



Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave)

Loppuraportti 2021

Helena Äijö, Merja Myllys, Markus Sikkilä, Heidi Salo, Alekski Salla,
Jyrki Nurminen, Maija Paasonen-Kivekäs, Harri Koivusalo

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave)

Loppuraportti 2021

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 35

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave)

Loppuraportti 2021

Helena Äijö, Merja Myllys, Markus Sikkilä, Heidi Salo, Alekski Salla,
Jyrki Nurminen, Majja Paasonen-Kivekäs, Harri Koivusalo

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry

Simonkatu 12 A II

00100 Helsinki

puh. (09) 694 2100

fax (09) 694 2677

Päätoimittaja Helena Äijö

Etukansi Korvenoja Sievin Järvikylässä. Kuva: Markus Sikkilä

Taitto DTPage Oy

Web www.salaojayhdistys.fi/julkaisut

ISBN 978-952-5345-46-9

Sisällysluettelo

Esipuhe	5
Tiivistelmä	6
Sammandrag	8
Abstract	10
I JOHDANTO	12
1.1 Tausta	12
1.2 Tavoitteet	13
2 TUTKIMUSMENETELMÄT	15
2.1 Nummelan koekenttä	15
2.1.1 Koko kentän koe	17
2.1.2 Kuohkeutuskoe	17
2.1.3 Fosforin porraskoe	19
2.1.4 Yhteistyö muiden hankkeiden kanssa	20
2.2 Sievin säätösalaojituskenttä	21
2.3 Valtaojan padotus Sievissä	25
2.4 Matemaattinen mallintaminen	27
3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELO	31
3.1 Nummelan koekenttä	31
3.1.1 Koko kentän koe	31
3.1.2 Kuohkeutuskoe	51
3.1.3 Fosforin porraskoe	51
3.1.4 Muiden hankkeiden kokeet	53
3.2 Sievin säätösalaojituskentän tulokset	55
3.2.1 Sääolot	55
3.2.2 Pohjavedenpinnan syvyys koekentällä	55
3.2.3 Pohjaveden syvyudet eri etäisyyksillä salaojasta	56
3.2.4 Salaojavalunnat	57
3.2.5 Salaojavalunnan laatu	58
3.2.6 Sato	60
3.3 Valtaojan padotuskokeen tuloksia	60
3.4 Mallintamistulokset	61
3.4.1 Mallin kalibrointi ja validointi	61
3.4.2 Säätösalaojitusskenaario	64
3.4.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus säätösalaojitukseen	66
3.4.4 Valtaojan kuivatusvaikutus	68
3.4.5 Hydrologisten vuosien tarkastelu	69

4 JOHTOPÄÄTÖKSET	72
Kirjallisuusviitteet	76
Liitteet	
1 a Nummelan koekentän viljelytoimet vuosilta 2007–2011	79
1 b Nummelan koekentän viljelytoimet vuosilta 2012–2015	79
2 Sievin säättökoekentän viljelytoimet vuosilta 2018–2020	80
3 Sievin säättökoekenttä, maankosteudet ja vedenpidätyskäyrät	81
4 Sievin säättökoekenttä, simuloitavan profiilin parametrien arvot	82

Esipuhe

Tässä loppuraportissa esitetään tutkimushankkeen *Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa* (VesiHave) lähtökohdat, tavoitteet, käytetyt tutkimusmenetelmät sekä tulokset ja johtopäätökset. Sievin koekentän osalta esitetään myös TOSKA-hankkeen tuloksia vuosilta 2015–2017 ja Nummelan koekentän osalta PVO- ja TOSKA-hankkeiden tuloksia vuosilta 2007–2017.

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

Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat: Antton Keto (YM, pj.), Arja Nykänen (YM, 2018–2019), Riikka Malila (YM, 2020), Seija Virtanen (Salaojituksen Tukisäätiö sr), Timo Maasilta (Maa- ja vesitekniikan tuki ry), Sini Wallenius (MMM), Juha-Pekka Triipponen (VARELY), Sari Peltonen (ProAgria Keskusten Liitto) sekä Airi Kulmala/Juha Lappalainen (MTK).

Tutkimus toteutettiin yhteistutkimushankkeena, ja siitä vastasi Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry. Tutkimusryhmässä ovat toimineet Helena Äijö (Salaojayhdistys ry) tutkimuksen vastuullisena johtajana, Merja Mylly (Luonnonvarakeskus Luke), Markus Sikkilä (Salaojayhdistys ry / Maveplan Oy), Heidi Salo (Aalto-yliopisto), Maija Paasonen-Kivekäs (Sven Hallinin tutkimussäätiö sr), Jyrki Nurminen (Salaojituksen tutkimusyhdistys ry), Olle Häggblom (Salaojayhdistys ry), Alekski Salla (Aalto-yliopisto), Harri Koivusalo (Aalto-yliopisto) sekä yhteistyökumppaneina Laura Alakukku (Helsingin yliopisto) ja Markku Puustinen (Suomen ympäristökeskus). Hankkeessa tehtiin yhteistyötä Luonnonvarakeskuksen tutkimushankkeiden *Maatalouden rehevöittävä fosforikuormitus ja sen vähentäminen (Samassa Vedessä)*, *Risky P economy (RiPE)* ja *Smart Farming* kanssa.

VesiHave-hanketta ovat rahoittaneet ympäristöministeriö, Salaojituksen Tukisäätiö sr, Maa- ja vesitekniikan tuki ry sekä hankkeeseen osallistuneet tahot: Salaojayhdistys ry, Luonnonvarakeskus, Aalto-yliopisto ja Sven Hallinin tutkimussäätiö sr.

Kiitämme kaikkia myönteisestä suhtautumisesta tutkimushankkeeseen ja hankkeen hyväksi tehdystä työstä sekä tutkimuksen rahoittajia. Erityiskiitokset tutkija Risto Uusitalolle, Sievin koekentän viljelijälle Sakari Sikkilälle ja Korvenojan padotusalueen viljelijälle Mikael Myllylälle.

Tutkimusta jatketaan VesiHave2-hankkeessa vuosina 2021-2022 osana maa- ja metsätalouden kestävä vesienhallinnan edistämistä.

We acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate, and the Working Group on Coupled Modelling, former coordinating body of CORDEX and responsible panel for CMIP5. We also thank the climate modelling groups (listed in Table 2.2 of this paper) for producing and making available their model output. We also acknowledge the Earth System Grid Federation infrastructure an international effort led by the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, the European Network for Earth System Modelling and other partners in the Global Organisation for Earth System SciencePortals (GO-ESSP).

Tiivistelmä

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave) -hankkeen päätavoitteena oli peltoalueiden optimaalisen vesitalouden hallinnan kehittäminen. Hankkeessa selvitettiin, voidaanko peltoalueiden vesistökuormitusta vähentää ja pellon tuottokykyä nostaa täydennysojituksella, säätösalaajituksella/salaojakastelulla ja valtaojan padotuksella. Säätösalaajituksen vaikutuksia peltoalueen hydrologiaan tarkasteltiin eri ilmastoskenaarioissa. Lisäksi selvitettiin huonotuottoisen peltoalueen maan rakenteen parantamista biologisella ja mekaanisella kuohkeutuksella ja satotason nostoa fosforilannoituksella. Tutkimus toteutettiin kenttäkokeilla ja matemaattisella mallinnuksella. Hanke toteutettiin kolmena osahankkeena:

1. Peltoviljelyn tuottavuuden parantaminen ja vesistökuormituksen vähentäminen täydennysojituksella, sekä maan kuohkeutuksella syväjuurisia kasveja ja jankkurointia käyttäen. Kohdealueena oli vuonna 2006 perustettu Nummelan salaojakoe kenttä Jokioisissa. Fosforilannoituksen vaikutusta satoon tutkittiin ruutukokeessa 2019 ja 2020.
2. Peltoviljelyn tuottavuuden parantaminen ja vesistökuormituksen vähentäminen säätösalaajituksella ja salaojakastelulla ja valtaojan padotuksella. Säätösalaajituksen ja salaojakastelun toimintaa tutkittiin Sievissä sijaitsevalla koekentällä. Valtaojan padotus toteutettiin Korvenojalla Sievin Järvikylässä.
3. Matemaattisen mallin (FLUSH) kehittäminen ja soveltaminen peltoalueiden vesitalouden suunnittelun apuvälineeksi. Mallilla tutkittiin säätösalaajituksen ja valtaojan padotuksen vaikutuksia vesitaseen komponentteihin ja pohjaveden pinnan syvyyteen. Kohdealueena oli Sievin koekenttä. Mallilla simuloitiin ojitusten vaikutuksia hydrologiaan tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa.

Vuonna 2014 tehty täydennysojitus ei nostanut satotasoa Nummelan koekentän koalueella. Alue oli kärsinyt märkydestä vuosikymmeniä harvasta ojituksesta johtuen, maan fosforiluku oli alhainen (2–3 mg l⁻¹) ja rakenne heikko. Kuivatustilan parantaminen ei riittänyt satotason nostamiseksi vaan tarvittiin lisäksi muita perusparannustoimenpiteitä ja hyvä maan ravinnetila. Maan perusparannustoimenpiteenä keväällä 2019 aloitettu kuohkeutus syväjuurisia kasveja ja jankkurointia käyttäen osoittautui pitkäaikaiseksi prosessiksi, jonka vaikutukset maan rakenteeseen ja satoon voidaan arvioida vasta muutaman vuoden päästä.

Fosforilannoituksen (0, 5, 15, 30 ja 45 kg ha⁻¹) satovaste näkyi vasta lannoitemäärillä 30 ja 45 kg ha⁻¹. Lannoitemäärät 15–45 kg ha⁻¹ kasvattivat pintamaan (0–10 cm) fosforipitoisuutta, mutta eivät syvempien kerrosten (10–20 ja 20–30 cm) pitoisuutta. Fosforitase oli lähellä nollaa lannoitemäärällä 15 kg ha⁻¹ ja sitä suuremmilla määrillä selvästi positiivinen, jolloin fosforin huuhtoutumisriski kasvaa.

Pitkäaikaiset mittaukset (kesäkuu 2007 – toukokuu 2020) Nummelan savisella peltoalueella osoittivat, että täydennysojitus lisäsi salaojavaluntaa ja salaojien kautta tullutta ravinne- ja kiintoainekuormitusta valtaojaan ojitusta edeltävään ajanjaksoon verrattuna. Vastaavasti pintavalunta ja sen mukana tullut kuormitus vähenivät selvästi, mutta vähenemä

oli pienempi kuin salaojavalunnan mukana tullut lisäys. Kuormituksen suuruus määräytyi pääasiallisesti valunnan määrän mukaan, sillä typpi-, fosfori- ja kiintoainepitoisuudet olivat pintakerros- ja salaojavalunnassa melko lähellä toisiaan.

Sievin koekentän mittaustulokset osoittivat, että säätösalojitetulla alueella pohjavedenpinta oli keskimäärin hieman ylempänä kuin tavanomaisesti salaojitetulla alueella (vertailualue). Sateiden ja sulannan jälkeen pohjavesi laski nopeasti myös säätösalojitetulla alueella. Kasteluveden pumppaus salaojiin nosti pohjaveden pintaa ja hidasti sen laskua. Sadon määrä (ruis ja ohra) oli hieman korkeampi säätösalojitetulla alueella kuin vertailualueella. Salaojavalunta säätösalojitetulta alueelta (ilman kasteluveden pumppausta ja sen aiheuttamaa valuntaa) oli jonkin verran pienempi kuin tavanomaisesti ojitetulta alueelta. Valumavesien ravinne- ja kiintoainepitoisuuksissa ei ollut havaittavissa systemaattisia eroja eri ojitusalueiden välillä vajaan vuoden pituisella mittausjaksolla, joten kuormituksen säätösalojitetulta alueelta ilman kastelua voidaan olettaa olevan pienempi pienemmästä valunnasta johtuen. Myös mallinnustulokset koekentältä osoittivat, että säätösalojitus vähensi salaojavaluntaa. Samalla pohjavesivalunta lisääntyi ja tietyissä olosuhteissa myös pintavalunta, mikä tulee ottaa huomioon arvioitaessa säätösalojituksen vaikutuksi peltoalueelta tulevaan kokonaiskuormitukseen.

Valtaojan padotus piti ojan vedenpinnan keväällä ja alkukesästä padotustasossa, kunnes se haihdunnan seurauksena kuivui lähes kokonaan. Mittauksista ei saatu vielä riittävästi tietoa padotuksen vaikutuksesta pohjavedenpinnan korkeuteen peltoalueilla. Sievin salaojakoekentälle tehdyt mallisimulaatiot valtaojan kuivattavasta vaikutuksesta osoittivat, että valtaoja alensi pohjavedenpintaa jopa 100 metrin etäisyydellä ojasta verrattuna sitä kauempana olevaan peltoalueeseen. Tulokset antavat viitteitä siitä, että padottamalla vettä valtaojassa, voitaisiin hidastaa pohjavedenpinnan laskua peltoalueella.

Simulointitulokset eri ilmastonmuutoskenaarioissa osoittivat, että tulevaisuudessa vuodet muuttuvat sateisimmiksi, minkä seurauksena vuotuinen valunta kasvaa enemmän kuin kasvukauden haihdunta lisääntyy. Säätösalojituksen avulla salaojavaluntaa voidaan vähentää. Säätösalojituksen merkitys tulevaisuudessa kasvaa, koska pohjavedenpinta pysyy luontaisesti pidempään salaojitussyvyyden yläpuolella. Kuivien vuosien osalta säädöllä on suurempi vaikutus pohjavedenpinnan tasoon tulevaisuudessa kuin nykyisin.

Hanke kesti 2,5 vuotta ja sen kokeellinen osuus vain 1,5 vuotta, joten tutkimustulokset ovat alustavia erityisesti säätösalojituksen/salaojakastelun ja valtaojan padotuksen osalta.

Tutkimusta jatketaan VesiHave2-hankkeessa vuosina 2021–2022 osana maa- ja metsätalouden kestäväen vesienhallinnan edistämistä.

Sammandrag

Huvudmålet för projektet *Vattenhantering inom vattenskyddet (Vesienhallinta vesiensuojelussa, VesiHave)* var att utveckla optimal vattenhantering på jordbruksmark. I projektet undersöktes om man med hjälp av kompletteringsdikning, reglerad dränering/underbevattning och uppdämning av utfalldikena kan minska på belastningen av vattendragen och samtidigt öka åkrarnas produktivitet. Effekterna av reglerad dränering på åkerns hydrologi undersöktes i olika klimatscenarier. Man lade också grunden till ett försök, där man kommer att undersöka hur biologisk och mekanisk bearbetning förbättrar markstrukturen och höjer skörden. Därtill undersöktes hur olika nivåer av fosforgödsling inverkar på skörden. Studien genomfördes med fältförsök och matematisk modellering. Projektet bestod av tre delprojekt:

1. Skördeökning och minskning av belastningen av vattendragen genom kompletterad dränering och genom uppluckring av marken med växter med djuptgående rötter och tubulering. Försöksområdet var Nummela försöksfält i Jockis, som grundades år 2006. Fosforgödslingen betydelse för skörden undersöktes år 2019 och 2020.
2. Skördeökning och minskning av belastningen av vattendragen genom reglerad dränering och underbevattning samt genom uppdämning av utfalldike. Försöksfältet för reglerad dränering och underbevattning ligger i Sievi. Uppdämningen utfördes i Korvenoja likaså i Sievi.
3. Utveckling och tillämpning av en matematisk modell (FLUSH) som verktyg för planering av vattenhushållning på åkermark. Med modellen undersöktes hur reglerad dränering inverkar på vattenbalansen och på grundvattennivån samt utfalldikets inverkan på grundvattennivån på olika avstånd från diket i Sievi. Modellen simulerade också effekterna av dränering på hydrologin i framtida klimatscenarier.

Kompletteringsdikningen år 2014 ökade inte skörden på försöksfältet Nummela. Området har lidit av väta i årtionden på grund av för glest lagda täckdikena, fosfortalet i marken är lågt ($2-3 \text{ mg l}^{-1}$) och makens struktur är dålig. Kompletteringsdikningen var inte nog för att förbättra skörden utan det behövdes dessutom andra förbättringsåtgärder såsom uppluckring och gödsling. Biologiska uppluckring, som påbörjades våren 2019 som en markförbättringsåtgärd, visade sig vara en långsiktig process vars effekter på markens struktur och skördenivå kan bedömas först efter några år.

