



Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa 2 (VesiHave 2)

Loppuraportti 2023

Helena Äijö, Merja Myllys, Heidi Salo, Alekski Salla, Maija Paasonen-Kivekäs,
Harri Koivusalo, Minna Mäkelä, Jyrki Nurminen, Elina Paavonen, Kielo Isomäki,
Vilma Jokinen, Hanne Laine-Kaulio, Olle Häggblom, Markus Sikkilä

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa 2 (VesiHave 2)

Loppuraportti 2023

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 37

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa 2 (VesiHave 2) Loppuraportti 2023

Helena Äijö, Merja Myllys, Heidi Salo, Alekski Salla, Majja Paasonen-Kivekäs,
Harri Koivusalo, Minna Mäkelä, Jyrki Nurminen, Elina Paavonen, Kielo Isomäki,
Vilma Jokinen, Hanne Laine-Kaulio, Olle Häggblom, Markus Sikkilä

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry

Simonkatu 12 A 11
00100 Helsinki
puh. 0400 882 136

Päätoimittaja Olle Häggblom

Kansikuva Nummelan kuohkeutuskokeen neljä käsittelyä heti jankkuroinnin jälkeen 1.7.2022. Kuva: Merja Myllys

Taitto Paula Heiäng

Web www.salaojayhdistys.fi/julkaisut

ISBN 978-952-5345-54-4

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	5
Tiivistelmä.....	6
Sammandrag.....	8
Abstract.....	10
1 JOHDANTO.....	12
1.1 Tausta.....	12
1.2 Tavoitteet.....	13
2 TUTKIMUSMENETELMÄT.....	14
2.1 Nummelan koekenttä.....	14
2.1.1 Koko kentän koe.....	15
2.1.2 Kuohkeutuskoe.....	17
2.1.3 Fosforin porraskoe.....	19
2.2 Sievin säätösalaojituskenttä.....	21
2.3 Valtaojan padotus Sievissä.....	24
2.4 Peltoalueen matemaattinen mallintaminen.....	26
2.4.1 Valtaojan padotuksen mallinnus (peruskuivatuksen säätö).....	27
2.4.2 Pellon vesitalouden säädön mallinnus (paikalliskuivatuksen säätö).....	29
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	31
3.1 Nummelan koekenttä.....	31
3.1.1 Koko kentän koe.....	31
3.1.2 Kuohkeutuskoe.....	55
3.1.3 Fosforin porraskoe.....	55
3.2 Sievin säätösalaojituskentän tulokset.....	57
3.2.1 Sääolosuhteet.....	57
3.2.2 Pohjavedenpinnan syvyys koekentällä.....	58
3.2.3 Pohjavedenpinnan syvyydet eri etäisyyksillä salaojasta.....	59
3.2.4 Salaojavalunnat.....	60
3.2.5 Salaojavalunnan laatu ja kuormitus.....	62
3.2.6 Sato.....	65
3.2.7 Kasvihuonekaasuemissiot.....	67
3.3 Valtaojan padotuskokeen tuloksia.....	68
3.4 Peltoalueen ja ojitusverkoston säädön mallintaminen.....	70
3.4.1 Valtaojan padotuksen mallinnus.....	70
3.4.2 Pellon vesitalouden säädön mallinnus.....	74

4 JOHTOPÄÄTÖKSET	80
Täydennysojitus, maan biologinen kuohkeutus ja fosforilannoitus	80
Säätösalaojitus ja altakastelu.....	81
Valtaojan padotus	81
Peltoalueen mallinnus	82
Jatkotutkimustarpeet	83
 Kirjallisuusviitteet.....	 85
 Liitteet	
1 Sievin salaojakentän viljelytoimet vuosina 2019–2022.....	87
2 VesiHave 2 -hankkeen akateemiset ja viestinnälliset tuotokset.....	88

Esipuhe

Tässä loppuraportissa esitetään tutkimushankkeen *Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa 2* (VesiHave 2) tausta, tavoitteet, käytetyt tutkimusmenetelmät sekä tulokset ja johtopäätökset. Hankkeen tutkimuksen kohteena olleiden koekenttien (Sievi, Korvenoja ja Nummela) tutkimushistoriasta löytyy lisää tietoa tätä hanketta edeltäneen hankkeen (*Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa - VesiHave*) loppuraportista (Äijö ym., 2021).

VesiHave 2 -hankkeen tulokset osoittavat, että peltoalueiden ja peltovaltaisten valuma-alueiden järkevällä vesitalouden hallinnalla voidaan vähentää pintavesiin päätyvää kuormitusta. Lisäksi matemaattiset mallit antavat yhä parempia työkaluja arvioida ja ymmärtää vesienhallintaratkaisujen vaikutuksia yhä suuremmilla tarkastelualueilla. Hankkeen tulosten avulla päästään taas askel lähemmäs tavoitetta, jossa maatalouden tuotantoa ja ympäristökuormituksen minimointia edistetään yhtäaikaaisesti.

Hanke toteutettiin yhteistutkimushankkeena ja siitä vastasi Salaojituksen tutkimusyhdistys ry. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi Helena Äijö (Salaojayhdistys ry). Tutkijaryhmän muut jäsenet olivat Merja Mylly (Luonnonvarakeskus), Harri Koivusalo (Aalto-yliopisto), Minna Mäkelä (Salaojayhdistys ry), Maija Paasonen-Kivekäs (Sven Hallinin tutkimussäätiö sr), Jyrki Nurminen (Salaojituksen tutkimusyhdistys ry), Hanne Laine-Kaulio (Sven Hallinin tutkimussäätiö sr), Heidi Salo (Aalto-yliopisto), Alekski Salla (Aalto-yliopisto), Vilma Jokinen (Aalto-yliopisto), Kielo Isomäki (Aalto-yliopisto) ja Elina Paavonen (Aalto-yliopisto). Mallinnusosahankkeessa kehitystyötä tehtiin yhteistyössä Alekski Sallan väitöskirjaprojektin kanssa. Markus Sikkilä (Maveplan) hoiti valtaosan Sievin koekentän käytännön tutkimustoimista hankepartnerina. Nummelan koekentällä Jokioisilla tehtiin yhteistyötä Luonnonvarakeskuksen *Smart Farming* -hankkeen kanssa. Laitteita ja niiden käyttöön ja huoltoon liittyviä tukipalveluita ostettiin seuraavilta yrityksiltä: Profimeas Oy, Soil Scout Oy, Luode Consulting Oy, Agrolink Ab, Pythagoras Oy ja Caproc Oy.

Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat Antton Keto (pj., YM), Anne-Mari Rytönen (Pohjois-Pohjanmaan ELY) /Eeva Nuotio (Etelä-Pohjanmaan ELY), Seija Virtanen (Salaojituksen Tukisäätiö sr), Anni Karhunen (Varsinais-Suomen ELY), Sari Peltonen (ProAgria Keskusten Liitto) ja Airi Kulmala/Juha Lappalainen (MTK).

VesiHave 2 -hanketta rahoittivat ympäristöministeriö/Pohjois-Pohjanmaan ELY (Vesien suojelelun tehostamisohjelma, maa- ja metsätalouden kestävä vesienhallinta) ja Salaojituksen Tukisäätiö sr, sekä hankkeeseen osallistuneet tahot: Salaojayhdistys ry, Luonnonvarakeskus, Aalto-yliopisto ja Sven Hallinin tutkimussäätiö sr.

Kiitämme lämpimästi hankkeen rahoittajia, hankkeen tutkimusryhmää, sekä kaikkia muita, jotka ovat vaikuttaneet hankkeen toteuttamiseen. Erityiskiitokset prof. Laura Alakukulle (Helsingin yliopisto), Seija Virtaselle (Salaojituksen Tukisäätiö sr) sekä Sievin koekentän omistajalle ja viljelijälle Sakari Sikkilälle ja Korvenojan padotusalueen viljelijälle Mikael Myllylälle.

Tiivistelmä

VesiHave 2 -hankkeessa selvitettiin paikallis- ja peruskuivatusjärjestelmien säädön vaikutuksia peltoalueiden hydrologiaan, vesistökuormitukseen ja satotasoon. Pellon vesitaloutta säädettiin säätösalaajituksen ja altakastelun avulla tavoitteena maksimoida sato, turvata kestävä maan rakenne sekä minimoida vesistökuormitus. Lisäksi hankkeessa selvitettiin, miten huonotuottoisen märkyydestä kärsineen peltoalueen täydennysojitus, maan rakenteen kuohkeutus ja fosforitilan parantaminen vaikuttavat tuottokykyyn. Hankkeen mallinnustutkimuksessa teoretisoitiin valtaojan padotuksen vaikutuksia sekä laskettiin säätösalaajituksen ja valtaojan padotuksen hydrologisia yhteisvaikutuksia. Hankkeessa jatkettiin *Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa* (VesiHave) -hankkeessa (elokuu 2018–joulukuu 2020) perustettujen koealueiden seurantaa ja laskennallista tutkimusta.

Hanke toteutettiin neljänä osahankkeena:

1. Peltoviljelyn tuottavuuden parantamista ja vesistökuormituksen vähentämistä säätösalaajituksella ja altakastelulla tutkittiin Sievin koekentällä. Menetelmillä onnistuttiin pitämään pohjavedenpinta korkeammalla kasvukauden aikana sekä vähentämään typpikuormitusta saaden samanaikaisesti sadonlisää. Fosforikuormitukseen tai kasvihuonepäästöihin säätösalaajitus ja altakastelu eivät vaikuttaneet.
2. Valtaojan padotuksen vaikutus pohjavedenpinnan korkeuteen padon yläpuolisilla peltoalueilla. Padotuskoe saatiin onnistuneesti käyntiin ja sen mittausrakenteet toimimaan. Padotuskoe ja sen tuottamia aineistoja hyödynnetään tulevassa VESIMA-hankkeessa sekä mallintamistyössä. Padotuskokeeseen liittyvä mallisovellus osoitti, että padotus nosti vedenpinnan salaajasyvyyden yläpuolelle lähellä patoa, kun taas kauempana padosta (650 metriä ylävirtaan) padotusvaikutus ei enää ylettynyt salaajasyvyyden yläpuolelle. Lisäksi mallinnus osoitti, että Sievin uomaverkoston laskennallinen tilavuus, jonka valtaojan padotus voi muodostaa oli malliarvioissa noin 2000 m³. Valuma-alueen pelloilla tilavuutta vastaava määrä kasteluvettä olisi 2,5 l m⁻², mikä käytännössä vastaa vain pienen mittakaavan kastelua.
3. Perus- ja paikalliskuivatuksen vuorovaikutuksen ja optimaalisen säädön matemaattinen mallinnus peltoalueella. Osahankkeessa laadittiin kaksi uutta mallinnuskokonaisuutta, jotka täydentävät hydrologista FLUSH-mallia. Valtaojan hydraulinen virtausmalli mahdollisti ojan padotusvaikutusten määrittämisen erilaisissa virtausolosuhteissa valuma-alueen koko uomaverkostossa. Säätösalaajituksen ja valtaojan mallitulosten mukaan vesienhallintamenetelmät nostivat yhdessä pohjavedenpintaa koko pellon alueella tasaisemmin kuin erikseen mallinnettuna. Valtaojan vaikutus pohjavedenpintaan erottui laskennallisesti tasaisella, alle 0,2 %:n kaltevuuden pellolla noin 200 m etäisyydellä valtaojasta.

4. Peltoviljelyn tuottavuuden parantaminen ja vesistökuormituksen vähentäminen täydennysojituksella ja maan biologisella ja mekaanisella kuohkeutuksella. Täydennysojitus paransi maan vesitaloutta, mutta pitkään märkyydestä kärsineen pellon rakenteen ja fosforitilan parantaminen ovat hitaita prosesseja. Luotettavien tulosten saaminen vaatii tältä osin pidempää seurantaa.

Hankkeen tulokset ovat laajasti sovellettavissa peltoalueiden kuivatusjärjestelmien parantamiseen käytännössä ja eri ojitusratkaisujen vaikutusten arviointiin maatalouden vesiensuojelussa. Tulokset ovat hyödynnettävissä mm. maatalouden ympäristönsuojelun sekä tuotannollisten investointien tukien kehittämisessä ja ohjauksessa. Tuloksista on tiedotettu laajasti sidosryhmille. VesiHave 2 -hanke toteutettiin yhteistutkimushankkeena vuosina 2021–2022, ja tutkimus jatkuu *Vesienhallinta maatalousvaltaisilla valuma-alueilla* (VESIMA)-hankkeessa vuosina 2023–2024.

Sammandrag

I projektet utreddes hur reglerbar dränering implementerad i täckdiknings- och grundtorrläggningssystemen påverkar hydrologin, näringsbelastningen till vattendragen och skördenivån på jordbruksområden. Reglerbar dränering och underbevattning tillämpades på ett åkerskifte med målsättningen att maximera skörden, garantera en god markstruktur och att minimera näringsbelastningen till vattendragen. Därutöver utreddes hur kompletteringsdikning, markluckring och tillägg av fosfor påverkade produktiviteten av ett lågproduktivt och vattensjukt skifte. Modelleringsforskningen fokuserade på teoriserandet av den hydrologiska inverkan av dämningen i grundtorrläggningssystemet samt på samverkan mellan den reglerbar dräneringen i täckdikningssystemet och dämningen i grundtorrläggningssystemet. I projektet fortsattes uppföljningen av fältförsök som grundats i *Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave)* -projektet samt beräkningsmässig forskning i samband med dessa.

Projektet utfördes som fyra delprojekt:

1. På försöksfältet i Sievi undersöktes hur åkermarkens produktivitet kunde förbättras och näringsbelastningen minskas med hjälp av reglerbar dränering och underbevattning. Grundvattennivån kunde med hjälp av dessa metoder hållas på en högre nivå under växtsäsongen, vilket även minskade kväveutlakningen och ökade skörden. Reglerbar dränering och underbevattningen påverkade dock inte fosforbelastningen eller växthusgasemissionerna.
2. Inverkan av uppdämningen av ett stamdike på ett åkerområde beläget uppströms. Uppdämningsförsöket med tillhörande mätinstrument kördes framgångsrikt igång. Data som producerades i samband med uppdämningsförsöket kommer att utnyttjas i uppföljningsprojektet VESIMA samt i kommande modelleringsarbete. Modelleringen som gjordes i samband med uppdämningsförsöket visade att uppdämningen höjde grundvattennivån över täckdikningsnivån i närheten av dämningen. Längre uppströms (650 m från dämningen) räckte dämningseffekten inte till för att höja grundvattennivån över dikningsnivån. Utöver detta visade modelleringen att dikesnätverkets beräknade volym och därmed maximala vattenlagringskapacitet var ca. 2000 m³. Ifall denna vattenmängd skulle användas för att bevattna alla åkrar som är belägna på uppdämningens avrinningsområde, skulle det motsvara 2,5 l/m² (2,5 mm), vilket är otillräckligt för storskalig bevattning.
3. Modellering av samspelet mellan och optimeringen av reglerbarheten i grundtorrläggningen och den lokala dräneringen på ett åkerområde. I delprojektet producerades två nya modelleringshelheter som kompletterar den hydrologiska FLUSH-modellen. Flödesmodellen för öppet dike möjliggjorde en kvantitativ bedömning av dämningens inverkan på hela dikesnätverket under olika flödeslägen. Modellens resultat visade att reglerbarheten i grundtorrläggningen och i den lokala

dräneringen i samspel höjde grundvattennivån mer och jämnare än någondera metoden var för sig. Inverkan av dämningen i grundtorrläggningssystemet kunde räknemässigt urskiljas upp till ca. 200 meter från diket på ett flackt skifte med en lutning på 0,2 %.

4. Förbättrandet av produktiviteten av ett åkerskifte och minskningen av näringsbelastningen med hjälp av kompletteringsdikning samt biologisk och mekanisk markluckring. Kompletteringsdikningen förbättrade markens vattenhushållning, men förbättrandet av fosforinnehållet och markstrukturen är en långsam process på ett skifte som varit vattensjukt under en lång tid. För att få pålitliga resultat angående metodernas inverkan krävs fortsatt uppföljning under en längre tid.

Projektets resultat kan tillämpas brett vid förbättringen av dräneringssystemen i praktiken och för att utvärdera inverkan av olika dräneringsmetoder på jordbrukets vattenskydd. Resultaten kan utnyttjas bland annat vid utvecklingen och styrningen av miljöskydds- och investeringsrelaterade jordbruksstöd. Resultaten har blivit väl kommunicerade till målgrupperna. VesiHave 2-projektet förverkligades som ett samforskningsprojekt under åren 2021–2022 och forskningen fortsätter under åren 2023–2024 i projektet *Vesienhallinta maatalousvaltaisilla valuma-alueilla* (VESIMA).

Abstract

In this project, the effects of drainage control in field and basic drainage on field hydrology, nutrient loading and yield were investigated. Controlled drainage and subirrigation were applied to an agricultural field with the aim to increase yields, ensure a stable soil structure and minimize nutrient loading.

In addition, the effect of supplementary drainage, soil structure improvement and increasing soil phosphorus reserve on the yield of a clay field with long term drainage problems were studied. Modelling case studies focused on theorizing hydrological impacts of water level regulation in the main ditch and implementation of main ditch damming jointly with the controlled drainage.

This project continued work on sites established in a previous project, “*Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa*” (Water management in water conservation, VesiHave) (August 2018–December 2020) and had four work packages:

1. Improvement of productivity and reduction of nutrient loading through controlled drainage and subirrigation was investigated in Sievi, North Ostrobothnia. The method was successful in elevating ground water level during the growing season and reducing nitrogen runoff, as well as increasing yield. No effect on phosphorus loading or greenhouse gas emission was observed.
2. Elevating the groundwater level in a field by damming of the main ditch. Data was collected on the groundwater levels above the dam and water levels in the ditch before the dam. The data will be used in the next project (VESIMA) and in hydrological modelling. Modelling performed on the experimental site showed that the dam elevated the groundwater level above drainage depth near the dam, but at 650 m upstream, the dam had no such effect. The model also showed that the volume of water retained by the dam in the ditch network was approximately 2000 m³. This is equivalent to 2.5 l m⁻² if used to irrigate the fields in the catchment area, insufficient for any large-scale irrigation.
3. Mathematical modelling of the interaction between and optimal control of basic and field drainage. Two new models were developed to supplement the hydrological FLUSH-model. The ditch hydraulic model provided quantification of regulation impacts across a range of flow conditions in the entire main ditch network. The model results on controlled drainage and main ditch damming showed that the two water management methods were able to raise water tables of a field more uniformly than individual methods. Water level control in the main ditch was computationally detected in a flat (slope 0.2 %) field at the distance of about 200 m from the main ditch.

4. Improving productivity and reducing nutrient loading by supplementary drainage and improvement of soil structure with biological and mechanical loosening. Supplementary drainage improved hydrological conditions in the field, but the structure and phosphorus reserves of the soil had already been damaged by long term waterlogging and restoring them takes time. Any reliable results on these will require a longer observation.

Results of this project are widely applicable in the improvement of water management systems in agriculture and assessing the effects of different drainage systems for water conservation. These results can be utilized in the development and directing of conservation efforts and agricultural investment subsidies. Results have been communicated widely to various stakeholders. Vesihave2- project was a co-operative project, carried out in 2021–2022, and the research will continue in a follow up project “*Vesienhallinta maatalousvaltaisilla valuma-alueilla*” (Water management in rural catchments, VESIMA) in 2023–2024.

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Maankuivatus on valtaosalla Suomen pelloista kannattavan ja kestäväen viljelyn edellytys. Optimaalinen vesitalous on keskeinen tekijä sekä pellon tuottavuuden varmistamisessa että ympäristövaikutusten muodostumisessa. Maaperän kosteusolot vaikuttavat peltomaassa tapahtuviin fysikaalisiin, kemiallisiin ja biokemiallisiin prosesseihin, jotka vuorostaan vaikuttavat niin määrällisesti kuin laadullisesti pellolta lähteviin kasviuonekaasuihin ja vesistökuormitukseen.

Vesitalouden hallinta, eli kuivatusjärjestelmien säätömahdollisuus (säätöojitus), antaa mahdollisuuden vaikuttaa peltomaan kosteusoloihin padottamalla maassa olevaa vettä sekä kastelun tai sadannan avulla jopa nostamalla pohjaveden pintaa toivottuun korkeuteen asti. Säätöojitus voidaan toteuttaa esimerkiksi säätösaloajituksella tai valtaojan padotuksella. Säätöojituksen hyödyistä niin tuotannon kuin ympäristön osalta on jo viitteitä tutkimuksessa, ja säätöojitus onkin nähty tärkeänä menetelmänä kestäväen maataloustuotantoon siirtymisessä. Säätöojituksen hyödyt korostuvat erityisesti, jos Suomen ilmasto-olot muuttuvat ennusteiden mukaisesti. Kastelua tarvitaan nykyistä enemmän, jos pitkät kuivuuskaudet yleistyvät, mikä edellyttää riittävää kasteluveden saantia ja kastelun kustannustehokasta toteutusta. Paikallis- ja peruskuivatusjärjestelmät kattavat miltei 85 % Suomen peltoalasta (2,27 milj. ha, Luke, 2021), joten niiden toimintaa parantamalla voidaan saavuttaa merkittäviä ja laaja-alaisia hyötyjä niin maatalouden tuotannon kuin vesiensuojelun kannalta. Säätösaloajitettua peltoa on noin 5 % salaojitetusta peltoalasta eli 77 000 hehtaaria (Luke, 2021). Säätösaloajitukseen soveltuvaa peltomaata on arvioitu olevan kaikkiaan 600 000–800 000 ha riippuen siitä, kuinka kalteville pelloille ja mille maalajeille menetelmän katsotaan soveltuvan, joten säätöojituksen tuottamien hyötyjen osalta potentiaalia on paljon.

Kuivatusjärjestelmien merkityksestä ja valumavesien pidättämisestä on melko vähän tutkimustietoa maatalouden vesiensuojelussa Suomessa. Eri tavoilla toteutettujen salaojitusten toimivuutta ja vaikutuksia pellon kuivatustilaan, satotasaan, vesistökuormitukseen ja maan rakenteeseen on tutkittu VesiHave 2 -hanketta edeltäneissä tutkimuksissa: *Pellon vesitalouden optimointi* (PVO), *Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi* (PVO2), *Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa* (TOSKA) ja *Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa* (VesiHave) -yhteistutkimushankkeissa vuosina 2007–2021 (Vakkilainen ym. 2010, Äijö ym. 2014, Äijö ym. 2017, Äijö ym. 2018, Äijö ym. 2021).

Matemaattiset mallit tarjoavat kustannustehokkaan työkalun vesitalouden ja sen vaikutusten arviointiin ja ymmärtämiseen. Matemaattista mallinnusta onkin käytetty ja kehitetty tässä ja edeltävissä hankkeissa, ja sitä on sovellettu erilaisissa alueellisissa ja ajallisissa mittakaavoissa (esim. Salo ym., 2017; Turunen ym., 2017; Häggblom ym., 2019; Koivusalo ym., 2017). Mallien suurimpia etuja on mahdollisuus soveltaa niitä koekenttien ulkopuolisilla alueilla sekä erilaisten skenaarioiden analysointi (Salla ym., 2022; Salo ym.,

2021). VesiHave 2 -hankkeessa lohkokohtainen laskentamalli yhdistettiin uomavirtausmalliin, joka mahdollistaa tarkastelualueen suurentamisen kokonaisen maatalousalueen tasolle.

Suomen sisävesien ja merialueiden tilan parantaminen edellyttää erityisesti maataloudesta tulevan vesistökuormituksen vähentämistä. Samalla maataloustuotannon edellytetään vähentävän myös kasvihuonekaasupäästöjään. Samanaikaisesti ympäristökuormituksen vähentämisen ohella maatalouden tulisi lisätä tuottavuuttaan, jotta viljely olisi taloudellisesti kannattavaa.

Valtaosa maatalouden ravinne- ja kiintoainekuormituksesta tulee peltoalueilta valumavesien mukana. Kuormituksen laaja-alaisuus ja lähinnä ilmasto-olosuhteistamme johdettu suuri ajallinen vaihtelu hankaloittavat sen hallitsemista. Ilmasto-olojen muuttuminen saattaa vaikeuttaa tilannetta entisestään.

1.2 Tavoitteet

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa 2 (VesiHave 2) -hankkeen tavoitteena oli selvittää, miten paikallis- ja peruskuivatukseen kohdistuvilla toimenpiteillä voidaan säätää pellon vesitaloutta satopotentiaali hyödyntäen, kestävä maan rakenne turvaten ja vesistökuormitus minimoiden.

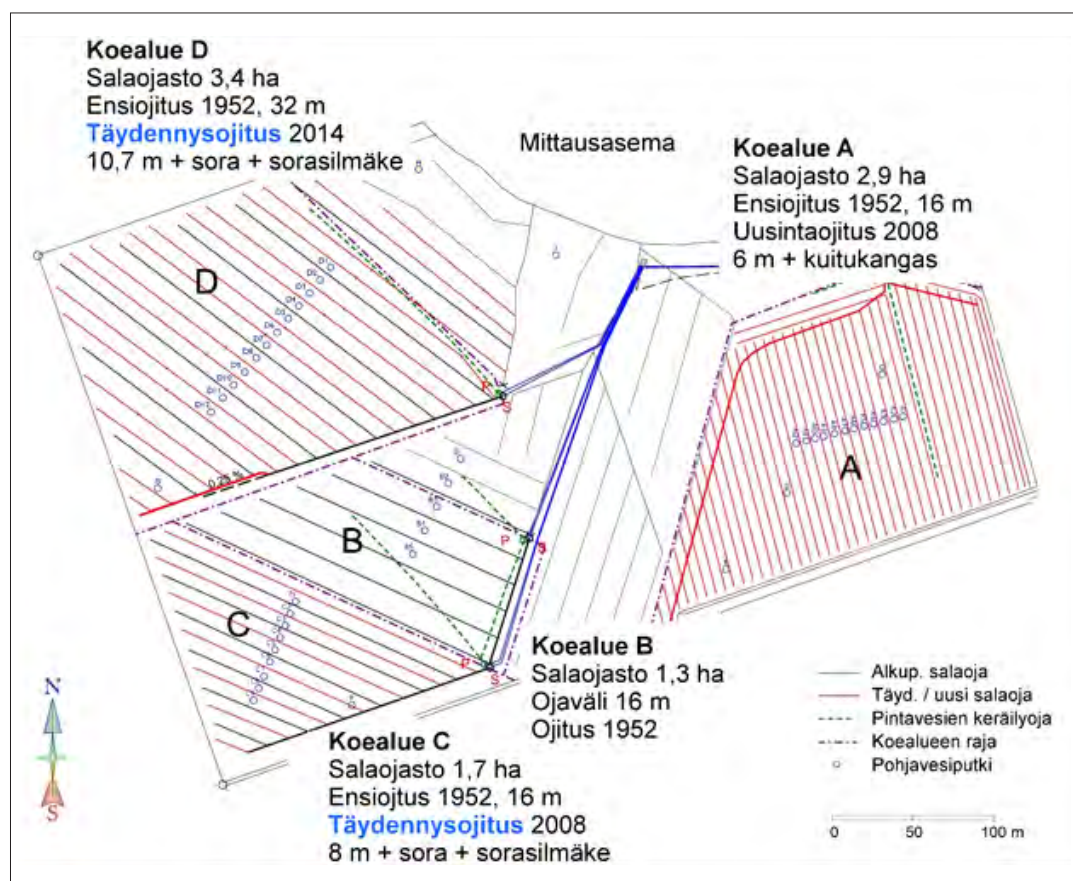
Hanke tuotti tietoa kasvintuotannon, maan kuivatuksen ja vesiensuojelun suunnittelua varten ja se koostui neljästä osahankkeesta, joiden yksityiskohtaiset tavoitteet olivat:

1. Selvittää, miten säätösalaajitus ja altakastelu vaikuttavat pellon vesitaseeseen komponentteihin ja pohjavedenpinnan korkeuteen, satoon ja vesistökuormitukseen peltoalueen mittakaavassa tavanomaisella kivennäismaalla. Lisäksi tutkittiin kasvihuonekaasupäästöjä maan eri kosteustiloissa. Kohdealueena oli säätösalaajituskoekenttä Sievissä.
2. Selvittää kokeellisesti, miten valtaojan padotus vaikuttaa pohjavedenpinnan korkeuteen padon yläpuolisilla peltoalueilla. Kohdealueena oli Korvenoja Järvikylässä Sievissä.
3. Kehittää matemaattinen mallijärjestelmä, joka kuvaa salaajituksen ja valtaojien välistä vuorovaikutusta ja säätöä.
4. Selvittää, miten täydennyssalaajitus ja sen jälkeen tehtävä maan biologinen ja mekaaninen kuohkeutus vaikuttavat märkyydestä kärsineen pellon tuottokykyyn ja vesistökuormitukseen sekä maan rakenteeseen. Lisäksi tutkittiin fosforilannoituksen vaikutusta satotasoon ja kasvihuonekaasupäästöjä salaajitetusta savimaasta. Kohdealueena oli Nummelan koekentän täydennysojitettu peltoalue Jokioisissa.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Nummelan koekenttä

Nummelan koekenttä Jokioisissa on perustettu vuosina 2006–2007 salaojatutkimusta varten. Peltoalue (9 ha) on lievästi viettävä, ja maa on lähes kauttaaltaan aitosavea. Kenttä koostuu neljästä eri tavoin salaojitusta alueesta (alueet A, B, C ja D; kuva 2.1). Alueilla A, B ja C oli alkujaan 16 metrin ojaväli ja alueella D 32 metrin ojaväli. Alue C täydennysojitettiin (ojaväli 16 m -> 8 m) kesäkuussa 2008, ja märkyydestä kärsinyt alue D (ojaväli 32 m -> 10,7 m) kesäkuussa 2014. Alue A uusintaojitettiin keväällä 2008 6 metrin ojavälillä. Alue B (ojaväli 16 m) jätettiin vertailualueeksi. PVO- ja TOSKA-hankkeissa (2006–2017) koekentällä selvitettiin salaojien eri ojaväliden vaikutuksia satoon, maan rakenteeseen, pellon hydrologiaan ja ravinnehuuhtoumiin. Tutkimushankkeissa tehtiin kokeellista tutkimusta ja matemaattista mallintamista (Vakkilainen ym., 2010; Äijö ym., 2014; Äijö ym., 2017; Äijö ym., 2018; Äijö ym., 2021).



Kuva 2.1. Nummelan koekentän ojitukset.

Alueella D vuonna 2014 tehty täydennysojitus (ojaväli 10,7 m) ei ole yksinään riittänyt parantamaan satomääriä eikä maan rakennetta. VesiHave 2 -hankkeessa alueelle D perustettiin maan kuohkeutuskoe, jossa maan rakennetta ja tuottokykyä koetettiin parantaa biologisen (syväjuuriset kasvit) ja mekaanisen (jankkurointi) kuohkeutuksen yhdistelmällä. Alueelta D saatuja mittaustuloksia voidaan verrata koealueiden B ja C mittaustuloksiin sekä alueen D mittauksiin ennen kuohkeutuskoetta.

Koska vuosikymmeniä kestänyt märkyys oli heikentänyt maan fosforitilaa, alueen D reunalle perustettiin fosforin porraskoe, jossa lannoitusportaavat olivat P 0, 5, 15, 30 ja 45 kg ha⁻¹. Kokeella haluttiin selvittää, missä määrin huonot sadot ovat johtuneet huonosta fosforiluvusta eivätkä pelkästään maan rakenteesta.

Nummelan koekentällä oli VesiHave 2 -hankkeen aikana menossa siis kolme koetta: koko kentän koe, kuohkeutuskoe ja fosforin porraskoe.

2.1.1 Koko kentän koe

Vesihave 2 -hankkeessa jatkettiin Nummelan koekentällä vuodesta 2007 alkaen tehtyjä mittauksia kaikilta neljältä koealueelta. Mittausten tarkoituksena on ollut seurata uusinta- ja täydennysojitusten pitkäaikaisvaikutuksia vesistökuormitukseen, maan ominaisuuksiin ja satoon. Vuodesta 2019 alkaen on seurattu kuohkeutuskokeen yhteydessä alueelle D perustetun syväjuurisen nurmen vaikutuksia vesistökuormitukseen.

On tehty seuraavia mittauksia:

- pinta- ja salaojavalunta (jatkuva mittaus 15 min välein)
- kiintoaine, fosfori- ja typpipitoisuudet pinta- ja salaojavalunnassa (automaattinen näytteenotto virtauksen suhteen, laboratorioanalyysit)
- sadanta (jatkuva mittaus 15 min välein)
- pohjaveden syvyys (osittain manuaalinen ja osittain automaattinen mittaus 15 minuutin välein)
- maan kosteus (manuaalinen mittaus TDR-mittarilla 0–30 cm:n syvyydestä)
- lumen syvyys ja vesiarvo (manuaalinen mittaus, lumikeppi ja lumipuntari)
- roudan syvyys (manuaalinen mittaus, metyleenisiniputket)
- sadon määrä ja laatu (kuiva-aine, hehtolitraino, 1000 jyvän paino, typpipitoisuus)
- maan kemialliset ominaisuudet: maan viljavuus, happamuus ja orgaanisen aineksen pitoisuus (vuosina 2006, 2013, 2018, 2020 ja 2022)

Lisäksi on vuosina 2006 ja 2013 on analysoitu maan rakenneominaisuuksia. Analyysimenetelmät ja tulokset on esitetty julkaisuissa Vakkilainen ym., (2010) ja Äijö ym., (2014).

Nummelan koekentältä mitattiin kasvihuonekaasuja kesäkausina vuosina 2020–2022 sen selvittämiseksi, vaikuttaako maan rakenne kasvihuonekaasupäästöihin. Mittauksia tehtiin eri olosuhteissa alueelta C, jossa maan rakenne oli hyvä ja alueelta D, jossa maan rakenne oli huono. Mittaukset tehtiin paljaasta maasta neljänä kerranteena pimeillä kammioilla. Kammioista otettiin kaasunäytteitä, joista analysoitiin CO₂, N₂O ja CH₄ laboratoriossa kaasukromatografisesti.

Taulukko 2.1. Nummelan koekentän alueiden A-C viljelytoimet VesiHave-hankkeiden aikana vuosina 2019–2022. Alueen D viljelytoimet on esitetty kohdassa 2.1.2.

	2019	2020	2021	2022
kevätkuokkaus	20.5.2019 joustopiikkiäestys	19.–20.5.2020 joustopiikkiäestys	2.6.2021 joustopiikkiäestys	14.5.2022 joustopiikkiäestys
kylvö	20.5.2019 Niklas-kaura 195 kg ha ⁻¹	21.5.2020 Eversti-ohra 268 kg ha ⁻¹	2.6.2021 Niklas-kaura 208 kg ha ⁻¹	14.5.2022 Vipekka-ohra 260 kg ha ⁻¹
lannoitus	20.5.2019 + 3.6.2019 NPK 100-21-18 kg ha ⁻¹	21.5.2020 NPK 94-10-18 kg ha ⁻¹	2.6.2021 NPK 94-0-4 kg ha ⁻¹	14.5.2022 NPK 86-0-3 kg ha ⁻¹
lannanlevitys	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä
torjunta- ainekäsittely	9.5.2019 Glyfosaatti 25.6.2019 Biathlon 4D	26.6.2020 Duplosan Meko	22.6.2021 Biathlon 4D 23.9.2021 Glyfosaatti	17.6.2022 Biathlon 4D
puinti/niitto	18.9.2019	1.10.2020	3.9.2021	6.9.2022
syysmuokkaus	7.11.2019 kultivointi	28.10.2020 kultivointi	13.10.2021 kultivointi	28.9.2022 lautasmuokkaus

Typpimittausten aineistoanalyysi ja tilastollinen tarkastelu

Täydennysojituksen vaikutuksia typen fraktioiden huuhtoutumiseen selvitettiin aineiston analysoinnilla (Jokinen ym., 2023). Aineistona käytettiin Nummelan koekentän mittaus- ja havaintotietoja valumavesien määrästä sekä laadusta. Analyysissä tarkasteltiin 11 vuoden jaksoa (2008–2018), josta alueen D täydennysojitusta edeltävä jakson pituus oli 6,5 ja sen jälkeisen 4,5 vuotta.

Tarkasteltavia muuttujia olivat salaojavalunta, pintakerrosvalunta sekä kokonaisvalunta. Näistä valuntareiteistä tarkasteltiin myös erikseen typen fraktioiden pitoisuuksia sekä kuormia. Kenttädata koostui automaattisesti mitatuista valunta-aikasarjoista sekä valunnoista kerätyistä kokoomanäytteistä, joista määritettiin kokonaistypen, nitraattitypen ja ammoniumtypen pitoisuudet. Pitoisuuksista ja valuntamäärästä laskettiin typen fraktioiden kuormat sekä salaojavalunnalle että pintakerrosvalunnalle.

Aineistoanalyysissä käytettiin visuaalista tarkastelua, jossa tutkittiin, kuinka alueen D vuosivalunnat, vuosittaiset keskipitoisuudet ja vuosikuormat muuttuivat täydennysojituksen jälkeen. Tilastollisessa tarkastelussa tutkittiin alueen D kuukausittaisten arvojen eroja muihin alueisiin nähden. Tilastollinen tarkastelu tehtiin kumulatiivisten summien ja Pettitin testin avulla. Kumulatiiviset summat näyttävät muutoksen suunnan, kun taas Pettitin testi paljastaa muutospisteet aikasarjoissa.

Aineistoanalyysia ei tehty ammoniumtyypelle, koska sen arvot olivat hyvin pienet muihin fraktioihin nähden. Sen sijaan tarkasteltiin jäännöstyyppiä, joka saatiin vähentämällä kokonaistypestä analysoitu epäorgaaninen tyyppi (NO₃⁻ ja NH₄⁻-N).

2.1.2 Kuohkeutuskoe

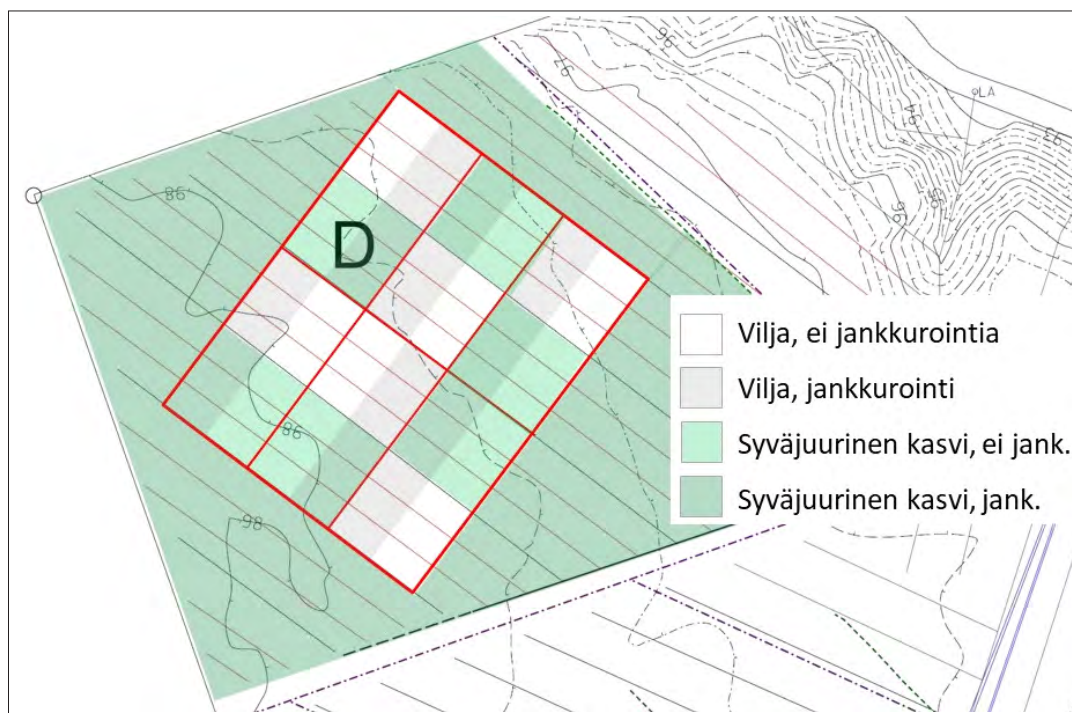
Nummelan kentän märkyydestä kärsineelle alueelle D perustettiin keväällä 2019 monivuotinen maan kuohkeutuskoe, joka valmistuu vuonna 2024. Tässä raportissa esitetään siten vain kokeen hoitotoimet.

Alueen D keskellä on ruutukoe (kuva 2.2), jossa maan rakennetta ja vesitaloutta parannetaan biologisen ja mekaanisen kuohkeutuksen yhdistelmällä ja jossa parannustoimien vaikutuksia verrataan ”käsittlemättömään” maahan eli viljanviljelyyn. Biologisessa kuohkeutuksessa syväjuuriset nurmikasvit rei’ittävät maata, ja mekaanisessa kuohkeutuksessa jankkuri rikkoo maata.

