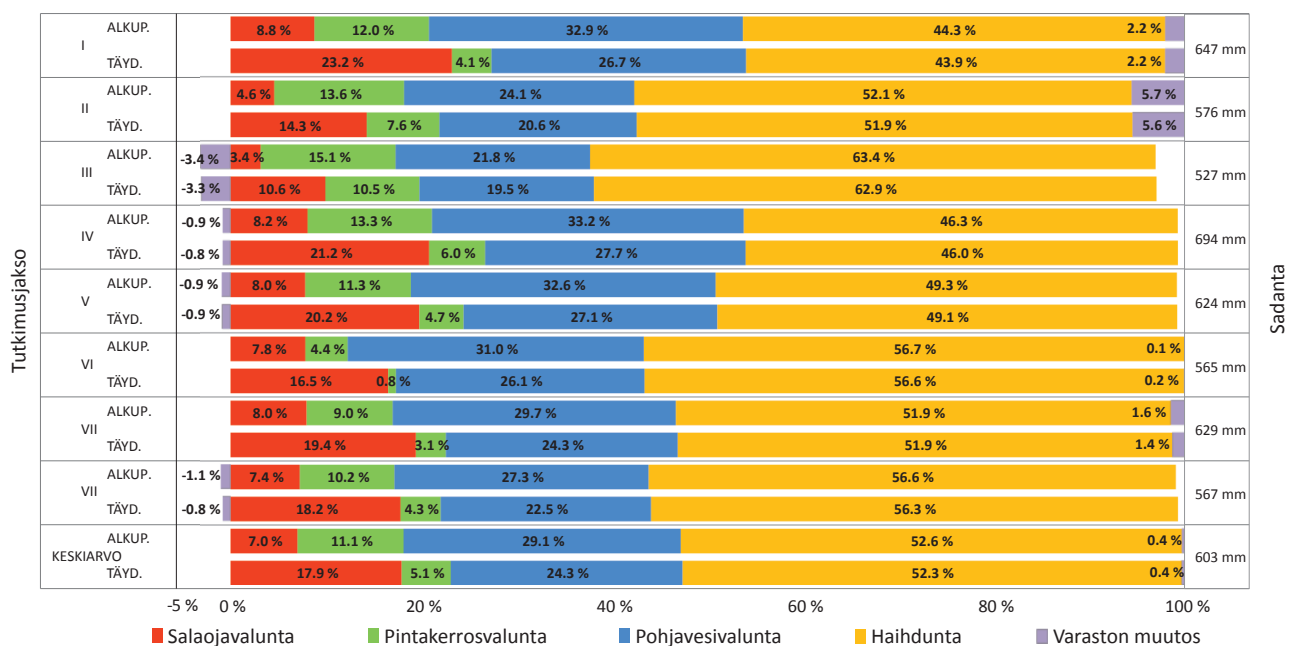
Kuva 3.47. Alkuperäisen ojituksen ja täydennysojituksen skenaarioiden simuloitujen vesitaseiden valuntakomponenttien kuukausikeskiarvot tutkimusjaksoilta I–VIII. Tutkimusjaksojen keskisadanta (korjattu arvo) oli 603 mm.

huhtikuussa. Kokonaisvalunta oli suurimmillaan marras-joulukuussa ja huhtikuussa, mutta etenkin tiheällä ojituksella pohjavesivalunta oli talvikuukausina aktiivisempaa kuin huhtikuussa, mikä vähensi pintakerrosvalunnan osuutta marras- ja joulukuussa. Simuloitu vuotuinen kokonaisvalunta oli yhtä suuri molemmissa ojituksissa (290 mm).

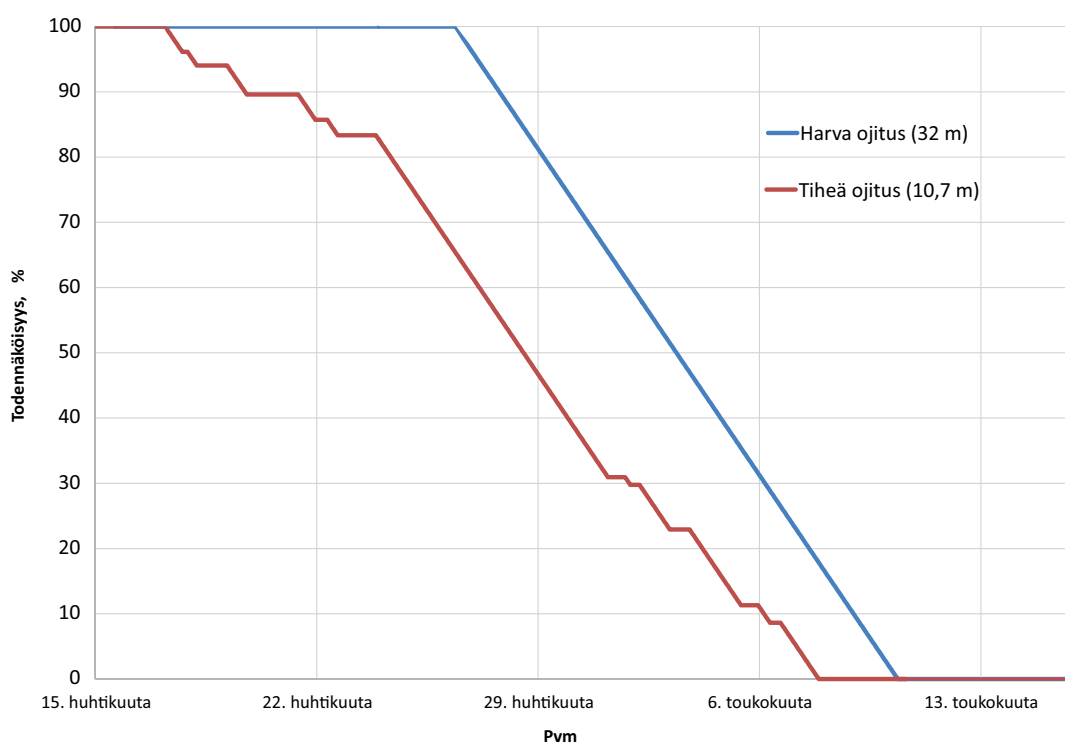
Loka-joulukuussa tiheän ojituksen salaojavalunta oli keskimäärin 2,5-kertainen harvan ojituksen salaojavaluntaan verrattuna, kun taas pintakerrosvalunnan määrä väheni lähes 70 %. Simuloitu pohjavesivalunta väheni noin 17 %. Huhtikuussa tiheämpi ojitus kasvatti salaojavalunnan määrää harvaan ojitukseen nähden 3,2-kertaiseksi, kun taas pintakerrosvalunnan määrä väheni noin 37 %. Pohjavesivalunnan määrä väheni huhtikuussa noin 15 %.

Simuloidut vuosittaiset vesitaseet komponenteittain (salaojavalunta, pintakerrosvalunta, pohjavesivalunta, haihdunta ja varaston muutos) tutkimusjaksoilta I–VIII on esitetty kuvassa 3.48. Vuositasolla simuloitu salaojavalunta kasvoi keskimäärin 2,6-kertaiseksi ojituksen muuttuessa harvasta tiheään, ja pintakerrosvalunta väheni 57 %. Simuloitu pohjavesivalunta väheni 16 %, kun siirryttiin harvasta ojituksesta tiheän ojituksen skenaarioon. Haihdunnan osuus vesitaseesta vaihteli tutkimusjaksoittain 44–63 %:n välillä ja maksimissaan 0,5 % eri ojitusten välillä. Maavesivaraston muutos vaihteli välillä -3,4–5,7 %.

Kuvassa 3.49 on esitetty simuloitujen pohjavedenpinnan syvyyksien tulokset kummallekin ojitukselle. Simuloiduista pohjavedenpinnan syvyyksistä laskettiin ajallinen osuus, jolloin pohjavedenpinnan syvyys oli 0–60 cm:n etäisyydellä maanpinnasta. Ajallinen osuus laskettiin kahden viikon liukumana huhti-toukokuulle. Tutkimusjaksojen erilaiset kevät huomioitiin tarkastelemalla pohjavedenpinnan syvyyksiä keskiarvoina kahdeksalta simuloitijaksolta. Kuvasta 3.49 nähdään, että huhti-toukokuun vaihteessa tiheän ja harvan ojituksen ero on noin 40 % ajasta, jolloin keskiarvoistettu pohjavedenpinta on alle 60 cm syvyydessä maanpinnasta. Harva ojitus saavuttaa tiheän ojituksen tason 5–7 päivää myöhemmin.



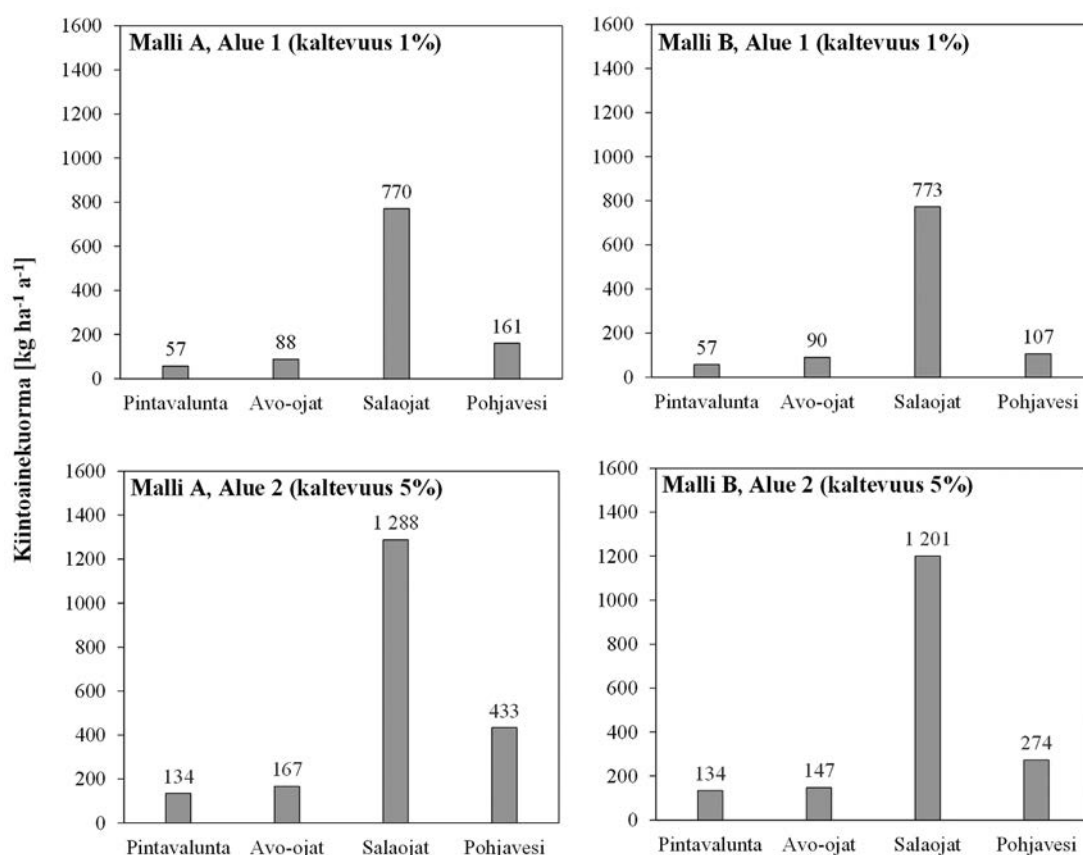
Kuva 3.48. Koealueen D simuloitu vesitaseen komponenttien (salaojavalunta, pintakerrosvalunta, pohjavesivalunta, haihdunta ja varaston muutos) osuus tutkimusjakson sadannasta harvan ja tiheän ojituksen skenaarioissa tutkimusjaksoille I–VIII sekä keskiarvona simulointijaksoista. Maavesivaraston muutos on negatiivinen nollalinjan vasemmalla puolella. Tutkimusjaksojen korjatut sadannat on esitetty kuvan oikeassa laidassa.