Fosforgödslingen ($0, 5, 15, 30$ och 45 kg ha^{-1}) höjde skörden först då gödselmängderna var 30 och 45 kg ha^{-1} . Gödselmängder på $15-45 \text{ kg ha}^{-1}$ ökade fosforhalten i ytskiktet ($0-10 \text{ cm}$), men inte i de djupare skikten ($10-20$ och $20-30 \text{ cm}$). Fosforbalansen var nära noll då fosformängden var 15 kg ha^{-1} och högre mängder resulterade i betydligt högre fosforbalans, vilket ökar risken för fosforläckage.

Enligt mätningarna (juni 2007 - maj 2020) på Nummela försöksfält på lerjord ökade kompletteringsdikningen täckdikensavrinningen och utlakningen av näringsämnen och fasta partiklar. Samtidigt minskade ytavrinningen och dess belastning, men minskningen var min-

dre än ökningen i täckdikessavrinningen. Det var främst avrinningens storlek som inverkade på belastningen, eftersom koncentrationerna av kväve, fosfor och fasta partiklar var ungefär lika stora i ytavrinningen som i täckdikessavrinningen.

På försöksfältet i Sievi låg grundvattennivån i genomsnitt en aning högre på området med reglerad dränering än på referensområdet med konventionell dränering. Efter regn och snösmältning sjönk grundvattnet snabbt också på området med reglerade dränering. Pumpning av bevattningsvatten höjde grundvattennivån och bidrog till att nivån sjönk långsammare. Skörden (råg och korn) var något högre på området med kontrollerad dränering än på referensområdet. Täckdikessavrinningen och dess belastning var en aning lägre på området med reglerad dränering (utan underbevattning) än på referensområdet. Det fanns inga systematiska skillnader i koncentrationer av näringsämnen och fasta partiklar i avrinningsvattnet från försöksområdena. Modelleringsresultaten från försöksfältet visade också att kontrollerad dräneringen minskade avrinningen. Samtidigt ökade grundvattenavrinningen och under vissa omständigheter också ytavrinningen, vilket måste beaktas när man bedömer hur kontrollerad dränering inverkar på den totala belastningen.

Uppdämningen av utfalldiket på våren och försommaren höll vattennivån i diket på uppdamningsnivå tills diket torkade ut nästan helt till följd av avdunstning. Mätningarna gav ännu inte tillräcklig information om hur uppdamning inverkar på grundvattennivån på åkrarna. Enlig modellsimuleringar sjönk grundvattennivån på grund av utfalldiket ända upp till 100 meter från diket. Detta tyder på att man genom uppdamning av vatten i utfalldiket kan bromsa upp sänkningen av grundvattennivån på åkrarna.

Enlig simuleringsresultaten med olika klimatförändringsscenarier (RCP 2.6 och RCP 8.5) kommer det att regna mera i framtiden, vilket leder till att den årliga avrinningen kommer att öka mer än avdunstningen under växtsäsongen ökar. Med hjälp av reglerad dräneringen kan man minska avrinningen. Betydelsen av reglerad dränering kommer att öka i framtiden, eftersom grundvattennivån naturligt kommer att ligga över dräneringsdjupet under en längre tid. Under torra år kommer reglerad dränering att ha en större inverkan på grundvattennivån i framtiden än i nuläget.

Projektet varade i 2,5 år och dess experimentella del bara i 1,5 år, så forskningsresultaten är preliminära, särskilt för reglerad dränering /underbevattning och uppdamning av utfalldike.

Forskningen fortsätter under åren 2021–2022 som en del av främjande av hållbar vattenhushållning inom jord- och skogsbruket.

Abstract

The main goal of the research project *Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa* (VesiHave) was to develop optimal water management practices for agricultural land. The project investigated the possibility to reduce losses of nutrients and suspended solids from cultivated fields into waterways and to enhance agricultural productivity through supplementary drainage, controlled drainage/sub-irrigation and damming of the main ditch. The effects of controlled drainage on the field hydrology were examined under different climate scenarios. In addition, experiments were established to improve the soil structure of a low-yielding field area by biological and mechanical de-compaction and to increase the yield with phosphorus fertilization. The research was conducted through extensive field experiments and mathematical modelling. The project consisted of three parts:

1. Increasing agricultural productivity and decreasing losses of nutrients and suspended solids into waterways through supplementary drainage and improving the soil structure with deep rooted plants and subsoiling. The research site was Nummela experimental field in Jokioinen, southwestern Finland, established in 2006. The effect of phosphorus fertilization on yield was investigated with a plot experiment in 2019 and 2020.
2. Increasing agricultural productivity and decreasing losses into waterways through controlled drainage and sub-irrigation as well as damming of the main ditch. Controlled drainage and sub-irrigation were investigated in an experimental field in Sievi, North Ostrobothnia. A main ditch, Korvenoja, was dammed in Järvikylä village, in Sievi.
3. Development and application of the mathematical FLUSH model as a design tool for agricultural water management. The model was used to investigate the effects of controlled drainage on water balance and groundwater levels in the Sievi experimental site. Furthermore, model simulations were carried out to evaluate the effects of an open main ditch on groundwater levels within the field area. The model was also used to simulate the effects of controlled drainage and conventional subsurface drainage on field hydrology under future climate scenarios.

A supplementary drainage, installed in 2014, had no effects on yields in the Nummela experimental site. The area had suffered from excessive wetness for decades due to the sparse drain spacing, the amount of plant available phosphorus in the topsoil was low (2–3 mg l⁻¹) and the soil structure was poor. The improved drainage alone could not increase yields in the field, and other measures were required to improve productivity of the soil. To improve the soil structure, a regime of decompaction was started in spring 2019 with deep rooted plants and subsoiling. This process is still going on and needs some years before its effects on yields and soil structure can be evaluated.

The effects of phosphorus fertilization (0, 5, 15, 30 and 45 kg ha⁻¹) on the crop yields could only be observed at the rates of 30 and 45 kg ha⁻¹. Rates of 15–45 kg ha⁻¹ increased the phosphorus amount in the topsoil (0–10 cm), but not in the deeper (10–20 and 20–30 cm) soil layers. The phosphorus balance was close to zero at the fertilizer rate of 15 kg ha⁻¹

and clearly positive above it, increasing the risk of phosphorus leaching.

The long-term measurements (June 2007 – May 2020) in the clayey Nummela field showed that the supplementary drainage increased the subsurface drain discharge and the losses of nutrients and suspended solids via drain discharge compared to the measurement period before the supplementary drainage. The corresponding surface runoff decreased significantly, but the decrease was smaller than the increase in the subsurface drain discharge. The amount of loading from the field into the main ditch was primarily determined by the volume of measured water outflow because the concentrations of nitrogen, phosphorus and dry matter in the surface runoff and drain discharge were quite similar before and after the supplementary drainage installation.

The results of Sievi experimental site showed that the field plot under controlled drainage/sub-irrigation had a slightly higher average groundwater level compared to the conventional subsurface drainage field plot (control area). After rainfall events and spring snow melt period, groundwater table descended rapidly in the controlled drainage as well as in the conventional drainage plot. During the sub-irrigation events, pumped water into the drain network raised the groundwater levels and slowed the descent of the levels. The yields of rye and barley were slightly higher in the controlled drainage plot compared to the conventional drainage plot. The annual drain discharge was slightly lower in the controlled drainage compared to the conventional drainage, excluding the discharge from the pumped irrigation water. Concentrations of nutrients and suspended solids in the subsurface drain discharge had no systematic differences between the different drainage plots. It is assumed that nutrients and suspended solids were lower from the controlled plot compared to conventional plot due to the decreased drain discharge. The simulation results also showed a smaller annual drain discharge from the field under controlled drainage compared to conventional drainage. At the same time, groundwater outflow increased, and under certain conditions, surface runoff as well. This should be taken into account when the effects of controlled drainage on the total loading from field area to surface waters is being assessed.

Damming of the main ditch Korvenoja in Sievi kept the ditch water level at the damming level in spring and early summer, until the ditch dried out almost completely due to increased evaporation. The short-term measurement data is so far insufficient to evaluate the effects of damming on groundwater levels in the surrounding field areas. The results obtained by model simulation showed that an open main ditch has influence on groundwater levels in a long distance within the field. This indicates that damming of the main ditch in flat areas can slow down the descent of groundwater levels and enhance crop water uptake.

The water balance simulation results of Sievi experimental site under different climate scenarios (RCP 2.6 and RCP 8.5) showed that annual drain discharge will increase in the future due to increased annual precipitation, but the growing season evapotranspiration will remain similar in the future. Subsurface drain discharge can be reduced with controlled drainage. The importance of controlled drainage will increase in the future because groundwater levels will remain longer above the drain level. In dry years, the effects of controlled drainage on groundwater levels will increase.

The project lasted for 2.5 years with only a 1.5 year-long experimental period, so results are preliminary especially for controlled drainage/sub-irrigation and main ditch damming. The second stage of the research will continue until 2022.

I JOHDANTO

I.1 Tausta

Maan hyvä kasvukunto ja korkea tuottokyky ovat oleellinen osa paitsi maatalouden kannattavuutta myös vesiensuojelua. Ratkaisukeinoja tarvitaan korkean satotason, pienten ravinnetaseiden ja -huuhtoumien tuottamiseksi ekologisesti, taloudellisesti ja sosiaalisesti kestäväällä tavalla (Hägglom ym. 2020). Ympäristöystävälliset viljelymenetelmät ja muut toimenpiteet itse peltoalueella ovat maatalouden vesiensuojelun perusta, sillä valumavesien käsittely (esim. kosteikat ja kemiallinen käsittely) on teknisesti hankalaa ja kallista suurten vesimäärien sekä ravinne- ja kiintoainekuormituksen suuren ajallisen vaihtelun vuoksi.

Pellon vesitaloudella on keskeinen merkitys sadon määrään ja laatuun, sieltä tulevaan vesistökuormitukseen sekä maan kantavuuteen ja rakenteeseen. Pellon kuivatuksen on oltava kunnossa ennen kuin muista perusparannustoimenpiteistä, ravinteiden kierrätyksestä ja eri viljelytoimista saadaan optimaalinen hyöty. Maan kosteustilan säätömahdollisuus parantaa pellon vesi- ja ravinnetalouden hallintaa sekä kasvintuotannon että vesiensuojelun kannalta erityisesti, jos Suomen ilmasto-olot muuttuvat ennusteiden mukaisesti. Suomessa vuodet tulisivat olemaan keskimäärin sateisempia ja lämpimämpiä kuin nykyisin (esim. Ruosteenoja ym. 2016). Lisäksi ääri-ilmiöt, rankkasateet ja pitkät kuivuuskaudet, tulisivat yleistymään.

Miltei 85 % Suomen peltoalasta (2,27 milj. ha) on ojitettu joka salaojilla tai avo-ojilla (Luke 2021). Peltomaan laatutesti, jossa viljelijät arvioivat vuonna 2017 hallinnassaan olleiden peruslohkojen (532 771 kpl) ominaisuuksia, antaa viitteitä maankuivatuksen parantamisen tarpeesta Suomessa. Laatutesti oli tehtävä osana ympäristösitoumuksen vaatimuksia (Ruokavirasto 2021). Käytössä olevaan maatalousmaahan suhteutettuna ojituksen toimivuus ja pellon kuivuminen tulisi saada selvästi paremmaksi noin 200 000 hehtaarilla (Ovaska ym. 2021). Salaojitusten kunnostus- ja täydennystarvetta on arvioitu olevan noin 10 %:lla salaojitetusta alasta eli 150 000 hehtaarilla (Luke 2021).

Säätösalaojitettua peltoa on noin 5 % salaojitetusta peltoalasta eli 77 000 hehtaaria (Luke 2021). Säätösalaojitukseen soveltuvaa peltomaata on arvioitu olevan kaikkiaan 600 000 – 800 000 ha riippuen siitä, kuinka kalteville pelloille ja mille maalajeille menetelmän katsotaan soveltuvan. Säätösalaojitusten yhteydessä on mahdollista käyttää myös salaojakastelua. Valumavesien pidättäminen valtaojissa tarjoaa mahdollisesti vastaavanlaisia hyötyjä suuremmalla peltoalueella kuin yksittäisen salaojaston säätö, mutta sen käytöstä ei ole toistaiseksi kokemuksia Suomen olosuhteissa.

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

Tätä aiemmin avo-ojitetun pellon salaojittamisen vaikutusta huuhtoumiin on tutkittu Suomessa Hovin peltoalueella Vihdissä (Seuna ja Kauppi 1981) ja uusintaojituksen vaikutusta Jokioisissa Kotkanojan koekentällä (Turtola ja Paajanen 1995, Turtola 2000). Säättösalaojitusstudiumista on tehty Suomessa eniten happamilla sulfaattimailla (esim. Joukainen ja Yli-Halla 2003, Bärilund ym. 2004, Åström ym. 2007, Yli-Halla ym. 2020). Viime vuosina säättösalaojitusta on alettu tutkia myös turvepelloilla (esim. Mylly 2019), joissa sillä on mahdollista vaikuttaa myös kasvihuonekaasupäästöihin. Tavanomaisilla kivennäismailla säättösalaojituksen toimintaa on tutkittu niukemmin, mutta sen vaikutuksia vesistökuormitukseen ja satoon on arvioitu matemaattisilla malleilla (esim. Paasonen-Kivekäs ym. 2000, Karvonen 2016). Lisää tietoa tarvitaan säättösalaojituksen toiminnasta ja vaikutuksista mm. vesitaseeseen, erityisesti eri valuntakomponentteihin, ja huuhtoumiin erilaisissa maaperä- ja sääolosuhteissa, sillä menetelmän toiminnassa on todettu suurta vaihtelua eri tutkimusten perusteella (Carstensen ym. 2020).

Pellon vesi- ja ravinnetalouden hallinnassa ja vesiensuojelussa eri toimenpiteiden vaikutusten analysointi edellyttää sekä kokeellista että laskennallista tutkimusta erilaisissa alueellisissa ja ajallisissa mittakaavoissa (esim. Salo ym. 2017, Turunen ym. 2017, Häggblom ym. 2019, Koivusalo ym. 2017). Mallintaminen mahdollistaa mittaustulosten laajentamisen myös koeolosuhteiden ulkopuolelle. Malleilla voidaan laskea skenaarioita, joissa tarkastellaan eri olosuhteiden (esim. maaperä ja ilmasto), ojitusratkaisujen ja muiden toimenpiteiden vaikutuksia. Mallien kehitystyö ja soveltaminen Suomen olosuhteisiin on tärkeää, jotta päätöksentekoa varten on käytettävissä monipuoliset ja laajalti testatut työkalut. Peltoalueiden ravinnekuormituksen ja eroosion mallintamisen edellytyksenä on sen vesitasetta ja eri ojitustoimenpiteitä mahdollisimman luotettavasti kuvaava malli.

1.2 Tavoitteet

Hankkeen päätavoitteena oli peltoalueiden optimaalisen vesitalouden hallinnan kehittäminen. Hankkeessa selvitettiin paikallis- ja peruskuivatusjärjestelmien, eli salaojituksen ja valtaojien, tehokkuuden ja säädön toimivuutta ja mahdollisuuksia soveltaa niitä peltoalueilla ja maatalousvaltaisilla valuma-alueilla. Lisäksi tavoitteena oli selvittää huonotuottoisen peltoalueen maan rakenteen parantamista biologisella ja mekaanisella kuohkeutuksella ja satotason nostoa fosforilannoituksella. Tavoitteena oli tuottaa tietoa menetelmien vaikutuksista kasvintuotannon, maan kuivatuksen ja vesiensuojelun suunnittelua varten siten, että maksimoidaan satotaso ja sadon laatu, turvataan kestävä maan rakenne sekä minimoidaan vesistökuormitus. Tavoitteena oli selvittää myös maan kuivatustilan ja kasvihuonekaasupäästöjen välisiä yhteyksiä.