Ruutukokeessa on neljä käsittelyä; 1) vilja, ei jankkurointia, 2) vilja, jankkurointi, 3) syväjuurinen nurmi, ei jankkurointia, 4) syväjuurinen nurmi, jankkurointi. Nurmen kasvijaikseoksessa oli sinimailasta, rehumailasta, ruokonataa ja timoteitä (kuva 2.3).

Ruutukokeen ympärillä, koko lopulla alueella D kasvaa syväjuuristen nurmikasvien seos (kuva 2.3). Näin alue D toimii lähes kokonaan nurmea kasvavana alueena, jonka valunta ja huuhtoumat ovat vertailukelpoisia alueisiin A–C.

Koko Nummelan koekenttää on aina lannoitettu samalla tavalla. Ainoa poikkeus on tehty vuodesta 2019 alkaen alueen D nurmelle, jota on lannoitettu pienemmällä typpimäärällä tyypeä sitovien sini- ja rehumailaskasvien takia. Alueen D nurmen viljelytoimet on esitetty taulukossa 2.2. Alueen D ruutukokeen viljaruutuja on käsitelty samalla tavalla kuin vilja-alueita A-C (taulukko 2.1).



Kuva 2.2. Kuohkeutuskoe Nummelan koekentän alueella D.

Jotta nurmella olisi mahdollisimman paljon energiaa juurten kasvattamiseen, nurmi niitetään vain kerran kesässä kokeen aikana.

Ruutukokeen ja sitä ympäröivän nurmen mekaaninen kuohkeutus tehtiin kesällä 2022, kun nurmen juuret olivat kasvaneet syvälle (kuva 2.4).

Taulukko 2.2. Nummelan kuohkeutuskokeen (alue D) syväjuurisen nurmen viljelytoimet VesiHave-hankkeiden aikana vuosina 2019–2022. Ruutukokeen viljaruutuja on käsitelty kuten alueita A-C (ks. taulukko 2.1).

	2019	2020	2021	2022
kevätmuokkaus	20.5.2019 joustopiikkiäestys			
kylvö	7.6.2019 nurmiseos 20 kg ha ⁻¹ , suojaviljana Niklas- kaura 120 kg ha ⁻¹	22.6.2020 täydennyskylvö huonon talvehtimisen takia		
lannoitus	20.5.2019 + 3.6.2019 NPK 100-21-18 kg ha ⁻¹	22.6.2020 NPK 50-10-17 kg ha ⁻¹	31.5.2021 NPK 47-0-2 kg ha ⁻¹	ei lannoitusta
lannanlevitys	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä
torjunta-ainekäsittely	9.5.2019 Glyphosaatti 19.6.2019 Basagran SG	28.7.2020 Basagran SG	ei rikkakasvien torjuntaa	ei rikkakasvien torjuntaa
niitto	25.7.2019 tuoreen suojaviljan korjuu	17.7.2020	29.6.2021	28.6.2022
muuta				1.7.2022 jankkurointi



Kuva 2.3. Alueen D nurmea.



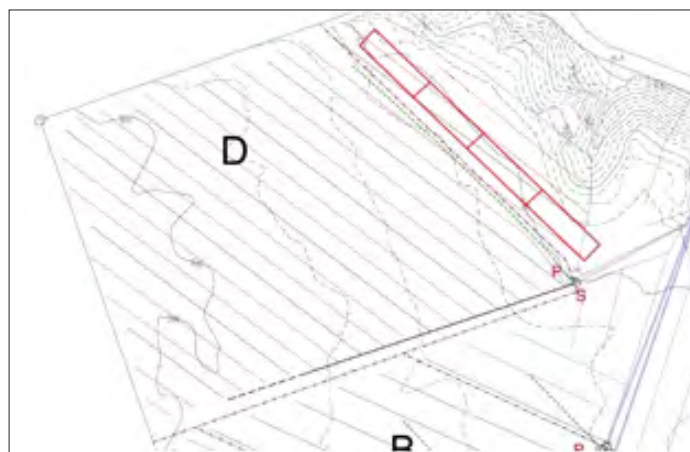
Kuva 2.4. Kuohkeutuskokeen neljä käsittelyä heti jankkuroinnin jälkeen 1.7.2022. Nurmi oli niitetty ennen jankkurointia.

2.1.3 Fosforin porraskoe

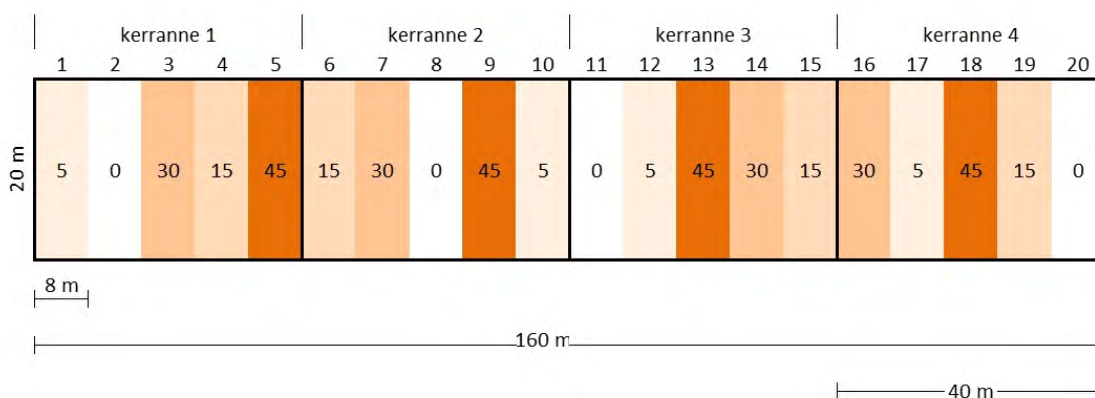
Nummelan koekentän alueen D huonot sadot voivat johtua maan huonon rakenteen lisäksi myös huonosta fosforiluvusta, minkä takia fosforin vaikutusta satoon tutkitaan erillisessä fosforin porraskokeessa. Koe sijaitsee alueella D olevan kuohkeutuskokeen vieressä sala-ojituskokeen ulkopuolella (kuva 2.5). Koe on satunnaistettujen täydellisten lohkojen koe, ja siinä on neljä kerrannetta. Kokeen järjestelyt on esitetty kuvassa 2.6.

Koe perustettiin vuonna 2019, ja sitä jatketaan edelleen. Jokaiselta koeruudulta otetaan maanäytteet keväisin ennen lannoitusta 0–10 cm:n ja 10–20 cm:n syvyydestä. Näytteistä määritetään maan viljavuus, jossa fosfori määritetään Suomessa käytetyllä happamalla ammoniumasetaattiuutolla (HAAC). Tämän lisäksi fosfori analysoidaan Mehlich- ja Olsen-P -menetelmillä. Lisäksi määritetään fosforin kyllästysasteet HAAC- ja Mehlich-uutoilla tehdyistä analyyseistä.

Koeruutujen viljelytoimet on esitetty taulukossa 2.3. Viljelykasvina on ollut joko ohra tai kaura. Satonäytteistä määritetään sadon määrä, hehtolitraino, 1000 jyvän paino, typpipitoisuus (valkuainen) sekä kivennäispitoisuudet (mm. fosforipitoisuus).



Kuva 2.5. Fosforin porraskokeen sijainti Nummelan koekentällä.



Kuva 2.6. Fosforin porraskokeen koejärjestely. Lannoitusmäärät 0, 5, 15, 30 ja 45 kg ha⁻¹.

Taulukko 2.3. Fosforin porraskokeen viljelytoimet.

	2019	2020	2021	2022
kevätkuokauspv.	23.5.2019	29.5.2020	8.6.2021	16.5.2022
kevätkuokausväline	Jyrsin	Joustopiikkiäes	Joustopiikkiäes	Joustopiikkiäes
kylvö- ja lannoituspv.	23.5.2019	29.5.2020	8.6.2021	17.5.2022
viljalaji ja -lajike	Niklas-kaura	Eversti-ohra	Niklas-kaura	Vipeka-ohra
siemenmäärä	195 kg ha ⁻¹	265 kg ha ⁻¹	210 kg ha ⁻¹	260 kg ha ⁻¹
typen määrä	100 kg ha ⁻¹	100 kg ha ⁻¹	100 kg ha ⁻¹	100 kg ha ⁻¹
fosforin määrä	koesuunnitelman mukaan			
kasvinsuojelu pv.	19.6.2019	26.6.2020	2.7.2021	17.6.2022
glyfosaatti, pv	9.5.2019	ei	23.9.2021	ei
syysmuokauspv.	11.11.2019	ei	8.10.2021	6.10.2022
syysmuokausväline	Kultivaattori		Kultivaattori	Kultivaattori
Maanäytteiden ottopv.	13.5.2019	27.4.2020	5.5.2021	2.–3.5.2022
satonäytteiden ottopv.	29.–30.9.2019	21.9.2020	9.9.2021	9.9.2022

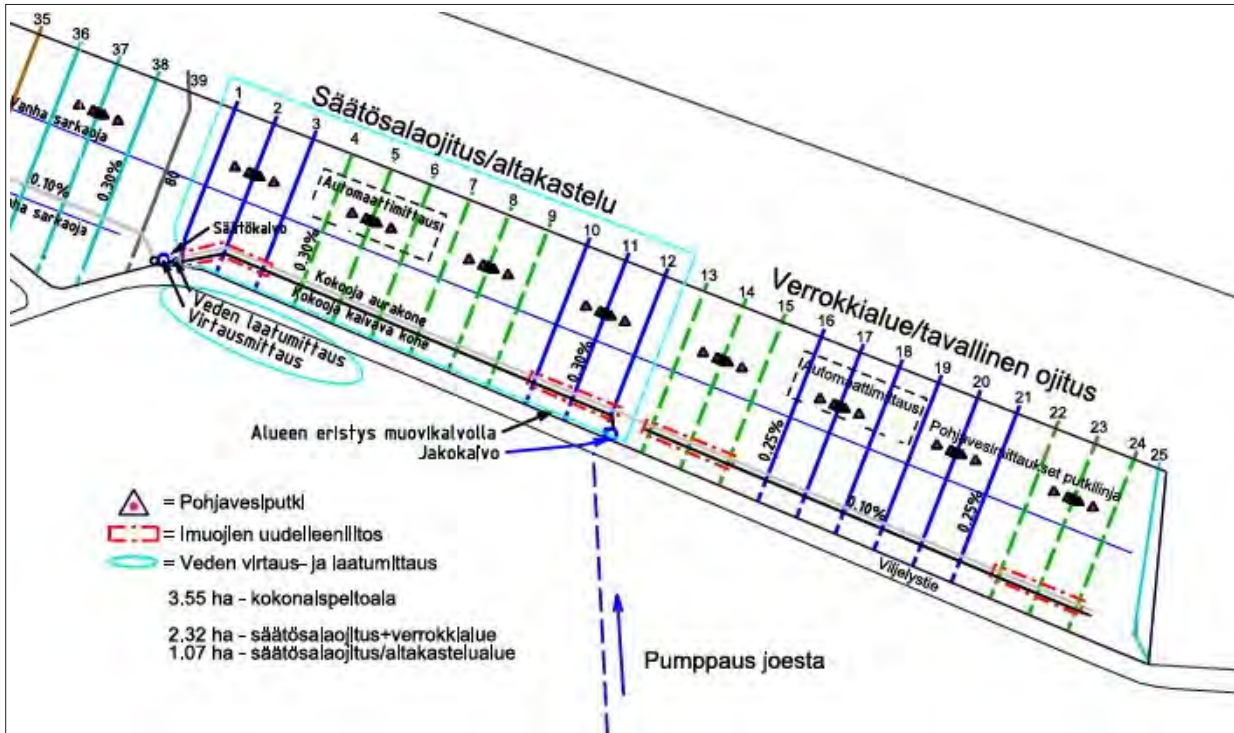
2.2 Sievin säätösaloituskenttä

Sievin koekenttä perustettiin vuonna 2015 TOSKA-hankkeessa (2015–2017), jossa selvitettiin kaivavalla salaojakoneella ja aurakoneella tehtyjen ojitusten toimivuutta (Äijö ym., 2017; Äijö ym., 2018; Salo ym., 2019). Koekentän kokonaispinta-ala on 3,55 ha. Peltoalue on suorakulmion muotoinen ja maastoltaan tasainen (keskikaltevuus alle 0,2 %). Säätösaloitetun alueen pinta-ala on 1,07 ha ja tavanomaisesti salaojitettun vertailualueen 1,25 ha. Koekenttää ympäröivät maastot ovat tasaisia ja samantyyppistä viljelysmaata. Vääräjoki virtaa 300 metrin etäisyydellä pellosta (kuva 2.7). Pellon maalaji on hietaa ja hiuetta (Äijö ym., 2017).

Aiemman VesiHave-hankkeen alussa, toukokuussa 2019, osa (1,07 ha) Sievin koepelosta muutettiin säätösaloitettuksi ja osa (1,25 ha) jätettiin ennalleen (tavanomainen salaojitus) vertailualueeksi siten, että molemmilla koealueilla on oma kokoojaoja. Imuojaväli on lohkolta 15 metriä. Koekentän salaojakartta on esitetty kuvassa 2.8. Säätöalueen alareunassa on yksi säätökaivo, jolla voidaan padottaa vettä alueella. Kokoojaojan yläpäässä on jakokaivo altakastelua varten. Vesi pumpataan läheisestä Vääräjoesta. Vääräjoen valuma-alue vedenottoa kohdalla on noin 560 km² (<https://paikkatieto.ymparisto.fi/value/>), josta noin 60 % on metsää ja 13 % maatalousmaata. Valtaosa maatalousmaasta sijaitsee lähellä vedenottoa.



Kuva 2.7. Sievin koekenttä sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla Sievin Vanhallakirkolla Vääräjoen varrella. Kasteluveden pumppauslinja näkyy kuvassa sinisellä (P 63° 55,978' ja I 24° 20,646').



Kuva 2.8. Sievin koekenttä. Säätösalaajitettu alue (imuojat 1–12, 1,07 ha) ja tavanomainen salaajitus (imuojat 13–24, 1,25 ha). Pohjavesiputkien sijainnit on merkitty kolmioilla.

Koealueet on eristetty toisistaan muovikalvolla (aluskate) koealueiden välillä tapahtuvan veden liikkeen estämiseksi. Muovikalvo myös hidastaa säätökentällä vedenpinnan laskua ja vähentää pumpattavan kasteluveden tarvetta, kun vesi ei pääse karkaamaan pois pelloilta. Muovin yläreuna on 0,3–0,4 m syvyydessä, jotta muokattaessa koneet eivät osu katteeseen. Muovin alareuna on 1,5–1,8 metrin syvyydessä.

Kummankin koealueen kokoojajot liittyvät mittauskaivoon, jossa salaajavalunnan määrää mitattiin ultraäänivesimittareilla, ja kokoomavesinäytteitä otettiin automaattisesti magneettiventtiilien avulla. Vuonna 2022 salaajavaluntamittarit jouduttiin lukemaan manuaalisesti tiedonsiirron teknisen vian vuoksi. Salaajavalunnasta otettiin kokoomanäytteitä siten, että magneettiventtiili aukesi ja vesinäyte valui kanisteriin automaattisesti, kun näytteenottoehdon mukainen määrä, 1 tai 2 m³, vettä oli virrannut mittarin läpi. Vettä virtasi 15 sekuntia kanisteriin. Vuoden 2022 teknisen vian vuoksi magneettiventtiilit eivät olleet tuolloin käytössä, vaan salaajavalunnan laatu näytteet otettiin manuaalisesti, ja ne kuvaavat vain näytteenottohetken pitoisuutta. Näytteistä analysoitiin kiintoaineen (GF/C), kokonaisfosforin, fosfaattifosforin, kokonaistypen, ammoniumtypen, nitriitti- ja nitraattitypen summan ja nitriittitypen pitoisuudet KVVY Tutkimus Oy:ssä.

Mitattujen salaajavalunnan määrien ja pitoisuuksien perusteella laskettiin fosforin ja typen kuormat vuosille 2020–2022. Vuosien 2020–2021 osalta laskelmat kattavat kaiken salaajavalunnan, ja kokoomanäytteiden ravinnepitoisuudet vastaavat kunkin näytteenottovälin keskimääräistä konsentraatiota. Vuoden 2022 huhtikuun (11.–27.4.) ja syksyn salaajavaluntamittauksissa oli puutteita, joten havaittu valunta, ja siten myös laskennal-

linen kuormitus on todellista pienempi. Lisäksi vuoden 2022 launäytteet kuvastavat näytteenottohetkellä vallinnutta pitoisuutta, eivätkä valunnalla painotettua keskiarvoa, joten niiden edustavuus on aiempia vuosia heikompi. Näiden epävarmuustekijöiden vuoksi esitetyt vuoden 2022 ravinne- ja kiintoainekuormat lienevät aliarvioita.

Pohjavedenpinnan syvyyttä mitattiin eri etäisyyksillä salaojasta olevista pohjavesiputkista. Pohjavesiputkien etäisyydet salaojasta olivat 0,2, 0,6, 2,5 ja 7,5 m, ja niitä oli sijoitettu salaojan molemmille puolille lukuun ottamatta etäisyydellä 0,2 m sijainnutta putkea. Sääto- ja verrokkialueilla mitattiin kasvihuonekaasupäästöjä maan eri kosteustiloissa.

Säätosalaojitus saatiin toimintaan kesäkuussa 2019, jonka jälkeen padotusta pidettiin ylhäällä koko ajan, lukuun ottamatta toukokuun 2020 kylvöaikaa ja vuoden 2021 loka-kuuta, jolloin pohjavedenkorkeus nousi sateisena aikana lähelle maanpintaa. Padotustaso oli noin +74.75 (ETRS-TM35/N2000) ja maanpinta kaivolla +75.25. Kuivavara kaivolla oli 0,5 m.

Säätosalaojitetulle alueelle pumpattiin kesäisin kasteluvettä säätoalueen yläpäässä olevaan jakokaivoon. Jakokaivosta vesi virtasi kokoojaojaa pitkin säätokaivoon, jossa vedenpinta nousi padotuskorkeuteen asti. Noustessaan vesi kulkeutui imuojiin, josta se pääsi imeytymään maahan. Padotuskorkeuden yli mennyt vesi virtasi poistoputkeen ja edelleen valtaojaan. Vuosina 2019–2020 kasteluun käytettiin polttomoottoritoimista pumppua, jota koekäytettiin heinäkuussa 2019, ja vuoden 2020 touko-heinäkuussa pumppauspäiviä oli 26. Vuonna 2021 otettiin käyttöön aurinkokennoista virtansa saava sähköpumppu (kuva 2.9), joka voitiin pitää käytössä jatkuvasti, ja se toimi joka päivä 11.6.–12.10.2021 ja 19.5.–12.9.2022. Vuonna 2022 kasteluun käytetyn veden määrää mitattiin jatkuvatoimisella mittarilla.



Kuva 2.9. Kasteluvettä pumpattiin Vääräjoesta sähköpumppulla, joka sai virtansa aurinkokennoista.

Viljely- ja muokkaustoimenpiteet

Koekentällä viljeltiin kasvukausina 2015–2018 ohraa. Vuonna 2019 pellolla oli syysruis. Vuonna 2020 viljeltiin Aukusti siemenohraa ja samalla suojaviljaan perustettiin Timoteinurmi siemenviljelyä varten vuosiksi 2021–2023. Viljelykiertoon ovat kuuluneet viljat (ohra ja kaura), nurmet ja rypsi ennen tutkimusta. Viljelytoimenpiteet vuosina 2019–2022 on esitetty liitteessä 1.

Satomittaukset

Koealueiden sadon määrä ja laatu mitattiin ruutunäytteistä, jotka otettiin ennen sadonkorjuuta salaojan kohdalta ja 7,5 m etäisyydeltä salaojasta. Viljoilla kerranteita oli kumpaakin etäisyyttä kohti 12 molemmilla salaojitusmenetelmillä, joten näytteitä tuli yhteensä 48. Yksi näyteruutu edusti 0,25 m² satoalaa, joka muutettiin vastaamaan hehtaarisatoa. Satonäytteiden käsittelyssä pussiin kerätyt jyvät puitiin irti tähkistä ja jyväsato punnittiin. Sadosta määritettiin kuiva-ainepitoisuus.

Säätösaloajitetun ja vertailualueen nurmisadoista kerättiin kuusi rinnakkaista näytettä salaojan kohdalta ja 7,5 m etäisyydellä salaojasta (yhteensä 24 näytettä). 0,25 m² alalta otettiin talteen kaikki maanpäällinen biomassa. Näytteistä määritettiin kuiva-ainepitoisuus. Säätösaloajituksen ja altakastelun sekä paikan vaikutusta biomassan määrään tutkittiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä IBM SPSS Statistics 27-ohjelmalla.

Kasvihuonekaasuemissioiden mittaus

Hiilidioksidin ja dityppioksidin emissiota mitattiin staattisen pimeän kammion menetelmällä lumettomina aikoina kaksitoista kertaa toukokuun 2020 ja marraskuun 2022 välisenä aikana. Molemmilta koealueilta otettiin neljä rinnakkaisnäytettä samaan aikaan. Maan pintaan pysyvästi asennetut kammiot suljettiin ilmatiiviisti, ja tutkittavien kaasujen annettiin kerääntyä kammioihin. Kammioista otettiin näytteet kolme kertaa niiden sulkemisen jälkeen, ja kaasujen pitoisuuksien eroista laskettiin emissionopeus. Havaittuja emissionopeuksia verrattiin pohjaveden korkeuksiin. Säätösaloajituksen vaikutusta kasvihuonekaasuemissioiden määrään testattiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä sekä laskemalla emissioiden ja pohjaveden korkeuksien väliset korrelaatiokertoimet IBM SPSS Statistics 27 -ohjelmalla.

2.3 Valtaojan padotus Sievissä

Valtaojan vedenpinnan padotusta ja säätöä tutkittiin Sievin Järvikylällä Korvenojassa (kuva 2.10) jatkamalla vuonna 2019 VesiHave-hankkeen puitteissa alkanutta tutkimusta. Tutkimusalue ja padotusjärjestely on kuvattu tarkemmin VesiHave-hankkeen raportissa (Äijö ym., 2021). Patoa (kuva 2.11) huollettiin syksyllä 2021.

Pohjavedenpintaa seurattiin syksystä 2019 saakka käsin mitaten yhteensä 49 kertaa marraskuun 2019 ja syyskuun 2022 välillä (keskimäärin noin kolmen viikon välein), ja keväällä 2021 asennettiin jatkuvatoiminen vedenpinnan korkeuden mittaus säätöpadon eteen. Pohjaveden korkeutta mitattiin kahdelta linjalta, jotka olivat eri etäisyyksillä padosta: linja 1 kauempana ja linja 2 lähempänä patoa (kuva 2.12). Linjat olivat kohtisuoraan valtaojaan nähden ja niillä oli viisi havaintopistettä: 0, 10, 60, 140 ja 200 m ojasta.

Maanpinta linja 1:n kohdalla on noin puoli metriä linja 2:n maanpintaa korkeammalla, mutta kaltevuus on molemmilla linjoilla sama.



Kuva 2.10. Sievin Järvikylän Korvenoja. Säätopato on kuvan oikeassa yläkulmassa.



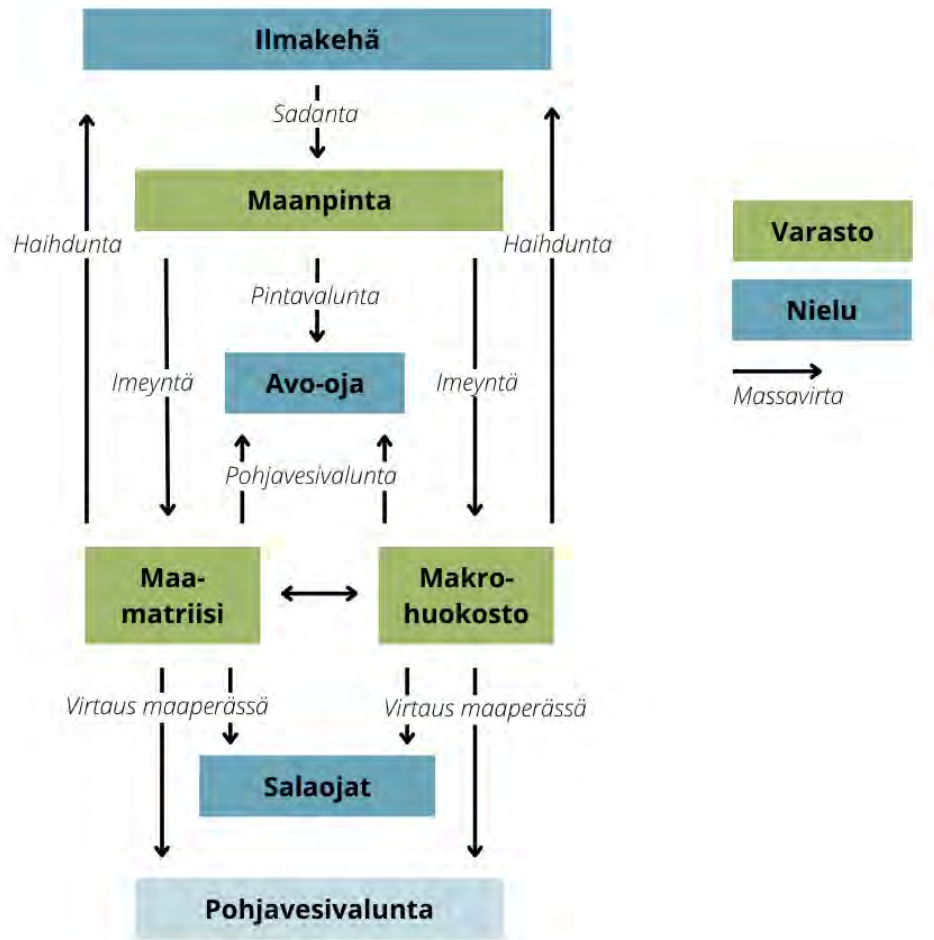
Kuva 2.11. Korvenojan säätopato.



Kuva 2.12. Valtaojan padotusalue ja pohjavesiputkilinjat 1 ja 2.

2.4 Peltoalueen matemaattinen mallintaminen

Mallinnuskokonaisuus toteutettiin kahdessa osassa, joista ensimmäisessä mallinnettiin valtaojan padotuksen vaikutuksia peruskuivatusuoman vedenpinnan korkeuteen (Paavonen, 2023) ja toisessa säätösalojituksen ja valtaojan padotuksen vaikutuksia pellon vesitaseseen sekä pohjavedenpintojen vaihteluun (Isomäki, 2023). Mallinnukset toteutettiin FLUSH-mallilla (Warsta, 2011), jossa veden virtauksen (Warsta ym., 2013a), eroosion (Warsta ym., 2013b), aineiden kulkeutumisen (Salo ym., 2014) ja avouomavirtauksen (Haahti ym., 2016) prosessit on kuvattu numeerisesti. FLUSH-mallia (kuva 2.13) on aikaisemmissa hankkeissa kehitetty ja sovellettu salaojitetuilla savipelloilla (Warsta ym., 2013a; Nousiainen ym., 2015; Turunen ym., 2017; Salo, 2014). FLUSH on hajautettu hydrologinen malli peltoalueen veden, lämmön, eroosion ja aineiden kulkeutumisen laskentaa varten. Mallissa veden liikkeitä maaperässä ratkaistaan kolmessa ulottuvuudessa, ja maan huokosto on laskennallisesti jaettu mikro- ja makrohuokosiin. Mallilla voidaan kuvata peltolohkon valuntareitit pintavaluntana, salaojavaluntana, pohjavesivaluntana tai virtauksena valtaojaan. Mallissa on mukana lumen kertymistä ja sulamista kuvaava energiatasemalli ja maan lämpöasetta kuvaava jäätymismalli, mikä mahdollistaa mallin soveltamisen Suomen olosuhteissa läpi kaikkien vuodenaikojen. Malli muodostaa matemaattisen kuvauksen peltoalueen prosesseista mittakaavassa, joka vastaa peltoalueella tehtävien viljelytoimenpiteiden ja vesitalouden säädön mittakaavaa. Malli on julkaistu avoimena lähdekoodina ja se voidaan räätälöidä erityisiin tutkimusongelmiin sopivaksi (Warsta ym., 2013a). Tässä hankkeessa FLUSH-mallin avouomakomponenttia sovellettiin ensimmäistä kertaa maatalousalueen valtaojan virtaaman ja vedenkorkeuksien laskentaan.

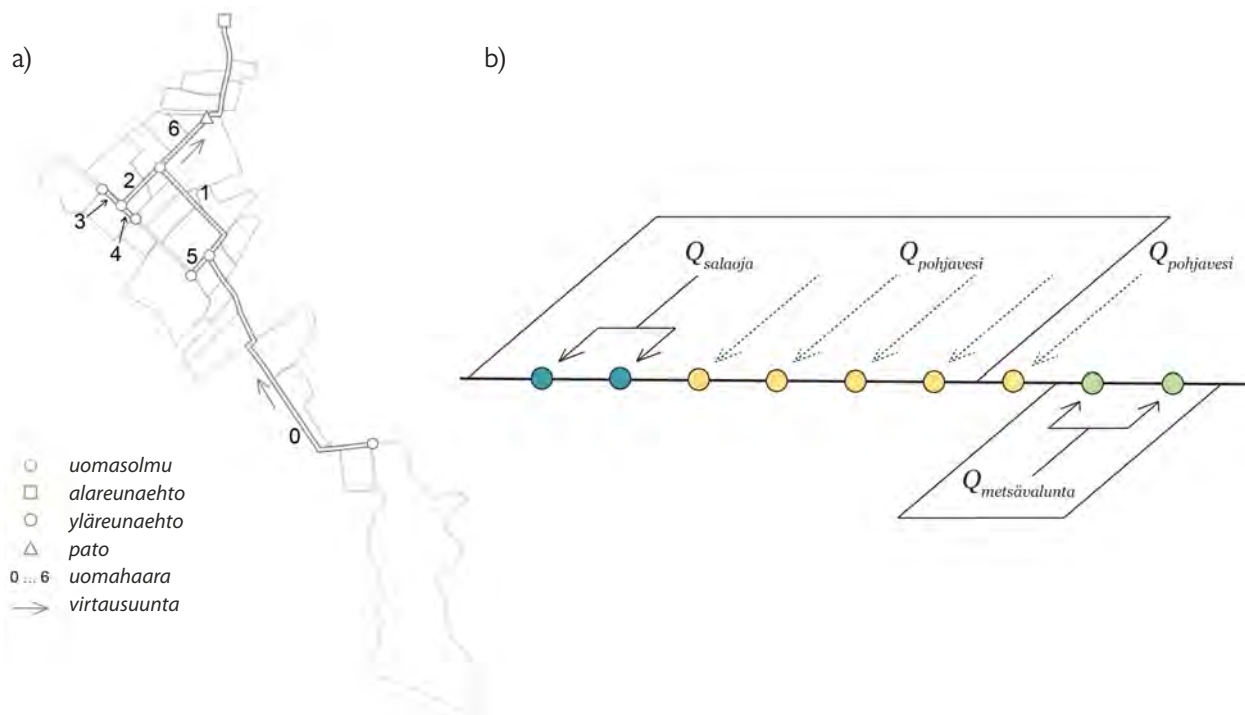


Kuva 2.13. Konseptuaalinen kuvaus FLUSH-mallin hydrologisesta osasta. Simulaatioissa kaikki pohjavesivalunta ohjautui avo-ojaan, eikä muuta pohjavesinielua sen lisäksi käytetty. Mallissa oli lisäksi mukana uomaverkostoa kuvaava hydraulinen osamalli.

2.4.1 Valtaojan padotuksen mallinnus (peruskuivatuksen säätö)

Valtaojan padotuksen mallinnukset toteutettiin Korvenojalla (ks. kohta 2.3), josta oli saatavilla vedenpinnan korkeuden mittauksia mallinnuksen tueksi. Kuvassa 2.14 on esitetty malliin parametrisoitu uomaverkosto. Korvenojan kuivatusuoman padotusta ja tuntiaika-skaalan vaikutuksia uoman vedenpinnan korkeuksiin simuloitiin yhden vuoden (2021) jak-solle (Paavonen, 2023). Korvenojan kuivatusuomaan peltolohkoilta tulevan valumaveden kokonaismäärä (salaoja-, pohjavesi- ja pintakerrosvalunta) vuodelle 2021 saatiin Sievin koekentän mallinnustuloksista (Isomäki, 2023). Uomaan tulevan veden mallinnustulosta käytettiin lisäksi kuvaamaan Korvenojan metsäiseltä latvavaluma-alueelta uoman ylävir-ran osaan tulevaa valumaa (kuva 2.14).

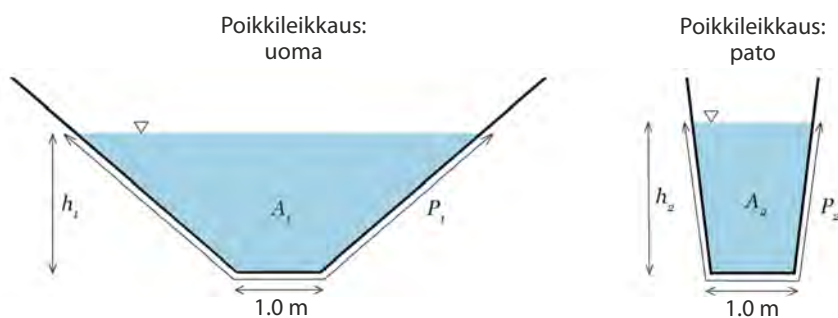
Valtaojan padotuksessa simuloitiin avouomassa tapahtuvaa virtausta yhdessä ulot-tuvuudessa (1D). Uoman poikkileikkauksena (kuva 2.15) käytettiin tyypillistä peruskuiv- vatusuoman muotoa, jonka mittasuhteet saatiin alueen peruskuivatussuunnitelmasta (Sikkilä, 2022). Uoman pohjan korkeus johdettiin alueella toteutetuista mittauksista sekä



Kuva 2.14. Malliin muodostettu valtaojaverkosto (a) ja valtaoajan tulevan valunnan jakautuminen uomaverkostoon (b). Valuma-alueen eteläosan metsäalue on kytketty uomahaaraan 0 latvaan. Valunta on jaettu 3 komponenttiin: salaojavaluntaan, pohjavesivaluntaan ja metsästä tulevaan valuntaan.

maanmittauslaitoksen korkeusmallista (Paavonen, 2023). Valtaoajan pato toteutettiin mallissa siten, että padon kohdalla uoman pohjaa nostettiin padotuskorkeuteen ja poikkileikkauksen muotoa kavennettiin. Uoman alapuolinen reunaehto sijoitettiin padosta alavirtaan etäisyydelle, jossa reunaehdolla ei ollut vaikutusta padon läheisyyteen. Reunaehtona käytettiin v-aukkoisen padon purkautumiskäyrää (Haahti, 2014).

Korvenojan simulaatioita tehtiin tilanteessa ilman patoa sekä kolmella eri padotuskorkeudella (50, 75, 100 cm) ja neljällä eri Manningin karkeuskertoimella (0,03, 0,07, 0,11, 0,15), jotka kuvasivat uoman virtausvastusta. Virtausvastuksen vaihtelun tarkoituksena oli arvioida likimääräisesti kasvillisuuden aiheuttaman virtausvastuksen suurentumisen vaikutusta vedenkorkeuksiin. Mallin tuloksena saatiin vedenpinnan korkeuden vaihtelu uomassa aikaresoluutiolla 1 tunti ja paikkaresoluutiolla 5 m. Eri padotusskenaarioiden ja



Kuva 2.15. Mallissa käytetyt uomaverkoston ja padon poikkileikkaukset.

karkeuskorkeuden vedenpintatulosten erotuksena laskettiin padotusvaikutuksia padon yläpuolella. Padotusvaikutusta arvioitiin lisäksi uomassa sijaitsevien salaojien purkupuutkien korkeustasoon nähden.

2.4.2 Pellon vesitalouden säädön mallinnus (paikalliskuivatuksen säätö)

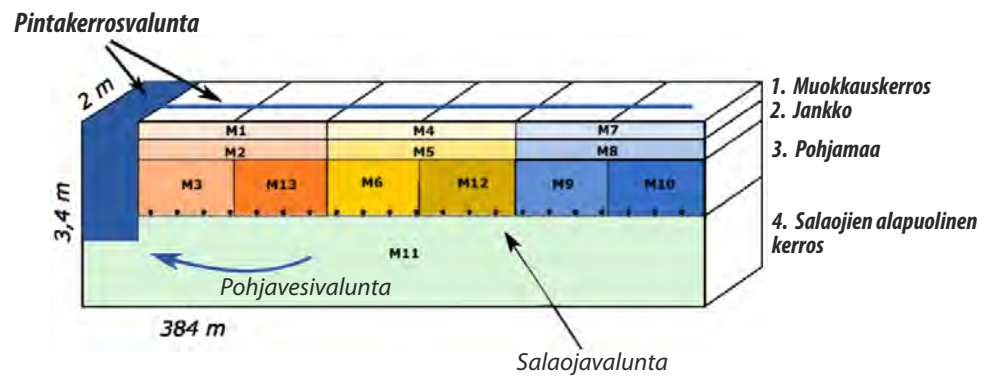
Säätösalaajituksen ja valtaojan padotuksen yhteisvaikutusta mallinnettiin Sievin säätösalaajituskentällä (ks. kohta 2.2), jonne FLUSH-mallisovelluksen olivat aiemmin toteuttaneet Salo ym., (2021) ja Salla ym., (2022). Sievin koepeltoa simuloitiin 12 vuoden jaksolla (2010–2021) käyttämällä mallin syötteenä tunnittaisia säämuuttujia läheisiltä mittauspisteiltä. Sievin koekentän mallinuksissa toteutettiin neljä eri ojitusskenaariota, jotka olivat 1) perustilanne ilman vesitalouden säätöä, 2) jatkuva säätö pellolla ja valtaojassa, 3) pelkkä säätösalaajitus ja 4) pelkkä valtaojan padotus (taulukko 2.4). Tavoitteena oli selvittää, miten eri säätöoitusmenetelmät vaikuttavat pellon vesitalouteen (vesitase ja pohjavedenpinta) hydrologisesti erilaisina aikoina. Lisäksi tarkasteltiin, millainen potentiaali säätöoituksella on pitää kasvukauden aikaista pohjavedenpintaa optimaalisessa syvyydessä eri kohdissa peltoa.

Taulukko 2.4. Mallinnusosiossa simuloituiden säätöoitusmenetelmien, niiden selitykset ja käytetyt lyhenteet.

Skenaario	Selitys	Lyhenne
1	Perustilanne: tavanomainen salaajitus, avonainen valtaoja	S1: SO + AO
2	Säätösalaajitus sekä valtaojan padotus koko ajan päällä	S2: SS + PO
3	Säätösalaajitus koko ajan päällä, avonainen valtaoja	S3: SS + AO
4	Tavanomainen salaajitus, valtaoja padotettu koko ajan	S4: SO + PO

Mallinnusta varten muodostettiin Sievin koepellon kaltainen tyyppiprofiili, jossa laskentaverkon mittasuhteet olivat vaakatasossa 384 m x 2 m (pituus x leveys) ja syvyyssuunnassa 3,4 m (kuva 2.16). Tyyppiprofiili kuvasi veden virtauksen pääasiassa kahdessa ulottuvuudessa pituus-syvyyssuunnassa, jossa maanpinnan kaltevuus oli keskimäärin 0,2 %. Kaltevuuden tarkka topografia ja maalajit otettiin Sallan ym., (2022) Sieviin muodostamasta laskentaverkosta. Salaajat olivat sijoitettu verkkoon 15 m ojavälillä noin 1 m syvyyteen. Laskentaverkon toiseen reunaan parametrisoitiin 1,5 m syvyinen valtaoja, jonne pellon valumavedet purkautuivat. Valtaojan padotus toteutettiin mallinuksissa siten, että vedenpinta säädettiin vakiotasolle, joka oli 0,6 m maanpinnasta. Säätösalaajituksessa käytettiin niin ikään vakiosäätöä, joka oli 0,6 m maanpinnasta. Säätösalaajituksen padotus toteutettiin teoreettisena maksimivaikutuksena, jossa säätö asetettiin jokaiseen salaajaan samalle padotustasolle. Teoreettista maksimivaikutusta kuvattiin myös valtaojassa, jossa padotus pysyi koko laskenta-ajan valitulla korkeudella eikä valtaojan vedenpinnan laskua esimerkiksi haihdunnan takia huomioitu. Valtaojan padotus asetti fysikaalisen reunaehdon peltoprofiilin pohjavedenpinnan korkeudella, minkä lisäksi simulaatioissa valtaojassa oleva vesi padotti myös salaajia pellon topografian mukaisesti. Pohjavesivalunta pääsi purkautumaan maaprofiilista valtaojaan, mutta veden virtausta valtaojasta takaisin peltolle ei sallittu.