Kuva 3.49. Osuus (todennäköisyys) kahden (2) viikon liukumasta, jolloin pohjavedenpinta on 0,6 m yläpuolella harvan (32 m) ja tiheän (10,7 m) ojituksen skenaarioissa. Huhti-toukokuun pohjavedenpinnat on laskettu keskiarvoina kahdeksasta simulointijaksosta (tutkimusjaksot I–VIII).

3.4.3 Eroosion ja kiintoainetaseiden mallintaminen Gårdskulla Gårdin koekentällä

Simulaatiot muodostivat laskennallisen arvion Gårdskulla Gårdin koekentän kiintoainetaseista ja kuormitusreiteistä. Sekä mittaus- että mallinnustulokset osoittivat, että salaojien kautta voi tulla huomattavasti enemmän kuormaa kuin pintakerrosvalunnan kautta sekä tasaisilla että kaltevilla peltoalueilla (kuva 3.50). Laskentatulokset mallirakenteilla A ja B kuvasivat mitatut kuormituskomponentit hyvin. Sen sijaan Malli C ei pystynyt kuvaamaan kaikkia kuormituskomponentteja koealueilla. Siten simulaatioiden mukaan horisontaalinen kiintoaineen kulkeutuminen oikovirtausreittejä pitkin oli oleellinen osa kiintoainekuormien muodostumisprosessia. Laskenta osoitti, että kuormitusta voi tapahtua myös horisontaalisen pohjavesivalunnan kautta, etenkin kaltevalla peltolohkolla (kaltevuus 5 %) (kuva 3.50). Pohjavesivalunnan kautta tulevaa kuormitusta ei ole otettu aiemmin huomioon peltomittakaavan seurannoissa. Myös maaperän oikovirtausreittien kautta avo-ojiin suotautuva kiintoainekuormitus ylitti simulaatiotuloksissa pintavaluntakuormituksen kautta tulevan kuormituksen (kuva 3.50). Pinnanalaisten virtausreittien dominoidessa esimerkiksi suoja-vyöhykkeet peltojen pinnoilla eivät voi vaikuttaa tehokkaasti tutkituilta pelloilta syntyvään kokonaiskuormitukseen.



Kuva 3.50. Simuloitu kiintoainekuorma vuosina 2008–2009 eri virtausreiteistä Gårdskulla Gårdin koekentän Alueilla 1 (kaltevuus 1 %) ja 2 (kaltevuus 5 %) mallirakenteilla A ja B.

Kokonaisuudessaan kaltevalta alueelta muodostui enemmän kuormaa kuin tasaiselta peltoalueelta (kuva 3.50). Lisäksi simulaatioiden mukaan suuri osa (48–69 %) erodoituneesta kiintoaineesta ei muodostanut kuormaa peltoalueilla maaperään suodattumisen ja pellon pinnalle laskeutumisen vuoksi. Malliteknisesti tulokset osoittivat, että rakenteelliset epävarmuudet eroosio- ja kiintoaineen kulkeutumismalleissa voivat aiheuttaa simulaatioihin enemmän epävarmuutta kuin parametriset epävarmuudet. Simulaatiot demonstroivat, että parametrien epävarmuusanalyysi ei paljasta epävarmuuksia liittyen mallien rakenteisiin. Tulokset osoittivat, että kattavampi käsitys eroosio- ja kiintoainetaseen komponenteista vaatisi kuormien ja pitoisuuksien mittausten lisäksi pellon sisäisiä mittauksia eroosiosta ja kiintoaineen kulkeutumisesta.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

TOSKA-hankkeen ja sitä edeltävien hankkeiden (PVO, PVO2) pitkäaikaisten mittaustulosten ja matemaattisen mallinnuksen avulla on lisätty tietoa suomalaisten savipeltojen vesitaloudesta, salaojituksesta, ravinnehuuhtoutumista ja eroosiosta sekä sadoista. Uutta ja erittäin tarpeellista tietoa on saatu muun muassa eri ojavälien, salaojakonetyyppien, kaivantojen ja ympärysaineiden toimivuudesta.

Hankkeen kokeellinen osuus oli laaja. Yhdeksän vuoden intensiiviset mittaukset Nummelan koekentällä Jokioisissa mahdollistivat syvällisen analyysin pellon vesi- ja ravinnetaloudesta. Pohjois-Pohjanmaalla Sievin koekentällä tehdyt mittaukset 1,5 vuoden ajalta osoittivat, että eri salaojakonetyypeillä pystytään tekemään yhtä hyvin toimivia ojituksia, kun ne tehdään huolellisesti suositusten mukaan. Kenttäselvitykset 30 peltoalueella antoivat monipuolista tietoa salaojien ympärysaineista ja kaivannon merkityksestä.

Aalto-yliopistossa kehitetyllä FLUSH-mallilla simuloitiin Nummelan koealueilla erilaisten ojitusten lyhyt- ja pitkäaikaisia vaikutuksia pellolla tapahtuvaan valuntaan (salaoja-, pintakerros- ja pohjavesivalunta) sekä pohjavedenpinnan syvyyteen. Mallin on todettu toimivan hyvin suomalaisilla savipelloilla. Se soveltuu hyvin ojitusten vaikutusten arviointiin ja salaojitusten suunnitteluperusteiden laadintaan. Koekenttien mittausaineistoa on käytetty FLUSH-mallin kehittämisessä.

Mallilla saatiin esille maaperän ominaisuuksien (makrohuokokset ja hydrauliset ominaisuudet), ojavälin ja kaivannon vaikutukset valuntakomponentteihin ja pohjavedenpinnan syvyyteen. Mallilla pystyttiin tuottamaan pohjavedenpinnan todennäköisiä syvyyksiä pellon viljelylle kriittisinä aikoina. Käytännössä tätä voidaan hyödyntää salaojituksen kuivatustehokkuuden (ojaväli, ojasyvyys, kaivannon täytön tarve) valinnassa.

Ojavälin vaikutukset

Nummelan koekentän mittaukset osoittivat, että ojaväli vaikuttaa pintakerros-, salaoja- ja pohjavesivaluntojen suhteisiin. Täydennysojitus muuttaa valuntasuhteita siten että salaojavalunta lisääntyy, jolloin pintakerros- ja pohjavesivalunnan osuus vähenee. Nummelan savipellolla täydennysojitukset lisäsivät vuotuista salaojavaluntaa keskimäärin 1,7-kertaiseksi (16 m / 8 m) ja 2,6-kertaiseksi (32 m → 10,7 m). Harvan (32 m) ojavälin täydennysojitus puolitti pintakerrosvalunnan. Mallisimulaatioiden mukaan pohjavesivalunta väheni vastaavasti vajaan viidesosan. Täydennysojitus paransi pellon kuivatustilaa selvästi, erityisesti märkyydestä kärsineellä harvan ojavälin (32 m) alueella. Pohjavedenpinta laski keväällä peltotöiden vaatimaan syvyyteen noin viikon nopeammin kuin aikaisemmin.

Mallinnustulosten mukaan maan ominaisuuksilla, kuten hydraulisella johtavuudella ja makrohuokoston määrällä, oli ojitusmenetelmää (kaivanto ja ojaväli) suurempi vaikutus syksyn kokonaisvalunnan jakaantumiseen eri komponentteihin (salaoja-, pintakerros- ja pohjavesivalunta). Pohjavedenpinnan tasoon ojien välissä vaikutti enemmän ojaväli kuin maan ominaisuudet.

Ojaväleillä 32 ja 16 m maan ominaisuudet aiheuttivat enemmän vaihtelua pohjavedenpinnan syvyyden jakaumaan keväällä (huhti-toukokuussa) kuin tiheällä ojituksella (8 m), jolla maan ominaisuuksien aiheuttama vaihtelu oli selvästi pienempää.

Täydennysojituksen vaikutus valuntavesien ravinne- ja kiintoainepitoisuuksiin oli vähäinen. Kokonaistyyppipitoisuuden lyhytaikaista (1–2 vuotta) nousua lukuun ottamatta täydennysojitus ei lisännyt salaojaveden pitoisuuksia. Täydennysojitus lisäsi salaojavalunnan mukana tulleita ravinne- ja kiintoainehuuhtoumia ja vähensi pintakerrosvalunnan mukana tullutta kuormaa, niiden yhteenlaskettu huuhtouma lisääntyi. Pellon kokonaiskuormaa arvioitaessa tulisi huomioida pohjavesivalunnan sisältämä kuorma. Nummelan koekentän mallinnustuloksista huomattiin, että pohjavesivalunta muodostaa merkittävän osan kokonaisvalunnasta.

Nummelan koealueiden sadot olivat suhteellisen matalia. Heikko satotaso johtunee huonosta viljavuudesta, erityisesti märkyydestä kärsineellä harvan (32 m) ojavälin alueella. Ojavälin tihentäminen ei näkynyt sadon määrässä tai laadussa, kun kylvöaika oli sama kaikilla koealueilla. Kolmen vuoden mittausjakson sadot olivat keskimäärin hieman paremmat salaojien kohdalla kuin ojien välissä.

Suosituks

- Heikkotuottoisen pellon vesitalous ja muut tuottokykyyn vaikuttavat tekijät tulee selvittää ennen ojituspäätöstä.
- Nykyisten suositusten mukainen 10–14 metrin ojaväli savimaille on mittaustulosten pohjalta sopiva.
- Liian tiheää ojaväliä tulee välttää, koska se lisää kustannuksia ja saattaa lisätä ravinnehuuhtoumia salaojien kautta lisääntyneen salaojavalunnan myötä.
- Jos pellon viljavuus on huono, kannattaa ojitusten yhteydessä tehdä myös viljavuutta parantavia toimenpiteitä, sillä kuivatustilan parantaminen salaojituksella ei yksin riitä satotason parantamiseksi.
- Maan rakenteen parantamiseksi tarvitaan ojituksen lisäksi muita toimenpiteitä (kuten syväjuuriset kasvit kasvinvuorotuksessa).
- On kehitettävä toimenpiteitä salaojien kautta tulevan kuormituksen vähentämiseksi.

Salaojakonetypin ja kaivannon merkitys

Sievin koekentän hietahiemaassa ojitukset toteutettiin kaivavalla salaojakoneella ja aurakoneella. Kaivantojen leveys ja syvyys sekä täyttömateriaali vastasivat toisiaan molemmissa menetelmissä. Puolentoista vuoden mittauksen mukaan kaivavalla salaojakoneella tehty salaojitus kuivatti pellon hieman aurakoneella tehtyä tehokkaammin. Aurakoneella tehdyissä salaojituksissa pohjaveden pinta oli keskimäärin 6–13 cm korkeammalla ja salaojavalunta oli 10 % pienempi. Ero ei näyttäisi olevan merkittävä kahden vuoden mittauksen perusteella, sillä pohjavedenpinnan syvyyksissä esiintyi eroja myös rinnakkaisten koealueiden välillä. Erityyppisten salaojakoneiden ojitukset eivät aiheuttaneet eroja sadoissa tai pellon viljeltävyydessä.

Esille kaivetut kaivannot eri pelloilla (30 peltoa, 94 kaivantoa) antoivat viitteitä siitä, että juoksevilla ja huonosti läpäisevillä mailla salaojakaivannon vedenläpäisevyys on huono, mikäli kaivantoa ei ole täytetty läpäisevällä materiaalilla. Tämä korostuu erityisesti aurakoneella, jolla salaojakaivantoa ei kaiveta auki eikä huonosti läpäisevää maata poisteta kaivannosta. Salaojakaivannon täyttö läpäisevällä materiaalilla on koneen varustuksesta riippuen mahdollista molemmilla menetelmillä. Ojitus määrässä maassa saattaa aiheuttaa maan tiivistymistä ja salaojakaivannon sortumista sekä vaikeuttaa putkien asennusta. Aurasalaojakoneella päästään salaojittamaan ja tekemään salaojakaivanto hyvinkin määrässä maassa, mitä ei tule tehdä ojituksen epäonnistumisen riskin välttämiseksi.