Hanke koostui kolmesta osahankkeesta, joiden yksityiskohtaisemmat tavoitteet olivat:

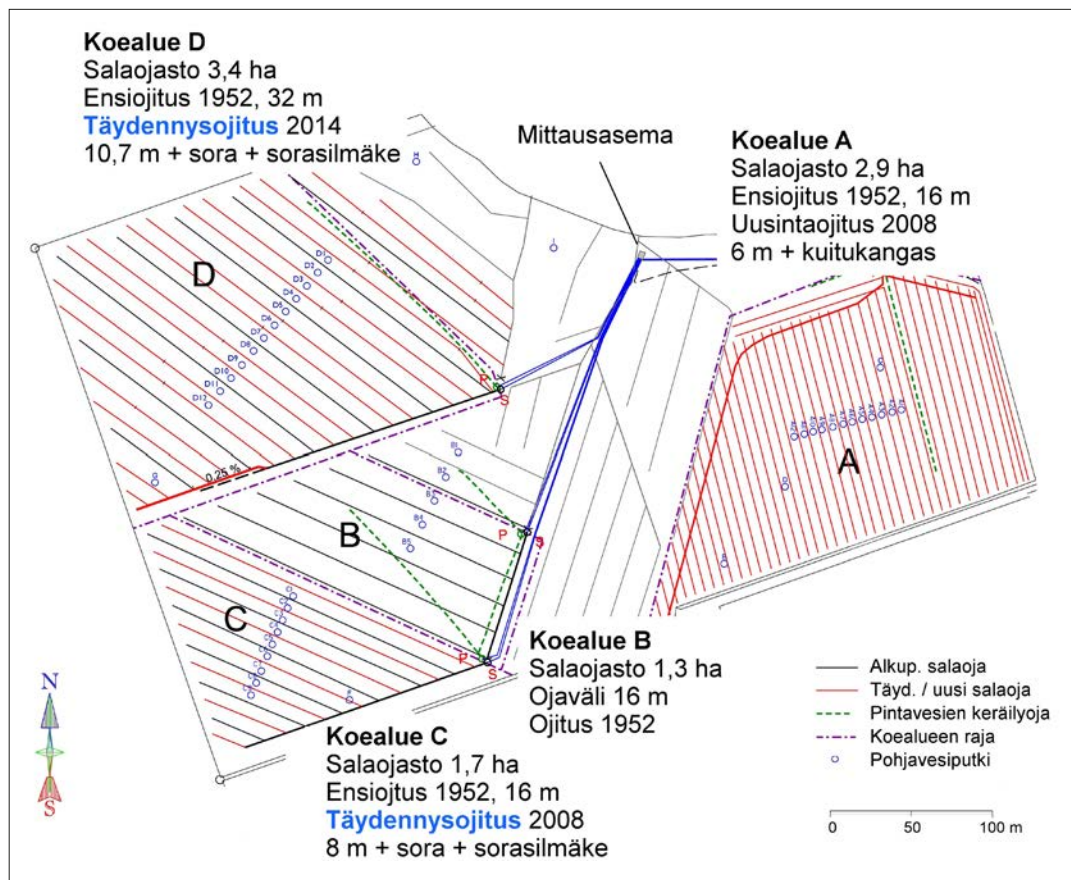
1. Peltoviljelyn tuottavuuden parantaminen ja vesistökuormituksen vähentäminen täydennysojituksella sekä muilla perusparannustoimenpiteillä. Kohdealueena oli Nummelan salaojakoekenttä Jokioisissa.
2. Peltoviljelyn tuottavuuden parantaminen ja vesistökuormituksen vähentäminen säättösalaojituksella ja valtaojan padotuksella. Kohdealueina olivat Sievin salaojakoekenttä ja Järvikylän Korvenoja Pohjois-Pohjanmaalla.

3. Matemaattisen mallin (FLUSH) kehittäminen ja soveltaminen peltoalueiden vesitalouden suunnittelun apuvälineeksi. Kohteena oli erityisesti säätösalaajituksen ja valtaojan padotuksen hydrologisten vaikutusten arviointi, sovellusalueena Sievin koekenttä.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Nummellan koekenttä

Nummellan 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 märkydestä selvästi 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 ojavälien 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). Koekentän viljelytoimet vuosilta 2007–2015 on esitetty liitteessä 1 ja 2016–2020 taulukossa 2.1.



Kuva 2.1. Nummellan koekentän ojitukset.

Taulukko 2.1. Nummelan koekentän viljelytoimet viiden viimeisen vuoden aikana (vuosina 2019–2020 alueiden A–C viljelytoimet. Alueen D viljelytoimet on esitetty kohdassa 2.1.2.)

	2016	2017	2018	2019	2020
kevätmuokkaus	joustopiikkiäes 19.5.2016	joustopiikkiäes 19.5.2017	joustopiikkiäes 20.-21.5.2018	joustopiikkiäes 20.5.2019	joustopiikkiäes 19.-20.5.2020
kylvö	Mallasohra Trekker 260 kg/ha 19.5.2016	Kaura Venla 185 kg/ha 22.5.2017	Ohra Elmeri 220 kg/ha, heinänsiemen 25 kg/ha 22.5.2018	kaura Niklas 195 kg/ha 20.5.2019	ohra Eversti 268 kg/ha 21.5.2020
kylvölannoitus	Belor Premium Typpi 27 (27-0-0) 300 kg/ha	Befert Can 100 kg/ha (27-0-0)	Befert Can 150 kg/ha	BeFert (27-3-5) 370 kg/ha + Superfosfaatti (0-20-0) 50 kg/ha 3.6.2019	BeFert (27-3-5) 350 kg/ha
lannanlevitys keväällä	ei lietettä	Naudan lietettä 40 m ³ /ha 18.5.2017	Naudan lietettä 40 m ³ /ha 20.5.2018	ei lietettä	ei lietettä
torjunta- ainekäsittely	Tooler 50 g 15.6.2016; glyfosaatti 6.- 14.9.2016	Tooler 50 g + sito 7.7.2017	Ariane S 2.7.2018	Biathlon 4D 25.6.2019	Duplosan Meko 1,75 l/ha 26.6.2020 Rodeo xl
puinti	1.9.2016	19.9.2017	23.9.2018	18.9.2019	1.10.2020
sato	2878 kg/ha	n. 2800 kg/ha	n. 2500 kg/ha	n.d.	3000 kg/ha
syysmuokkaus	kultivointi 21.9.2016	kultivointi 29.9.2017	kultivointi 22.11.2018	kultivointi 7.11.2019	kultivointi 28.10.2020
lannan syyslevitys	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä
kalkitus					
muuta mainittavaa	pintavesikeräinten avaus 2.11.2016		Pintavesikeräinten avaus. Nurmen tuhoaminen syksyllä muokkaamalla seuraavana vuonna alkavaa uutta koetta varten.	9.5.2019 glyfosaattiriskutus nurmen jämien poistamiseksi. Pintavesikeräinten avaus marraskuun lopussa.	Pintavesikeräinten avaus joulukuun lopussa.

Alueella D vuonna 2014 tehty täydennysojitus (ojaväli 10,7 m) ei ole yksinään riittänyt parantamaan satomääriä eikä maan rakennetta. VesiHave-hankkeessa aloitettiin parantamaan tämän alueen maan rakennetta ja tuottokykyä biologisen (syväjuuriset kasvit) ja mekaanisen (jankkurointi) kuohkeutuksen yhdistelmällä. Alueelta D saatuja mittaustuloksia verrataan koealueiden B ja C mittaustuloksiin sekä alueen D mittauksiin ennen kuohkeutuskoetta.

VesiHave-hankkeessa selvitettiin yhteistyössä *Risky P economy (RiPE)* -hankkeen kanssa myös sitä, missä määrin alueen D huonot sadot ovat johtuneet huonosta fosforiluvusta eivätkä pelkästään huonosta maan rakenteesta. Alueen D reunalle perustettiin fosforin porraskoe, jossa lannoitusportaina on P 0, 5, 15, 30 ja 45 kg ha⁻¹.

Yhdellä koealueella (A) tutkittiin myös rakennekalkituksen vaikutusta ravinteiden ja kiintoaineen huuhtoutumiseen. Tutkimuksesta vastasi *Maatalouden rehevöittävä fosforikuormitus ja sen vähentäminen (Samassa Vedessä)* -hanke (www.samassavedessa.fi). Rakennekalkitun alueen A mittaustuloksia verrattiin alueeseen B sekä alueeseen A ennen kalkitusta.

2.1.1 Koko kentän koe

Nummelan koekentällä on mitattu kaikilta neljältä koealueelta seuraavia muuttujia:

- 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)
- pohjaveden ravinnepitoisuudet (manuaalinen näytteenotto, laboratorioanalyysit)
- maan kosteus (manuaalinen mittaus TDR-mittarilla 0–30 cm:n syvyydestä)
- lumen syvyys ja vesi-arvo (manuaalinen mittaus, lumikeppi ja lumipuntari)
- roudan syvyys (manuaalinen mittaus, metyleenisiniputket)
- sadon määrä ja laatu (kuiva-aine, hehtolitraino, 1000 jyvän paino, typpipitoisuus)

Nummelan koekentän koejärjestelyt ja mittaus- ja analyysimenetelmät on kuvattu yksityiskohtaisesti julkaisuissa Vakkilainen ym. (2008, 2010) ja Äijö ym. (2017).

Lisäksi Nummelan koekentällä on seurattu pintamaan (0–20 cm) viljavuutta, happamuutta ja orgaanisen aineksen pitoisuutta vuosina 2006, 2013 ja 2018. Näytteet otettiin joka koealueesta viidestä kohdasta. Tulokset esitetään tässä raportissa. Maan rakennetta (vedenjohtavuus, huokoskokojakauma, lierokanavien pinta-ala, juurikanavien määrä, maan irtotiheys) on tutkittu vuosina 2006 ja 2013 kaikilta alueilta otetuista häiriintymättömistä maanäytteistä 60 cm:n syvyyteen asti. Käytetyt analyysimenetelmät ja tulokset on esitetty julkaisuissa Vakkilainen ym. (2010) ja Äijö ym. (2014).

Nummelan koekentältä mitattiin kesällä 2020 kasvihuonekaasuja sen selvittämiseksi, vaikuttaako maan rakenne kasvihuonekaasupäästöihin. Mittauksia tehtiin eri olosuhteissa kolmeen kertaan 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.

2.1.2 Kuohkeutusko

Nummelan kentän alueen D keskelle perustettiin keväällä 2019 ruutukoe (kuva 2.2), jossa maan rakennetta ja vesitaloutta parannetaan biologisen ja mekaanisen kuohkeutuksen yhdistelmällä ja jossa parannustoimien vaikutuksia verrataan ”käsittelemättömään” maahan eli viljanviljelyyn. Biologisessa kuohkeutuksessa syväjuuriset nurmikasvit rei’ittävät maata ja mekaanisessa kuohkeutuksessa jankkuri rikkoo maata. Mekaaninen kuohkeutus tehdään vasta, kun nurmen juuret ovat jo kasvaneet syvälle.

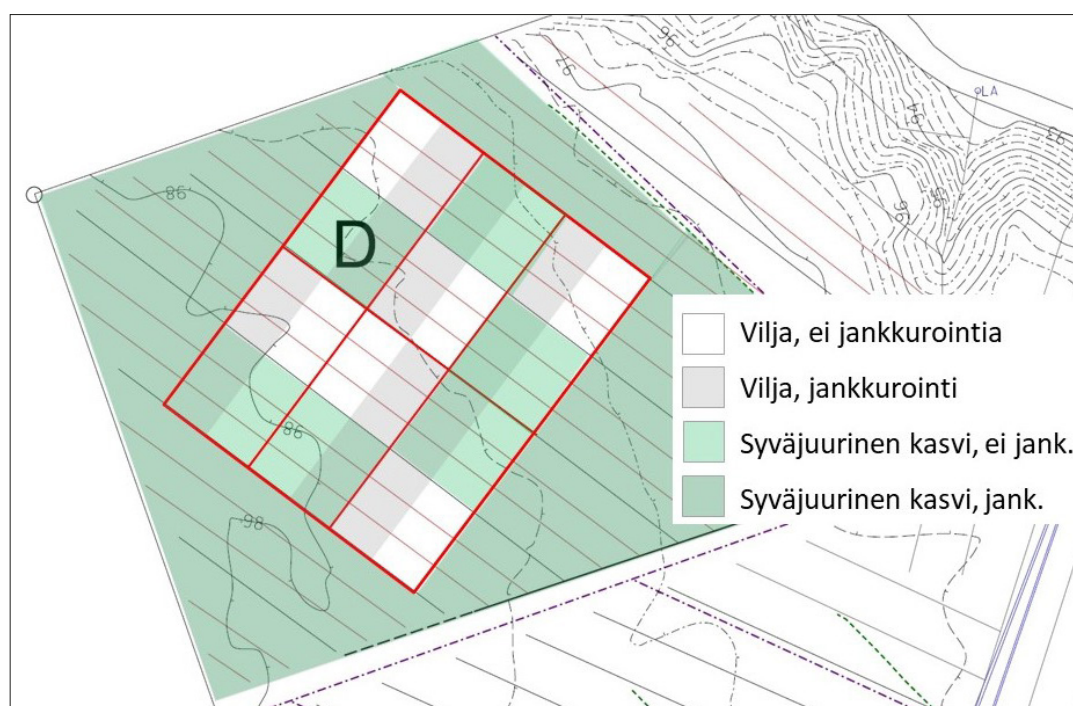
Ruutukokeessa on neljä käsittelyä; 1) vilja, ei jankkurointia, 2) vilja, jankkurointi, 3) syväjuurinen nurmi, ei jankkurointia, 4) syväjuurinen nurmi, jankkurointi.

Ruutukokeen ympärille, koko lopulle alueelle D kylvettiin syväjuuristen nurmikasvien seos. Näin (lähes koko) alue D toimii koeruutuna, jonka valuntaa ja huuhtoumia voidaan

verrata alueisiin A–C. Koko Nummellan pelto (alueet A–D ruutukokeineen) lannoitettiin perustamisvuonna 2019 samalla tavalla: NPK 99–19–8 kg ha⁻¹.

Syväjuuristen kasvien kasvilajiseos kylvettiin suojaviljaan, joka oli kauraa. Seoksessa oli

- sinimailasta (syväjuurinen) 8 kg ha⁻¹
- rehumailasta (jonka on sinimailasen ja sirppimailasen risteytys ja jonka talvenkestävyys on parempi kuin sinimailasen) 4 kg ha⁻¹
- ruokonataa (syväjuurisin heinäkasvi) 6 kg ha⁻¹
- timoteitä (varmistamassa heinäkasvien talvehtimistä) 2 kg ha⁻¹



Kuva 2.2. Kuohkeutuskoe Nummellan koekentän alueella D.

Suojavilja korjattiin vihantana nurmen päältä heinäkuussa 2019. Jotta nurmella oli mahdollisimman paljon energiaa juurten kasvattamiseen, nurmea ei niitetty koko kesänä. Nurmi talvehti huonosti talvella 2019–2020, ja ruutukokeen ruuduille jouduttiin tekemään täydennyskylvö kesäkuussa 2020 (kuva 2.3). Täydennyskylvö onnistui hyvin. Nurmi ja harvaa kasvustoa vallanneet rikkakasvit niitettiin heinäkuussa 2020, ja rikkakasvit ruis-kutettiin. Tämän jälkeen nurmi pääsi hyvin kasvuun ja oli syksyllä hyvässä kunnossa (kuva 2.3).

Koska mailaset ovat typensitojakasveja, alueen D nurmialueella vähennettiin typpi-lannoitusta kesällä 2020. Lannoitteita annettiin NPK 50–10,5–17,7 kg ha⁻¹, kun koko muu kenttä (alueet A–C ja ruutukokeen viljaruudut) saivat lannoitetta 94,5–10,5–17,7 kg ha⁻¹. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun koko kenttää (A–D) ei lannoitettu samalla tavalla.