FLUSH-mallin tuloste oli tunnittainen aikasarja useasta hydrologisesta muuttujasta pellolla: todellinen haihdunta (evapotranspiraatio), salaojavalunta, pintakerrosvalunta, pohjavesivalunta valtaojaan ja pohjavedenpinta 23 eri etäisyydellä uomasta. Mallin laskemia hydrologisia tuloksia eri ojitusskenaarioilla ja erilaisina vuosina verrattiin toisiinsa. Sekä vesitasekomponentteja että pohjavedenpintoja käsiteltiin vuoden jaksoina (tammikuu-joulukuu), minkä lisäksi pohjavedenpinnoissa kiinnitettiin erityistä huomiota kasvukauden (25. toukokuuta – 16. syyskuuta) aikaiseen vaihteluun. Pohjavedenpinnasta muodostettiin todennäköisyysjakauma, jonka perusteella arvioitiin kasvukauden aikaisen pohjavedenpinnan pysymistä optimisyvydessä (60–80 cm maanpinnasta). Optimisyvyys arvioitiin kirjallisuuden perusteella, ja sen ajateltiin kuvaavan hyviä kasvuolosuhteita pellolla. Mallin lasketut vesitasekomponentit laskettiin koko vuoden ajalle, sillä valunnasta suurin osa tapahtuu kasvukauden ulkopuolella. Tarkasteluvuosiksi valittiin jakson kuivin vuosi 2018 ja märin vuosi 2012. Lisäksi tuloksia tarkasteltiin mediaaniolosuhteita kuvaavalta vuodelta 2013.



Kuva 2.16. Sievin koepellosta tehty tyyppiprofiili, pellon valuntareitit sekä eri maalajien sijainti pellolla. Tarkempi kuvaus parametrisoinnista löytyy Salo ym., (2021).

3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

3.1 Nummellan koekenttä

Tähän lukuun on koottu sekä VesiHave 2 -hankkeen että Nummellan koekentän aikaisempien tutkimushankkeiden (Vakkilainen ym., 2010; Äijö ym., 2014; Äijö ym., 2017; Äijö ym., 2018; Äijö ym., 2021) mittaustuloksia vuodesta 2007 lähtien, jotta vuosien vaihtelusta ja ojitustoimenpiteiden vaikutuksista saadaan mahdollisimman kattava käsitys. Valunnan sekä ravinne- ja kiintoainepitoisuuksien ja ainekuormien osalta VesiHave 2 -hankkeen tulokset käsittävät ajanjakson kesäkuu 2020 – toukokuu 2022.

3.1.1 Koko kentän koe

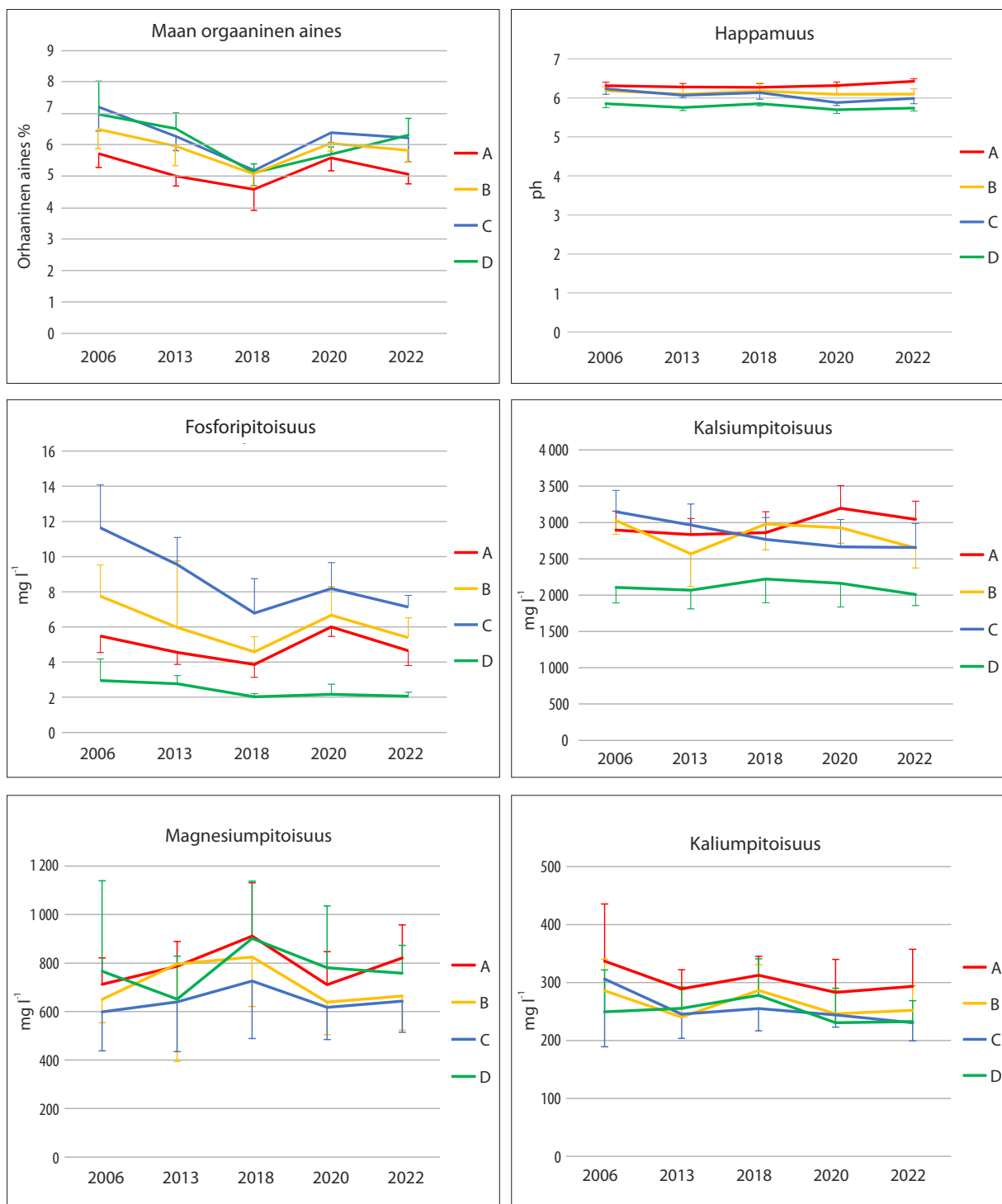
3.1.1.1 Maan ominaisuudet

Nummellan koekentän maa on aitosavea. Pintamaan savespitoisuus on 67 % ja pohjamaan noin 80 % (Vakkilainen ym. 2010). Maan kemialliset ominaisuudet olivat pysyneet melko samansuuruisina kaikilla koealueilla kuudentoista seurantavuoden ajan, vaikka vuosien välillä oli vaihtelua, ja samalta koealueelta otettujen näytteiden välillä on hajontaa (kuva 3.1). Seuranta-ajan alussa olleet korkeat fosforipitoisuudet olivat kuitenkin alentuneet, mikä voi johtua siitä, että kentälle ei ole levitetty fosforia kivennäislannoitteena kahta poikkeusvuotta lukuun ottamatta (2018, 2019) ja kenttä on saanut fosforia vain karjanlannan mukana (2007, 2008, 2017, 2018).

Myös maan orgaanisen aineksen pitoisuudessa havaittiin pieni laskeva trendi. Vuoden 2019 hyvä sato (kuva 3.22) saattoi vaikuttaa siihen, että maassa oli aiempaa enemmän orgaanista ainesta vuoden 2020 mittauksessa.

Alueella D maan pH, kalsiumpitoisuus ja erityisesti fosforipitoisuus olivat merkittävästi alempia kuin muilla alueilla lähes joka vuosi. Huono fosforipitoisuus johtuu todennäköisesti märkyydestä, josta maa oli kärsinyt 1950-luvulta lähtien; kun maa on ollut hapetonta, raudan oksidit ovat voineet pelkistyä 3-arvoisesta 2-arvoiseksi, joka on liukoinen muoto. Kun rauta liikkuu veden mukana hapelliseen kohtaan, 2-arvoinen rauta hapettuu 3-arvoiseksi ja saostuu rautahydroksidiksi. Juuri saostuneen rautahydroksidin pinnalle ei ole vielä sitoutunut mitään, jolloin fosfori voi helposti sitoutua siihen. Fosforia sitoutuu siis erityisen hyvin vastasaostuneisiin rautayhdisteisiin, jotka ovat yleisiä vedenvaivaamissa maissa.

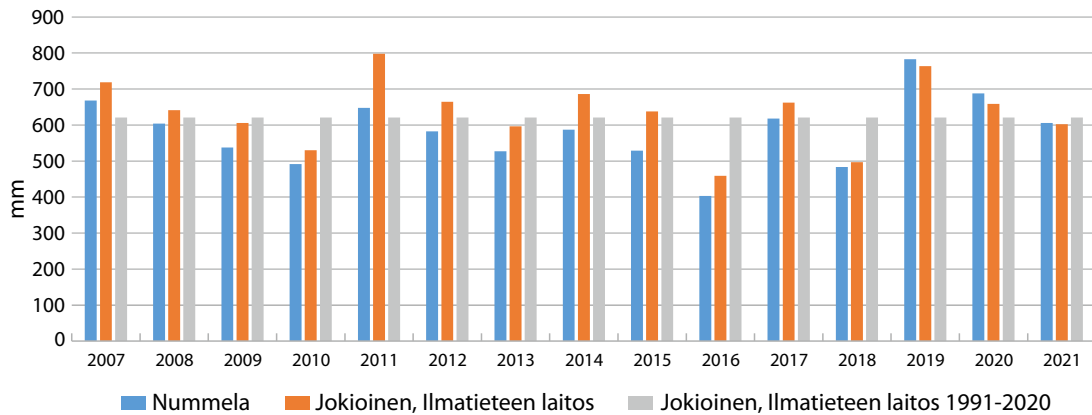
Kentälle levitettiin fosforia kivennäislannoitteena vuosina 2018 ja 2019, mikä paransi maan fosforipitoisuutta vuoden 2020 mittauksessa kaikilla muilla alueilla paitsi alueella D. Tämän havainnon, samoin kuin fosforin porraskokeen tähänastisten tulosten (ks. kohta 3.1.3) perusteella näyttää siltä, että jos savimaan fosforitila on mennyt hyvin huonoksi, sitä on vaikea saada paranemaan fosforilannoituksella ainakaan nopeasti.



Kuva 3.1. Maan kemiallisten ominaisuuksien kehitys vuoden 2006 jälkeen 0–20 cm:n syvyydessä.

3.1.1.2 Sadanta

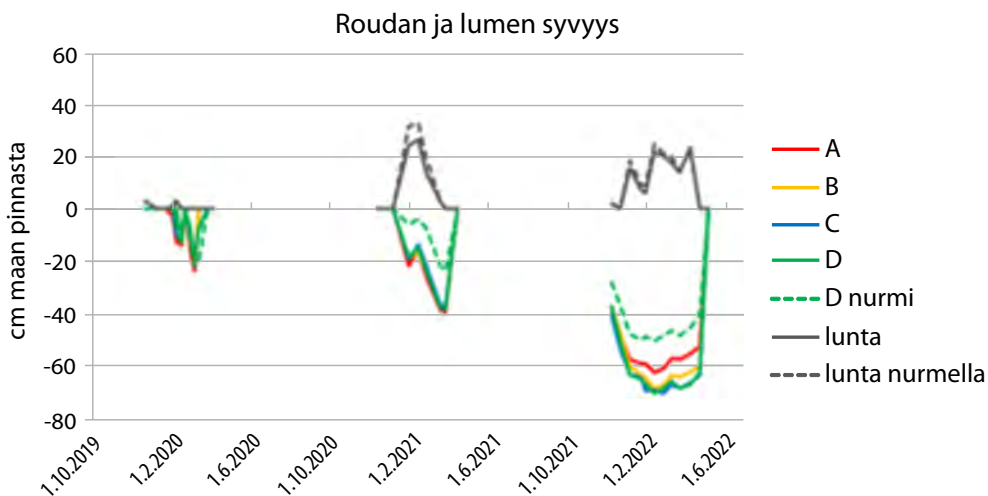
Nummellan koekentän vuoden pituisten tutkimusjaksojen sademäärät (korjaamattomat arvot) vaihtelivat välillä 403–798 mm (kuva 3.2). Koekenttää lähimpänä (noin 7 km kaakkoon) sijaitsevalla Ilmatieteenlaitoksen Jokioisten mittausasemalla sadannan 30 vuoden (1991–2020) keskiarvo (korjaamaton) on 621 mm. VesiHave 2 -hankkeen aikaisien tutkimusjaksojen (06/2020–05/2021 ja 06/2021–05/2022) sadannat olivat Nummellan koekentän viisitoistavuotisen mittauksien keskiarvoa (584 mm) sateisempia (688 mm ja 606 mm).



Kuva 3.2. Nummellan koekentän sekä Ilmatieteen laitoksen Jokioisten mittausaseman vuotuiset (korjaamattomat) sadannat tutkimusjaksoilla (6/2007–5/2007 ... 6/2021–5/2022) sekä vertailukauden 1991–2020 sadannan keskiarvo (Ilmatieteen laitos, Jokioinen).

3.1.1.3 Roudan ja lumen syvyys

Jokaisella alueella olleiden kahden routaputken tulosten perusteella alueiden A–D välillä ei ollut systemaattista eroa roudan syvyydessä VesiHave- ja VesiHave 2 -hankkeiden aikana (kuva 3.3), eikä eroa ollut havaittu aiempinakaan vuosina (Äijö ym., 2021). Mutta alueen D kuohkeutuskokeen nurmi- ja viljaruuduilta tehdyissä mittauksissa nurmea kasvava



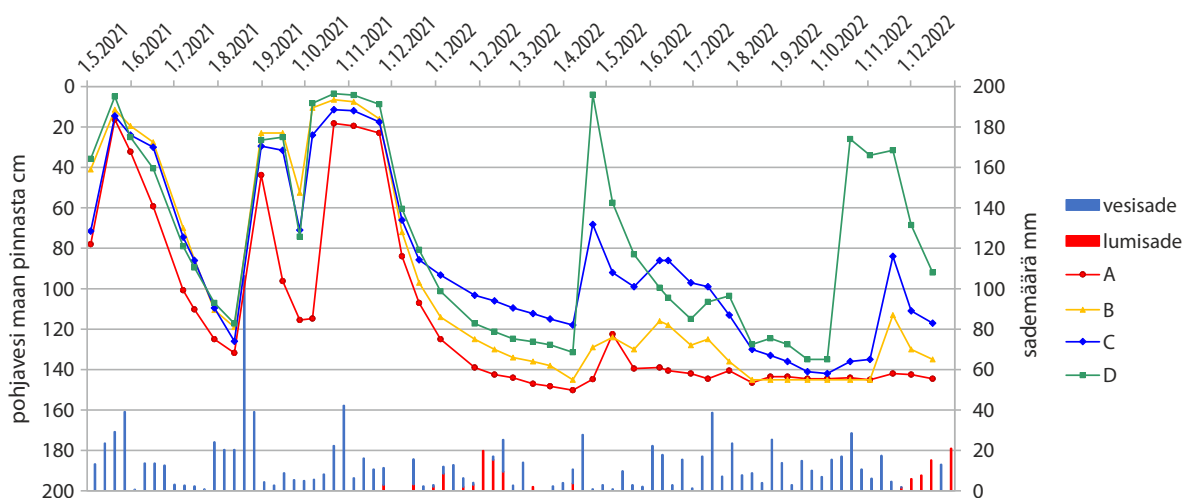
Kuva 3.3. Lumen ja roudan syvyudet alueilla A–D vuosina 2019–2022.

maa ei routaantunut yhtä syvälle kuin viljaa kasvava maa. Maan pinnalla oleva kasvusto näytti siis heikentävän routaantumista.

Routa oli yleensä syvimmillään maaliskuussa juuri vähän ennen kuin se alkoi sulaa. Sulaminen tapahtui sekä pinnasta että syvältä käsin.

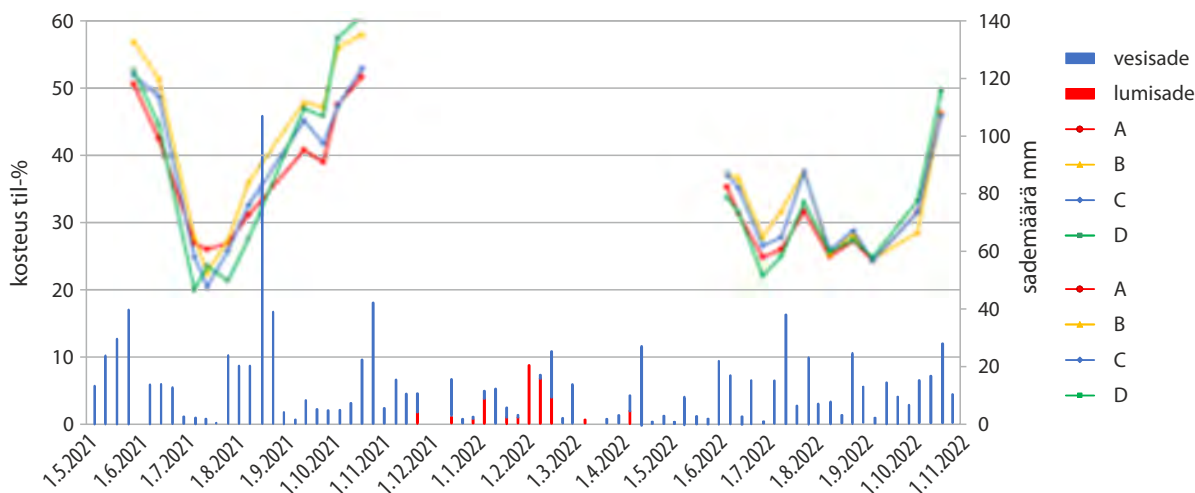
3.1.1.4 Pohjavedenpinnan syvyys ja maan kosteus

Pohjaveden syvyyksiä on seurattu Nummelan kentällä vuodesta 2007 alkaen (Vakkilainen ym., 2010, Äijö ym. 2014). Syvyys on vaihdellut sulan maan aikana sateiden mukaan. Kesäisin kuivina aikoina ja talvisin roudan alla pohjavesi on laskenut salaojasyvyyden alapuolelle. Lumen ja roudan sulamisen aikaan pohjavesi on usein noussut lähelle maan pintaa samoin kuin märkinä syksyinä ja satunnaisesti rankkasateiden aikaan. Alueella D, jolla oli alun perin 32 metrin ojaväli, vesi on noussut lähemmäksi maan pintaa kuin muilla alueilla. Vuonna 2014 alueella D tehdyn täydennysojituksen jälkeen pohjavesi nousi märkinä aikoina edelleen lähemmäksi maan pintaa kuin alueilla A–C (Äijö ym., 2017), mutta vuosien mittaan pohjaveden korkeudet alueella D alkoivat lähestyä verran- nealuetta B (Äijö ym., 2021). VesiHave 2 -hankkeen aikana tehdyissä mittauksissa pohjavesi kuitenkin edelleen nousi alueella D lähemmäksi maan pintaa kuin muilla alueilla (kuva 3.4). Pitkäaikaisella märkyydellä vaikuttaa siis olevan pitkäaikaiset seuraukset maan kuivatustilaan.



Kuva 3.4. Pohjaveden pinnan etäisyys maan pinnasta ojen puolivälissä vuosina 2021 ja 2022 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m) (n=5–12).

Maan kosteusmittaukset osoittavat saman kuin pohjavesimittauksetkin, sen että alueiden B ja D kosteustila on ollut usein likimain samanlainen, mutta märkinä aikoina alueella D on ollut hieman kosteampaa kuin alueella B (kuva 3.5).



Kuva 3.5. Maan kosteus (tilavuusprosentteina maan kokonaistilavuudesta) ojien puolivälissä 0-30 cm:n kerroksessa vuosien 2021 ja 2022 mittausjaksojen aikana alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m), (n=10–24).

3.1.1.5 Valunta

Nummelan koekentän salaoja- ja pintakerrosvalunnat tutkimusjaksoilla (6/2007–5/2008 ... 6/2021–5/2022) on esitetty kuvassa 3.6. Lisäksi kuvien alla on jaksojen sadesummat. Kevätsulannan aikaiset suuret vesimäärät, jäinen maa sekä veden virtailu pengerrysten yli aiheuttivat useana vuonna epätarkkuutta pintakerrosvalunnan mittaamisessa erityisesti alueella B. Tämän vuoksi alueen B pintakerrosvalunnasta esitetään vain ensimmäisen jakson mittaustulos.

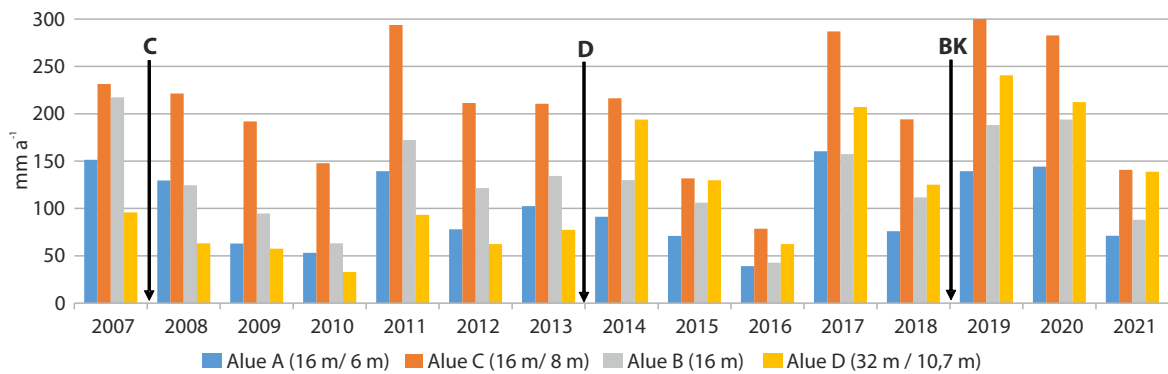
Nummelan lievästi viettävällä koekentällä salaojavalunta muodosti keskimäärin 84 % mitatusta kokonaisvalunnasta (salaojavalunnan ja pintakerrosvalunnan summa) alueella C (ojaväli 16 ja 8 m). Ennen täydennysojitusta (05/2014) 32 metrin ojavälin alueella D salaojavalunnan osuus oli keskimäärin puolet mitatusta kokonaisvalunnasta, ja täydennysojituksen jälkeisillä kahdeksalla vuosijaksolla keskimäärin 84 %. Salaojavalunnan osuus mitatusta kokonaisvalunnasta (S+P) oli biologista kuohkeutusta edeltäneillä viidellä ja sen jälkeisillä kolmella jaksolla likimain yhtä suuri.

Valtaosa valunnasta syntyi pohjoisille ilmasto-oloille tyypillisesti kasvukauden ulkopuolella. Valuntojen vuosittaiseen vaihteluun vaikuttivat lähinnä sademäärä sekä sateiden ajallinen jakautuminen ja rankkuus. Myös erilaiset talviolosuhteet näkyivät valunnan muodostumisessa.

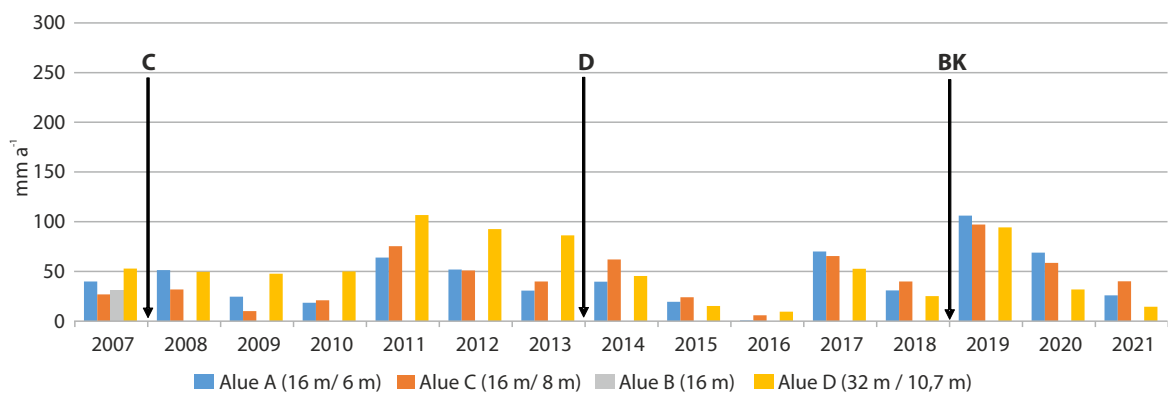
Täydennysojituksen vaikutus valuntaan

Täydennysojituksen vaikutuksia salaojavaluntaan arvioitiin vertaamalla alueiden C ja D salaojavalunnan vuosiarvoja verrannealueen B (ojaväli 16 m) arvoihin. Täydennysojitus lisäsi salaojavaluntaa koealueilla C ja D. Ojavälin puolittaminen (16 m → 8 m) alueella C lisäsi vuotuista salaojavaluntaa keskimäärin 1,7-kertaiseksi 16 m ojavälin alueeseen (B) verrattuna. Täydennysojituksen (ojaväli 32 m → 10,7 m) jälkeisillä kahdeksalla tutkimusjaksolla alueen D salaojavalunta oli vertailualueeseen B nähden 1,1–1,6-kertainen. Ennen täydennysojitusta salaojavaluntojen suhde (D/B) vaihteli välillä 0,4–0,6. Salaojavalunnan

a) Salaojavalunta

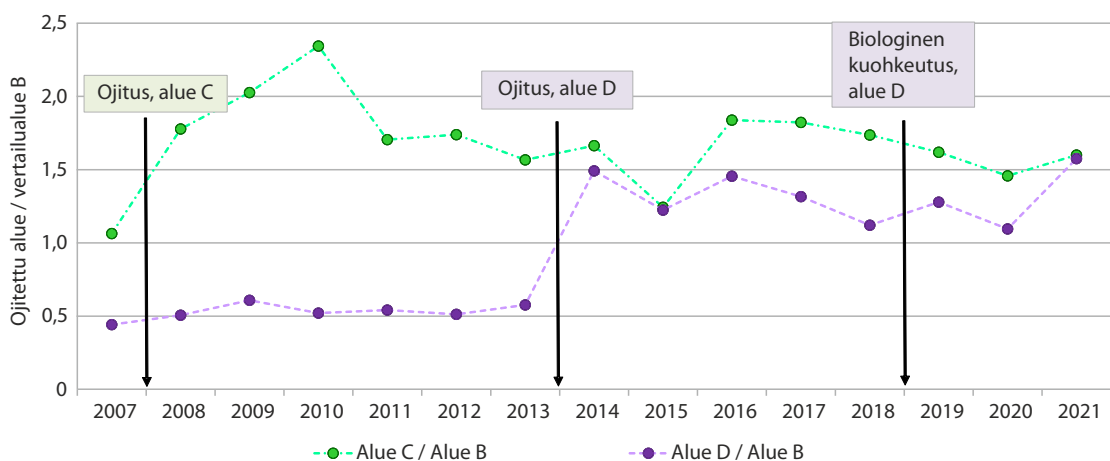


b) Pintakerrosvalunta



Sadanta (korjattu) mm a ⁻¹														
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
715	646	575	526	693	623	564	628	566	434	709	534	843	755	588

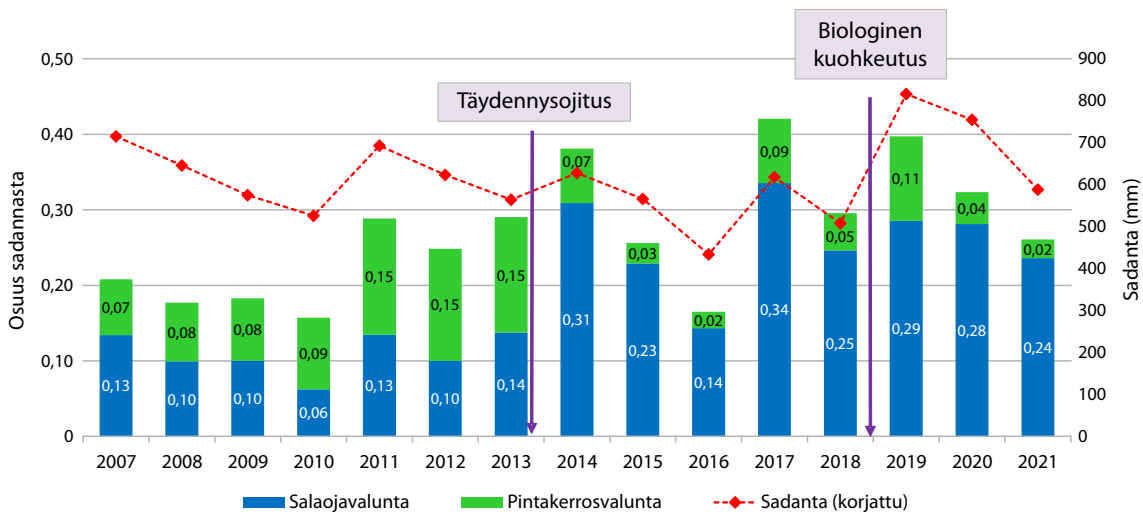
Kuva 3.6. Vuotuinen salaojavalunta (a) ja pintakerrosvalunta (b) Nummelan koalueilta vuosijaksoilla kesäkuusta 2007 toukokuuhun 2022. Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella. Kuvien alla on koekentän vuoden pituisten jaksosten sadannat.



Kuva 3.7. 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), vuotuisten salaojavaluntujen suhde vertailualueen B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m) salaojavaluntoihin mittausjaksoilla (06/2007–05/2022).

suhdeluku (D/B) oli biologista kuohkeutusta edeltäneillä viidellä ja sen aikaisilla kolmella vuosijaksolla yhtä suuri, 1,3. Salaojavaluntojen suhdeluvut (C/B ja D/B) tutkimusjaksoilla on esitetty kuvassa 3.7.

Täydennysojituksen (05/2014) jälkeen salaojavalunnan osuus sadannasta oli alueella D ojitusta edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna keskimäärin 2,3-kertainen (kuva 3.8). Salaoja- ja pintakerrosvalunnan summan osuus sadannasta kasvoi keskimäärin 1,4-kertaiseksi. Kahdeksalla täydennysojituksen jälkeisellä jaksolla salaojavalunnan osuus sadannasta oli alueella D keskimäärin 0,25 ja vaihteluväli 0,14–0,31. Pienin osuus mitattiin vähäsateisilla (P=434 mm) ja suurimmat (0,28–0,31) verrattain sateisilla (P=628–843 mm) jaksoilla. Samalla aikavälillä (6/2014 ... 5/2022) salaojavalunnan osuus sadannasta oli alueella C keskimäärin 0,31 ja vertailualueella B 0,19.



Kuva 3.8. Vuotuisten salaojavaluntojen ja pintakerrosvaluntojen osuudet vuosisadannasta (korjattu arvo) alueella D.

3.1.1.6 Ravinne- ja kiintoainepitoisuudet sekä ainekuormat

Nummelan koekentältä valumavesien mukana valtaojaan kulkeutuneille ravinne- ja kiintoainehuuhtoumille oli tyypillistä suuret vaihtelut eri vuosien ja koalueiden välillä, pääosin valunnan vaihtelun vuoksi. Kuormitushuiput ajoittuivat kasvukauden ulkopuolelle, keväällä lumen ja roudan sulamiseen sekä syksyn ja talven sateisiin. Huomattava osa ravinne- ja kiintoainekuormituksesta tuli salaojien kautta.

Kokonaistyyppi

Kokonaistyyppipitoisuus

Koalueiden salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet viidentoista vuoden mittausaineistosta on esitetty taulukossa 3.1. Valumavesien pitoisuuksissa oli vaihtelua eri vuodenaikojen ja vuosien välillä. Mittauksissa tuli selvästi esille valumavesien tyyppipitoisuuksien nousu lannoituksen ja maan muokkauksen jälkeen. Mittausten (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 2,2–15,4 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 sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l⁻¹) Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2022. 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	1,7 / 7,1 / 52,5	1,4 / 4,4 / 30,1	1,3 / 4,2 / 44,9	0,9 / 3,7 / 38,4
Painotettu pitoisuus	9,2	5,3	5,8	4,8
Pintakerrosvalunta min/Md/max	1,0 / 5,8 / 98,7	0,8 / 4,0 / 68,4	0,8 / 4,0 / 80,2	0,7 / 2,9 / 64,6
Painotettu pitoisuus	6,6	4,5	3,6	3,2

Kokonaistyyppipitoisuudet olivat salaojavalunnassa keskimäärin pintakerrosvaluntaa korkeampia; ero näkyi etenkin valunnalla painotetuissa pitoisuuksissa. Suurimmat keskimääräiset pitoisuudet mitattiin alueelta A ja pienimmät alueelta D. Vierekkäin sijaitsevien alueiden C ja B valumavesien pitoisuudet olivat lähellä toisiaan.

Vertailualueen B ja täydennysojitetun (05/2014) alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.2.

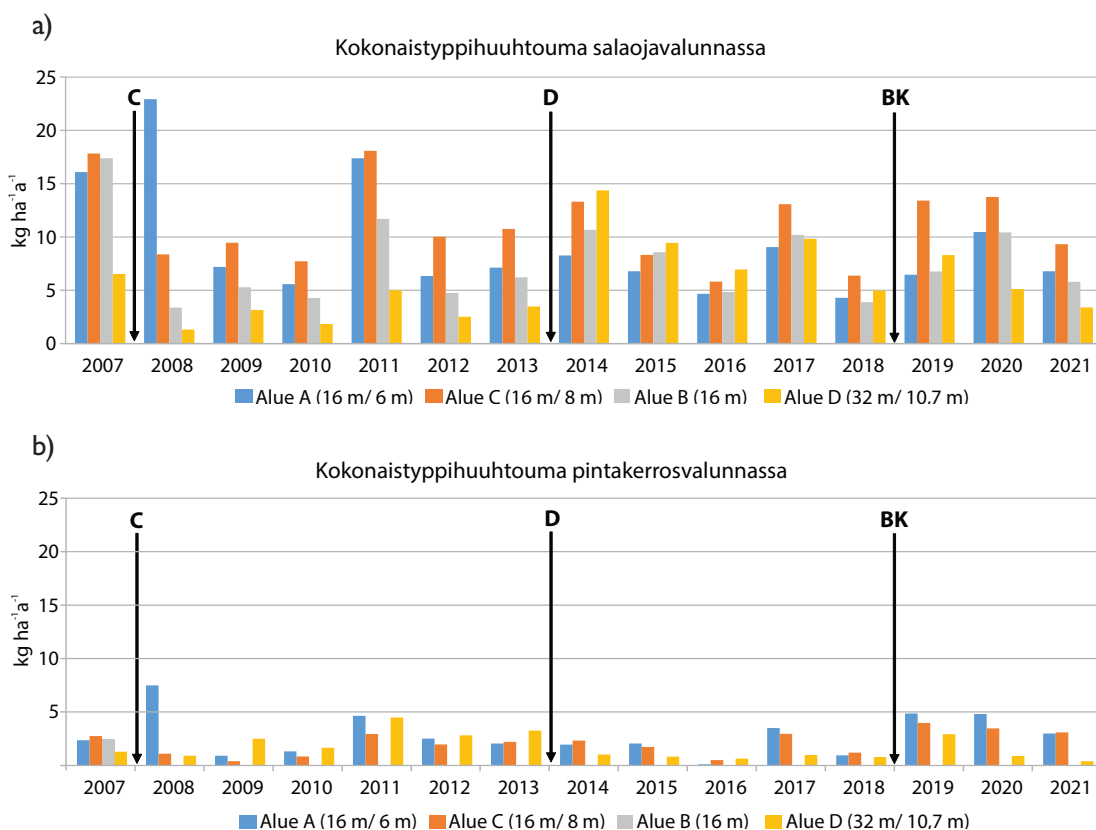
Taulukko 3.2. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l⁻¹) Nummelan koekentällä ajanjaksoilla 6/2007–5/2014 ja 6/2014–5/2022. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

	Kokonaistyyppipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2022	
	Alue B	Alue D	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	1,3 / 4,4 / 21,0	1,4 / 3,9 / 24,8	1,3 / 4,0 / 64,6	0,8 / 3,3 / 38,4
Painotettu pitoisuus	5,7	4,9	6,0	4,8
Pintakerrosvalunta min/Md/max	1,2 / 4,3 / 25,5	0,9 / 3,2 / 61,5	0,8 / 3,9 / 80,2	0,7 / 2,9 / 64,6
Painotettu pitoisuus	2,9	3,4	4,4	2,9

Alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuden mediaaniarvot olivat vertailualueen B vastaavia pitoisuuksia matalampia sekä ennen täydennysojitusta että sen jälkeen. Alueiden valunnalla painotetut kokonaistyyppipitoisuudet erosivat salaojavalunnan osalta ennen ja jälkeen ajanjaksoilla verrattain vähän. Pintakerrosvalunnassa ero oli selkeämpi: vertailualueella B valunnalla painotettu kokonaistyyppipitoisuus nousi ja täydennysojitetulla alueella D se laski.

Typpihuuhtoumat

Salaojien osuus mitatusta kokonaistyyppikuormasta (S+P) oli 8, 10,7 ja 16 m ojavälillä 75–95 % ja 32 m ojavälillä keskimäärin 60 %. Vuotuiset typpihuuhtoumat salaojavalunnassa vaihtelivat välillä 1,3–23 kg ha⁻¹ (kuva 3.9 a) ja pintakerrosvalunnassa 0,1–7,5 kg ha⁻¹ (kuva 3.9 b). Valtaosa huuhtoutuneesta tyyppistä oli nitraattityyppiä.

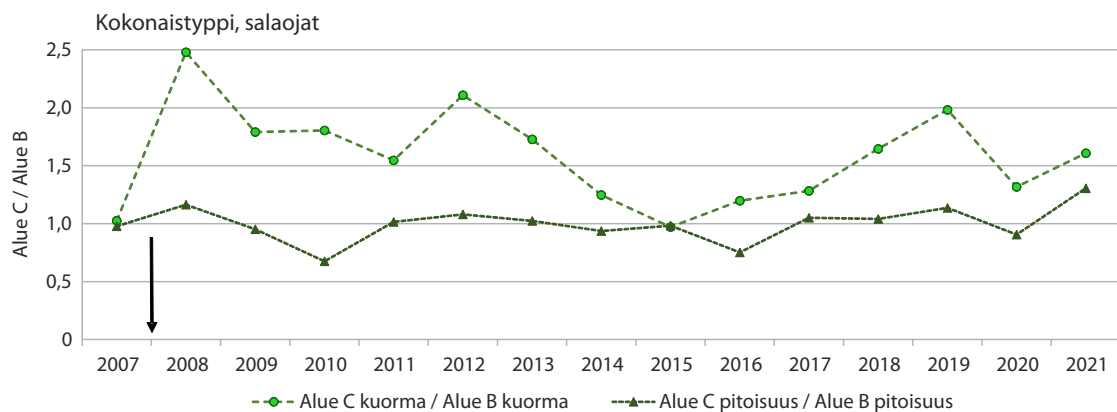


Kuva 3.9. Kokonaistyyppien vuotuiset huuhtoumat ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

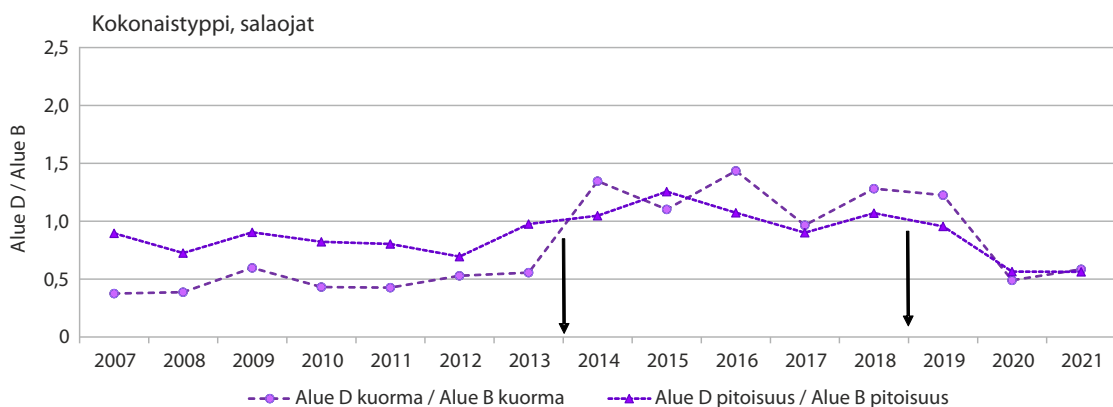
Täydennysojituksen vaikutus tyyppihuuhtoutumiseen

Täydennysojituksen vaikutuksia salaojavalumavesien mukana kulkeutuneisiin huuhtoutumiin arvioitiin vertaamalla alueiden C ja D ainepitoisuuksia ja -kuormia alueen B (ojaväli 16 m) arvoihin. Salaojavalunnassa kokonaistyyppipitoisuuden suhdeluku (C/B) oli täydennysojituksen jälkeisenä 14 vuonna keskimäärin yhtä suuri kuin täydennysojitusta edeltäneenä vuonna. Olosuhteiltaan erilaiset jaksot näkyivät suhdeluvun vaihteluna välillä 0,7–1,3. (kuva 3.10). Kokonaistyyppihuuhtoumien suhdeluku (C/B) nousi täydennysojituksen jälkeen selvästi, ja oli sen jälkeen edeltäneeseen jaksoon verrattuna keskimäärin 1,6-kertainen.