Suositukset

- Salaojakonetyyppiin ja sen varustukseen (mm. ruokamullan pudotin) tulee kiinnittää huomiota, sillä se vaikuttaa salaojakaivannon muodostumiseen
- Salaojakaivannon hyvä vedenläpäisy tulee varmistaa erityisesti ojitettaessa tiiviillä maalla, jossa on kehittymätön rakenne
- Työn aikana tulee huolehtia siitä, ettei kaivanto mene heti umpeen erityisesti koheesiottomilla mailla, kuten siltillä, jotka liikkuvat herkästi veden mukana
- Määrän maan ojittamista tulee välttää (houkutus erityisesti aurakoneella ojitettaessa)

Ojitus eri ympärysaineilla

Eri ympärysaineilla (Fibrella-suodatinkangas, kookoskuitu, sora) tehtyjen ja eri-ikäisten ojituskohteiden esille kaivu osoitti, että tutkitut esipäällysteet saattavat olosuhteista riippuen hajota nopeasti, suodatinkangas jopa parissa vuodessa.

Maa-aineksen kertymistä salaojiin esiintyi kaikilla ympärysaineilla, myös soran ympäröimissä putkissa. Tietyillä maalajeilla tehokkaasti vettä johtava salaojakaivanto lisäsi maa-aineksen kertymistä salaojaputkiin. Kertymistä ei välttämättä estä edes hyvälaatuinen ympärysaine.

Suositukset

- Rakeisuuskäyrien alue kuvaa niitä maalajeja, joilla salaojien suodatintarve on suuri. Tämän tutkimuksen mukaan tämän alueen tulisi ulottua nykyisiä suosituksia hienojakoisimmille maille.
- Nopeasti hajoavan ympärysaineen käyttöä tulee välttää.
- Ongelmallisilla maalajeilla putken tukkeutumisen estämiseksi tulee selvittää uusien esipäällysteiden, kuten geotekstiilien soveltuvuutta salaojitukseen.

Jatkotutkimustarpeita

Toimivan salaojituksen toteuttaminen, pellon tuottokyvyn parantaminen ja ympäristökuormituksen vähentäminen riippuvat useista tekijöistä. Tämä tutkimus osoitti, että osa näistä tekijöistä tunnetaan huonosti ja niistä tarvitaan kattavampaa tietoa sekä uusia ratkaisuja. Lisätutkimusta tarvitaan:

- peltomaan kuivatuksen vaikutuksesta sadontuottokykyyn
- kosteuden vaikutuksesta maan rakenteeseen, kantavuuteen ja tiivistymisriskiin
- pellon tuottokyvyn parantamisesta muilla toimenpiteillä ojituksen lisäksi
- keinoista salaojien kautta tulevan kuormituksen vähentämiseksi muun muassa säätösalaajitusta ja uusia menetelmiä kehittämällä
- pohjavesivalunnasta ja sen mukana tulevasta ainekuormituksesta maatalousalueilla
- ympärysaineiden toiminnasta ja uusista esipäälysteistä
- ympärysaineiden laatuvaatimuksista eri maalajeilla
- eri tavoin (konetyyppi, täyttömateriaali ym.) tehtyjen salaojakaivantojen toimivuudesta eri maalajeilla
- FLUSH-mallin käytöstä pellon vesi- ja ravinnetalouden kuvauksessa eri maalajeilla sekä suunnittelun apuvälineenä

Kirjallisuusviitteet

- Allaire, S.E., Roulier, S., Cessna, A.J. 2009. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology* 378, 179–204.
- Anon. Virallisten lajikekokeiden suoritusohjeet. [http://www.mtt.fi /lajikekokeet](http://www.mtt.fi/lajikekokeet) >lajikekokeiden suorittaminen > suoritusohjeet
- Cavelaars, J. C., Vlotman, W. F. & Spoor, G. 1994. *Subsurface Drainage Systems*. Teoksessa: Ritzema H.P. 2006. *Drainage Principles and Applications*. 2006. 3. painos. ILRI Publications 16: s. 827–929.
- Eggelsman, R. 1979. Comparisons between trenchless and trenching subdrainage. ILRI Publications 25: s. 536-542.
- Feddes, R.A. 1971. Water, heat and crop growth. Thesis for the State Agricultural University, Wageningen, 71-12, 184 s.
- Häggblom, O. 2017. Impacts of improved subdrainage on the water balance of poorly drained clayey agricultural field. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 69 + 2 s.
- Kanwar, R.S., Colvin, T.S. & Melvin, S.W. 1986. Comparison of trenchless drain plow and trench methods of drain installations. *Transactions of the ASAE* 29(2): 456-461
- Koivusalo, H., Turunen, M., Salo, H., Haahti, K., Nousiainen, R., Warsta, L. 2015. FLUSH: 3D hydrological model for agricultural water management in high latitude areas. In: 20th International Northern Research Basins Symposium and Workshop, Kuusamo 16-21 Aug 2015, Finland: 14-23. (<http://www.syke.fi/download/noname/%7B8AE2852A-3B60-409A-BE52-574AB5085767%7D/111231>)
- Koivusalo, H., Turunen, M., Salo, H., Haahti, K., Nousiainen, R., Warsta, L. 2017. Analysis of water balance and runoff generation in high latitude agricultural fields during mild and cold winters. *Hydrology Research*, Vol 46, Issue 3, verkkojulkaisu [viitattu 12.6.2017] DOI: 10.2166/nh.2017.056.
- Mirjat, M. S., Kanwar, R. S. 1992. Evaluation of Subsurface Drain Installation Methods Using Water Table and Drain Outflow Data. *Transactions of the ASAE* 35(5): 1483-1488.
- Mirjat, M. S., Kanwar, R. S. 1994. A Comparison of two saturated hydraulic conductivity measuring techniques in relation to drain installation methods. *Applied Engineering in Agriculture* 10(1): s. 65-68.
- Naarding, W.H. 1979. Trenching and trenchless drainage. ILRI Publications 25: s. 543-555.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 282–290.
- Nousiainen, R., Warsta, L., Turunen, M., Huitu, H. Koivusalo, H., Pesonen, L. 2015. Analyzing subsurface drain network performance in an agricultural monitoring site with a three-dimensional hydrological model. *J. Hydrol.*, 529, 82–93.
- Olesen, S. E. 1979. Trenchless drainage experiments in Denmark. In: *Proceedings of the International Drainage Workshop*. I.L.R.I. Publications 25: s. 527-535.
- Olkinuora, P., Esala, J. 1982. Aurasalaojituksen käyttömahdollisuudet. Utilization of trenchless drainage. Tutkimuslaskelma No 29. Valtion maatalouskoneiden tutkimuslaitos, Vakola, Vihti. 28 s.
- Paasonen-Kivekäs, M., Vakkilainen, P., Karvonen, T. 2008. Salaojitus ja savipeltojen ravinnekuormitus. *Vesitalous* 4: 20-23.

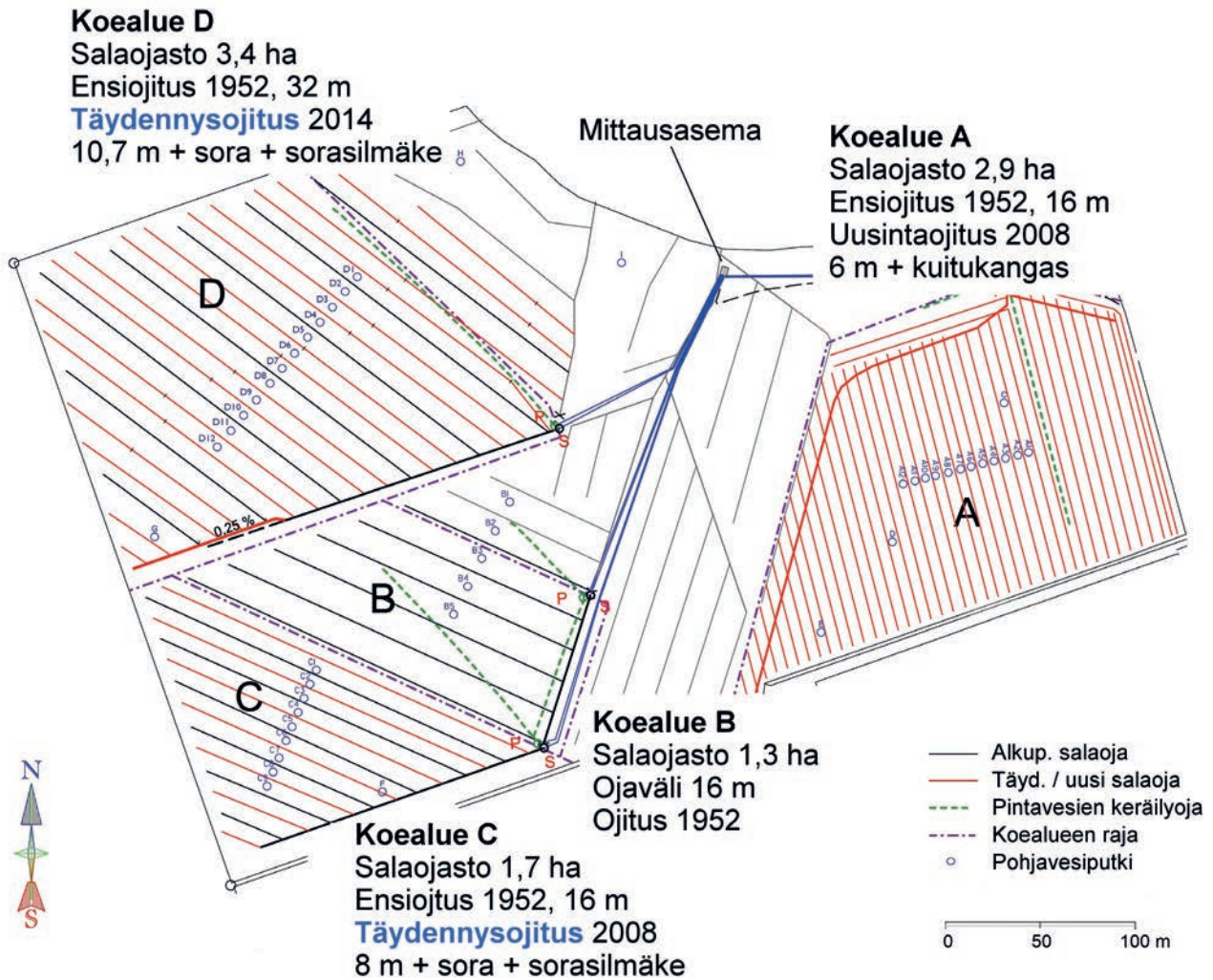
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiaho, J., Linjama, J. 2007. Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland. *Soil and Tillage Research* 93: 44-55.
- Rycroft, D. W., Smedema, L. K. 1983. *Land drainage: Planning and design of agricultural systems*. 376 s.
- Ritzema, H. P. 1994. *Subsurface Flow to Drains*. Teoksessa: Ritzema H.P. 2006. *Drainage Principles and Applications*. 2006. 3. painos. ILRI. Publications 16: s. 263–303.
- Salo, H. 2014. Aineiden kulkeutumismallin kehittäminen ja soveltaminen typen prosessien kuvaamiseen peltomittakaavassa. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 80 + 5 s.
- Salo, H., Warsta, L., Turunen, M., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J. and Koivusalo, H. 2015. Development and application of a solute transport model to describe field-scale nitrogen processes during autumn rains. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(sup1), s.30-43.
- Salo, H., Warsta, L., Turunen, M., Nurminen, J., Myllys, M., Paasonen-Kivekäs, M., Alakukku, L. and Koivusalo, H. 2017. Simulating 3-D water flow in subsurface drain trenches and surrounding soils in a clayey field. *Soil & Tillage Research*, 168, s.20-32.
- SGY. 1985. *Geotekniset laboratorio-ohjeet, 1. Luokituskokeet*. Espoo, Suomengeoteknillinen yhdistys ry, Rakentajain Kustantamo Oy. 107 s.
- Sikkilä, M. 2014. Esipäällysteen toimivuus salaojituksessa. Maatalouden ympäristoteknologian pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, maataloustieteiden laitos. 76 s.
- Tattari, S., Puustinen, M., Koskiaho, J., Roman, E., Riihimäki, J. 2015. Vesistöjen ravinnekuormituksen lähteet ja vähentämismahdollisuudet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 33/2015. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. www.syke.fi/julkaisut. 72 s.
- Tattari, S., Koskiaho, J., Kosunen, M., Lepistö, A., Linjama, J., Puustinen, M. 2017. Nutrient loads from agricultural land and forest areas in Finland from 1981 up to 2010 – can the efficiency of undertaken water protection measures seen? *Environmental Monitoring Assessment*, verkkojulkaisu [viitattu 12.6.2017] DOI 10.1007/s10661-017-5791-z. 25 s.
- Tovey, R. 1964. Alfalfa growth as influenced by static and fluctuating water tables. *Transactions of the ASAE* 7: 310-312.
- Turtola, E., Paajanen, A. 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management*, 28, s. 295-310.
- Turtola, E. 2000. Ojitus, muokkaus ja lannoitus ratkaisevia fosforikuormitukselle. *Salaojakeskus ry:n jäsenjulkaisu* 1/2000. s. 14-21.
- Turtola, E., Alakukku, L., Uusitalo, R. 2007. Surface runoff, subsurface drainflow and soil erosion as affected by tillage in a clayey Finnish soil. *Agricultural and Food Science* 16, 332–351.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Myllys, M., Alakukku, L., Äijö, H., Puustinen, M., ja Koivusalo, H. 2013. Modeling water balance and effects of different subsurface drainage methods on water outflow components in a clayey agricultural field in boreal conditions. *Agricultural Water Management*, 121, s. 135-148.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Koivusalo, H. 2015 a. Simulating water balance and evaporation in a subsurface drained clayey agricultural field in high latitude conditions. *Acta Agric. Scand. B*. 65:44-57.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Alakukku, L., Myllys, M., Koivusalo, H. 2015 b. Effects of terrain slope on long-term and seasonal water balances in clayey, subsurface drained agricultural fields in high latitude conditions. *Agricultural Water Management* 150, 139–151.

- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, Koivusalo, H., 2017. Computational assessment of sediment balance and suspended sediment transport pathways in subsurface drained clayey soils. *Soil Till. Res.* 174:58–69.
- Vakkilainen, P., Suortti-Suominen, T. 1982. Pitkälle koneellistetun salaojituksen käyttömahdollisuudet ja kannattavuus. Esitutkimus. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry. 55 s.
- Vakkilainen, P., Alakukku, L., Myllys, M., Nurminen, J., Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Puustinen, M., Äijö, H. 2010. Pellon vesitalouden optimointi. Loppuraportti 2010. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 30. 114 s.
- Vittetoe, G. C, B. J. Garner. 1978. Field evaluations of groundwater control by trench and trenchless methods of installed drains. Lower Rio Grande Valley of Texas. ASAE Paper No. s. 78-204.
- Warsta, L. 2011. Modelling Water Flow and Soil Erosion in Clayey, Subsurface Drained Agricultural Fields. Doctoral dissertation. Aalto University. Department of Civil and Environmental Engineering. 209 s. <http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526042893/>
- Warsta, L., Karvonen, T., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., ja Taskinen, A. 2013 a. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. *J. Hydrol.*, 476, s. 395–409.
- Warsta, L., Taskinen, A., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M. ja Karvonen, T. 2013 b. Modelling soil erosion in a clayey, subsurface-drained agricultural field with a three-dimensional FLUSH model, *J. Hydrol.*, 498, s. 132-143.
- Warsta L, Taskinen A, Paasonen-Kivekäs M, Karvonen T, Koivusalo H. 2014. Spatially distributed simulation of water balance and sediment transport in an agricultural field. *Soil Till. Res.* 143:26–37.
- Wesseling, J. 1974. Crop growth and wet soils. Teoksessa: J. van Schilfgaarde, *Drainage for agriculture. Agronomy 17*, American Society of Agronomy, Madison, s. 7-38.
- Williamson, R. E., J. R. Carrekar 1970. Effect of water table levels on evapotranspiration and crop yield. *Transactions of the ASAE* 13: s. 168-170.
- Zijlstra, G. 1987: Drainage machines. In: *Proceedings, Symposium 25th International Course on Land Drainage. Twenty five Years of Drainage Experience.* J. Vos (ed.). Publ. 42, ILRI, Wageningen, The Netherlands, s. 74-81.
- Äijö, H., Myllys, M., Nurminen, J., Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Korpelainen, E., Salo, H., Sikkilä, M., Alakukku, L., Koivusalo, H., Puustinen, M. 2014. Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi. Loppuraportti 2014. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 31. 126 s.

Liitteet

- Liite 1** Nummelan koekentän kartta
- Liite 2a** Nummelan koekentän viljelytiedot vuosilta 2007–2013
- Liite 2b** Nummelan koekentän viljelytiedot vuosilta 2014–2016
- Liite 3** Sievin koekentän maan rakeisuudet ja maalajit
- Liite 4** Sievin koekentän viljelytoimenpiteet
- Liite 5a** Nummelan koekentän alueen C maanäytteiden ominaisuuksia viidestä rinnakkaisnäytteestä (C1–C5)
- Liite 5b** Nummelan koekentän alueen C mitatut maan kosteudet 0,1 m:n, 1,0 m:n ja 150 m:n imuilla
- Liite 6** Nummelan koekentän alueen D mitatut vedenpidätysominaisuudet eri syvyydeltä sekä niihin sovitettut vedenpidätyskäyrät.
- Liite 7** Nummelan koekentän routa- ja lumimittaukset sekä kasvukauden sadanta 2007–2016
- Liite 8a** Nummelan koealueiden pohjavedenpinnan syvyydet 08/2007–12/2010
- Liite 8b** Nummelan koealueiden pohjavedenpinnan syvyydet 01/2011–12/2013
- Liite 9a** Nummelan koealueiden pintamaan kosteudet 08/2007–11/2010
- Liite 9b** Nummelan koealueiden pintamaan kosteudet 05/2011–11/2013
- Liite 10** Nummelan koealueiden kumulatiiviset salaoja- ja pintakerrosvalunnat, 06/2007–05/2016
- Liite 11** Nummelan koealueiden sadon määrä ja laatu 2008–2016
- Liite 12** Sievin koekentän pohjavesimittausten tulokset
- Liite 13** Ympärysainetutkimus, tutkimuskohteiden maanäytteiden maalajit (rakeisuusmäärittäminen)

Liite I. Nummelan koekentän kartta.



Liite 2a. Nummelan koekentän viljelytiedot vuosilta 2007–2013.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Kevätmuokaus	10.-11.5.2007 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	9.-10.5.2008 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	27.5.2009 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	4-5.6.2010 joustopiikkiäkeellä (Potila Magnum)	Joustopiikkiäkeellä 2x (Potila Magnum) (26.5. tai 27.5.)	joustopiikkiäes juuri ennen kylvää	Muokaus Catross+ Potila Magnum 2 x 28.-29.5.2013
Kevätkylvö	Roope-kaura 150 kg/ha 11.5.2007	Roope-kaura 170 kg/ha 10.5.2008	Eerik-ohra 248 kg/ha 28.5.2009	Kaura Roope I 60 kg/ha 5.6.2010	Ohra Annabell 234 kg/ha 27.5.2011	Kaura Roope 146 kg/ha 30.5.2012	Ohra Wolmari 190 kg/ha 28-29.5
Kylvölannoitus	Suomen salpietari 150 kg/ha	Suomen salpietari 100 kg/ha	Suomen salpietari 350 kg/ha	Urea 174 kg/ha = 80 kg N	Suomen salpietari 350 kg/ha (N 27 %)	Can27 300 kg/ha (N 27 %)	Can27 300 kg/ha
Lannanlevitys keväällä	liete 72l m3/koko kenttä, 10.5.2007	liete 72l m3/koko kenttä, 9.5.2008	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä	Lietettä 40 m3/ha 27-28.5.
Torjunta-ainekäsittely	MCPA 11.6.2007	MCPA 26.6.2008	MCPA 0.58 l/ha ja Ally classic 13,7 g/ha 29.6.2009.	6.7.2010 MCPA II/ha	Arianne S 27.6., glyfosaatilla pesäkekäsittely 27.9.2011	MCPA II/ha 2.7.2012	MCPA II/ha 24.6.2013
Puinti	7.-8.9.2007	24.9.2008 (satonäytteet 18.9.2008)	11.9.2009 (satonäytteet myös 11.9.2009)	7.9.2010 (satonäytteet myös 7.9.2010)	17.9.2011 (satonäytteet 29.8.2011)	12.10.2012	14.9.2013
Syysmuokaus	kultivointi 22.-24.10.2007	lautasmuokaus 26.9.2008	kultivointi 5.10.2009	Lautasmuokattu Amazonella 2.11.2010	kultivointi	ei tehty märkyyden takia	Kevytmuokaus 27.9.
Lannanlevitys syksyllä	liete 430 m3/koko kenttä, 16-22.10.2007	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä

Liite 2b. Nummelan koekentän viljelytiedot vuosilta 2014–2016.

	2014	2015	2016
Kevätmuokkaus	Potila Magnum (joustopiikkiäes) 2 x 4-5.6.2014	joustopiikkiäes juuri ennen kylvöä	äestys 19.5.2016
Kevätkylvö	Ohra Aukusti 5.6 189 kg/ha	Kaura Vivian 190 kg/ha 28.5.2015	Mallasohra Trekker 260 kg/ha 19.5.2016
Kylvölannoitus	Can27 +Mg 290 kg/ha	Can27 300 kg/ha	Belor Premium Typpi 27 (27-0-0) 300 kg/ha
Lannanlevitys keväällä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä
Torjunta-ainekäsittely	Mcpa II/ha 7.7 4.9 glyfosaatti pesäkekäsittely	Ariane S 4.7.2015	Tooler 50 g 15.6.2016; glyfosaatti 6.-14.9.2016
Puinti	4.9.2014	8.10.2015	1.9.2016
Syysmuokkaus	kultivointi 19.9.2014	11.11.2015 Kultivointi	21.9.2016 kultivointi
Lannanlevitys syksyllä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä

Liite 3. Sievin koekentän maan rakeisuudet ja maalajit.