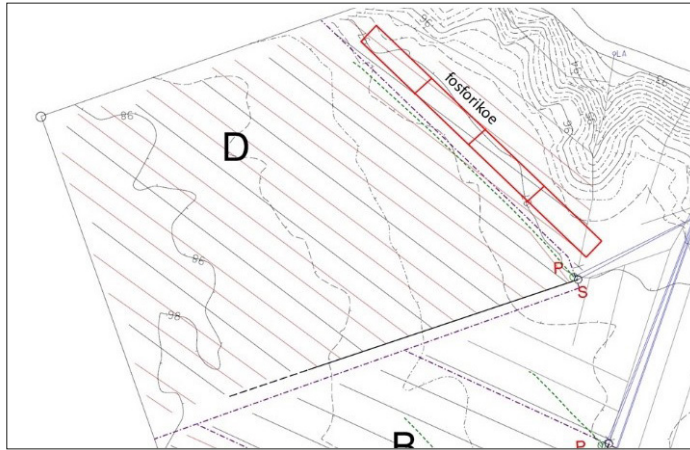
Kuva 2.3. Alue D ennen täydennyskylvöjä (19.5.2020) ja niiden jälkeen syksyllä (2.10.2020).

2.1.3 Fosforin porraskoe

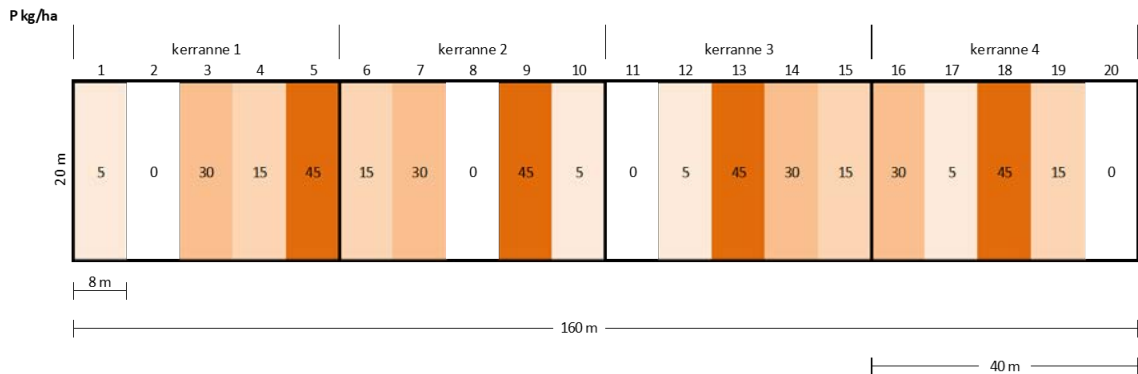
Nummelan koekentän alueen D huonot sadot voivat johtua maan huonon rakenteen lisäksi myös huonosta fosforiluvusta, minkä takia fosforin vaikutusta satoon tutkittiin erillisessä fosforin porraskokeessa. Koe sijaitsi alueella D olevan kuohkeutuskokeen vieressä salaojituskokeen ulkopuolella (kuva 2.4). Koe oli satunnaistettujen täydellisten lohkojen koe, ja siinä oli neljä kerrannetta. Kokeen järjestelyt on esitetty kuvassa 2.5.

Koe tehtiin vuosina 2019 ja 2020. Kumpanakin keväänä jokaiselta koeruudulta otettiin maanäytteet ennen lannoitusta 0–10 cm:n ja 10–20 cm:n syvyydestä. Lisäksi jokaisen kerranteen 0-ruudusta otettiin näyte 20–30 cm:n syvyydestä. Näytteistä määritettiin maan viljavuus, jossa fosfori määritettiin Suomessa käytetyllä happamalla ammoniumasetaatti-uutolla. Tämän lisäksi fosfori analysoitiin Mehlich- ja Olsen-P -menetelmillä.

Koeruudut muokattiin jyrsimellä, jotta maata ei kulkeutuisi ruudulta toiselle. Lannoitus tehtiin sijoituslannoituksena. Kaikille koeruuduille levitettiin typpilannoitteena suomensalpietaria (NPK 27-0-0) 370 kg ha⁻¹, jolloin typpeä tuli 100 kg ha⁻¹. Fosforilannoitus tehtiin Superfosfaatilla (NPK 0-20-0), jota levitettiin niin, että fosforia tuli 0, 5, 15, 30 tai 45 kg ha⁻¹ (kuva 2.5). Vuonna 2019 ruuduille kylvettiin kaura ja 2020 ohra. Kumpanakin vuonna torjuttiin rikkakasvit. Syksyllä jokaiselta koeruudulta otettiin kaksi satonäytettä koeruutupuimurilla 2 m x 20 metrin alalta. Näytteistä määritettiin sadon määrä, hehtoliterapaino, 1000 jyvän paino, typpipitoisuus (valkuainen) sekä kivennäispitoisuudet (mm. fosforipitoisuus).



Kuva 2.4. Fosforin porraskokeen sijainti Nummelan koekentällä.



Kuva 2.5. Fosforin porraskokeen koejärjestely. Lannoitusmäärät 0–45 kg ha⁻¹.

2.1.4 Yhteistyö muiden hankkeiden kanssa

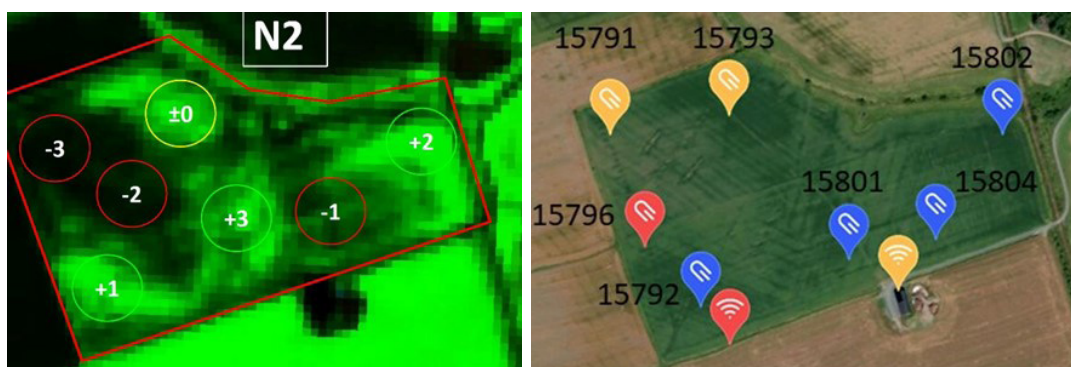
Nummelan koekenttä oli sopiva tutkimusalusta myös muille hankkeille. Vesihave-hankkeessa tehtiin yhteistyötä hankkeiden kanssa, joissa koetetaan vähentää ravinnehuuhtoumia, seurataan maan kosteutta jatkuvatoimisesti sekä kehitetään maan kosteuden arviointia kaukokartoitusmenetelmillä.

2.1.4.1 Rakennekalkitusko

Alueelle A levitettiin rakennekalkkia yhteistyössä Samassa vedessä -tutkimushankkeen kanssa 15.10.2018. Kalkki oli metsäteollisuudesta peräisin olevaa kalkkiuunin sivukalkkia, ja sitä levitettiin noin 10 tn/ha. Maan märkyuden takia kalkkia ei pystytty sekoittamaan maahan heti, vaan maa muokattiin vasta 22.–23.11.2018 kahteen kertaan lautasäkeellä ristikkäin. Kokeen perustaminen siis osaksi epäonnistui, mutta rakennekalkituksen vaikutuksia huuhtoutuneisiin ravinteisiin päätettiin silti seurata. Vertailu tehtiin rakennekalkitun alueen A ja vertailualueen B välillä sekä alueiden aiempien tulosten välillä.

2.1.4.2 Maan kosteuden jatkuvatoimisen mittauksen kokeilu

Luonnonvarakeskuksen Smart Farming -projektissa asennettiin useille Jokioisten kartanoiden peltolohkoille langattomia Soil Scout -antureita (<http://www.soilscout.com>), jotka mittaavat maan kosteutta, lämpötilaa ja johtolukua jatkuvatoimisesti 20 minuutin välein. Nummelan kentän alueelle asennettiin seitsemän anturia 20 cm:n syvyyteen. Antureita asennettiin Sentinel-satelliittikuvista tunnistettuihin, biomassaltaan eritasoisiin kohtiin (kuva 2.6). Antureiden lähettämää dataa verrattiin tässä hankkeessa 0–30 cm:n syvyydestä käsin TDR-menetelmällä (Time Domain Reflectometry) tehtyihin kosteusmittauksiin. TDR-mittaukset tehtiin kannettavalla laitteella, joka mittasi maan kosteuden maahan asennettujen ohjuripuikkojen välissä. Kumpikin menetelmä mittasi maan kosteutta tilavuusprosentteina. Soil Scout- ja TDR-mittauksia ei tehty täysin samoista paikoista eikä samasta syvyydestä, joten vertailussa tarkasteltiin tulosten suuruusluokkia ja arvioitiin jatkuvatoimisesta mittauksesta saatavia hyötyjä.



Kuva 2.6. Vasemmalla: Seitsemän biomassaltaan erilaista aluetta Sentinel-satelliittikuvan perusteella Nummelan koekentällä. Alueella D sijaitseva -3 on biomassaltaan huonoin alue ja alueella B sijaitseva +3 paras. Oikealla: Soil Scout -antureiden (7 kpl) sijainnit ja numeroinnit ja lähettimien (2 kpl) sijainnit. (Värit kuvaavat lähetystilaa kuvantekohetkellä.)

2.1.4.3 Drone-lämpökamerakuvaus

Luonnonvarakeskuksen rahoittamassa Monitoring the state and changes in forests and agricultural fields using remote sensing and modern data-analysis (MORE) -hankkeessa peltolohkoja kuvataan drooniin kiinnitetyllä lämpökameralla sekä RGB-ilmakuvakameralla. Tavoitteena on selvittää, voidaanko lämpökameraa käyttää tunnistamaan pellon sisäistä kosteusvaihtelua. Kuvauksia tehtiin Nummelan kentällä kolmeen kertaan alkukesän aikana.

2.2 Sievin säätösalojituskenttä

Sievin peltoalueella toteutettiin TOSKA-hankkeessa kolmivuotinen (2015–2017) tutkimus (Äijö ym. 2017, Äijö ym. 2018, Salo ym. 2019), jossa selvitettiin kaivavalla salaojakoneella ja aurakoneella tehtyjen ojitusten toimivuutta. Pohjavedenpinnan syvyyksissä eri konetyypeillä tehtyjen ojitusten välillä ei havaittu merkittäviä eroja. VesiHave-hankkeessa koekentän mittauksia (pohjavedenpinnan syvyys, salaojavalunta, sadanta ja sato) jatkettiin sekä osa koekenttää muutettiin säätösalojitetuksi.

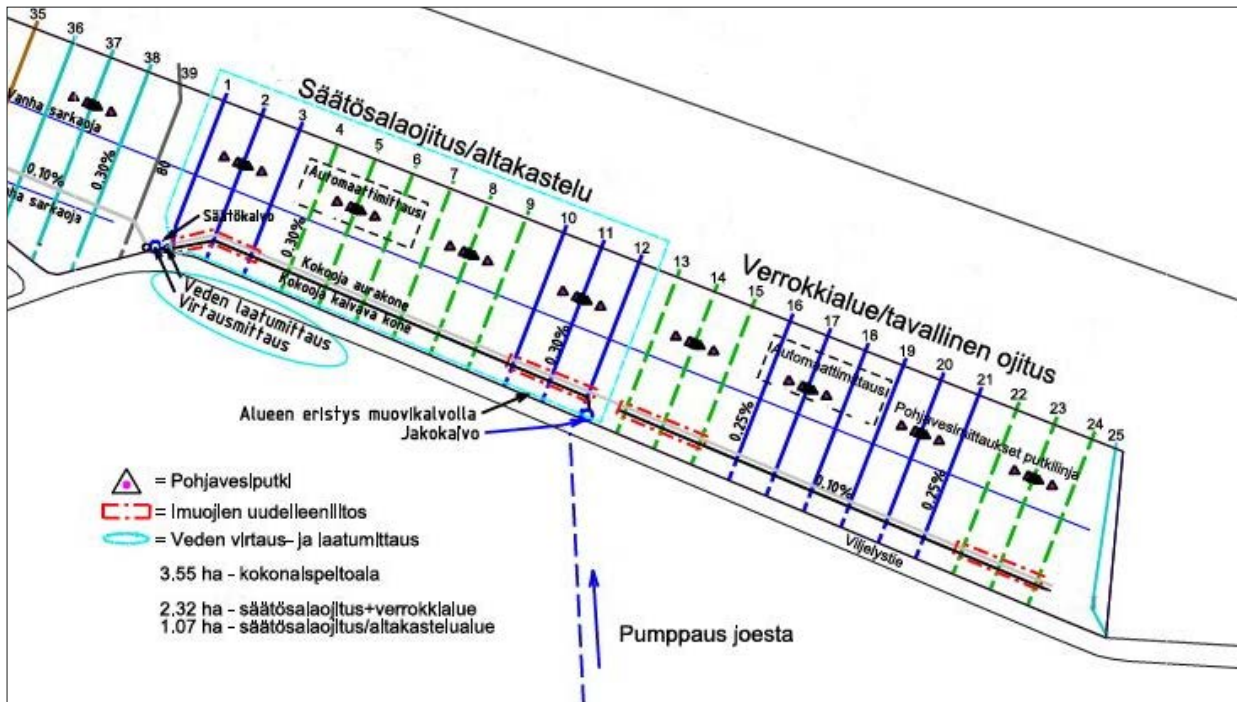


Kuva 2.7. Sievin koekenttä sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla Sievin Vanhallakirkolla Vääräjoen varrella. Kasteluvien pumppauslinja näkyy kuvassa sinisellä (P 63° 55,978' ja l 24° 20,646').

Sievin koekentän kokonaispinta-ala on 3,55 ha. Peltoalue on suorakulmion muotoinen ja maastoltaan tasainen (keskikaltevuus alle 0,2 %). Säättösalaajitetun alueen pinta-ala on 1,07 ha ja tavanomaisesti salaajitetun vertailualueen 1,25 ha. Koekenttää ympäröivät maastot ovat tasaisia ja samantyyppistä viljelysmaata. Vääräjoki virtaa 300 metrin etäisyydellä pellostä (kuva 2.7). Pellon maalaji on hietaa ja hiuetta (Äijö ym. 2017).

Toukokuussa 2019 puolet Sievin koepellosta muutettiin säättösalaajitetuksi ja toinen puoli jätettiin ennalleen (tavanomainen salaajitus) vertailualueeksi. Imuojaväli on lohkolle 15 metriä. Kokoojaojat muutettiin siten, että molemmilla ojitusalueilla on omat kokoojaojansa. Koekentän salaajakartta on esitetty kuvassa 2.8. Säättöalueen alareunaan kokoojaan asennettiin yksi säätökaivo, jolla voidaan padottaa vettä alueella. Lisäksi kokoojaajaan asennettiin pumppauskaivo veden johtamiseksi ojastoon salaajakastelua varten. Vesi pumpataan läheisestä Vääräjoesta.

Koalueet eristettiin toisistaan muovikalvolla (alusKate), jotta koalueiden välillä tapahtuva veden liike saadaan estettyä (kuva 2.9). Muovikalvo hidastaa säätökentällä vedenpinnan laskua ja vähentää pumpattavan kasteluvien tarvetta, kun vesi ei pääse karkaamaan pellostä pois. 1,5 metriä leveä muovi asennettiin kapeakauhaisella kaivinkoneella maahan pystyyn. Muovin yläreuna asennettiin 0,3–0,4 m maanpinnasta alaspäin, jotta muokattaessa koneet eivät osu katteeseen. Muovin alareuna asettui 1,5–1,8 metrin syvyyteen. Muovia asennettiin koalueen ympärille kaikkiaan 480 metriä.