Alueen D salaojavalunnassa tyyppipitoisuudet olivat täydennysojituksen jälkeisillä kahdeksalla jaksolla (suhteessa vertailualueeseen B) ojitusta edeltäneiden jaksoiden keskiarvoon nähden 1,1-kertaisia (kuva 3.11). Huuhtoumien suhde (D/B) oli ojituksen jälkeen sitä edeltäneisiin vuosiin verrattuna keskimäärin 2,2-kertainen. Kokonaistyyppihuuhtoumien kasvu pohjautui täydennysojitetuilla alueilla C ja D pääosin lisääntyneeseen salaojavaluntaan. Täydennysojituksen ja biologisen kuohkeutuksen vaikutuksista ravinne- ja kiintoainehuuhtoutumiin on lisää sivulla 49.



Kuva 3.10. Alueiden C ja B vuotuisen salaojavaluntonen kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaistyyppikuormien suhde. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



Kuva 3.11. Alueiden D ja B vuotuisen salaojavaluntonen kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaistyyppikuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta ja biologisen kuohkeutuksen alkaminen on merkitty nuolella.

Typiaineiston tilastollinen tarkastelu

Typiaineiston tilastollisen testauksen yhteydessä testattiin, miten täydennysojitus näkyy alueen D valunnoissa. Vuosivaluntonen tarkastelussa havaittiin, että täydennysojituksen jälkeen salaojavalunnon osuus kokonaisvalunnasta kasvoi 49 %:sta 83 %:iin. Myös kokonaisvalunta alueella D kasvoi, mutta sen muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevää (Jokinen ym., 2023). Kuitenkin voidaan havaita, että salaojavalunta kasvoi enemmän kuin mitä pintakerrosvalunta pieneni. Sekä salaojavalunnon että pintakerrosvalunnon muutos alueella D oli tilastollisesti merkitsevää, vaikka muutosten suunnat olivat päinvastaiset.

Täydennysojitus lisäsi salaojavalunnon kokonais- ja nitraattitypen pitoisuutta tilastollisesti merkitsevästi. Muutos kokonaistyyppien pitoisuudessa johtui nitraattitypen pitoisuuden kasvusta, sillä muissa tyyppien muodoissa ei havaittu muutosta. Pintakerrosvalunnon tyyppipitoisuus väheni hieman, mutta eri tyyppien muotojen osuudet eivät muuttuneet. Pintakerrosvalunnon osalta pitoisuuden muutos oli tilastollisesti merkitsevää vain osassa lohkovertailuista.

Täydennysojitus vaikutti kokonaistyyppikuormitukseen kasvattaen sitä.

Kokonaisfosfori

Kokonaisfosforipitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforipitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (15 mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.3. Mittausten (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien vuosi-mediaanit vaihtelivat välillä 0,13–1,89 mg l⁻¹ ja pintakerrosvalunnan 0,27–2,12 mg l⁻¹.

Taulukko 3.3. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot (mg l⁻¹) sekä valunnalla painotettu pitoisuus Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2022.

	Kokonaisfosforipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	0,04 / 0,45 / 4,08	0,03 / 0,58 / 4,69	0,05 / 0,71 / 5,27	0,03 / 0,56 / 4,32
Painotettu pitoisuus	0,65	0,97	1,19	0,82
Pintakerrosvalunta min/Md/max	0,06 / 0,67 / 4,94	0,13 / 0,88 / 4,79	0,05 / 0,80 / 5,29	0,06 / 0,55 / 4,54
Painotettu pitoisuus	0,74	1,31	0,78	0,67

Salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien mediaaniarvot olivat tutkimusvuosina alueilla C ja B pintakerrosvalunnan vastaavia alempia ja alueella D yhtä suuria. Alueella C salaojavalunnan painotetut pitoisuudet olivat pintakerrosvaluntaa pienempiä, mutta alueilla B ja D suurempia. Kokonaisfosforin pitoisuudet noudattivat pitkälti kiintoaineen pitoisuuksia.

Vertailualueen B ja täydennysojitetun alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforin pitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.4.

Taulukko 3.4. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l⁻¹) Nummelan koekentällä ajanjaksoilla 6/2007–5/2014 ja 6/2014–5/2022. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

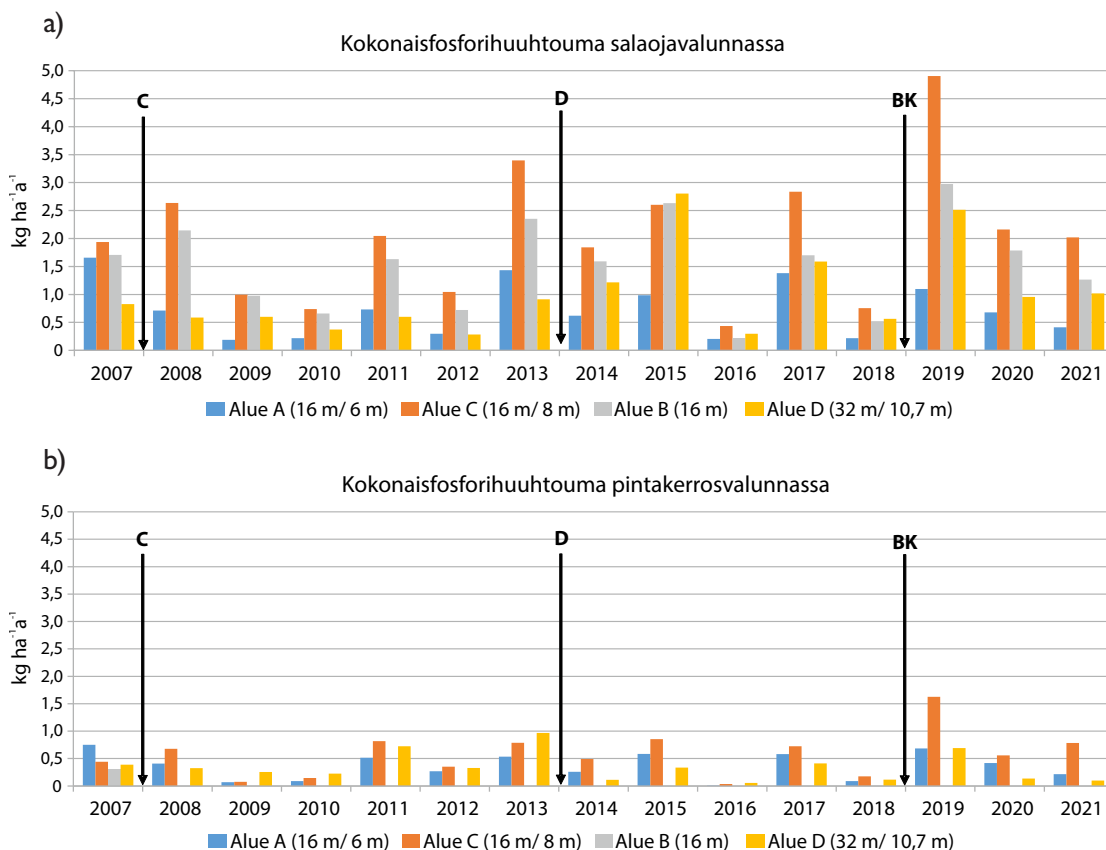
	Kokonaisfosforipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2022	
	Alue B	Alue D	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	0,05 / 0,62 / 4,72	0,03 / 0,54 / 2,14	0,10 / 0,80 / 5,27	0,04 / 0,58 / 4,32
Painotettu pitoisuus	1,14	0,87	1,24	0,80
Pintakerrosvalunta min/Md/max	0,05 / 0,76 / 3,36	0,06 / 0,46 / 1,98	0,18 / 0,85 / 5,29	0,07 / 0,61 / 4,54
Painotettu pitoisuus	0,48	0,66	1,13	0,68

Valumavesien mediaanipitoisuudet olivat jälkimmäisellä vertailujaksolla (6/2014–5/2022) edeltänyttä jaksoa (6/2007–5/2014) korkeampia molemmilla alueilla. Alueen D kokonaisfosforipitoisuuden mediaaniarvot olivat salaoja- ja pintakerrosvalunnassa vertailualueen B arvoja alempia sekä ennen täydennysojitusta että sen jälkeen.

Salaojavalunnan painotetut kokonaisfosforipitoisuudet olivat molemmilla alueilla mediaanipitoisuuksia korkeampia, 1,4–1,8-kertaisia. Alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan valunnalla painotetut kokonaisfosforipitoisuudet olivat ennen täydennysojitusta ja jälkeen lähellä toisiaan.

Kokonaisfosforihuuhtoumat

Vuotuiset kokonaisfosforin huuhtoumat Nummelan koealueiden salaojista vaihtelivat välillä 0,2–4,9 kg ha⁻¹ (kuva 3.12a). Pintakerrosvalunnan mukana fosforia huuhtoutui selvästi vähemmän, 0,01–1,6 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.12b), lähinnä pienten valuntojen takia. Kuormituksesta tuli 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä salaojista keskimäärin 70–90 %. Kokonaistypen tapaan 32 m ojavälillä salaojien osuus kokonaisfosforista oli noin 60 %.

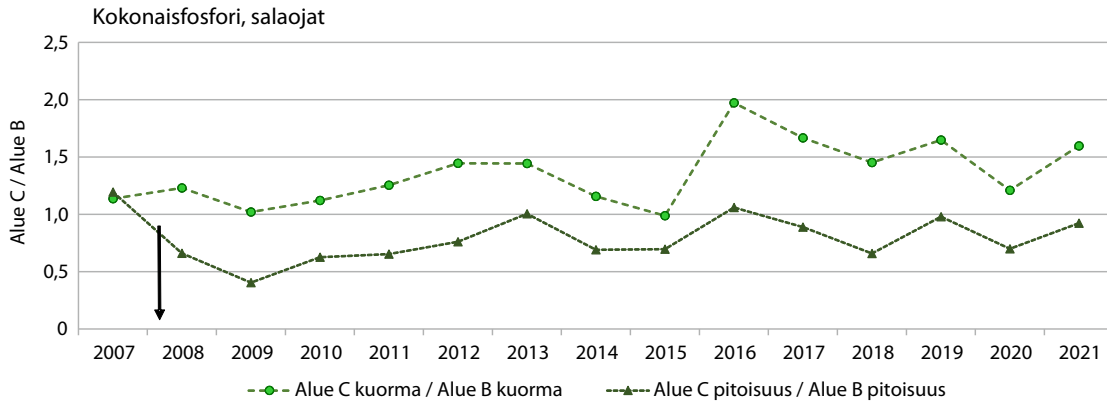


Kuva 3.12. Kokonaisfosforin vuotuiset huuhtoumat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

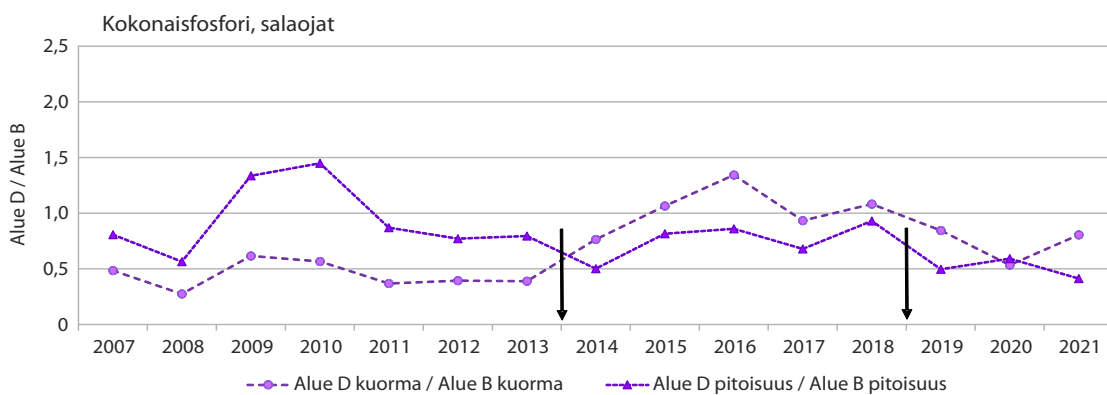
Täydennysojituksen vaikutus kokonaisfosforin huuhtoutumiseen

Salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuden suhdeluku (C/B) oli kaikilla täydennysojituksen jälkeisillä jaksoilla pienempi (30–90 %) kuin ennen ojitusta (kuva 3.13). Salaojavalunnan suhteellinen (C/B) kokonaisfosforikuormitus oli ojitusta seuranneilla 14 jaksolla ojitusta edeltäneeseen nähden keskimäärin 1,2-kertainen.

Täydennysojituksen jälkeen suhteelliset (D/B) kokonaisfosforipitoisuudet olivat keskimäärin pienempiä kuin ennen ojitusta (kuva 3.14), jolloin suhdeluku (D/B) oli 0,94 ja sen jälkeen 0,66. Samoin kuin alueella C, lisääntynyt salaojavalunta kuitenkin kasvatti kokonaisfosforihuuhtoumia suhteessa vertailualueeseen B. Täydennysojituksen jälkeen huuhtoumien suhdeluku (D/B) oli edeltäneeseen tilanteeseen nähden keskimäärin 2,1-kertainen.



Kuva 3.13. Alueiden C ja B vuotuisten salaojavaluntujen kokonaisfosforipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaisfosforikuormien suhde. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



Kuva 3.14. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntujen kokonaisfosforipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaisfosforikuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta ja biologisen kuohkeutuksen alkaminen on merkitty nuolella.

Liukoinen epäorgaaninen fosfaattifosfori

Liukoisen epäorgaanisen fosfaattifosforin pitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen epäorgaanisen fosfaattifosforin (liukoisen fosforin) pitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (15 mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.5. Mittausten (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan liukoisen fosforin pitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 16–140 $\mu\text{g l}^{-1}$ ja pintakerrosvalunnan 16–158 $\mu\text{g l}^{-1}$.

Salaojavalunnan liukoisen fosforin mediaanien arvot ja painotetut pitoisuudet olivat alueilla C ja B pintakerrosvaluntaa pienempiä, ja alueella D likimain yhtä suuria.

Maan helppoliukoisen 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 3.5. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen epäorgaanisen fosforin pitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$) Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2022.

Liukoisen fosforin pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$)				
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	10 / 50 / 1040	5 / 88 / 881	3 / 84 / 547	0 / 47 / 1348
Painotettu pitoisuus	60	112	104	62
Pintakerrosvalunta min/Md/max	9 / 70 / 622	9 / 102 / 1364	5 / 103 / 456	3 / 49 / 280
Painotettu pitoisuus	83	137	127	58

Vertailualueen B ja täydennysojitetun alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen fosforin pitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.6.

Taulukko 3.6. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen fosforin pitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l^{-1}) Nummelan koekentällä ajanjaksoilla 6/2007–5/2014 ja 6/2014–5/2022. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

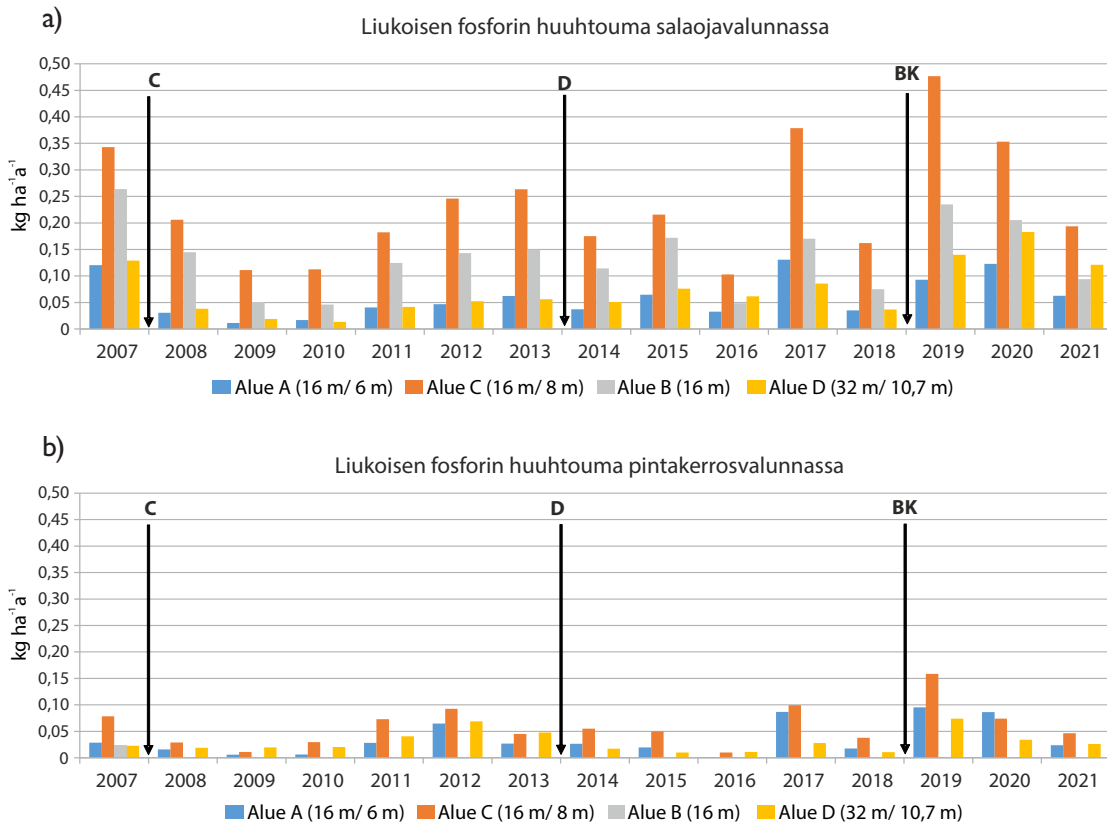
Liukoisen fosforin pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$)				
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2022	
	Alue B	Alue D	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	3 / 74 / 298	10 / 49 / 1348	6 / 90 / 547	0 / 40 / 250
Painotettu pitoisuus	100	72	106	64
Pintakerrosvalunta min/Md/max	7 / 87 / 456	3 / 40 / 168	32 / 110 / 310	9 / 60 / 290
Painotettu pitoisuus	121	49	140	81

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen fosforipitoisuuden mediaaniarvot olivat alueella D vertailualueen B arvoja alempia sekä ennen täydennysojitusta että sen jälkeen. Täydennysojituksen jälkeen alueen D salaojavalunnan liukoisessa fosforipitoisuudessa oli nähtävissä lievää laskua ja pintakerrosvalunnassa selkeää nousua. Vertailualueen B salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen fosforin keskimääräiset pitoisuudet olivat jälkimmäisellä (6/2014–5/2022) jaksolla aiempaa (6/2007–5/2022) korkeampia.

Liukoisen fosforin huuhtoumat

Suurin osa valtaojaan kulkeutuneesta fosforista oli kiintoaineeseen sitoutunutta partikkelimaista fosforia. Liukoisen epäorgaanisen fosfaattifosforin (liukoisen fosforin) osuus kokonaisfosforihuuhtoumasta oli 3–24 % koealueesta ja jaksosta riippuen.

Nummelan koealueilla liukoisen fosforin huuhtoumat salaojavalunnassa vaihtelivat välillä 0,01–0,48 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (kuva 3.15a). Pintakerrosvalunnan mukana huuhtoutui 0,001–0,16 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (kuva 3.15b). Kuormituksesta 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä tuli salaojien kautta keskimäärin noin 80 % ja 32 m ojavälillä 55 %.

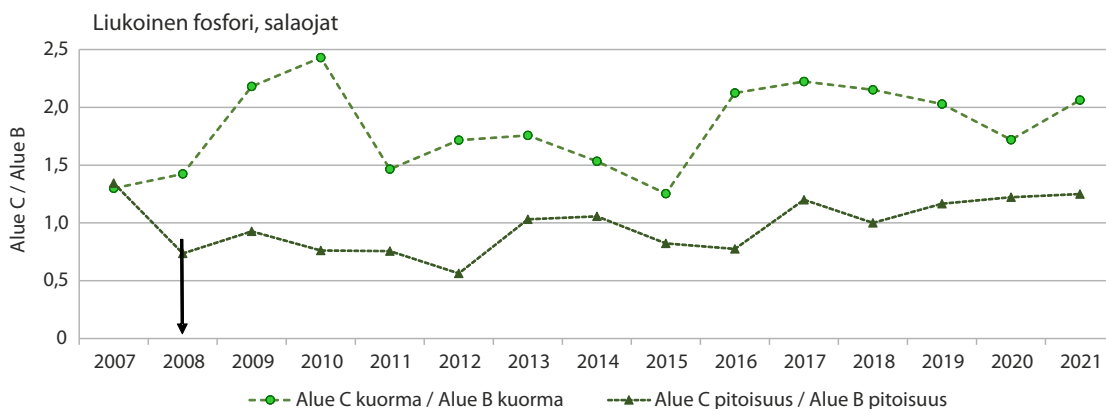


Kuva 3.15. Liukoisen fosforin vuotuiset huuhtoumat (kg ha^{-1}) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

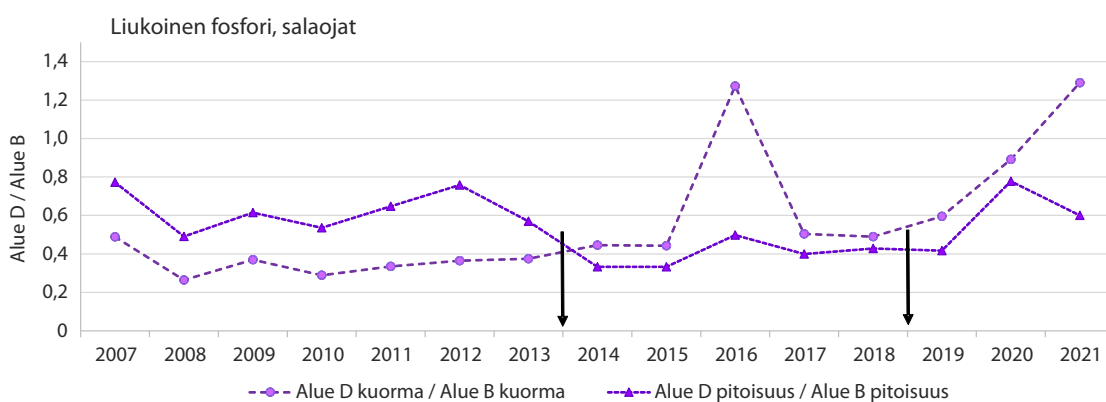
Täydennysojituksen vaikutus liukoisen fosforin huuhtoutumiseen

Kokonaisfosforipitoisuuksien tapaan myös alueen C salaojavalunnan suhteelliset (C/B) liukoisen fosforin pitoisuudet olivat täydennysojituksen jälkeen ojitusta edeltänyttä vuotta alempia (kuva 3.16). Alueen C salaojien liukoisen fosforin kuormat (C/B) sen sijaan olivat täydennysojituksen jälkeen edeltänyttä jaksoa suurempia, keskimäärin 1,4-kertaisia. Keskeisenä syynä oli lisääntynyt salaojavalunta.

Alueella D salaojavalunnan liukoisen fosforin pitoisuudet suhteessa alueeseen B olivat täydennysojituksen jälkeen aikaisempaa alempia, suhdeluku (D/B) oli keskimäärin 0,76 (kuva 3.17). Liukoisen fosforin huuhtoumat nousivat alueella D ojituksen jälkeen suhteessa alueeseen B. Tutkimusjaksojen suhdelukujen (D/B) keskiarvo oli ennen ojitusta 0,36 ja sen jälkeen 0,74; erityisen kuormittava oli viimeinen tutkimusjakso (6/2021–5/2022), jolloin suhde (D/B) oli 1,29. Verrattain suuren liukoisen fosforin huuhtouman taustalla oli alueeseen B nähden moninkertainen salaojavalunta huhtikuussa 2022. Toinen erityisen kuormittava jakso oli 6/2016–5/2017. Tällöin suuri huuhtouma (suhde (D/B) 1,27) johtui alueen D joulou-maaliskuun runsaista salaojavalunnoista.



Kuva 3.16. Alueiden C ja B vuotuisten liukoisin fosforin pitoisuuksien mediaanien sekä liukoisin fosforin kuormien suhde. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.



Kuva 3.17. Alueiden D ja B vuotuisten liukoisin fosforin pitoisuuksien mediaanien sekä liukoisin fosforin kuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta ja biologisen kuohkeutuksen alkaminen on merkitty nuolella.

Kiintoaine

Kiintoainepitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet on esitetty taulukossa 3.7. Viidentoista mittausvuoden (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kiintoainepitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 260–1200 mg l⁻¹ ja pintakerrosvalunnan 210–1480 mg l⁻¹.

Taulukko 3.7. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimiarvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l⁻¹) Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2022.

	Kiintoainepitoisuus (mg l ⁻¹)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	20 / 445 / 3310	24 / 400 / 2710	80 / 517 / 4640	60 / 511 / 4430
Painotettu pitoisuus	647	643	849	770
Pintakerrosvalunta min/Md/max	20 / 597 / 4490	0 / 715 / 3340	20 / 580 / 4140	10 / 493 / 4730
Painotettu pitoisuus	767	914	531	601

Alueilla C ja B salaojavalunnan kiintoainepitoisuuden mediaani oli pintakerrosvaluntaa alempi. Alue D poikkesi muista alueista. Siellä salaojavalunta oli keskimäärin (mediaani ja painotettu pitoisuus) pintakerrosvaluntaa kiintoainepitoisempaa. Erilaisten ja eri-ikäisten ojitusten kiintoainepitoisuuksissa ei näyttänyt olevan eroja, vaan korkeita pitoisuuksia mitattiin sekä noin 70 vuotta vanhan ojaston että 8–14 vuotta vanhojen täydennysojitettujen ojastojen salaojavesissä.

Vertailualueen B ja täydennysojitetun alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.8.

Taulukko 3.8. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimiarvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l^{-1}) Nummelan koekentällä ajanjaksoilla 6/2007–5/2014 ja 6/2014–5/2022. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

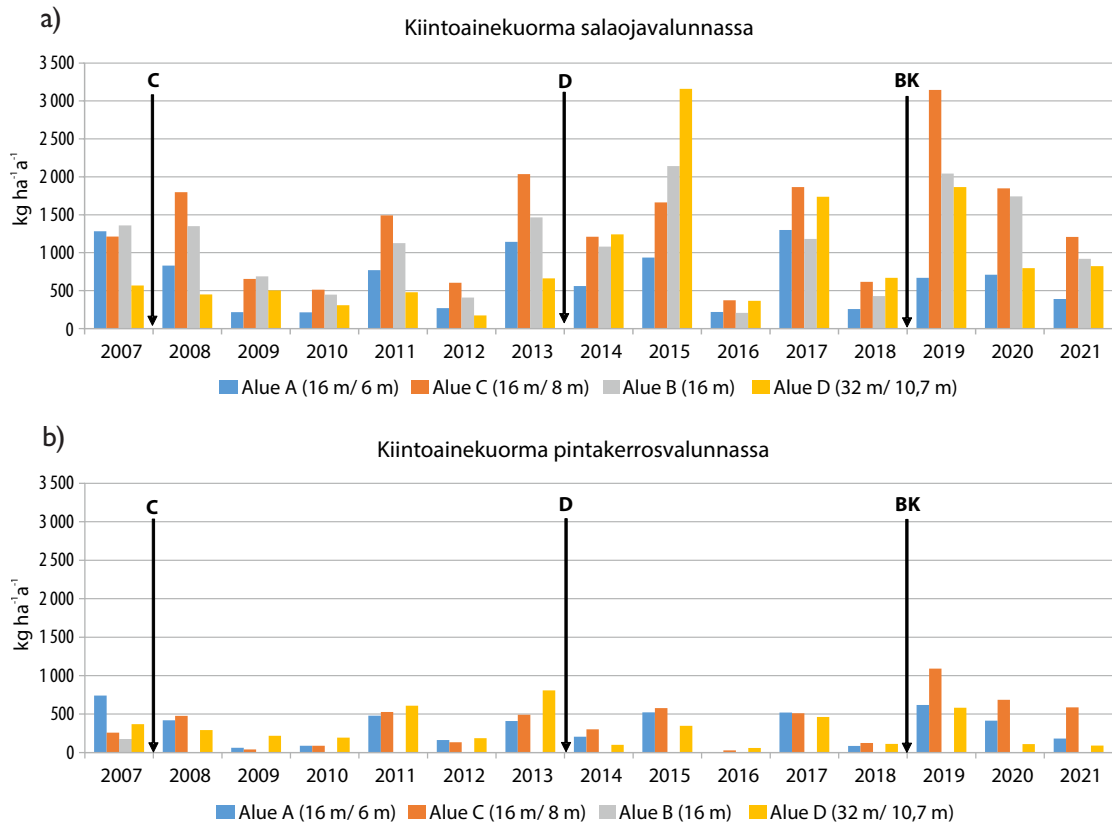
	Kiintoainepitoisuus (mg l^{-1})			
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2022	
	Alue B	Alue D	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	80 / 440 / 3000	80 / 420 / 1780	118 / 609 / 4640	60 / 550 / 4430
Painotettu pitoisuus	738	651	950	813
Pintakerrosvalunta min/Md/max	20 / 520 / 2380	40 / 420 / 1700	50 / 641 / 4140	10 / 541 / 4730
Painotettu pitoisuus	247	551	863	687

Valumavesien mediaanipitoisuudet olivat alueen D täydennysojitusta seuranneina vuosina (6/2014–5/2022) edeltäneitä vuosia (6/2007–5/2014) korkeampia molemmilla alueilla. Alueen D kiintoainepitoisuuden mediaaniarvot olivat salaoja- ja pintakerrosvalunnassa vertailualueen B pitoisuuksia alempia sekä ennen täydennysojitusta että sen jälkeen.

Alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan painotetut kiintoainepitoisuudet olivat täydennysojituksen jälkeisinä vuosina ojitusta edeltäviin vuosiin nähden keskimäärin 1,2-kertaisia. Vertailualueen B salaojavalunnassa ero oli samaa luokkaa, mutta pintakerrosvalunnan painotettu kiintoainepitoisuus oli yli kolminkertainen.

Kiintoainekuormat

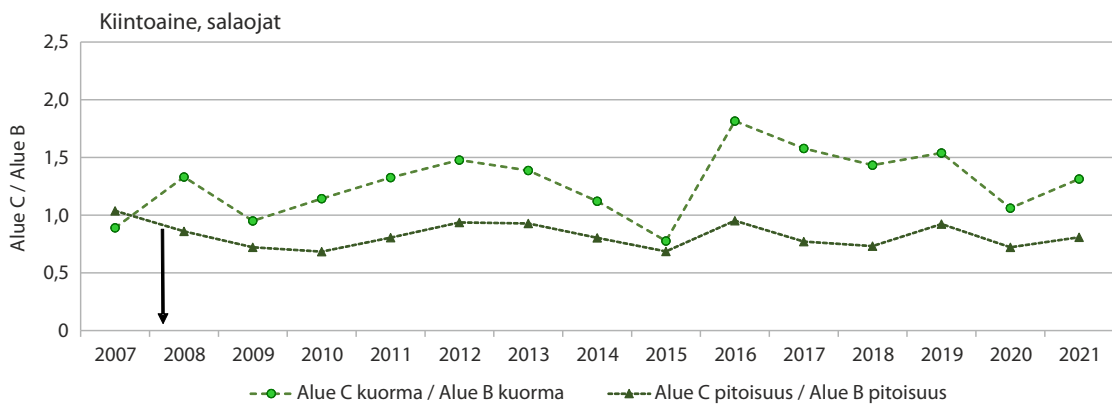
Salaojavesien mukana kulkeutuneen maa-aineksen määrä vaihteli huomattavasti eri vuosien välillä. Maa-ainesta kulkeutui salaojavalunnassa $170\text{--}3160 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ja pintakerrosvalunnassa $6\text{--}1090 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (kuva 3.18). Salaojien osuus mitatusta kokonaiskuormituksesta 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä oli 70–95 %. Ojavälin olleessa 32 m salaoja- ja pintakerrosvalunnan keskimääräiset osuudet olivat likimain yhtä suuret.



Kuva 3.18. Vuotuiset kiintoainekuormat (kg ha^{-1}) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

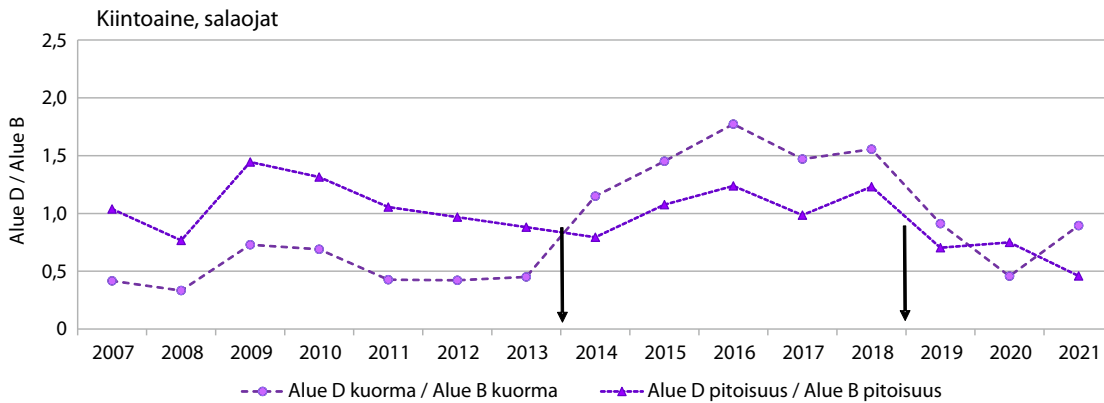
Täydennysojituksen vaikutus kiintoaineen huuhtoutumiseen

Samoin kuin fosforipitoisuuksien myös salaojavalunnan kiintoainepitoisuuksien suhde (C/B) oli täydennysojituksen jälkeisinä vuosina aiempaa alempi (kuva 3.19.). Suhdelukujen keskiarvo oli tällöin 0,8, kun se oli ennen ojitusta ollut 1,0. Lisääntynyt salaojavalunta näkyi kuitenkin kiintoainehuuhtoumassa: suhde (C/B) oli ojituksen jälkeen aiempaan verrattuna keskimäärin 1,5-kertainen.



Kuva 3.19. Alueiden C ja B vuotuisen salaojavalunton kiintoainepitoisuuksien mediaanien sekä kiintoainekuormien suhde. Alueen C täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

Täydennysojituksen jälkeen suhteelliset (D/B) kiintoainepitoisuudet olivat keskimäärin alempia kuin ennen ojitusta (kuva 3.14). Suhdeluku (D/B) oli ennen täydennysojitusta 1,07 ja sen jälkeen 0,90. Lisääntynyt salaojavalunta kuitenkin kasvatti kiintoainehuuhtoumaa suhteessa vertailualueeseen B. Täydennysojituksen jälkeen huuhtoumien suhdeluku (D/B) oli edeltäneeseen tilanteeseen nähden keskimäärin 2,4-kertainen.



Kuva 3.20. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntujen kiintoainepitoisuuksien mediaanien sekä kiintoainekuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta ja biologisen kuohkeutuksen alkaminen on merkitty nuolella.

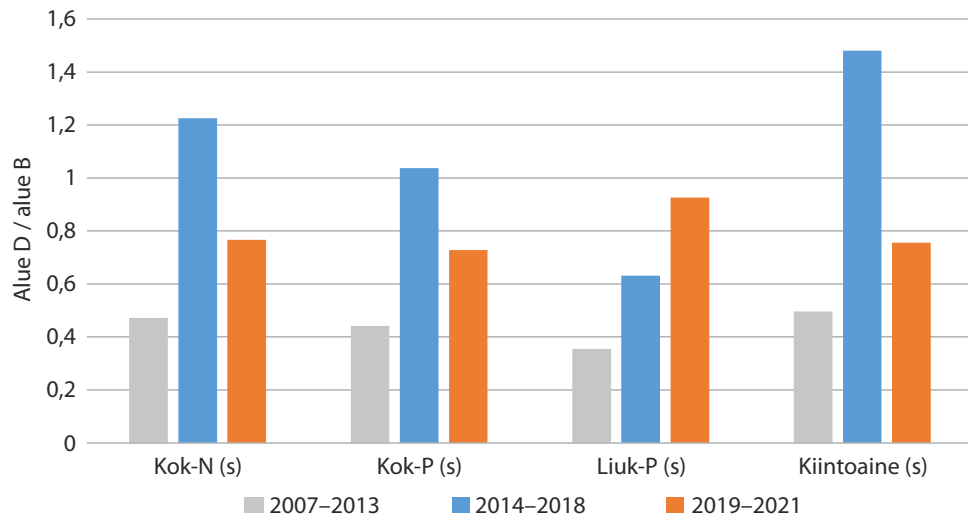
Täydennysojituksen ja biologisen kuohkeutuksen vaikutus ravinne- ja kiintoainehuuhtoumiin

Mittausten alkaessa vuonna 2007 Nummelan koekentän alueen D ojaväli oli 32 m (ensiojitus vuonna 1952). Märkyydestä selvästi kärsinyt alue täydennysojitettiin keväällä 2014, jolloin ojaväliksi tuli 10,7 m. Alueelle D perustettiin keväällä 2019 monivuotinen maan kuohkeutuskoe, jossa maan rakennetta ja vesitaloutta parannetaan biologisen ja mekaanisen kuohkeutuksen yhdistelmällä (ks. kohta 2.1.2).

Täydennysojituksen ja biologisen kuohkeutuksen vaikutuksia salaojavalumavesien mukana kulkeutuneisiin ainehuuhtoumiin arvioitiin vertaamalla alueen D huuhtoumia vertailualueen B (ojaväli 16 m) huuhtoumiin (kuva 3.21).

Ojitusta edeltäneinä vuosina 2007–2013 alueen D salaojavalunnan ravinne- ja kiintoainekuormat olivat 36–50 % vertailualueen B kuormista. Liukoisen fosforin kuorman suhdeluku oli pienin ja kiintoaineen suurin (kuva 3.21). Täydennysojitus (kevät 2014) näkyi selvänä salaojavalunnan ravinne- ja kiintoainekuormien kasvuna suhteessa vertailualueeseen. Kokonaistyyppi-, kokonaisfosfori- ja kiintoainekuormien suhdeluvut (D/B) olivat täydennysojitusta seuranneina viitenä vuonna (2014–2018) aiempiin vuosiin nähden 2,3–3,0-kertaisia ja liukoisen fosforin 1,8-kertainen. Pääasiallisena syynä kuormituksen kasvuun oli ojituksen myötä lisääntynyt salaojavalunta.

Kuohkeutuskokeen biologinen osuus aloitettiin alueella D keväällä 2019 (ks. kohta 2.1.2). Seuranneiden kolmen tutkimusvuoden aikana salaojavalunnan kokonaistyyppi-, kokonaisfosfori- ja kiintoainekuormat alenivat suhteessa vertailualueeseen B. Alueen D salaojavalunnan suhteelliset kuormat olivat täydennysojituksen jälkeisten vuosien (2014–2018) kuormista keskimäärin 50–70 %. Pienempien kuormien taustalla oli pitoi-



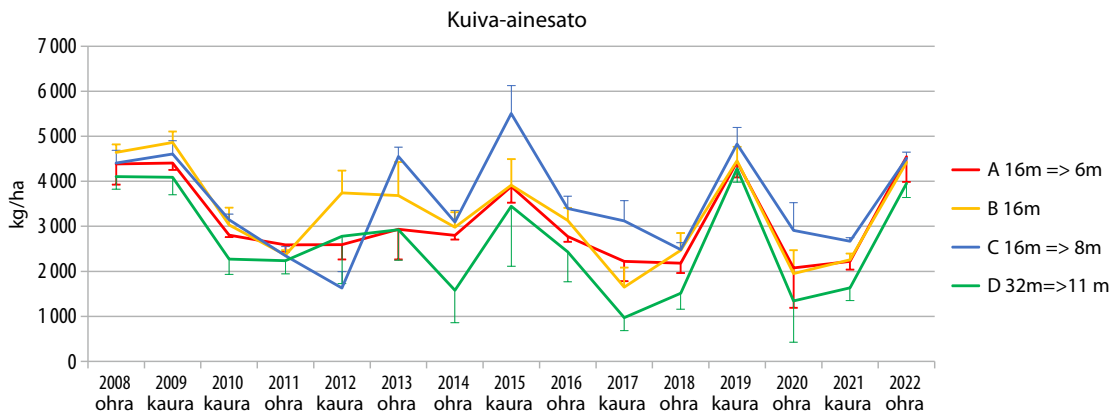
Kuva 3.21. Alueiden D ja B salaojavaluntujen vuosikuormien suhteen keskiarvot kolmella jaksolla, 2007–2013, 2014–2018 ja 2019–2021. Vuosina 2007–2013 alueen D ojaväli oli 32 m ja vuodesta 2014 lähtien 10,7 m. Alueella D alkoi keväällä 2019 maan kuohkeutusko. Vertailualueen B ojaväli oli 16 m.

suuksien lasku. Kokonaistyyppi-, kokonaisfosfori- ja kiintoainepitoisuuksien suhdeluvut (D/B) olivat vuosina 2019–2021 keskimäärin 34–40 % pienempiä kuin viitenä edeltäneenä vuonna. Liukoisen fosforin osalta muutos oli päinvastainen. Keskimääräiset suhteelliset (D/B) liukoisen fosforin kuormat olivat vuosijaksoilla 2019–2021 edeltäneeseen jaksoon (2014–2018) verrattuna keskimäärin 1,5-kertaisia. Liukoisen fosforin kuorman lisääntymisen keskeisenä syynä oli pitoisuuden nousu; keskimäärin pitoisuuksien suhde oli aiempaan nähden 1,5-kertainen. Valtaosa alueen D pinta-alasta on ollut kevästä 2019 lähtien nurmella, mikä on osaltaan vaikuttanut valumavesien liukoisen fosforin pitoisuuksien nousuun. Nurmiviljelyn ja biologisen kuohkeutuksen myötä salaojavalunnan suhteelliset (D/B) kokonaistyyppi-, kokonaisfosfori- ja kiintoainekuormat laskivat, mutta olivat täydennysojitusta edeltäneiden vuosien (2007–2013) kuormiin verrattuna keskimäärin noin 1,5-kertaisia. Liukoisen fosforikuorman osalta vastaava suhdeluku oli 2,6.