Näytepiste	Lajiteosuus %							Sr	Maalaji
	Sa	HHs	KHs	HHt	KHt	HHk	KHk		
1	12	3	16	27	0	0	0	0	KHt
2	15	5	19	26	34	1	0	0	sKHt
3	18	6	23	22	27	4	0	0	sKHt
4	13	6	10	19	50	2	0	0	Kht
5	16	7	23	22	32	0	0	0	sKHt
6	19	10	31	23	16	1	0	0	sHe
7	20	13	28	23	14	2	0	0	sHe
8	21	11	31	25	10	1	1	0	sHe
9	19	11	33	25	11	1	0	0	sHe
10	26	17	32	15	5	0	5	0	sHe
11	25	14	31	14	10	5	1	0	sHe
12	25	11	32	17	13	2	0	0	sHe
13	26	18	30	19	5	2	0	0	sHe
14	22	12	30	22	10	3	1	0	sHe
15	10	18	29	22	19	2	0	0	sHe
16	9	9	15	24	42	1	0	0	KHt
17	10	2	8	10	68	2	0	0	KHt
18	9	9	21	21	40	0	0	0	KHt
19	5	4	4	8	67	12	0	0	KHt
20	21	7	36	25	10	1	0	0	sHe
21	23	10	37	20	10	0	0	0	sHe

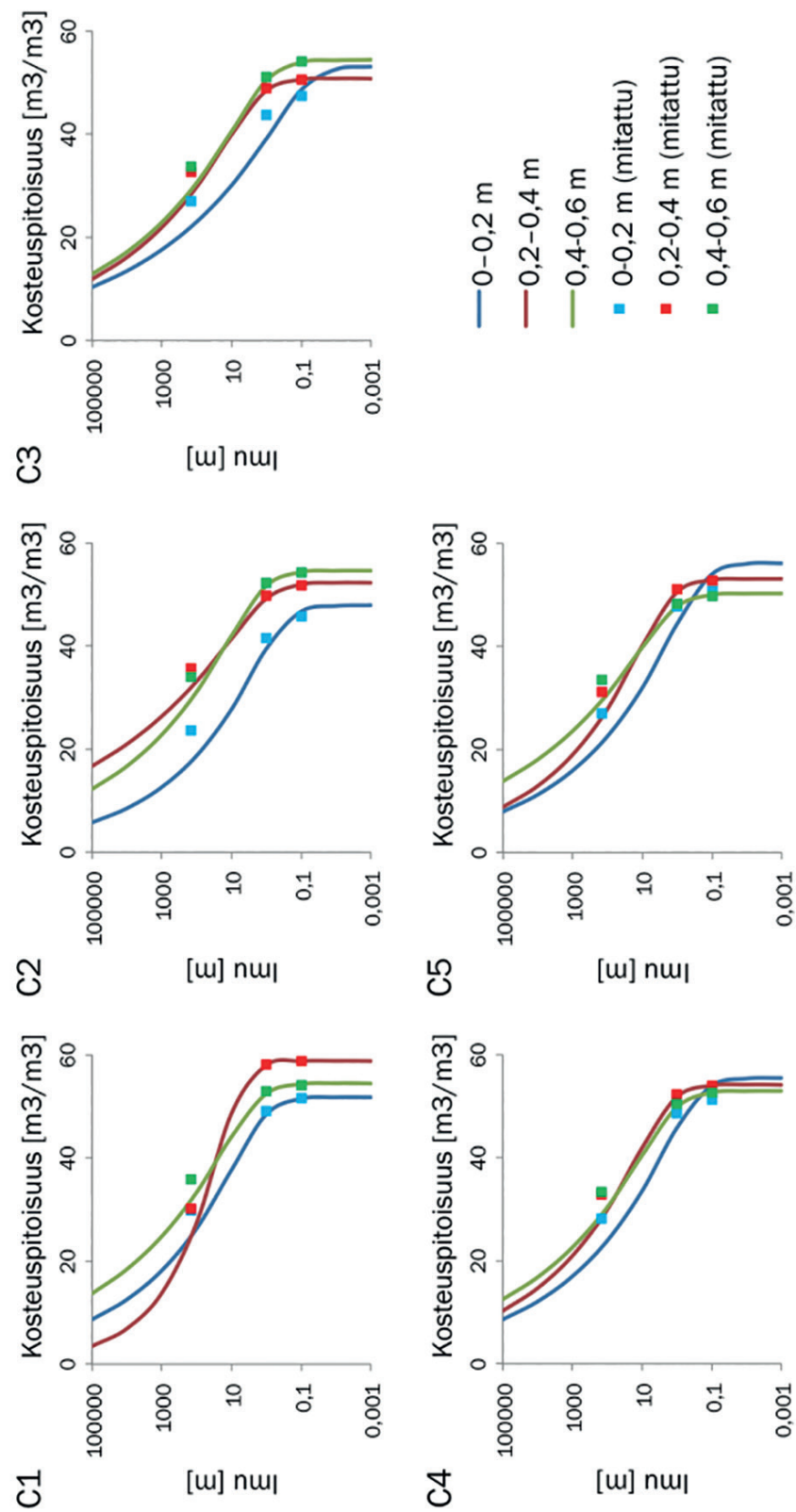
Liite 4. Sievin koekentän viljelytoimenpiteet.

	2015	2016
Kevätkuokkaus		
Miten ja milloin tehtiin	Kyntö 28.5. Joustopiikkiäestys (Väderstad 6m) 29.5.	Kyntö 11.5. Joustopiikkiäestys (Väderstad 6m) 24.5.
Mitä kylvettiin		
Laji, lajike ja milloin	Brage-ohra 220 kg/ha Kylvö 31.5.	Brage-ohra 235 kg/ha Kylvö 26.5.
Kylvölannoitus		
Mikä lannoite, kuinka paljon/ha	YaraMila Pellon Y2 350 kg/ha	YaraMila Pellon Y2 220 kg/ha
Lannanlevitys		
Mitä levitettiin, kuinka paljon/ha ja milloin	Ei lietelantaa	Lietelanta 20 tn/ha Vredo multaus 20.5.
Torjunta-aine käsittely		
Mikä aine ja milloin	14.7. korrensäde Moddus Evo + rikka-aine Ratio 50 10g/ha&kiinnike + tautiaine Acanto 0,25l/ha&Proline 0,25 l/ha + YaraVita Triotrac 3l/ha	27.6. korrensäde Moddus Evo + rikka-aineet MCPA& Logran 13.7. tautiaine Acanto Prima + YaraVira Gramitrel
Puinti		
Milloin	24.9.	1.-2.9.
Syyskuokkaus		
Miten tehtiin ja milloin	Ei syyskuokasta, kasvipeite	Kyntö (Kverneland paluuaura) 4.-5.10.

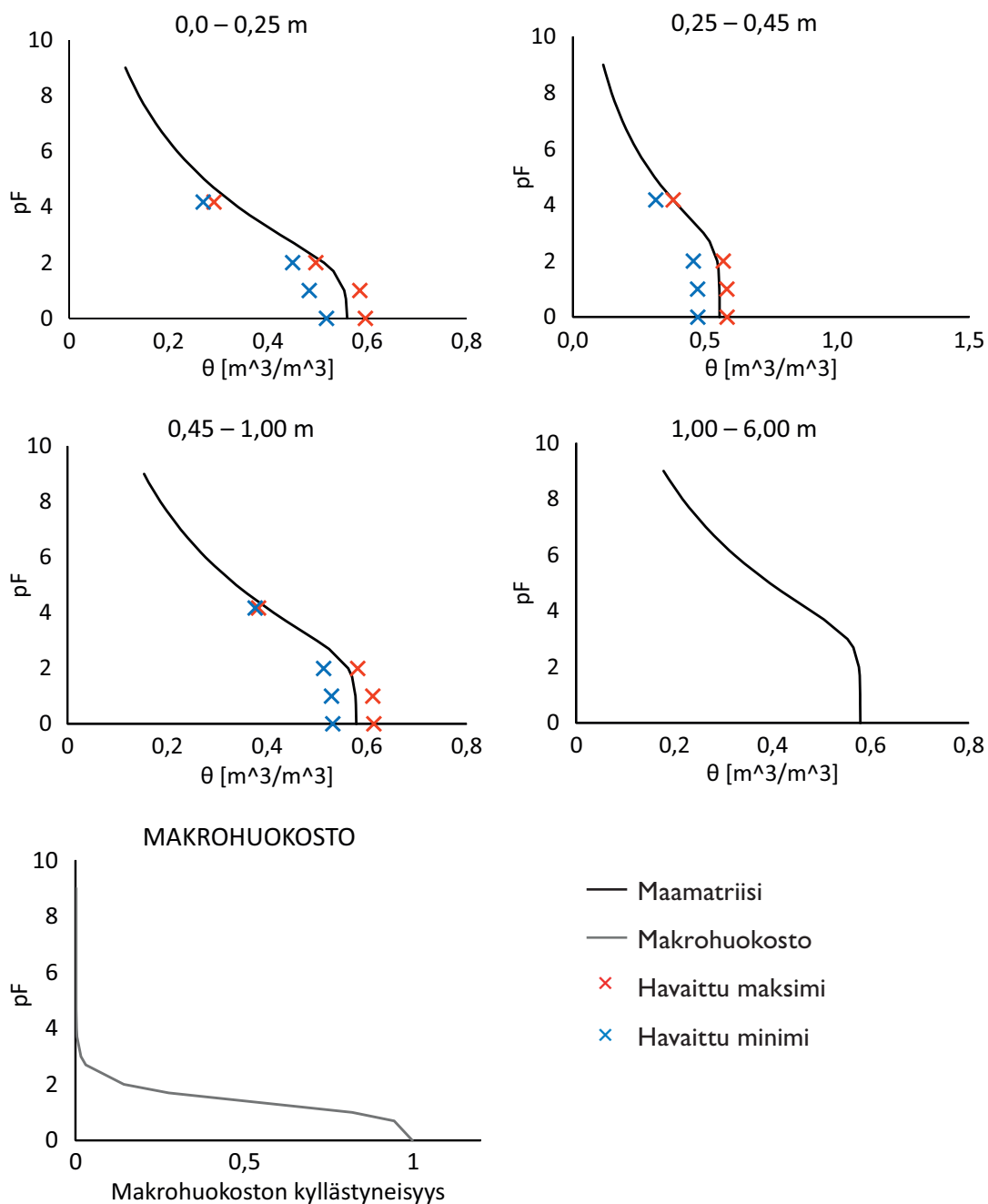
Liite 5a. Nummelan koekentän alueen C maanäytteiden ominaisuuksia viidestä rinnakkaisnäytteestä (C1–C5) kolmelta eri syvyydeltä (0–0,2 m, 0,2–0,4 m ja 0,4–0,6 m). Taulukossa K_{sat} on vedellä kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus q_s vedellä kyllästyneen maan kosteuspitoisuus ja w makrohuokosten osuus kokonaishuokoisuudesta.

Kerrossyvyys [m]	Maanäyte	K_{sat} [m/h]	q_s [m ³ /m ³]	w [m ³ /m ³]
0–0,25	C1	0,032	0,52	0,011
	C2	0,18	0,48	0,13
	C3	0,57	0,53	0,074
	C4	0,059	0,55	0,055
	C5	0,18	0,56	0,067
0,25–0,45	C1	0,0012	0,59	0,002
	C2	0,26	0,52	0,0057
	C3	0,19	0,51	0,003
	C4	0,004	0,54	0,0064
	C5	0,00004	0,53	0,002
0,45–1,0	C1	0,00005	0,55	0,0025
	C2	0,00005	0,55	0,0011
	C3	0,0004	0,54	0,0027
	C4	0,03	0,53	0,0084
	C5	0,0063	0,50	0,0079
1,0–1,5	Pohjamaa	0,00008	0,53	0,0006
0,25–1,0	Sora	0,07	0,30	0,5

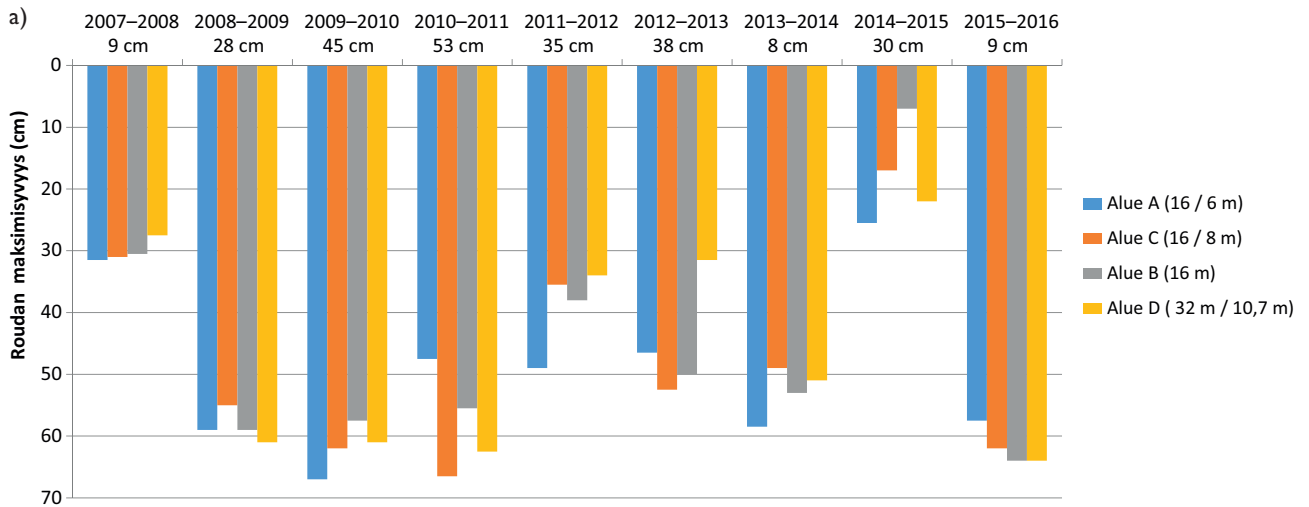
Liite 5b. Nummela koekentän alueen C mitatut maan kosteudet 0,1 m, 1,0 m ja 150 m imuilla ja niihin sovitetut van Genuchtenin (1980) vedenpidätyškäyrät.