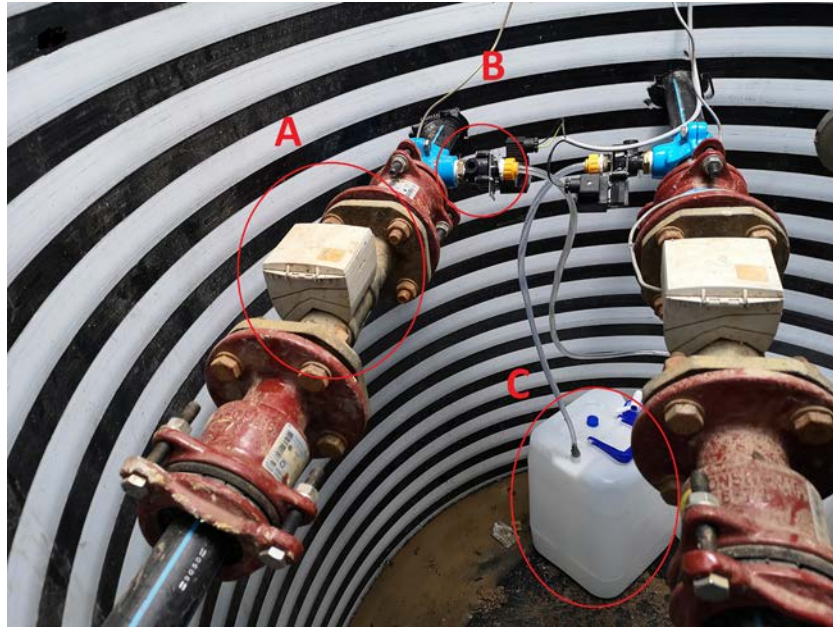
Kuva 2.8. Sievin koekenttä. Säätösalaajitettu alue (imuojat 1–12, 1,07 ha) ja tavanomainen salaajitus (imuojat 13–24, 1,25 ha). Pohjavesiputkien sijainnit on merkitty kolmioilla.



Kuva 2.9. Säätösalaajitettu koalue eristettiin muovikalvolla.

Säätökaivo ja tarkastuskaivo asennettiin vanhojen sakkakaivojen tilalle. Kaivojen jälkeen asennettiin uusi mittauskaivo, johon kokoojaojat liitettiin. Mittauskaivoon asennettiin ultraäänivirtausmittarit sekä uudet magneettiventtiilit vesinäytteiden ottoa varten (kuva 2.10).

Salaojavalunnan määrää mitattiin molempien koalueiden kokoojaojista jatkuvatoimisilla ultraäänivirtausmittareilla. Salaojavalunnasta otettiin kokoomänäytteitä siten, että



Kuva 2.10. Mittauskaivo: säätösalaajitetun ja tavanomaisesti ojitetun alueen salaajaan valun ultraäänimittarit (A), magneettiventtiilit (B) ja kokoomanäytteen keruukanisterit (C).

magneettiventtiili aukesi ja vesinäyte valui kanisteriin automaattisesti, kun 1 m³ vettä oli virrannut mittarin läpi. Vettä virtasi 15 sekuntia kanisteriin. Näytteistä analysoitiin kiintoaineen (GF/C), kokonaisfosforin, fosfaattifosforin, kokonaistypen, ammoniumtypen, nitriitti- ja nitraattitypen summan ja nitriittitypen pitoisuudet KVVY Tutkimus Oy:ssä.

Pohjavedenpinnan syvyyttä mitattiin eri etäisyyksillä salaajasta olevista pohjavesiputkista. Pohjavesiputkien etäisyydet ovat 0,2, 0,6, 2,5 ja 7,5 m molemmin puolin salaajaa, paitsi 0,2 metrin putkien, joita on vain salaajan yhdellä puolella. Molemmilla alueilla mitattiin kasvihuonekaasupäästöjä maan eri kosteustiloissa. Hydrologisista mittauksista on lisää tietoa TOSKA-hankkeen loppuraportissa (Äijö ym. 2017).

Säätökaivon padotus laitettiin päälle 3. kesäkuuta 2019. Padotustaso oli noin +74.75 (ETRS-TM35/N2000) ja maanpinta kaivolla +75.25. Kuivavara oli kaivolla 0,5 m. Padotus oli jatkuvasti päällä marraskuun 2020 loppuun asti lukuun ottamatta toukokuun 2020 kylvöä. Padotus laitettiin takaisin päälle 4. tammikuuta 2021.

Säätösalaajitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä heinäkuussa 2019 jakokaivoon, josta vesi kulkeutui salaajastoon. Vuonna 2020 vettä pumpattiin 31.5–9.7. välisenä aikana yhteensä 26 päivänä.

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 seuraavaksi kolmeksi vuodeksi. Muokkausketju koekentällä on perinteinen kyntö-äestys-kylvö. Viljelykiertoon ovat kuuluneet viljat (ohra ja kaura), nurmet ja rypsi ennen tutkimusta. Viljelytoimenpiteet on esitetty liitteessä 2.

Satomittaukset

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

2.3 Valtaojan padotus Sievissä

Valtaojan vedenpinnan padotusta ja säätöä tutkittiin Sievin Järvikylällä Korvenojaissa (kuva 2.11). Korvenoja perattiin Sievin uusjaossa vuonna 2015. Oja laskee Vääräjokeen (Kalajoen sivujoki). Uusjaossa ojaan asennettiin settipato happamien sulfaattimaiden esiintymisen vuoksi. Settipato on asennettu ojarummun päähän veden padottamiseksi (kuvat 2.12). Vedenkorkeutta ja virtaamaa säädettiin virtaussuuntaan nähden poikittain asetetuilla lankuilla. Korvenojan valuma-alue on 2,1 km². Yli 60 % alueen pinta-alasta on peltoa ja loput metsää. Ojaa ympäröivät pellot ovat tasaisia, mutta maanpinta nousee melko nopeasti etäisyyden kasvaessa ojasta. Suuri osa valuma-alueen pelloista on säätösalojittettu. Säätösalojakaivoja on Korvenojan varrella viisi kappaletta. Säätösalojia käytetään tarvittaessa yksittäisten salaojastojen vedenpinnan tutkimiseksi.



Kuva 2.11. Sievin Järvikylän Korvenoja. Säätöpato on kuvan oikeassa yläkulmassa. Pohjavesiputkien sijainti on merkitty oransseilla ympyröillä.



Kuva 2.12. Korvenojan säätöpato.

Tutkimuksessa selvitetään settipadon käyttömahdollisuuksia laajojen alueiden vesipinnan säätömekanismina. Korvenojan padotustutkimuksessa selvitetään kuinka laajalla peltoalueella padotus vaikuttaa pohjaveden pinnan korkeuteen ja kuinka nopeasti vedenpinnan muutokset ojassa johtavat peltojen pohjavesipinnan muutoksiin. Maastonmuodot alueella sekä etäisyys ojasta ovat tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa pellon pohjavedenpinnan korkeuteen merkittävästi. Padotus voi vähentää säätösalaajakaivojen tarvetta tasaisilla alueilla ja mahdollistaa lukuisten peltolohkojen vesipinnan hallinnan yhdellä rakenteella.

Vedenpintaa seurataan alueella pohjavesiputkilla. Pohjavesiputket asennettiin lokakuussa 2019. Putkia on yhteensä 13 kappaletta eri etäisyyksillä padotettavasta uomasta. Etäisyydet ovat 0, 10, 60, 140 ja 200 m. Mittauslinjoja on kaksi (kuva 2.13). Lisäksi asennettiin kontrolliputki alimpaan maastonkohtaan sekä kaksi putkea ylemmäs rinteeseen. Pohjavedenpinnan mittauksia tehtiin kasvukaudella viikon välein. Mittaustiheyttä muutettiin tarpeen tullen valunnan mukaan. Talvella mittauksia tehtiin harvemmin.

Settipadon padotus asetettiin tasoon +78.80 (ETRS-TM35/N2000). Vallitseva maanpinta padon ympärillä on +79.40. Padotus laitettiin päälle lokakuussa 2019. Padotuksen vaikutusalue on 3,2 ha. Tällä alueella pohjaveden nousu voidaan havaita salaajissa ja sala-ojasyvytydessä.



Kuva 2.13. Valtaojan padotusalue ja pohjavesiputkilinjat 1 ja 2.

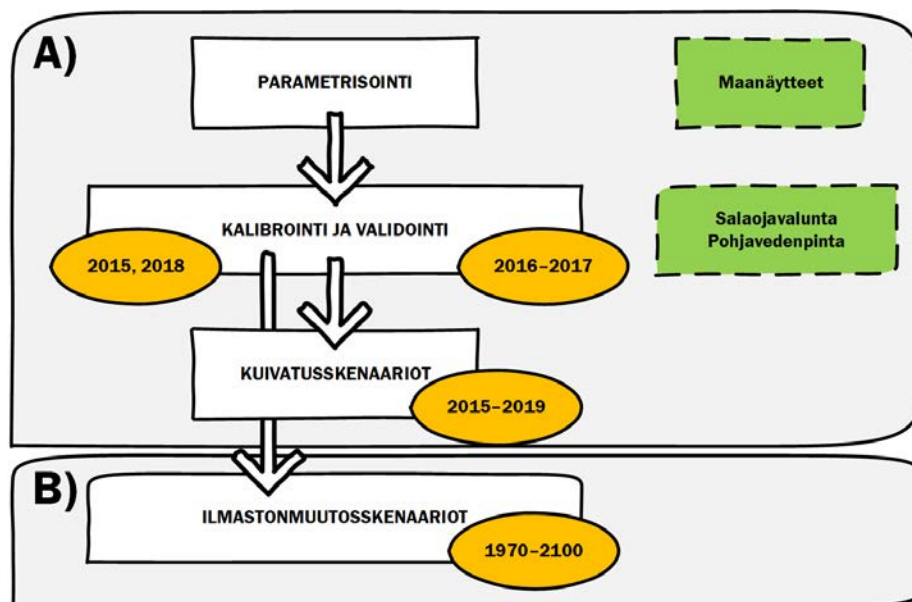
2.4 Matemaattinen mallintaminen

Mallinnuksessa käytettiin FLUSH-mallia, jota on aikaisemmissa hankkeissa kehitetty ja sovellettu salaojitetuilla savipelloilla (Warsta ym. 2013, Nousiainen ym. 2015, Turunen ym. 2017, Salo ym. 2014). FLUSH on hajautettu hydrologinen malli peltoalueen veden, lämmön, eroosion ja aineiden kulkeutumisen laskentaa varten. Mallissa veden liikkeet 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 jäätyymismalli, 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. 2013).

Tässä hankkeessa mallia kehitettiin siten, että sillä voitiin simuloida säätösalaajituksen vaikutusta pellon hydrologiaan. Mallisovellus toteutettiin Sievin koekentälle, josta oli aikaisempaa mittaussaineistoa salaojavalunnasta ja pohjavedenpinnan syvyydestä mallin kalibrointia ja validointia varten. Koekentää simuloitiin kahden ulottuvuuden (2D) pysty-poikkileikkauksena, joka on linjattu salaojiin nähden kohtisuoraan (kuva 2.14). Poikkileikkauksia jaettiin vaakasuunnassa kuuteen alueeseen siten, että alueiden maaperäparametrien arvot perustuivat maanäytteistä tehtyihin mittauksiin.

Mallinnusosahankkeen vaiheet on esitetty kaaviona kuvassa 2.14. Mallinnusosahanke toteutettiin kahdessa osassa, joissa keskityttiin säätösalaajituksen vaikutusten laskennalliseen tarkasteluun Sievissä. Osat olivat:

- A) Säätösalaajituksen vaikutus vesitaseseen sekä mallin kehitys (kuva 2.14)
- B) Tulevaisuuden ilmastoskenaarioiden vaikutus kuivatustilaan ja säätösalaajituksen hyödyt muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa (kuva 2.14)



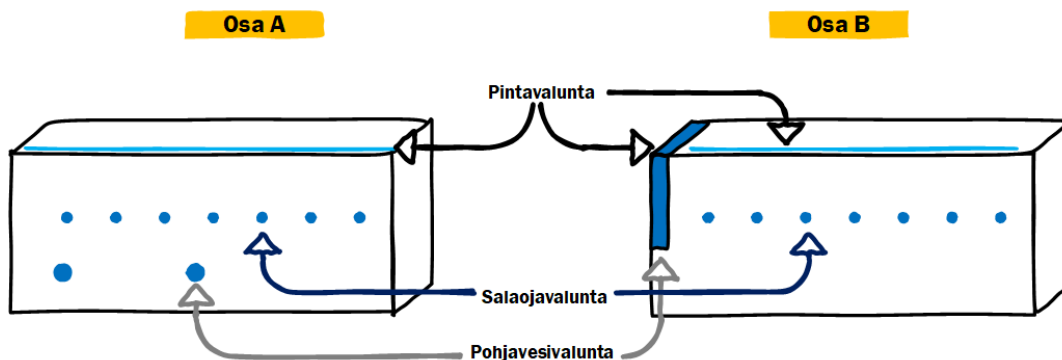
Kuva 2.14. Kaaviokuva mallisovelluksesta. Oranssi väri viittaa simulaatiojaksoihin ja vihreä koekentän mittauksiin, joita mallinnuksessa käytettiin.

Mallinnusosassa A aineistona käytettiin Sievin koekentän mittauksia vuosilta 2015–2019. Osan B simulaatioissa sovellettiin osassa A testattua mallia. Lähtötietoina käytettiin pitkiä ilmastoajaksarjoja (1970–2100), jotka saatiin EURO-CORDEX-tietokannasta (EURO-CORDEX 2020). Tarkasteltaviksi päästöskenaarioiksi valittiin RCP 2.6 ja RCP 8.5, joista ensimmäisessä kasvihuonekaasupäästöt saadaan laskuun, kun taas jälkimmäisessä päästöt jatkavat kasvua. Nämä toimivat ääripäiden tapauksina ja valittiin tämän vuoksi edustamaan vaihteluväliä, miten pellon vesitalous muuttuu tulevaisuudessa. Tarkemmat tiedot EURO-CORDEXin aikasarjat tuottaneesta simulaatiosta ovat taulukossa 2.2.

Taulukko 2.2. Tietoa EURO-CORDEXin aikasarjat tuottaneesta simulaatiosta.

Globaali ilmastomalli (GCM)	
Instituutti	Norwegian Climate Center (NCC)
Malli	NorESM1-M
Ajo	r1i1p1
Alueellinen ilmastoalli (RMC)	
Instituutti	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
Malli	RCA4
Resoluutio	Eur-II (~12.5 km)

Kummassakin mallinnusosassa A ja B käytettiin 2D-laskentaverkkoa, joka oli x-suunnassa 384 metriä pitkä ja z-suunnassa 3,4 metriä syvä. Kolmas ulottuvuus suljettiin pois asettamalla laskentaverkko y-suunnassa 2 m levyiseksi. Salaojat asetettiin metrin syvyyteen maanpinnasta, mutta pintavalunnan ja pohjavesivalunnan reitit ja reunaehdot vaihtelivat osien A ja B simulaatioissa (kuva 2.15): Osassa A pohjavesivaluntaa simuloitiin asettamalla laskentaverkon alaosaan syvällä sijaitsevat salaojaputket (2,5 metrin syvyydessä), jotka toimivat nieluina poistaen laskentaverkosta vettä pohjavesivaluntana. Osassa B pohjavesivaluntaa simuloitiin laskentaverkon vasempaan reunaan asetetun avo-ojan (1,5 metriä syvä) kautta. Pintavaluntaa simuloitiin osassa A pintavaluntakeräimen kautta ja osassa B pintavaluntakeräimen ja avo-ojan kautta (kuva 2.15).



Kuva 2.15. Mallisovelluksissa (osat A ja B) simuloitava 2D peltoalue ja valuntareitit (salaojavalunta, pintavalunta ja pohjavesivalunta).

Mallinnusosassa A mallin tunnitaiset syötemuuttujat (sadanta, ilman lämpötila, suhteellinen kosteus ja tuulen nopeus) jaksolle 2015–2019 saatiin pääosin Ilmatieteen laitoksen Ylivieskan lentokentän havaintoasemalta. Puuttuvat havainnot saatiin läheisiltä havaintoasemilta (Jyväskylä lentokenttä ja Pyhäjärvi Ojakylä) ja tunnitainen globaali säteily Jyväskylän lentokentän havaintoasemalta. Pitkääaltosäteily estimoitiin globaalin säteilyn ja ilman lämpötilan mukaan. Potentiaalinen haihdunta laskettiin Penman-Monteith menetelmällä (esim. Turunen ym. 2013).

Osassa B tunnitaiset syötemuuttujat muodostettiin ilmastoskenaarioiden avulla. Ilmastoskenaarioiden aikasarjoja skaalattiin vuodenaikojen mukaisilla kertoimilla, jotka saatiin vertaamalla ilmastoajaksarjan jaksoa 1970–2005 Ilmatieteen laitoksen havaintoihin läheisiltä havaintoasemilta (Jyväskylä, Sievi, Oulu ja Haaparanta). Potentiaalinen haihdunta ilmastomuutos skenaarioille laskettiin Penman-Monteithin kaavalla.