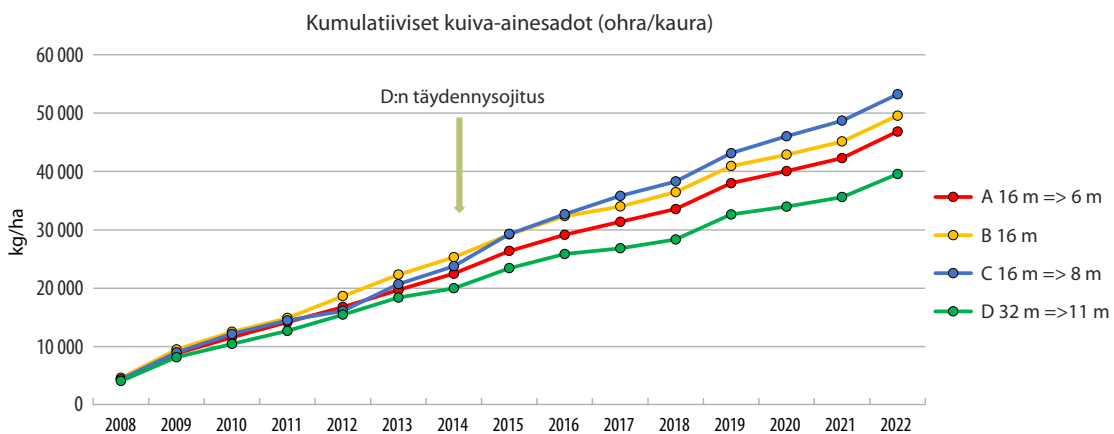
3.1.1.7 Sato

Nummelan kentän alueet B ja C ovat tuottaneet parhaat sadot lähes kaikkina vuosina, kun taas alue D huonoimmat (kuvat 3.22 ja 3.23). Alueen D huonoimmat sadot saattavat johtua siitä, että märkyys on vuosikymmenten aikana heikentänyt maan rakennetta tai siitä, että alueella D on selvästi muita alueita alempi maan fosforipitoisuus (kuva 3.1). Vuonna 2014 tehty alueen D täydennysojitus ei ole ratkaisevasti parantanut satoja.

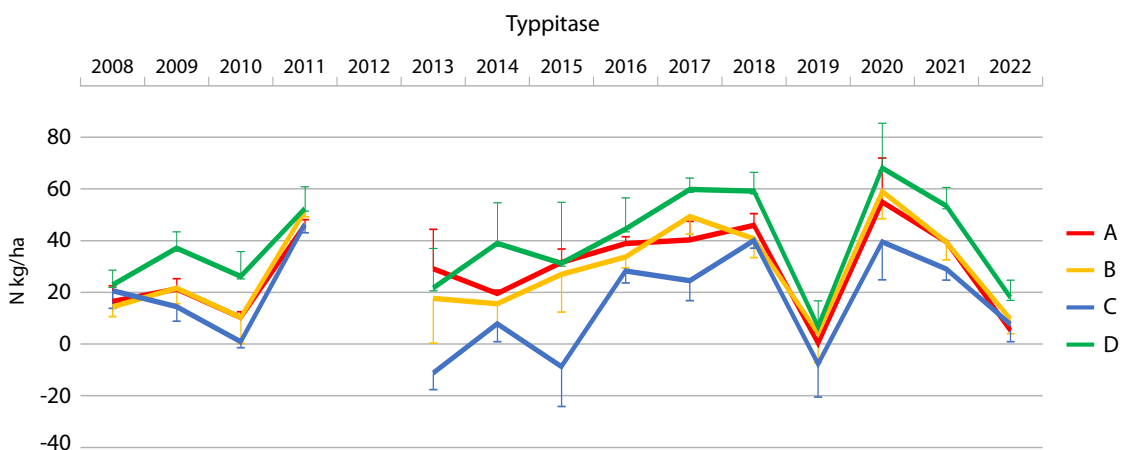
Satojen vaihtelun takia myös tyyppitase (kuva 3.24) on vaihdellut paljon eri vuosina. Alueen D huonon satotason takia tyyppitase on ollut kaikista suurin, eli sato ei ole käyttänyt kaikkea lannoitteena annettua tyyppiä, vaan sitä on jäänyt peltoon. Alueen D suuri tyyppitase ei kuitenkaan näyttänyt heijastuvan kokonaistyyppikuormiin, sillä ne olivat ennen täydennysojitusta vertailualueita pienempiä, ja täydennysojituksen jälkeen likimain samansuuruisia (ks. kuva 3.9)



Kuva 3.22. Nummelan kentän keskisadot ja satojen keskihajonnat eri alueilla vuosina 2008–2022. Alueen D satonäytteet on otettu kuohkeutuskokeen viljaruuduilta vuosina 2019–2022.



Kuva 3.23. Kumulatiiviset kuiva-ainesadot alueilla A–D vuosina 2008–2022.

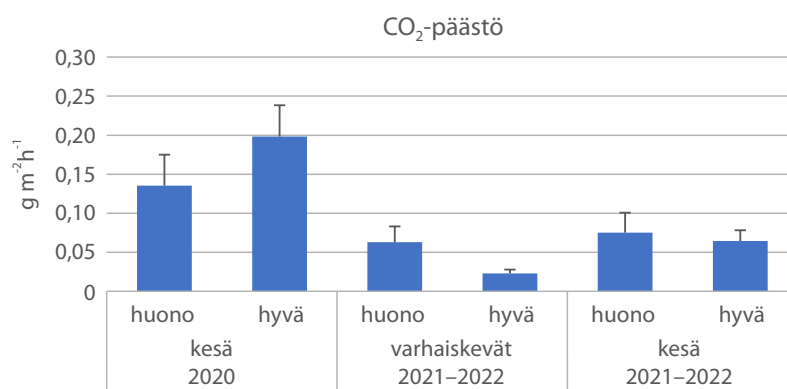


Kuva 3.24. Typpitase alueilla A–D vuosina 2008–2022.

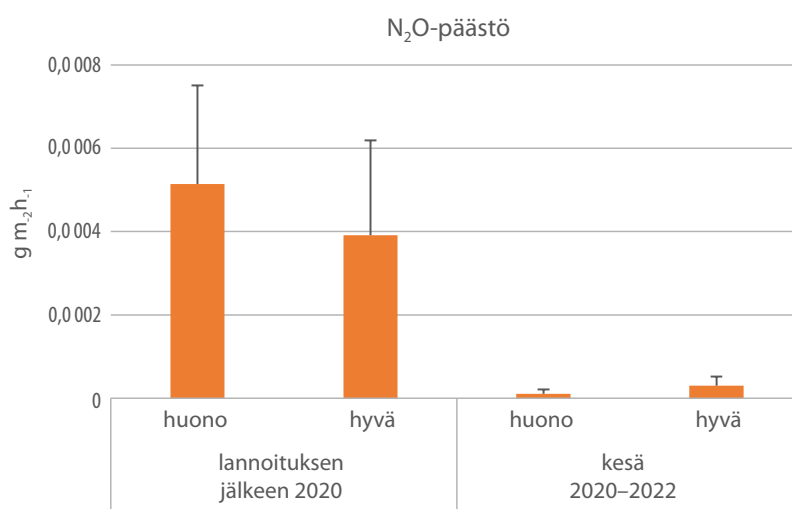
3.1.1.8 Kasvihuonekaasupäästöt

Hyvä- ja huonorakenteiselta maalta vapautuneet kasvihuonekaasupäästöt vaihtelivat eri olosuhteissa, eikä maiden välillä ollut jatkuvaa systemaattista eroa. Suurimmat hiilidioksidipäästöt tulivat ensimmäisenä mittausvuonna (2020), kun maa oli vielä kuohkeaa muokkauksen jälkeen, ja lämpimään maahan satoi runsaasti vettä lannoituksen jälkeen. Typpipäästö oli lannoituksen jälkeen eri kertaluokkaa kuin muulloin (kuva 3.26). Tämän jälkeen hyvä- ja huonorakenteisen maan typpipäästöjen hajonnat olivat suuria eikä aineiston perusteella voi sanoa varmasti, kummasta tuli suurempia päästöjä.

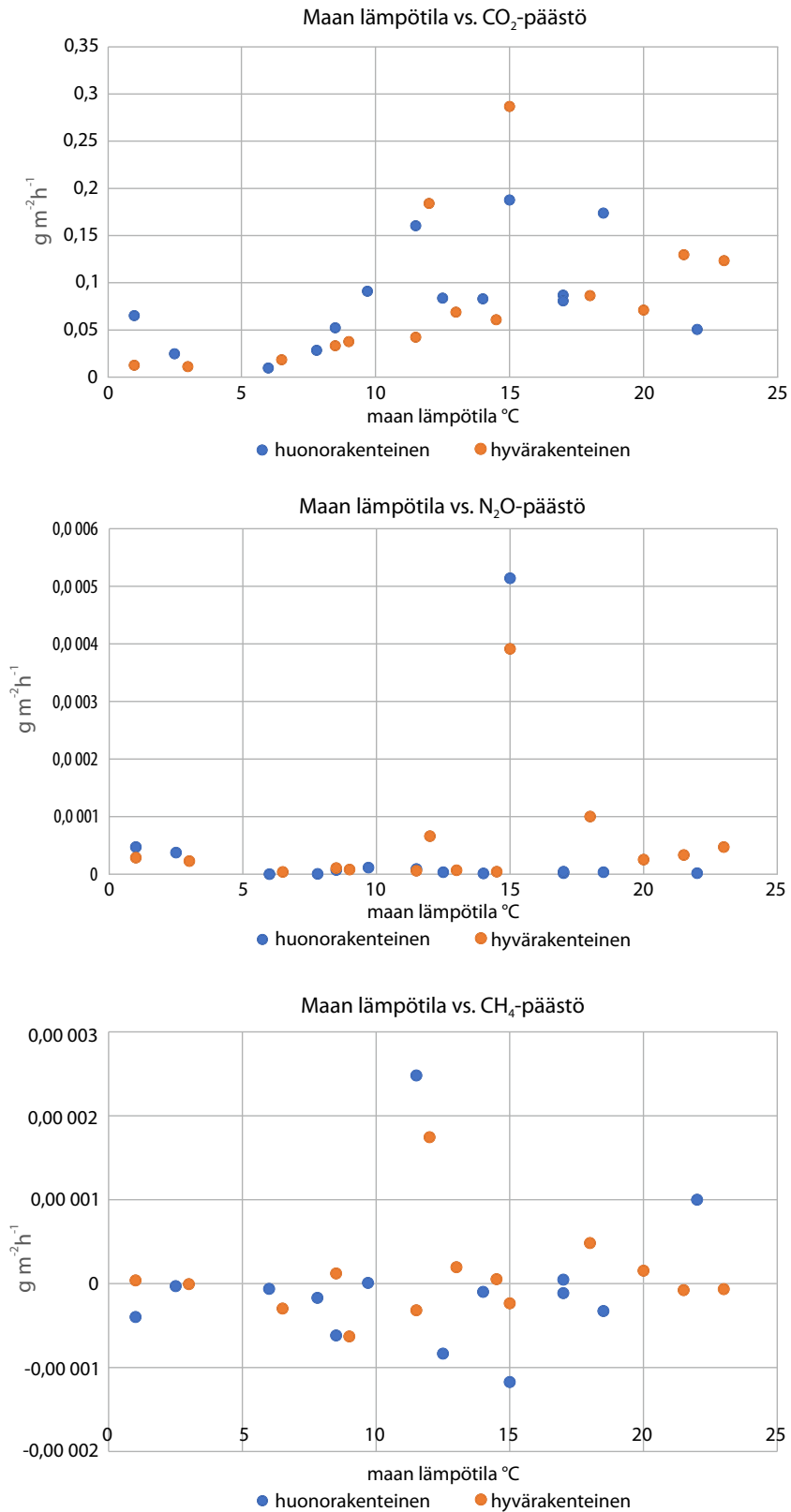
Kesä–syyskuun 2020 aikana tehdyissä mittauksissa hyvärakenteiselta maalta (alue C) vapautui 1,5-kertainen määrä hiiltä huonorakenteiseen maahan (alue D) verrattuna (kuva 3.25), mikä indikoi vilkasta mikrobitoimintaa hyvärakenteisessä maassa. Hyvärakenteisellä maalla kasvanut ohra tuotti paremman sadon ja sitoi hiiltä 2,2-kertaisen määrän huonorakenteiseen maahan verrattuna (kuva 3.22). Hiilitasetta ei kuitenkaan pystytty laskemaan minään vuonna, koska mittauksia tehtiin vain kesällä.



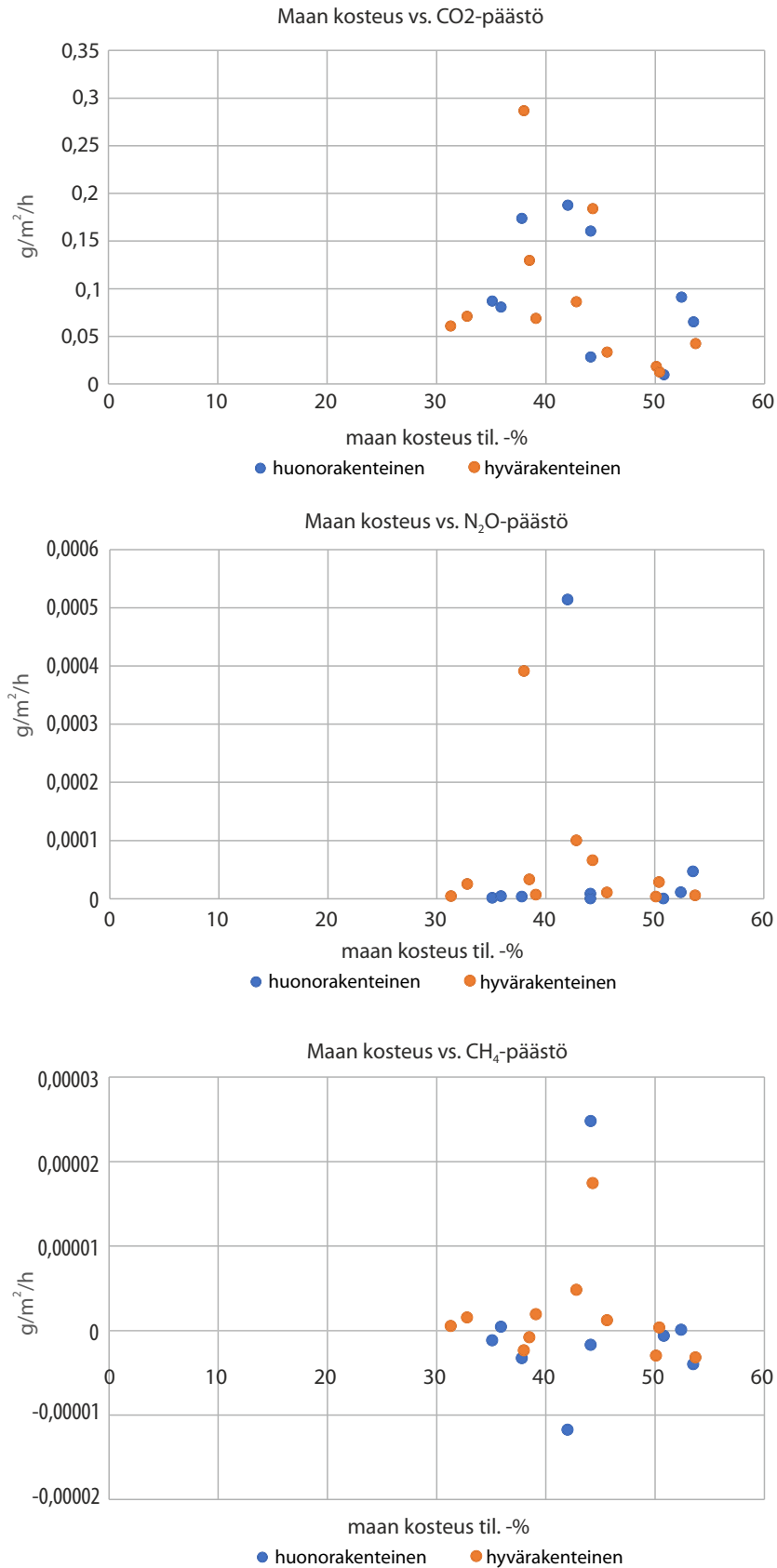
Kuva 3.25. Keskimääräiset hiilidioksidipäästöt hyvä- ja huonorakenteiselta maalta eri oloissa. a) Kesällä 2020 edullisissa kasvuoloissa, b) Huhti-toukokuun vaihteessa 2021 ja 2022 maan ollessa märkä lumien sulettua ja c) Kesinä 2021 ja 2022 vaihtelevissa oloissa.



Kuva 3.26. Dityppioksidipäästö a) hyvä- ja huonorakenteiselta maalta lannoituksen jälkeen maan ollessa kostea ja b) Kesinä 2020–2022 muina ajankohtina vaihtelevissa oloissa.



Kuva 3.27. Kasvihuonekaasupäästöjen riippuvuus maan lämpötilasta Nummelan kentällä hyvärakenteisella alueella C ja huonorakenteisella alueella D.



Kuva 3.28. Kasvihuonekaasupäästöjen riippuvuus maan kosteudesta Nummelan kentällä hyvärakenteisella alueella C ja huonorakenteisella alueella D.

Kesällä 2021 ja 2022 hiilipäästöt olivat ensimmäistä mittausvuotta pienemmät, osaksi ehkä sen takia, ettei mittauspaiikkojen maa ollut enää yhtä kuohkeaa; paikkoja ei muokattu vaan ne pidettiin puhtaina kasveista kitkemällä. Hyvä- ja huonorakenteisen maan päästöillä ei ollut merkittävää eroa paitsi lumen sulamisen jälkeen, kun maa oli märkää. Tällöin huonorakenteiselta maalta vapautui enemmän hiiltä kuin hyvärakenteiselta.

Metaanin merkitys oli mitätön; ajoittain sitä vapautui ja ajoittain sitoutui hyvin pieniä määriä.

Maan lämpötila ja kosteus vaikuttavat hajottajamikrobien aktiivisuuteen ja siten myös kasvihuonekaasupäästöihin. Tässä aineistossa tämä näkyi hieman hiilidioksidipäästöissä. Ne kasvoivat, kun lämpötila nousi ja vähenivät, kun maa muuttui liian märäksi (kuvat 3.27 ja 3.28).

3.1.2 Kuohkeuskoe

Maan kuohkeuskoe on monivaiheinen ja monivuotinen. Koe käynnistettiin VesiHave-hankkeessa toteuttamalla maan biologinen kuohkeutus syväjuurisen nurmen avulla. VesiHave 2 -hankkeessa toteutettiin mekaaninen kuohkeutus jankkuroimalla. Koe saadaan päätökseen seuraavassa tutkimushankkeessa.

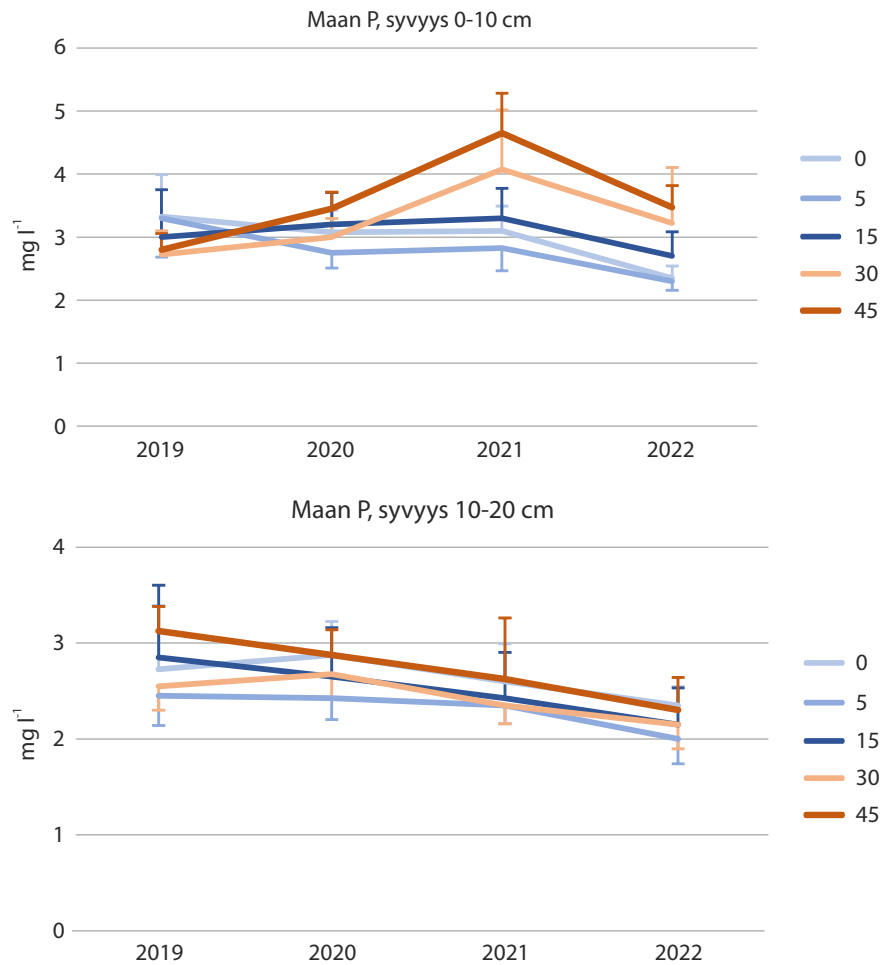
3.1.3 Fosforin porraskoe

Fosforin porraskokeessa vain suurimmat lannoitemäärät (30 ja 45 kg ha⁻¹) nostivat hieman pintamaan (0–10 cm) fosforipitoisuutta. Pienillä lannoitemäärillä pintamaan fosforipitoisuus ei muuttunut tai laski hieman. Syvemmillä (10–20 cm:n syvyydessä) maan fosforipitoisuus laski hieman kaikilla lannoitusmäärillä (kuva 3.29). Tulokset olivat samanlaiset kaikilla kolmella tutkimuksessa käytetyllä uuttomenetelmällä.

Maassa olevien fosforia sitovien rauta- ja alumiiniyhdisteiden määrä ei ole muuttunut kokeen aikana, joten fosforin kyllästysasteet (fosforin määrä suhteutettuna rauta- ja alumiiniyhdisteisiin) muuttuivat samalla tavalla kuin pitoisuudetkin ollen maan 0–10 cm:n syvyydessä keskimäärin 0,19±0,05 % ja 10–20 cm:n syvyydessä 0,15±0,02 %.

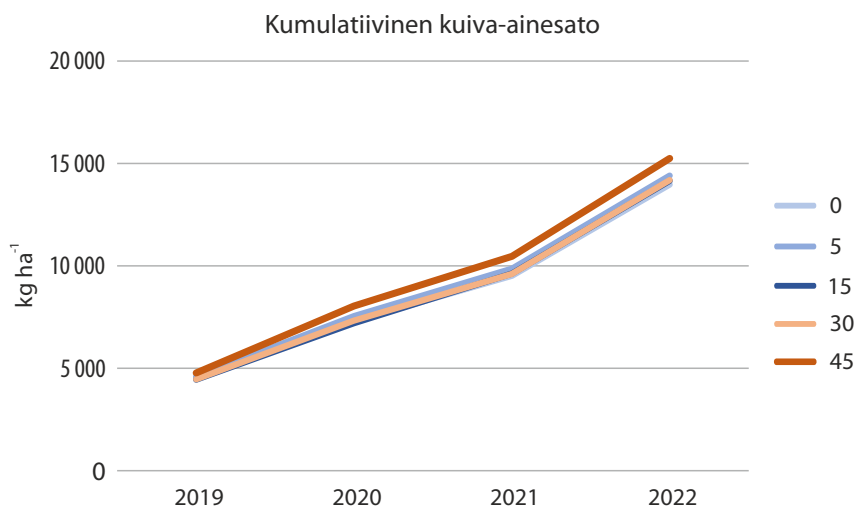
Fosforilannoitus lisäsi viljasatoja vain suurimmalla fosforilannoitemäärällä 45 kg ha⁻¹ (kuva 3.30). Eri vuosina sadon lisäys oli 4–15 %. Minkään suuruinen fosforilannoitus ei vaikuttanut sadon laatuun eli hehtolitrainoon, 1000 jyvän painoon eikä valkuaispitoisuuteen.

Sadon fosforipitoisuudet olivat lähes samat kaikilla lannoitusportailla (noin 4 g kg⁻¹ kuiva-ainetta). Sadon mukana poistui fosforia vuodessa keskimäärin 14 kg ha⁻¹. Siten annetun ja käytetyn fosforin määrät olivat parhaiten tasapainossa lannoitusportaalla 15 kg ha⁻¹ (kuva 3.31). Suuremmilla lannoitemäärillä maahan kertyi ylimääräistä fosforia, eli fosforitase oli positiivinen. Maan fosforipitoisuudet eivät kuitenkaan ole kasvaneet kovin selvästi (kuva 3.29). Lannoitemäärillä 0–5 kg ha⁻¹ sadon mukana poistui enemmän fosforia kuin lannoitteena oli annettu, eli fosforitase oli negatiivinen. Tämä aiheutti maan fosforipitoisuuden laskua (kuva 3.29).

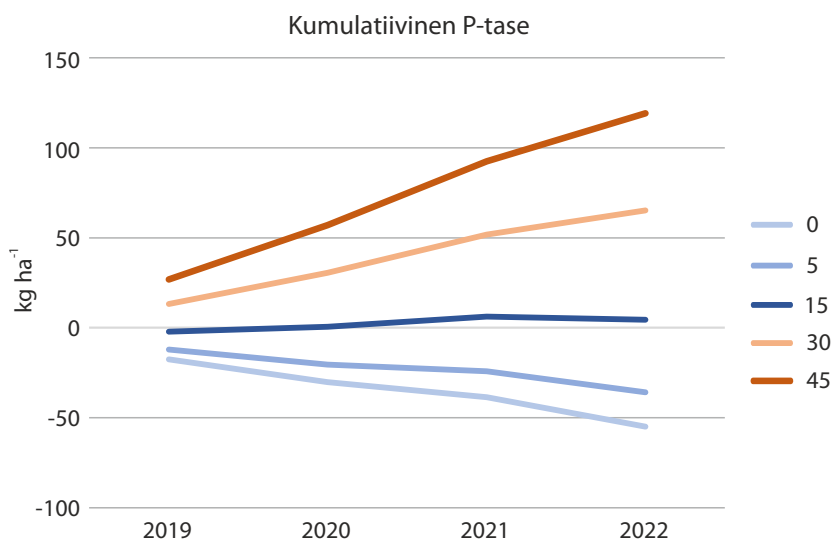


Kuva 3.29. Maan fosforipitoisuuksien muutos (P mg l⁻¹ maata) vuosina 2019–2022 kahdessa syvyydessä. Vuoden 2019 pitoisuus on alkutilanne juuri ennen ensimmäistä lannoitusta. Fosforia annettiin lannoitteessa 0–45 kg ha⁻¹. Kuvassa esitetään happamalla ammoniumasetaatilla eli suomalaisessa viljavuusanalyysissä käytetyllä menetelmällä uutettu fosfori.

Ylimääräinen fosfori näyttää siis fosforikokeessa sitoutuvan maahan sellaiseen muotoon, etteivät kasvin fosforinottoa jäljittelevät uutomenetelmät sitä löydä. Nummelan kentän alueen D vuosikymmeniä jatkunut märkyys on ilmeisesti muuttanut maan kemiallisia ominaisuuksia niin, etteivät fosforilannoituksen vaikutukset ole samanlaisia kuin hyvin kuivatetulla maalla (ks. selostus kohdassa 3.1.1.1). Poikkeavaa on, että vaikka fosforiluvut ovat alhaiset, lannoituksen aikaansaamat satovasteet ovat pieniä. Poikkeavat ominaisuudet tulevat ilmi myös siinä, että koko kentälle vuosina 2019 ja 2020 levitetty fosforilannoite paransi alueiden A-C maan fosforilukua mutta alueen D ei (kuva 3.1). Luonnonvarakeskuksen vanhoissa fosforin porraskokeissa on havaittu samaa ilmiötä, ja satovasteet pysyivät aluksi pieninä (Saarela, 1995). Fosforin porraskoetta jatketaan edelleen ja selvitetään, pystytäänkö fosforilannoituksella vuosien mittaan parantamaan maan fosforitilaa ja saamaan satovastetta aikaan. Joka tapauksessa VesiHave-hankkeissa on tullut osoitetuksi huonon ojituksen aiheuttaman märkyyden vaikutukset maan kemiallisiin ominaisuuksiin jo aiemmin osoitettujen fysikaalisten ja biologisten ominaisuuksien huonontumisen lisäksi.



Kuva 3.30. Kumulatiiviset kuiva-ainesadot fosforin porraskokeessa lannoitemäärillä 0–45 kg ha⁻¹. Vilja oli kauraa vuosina 2019 ja 2021 ja ohraa vuosina 2020 ja 2022.



Kuva 3.31. Kumulatiivinen fosforitase fosforin porraskokeessa lannoitemäärillä 0–45 kg ha⁻¹ vuosina 2019–2022.

3.2 Sievin säätösalojituskentän tulokset

3.2.1 Sääolosuhteet

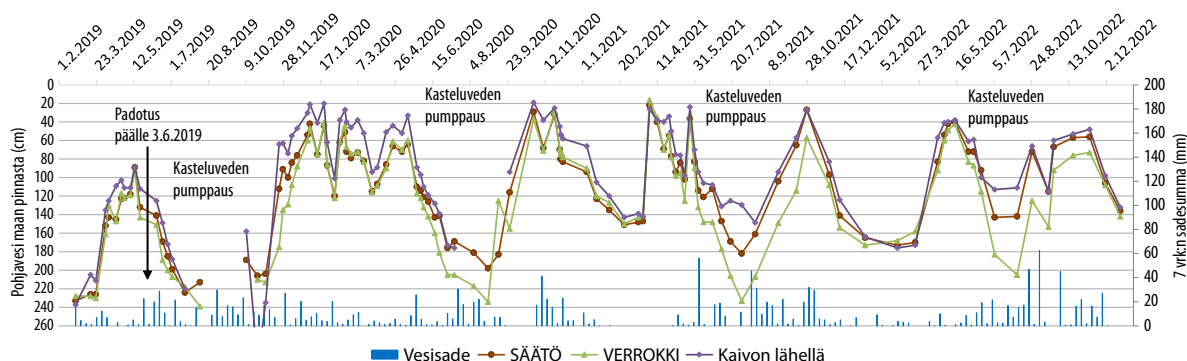
Termisen kasvukauden alku- ja loppupäivät sekä tehoisa lämpösumma ja sadanta on esitetty taulukossa 3.9. Lämpötilan vaihtelua ja lumen sulantaa tapahtui lähes koko talvikauden 2019. Runsaita sulanta- ja valuntajaksoja oli useita. Kasvukausi 2019 oli tutkimusjakson lämpimin ja kuivin, ja 2020 kylmin. Vuosien 2021–22 kasvukaudet olivat kahta aiempaa sateisempia, vaikka ainoastaan vuosi 2021 poikkesi pitkän aikavälin keskiarvosta. Ilmatieteen laitoksen mittausten mukaan alueen keskimääräinen vuosisadanta (1981–2010) on ollut 550–600 mm.

Taulukko 3.9. Termisen kasvukauden alku- ja loppupäivät, tehoisa lämpösomma sekä sadanta 2019–2022. Lähteinä on käytetty Ilmatieteen laitoksen Toholammin ja Ylivieskan havaintoasemien mittaustietoja (Ilmatieteen laitos 2023).

vuosi	Termisen kasvukauden alku	Termisen kasvukauden loppu	Tehoisa lämpösomma, C	Touko-elokuun sadanta, mm	Koko vuoden sadanta, mm
2019	20.4.	27.10.	1385	181	504
2020	21.5.	11.10.	1200	207	618
2021	9.5.	12.10.	1283	327	636
2022	5.5.	16.10.	1247	287	587

3.2.2 Pohjavedenpinnan syvyys koekentällä

Pohjavedenpinnan syvyyttä mitattiin molemmilla alueilla eri etäisyyksille (0,2–7,5 m) salaojista asennetuista pohjavesiputkista. Säättökaivossa padotus oli asennettu 0,5 metrin etäisyydelle maanpinnasta, ja se oli päällä kesäkuusta 2019 koko ajan lukuun ottamatta toukokuun 2020 kylvöaikaa ja lokakuun 2021 sadejaksoa. Vuonna 2019 padotus ei ehtinyt estää pohjaveden laskua, eikä vähäinen kastelu nostanut sitä. Seuraavina vuosina, kun padotus oli päällä vuoden alusta asti, pohjavedenpinta oli kesäaikana padotuksen ja kastelun seurauksena säättöalueella korkeammalla kuin verrokkialueella. Vuonna 2020 ero oli keskimäärin 28 cm, v. 2021 42 cm ja v. 2022 33 cm. Talviaikana pohjavedenpinnoissa ei havaittu eroa säättö- ja verrokkialueiden välillä.

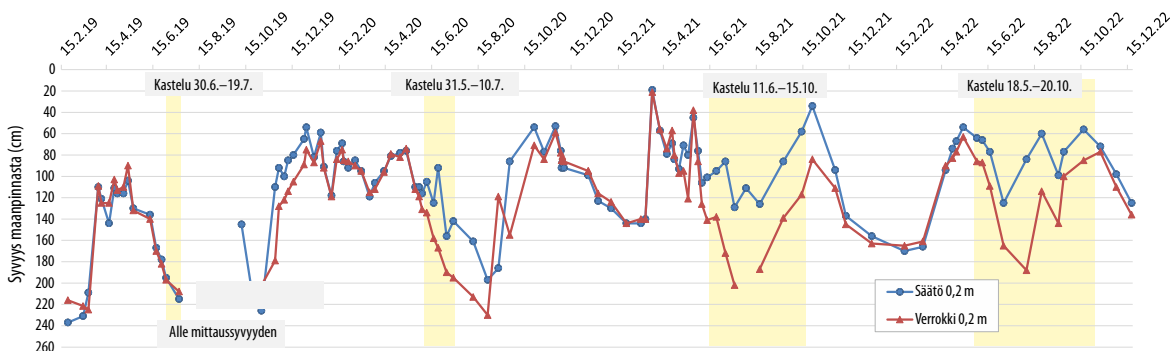


Kuva 3.32. Pohjavedenpinnan syvyydet (mediaanien keskiarvot) säättösalaojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla vertailualueella 23.2.2019–20.12.2022. Säättökaivon padotus laitettiin päälle 3.6.2019. Säättösalaojitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä 30.6.–19.7.2019, 31.5.–10.7.2020, 11.6.–15.10.2021 ja 18.5.–20.10.2022. Kuvassa on myös koekentän 7 vrk:n sadesummat.

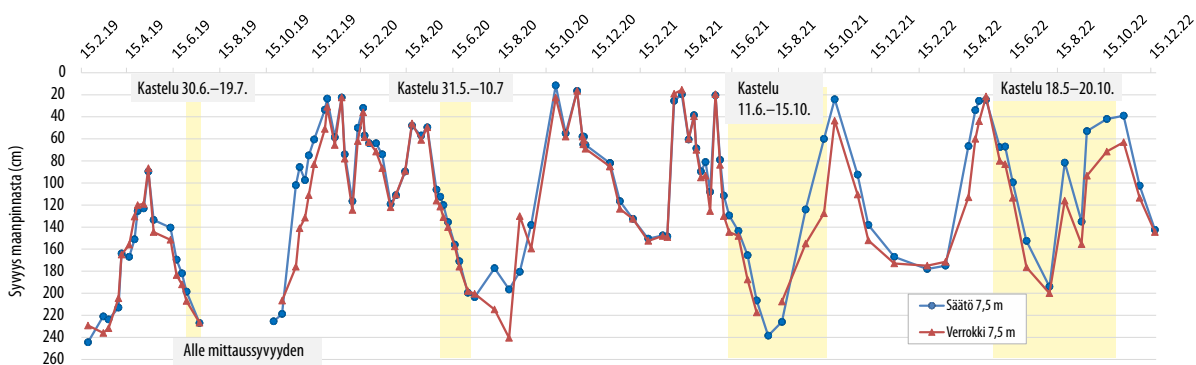
3.2.3 Pohjavedenpinnan syvyydet eri etäisyyksillä salaojasta

Padotuksen ja altakastelun vaikutus näkyi parhaiten lähellä salaojaa. Jatkuvat toimisten antureiden mukaan aurinkokennotoimisen pumpun toiminta nosti pohjaveden tason päivisin padotuskorkeuteen 0,2 m etäisyydellä imuojasta. Pumpun päivittäinen toiminta näkyi myös 0,6 m etäisyydellä salaojasta, vaikka pohjaveden pinta ei noussut yli sala-ojasyvyyden. 2,5 m etäisyydellä salaojasta aurinkokennopumpun toiminta ei näkynyt päivittäisenä vaihteluna pohjavedenkorkeudessa, mutta pohjaveden yleinen taso oli hie-man verrokkialuetta ylempänä. Salaojien puolivälissä kastelun ja padotuksen vaikutus oli vähäinen, ja näkyi lähinnä korkeampina piikkeinä syksyllä 2022. Kun pumpu öisin sammui virran loppuessa, pohjaveden pinta laski. Näin nopea pohjavedenpinnan korkeu-den vaihtelu osoittaa, että hyvin läpäisevässä maassa tapahtuu pohjavesivaluntaa ja veden sivusuuntaista liikettä säätöalueen ympärille asennetusta muovikalvosta huolimatta.

Pellon maalajista ja syvistä läpäisevistä kerroksista johtuen pohjavedenkorkeus ei pysynyt ylhäällä kovin pitkään sulannan ja sadannan jälkeen, mutta padotus hidasti pohjaveden laskua. Muoviseinäma ei pystynyt estämään pohjaveden liikettä maaperässä, vaan pohjavettä virtasi seinämän alta. Pohjaveden nopea lasku kuivina kausina on tullut esille myös muilla säätösalojituksen tutkimusalueilla Suomessa (esim. Paasonen-Kivekäs ym., 2000; Bärlund ym., 2004; Yli-Halla ym., 2020).



Kuva 3.33. Pohjavedenpinnan syvyydet (mediaanit) 0,2 metrin etäisyydellä salaojista säätösalojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla alueella 23.2.2019–22.12.2022. Säätökaivon padotus laitettiin päälle 3.6.2019.