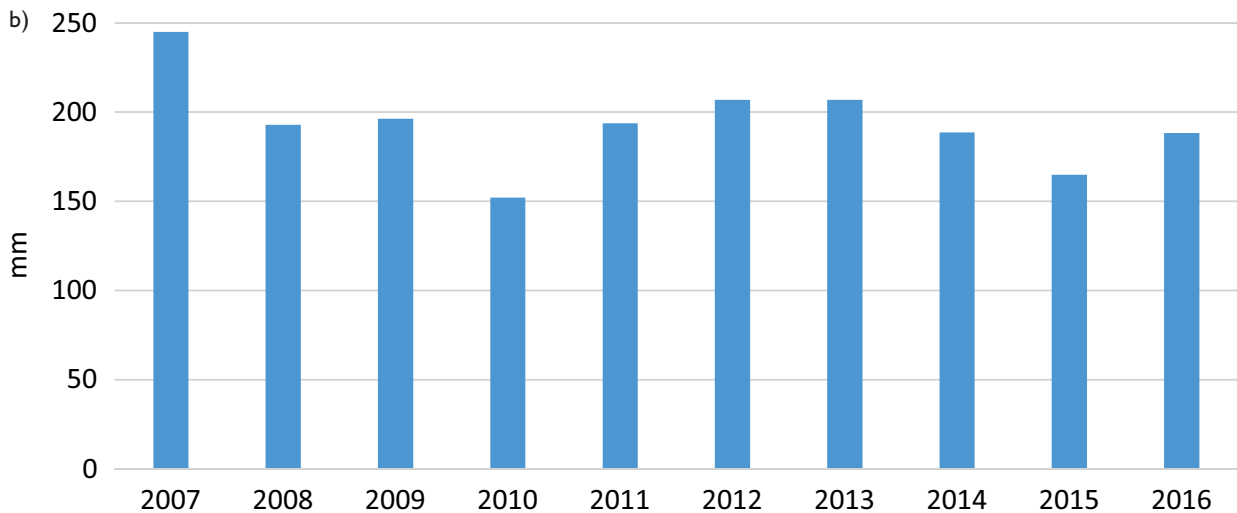
Liite 6. Nummellan koekentän alueen D mitatut maan vedenpidätysominaisuudet imun arvoilla 0, 0,1, 1 ja 150 m kolmelta eri syvyydeltä ja niihin sovitetut (van Genuchten) vedenpidätyskäyrät sekä 1,0–6,0 m syvyydellä olevalle maalle estimoidut vedenpidätyskäyrät.



Liite 7. Nummelan koekentän routa- ja lumimittaukset sekä kasvukauden sadanta 2007–2016.

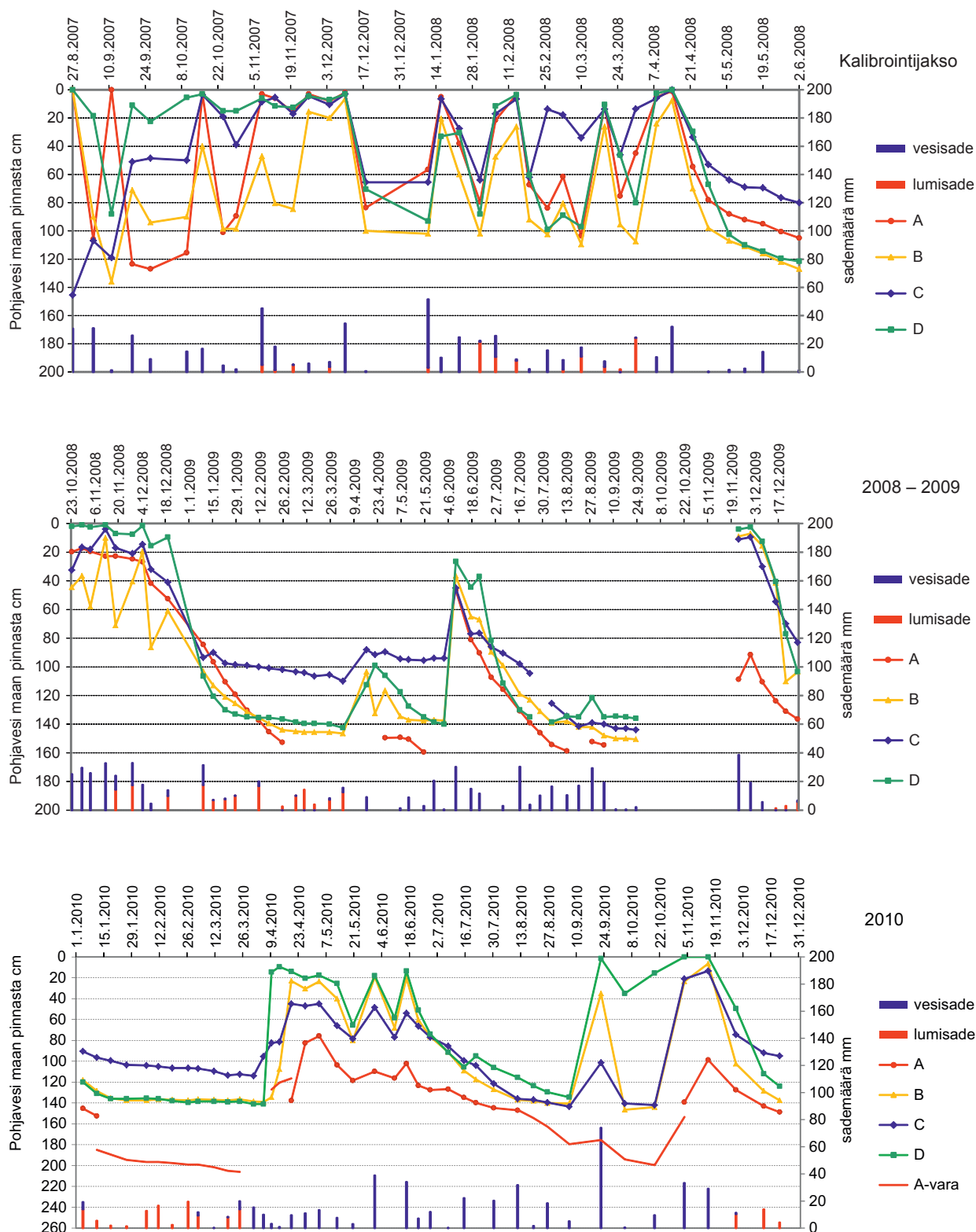


Nummelan koekentän roudan maksimisyvydet vuosina 2007–2016 (n=1, vuodesta 2015 alkaen n=2). Lumen maksimisyvyys on merkitty vuosilukujen alle.

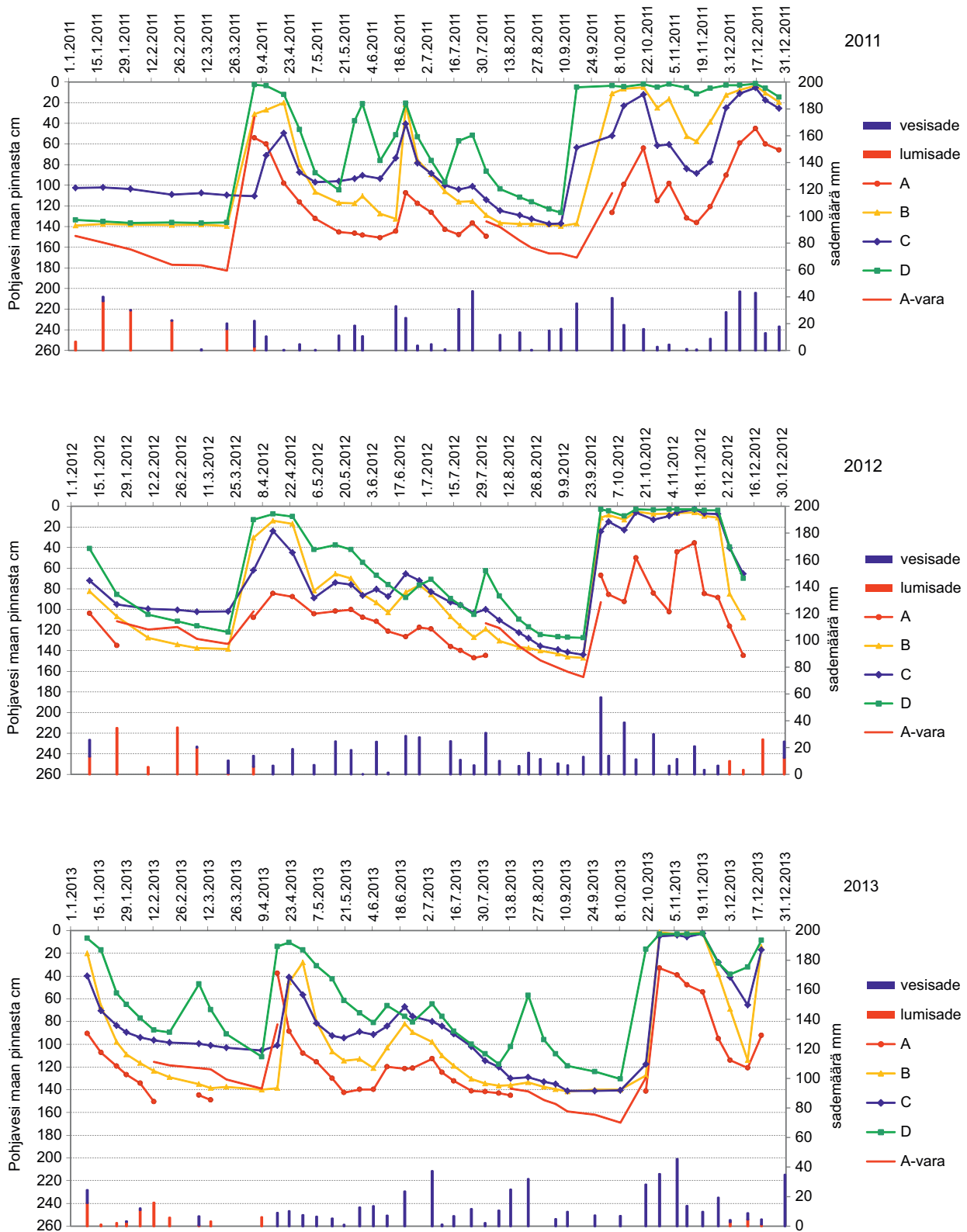


Kasvukauden sadanta (korjattu) Nummelan koekentällä 2007–2016. Sadantasumma on kylvön ja puinnin välillä kertynyt sademäärä.