Mallinnusosassa A käytettiin yhtä säätövaihtoehtoa, kun taas osassa B oli mukana kolme säätöskenaariota (taulukko 2.3). Molemmassa simuloitiin säätöskenaarioiden lisäksi myös tavanomaisen salaojituksen skenaariota. Säätösalaojitus toteutettiin mallissa siten, että säätöpadotuksen aikana salaojaputkeen ei synny salaojavaluntaa pohjavedenpinnan ollessa kyseisen salaojaputken kohdalla patokorkeuden alapuolella. Säädön ollessa päällä patokorkeus oli aina 0,6 m maanpinnasta. Säädön ollessa pois päältä, salaojitus toimi normaalisti.

Säätösalaajitus toteutettiin mallissa siten, että padotuksen vaikutus kohdistui jokaiseen salaojaan yhtä suurena. Laskennassa ei siten oteta huomioon, että säädön vaikutus saattaa pienentyä yksittäisen salaojan tai pellon eri kohdissa topografiasta riippuen.

Kasvukauden aikainen säätö vaihteli lopetusajankohdan osalta. Säädön tarve riippui kylvöstä ja sadonkorjuusta. Osassa A käytettiin todellisia viljely- ja puintiajankohtia. Osassa B kylvön oletettiin olevan joka vuosi 1.6. ja sadonkorjuu ajoittui lämpösumman mukaan elo-syyskuulle (Salla 2020).

Taulukko 2.3. Mallinnusosissa A ja B sovelletut säätöskenaariot.

Mallinnusosa	Skenaario	Säätöajat
A	Minimi säätö	Kasvukauden ja 1.10–15.11.
B	Minimi säätö	1.6. - puinti ja 1.10–15.11.
	Kattava säätö	1.6. - puinti ja 1.10–31.3.
	Jatkuva säätö	1.1. - 31.12.

Mallinnusosassa A tuloksia tarkasteltiin yksittäisten vuosien osalta, kun taas osassa B 130 vuoden simulaatiojakso jaettiin tulosten osalta neljään ajanjaksoon (taulukko 2.4): historiallinen jakso (S0), nykytulevaisuus (S1), lähitulevaisuus (S2), ja kaukainen tulevaisuus (S3). Jokaiselle ajanjaksolle muodostettiin tuloksista keskimääräinen vuosi, mikä mahdollisti eri ajanjaksojen keskinäisen vertaamisen.

Taulukko 2.4. Mallinnusosan B tarkasteltavat ajanjaksot.

Ajanjakso	Vuodet
Historiallinen	1970–2005
Nykytulevaisuus	2006–2037
Lähitulevaisuus	2038–2069
Kaukainen tulevaisuus	2070–2100

3 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

3.1 Nummelan koekenttä

Tähän lukuun on koottu sekä VesiHave-hankkeen että Nummelan koekentän aikaisempien tutkimushankkeiden (Vakkilainen ym. 2010, Äijö ym. 2014, Äijö ym. 2017, Äijö ym. 2018) mittaustuloksia vuodesta 2007 lähtien, jotta vuosien vaihtelusta ja ojitustoimenpiteiden vaikutuksista saadaan mahdollisimman kattava käsitys. VesiHave-hankkeen tulokset kattavat ajanjakson kesäkuu 2018 – toukokuu 2020.

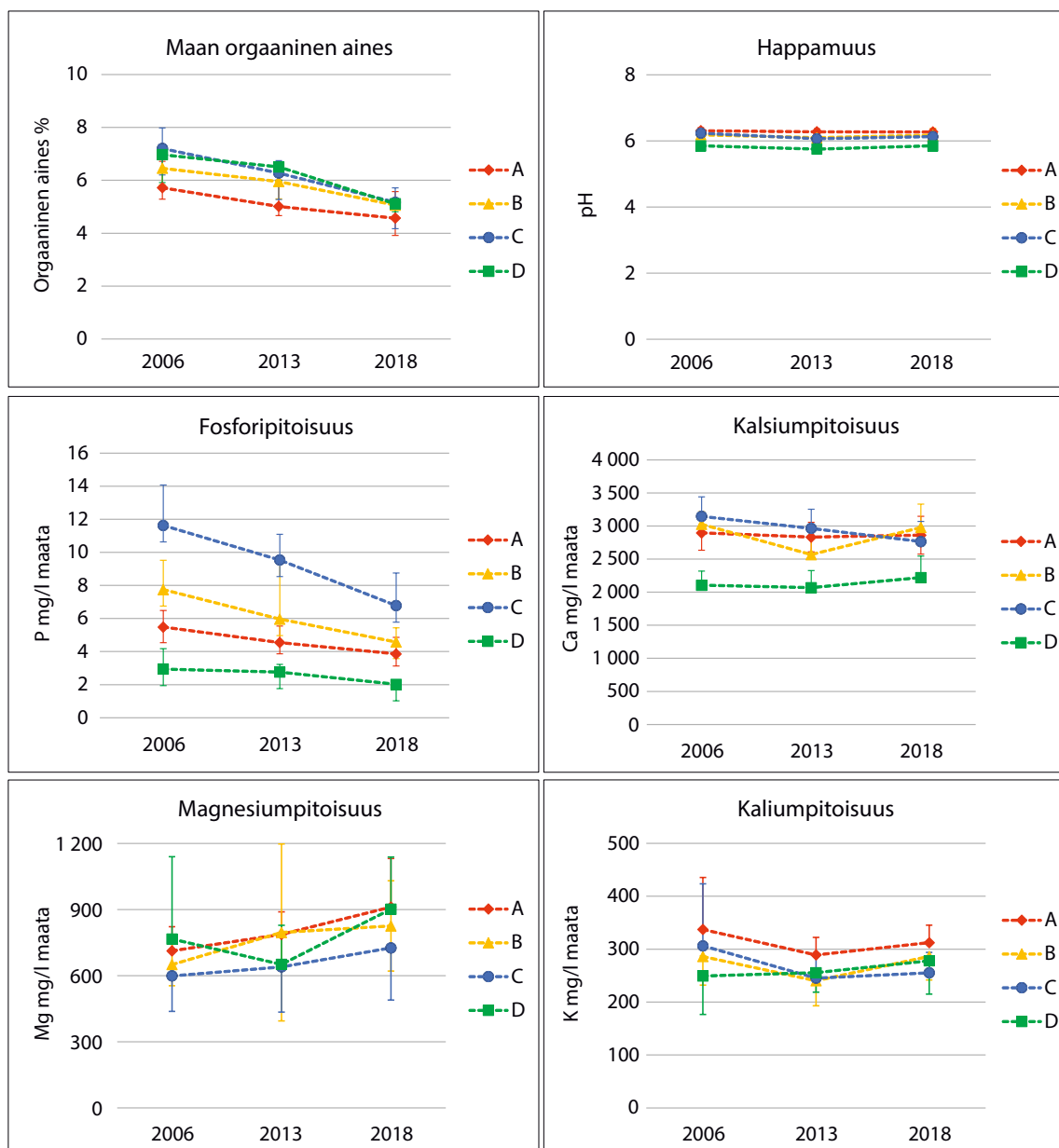
3.1.1 Koko kentän koe

3.1.1.1 Maan ominaisuudet

Nummelan koekentän maa oli aitosavea. Pintamaan savespitoisuus oli 67 % ja pohjamaan noin 80 % (Vakkilainen ym. 2010). Pintamaan orgaanisen aineksen pitoisuudessa havaittiin pieni laskeva trendi vuoden 2006 jälkeen, samoin fosforipitoisuudessa (kuva 3.1). Kumpaankin on voinut vaikuttaa se, että pellolle oli levitetty näytteenottojen välillä karjanlantaa vain vuosina 2007, 2008, ja 2017 (liite 1 ja taulukko 2.1). Näytemäärä oli kuitenkin pieni (kokoomanäyte viidestä kohdasta per ruutu), joten havainto ei ole kovin luotettava.

Alueen D fosforipitoisuus oli pienempi kuin muiden alueiden, mikä saattaa johtua märkyydestä; 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.

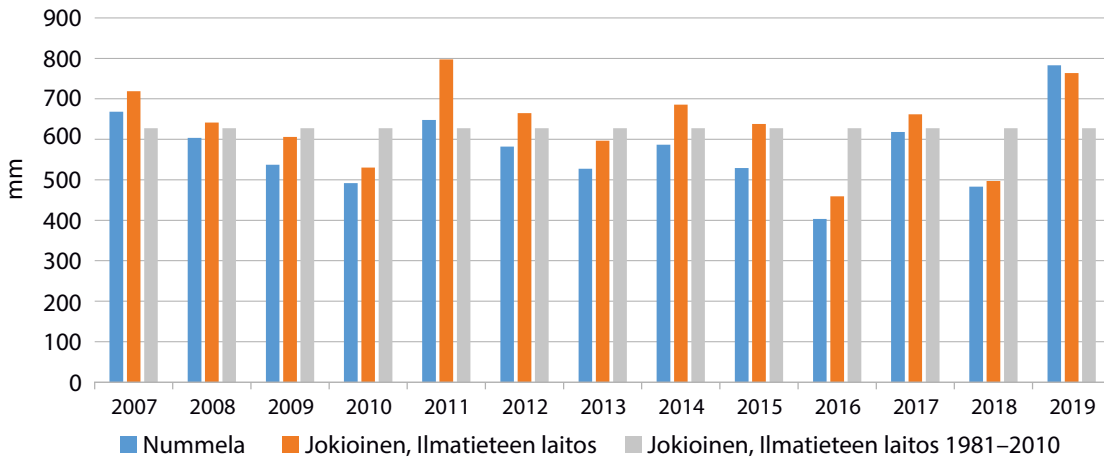
Savimaa läpäisi huonosti vettä pintakerrosta lukuun ottamatta. Maan fysikaalisia ominaisuuksia on kuvattu tarkemmin aiemman tutkimushankkeen loppuraportissa (Äijö ym. 2014).



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

3.1.1.2 Sadanta

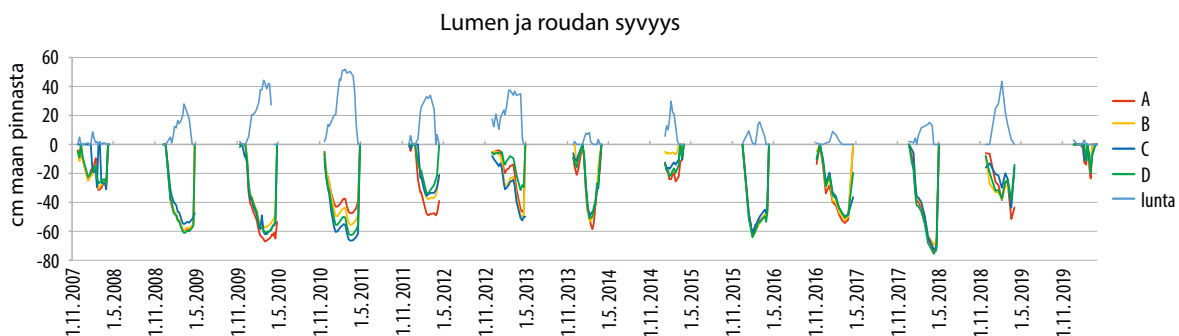
Nummelan koekentän vuoden pituisten tutkimusjaksojen sademäärät (korjaamattomat arvot) vaihtelivat välillä 403–783 mm (kuva 3.2). Koekenttää lähinnä sijaitsevalla Ilmatieteenlaitoksen Jokioisten mittausasemalla sadannan 30 vuoden (1981–2010) keskiarvo (korjaamaton) on 627 mm. VesiHave-hankkeen aikaisten tutkimusjaksojen (06/2018–05/2019 ja 06/2019–05/2020) vuosisadannat poikkesivat toisistaan selvästi. Ensimmäinen jakso oli keskimääräistä (ka. 575 mm) kuivempi ($P=483$ mm) ja toinen Nummelan koekentän kolmetoistavuotuisen mittaushistorian sateisin, $P=783$ mm.



Kuva 3.2. Nummelan koekentän sekä Ilmatieteen laitoksen Jokioisten mittausaseman vuotuiset (korjaamattomat) sadannat tutkimusjaksoilla (6/2007–5/2007 ... 6/2019–5/2020) sekä ajanjakson 1981–2010 keskimääräinen sadanta (Ilmatieteen laitos, Jokioinen).

3.1.1.3 Roudan ja lumen syvyys

Jokaisella alueella olleiden kahden routaputken tulosten perusteella alueiden välillä ei ollut systemaattista eroa roudan syvyydessä (kuva 3.3). Roudan syvyydet riippuivat syksyn ja talven olosuhteista ja vaihtelivat vuosittain. Routa oli yleensä syvimmillään maaliskuussa juuri vähän ennen kuin se alkoi sulaa. Sulaminen tapahtui sekä pinnasta että syvältä käsin.

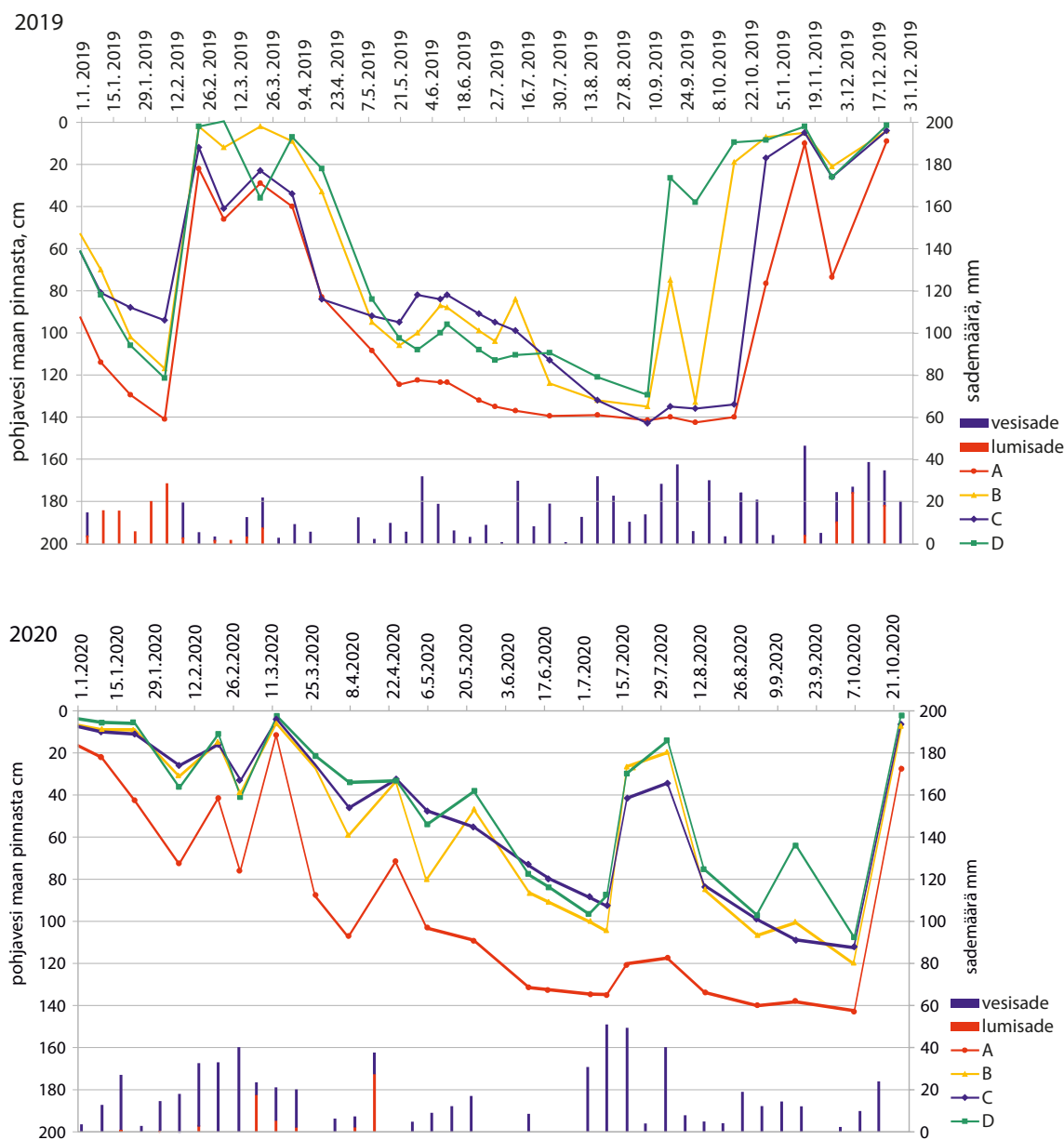


Kuva 3.3. Lumen ja roudan syvyydet alueilla A–D kentän perustamisesta lähtien.