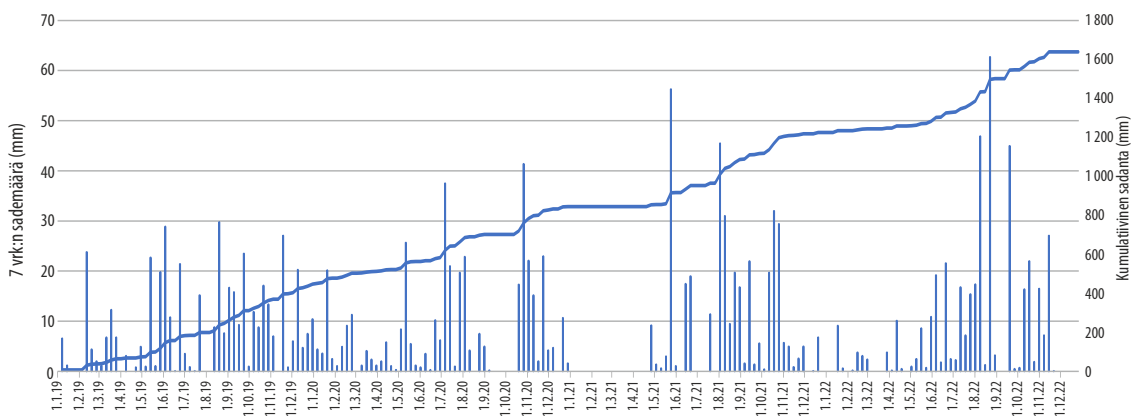
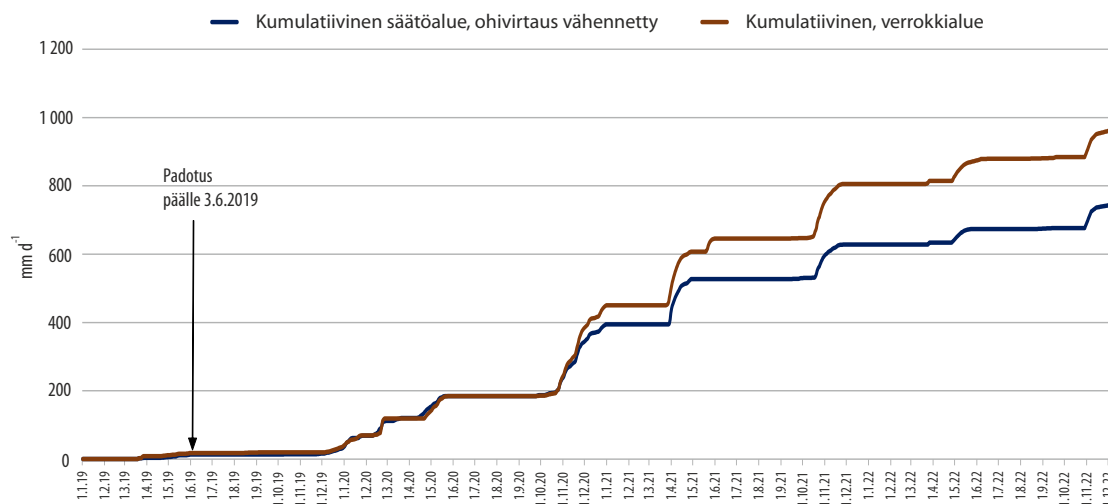
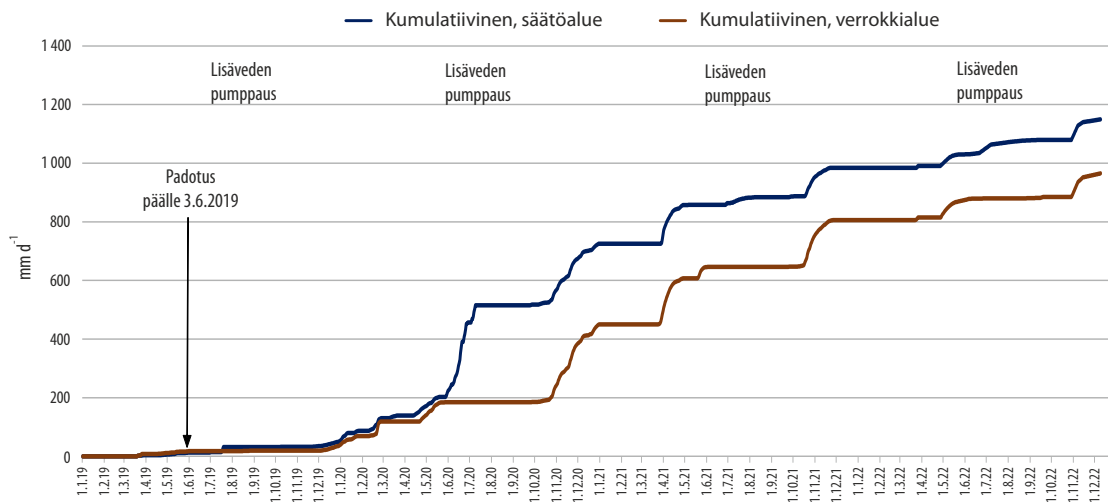
Kuva 3.34. Pohjavedenpinnan syvyydet (mediaanit) 7,5 metrin etäisyydellä salaojista säätösalojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla alueella 23.2.2019–22.12.2022. Säätökaivon padotus laitettiin päälle 3.6.2019.

3.2.4 Salaojavalunnat

Sievin koealueiden kumulatiivinen salaojavalunta sekä sadanta vuosina 2019–2022 on esitetty kuvassa 3.35. Säättösalojitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä heinäkuussa 2019 ja vuonna 2020 31.5.–9.7. välisenä aikana yhteensä 26 päivänä, vaihtelevia aikoja kerrallaan. Käytössä ollut polttomoottorikäyttöinen pumppu oli siinä määrin tehokas, että kasteluvettä purkautui säättökaivosta valtaosaan, lisäten kokonaisvaluntaa huomattavasti. Vuosina 2021–22 oli käytössä aurinkokennotoiminen pumppu, joka toimi joka päivä 11.6.–12.10.2021 ja 19.5.–12.9.2022 välisenä aikana. Pienemmästä tehosta huolimatta sähköpumppu nosti pohjaveden tasoa tehokkaammin, ja hitaamman syötön ansiosta ohivirtausta muodostui paljon vähemmän kuin kesällä 2020.

Pelkän säättösalojituksen vaikutusta valunnan määrään arvioitiin vähentämällä säättökentän salaojavalunnasta niiden päivien valunta, jolloin kastelu oli käytössä ja verrokkikentältä ei havaittu valuntaa. Näin estimoitu säättökentän salaojavalunta oli noin 220 mm (22,7 %) verrokkikentän salaojavaluntaa pienempi (kuva 3.35) ja noin 400 mm pienempi kuin säättökentän valunta kastelu mukaan lukien. Kastelun aikaansaama ohivalunta oli noin 35 % säättökentän salaojavalunnasta koko tutkimuksen aikana.

Altakasteluun käytetyn veden määrää mitattiin vuonna 2022 jatkuvatoimisella mittarilla. Koko kastelujakson aikana säättökentälle pumpattiin 1445 m³ vettä Vääräjoesta, keskimäärin 10,7 m³ päivässä. Tuona aikana säättökentältä mitattu salaojavalunta oli yhteensä noin 500 m³ (vastaa noin 50 mm), joten noin tuhat m³ (noin 100 mm) vettä imeytyi maahan kastelun seurauksena. Kastelun aiheuttamasta valunnasta valtaosa tapahtui 21.6.–7.7. välisenä aikana, jolloin pumppu oli tehokkaimmillaan. Tässä tutkimuksessa kaikki aurinkopaneelien tuottama sähkö ohjattiin suoraan pumpun toimintaan. Jos osa tehosta johdettaisiin pumpun sijaan akun lataamiseen, voisi aurinkopaneelin tuottamalla virralla kastella aluetta entistä tehokkaammin, pienentäen samalla ohivaluntaa. Kastelupumppuihin on saatavilla kohokytkimiä, jotka katkaisevat pumpun virran, kun veden pinta jakokaivossa saavuttaa ennalta määritellyn korkeuden, mutta tällä kentällä kytkimen käyttö ei ollut teknisesti mahdollista pumpun ja jakokaivon suuren etäisyyden vuoksi.

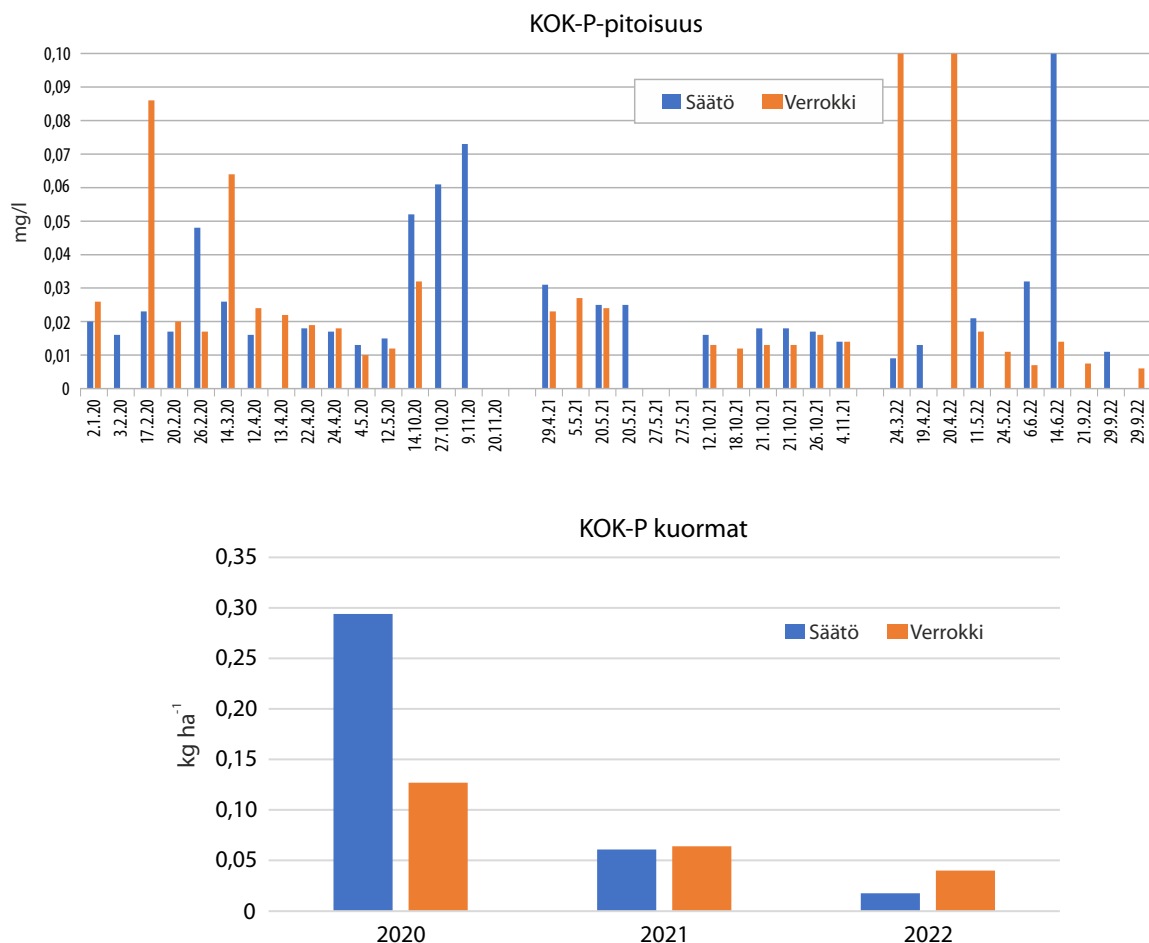


Kuva 3.35. Vuorokausivalunta ja kumulatiivinen valunta Sievin koalueilla 2019–2022: säästösalojitetun (altakastelu) ja tavanomaisesti salojitetun alueen mitattu salaojavalunta (ylin kuva) ja salaojavalunta, josta säästösalojitetun alueen mitatusta valunnasta on vähennetty kasteluveden pumppauksen aiheuttama valunta (keskimmäinen kuva). Viikkosadanta ja kumulatiivinen sadanta Sievin koekentällä (korjaamaton) (alin kuva).

3.2.5 Salaojavalunnan laatu ja kuormitus

Salaojaveden laatu määritettiin marraskuusta 2019 alkaen otetuista kokoomanäytteistä. Näytteistä analysoitiin ravinne- ja kiintoainepitoisuudet (kuvat 3.36–3.39). Pitoisuuksien ja salaojavalunnan määrien perusteella laskettiin salaojavalunnan aiheuttama kuormitus molemmilta koealueilta.

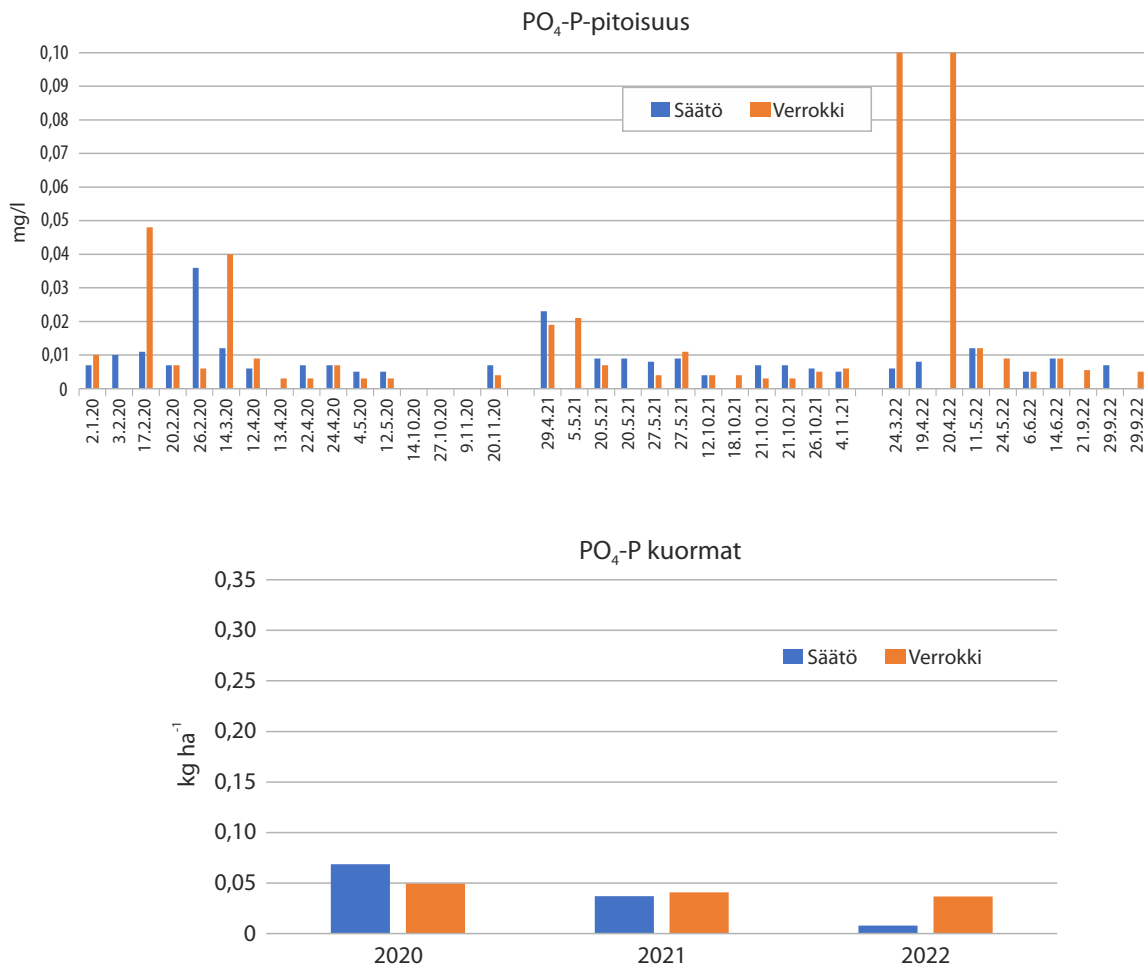
Molemmilta koealueilta mitattiin verrattain pieniä fosforipitoisuuksia, ja kokonaisfosforin kuormat salaojavalunnasta jäivät pieniksi (kuva 3.36). Suurin vuosikuorma oli noin 0,3 kg P ha⁻¹ vuonna 2020 säätökentältä. Samana vuonna verrokkikentän kuorma oli vain alle puolet säätökentän kuormituksesta, mutta vuosina 2021 ja 2022 verrokkialueen salaojavalunnan kokonaisfosforikuorma oli säätökentän kuormaa hieman suurempi. Valtaosa vuoden 2020 kokonaisfosforin kuormasta muodostui altakastelun aikana, jolloin tehokas pumppaus aiheutti suuren ohivirtauksen. Verrokkialueen kokonaisfosforin kuorma oli samaa suuruusluokkaa vuosina 2020–2021, mutta vuonna 2022 kuorma oli pienempi. Säätöalueen kokonaisfosforin kuorma oli selvästi suurin vuonna 2020, ja pieneni tasaisesti.



Kuva 3.36. Kokonaisfosforin pitoisuudet (a) ja kuormat (b) säätösalojitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 2020–2022. Vuoden 2022 mittausaineistossa on kevään ja loppuvuoden osalta puutteita.

Liukoisen fosfaattifosforin kuorma (kuva 3.37) oli verrokkialueella joka vuosi samaa suuruusluokkaa, samoin verrokkialueen ja säätöalueen kuormat vuosina 2020–2021, mutta säätöalueen kuorma oli pienempi vuonna 2022 aiempiin vuosiin verrattuna. Tämä vaihtelu saattaa johtua epävarmuudesta vuoden 2022 kuormien laskennassa, sillä etenkin fosforin osalta havaittiin aiempaa suurempia pitoisuuksia ja vaihtelua, mahdollisesti sen takia, että näytteet edustivat vain yhden hetken konsentraatiota. PO₄-P:n osuus kokonais-P:n kuormasta oli säätöalueella 32 % ja verrokkialueella 56 %.

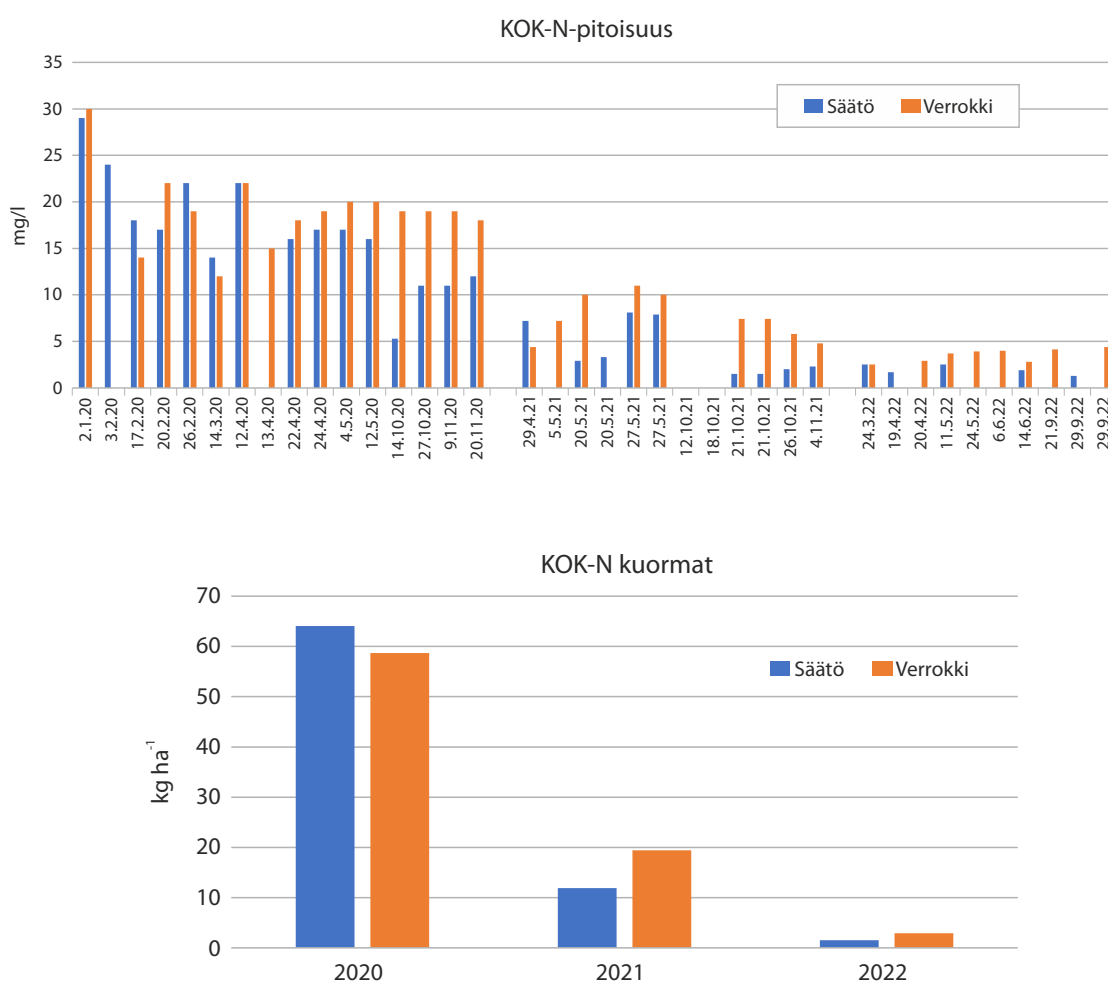
Salaojavalunnan kokonaistypen kuormitus oli selvästi suurin vuonna 2020 molemmilla koealueilla, säätöalueella suuremman valunnan takia hieman verrokkialuetta suurempi. Myöhemmin kokonaistypen kuorma oli suurempi verrokkialueelta siitä huolimatta, että säätöalueen salaojavalunta oli hieman suurempaa kastelun takia. Kokonaistypen pitoisuudet olivat kesästä 2020 saakka säätöalueen salaojavalunnassa verrokkialuetta pienempiä, ja molempien alueiden pitoisuudet laskivat vuoden 2020 jälkeen. Pitoisuuksien yleisen tason pieneneminen oli todennäköisesti seurausta viljelytoimenpiteistä. Vuoteen 2020 saakka koekentällä viljeltiin viljoja, ja sitä muokattiin säännöllisesti. Vuonna 2021 otettiin



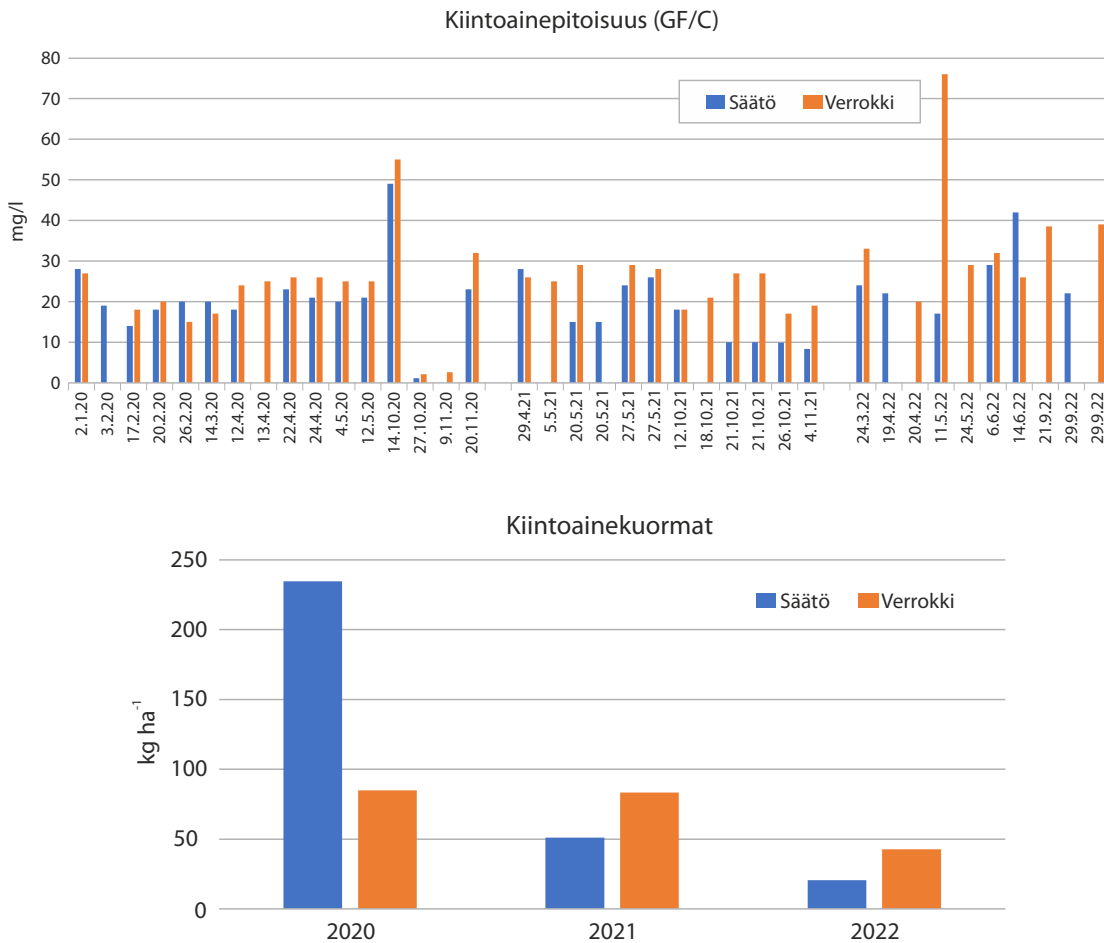
Kuva 3.37. Liukoisen epäorgaanisen fosforin pitoisuudet (a) ja kuormat (b) säätösalojitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 2020–2022. Vuoden 2022 mittausaineistossa on kevään ja loppuvuoden osalta puutteita.

viljelyyn nurmi, eikä koealueita ole muokattu toukokuun 2020 jälkeen. Typpipitoisuuden pieneneminen säätöalueen salaojavalunnassa verrokkialueeseen verrattuna johtunee kasvien tehokkaammasta ravinteidenotosta, ja kenties voimakkaammasta immobilisaatiosta mikrobitoiminnan vaikutuksesta. Vastaava ilmiö on havaittu myös muualla, kun on tutkittu säätösaloajituksen vaikutusta salaojavalunnan kokonaistyyppi- tai nitraattipitoisuuksiin (Wang et al., 2020).

Salaojavalunnan mukana tullut kiintoainekuorma oli verrokkialueella samaa suuruusluokkaa vuosina 2020–2021, ja vuonna 2022 noin puolet pienempi, heijastaen salaojavalunnan määrää (kuva 3.39). Säätöalueen kiintoainekuorma oli suurin vuonna 2020, ja siitä valtaosa muodostui kesällä kastelun aikana. Seuraavina vuosina säätökentän kiintoainekuorma oli verrokkialueen kuormaa pienempi, kuten muutkin tässä tutkimuksessa seurattut kuormat. Kiintoaineen pitoisuudet olivat suurimman osan ajasta hieman suurempia verrokkialueen salaojavalunnassa kuin säätöalueen, eikä kummankaan alueen pitoisuuksissa havaittu suurta vaihtelua.



Kuva 3.38. Kokonaistyyppien pitoisuudet (a) ja kuormat (b) säätösaloajitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 2020–2022. Vuoden 2022 mittausaineistossa on kevään ja loppuvuoden osalta puutteita.



Kuva 3.39. Kokonaisfosforin pitoisuudet (a) ja kuormat (b) säätösalojitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 2020–2022. Vuoden 2022 mittausaineistossa on kevään ja loppuvuoden osalta puutteita.

3.2.6 Sato

Kesällä 2019 Sievin koekentällä kasvoi ruista ja kesällä 2020 ohraa. Taulukossa 3.10 on esitetty keskimääräiset sadot molemmilla koealueilla sekä erikseen salaojien kohdalla ja ojien puolivälissä. Keskimääräinen ruissato oli verrokki-alueella 8700 ja säätöalueella 9100 kg ha⁻¹. Vuoden 2020 ohrasato oli 4500–4900 kg ha⁻¹. Säätöalueen sadot olivat vertailualueutta suurempia vuosina 2019 ja 2020, sadonlisä vaihteli välillä 2,5–7,9 %. Eri mittausten välinen hajonta oli säätösalojitetulla alueella vertailualueutta pienempää. Vaatimaton tulos vuonna 2019 selittynee sillä, että säätö saatiin toimintaan vasta kesäkuussa, jolloin pohjaveden pinta oli ehtinyt laskea salaojasyvyyden alapuolelle, eikä padotuksesta tai kastelusta ollut enää apua. Lisäksi vuosi oli poikkeuksellisen kuiva, joten vettä oli saatavilla niukasti, ja pohjaveden pinta laski molemmilla koealueilla mittaussyvyyden alapuolelle koko kesäksi.

Kesinä 2021–2022 koekentällä kasvoi siemenviljelyssä oleva nurmi, jonka kasvua tarkasteltiin ottamalla näytteitä koko biomassasta, ei siemensadosta. Nurmisato on esitetty taulukossa 3.11. Sato vaihteli noin 12 000–21 500 kg ha⁻¹ välillä, ja säätösalojituksella ja altakastelulla saavutettiin 5,9–17,3 % sadonlisä tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna.

Nurmen sadonlisä oli tilastollisesti merkitsevä kaksisuuntaisen varianssianalyysin perusteella ($F(1, 44) = 6,1$ $p = 0,018$), mutta ero sadossa salaojien päältä ja puolivälissä ei ollut merkitsevä, eikä säätökäsittelyllä ja paikalla ollut yhdysvaikutusta. Sadonlisä oli suurempi silloin, kun sato oli pienempi, eli säätösalaajitus ja altakastelu tasoittivat sadon vaihtelua nurmella. Säätösalaajituksen ja altakastelun positiivinen vaikutus nurmisatoon etenkin vuonna 2022, mutta myös 2021, voi selittyä säädön ja kastelun paremmalla onnistumisella. Padotus voitiin pitää päällä yhtäjaksoisesti, kun nurmi oli kylvetty yhtä aikaa ohran kanssa, ja kastelu onnistuttiin toteuttamaan aiempaa tasaisemmin. On myös mahdollista, että nurmen juuristo pystyi hyödyntämään alhaalta päin tulevaa kosteutta viljoja tehokkaammin, etenkin kolmantena kasvukautenaan.

Taulukko 3.10. Ruissato 2019 ja ohrasato 2020 keskimäärin (kuiva-aine), ja hajonta säätösalaajituksen ja tavanomaisen ojituksen alueilla kokonaisuudessaan, sekä säätösalaajituksella ja altakastelulla saavutettu sadonlisä salaojien kohdalla (0 m) ja ojien puolivälissä (7,5 m).

vuosi	Viljasato, kg/ha paikka suhteessa salaojaan	Tavanomainen		Säätökenttä		
		keskiarvo	keskihajonta	keskiarvo	keskihajonta	sadonlisä, %
2019, ruis	päällä	8951	1499	9171	1302	2.5
	välissä	8465	1056	9010	978	6.4
2020, ohra	päällä	4597	952	4961	599	7.9
	välissä	4528	873	4810	677	6.2

Taulukko 3.11. Nurmisato vuosina 2021 ja 2022 keskimäärin (kuiva-aine), ja hajonta säätösalaajituksen ja tavanomaisen ojituksen alueilla kokonaisuudessaan, sekä säätösalaajituksella ja altakastelulla saavutettu sadonlisä salaojien kohdalla (0 m) ja ojien puolivälissä (7,5 m).

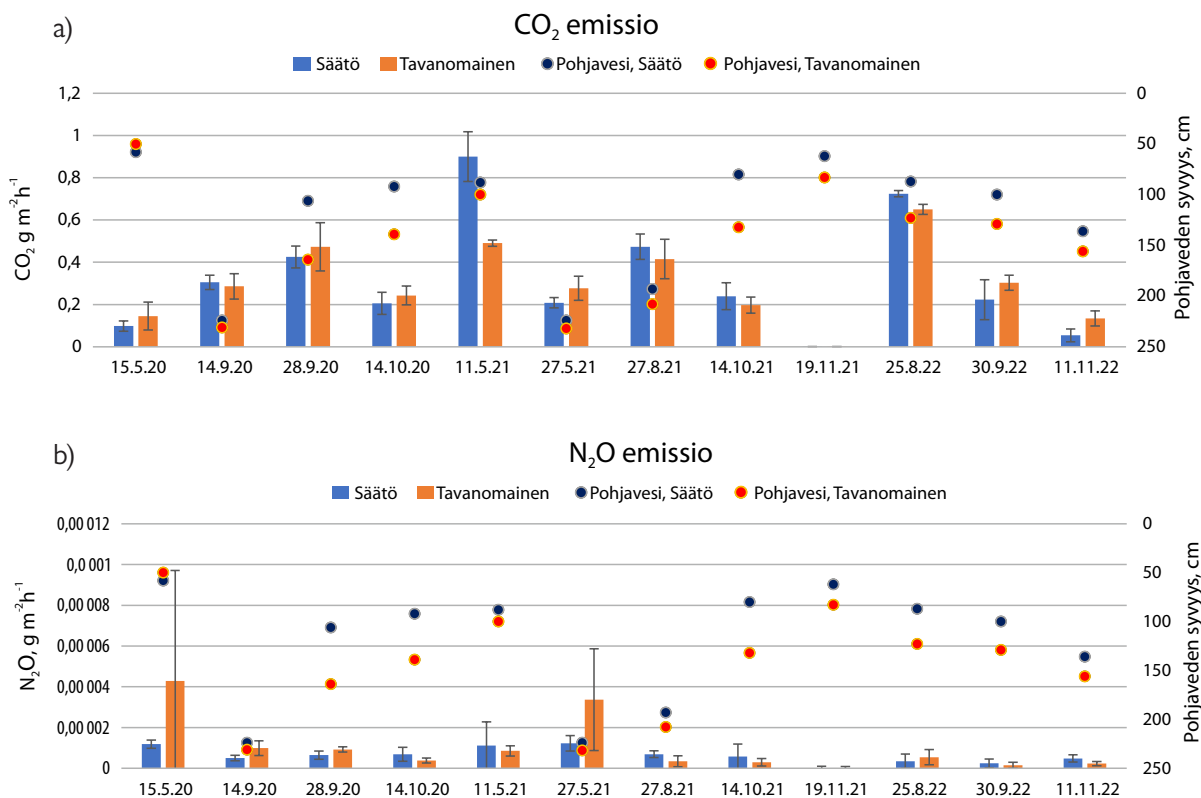
Vuosi	Nurmi, kg kuiva- ainetta/ha Paikka suhteessa salaojaan	Tavanomainen		Säätökenttä		
		keskiarvo	keskihajonta	keskiarvo	keskihajonta	sadonlisä, %
2021	päällä	19589.8	2422.2	21515.8	562.2	9.8
	välissä	20075.2	1912.9	21594.0	2888.2	7.6
2022_1	päällä	11831.1	1006.5	13701.5	1459.5	15.8
	välissä	11959.4	691.3	14025.3	1768.3	17.3
2022_2	päällä	15837.4	2748.8	16771.0	2802.2	5.9
	välissä	14018.1	2114.2	16438.2	1928.8	17.3
Yhteensä		15551.8	1816.0	17341.0	1901.5	12.3

3.2.7 Kasvihuonekaasuemissiot

Kasvihuonekaasuemissioita mitattiin säätö- ja verrokkialueelta kaksitoista kertaa tutkimuksen aikana. Molemmat koealueet olivat sekä hiilidioksidin että dityppioksidin lähteitä, eli niillä muodostui kasvihuonekaasujen päästöjä (kuva 3.40). Etenkin dityppioksidipäästöt olivat molemmilla koealueilla melko vaatimattomat ($0,4$ ja $0,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ vuodessa säätö- ja verrokkialueilta), ja selvästi pienemmät kuin suomalaiselta viljelykäytössä olevalta kivennäismaalta on havaittu aiemmissä tutkimuksissa ($1,2\text{--}7,8 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) (Pihlatie, 2007). Ero koealueiden dityppioksidipäästössä ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Vähäiset dityppioksidipäästöt voivat johtua kentän karkeahkosta maalajista ja siitä johtuvasta hyvästä kaasunvaihdosta.

Hiilidioksidin päästöt olivat hieman suuremmat säätö- kuin verrokkialueelta (n. $7700 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ säätö- ja $7200 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ verrokkialueelta), mutta ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Hiilidioksidipäästö koekentältä oli dityppioksidipäästöä suurempi maan vilkkaan mikrobitoiminnan ja runsaan eloperäisen aineksen määrän vuoksi.

Kummankaan kasvihuonekaasun päästöjen ja pohjavedenpinnan syvyyden välillä ei havaittu korrelaatiota.



Kuva 3.40. Hiilidioksidin- (a) ja dityppioksidiemissiot (b) säätö- ja verrokkialueilla sekä mittauspäivien pohjavedenpinnan syvyydet.

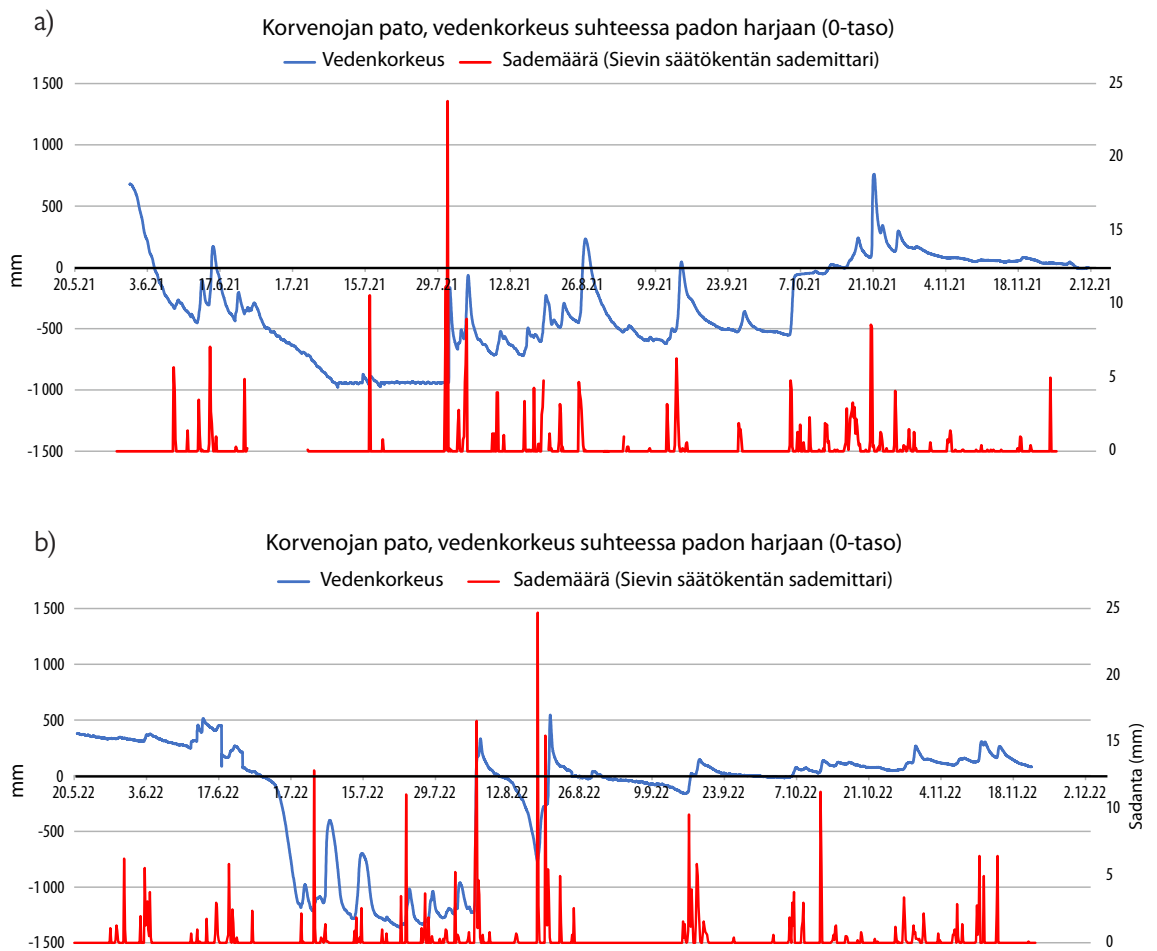
3.3 Valtaojan padotuskokeen tuloksia

Vedenpinta ojassa oli alle padotuskorkeuden suurimman osan ajasta vuonna 2021 (kuva 3.41 a), ja oja oli kuiva kesän ajan siitä huolimatta, että kasvukausi oli säätökentän sademittarin mukaan tutkimuksen sateisin. Vuonna 2022 ojassa oli vettä koko kasvukauden ajan, ja elokuusta alkaen veden pinta oli lähellä padotuskorkeutta.