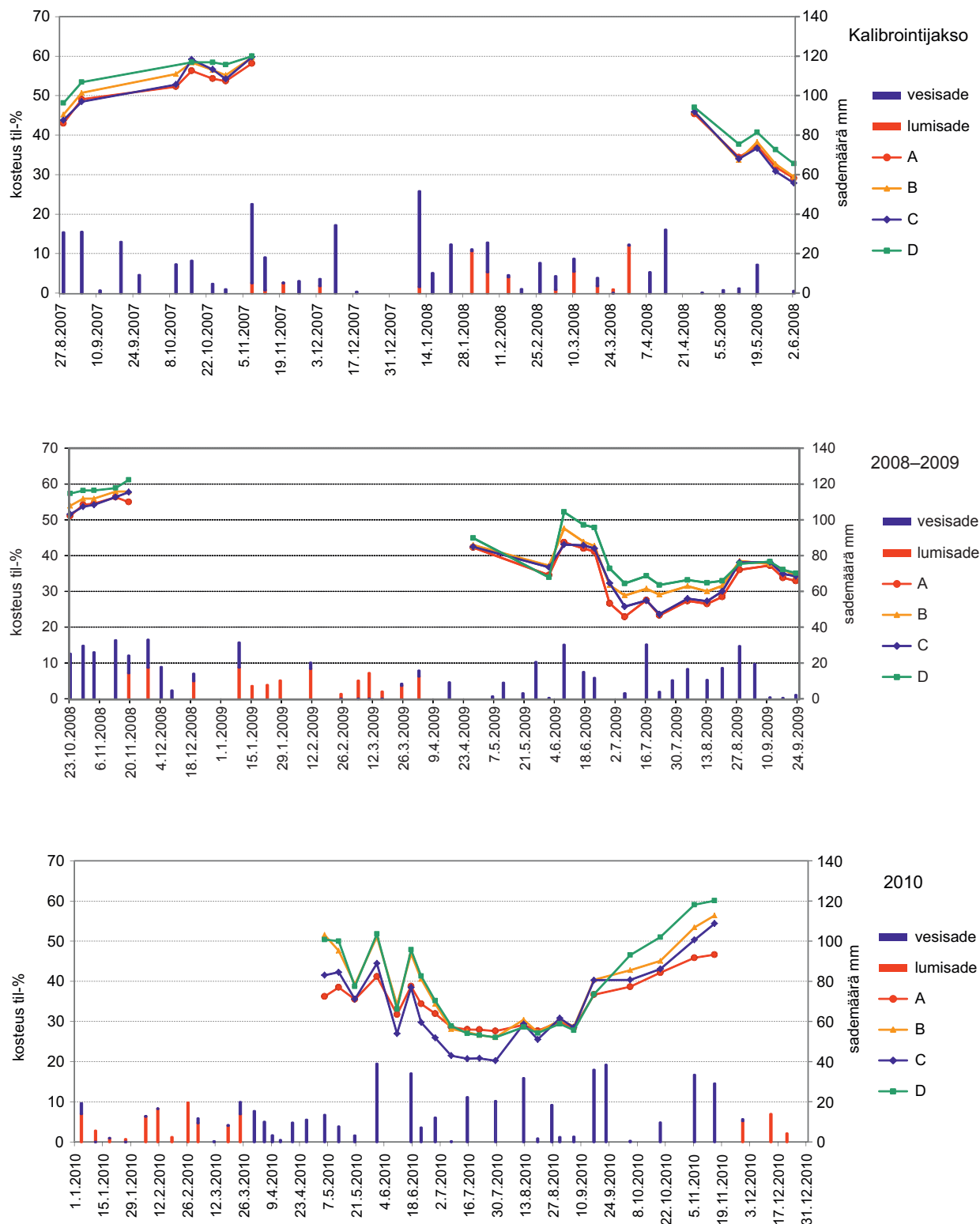
Liite 8a. Nummellan koealueiden A, B, C ja D pohjavedenpinnan syvyydet ja sadanta elokuu 2007–joulukuun 2010. Sadanta-arvot ovat pohjavesimittausten välisen ajan summa.



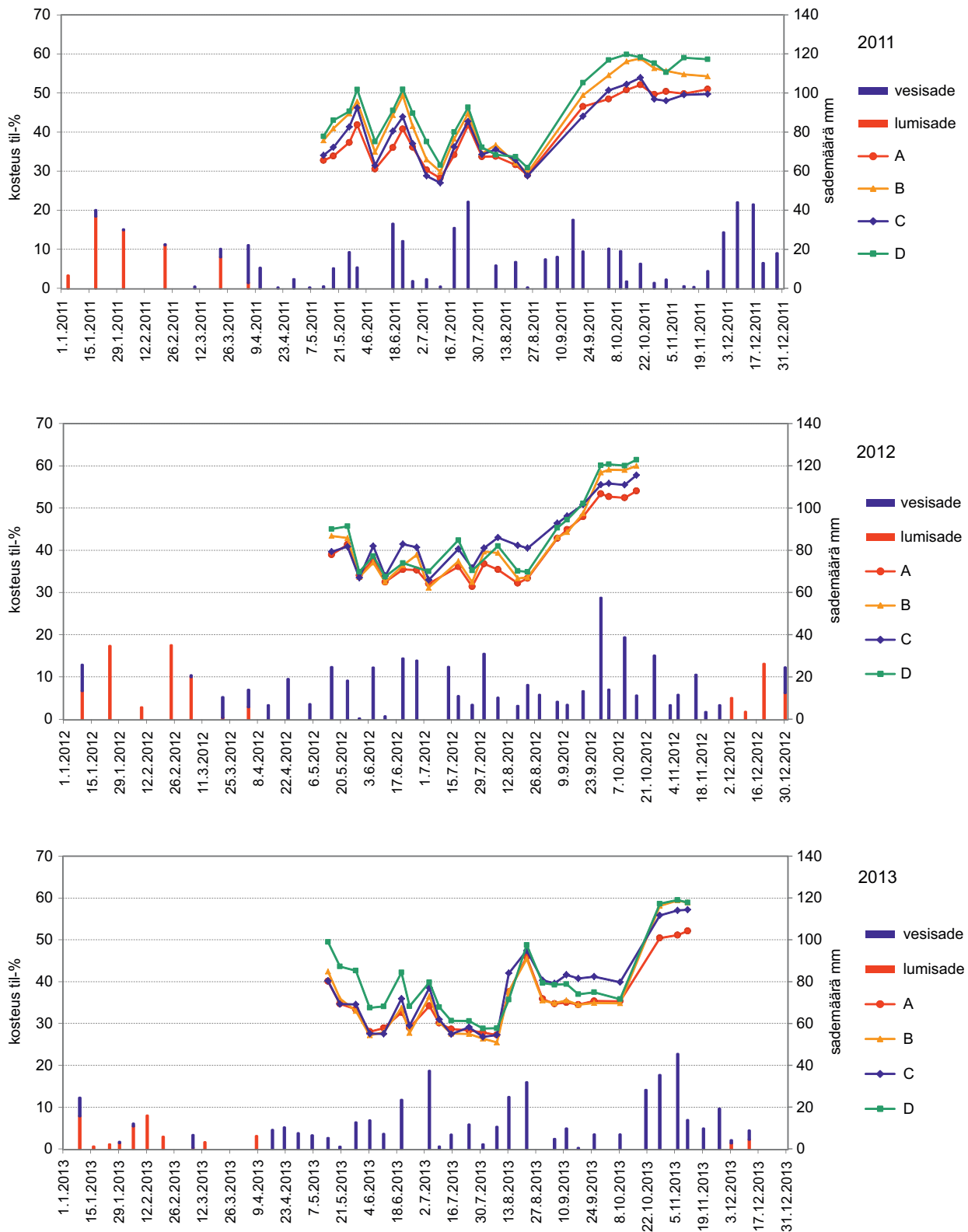
Liite 8b. Nummelan koealueiden A, B, C ja D pohjavedenpinnan syvyydet ja sadanta tammi-
kuu 2011 – joulukuu 2013. Sadanta-arvot ovat pohjavesimittausten välisen ajan summa.



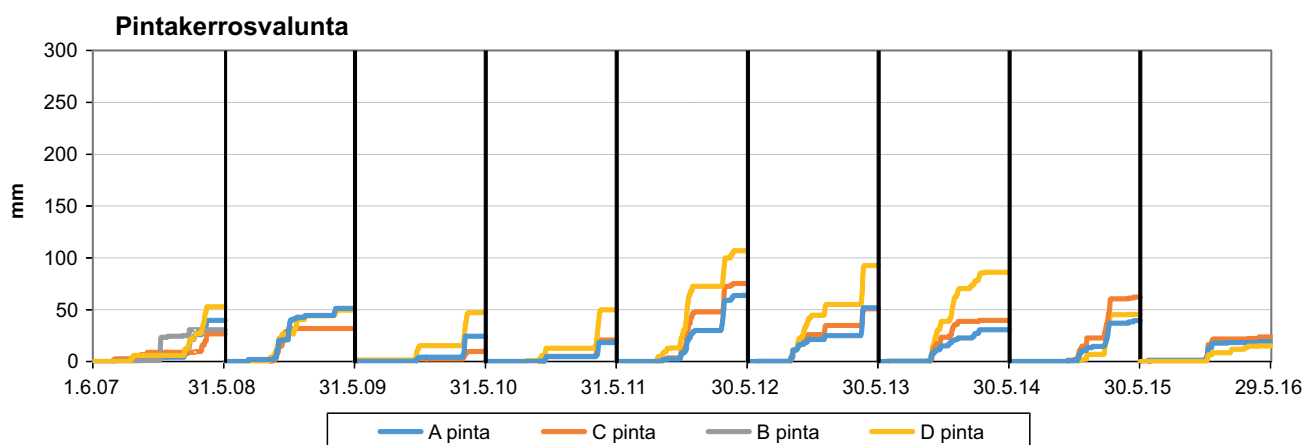
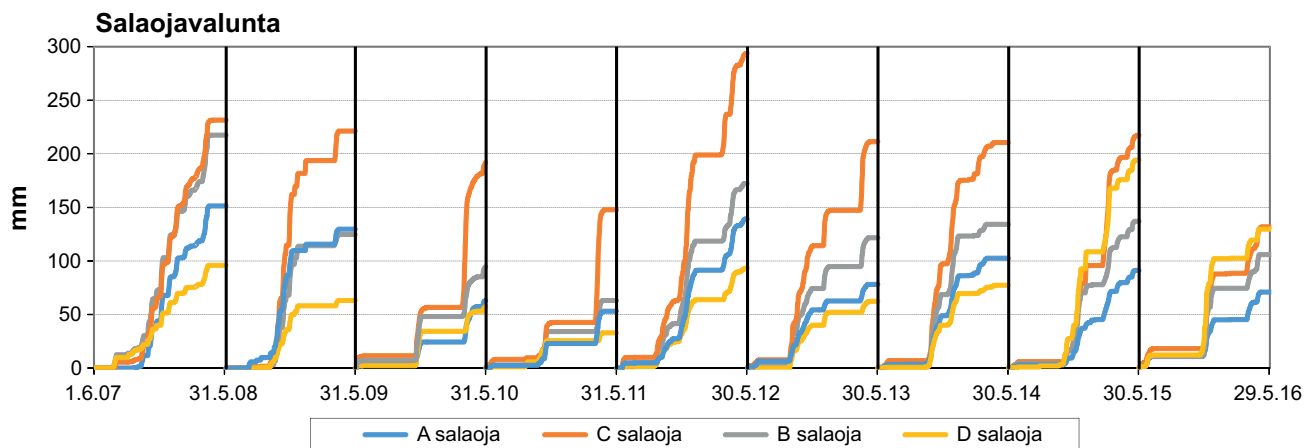
Liite 9a. Nummelan koealueiden A, B, C ja D pintamaan (0–30 cm) kosteudet ojen puolivälissä ja sadannat 2007–2010. Sadanta-arvot ovat mittausten välisen ajan summa.