3.1.1.4 Pohjavedenpinnan syvyys ja maan kosteus

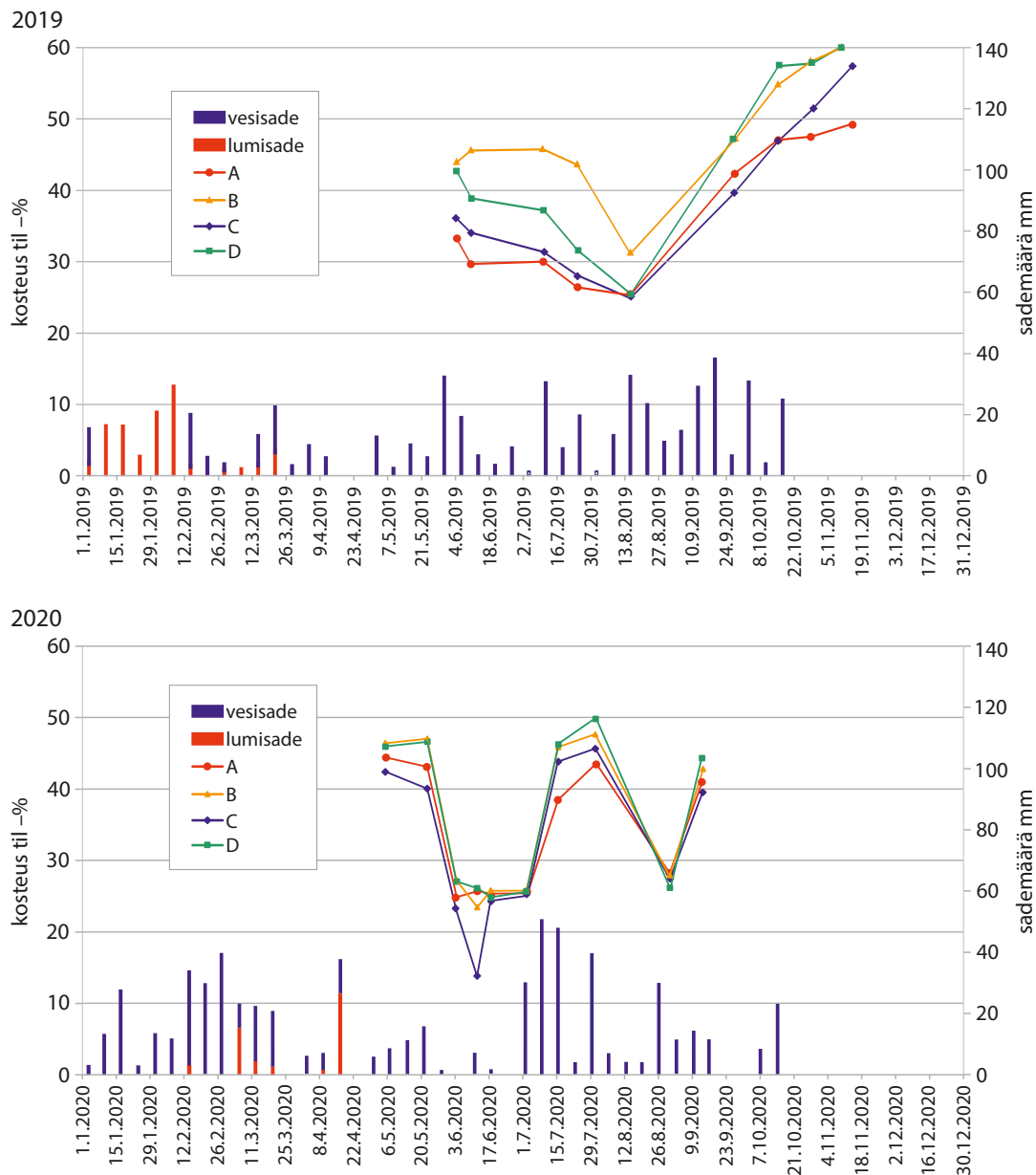
Pohjavedenpinnan syvyysmittaukset vuodesta 2007 alkaen ovat osoittaneet, että alueella D, jolla alun perin oli 32 metrin ojaväli, pohjavesi on märkinä aikoina lähes poikkeuksetta ollut lähempänä maan pintaa kuin muilla alueilla (Vakkilainen ym. (2010) ja Äijö ym. (2014)). Vuonna 2014 tehdyn täydennysojituksen jälkeen alueen D pohjaveden syvyydet eivät ole enää yhtä selvästi eronneet muista alueista vaan ovat vuosien mittaan alkaneet olla samalla syvyydellä kuin alueella B, jossa ojaväli on 16 metriä. Silti rankat sateet nostavat pohjavettä alueella D edelleen muita alueita herkemmin. Täydennysojitus on siis jonkin verran parantanut alueen D kuivatustilaa (kuva 3.4), mutta vuonna 2013 otetuissa maan rakennäytteissä todetut, pitkäaikaisen märkyyden aiheuttamat rakenne-erot alueen D ja muiden alueiden välillä (Äijö ym. 2014) todennäköisesti edelleen vaikuttavat alueen D hydrologiaan.

Alueella A pohjavesi painuu kuivina kausina salaojasyvyyden alapuolelle muita alueita herkemmin. Tämä johtuu alueen sijainnista valtaojaan päin kaltevan rinteen törmällä.



Kuva 3.4. Pohjaveden pinnan etäisyys maan pinnasta ojien puolivälissä vuosina 2019 ja 2020 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m, keväästä 2014), (n=5–12).

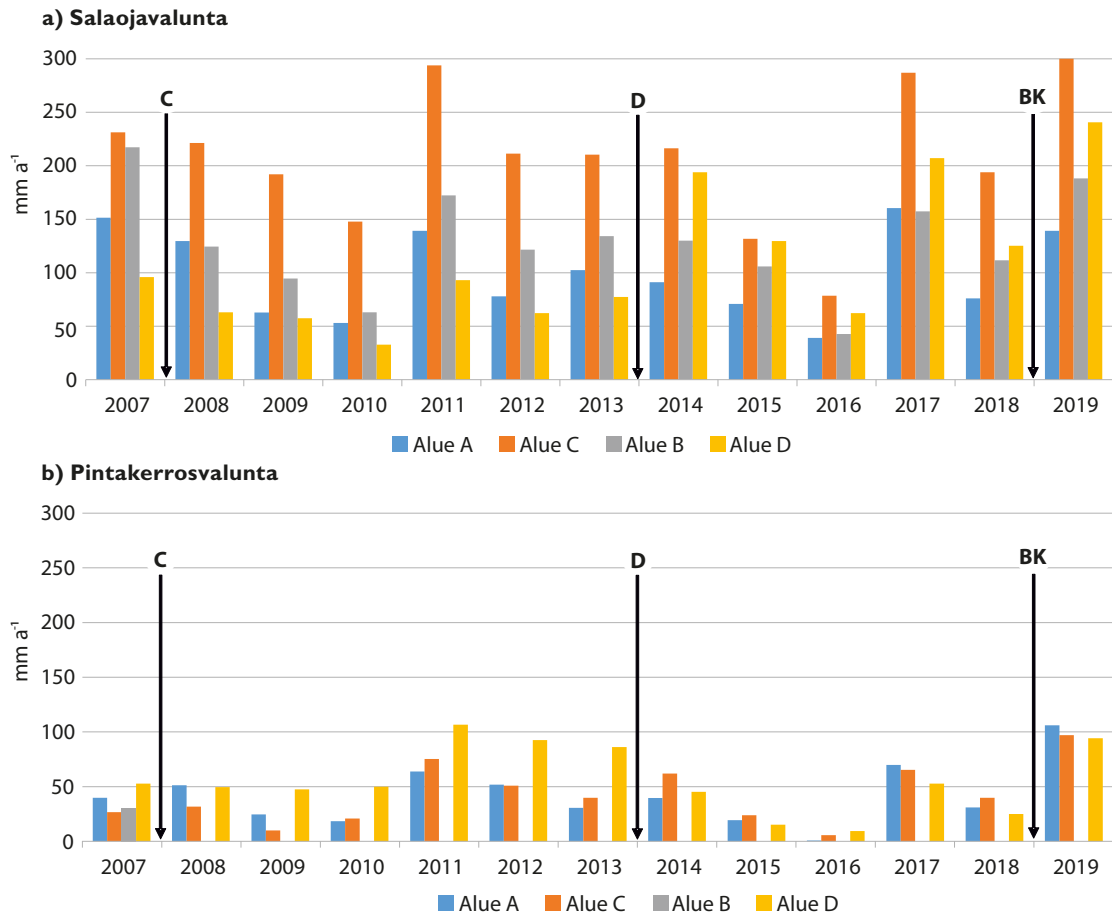
Maan kosteusmittaukset osoittavat saman kuin pohjavesimittauksetkin, että alueen D kosteus ei enää eroa yhtä selvästi muista alueista kuin ennen täydennysojitusta. Alueiden B ja D kosteustila on ollut usein likimain samanlainen (kuva 3.5).



Kuva 3.5. Maan kosteus (tilavuusprosentteina maan kokonaistilavuudesta) ojien puolivälissä 0–30 cm:n kerroksessa v. 2015 alueilla A (ojaväli 6 m), B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m), C (ojaväli 8 m) ja D (ojaväli 10,7 m kevästä 2014), (n=10–24).

3.1.1.5 Valunta

Nummelan koekentän salaoja- ja pintakerrosvalunnat tutkimusjaksoilla (6/2007–5/2008 ... 6/2019–5/2020) 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 pintakerrosvalunnassa mittaamisessa, varsinkin alueella B. Tämän vuoksi alueen B pintakerrosvalunnasta esitetään vain ensimmäisen jakson mittaustulos.



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

Kuva 3.6. Vuotuinen salaojavalunta (a) ja pintakerrosvalunta (b) Nummelan koealueilta vuosijaksoilla kesäkuusta 2007 toukokuuhun 2020. Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella. Alueelle A levitettiin kalkkia (rakennekalkitus) lokakuussa 2018. Kuvien alla on koekentän vuoden pituisten jaksosten sadannat.

Nummelan lievästi viettävällä koekentällä salaojavalunta muodosti keskimäärin 85 % mitatusta kokonaisvalunnasta (salaojavalunnan ja pintakerrosvalunnan summa) 8 ja 16 m ojavälin alueilla. Ennen täydennysojitusta (05/2014) 32 metrin ojavälin alueella D salaojavalunnan osuus oli keskimäärin puolet mitatusta kokonaisvalunnasta, ja täydennysojituksen jälkeisillä kuudella vuosijaksolla noin 80 %.

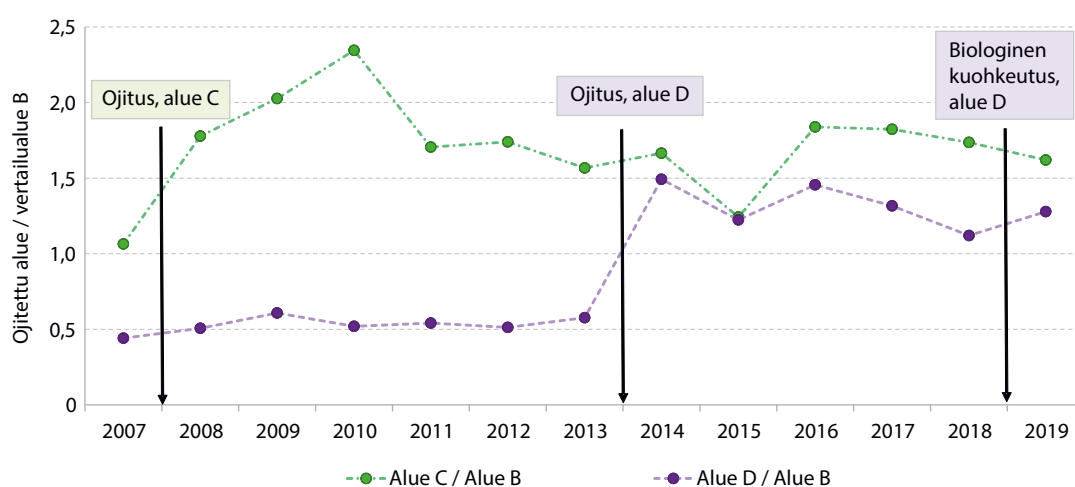
Valtaosa valunnasta syntyi pohjoisille ilmasto-oloille tyypillisesti kasvukauden ulkopuolella. Valuntojen vuosien väliseen vaihteluun vaikuttivat lähinnä sademäärä sekä sateiden ajallinen jakautuminen ja rankkuus. Myös erilaiset talviolosuhteet näkyivät valunnan muodostumisessa.

Täydennysojituksen vaikutus valuntaan

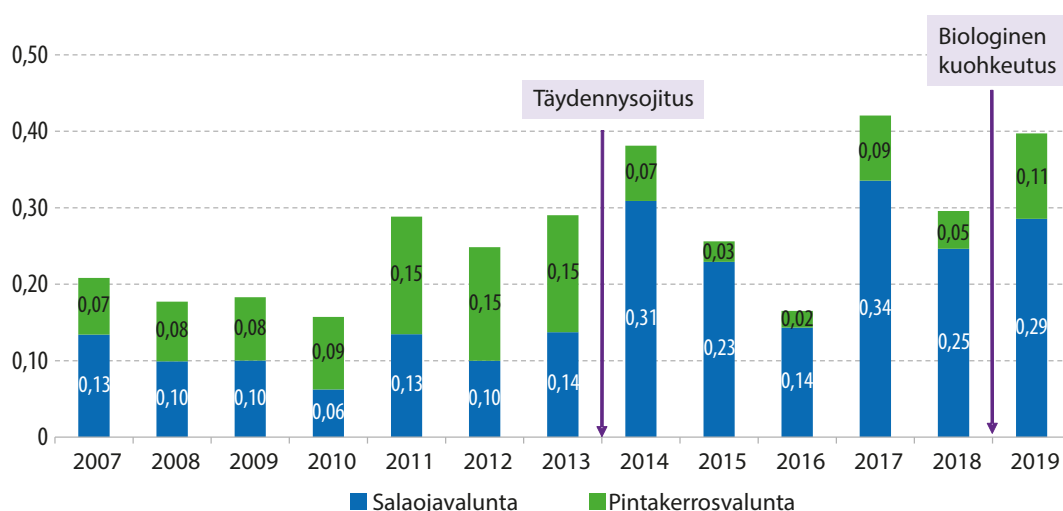
Täydennysojitus lisäsi salaojavaluntaa koealueilla C ja D. Ojavälin puolittaminen (16 m → 8 m) alueella C lisäsi vuotuista salaojavaluntaa keskimäärin 1,8-kertaiseksi 16 metrin

ojavälin alueeseen (B) verrattuna. Täydennysojituksen (ojaväli 32 m → 10,7 m) jälkeisillä tutkimusjaksoilla alueen D salaojavalunta oli vertailualueeseen B nähden 1,1–1,5-kertainen. Ennen täydennysojitusta salaojavaluntojen suhde (D/B) vaihteli välillä 0,4–0,6. Valuntojen suhdeluvut tutkimusjaksoilla on esitetty kuvassa 3.7.

Täydennysojituksen jälkeen salaojavalunnan osuus sadannasta lisääntyi alueella D ojittusta edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna 2,4-kertaiseksi (kuva 3.8). Salaoja- ja pintakerrosvalunnan summan osuus sadannasta kasvoi keskimäärin 1,4-kertaiseksi. Kuudella täydennysojituksen jälkeisellä jaksolla salaojavalunnan osuus sadannasta oli alueella D keskimäärin 0,26, ja vaihteluväli 0,14–0,34. Pienin osuus mitattiin vähäsateilla (P=434 mm) ja suurimmat (0,29–0,34) verrattain sateisilla (P= 618–816 mm) jaksoilla. Samalla aikavälillä (6/2014 ... 5/2020) salaojavalunnan osuus sadannasta oli alueella C keskimäärin 0,33 ja vertailualueella B 0,20.