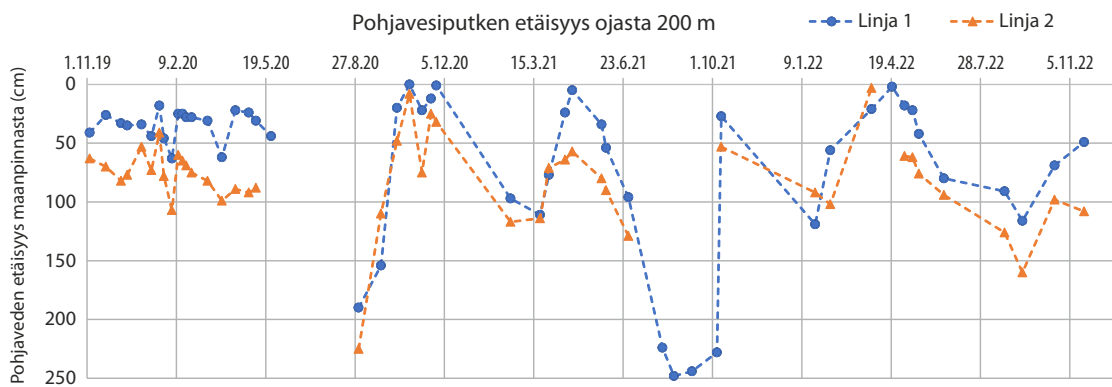
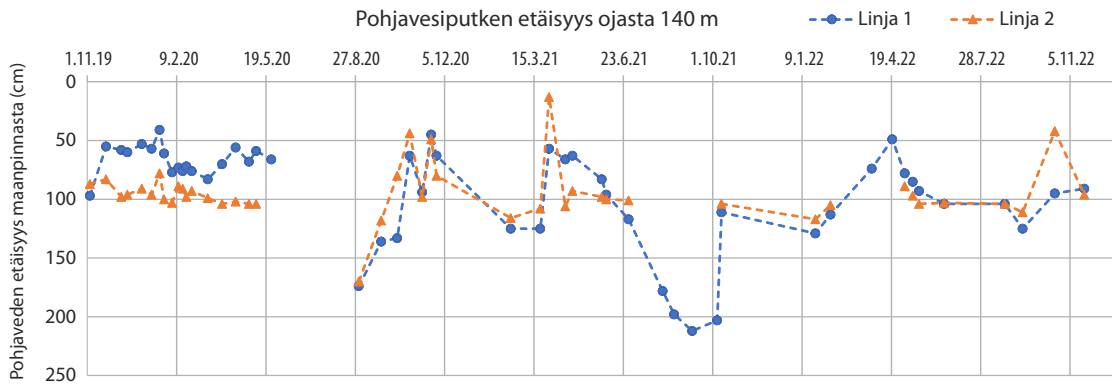
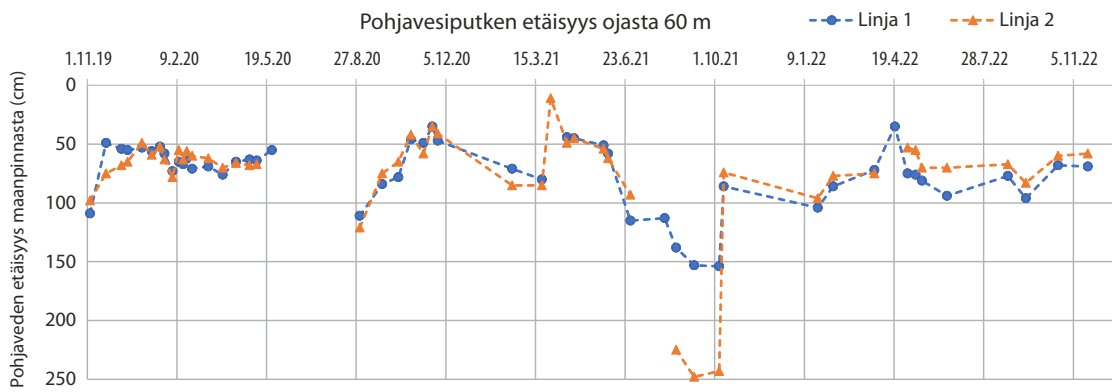
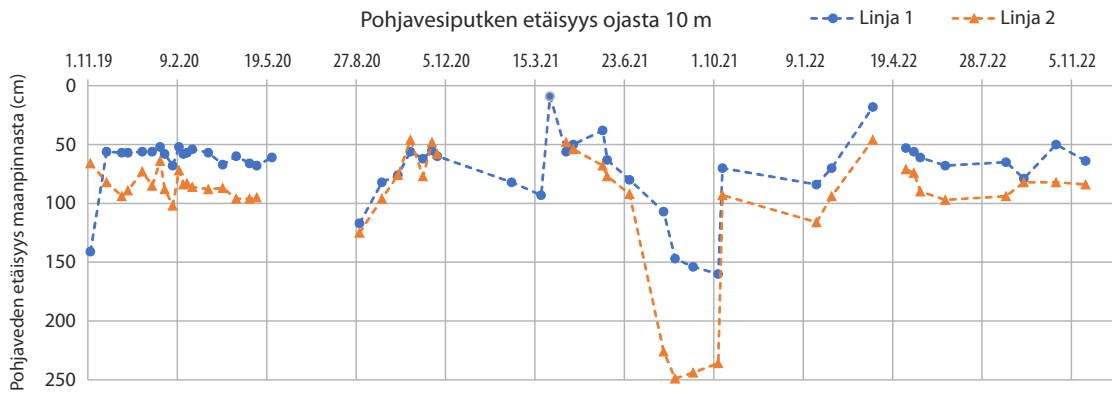
Pohjaveden taso vaihteli heijastaen muutoksia ojan vedenpinnan tasossa. Tutkimuksen alussa pohjaveden taso oli korkeammalla linjalla 1 kaikilla etäisyyksillä valtaojasta (kuva 3.42), mutta myöhemmin tasot olivat samansuuruiset.

Pohjavedenpinnan absoluuttinen korkeus oli molemmilla havaintolinjoilla korkeimmillaan kauimpana valtaojasta (kuva 3.43 b). Tarkasteltuna suhteessa maanpintaan pohjaveden taso oli melko tasainen kautta havaintolinjan lukuun ottamatta ojan kohtaa. Pohjaveden taso oli korkeammalla linjalla 1 (kauempana padosta) sekä absoluuttisella asteikolla tarkasteltuna että suhteessa maanpintaan. Ero oli kuitenkin pienempi suhteessa maanpintaan, jolloin pohjaveden tasoilla oli vain hyvin vähän eroa.

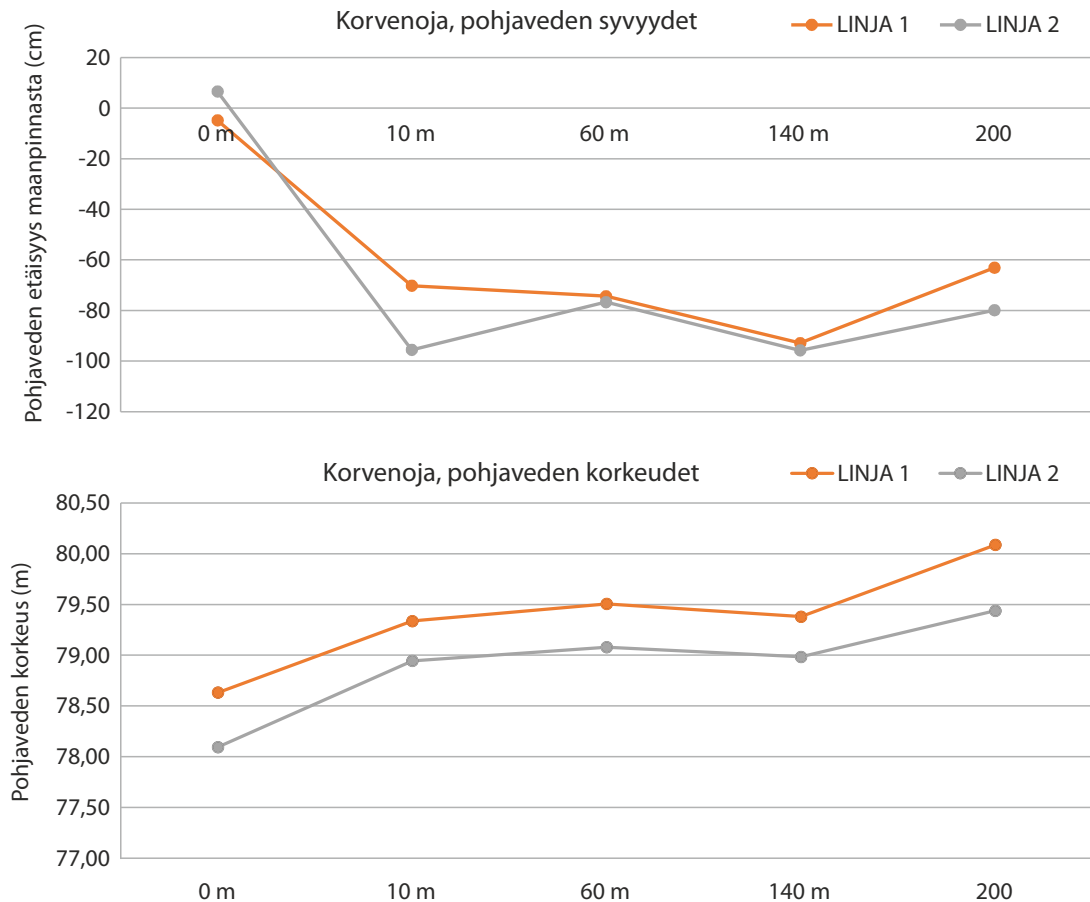
Valtaojan padotusalueen tietoja ja mittausten tuloksia käytettiin hankkeen mallinnusosuudessa.



Kuva 3.41 Vedenkorkeus ojassa padon edessä vuonna 2021 (a) ja 2022 (b).



Kuva 3.42. Pohjavedenpinnan korkeudet Korvenojaan rajoittuvalla peltoalueella syksystä 2019 vuoden 2022 loppuun eri etäisyyksillä valtaojasta.



Kuva 3.43. Pohjavedenpinnan keskimääräiset korkeudet suhteessa maanpintaan (a) ja meren pinnan tasoon (b) eri etäisyyksillä ojasta.

3.4 Peltoalueen ja ojitusverkoston säädön mallintaminen

3.4.1 Valtaojan padotuksen mallinnus

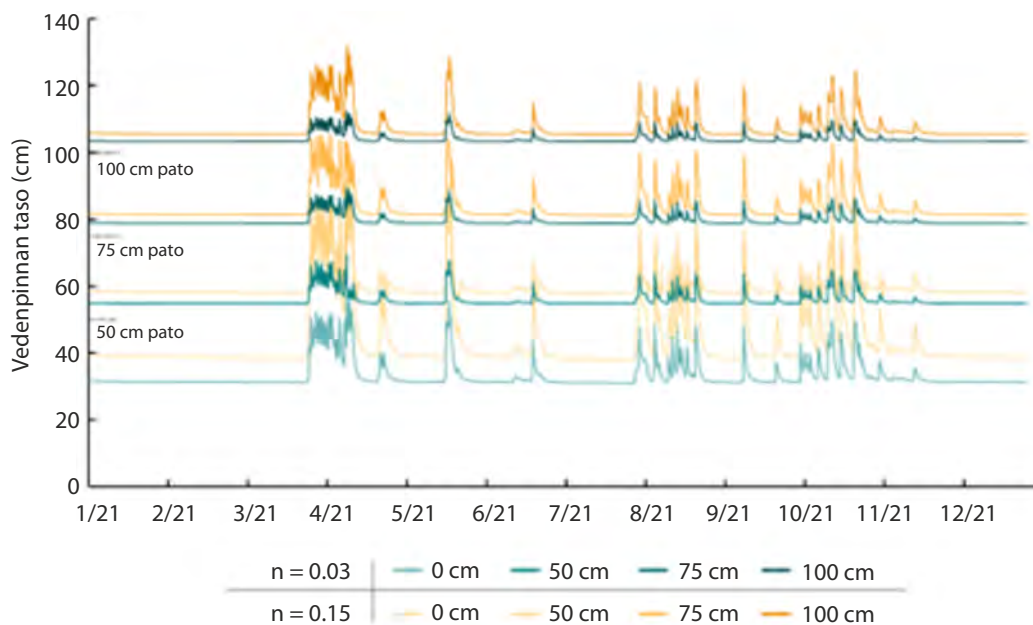
Uomamallilla tuotettiin teoretisoitu kuvaus valtaojan vedenpinnan vaihteluista yhden vuoden aikana eri padotuskorkeuksilla ja erilaisilla virtausvastuksen arvoilla (kuva 3.44). Padon kohdan vedenkorkeussarjoista näkyy uomaan tulevan vesimäärän nopea vaikutus vedenkorkeuksiin. Talviaikana sadanta tulee lumena, jolloin uomaan tuleva vesimäärä on vähäinen ja tasainen. Vuoden suurin ja pitkäkestoisin valuntatapahtuma näkyy kohenneena vedenkorkeutena ja nopeana pinnankorkeuden vaihteluna maaliskuun lopussa ja huhtikuun alussa. Kasvukauden aikana yksittäiset rankkasadejaksot nostavat vedenpintoja hetkellisesti, mitä seuraa vedenpinnan lasku takaisin sateita edeltäneelle tasolle noin 4–5 päivän kuluessa. Kesäaikana laskettu vedenpinta pysyy padon harjan tasalla, mikä johtuu mallioletuksesta, jonka mukaan mallissa toteutettu patorakennelma oli vesitiivis eli vettä ei päässyt suotautumaan padon ohi tai sen läpi. Mallissa uomasta ei myöskään haihtunut vettä kesäaikana, jolloin potentiaalinen haihdunta on samaan aikaan suurta. Mallissa on

lisäksi käytetty numeerisen ratkaisun stabiilisuuden parantamiseksi minimivirtaamaa, joka estää virtaaman alenemisen täsmälleen padonharjan tasalle. Teoreettisesta tarkastelusta poiketen Korvenojalla vedenpinnan on kesäisin havaittu laskevan lähelle uoman pohjaa sekä patorakenteen yläpuolella että alapuolella. Kesän lopun sadejaksot ja syksyn sateet näkyvät vedenpinnan vaihteluna, joka jää alemmaksi kuin kevään valuntahuiput.

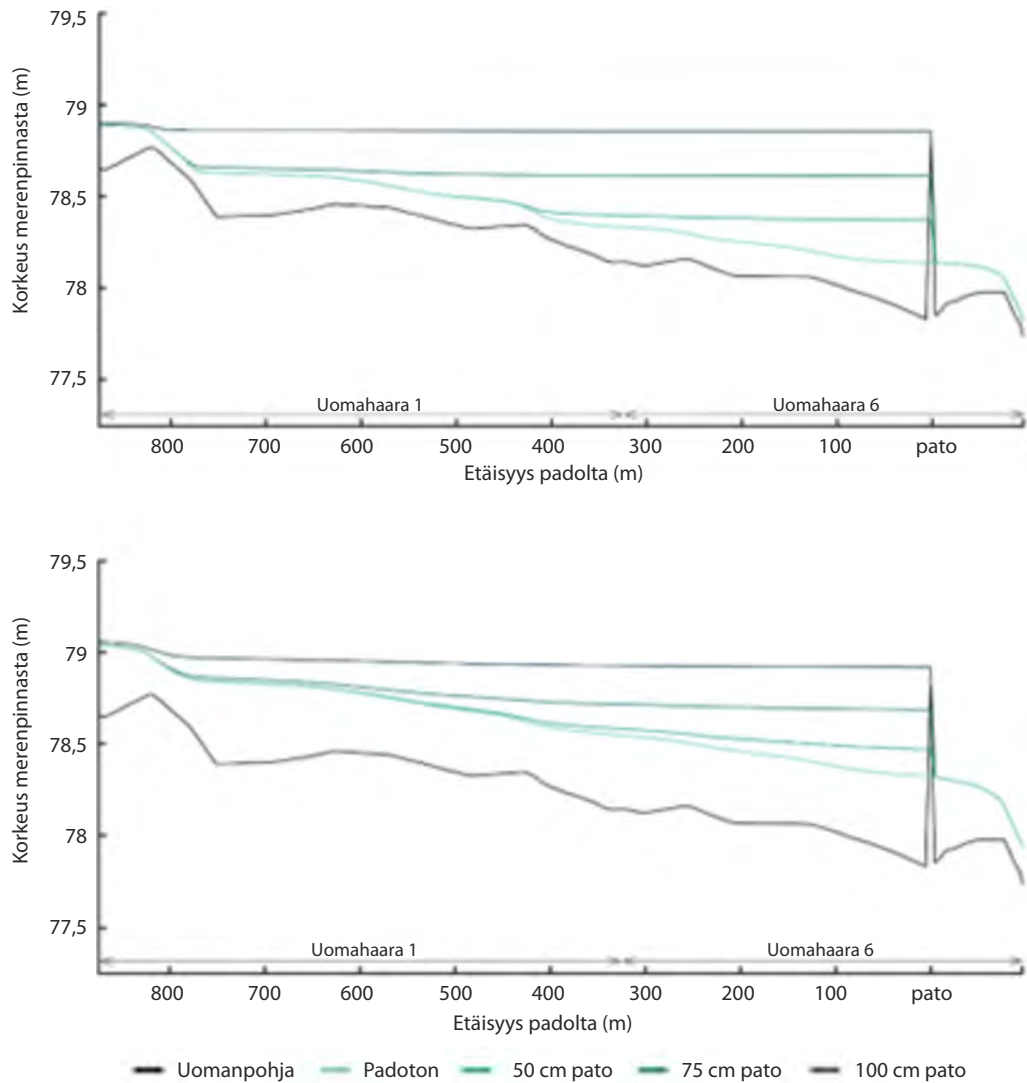
Peruskuivatuksen säädön eli valtaojan padotuksen laskennallinen vaikutus kuvassa 3.44 näkyy systemaattisena vedenpinnan nousuna, joka alimmilla vedenkorkeuksilla on käytännössä padotusmuutoksen suuruinen. Padotusvaikutus on suurimmillaan, kun pellolta uomaan tulevan valumaveden määrä on pienimmillään, mutta pienenee korkeammilla vedenkorkeuksilla uomavirtaaman kasvaessa. Tämä heijastaa uoman poikkileikkauksen muotoa, joka levenee korkeusaseman suhteessa. Kuvassa 3.44 on esitetty vedenkorkeudet tilanteessa, jossa uoman Manningin kerrointa on kasvatettu maksiarvoonsa 0,15. Suurempi virtausvastus kasvattaa vedenpinnan vaihtelua, joskaan resession pituus ei merkittävästi muutu. Suuri virtausvastus nostaa matalia vedenpintoja eniten skenaariossa, jossa valtaojaa ei padoteta (kuva 3.44). Padotusvaikutus on suurempi uomassa, jossa Manningin kerroin ja virtausvastus ovat pieniä. Manningin kertoimen vaikutusta on käsitelty kattavammin Paavosen (2023) esittämissä malliajoissa.

Suurimmillaan, padotuskorkeuden ollessa 100 cm, padotusvaikutus ulottui noin 900 m padolta ylävirtaan (kuva 3.45) uomassa, jossa uoman pohjan kaltevuus oli noin 0,1 %. Padon kohdalla uoman pohjan topografiassa oli kuoppa, jonka vuoksi padon kohdalla vesi oli selvästi pohjaa korkeammalla pohjamuodon padotusvaikutuksen takia. Tämän seurauksena 1,0 m korkuisella padolla pystyttiin nostamaan uoman vedenpintaa vain 75 cm padottomaan tilanteeseen verrattuna (kuva 3.45).

Uomamallin tulosten avulla voidaan arvioida padon vaikutusta vedenpinnan korkeuksiin erilaisissa virtaus- ja kasvillisuusolosuhteissa, joissa kasvillisuus lisää virtausvastusta. Ilman mallintamista padotusvaikutus voidaan arvioida likimääräisesti pelkästään uoman



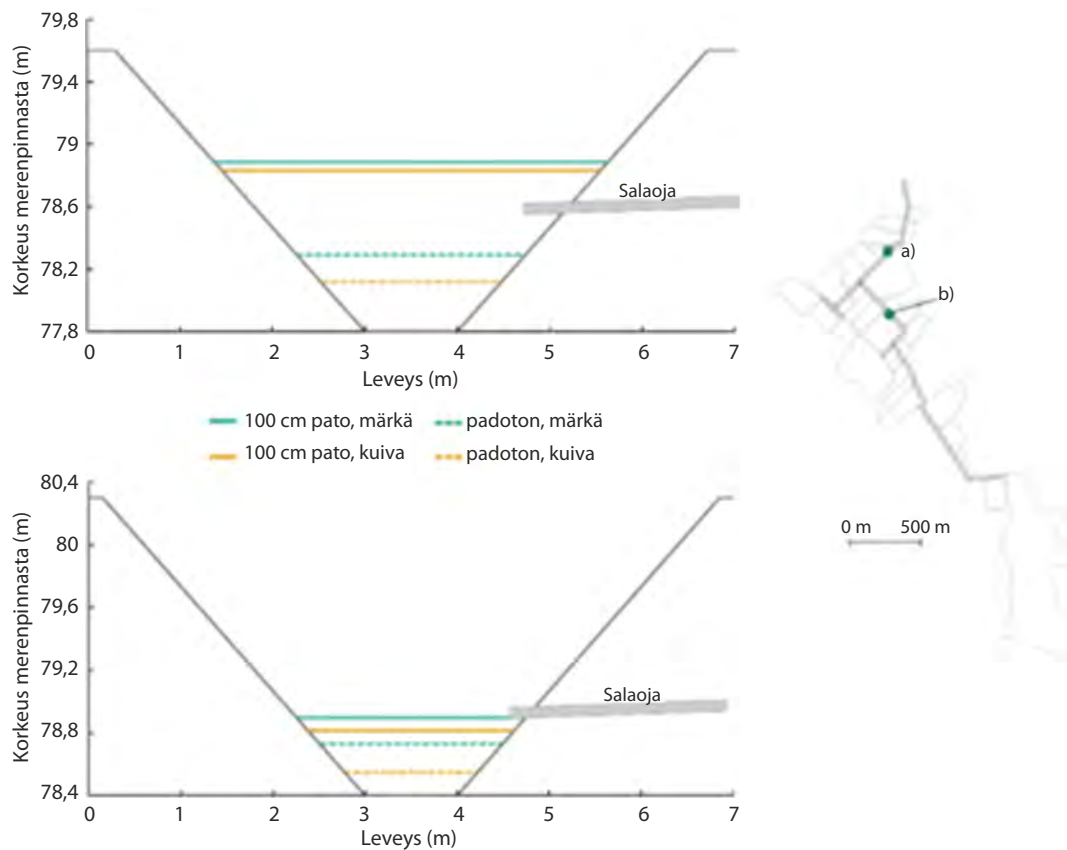
Kuva 3.44. Padotuskorkeuden ja uoman kasvillisuuden vaikutus vedenpinnan tasoon padon kohdalla.



Kuva 3.45. Padotuksen vaikutus vedenpintaan kuivana (a) ja märkänä (b) ajanhetkenä. Ajanhetkien vedenpinnat ja uoman pohjatopografia on kuvattu noin 900 m matkalla padolta ylävirtaan uomahaaroissa 6 ja 1.

korkeusmallin perusteella laskemalla padon aiheuttama horisontaalinen padotusvaikutus. Mallin tuoma lisäarvo padotusvaikutuksen arviointiin on sitä suurempi mitä enemmän vettä kulkeutuu uomassa ja mitä suurempi on uoman virtausvastus. Korvenojan padon yläpuolisen valuma-alueen pinta-ala on rajallinen ja valuma-alueen syöttämä vesimäärä on siinä mielessä vähäinen, että vedenkorkeuden vaihtelut uomassa jäävät laskennallisesti tulvakorkeuden eli ojan reunojen ylimmän korkeuden alapuolelle. Jos valuma-alue olisi suurempi ja uomaan tuleva vesimäärä isompi, valtaojan padotuksen vaikutus voisi vaihdella enemmän virtausolosuhteiden vaihdeltaessa. Korvenojalla on havaittu uomien ajoittaista tulvimista talven ja kevään suurten valuntatapahtumien aikana. Talviajan tulviminen on oletettavasti seurausta uomissa olevan jään virtausvastuksesta, mitä ei huomioitu laskentasovelluksessa. Korvenojan uomassa on kasvillisuutta, joka lisää veden virtausvastusta. Tässä tilanteessa vedenkorkeuksien laskennallinen arviointi mallilla on realistisempaa kuin pelkästään korkeusmallin perusteella tehty arvio.

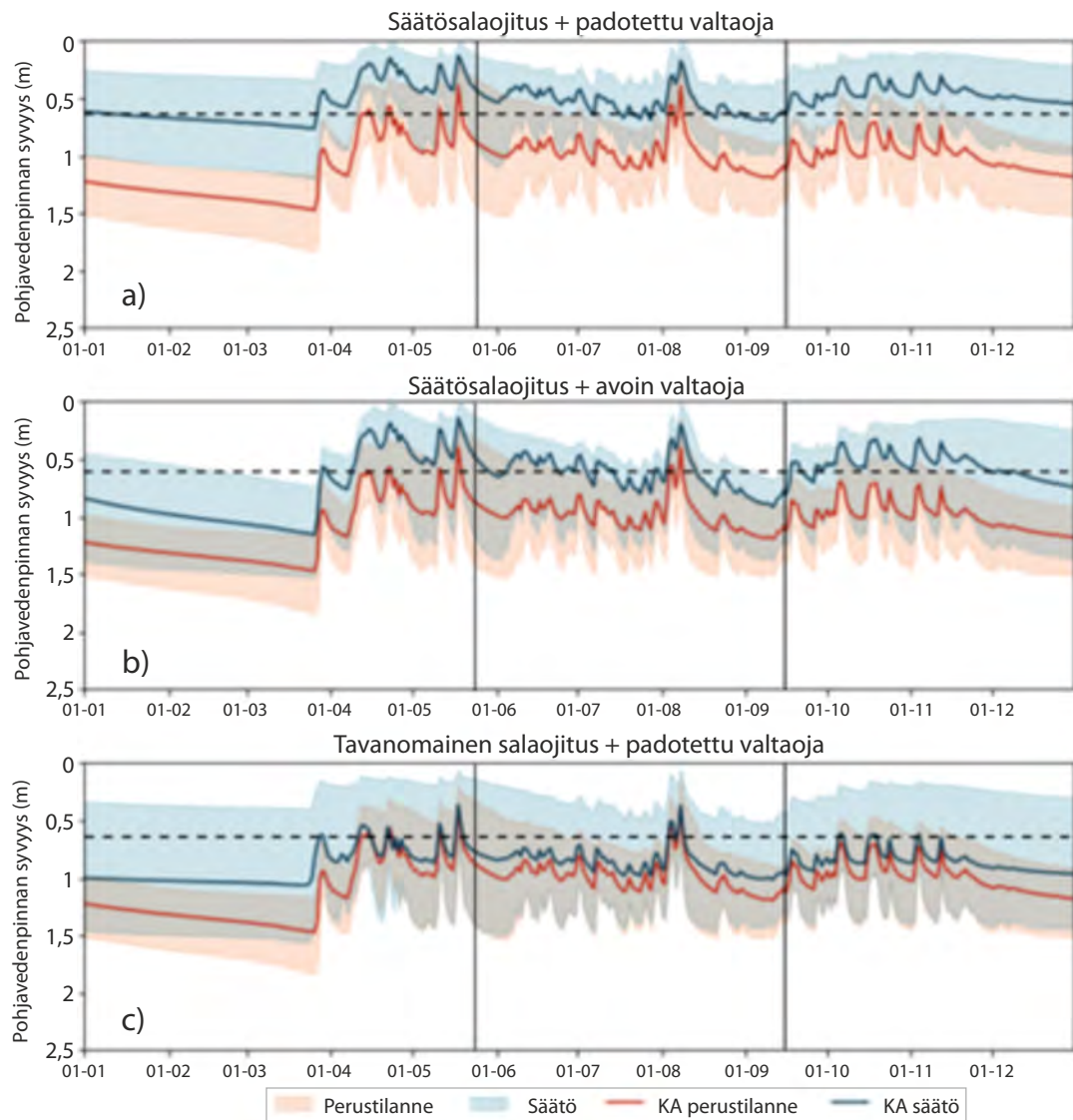
Padotuksen vaikutusta salaojaverkostoon Korvenojalla on konseptualisoitu kuvassa 3.46. Korvenojan simulointituloksista nähtiin, kuinka valtaojan padotus vaikuttaa vedenpintoihin salaojasyvyyteen nähden eri kohdissa uomaa (kuva 3.46). Lähellä patoa padotus nosti vedenpinnan salaojasyvyyden yläpuolelle, mutta kauempana padosta (650 metriä ylävirtaan) padotusvaikutus ei enää ylettynyt salaojasyvyyden yläpuolelle. Salaojaverkoston korkeudelle ulottuva padotus aiheuttaa säätösalojitukseen rinnastettavan vaikutuksen valtaojan läheisyydessä. Vastaavasti valtaojan vedenpinnan taso salaojaverkon alapuolella aiheuttaa pellolle kuivatusvaikutuksen, joka uoman läheisyydessä on tehokkaampi kuin salaojien kuivatusvaikutus. Valtaojan padotus luo varastotilan uomaverkostoon, jota voi käyttää myös kastelussa. Sievin uomaverkoston laskennallinen tilavuus, jonka valtaojan padotus voi muodostaa oli malliarvioissa noin 2000 m³. Valuma-alueen pelloilla tilavuutta vastaava määrä kasteluvettä olisi 2,5 l m⁻², mikä käytännössä vastaa vain pienen mittakaavan kastelua.



Kuva 3.46. Valtaojan padotuksen vaikutus uoman vedenpintaan suhteessa paikalliskuivatuksen tasoon lähellä patoa (a) ja 650 m padosta ylävirtaan (b).

3.4.2 Pellon vesitalouden säädön mallinnus

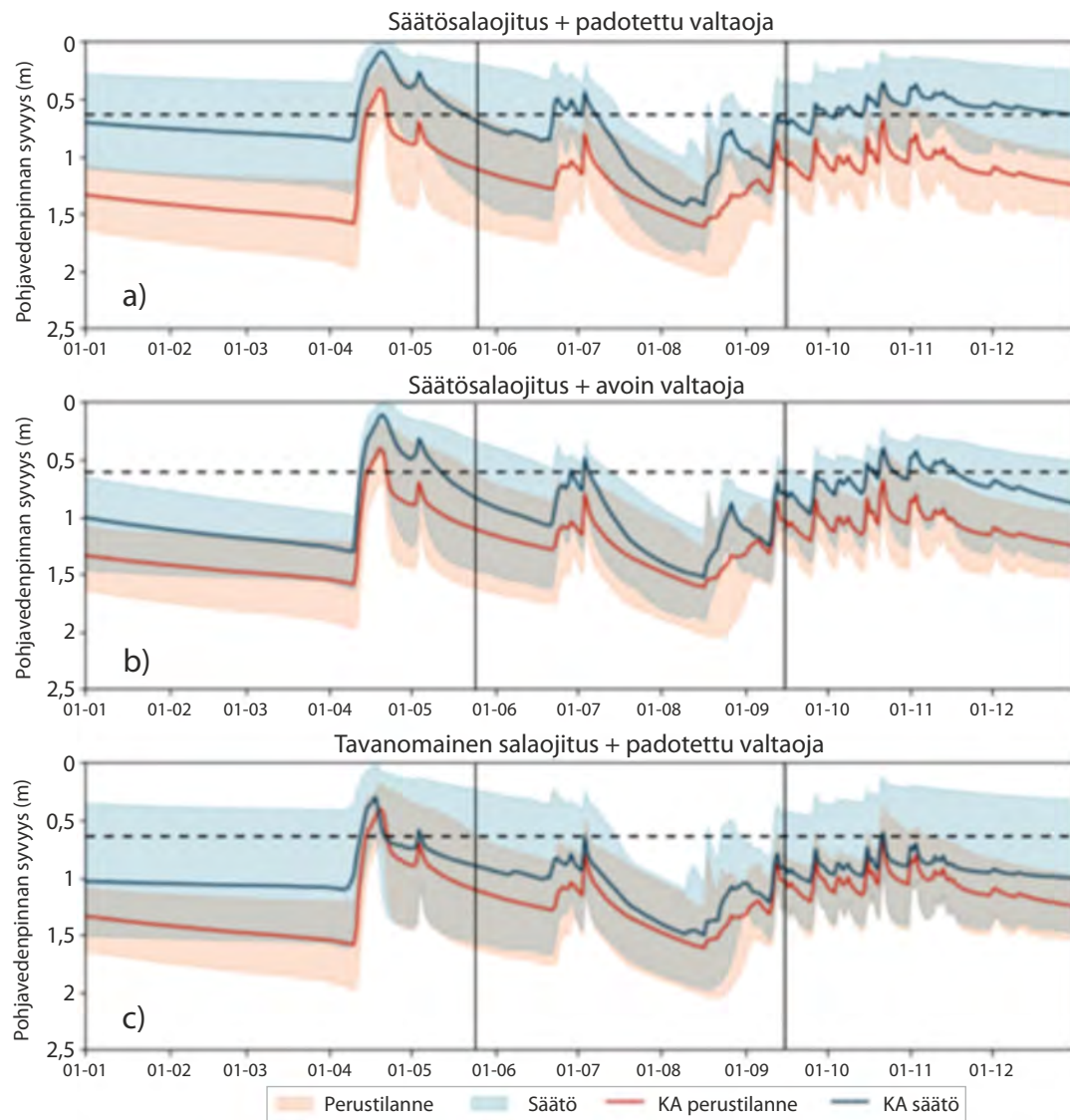
Pellon vesitalouden säädön vaikutus valtaojan tai salaojien padotuksella laskettiin mallilla runsassateiselle ja vähäsateiselle vuodelle (kuvat 3.47 ja 3.48). Kuvista nähdään peltoprofiilin keskimääräisen pohjavedenpinnan ajallinen vaihtelu, joka tavanomaisen ojituksen skenaariossa on syvimmillään talven lopussa ennen lumen sulanta-aikaa keväällä. Kuivana kesänä sateettomien jaksojen pohjavedenpinnat painuivat yhtä syväälle kuin talven lopussa. Yhtäaikainen säätösalaajitus ja valtaojan padotus nostivat pohjavedenpintaa eniten. Märkänä vuonna pohjavedenpinta pysyi suurimman osan aikaa 60 cm syvyyden yläpuolella (kuva 3.47 a), mutta kuivana vuonna säädöt eivät riittäneet pohjaveden pinnan pitämiseen samalla 60 cm syvyydellä (kuva 3.48 a). Kahden säätöoitusmenetelmän yhdistelmällä pohjavedenpintaa voitiin pitää vuoden aikana keskimäärin 0,47–0,51 m korkeammalla ja kasvukaudella 0,33–0,39 m korkeammalla riippuen sääolosuhteista.



Kuva 3.47. Keskimääräinen pohjavedenpinta sekä pohjavedenpinnan vaihteluväli peltoprofiilissa runsassateisena vuotena (2012). Ojien säätösyvyys on merkitty mustalla katkoviivalla ja kasvukausi on erotettu kahdella pystyviivalla.

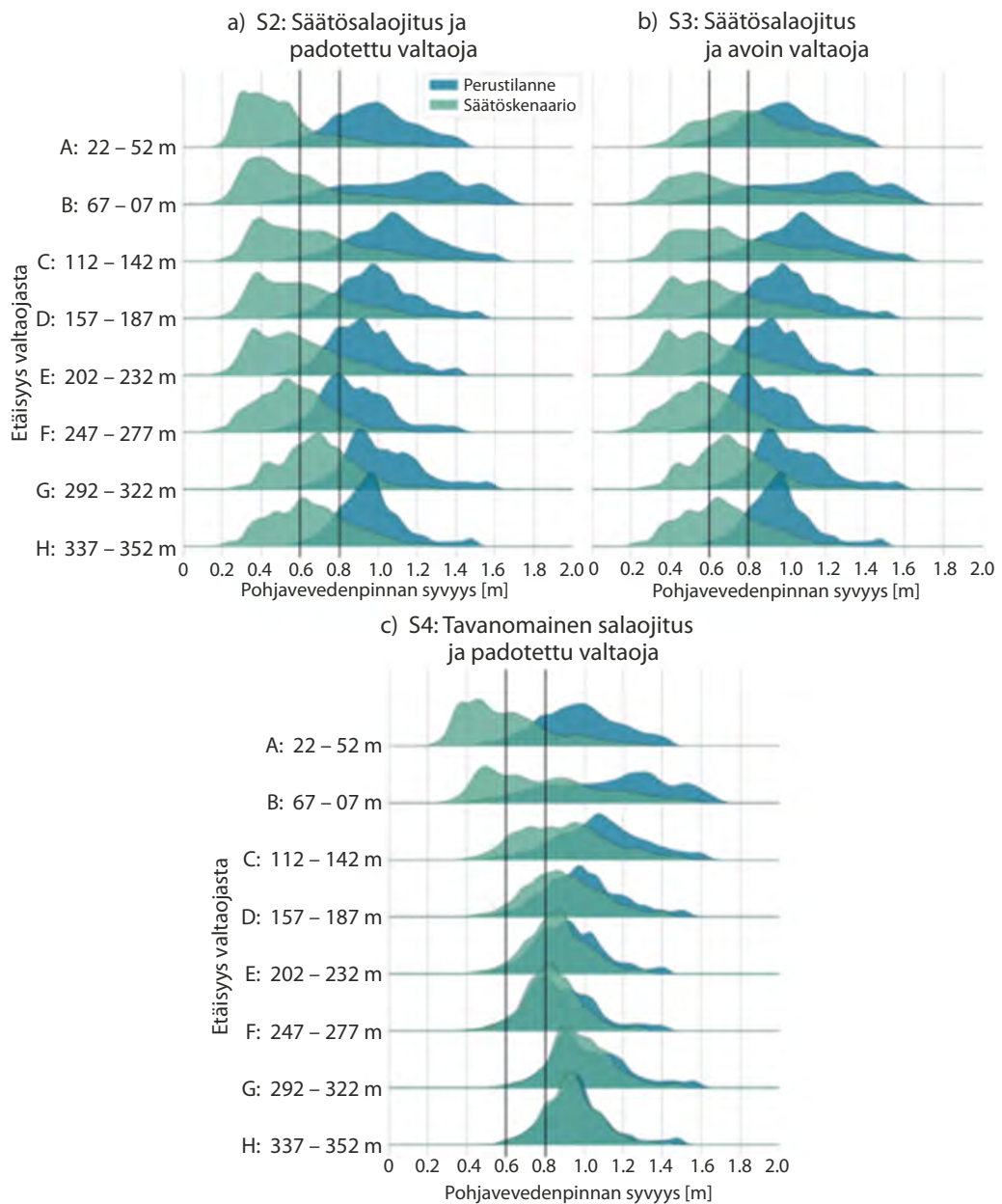
Pelkkä säätösalaajitus nosti pohjavedenpintoja vähemmän kuin molempien kuivatusojastojen säätö, mutta säädön vaikutus keskimääräisiin pohjavedenpintoihin oli samansuuntainen (kuvat 3.47 a–b ja 3.48 a–b). Pelkkä valtaojan säätö tavanomaisen salaajituksen kanssa (kuvat 3.47 c ja 3.48 c) vaikutti pohjavedenpintoihin vähiten, ja vaikutus oli pienimmillään kesän suurimpien rankkasateiden ja syksyn sateiden aikana. Käyttämällä vain säätösalaajitusta tai valtaojan padotusta, vaikutus pohjavedenpintoihin oli koko vuodelle 0,31–0,37 m ja 0,15–0,21 m sekä kasvukaudelle 0,23–0,30 m ja 0,10–0,17 m. Pohjavedenpinnan vaihtelu eri aikoina on kuvattu tarkemmin Isomäen (2023) esittämässä tuloksissa.

Simulaatiotuloksista voitiin määrittää säätöskenaarioiden vaikutus kasvukaudella (25. toukokuuta – 16. syyskuuta) esiintyvän pohjavedenpinnan syvyyden todennäköisyysjakaumaan eri etäisyyksillä valtaojasta. Kuvassa 3.49 on esitetty pohjavedenpinnan syvyyden jakauma eri kuivatusskenaarioille maamatriisissa, jossa suurin osa maavedestä on mallissa varastoituneena. Maamatriisin lisäksi malli tuottaa erikseen laskennallisen



Kuva 3.48. Keskimääräinen pohjavedenpinta sekä pohjavedenpinnan vaihteluväli peltoprofilissa vähäsateisena vuotena (2018). Ojien säätösyvyys on merkitty katkoviivalla ja kasvukausi on erotettu kahdella pystyviivalla.

pohjavedenpinnan makrohuokosissa. Makrohuokosten osuus maaperän kokonaishuokoisuudesta on pieni, mutta maamatriisia suuremman hydraulisen johtavuuden takia merkittävä osa maavedestä liikkuu makrohuokosissa (Isomäki, 2023). Mallissa vesi liikkuu maamatriisiin ja makrohuokosten välillä paine-erojen perusteella, ja transpiraatio vaikuttaa voimakkaasti kosteuspitoisuuteen ja pohjavedenpintaan maamatriisissa. Pohjavedenpinnat maamatriisissa olivat simulaatioissa syvimmillään joka kohdassa peltoa perustilanteessa eli skenaariossa, jossa pellolla oli käytössä tavanomainen ojitus (S1, sininen jakauma kuvissa 3.49 a–c). Valtaojan kuivattava vaikutus näkyy perustilanteessa lähellä avo-oojaa leveämpänä jakaumana ja syvien pohjavedenpintojen suurempana esiintyvyytenä. Kun sekä säätösalaajitus että valtaojan padotus ovat käytössä (S2, kuva 3.49 a), maamatriisin



Kuva 3.49. Säätöskenaarioiden vaikutukset pohjavedenpintoihin maamatriisissa eri etäisyyksillä valtaojasta. Pohjavedenpinnan optimialue on korostettu kuvaan mustilla pystyviivoillaviivoilla.

pohjavedenpinnat nousevat selvästi lähemmäs maanpintaa ja ovat korkeimmillaan lähellä valtaojaa, jossa molempien säätöoitusmenetelmien vaikutus pohjavedenpintaan on suurin. Säätösalaajitus yksistään nostaa pohjavedenpintoja pellon joka kohdassa, mutta tyhjä valtaoja aiheuttaa syvien pohjavedenpintojen esiintymistä avo-ojan lähellä. Valtaojan padotus yksistään osoittaa valtaojan padotuksen rajallisen ulottuvuuden etäisyyden valtaojoon kasvaessa. Valtaojan padotusvaikutus näkyi maamatriisissa noin 150 m etäisyydelle saakka, mutta makrohuokostossa kauemmaksi noin 230 m saakka (Isomäki, 2023), kun pellon keskimääräinen kaltevuus oli 0,2 %.