Liite 9b. Nummelan koalueiden A, B, C ja D pintamaan (0–30 cm) kosteudet ojen puolivälissä ja sadannat 2011–2013. Sadanta-arvot ovat mittausten välisen ajan summa.



Liite 10. Nummelan koealueiden kumulatiiviset salaoja- ja pintakerrosvalunnat, kalibrointijakso (6/2007–5/2008) – tutkimusjakso VIII (6/2015–5/2016).



Liite I I. Nummelan koealueiden sadon määrä ja laatu 2008–2016.

a) Nummelan koealueiden A, B, C ja D keskimääräinen satotaso ja keskimääräinen sadon laatu vuosina 2008–2013, pois lukien vuoden 2012 kaurasato. Keskihajonnat on merkitty kursiivilla (oikeanpuoleinen sarake). Ka-sato = kuiva-ainesato, Tjp = tuhannen jyvän paino, Hlp = hehtolitraino.

		Ka-sato (kg ha ⁻¹)		Typpi (%)		Typpisato (kg ha ⁻¹)		Tjp (g)		Hlp (kg)	
Ohra	A	3300	428	1,74	0,07	56,9	7,8	31,3	1,3	57,2	1,4
	C	3770	230	1,86	0,08	68,9	5,5	31,1	1,4	57,1	1,0
	B	3560	343	1,70	0,07	59,7	7,7	31,6	0,8	56,9	0,6
	D	3090	416	1,82	0,10	55,2	9,8	30,9	0,9	56,5	1,1
Kaura	A	3610	96	2,08	0,09	71,5	3,2	37,5	0,5	57,6	0,4
	C	3880	212	2,13	0,04	79,5	4,0	38,2	0,9	57,4	1,1
	B	3950	312	1,90	0,06	71,3	8,0	37,0	0,6	57,3	0,6
	D	3180	365	1,88	0,05	55,6	8,0	35,2	0,7	56,1	1,0

b) Nummelan koealueiden sadon määrä ja laatu vuosina 2014–2016. Keskihajonnat on merkitty kursiivilla (oikeanpuoleinen sarake).

		Ka-sato (kg ha ⁻¹)		Typpi (%)		Typpisato (kg ha ⁻¹)		Tjp (g)		Hlp (kg)	
2014 - ohra	A	2797	90	2,10	0,06	58,7	1,4	32,3	1,3	57,8	1,0
	C	2980	332	2,27	0,06	70,4	6,9	34,2	1,0	57,7	1,4
	B	3096	260	2,10	0,06	62,7	8,4	30,9	0,8	57,7	1,0
	D	1579	724	2,57	0,20	39,4	15,8	28,2	3,4	54,6	3,3
2015 - kaura	A	3882	356	1,27	0,04	49,4	5,3	32,5	0,5	58,0	1,3
	C	5504	620	1,62	0,13	89,8	15,4	32,0	1,6	56,3	1,5
	B	3914	579	1,37	0,14	54,1	14,5	32,8	1,6	58,0	1,7
	D	3447	1334	1,42	0,15	49,8	23,7	31,5	1,2	56,6	1,8
2016 - ohra	A	2773	118	1,52	0,05	42,1	2,7	35,3	1,1	62,0	0,7
	C	3395	275	1,55	0,02	52,7	4,6	35,0	1,2	63,2	1,1
	B	3130	279	1,51	0,02	47,3	4,2	36,0	0,6	62,6	0,6
	D	2432	668	1,48	0,11	36,5	12,1	35,9	2,0	63,7	1,4

Liite 12. Sievin koekentän pohjavesimittausten tulokset ennen salaajitusta toukokuussa 2015. Näytepisteet P1–P21 vastaavat näytepisteitä M1–M21.

Mittauspäivä	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21
7.3.2015	26	20									28		23					23			20
11.3.2015	28	22									36		35					23			24
15.3.2015	36	32									43		37					42			35
18.3.2015	36	31									43		35					52			41
22.3.2015	58	56									65		49					81			60
26.3.2015	70	69									92		71					89			70
29.3.2015	42	38									62		50					50			40
1.4.2015	30	25									39		43					28			27
6.4.2015	31	26									34		32					30			28
9.4.2015	34	32	31	27	22	20	23	27	32	29	38	31	36	29	38	27	33	36	30	27	10
12.4.2015	41	37	35	35	35	32	30	34	35	36	42	35	36	31	41	35	45	49	45	36	34
15.4.2015	38	35	35	36	37	33	32	33	38	38	43	36	38	33	40	34	42	48	42	35	33
19.4.2015	48	43	56	61	66	59	50	48	52	51	57	53	45	43	60	63	68	72	70	56	41
22.4.2015	77	68	84	85	88	81	78	73	76	78	81	78	56	63	88	87	86	90	87	76	59
26.4.2015	50	54	62	62	65	60	63	52	54	65	66	64	50	51	66	63	61	70	64	59	46
29.4.2015	78	70	85	90	91	85	84	75	80	80	82	80	59	63	89	89	87	91	88	77	60
3.5.2015	98	91	96	98	97	92	94	92	99	103	106	103	80	88	104	97	93	94	95	87	80
7.5.2015	132	126	117	121	117	110	114	113	113	118	123	121	105	108	121	117	108	113	111	106	114
10.5.2015	67	59	73	73	72	69	68	67	66	67	68	61	53	50	74	71	70	75	70	62	58
14.5.2015	33	28	28	28	23	21	19	21	26	28	35	30	31	25	35	25	27	29	24	21	26
17.5.2015	41	37	47	49	52	48	40	40	44	42	47	44	38	35	52	50	54	59	54	47	37
20.5.2015	38	34	41	43	43	40	36	37	41	39	46	41	41	34	44	41	44	48	42	35	32

Liite 13.Ympärysainetutkimus, tutkimuskohteiden maanäytteiden maalajit (rakeisuusmääritys).

Kohde	Näytepiste	Sa	HHs	KHs	HHt	KHt	HHk	KHk	Sr
Iitti 1	1	41	7	7	11	10	14	10	0
	2	36	18	10	22	8	4	2	0
Iitti 2	1	42	20	12	2	7	10	7	0
Iitti 3	1	50	15	15	5	6	4	5	0
Ilmajoki 1	1	32	27	25	8	3	2	3	0
	2	30	30	25	7	3	2	3	0
Ilmajoki 2	1	39	27	24	5	1	3	1	0
	2	36	26	26	6	1	3	2	0
Isokyrö	1	35	20	17	20	3	3	2	0
	2	32	16	22	22	3	3	2	0
Kannus 1	1	5	0	5	11	68	6	5	0
	2	6	5	11	22	55	1	0	0
	3	18	11	34	21	14	2	0	0
	4	18	11	29	24	17	1	0	0
	5	19	10	29	26	15	1	0	0
Kauhajoki 1	1	11	8	12	6	20	15	12	16
	2	21	14	19	6	14	9	10	7
Kauhajoki 2	1	13	5	20	42	18	2	0	0
	2	12	6	22	25	33	2	0	0
	3	13	7	20	35	23	2	0	0
Kirkkonummi	1	62	13	16	2	6	1	0	0
	2	60	8	12	15	4	1	0	0
	3	62	13	12	10	3	0	0	0
	4	62	11	17	6	2	2	0	0
Lieto	1	52	12	22	8	2	2	2	0
	2	52	15	12	10	3	3	5	0
	3	48	12	9	20	3	3	5	0
Sievi 1	1	5	1	4	13	77	0	0	0
	2	5	1	4	20	70	0	0	0
	3	9	0	0	3	79	9	0	0
Sievi 2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Sievi 3	1	20	13	28	23	14	2	0	0
	2	16	7	23	22	32	0	0	0
	3	10	18	29	22	19	2	0	0
Sievi 4	1	21	9	28	30	10	2	0	0
	2	20	10	24	26	20	0	0	0
	3	19	12	30	23	12	4	0	0
Tuusula	1	60	9	13	7	6	2	3	0
	2	45	12	7	16	9	6	5	0
	3	40	5	7	18	11	12	7	0
Vuolenskoski	1	29	26	33	6	4	2	0	0
	2	32	24	33	7	3	1	0	0
	3	14	7	8	41	29	1	0	0

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedotteet

- 1 Yhdistyksen toiminnasta ja otteita salaojitustutkimuksesta (1987)
- 2 Salaojitustutkimusta koskevia aiheita (1987)
- 3 Salaojituskoetoinnasta Ruotsissa ja salaojaputken ympärysaineista (1987)
- 4 Salaojatutkimuksia vuosilta 1987–1988 (1988)
- 5 Kuivatusta ja kastelua koskevia tutkimuksia (1988)
- 6 Maan tiivistymisen tutkimisesta Ruotsissa ja salaojatutkimuksesta Suomessa (1989)
- 7 Salaojaseminaari Osuuspankkiopistolla 17.9.1988 (1988)
- 8 Salaojituksen tavoiteohjelma, näkymiä vuoteen 2010 saakka (1989)
- 9 Sievin salaojituspäivät 20.–21.9.1989 ja ajankohtaista asiaa ympärysaineista (1989)
- 10 Maaseudun ympäristöpäivät Laukaalla 21.3 ja Jokioisissa 26.3.1990 (1990)
- 11 Turve- ja kivennäismaiden vesitaloudesta sekä rautasaostuman muodostumisesta (1990)
- 12 Salaojituskäytännön näkymiä maailmalta (1990)
- 13 Kenttätutkimusmenetelmistä paineenalaisilla salaojitusalueilla sekä Junkkarinjärven pengerrys (1991)
- 14 Myyräojituksesta (1991)
- 15 Zaitsevo-koekentän tuloksia (1992)
- 16 Säättösalojitus-koekenttien perustaminen (1992)
- 17 Turvemaiden salaojituksesta ja suoto-ojituksesta (1992)
- 18 Säättösalojitus-tutkimustuloksia vuosilta 1992–1993 (1993)
- 19 Agriculture sector reform in the Baltic republics (1995)
- 20 Maatalouden kehitysnäkökulmat Baltian maissa lähivuosina (1995)
- 21 Säättösalojituksen, uusinta- ja padotuskastelun tutkimustuloksia (1996)
- 22 Salaojitus ja pellon vesitalous – tavoitteita toimialan kehittämiseksi (1998)
- 23 Peltoviljelyn ravinnehuuhtoutumien vähentäminen pellon vesitaloutta säättämällä (1998)
- 24 Peltoviljelyn ravinnehuuhtoutumien vähentäminen pellon vesitaloutta säättämällä – vuoden 1998 väliraportti (2000)
- 25 Peltoviljelyn ravinnehuuhtoutumien vähentäminen pellon vesitaloutta säättämällä – loppuraportti (2000)
- 26 Haja-asutuksen jätevedet & Jaloittelutarhojen valumavedet – katsaus vuoden 2003 tilanteeseen (2004)
- 27 Laiduntamisen ja suoja-ohjelmien vaikutukset pintamaan rakenteeseen ja vesitalouteen (2007)
- 28 IDW2008 -10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage -seminaarin esitysten suomenkieliset tiivistelmät (2008)
- 29 Pellon vesitalouden optimointi -hankkeen väliraportti (2008)
- 30 Pellon vesitalouden optimointi -hankkeen loppuraportti (2010)
- 31 PVO2-hanke. Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi. Loppuraportti 2014
- 32 Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA). Loppuraportti 2017

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry

ISBN 978-952-5345-37-7