Kaikki säätöskenaariot vähensivät syvien pohjavesien esiintymistiheyttä sekä märällä että kuivalla kasvukaudella ja lisäsivät pohjavedenpinnan sijoittumista optimisyvyyteen (0,6–0,8 m), mutta myös optimisyvyyden yläpuolelle (taulukko 3.12). Optimisyvyyden yläpuoliset pohjavedenpinnat saattavat altistaa sadon liian kosteille kasvuolosuhteille, kun taas optimialueen alapuolinen pohjavedenpinta voi aiheuttaa kuivuutta. Kuivalla kasvukaudella pellon keskimääräinen pohjavedenpinta sijoittui todennäköisimmin optimialueelle valtaojan padotus –skenaariossa. Säätösalaajitus nosti pohjavedenpintaa ajoittain 0,6 metrin syvyyttä lähemmäksi maanpintaa (optimialueen yläpuolelle), jopa kuivan kasvukauden aikana säätöskenaarioissa 2 ja 3. Märällä kasvukaudella pellon keskimääräinen pohjavedenpinta maamatriisissa oli kaikissa säätöskenaarioissa todennäköisimmin optimisyvyydessä tai sen yläpuolella, kun taas perustilanteessa (S1) pohjavedenpinta oli 80 % kasvukaudesta optimialueen alapuolella. Pellon keskimääräinen pohjavedenpinta pysyi myös märällä kasvukaudella parhaiten optimialueella valtaojan padotus -skenaariossa, jolloin maamatriisin pohjavedenpinta oli optimisyvyydessä 44 % kasvukaudesta. Säätösalaajitusskenaariossa (S3) optimaalinen pohjavedenpinta saavutettiin kuitenkin lähes yhtä usein, noin 40 % kasvukaudesta. Molempien kuivatusjärjestelmien säätö nosti pellon keskimääräisen pohjavedenpinnan maamatriisissa lähes koko märän kasvukauden ajaksi optimisyvyyden yläpuolelle. Pohjavedenpintoja tarkasteltiin keskiarvojen lisäksi paikallisesti, jolloin huomattiin eroja siinä, missä osassa peltoa pohjavedenpinta oli useimmin

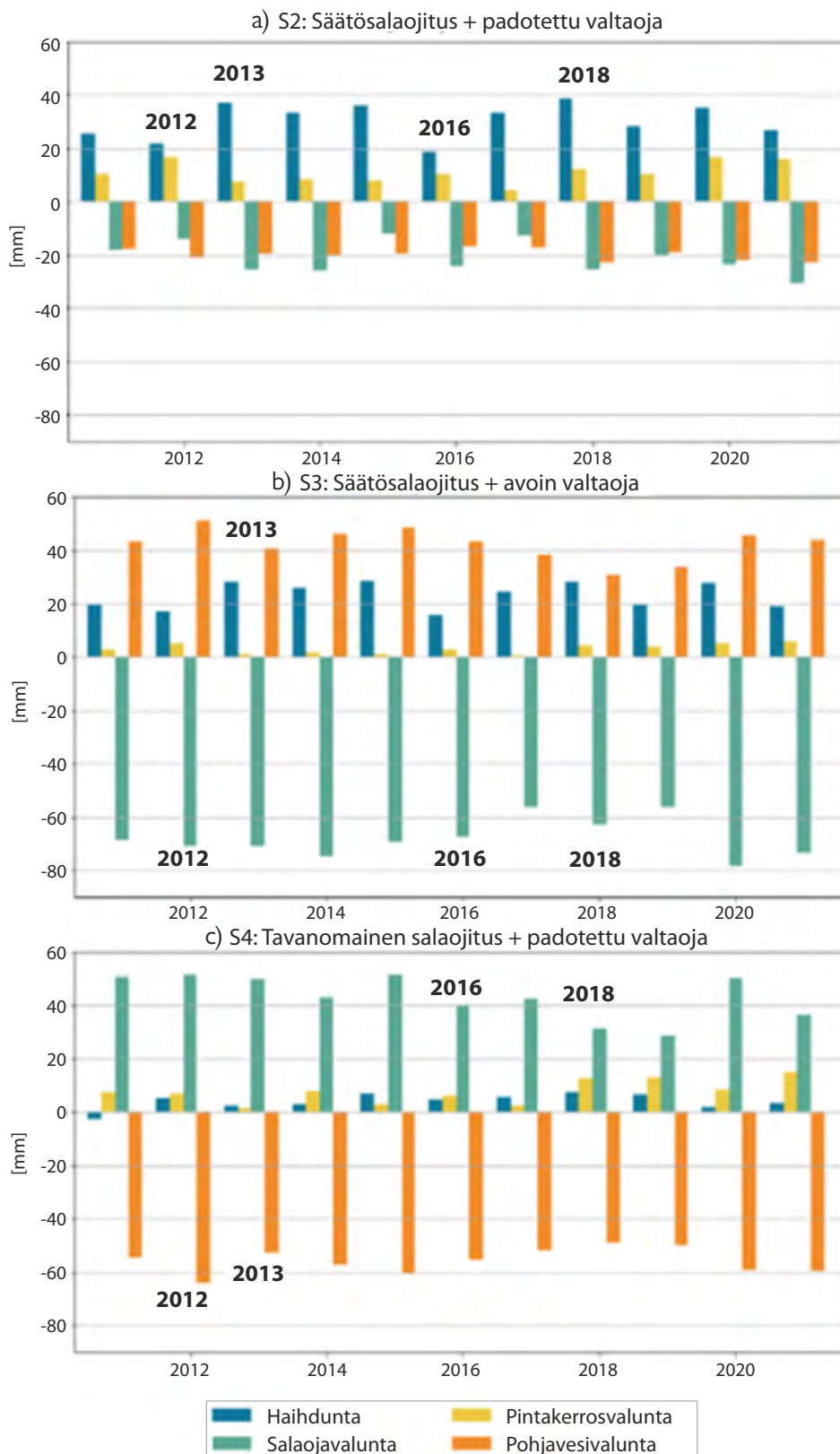
Taulukko 3.12. Todennäköisyys, jolloin pellon keskimääräinen pohjavedenpinta on optimialueella (0,6–0,8 m syvyys) tai sen ylä- ja alapuolella kolmella eri kasvukaudella.

	S1: SO+AO	S2: SS+PO	S3: SS+AO	S4:SO+PO
	Kuiva kasvukausi 2018, korjattu sademäärä 203 mm			
Yläpuolella [%]	0	40,2	15,7	0
Optimialueella [%]	0,2	10,1	29,9	40,7
Alapuolella [%]	99,8	49,7	54,4	59,3
	Märkä kasvukausi 2016, korjattu sademäärä 341 mm			
Yläpuolella [%]	6,9	80,7	54,3	10,7
Optimialueella [%]	11,6	19,3	39,7	44,3
Alapuolella [%]	81,5	0	5,9	45
	Mediaani kasvukausi 2013, korjattu sademäärä 246 mm			
Yläpuolella [%]	0,6	47,6	43,6	2,5
Optimialueella [%]	14,3	28,8	15,5	34,4
Alapuolella [%]	85,1	23,6	40,9	63,1

optimialueella (Isomäki, 2023). Optimaalisten pohjavesien esiintyvyyteen kasvukaudella vaikuttavat säätömenetelmän ja kokonaissademäärän lisäksi todennäköisesti myös sää-
töaikataulu ja esimerkiksi sadetapahtumien ajoittuminen (Isomäki, 2023).

Säätösalaajitus ja valtaojan padottaminen vaikuttivat pellon valuntareitteihin ja haihduntaan eri tavoin, mikä näkyy vuotuisten vesitasekomponenttien muutoksissa perustilanteen ja säätöskenaarioiden välillä (kuva 3.50). Säätösalaajitus yksistään (S3) vähensi salaojavaluntaa ja lisäsi pohjavesivaluntaa, kun taas pelkällä valtaojan padottamisella (S4) oli päinvastainen vaikutus. Säätösalaajitus pienensi vuotuista salaojavaluntaa enimmillään 79 mm ja vähimmillään 56 mm, mikä näkyy pohjavalunnan vuotuisen kasvun lisäksi haihdunnan lisääntymisenä (kuva 3.50 b). Valtaojan padottaminen kasvatti salaojavaluntaa 29–52 mm ja vähensi pohjavesivaluntaa 49–64 mm (kuva 3.50 c). Kahden padotusmenetelmän yhteisskenaariossa (S2) sekä salaoja- että pohjavesivalunta vähenivät (12–31 mm ja 17–22 mm) kaikkina simuloituina vuosina verrattuna perustilanteeseen (kuva 3.50 a). Pohja- ja salaojavaluntakomponenttien muutokset heijastuivat kaikissa skenaariossa pintakerrosvaluntaan. Kaikki säätöskenaariot lisäsivät vuotuista pintakerrosvaluntaa, jonka muutos oli vähäisin skenaariossa 3 ja suurin skenaariossa 2, jossa vuotuinen pintakerrosvalunta kasvoi enimmillään noin 17 mm.

Valtaojan padottamisella (S4) oli säätöoitusmenetelmistä vähäisin vaikutus kokonaishaihduntaan: valtaojan padottaminen kasvatti vuotuista haihduntaa enintään 7 mm vuonna 2018, kun taas 2011 vuotuinen haihdunta jopa pieneni 3 mm (kuva 3.50 c). Säätöskenaarioista eniten haihduntaa kasvatti skenaario 2, jossa säädettiin sekä valtaojaa että salaojia (kuva 3.50 a). Säätöoitusmenetelmien yhteisvaikutus kasvatti haihduntaa pellolla vuosittain 19–39 mm. Pelkän säätösalaajituksen vaikutuksesta kokonaishaihdunta kasvoi enimmillään noin 28 mm. Suhteellisesti haihduntaa voitiin kasvattaa eri säätöoitusmenetelmillä eniten kuivana aikana, ja kokonaisvalunnan ja haihdunnan suhdetta pellolla määrättivät enemmän hydrologiset olosuhteet kuin tutkitut säätöoitusmenetelmät (Isomäki, 2023).



Kuva 3.50. Säättöjittuskenaarioiden vuosittaisten vesitasekomponenttien absoluuttiset muutokset tavanomaiseen salaajitukseen verrattuna. 2012 märin vuosi, 2013 vuotuinen mediaanisadanta, 2016 märin kasvukausi, 2018 kuivin vuosi ja kasvukausi.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

VesiHave 2 -hankkeen tavoitteena oli selvittää, miten paikallis- ja peruskuivatukseen kohdistuvilla toimenpiteillä voidaan säätää pellon vesitaloutta siten, että hyödynnetään satopotentiaali, turvataan kestävä maan rakenne ja minimoidaan vesistökuormitus. Tutkimus toteutettiin kenttäkokeilla ja matemaattisella mallinnuksella.

Täydennysojitus, maan biologinen kuohkeutus ja fosforilannoitus

Nummelan koekentällä harvasta salaojituksesta (ojaväli 32 m) johtunut huono kuivatustila oli vuosikymmenten aikana heikentänyt maan rakennetta ja köyhdyttänyt maan ravinnetilaa, erityisesti fosforilukua. Täydennysojitus paransi kuivatustilaa ja vähensi pintamaan märkyysoongelmia. Kuivatustilan parantaminen täydennysojituksella oli välttämätöntä, mutta se ei yksin riittänyt parantamaan satoja, vaan tarvittiin lisäksi muita toimenpiteitä maan rakenteen, ravinnetilan ja satojen parantamiseksi.

Märkyydestä kärsineen maan rakennetta parannetaan Nummelassa kahdella tavalla; biologisella kuohkeutuksella syväjuurisia kasveja käyttäen ja mekaanisella kuohkeutuksella, jankkuroimalla. Vaikutukset ovat hitaita, ja niitä arvioidaan vasta jatkohankkeessa vuonna 2024. Alustavien tulosten perusteella syväjuurisen nurmen perustaminen näytti lisäävän liukoisen fosforin huuhtoutumista.

Maan fosforitilan parantamista tutkittiin Nummelassa fosforinlannoituksen porraskokeessa. Maan viljavuusfosfori oli alkujaan 2–3 mg l⁻¹. Satovastetta saatiin vasta lannoitemäärällä 45 kg ha⁻¹. Suurimmat lannoitemäärät nostivat hieman pintakerroksen (0–10 cm) fosforipitoisuutta, mutta lannoitus ei vaikuttanut pintaa syvemmälle. Fosforitase oli pienillä lannoitemäärillä negatiivinen, lannoitemäärällä 15 kg ha⁻¹ lähellä nollaa ja sitä suuremmilla määrillä selvästi positiivinen.

Täydennysojitus ja biologiset maanparannustoimenpiteet muuttivat valunta- ja kuormitusreittejä pellolta valtaojaan. Ojitus lisäsi salaojavalunnan osuutta salaojavalunnan ja pintakerrosvalunnan summasta. Ravinne- ja kiintoainepitoisuudet olivat salaojavalunnassa keskiarvoltaan korkeampia kuin pintakerrosvalunnassa. Pintakerrosvalunnan korkeimmat pitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia kuin salaojavalunnan, mikä todennäköisesti johtui lannoituksen jälkeisistä sadetapahtumista. Kuormituksen muutos määräytyi pääasiallisesti valunnan mukaan, joten salaojien kautta tuleva vesistökuormitus kasvoi täydennysojituksen jälkeen. Pintakerrosvalunta ja sen mukana tullut kuormitus vähenivät selvästi verrattuna aikaan ennen täydennysojitusta, mutta vähenemä oli pienempi kuin salaojavalunnan mukana tullut lisäys. Pohjavesivalunta väheni aiempien tutkimusten perusteella ja siten oletettavasti sen mukana kulkeutuva kuormitus.

Maan hyvän kasvukunnon ylläpitäminen ja lannoituksen oikea mitoittaminen auttavat sekä toteuttamaan pellon kasvupotentiaalin että pienentämään ravinnekuormitusta vesistöön. Maan kasvukunto koostuu useista tekijöistä, kuten maan rakenteesta, veden

ja ravinteidenpidätyskyvystä sekä vedenjohtavuudesta. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että puutteellinen ojitus voi heikentää useita näistä tekijöistä ja heikentyneen kasvukunnan korjaaminen on hidas ja kallis prosessi.

Säätösalaajitus ja altakastelu

Sievin koekentän tutkimuksessa havaittiin, että säätösalaajituksella voidaan vähentää salaajavaluntaa, ja siten sen aiheuttamaa ravinne- ja kiintoainekuormitusta. Säätösalaajituksella voidaan myös hidastaa pohjavedenpinnan korkeuden laskua, mutta Sievin säätökoekentällä pohjavedenpinnan korkeuden pitkäaikaiseen ylläpitämiseen tarvittiin altakastelua. Säätösalaajituksen ja altakastelun avulla pohjaveden tasoa voitiin ylläpitää keskimäärin 28–42 cm verrokkialueen tasoa korkeammalla, ja pumpun ollessa käynnissä pohjaveden pinta nousi padotuskorkeuteen.

Altakastelu kannattaa toteuttaa niin, että kastelu aloitetaan ennen kuin pohjaveden pinta on laskenut salaajasyvyyden alapuolella ja että vettä syötetään salaajastoon tasaisesti ja hitaasti. Näin mahdollistetaan veden imeytyminen salaajien kautta maahan ja minimoidaan kastelun aiheuttama ohivalunta.

Kasteluvesi pumpattiin pellolle läheisestä joesta. Hankkeen aikana jokiveden laatua mitattiin vain kerran. Kyseisen näytteen perusteella vaikuttaa siltä, että jokiveden mukana peltoon on kulkeutunut merkittävä määrä ravinteita, ja kun kastelu on aiheuttanut salaajavaluntaa, nämä samat ravinteet ovat valuneet valtaojasta takaisin jokeen. Koska tässä hankkeessa seurattiin tarkasti salaajavalunnan määrää ja laatua, mutta kasteluveden määrää ja laatua vain suuntaa antavasti, johtopäätöksiä kastelun aiheuttamasta kuormituksesta tai ravinteiden kierrätyksestä ei voida vielä tehdä. Tutkimusta jatketaan VESIMA-hankkeessa, jossa kasteluveden laatua tutkitaan aiempaa yksityiskohtaisemmin, ja pyritään selvittämään, siirtyykö joesta ravinteita kasvien käyttöön, vai aiheuttaako ylenmääräinen kastelu ravinteiden huuhtoutumista. Alustavat tulokset viittaavat kuitenkin siihen, että maahan imeytyneen jokiveden sisältämät ravinteet jäävät maahan, ja padotuksen yli virrannut vesi tulee ulos ojustosta muuttumattomana, eli se ei ota mukaansa maasta ravinteita, eikä näin ollen aiheuta ylimääräistä kuormitusta.

Koska tässä hankkeessa ei seurattu maan eloperäisen aineksen määrän muutosta, maan hiilitasapainosta ei voida tehdä johtopäätöksiä. Koska säätöalueelta ei tullut vertailualueita suurempia kasvihuonekaasupäästöjä, mutta sato oli suurempi, voidaan hiilitaseen kuitenkin arvioida olleen säätöalueella vertailualueita positiivisempi. Lisäksi koska altakastelu edistää juurten kasvua syvällä maaprofilissa, säätösalaajitus ja altakastelu voivat edistää maan eloperäisen aineksen kertymistä, ja se saattaa näin ollen olla hyödyllinen menetelmä hiiliviljelyssä. Teorian tueksi tarvitaan kuitenkin erityisesti aiheeseen suunnattua tutkimusta.

Valtaojan padotus

Valtaojaan asennettu pato viivytti vettä ojassa etenkin hankkeen loppuaikana, jolloin pato oli huollettu tiiviiksi. Pohjaveden pinta oli kuitenkin linjalla yksi (kauempana padosta) korkeammalla kuin linjalla kaksi (padon lähellä). Tämä voi johtua erosta maan

vedenläpäisykyvyssä eri linjoilla. Jos linjan yksi kohdalla pohjamaan vedenläpäisevyys on huonompi tai lähellä maanpintaa on läpäisemätön kerros, pohjaveden taso asettuu luontaisesti korkeammalle.

Huolellisesti ylläpidettynä pato pidatti vettä ojassa koko kasvukauden 2022 ajan. Kesällä vedenpinta kuitenkin laski alle padotussyvyyden, ja ojassa olleen veden määrä oli liian pieni ollakseen merkityksellinen kasteluun. Kuitenkin kesällä 2022, kun pato oli toiminnassa, pohjaveden taso pysyi korkeammalla kuin sateisempina vuonna 2021. Tällaiset settipadot vaativat säännöllistä ylläpitoa, jotta ne pysyisivät tiiviinä, mutta padottamalla voidaan pitää ympäröivän peltoalueen pohjaveden tasoa korkeammalla kuin ilman patoa.

Peltoalueen mallinnus

Hankkeessa muodostettiin peltoalueen valtaojan hydraulinen malli perustuen FLUSH-mallin avouomavirtauksen kuvaukseen. Mallitulosten perusteella voitiin tuottaa laskennallinen vedenkorkeus uomaverkoston jokaiseen kohtaan erilaisissa virtaustilanteissa ja erilaisille valtaojan padotusskenaarioille. Malliskenaarioiden avulla demonstroitiin vedenpinnan muutosta padon yläpuolisessa uomastossa, kun uoman virtausvastusta vaihdeltiin. Virtausvastuksen muutos ja vaikutus vedenpintaan kuvasti uomaan muodostuvan kasvuston hydraulisia vaikutuksia. Tulosten perusteella valtaojan padotusrakenteilla oli selvästi suurempi merkitys vedenpintoihin kuin virtausvastuksen muuttamisella.

Uomamalli voidaan kytkeä yhteen uomaa ympäröivän pellon hydrologisen mallikuvauksen kanssa. Uomamallin tulosten perusteella voidaan tällöin tuottaa laskennallinen vedenpinnan reunaehto valtaojaan kytkeytyville salaojaverkostoille. Uomamallin tuoma lisäarvo uoman vesitilanteen arviointiin on suurimmallaan tilanteessa, jossa uomassa kulkeutuu suuria vesimääriä. Suuret virtaamat voivat sattua tulvatilanteessa tai uomassa, jossa suuri yläpuolinen valuma-alue purkaa merkittäviä määriä vettä valtaojaan. Uomamallin avulla voi lisäksi arvioida teoreettisesti valtaojan padon tai useamman padon sijoittamisvaihtoehtoja.

Uomamallinnuksen yhteydessä tarkasteltiin uoman veden varastointikapasiteettia, jonka todettiin olevan tavanomaisen poikkileikkauksen uomassa rajallinen pidempiaikaiseen kastelutarpeeseen verrattuna. Uomamallissa tehtiin yksinkertaistavia oletuksia jättämällä huomiotta uoman jää- ja lumipeitteen, haihdunnan ja valtaojan patorakenteiden vuotamisen vaikutukset vedenpintoihin. Oletukset rajoittavat mallin soveltamista talviajan tilanteissa tai tilanteissa, jossa uomasta poistuu merkittävästi vettä haihdunnan seurauksena.

Pellon hydrologisella mallilla (FLUSH) laskettiin kahden eri säätöoitusmenetelmän vaikutuksia peltoalueen pohjavedenpintoihin, valuntoihin ja haihduntaan. Säätöskenaarioiden avulla eriteltiin säätösalojituksen, valtaojan padotuksen, säätösalojituksen ja valtaojan padotuksen samanaikaisen käytön sekä tavanomaisen ojituksen vaikutukset. Säädön mallinnettu vaikutus pohjavedenpintaan on tehokkain, kun padotetaan sekä valtaojaa että salaojia. Tällöin säädön keskimääräinen vaikutus pohjavedenpintaan pellolla oli 0,49 m koko vuoden aikana ja 0,39 m kasvukaudella. Säätösalojituksella saatiin ylläpidettyä pohjavedenpintaa koko vuonna keskimäärin 0,36 m ja kasvukaudella 0,30 m

korkeammalla tavanomaiseen ojitukseen verrattuna. Valtaojan padotuksella vastaavat luvut olivat 0,17 m ja 0,15 m.

Säätösalaajitus ja valtaojan padotus nostivat yhdessä pohjavedenpintaa koko pellon alueella tasaisemmin kuin erikseen mallinnettuna. Pelkästään valtaojaa padottamalla vaikutus pohjavedenpintaan oli havaittavissa tasaisella, alle 0,2 %:n kaltevuuden kellolla noin 200 m etäisyydellä valtaojasta, ja sitä kauempänä pohjavedenpinta kellolla oli lähes samalla tasolla kuin tavanomaisella ojituksella. Valtaojan kuivatusvaikutus lisäsi syvempien pohjavedenpintojen esiintymistä valtaojan lähellä (150 m etäisyydellä), kun ojaa ei padotettu.

Kaikilla säätöojitusmenetelmillä voitiin hidastaa pohjavedenpinnan vajoamista optimaalisen syvyyden alapuolelle ja kasvattaa todennäköisyyttä optimaalisten pohjavedenpintojen esiintymiselle kasvukaudella. Pelkästään valtaojan tai salaajituksen säädöllä on yksinään hankala optimoida koko pellon pohjavedenpintaa: kuivina aikoina pohjavedenpinta laskee salaajasyvyyden alapuolelle säätöojituksesta huolimatta ja pohjavedenpinnan nostamiseksi tarvitaan kastelua, kun taas märkänä aikana säätöojituksen kuivatustehoa tulisi muuttaa. Lisäksi kellolla esiintyy paikallisia eroja riippuen valitusta säätömenetelmästä.

Kaikki säätöojitusmenetelmät kasvattivat mallituloksissa haihduntaa ja vähensivät kokonaisvaluntaa suhteessa tavanomaiseen ojitukseen. Suurin vaikutus saatiin padottamalla valta- ja salaajia samaan aikaan, ja pienin vaikutus oli pelkällä valtaojan padottamisella.

Jatkotutkimustarpeet

Maatalouden vesistökuormituksen vähentäminen on viime vuosikymmenten aikana osoittautunut haasteelliseksi tehtäväksi. Maatalous on laaja-alainen ja pelloilta lähtevien ravinnepitoisuudet ovat niin alhaisia, ettei kustannustehokkaita keinoja niiden talteenottoon juuri löydy. Ensisijainen vesiensuojelutyö maataloudessa tulisikin kohdentaa toimiin, jotka alun perin estävät ravinteiden liikkeellelähtöä veden mukana. VesiHave 2 -hankkeen tulokset osoittavat kuitenkin, että peltojen vesitalouden järkevällä hallinnalla voidaan saavuttaa hyötyjä niin maataloustuotannon kuin vesiensuojelun osalta. Maailma muuttuu jatkuvasti, ja sen mukana myös yhteiskunnan odotukset ja arvot. Tästä syystä tarvitsemme jatkuvasti lisää tietoa vesitaloudellisten toimenpiteiden moninaisista vaikutuksista, ja siitä miten menetelmiä tulisi soveltaa niiden tuottamien hyötyjen maksimoimiseksi.

VesiHave 2 -hanke oli jatkoa aiemmille hankkeille, ja työ jatkuu seuraavassa hankkeessa. Tällainen jatkuvuus on olennaisen tärkeää, sillä se mahdollistaa pitkien aikasarjojen keräämisen tutkimuskohteista. Tämä on maataloustutkimuksessa välttämätöntä, sillä maaperän prosessit ovat hitaita, ja toimien vaikutukset voivat olla havaittavissa vasta vuosien päästä. Lisäksi vuosien välinen vaihtelu on voimakasta, ja tarvitaan laaja aineisto, jotta tutkittavien toimien aikaansaama vaikutus nousisi esiin luontaisesta vaihtelusta.

Matemaattiset laskentamallit tarjoavat meille kustannustehokkaan työkalun peltojen vesitalouden tutkimuksessa. Hydrologisia laskentamalleja tulisi kehittää siten, että niillä voidaan selvittää kokonaisten kuivatusalueiden vesienhallinnan toimintaa. Avoimen datan, kuten maaperä- ja säätiedon, hyödyntämistä tulisi edistää, jotta kuivatusalueiden mallintaminen voidaan tehokkaasti toteuttaa.

Tämä ja tätä edeltäneet hankkeet ovat tuoneet ilmi tutkimustarpeita, joista osa on toteutunut, osa on tutkimuksen kohteena ja osa on edelleen selvittämättä. Niiden lisäksi lisää tietoa tarvitaan:

- Säättösalaoituksen, altakastelun ja valtaojan padotuksen vaikutuksista pellon hydrologiaan, satotasoon, maan ominaisuuksiin ja vesistökuormitukseen vaihtelevissa olosuhteissa ja toimien pitkäaikaisesta vaikutuksesta
- Korkean pohjaveden tason vaikutuksista maan hiilitaseeseen ja kasvihuonekaasupäästöihin viljelyssä olevilla kivennäismailla
- Puutteellisen kuivatuksen vaikutuksesta peltomaan fosforinpidätyskykyyn ja fosforitaseeseen
- Peltomaan biologisen ja mekaanisen kuohkeutuksen pitkäaikaisvaikutuksista
- Valuma-alueen vesitalouden hallinnasta vesiensuojelussa huomioiden eri maankäyttömuotojen vuorovaikutus ja eri vesienhallintatoimien soveltuvuus kohteisiin

Kirjallisuusviitteet

- Bärlund, I., Tattari, S., Yli-Halla, M., Åström, M. 2004. Measured and simulated effects of sophisticated drainage techniques on hydrology and runoff hydrochemistry in areas of boreal acid sulphate soils. *Agricultural and Food Science* 14, ss. 98-111.
- Hägglom, O., Salo, H., Turunen, M., Nurminen, J., Alakukku, L., Myllys, M., Koivusalo, H. 2019. Impacts of supplementary drainage on the water balance of a poorly drained agricultural field. *Agricultural Water Management*, Vol 223, verkkojulkaisu [viitattu 5.11.2020] DOI: 10.1016/j.agwat.2019.03.039
- Isomäki, K. 2023. Säätosalaajituksen ja valtaojan padotuksen yhteisvaikutus pellon vesitalouteen. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 65+7 s.
- Jokinen V., Salo H., Mäkelä M., Nurminen J., Äijö H., Laine-Kaulio H., Myllys M., Koivusalo H. 2023. The effects of improved subsurface drainage on runoff and nitrogen leaching from a clayey field section. Artikkelin käsikirjoitus.
- 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 12.10.2020] DOI: 10.2166/nh.2017.056.
- Luke 2021. Tilastotietokanta. [verkkoaineisto]. [viitattu 6.3.2021] http://statdb.luke.fi/PXWeb/px-web/fi/LUKE/LUKE__02%20Maatalous__02%20Rakenne__12%20Viljelysmaan%20hoito%20ja%20kastelu/05_Ojitettu_pelto_puutarha_ala_alueet.px/table/tableViewLayout1/
- 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.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T., Vakkilainen, P. 2000. Vesitalouden säädön vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen. Julkaisussa: Vakkilainen, P. (toim.): Peltoviljelyn ravinnehuuhtoumien vähentäminen pellon vesitaloutta säätämällä – loppuraportti. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote N:o 25, ss. 8–40.
- Paavonen, E. 2023. Modelling the spatio-temporal effects of damming in an agricultural ditch network. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 73+7 s.
- Pihlatie, M. 2007. Nitrous oxide emissions from selected natural and managed northern ecosystems. *Dissertationes Forestales* 36. Academic dissertation at the University of Helsinki. Helsinki, Finland
- Saarela, I. 1995. Fosforilannoituksen porraskokeet 1977–1994. MTTK:n tiedote 16/1995.
- Salla, A., Salo, H., & Koivusalo, H. 2022. Controlled drainage under two climate change scenarios in a flat high-latitude field. *Hydrology Research*, 53(1), 14–28.
- Salo, H. 2014. Aineiden kulkeutumismallin kehittäminen ja soveltaminen typen prosessien kuvaamiseen peltomittakaavassa. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 80 + 5 s.
- 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, pp.20–32.
- Salo, H., Mellin, I., Sikkilä, M., Nurminen, J., Äijö, H., Paasonen-Kivekäs, M., Virtanen, S., Koivusalo, H. 2019. Performance of subsurface drainage implemented with trencher and trenchless machineries. *Agricultural Water Management*, Vol 213, 1, March, 2019: 957-967.

- Salo, H., Salla, A., & Koivusalo, H. 2021. Seasonal effects of controlled drainage on field water balance and groundwater levels. *Hydrology Research*, 52(6), 1633–1647.
- Sikkilä, M. 2022. Ojitussuunnitelma (Julkaisematon).
- 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&Tillage Research*, Volume 174, 58–69.
- Vakkilainen, P., Alakukku, L., Mylly, 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.
- Wang, Z., Shao, G., Lu, J., Zhang, K., Gao, Y., Ding, J. 2020. Effects of controlled drainage on crop yield, drainage water quantity and quality: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, Vol 239, 106253, ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106253>.
- 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. 2013a. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. *J. Hydrol.*, 476, pp. 395–409.
- Warsta, L., Taskinen, A., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., & Karvonen, T. 2013b. Modelling soil erosion in a clayey, subsurface-drained agricultural field with a three-dimensional FLUSH model. *Journal of Hydrology*, 498, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.020>
- Yli-Halla, M., Virtanen, S., Regina, K., Österholm, P., Ehnvall, B., Uusi-Kämpä, J. 2020. Nitrogen stocks and flows in an acid sulfate soil. *Environmental Monit Assess*, 192: 192–751. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08697-1>
- Äijö, H., Mylly, 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.
- Äijö H., Mylly, M., Sikkilä, M., Salo, H., Nurminen, J., Häggblom, O., Turunen, M., Paasonen-Kivekäs, M., Warsta, L., Koivusalo, H., Alakukku, L., Puustinen, M., 2017. Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA) – loppuraportti 2017. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 32. 109 s.
- Äijö H., Nurminen, J., Mylly, M., Sikkilä, M., Salo, H., Paasonen-Kivekäs, M., Turunen, M., Koivusalo, H., Alakukku, L., Puustinen, M., 2018. Toimivat salaojitusmenetelmät kasvintuotannossa (TOSKA) – Jatkohankkeen raportti 2018. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 33. 44 s.
- Äijö H., Mylly, M., Sikkilä, M., Salo, H., Salla, A., Nurminen, J., Paasonen-Kivekäs, M., Koivusalo, H., 2021. Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave) – Loppuraportti 2021. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 35. 82 s.

Liitteet

LIITE 1. Sievin salaojakentän viljelytoimet vuosina 2019–2022

	2019	2020	2021	2022
Kevätmuokkaus				
Miten ja milloin		Kyntö 25.5.2020 Joustopiikkiäestys (Väderstad 6 m) 26.5.		
Mitä kylvettiin				
Laji,lajike ja milloin	KWS Eterno Syysruis 70 kg/ha kylvetty syksyllä	Ohra Aukusti, samalla nurmi timotei, kylvö 27.5.	Monivuotinen timotei-nurmi	Monivuotinen timotei-nurmi
Kylvölannoitus				
Mikä lannoite, kuinka paljon/ha	YaraMila Pellon Y3 150 kg/ha syksyllä, keväällä 20.5. salpietari 300 kg/ha	YaraMila Pellon Y3 400 kg/ha	YaraMila Pellon Y3 180 kg/ha	YaraMila Pellon Y3 180 kg/ha
Lannanlevitys				
Mitä levitettiin, kuinka paljon/ha ja milloin		Ei lietelantaa	Ei lietelantaa	Ei lietelantaa
Torjunta-aine käsittely				
Mikä aine ja milloin	6.6. Rikka-aine Biathlon 50 g/ha, Korrensäade Moddus Evo 0,4 l/ha	27.6. Korrensäade Moddus evo 0,4l + Kinvara 0,7 l/ha + yara gramitrel 1l/ha. 3.7. Elatus Era 0,7l/ha + gramitrel 1 l/ha	6.6. Rikka-aine ArianeS 2 l/ha + Primus XI 1 l/ha 15.6. Korrensäade Moddus evo 0,7 l/ha	7.6. Rikka-aine ArianeS 2 l/ha + Primus XI 1 l/ha 15.6. Korrensäade Moddus evo 0,7 l/ha
Puinti				
Milloin	4.9.	1.9.	12.8.	21.8.
Syysmuokkaus				
Miten tehtiin ja milloin	Lietelanta 20 tn/ ha, kevytmuokkaus lapiorullaäes	Nurmikasvipeite		

LIITE 2.

VesiHave 2 -hankkeen akateemiset ja viestinnälliset tuotokset

Artikkelit

- Jokinen V., Salo H., Mäkelä M., Nurminen J., Äijö H., Laine-Kaulio H., Myllys M., Koivusalo H. 2023. The effects of improved subsurface drainage on runoff and nitrogen leaching from a clayey field section. Artikkelin käsikirjoitus. Lähetetty arvioitavaksi Irrigation & Drainage -lehteen.
- Mäkelä, M., Paavonen, E., Isomäki, K., Äijö, H. 2023. Säättösaloituksen ja altakastelun mahdollisuudet ruuantuotannon ja ympäristönsuojelun näkökulmasta. Vesitalous 1/2023. s. 25-29.

Diplomityöt

- Isomäki, K. 2023. Säättösaloituksen ja valtaoajan padotuksen yhteisvaikutus pellon vesitalouteen. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 65+7 s. Luettavissa: aaltodoc
- Paavonen, E. 2023. Modelling the spatio-temporal effects of damming in an agricultural ditch network. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 73+7 s. Luettavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/119393/master_Paavonen_Elina_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Seminaariesitykset

- Isomäki, K.; Salla, A.; Salo, H.; Mäkelä, M.; Äijö, H.; Sikkilä, M.; Paavonen, E.; Paasonen-Kivekäs, M.; Koivusalo, H. 2022. Combined effects of controlled drainage and main ditch damming on water table and water balance in a Nordic agricultural field. Esitys NHC-konferenssissa Tallinnassa 15–18.8.2022. Abstrakti luettavissa: <https://drive.google.com/file/d/1Ude1OYK4BMzRdSrxoisOXrmlXSqHxOxW/view>
- Isomäki, K., Paavonen, E., Salo, H., Salla A., Koivusalo H. 2022. Posteresitys Kansallisessa mallinuseminaarissa 28.11.2022, Otaniemi, Espoo. Abstrakti luettavissa: https://www.vesiyhdistys.fi/wp-content/uploads/2022/11/Isomaki_Paavonen_et_al_2022.docx
- Mäkelä, M.; Myllys, M.; Nurminen, J.; Äijö, H.; Salo, H.; Koivusalo, H. 2022. Effect of supplementary subsurface drainage on field scale nutrient fluxes. Esitys NHC-konferenssissa Tallinnassa 15–18.8.2022. Abstrakti luettavissa: <https://drive.google.com/file/d/1EtKNE62H3SwOPCFsajO-0ZYWPJ9QEXp/view>
- Mäkelä, M. 2022. Sievin säättökentän ja valtaoajan padotuskokeen tuloksia (VesiHave 2). Esitys Salaoituksen neuvottelupäivillä 2022.
- Mäkelä, M. 2022. Pellon vesitalouden hallinta säättösaloituksen ja salaojakastelun avulla – Sievin koekentän tuloksia. Esitys Pyhäjärvi-instituutin järjestämässä Salaojakasteluwebinaarissa 26.1.2022.
- Mäkelä M., Äijö H., Sikkilä M., Nurminen J., Salo H., Salla A., Myllys M., Koivusalo H., 2022. Agricultural water management with controlled drainage and subirrigation - results from Sievi, Finland. Esitys IDS (International Drainage Symposium) -konferenssissa Iowassa, 30.8.–2.9.2022. Abstrakti luettavissa: https://www.swcs.org/static/media/cms/IDS_Abstract_Book_F56C9B83EFD56.pdf
- Mäkelä, M. 2022. Vesitalouden hallintavesiensuojelussa (VesiHave 2). Esitys ELY:n järjestämässä vesienhallintahanke-webinaarissa 5.-6.10.2022.
- Mäkelä, M. 2022. Säättösaloituksen ja altakastelun mahdollisuudet tuotannon ja ympäristön näkökulmasta. Esitys ”Maatalouden kestävä vesienhallinta” -seminaarissa Kansallismuseossa 13.10.2022. Luettavissa: <https://www.tukisaatio.fi/wp-content/uploads/2022/10/8.-Saatosaloituksen-ja-altakastelun-mahdollisuudet.pdf>

Paavonen, E.; Isomäki, K.; Salo, H.; Salla, A.; Koivusalo, H.; Äijö, H.; Sikkilä, M.; Mäkelä, M.; Nurminen, J.; Laine-Kaulio, H.; Mylly, M. 2022. Valtaojan padotus ja sääätösaloitus ruoantuotantoalueilla – vaikutusten laskennallinen tarkastelu. Posterisitys ”Maatalouden kestävä vesienhallinta” -seminaarissa Kansallismuseossa 13.10.2022. Posterinähtävissä: <https://www.tukisaatio.fi/wp-content/uploads/2022/10/5.-Kielo-Isomaki.pdf>

Paavonen, E.; Salo, H.; Salla, A.; Leppä, K.; Isomäki, K.; Äijö, H.; Sikkilä, M.; Mäkelä, M.; Paasonen-Kivekäs, M.; Koivusalo, H. 2022. Modelling spatio-temporal extent of water level control in an agricultural ditch network. Esitys NHC-konferenssissa Tallinnassa 15–18.8.2022. Abstrakti luettavissa: https://drive.google.com/file/d/1z_Ge02UDHYgJov2GfbmP9KQpzCP1regn/view

Salla, A. 2022. Sääätösaloituksen vaikutus pohjavedenpinnan syvyyteen ja vesitaseeseen tasaisella peltoalueella muuttuvassa ilmastossa. Esitys Maataloustieteen päivillä 14–15.6. 2022. Abstrakti luettavissa: <https://www.smts.fi/sites/smts.fi/files/ABSTRAKTIKIRJA%202022.pdf>

Äijö H., Mäkelä M., Sikkilä M., Paasonen-Kivekäs M., Nurminen J., Salo H., Salla A., Mylly, M., Koivusalo, H. 2022. Pellon vesitalouden hallinta sääätösaloituksen ja salaajakastelun avulla - Sievin koekentän tuloksia. Esitys Maataloustieteen päivillä 14–15.6. 2022. Abstrakti luettavissa: <https://www.smts.fi/sites/smts.fi/files/ABSTRAKTIKIRJA%202022.pdf>

Muu viestintä

Salaojayhdistys ry:n jäsenjulkaisussa julkaistiin syksyllä 2022 n. 8 sivun artikkeli koko hankkeesta, yleistajuinen kuvaus tuloksista, otsikolla ”Tuloksia maatalouden vesienhallintatutkimuksesta”.

Salaoituksen tutkimusyhdistys ry

ISBN 978-952-5345-54-4