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 salaojavaluntojen suhde vertailualueen B (ojaväli 1950-luvulta lähtien 16 m) salaojavaluntoihin mittausjaksoilla (06/2007–05/2020).



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 koealueiden välillä, pääosin valuntamäärien 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

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

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

Vertailualueen B ja täydennysojitetun alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistypen pitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.1. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaistyyppipitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l⁻¹) Nummelan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2020. 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.

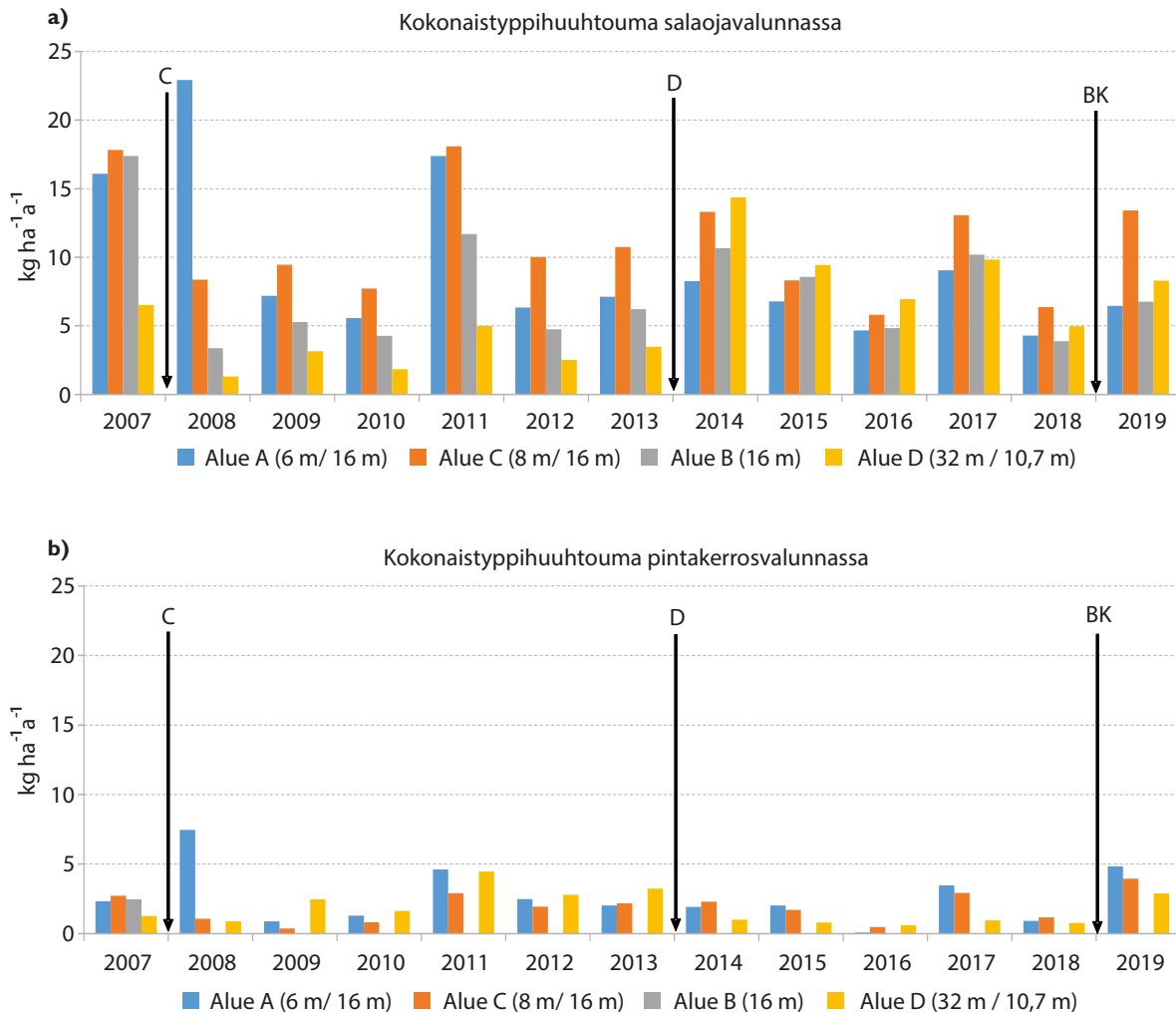
	Kokonaistyyppipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	1,7 / 7,3 / 52,5	1,4 / 4,4 / 30,1	1,3 / 4,3 / 44,9	0,9 / 4,1 / 38,4
Painotettu pitoisuus	9,4	5,2	5,9	5,4
Pintakerrosvalunta min/Md/max	1,0 / 5,2 / 65,2	0,8 / 3,9 / 55,5	0,8 / 3,9 / 53,8	0,7 / 3,0 / 61,5
Painotettu pitoisuus	6,3	4,5	3,3	3,3

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 6/2014–5/2020. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

	Kokonaistyyppipitoisuus (mg l ⁻¹)			
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2020	
	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 / 4,3 / 44,9	0,9 / 4,1 / 38,4
Painotettu pitoisuus	5,7	4,9	5,9	5,4
Pintakerrosvalunta min/Md/max	1,2 / 4,3 / 25,5	0,9 / 3,2 / 61,5	0,8 / 3,9 / 53,8	0,7 / 3,0 / 61,5
Painotettu pitoisuus	2,9	3,4	3,3	3,3

Typpihuuhtoumat

Mitatusta kokonaistypikuormasta salaojista tuli 8, 10,7 ja 16 m ojavälin alueilla 80–90 % ja 32 m ojavälillä osuus oli keskimäärin 60 %. Vuotuiset typpihuuhtoumat salaojavalunnassa vaihtelivat välillä 1,3–23 kg ha⁻¹ (kuva 3.9a) ja pintakerrosvalunnassa 0,1–7,5 kg ha⁻¹ (kuva 3.9b). Valtaosa huuhtoutuneesta typestä oli nitraattitypeä.

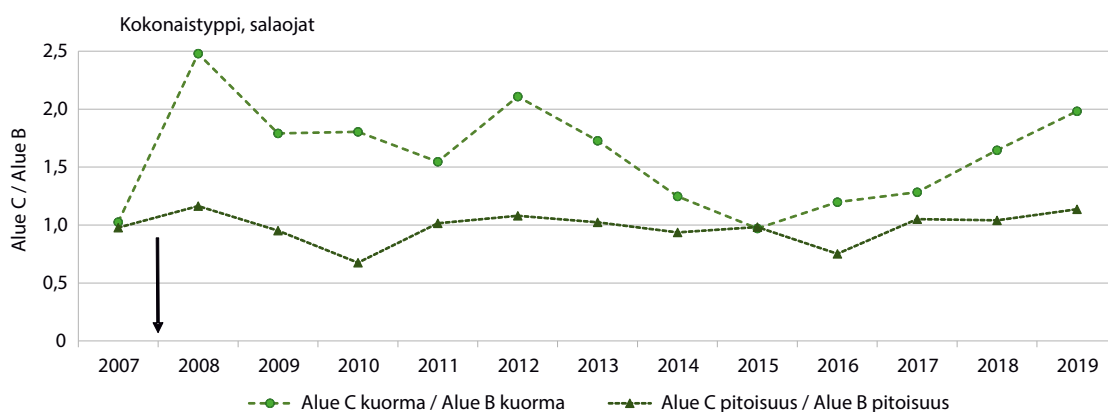


Kuva 3.9. Kokonaistypen vuotuiset huuhtoumat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

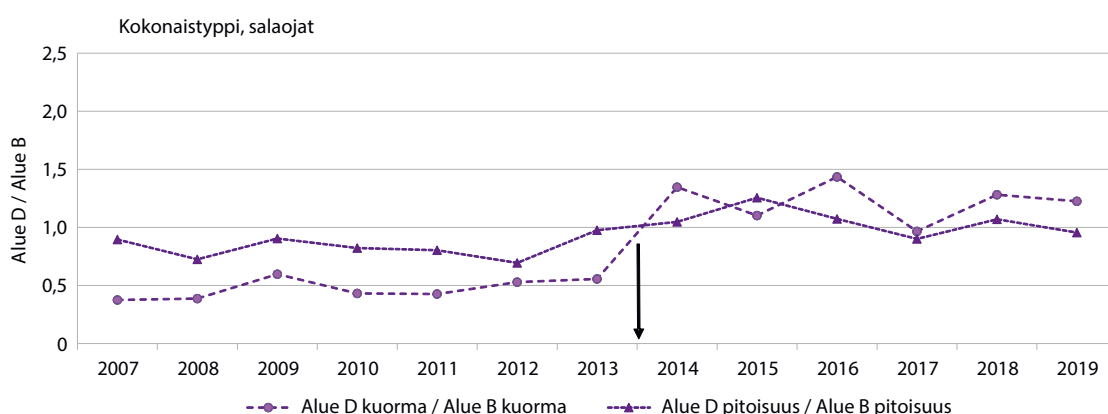
Täydennysojituksen vaikutus typen huuhtoutumiseen

Täydennysojituksen vaikutuksia salaojavalumavesien mukana kulkeutuneisiin huuhtoumiin arvioitiin vertaamalla alueiden C ja D ainepitoisuuksia ja -kuormia alueen B (ojaväli 16 m) arvoihin. Alueen C salaojavalunnan typpipitoisuuden suhdeluku (C/B) nousi hieman täydennysojituksen jälkeisenä vuonna, jonka jälkeen se kääntyi laskuun ja palasi likimain ojitusta edeltäneelle tasolle (kuva 3.10). Kokonaistyyppihuuhtoumien suhdeluku (C/B) nousi heti täydennysojituksen jälkeen selvästi, kääntyi sen jälkeen laskuun, mutta on yhtä tutkimusjaksoa (6/2015–5/2016) lukuun ottamatta ollut ojitusta edeltänyttä vuotta suurempi.

Alueen D salaojavalunnan typpipitoisuudet olivat täydennysojituksen jälkeisillä jaksoilla (suhteessa vertailualueeseen B) ojitusta edeltäneiden jaksosten keskiarvoon nähden 1,3-kertaisia (kuva 3.11). Pitoisuuden nousu ja lisääntynyt salaojavalunta näkyivät typpi-kuormituksen kasvuna. Huuhtoumien suhde (D/B) oli ojituksen jälkeen sitä edeltäneisiin vuosiin verrattuna keskimäärin 2,6-kertainen.



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



Kuva 3.11. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntojen kokonaistyyppipitoisuuksien mediaanien sekä kokonaistyyppikuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

Kokonaisfosfori

Kokonaisfosforipitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforipitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (yhdeksän mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.3. Mittausten (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 0,13–1,67 mg l⁻¹ ja pintakerrosvalunnan 0,27–1,94 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 6/2007–5/2020.

Kokonaisfosforipitoisuus (mg l ⁻¹)				
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	0,04 / 0,46 / 4,08	0,03 / 0,58 / 4,69	0,05 / 0,72 / 5,27	0,03 / 0,57 / 4,32
Painotettu pitoisuus	0,75	0,96	1,21	0,88
Pintakerrosvalunta min/Md/max	0,06 / 0,67 / 4,94	0,13 / 0,86 / 4,79	0,05 / 0,80 / 5,29	0,06 / 0,57 / 4,54
Painotettu pitoisuus	0,88	1,31	0,71	0,68

Kokonaisfosforipitoisuuksissa oli alueiden välisiä eroja. Alueella C salaojavalunnan painotetut pitoisuudet olivat pintakerrosvaluntaa pienempiä, mutta alueilla B ja D suurempia. Kokonaisfosforin pitoisuudet noudattivat pitkälti kiintoaineen pitoisuuksia.

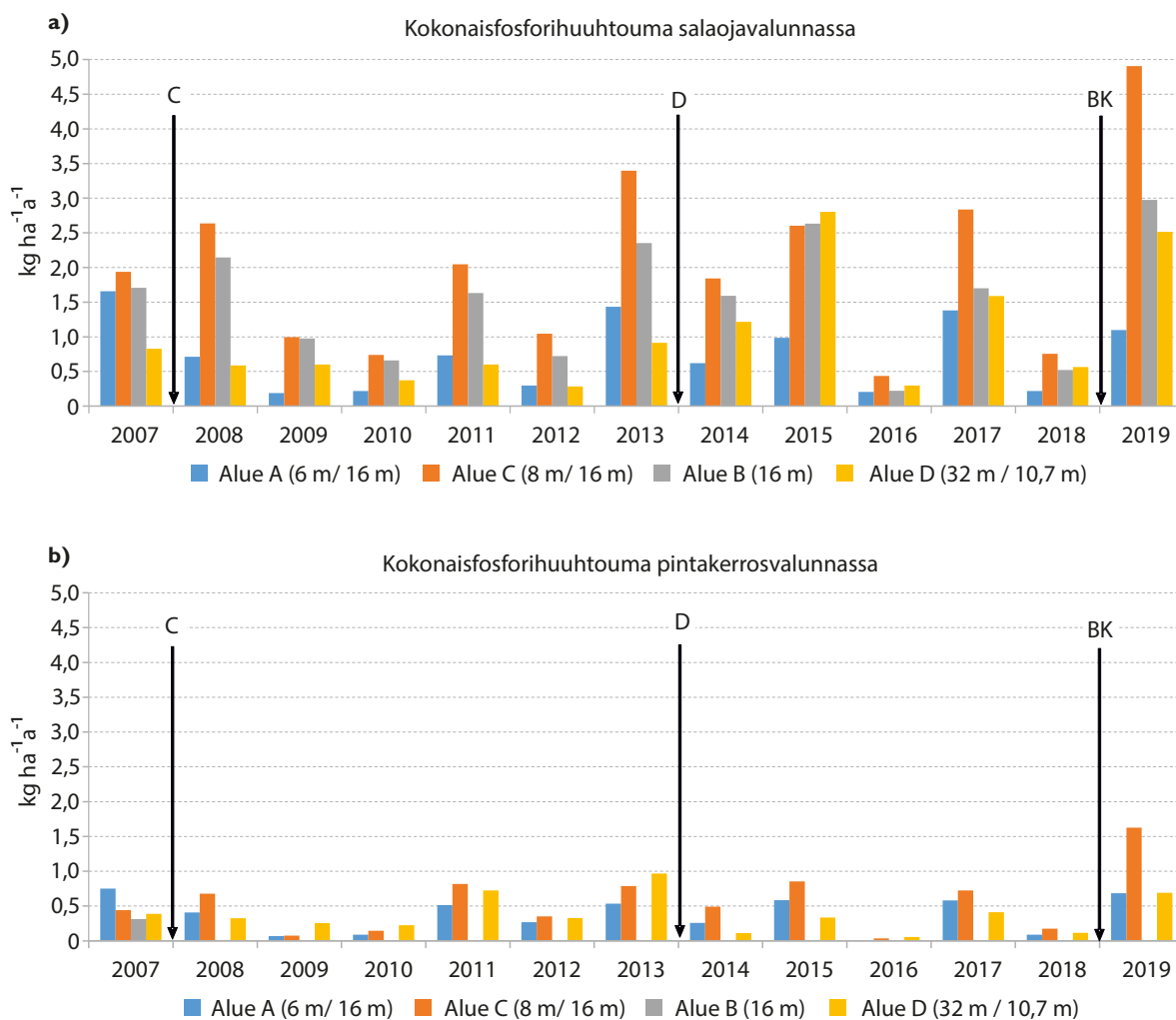
Vertailualueen B ja täydennysojitetun alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kokonaisfosforin pitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.4.

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 6/2014–5/2020. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

Kokonaisfosforipitoisuus (mg l ⁻¹)				
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2020	
	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 / 0,81 / 5,27	0,04 / 0,61 / 4,32
Painotettu pitoisuus	1,14	0,87	1,30	0,88
Pintakerrosvalunta min/Md/max	0,05 / 0,76 / 3,36	0,06 / 0,46 / 1,98	0,18 / 0,84 / 5,29	0,07 / 0,67 / 4,54
Painotettu pitoisuus	0,48	0,66	1,09	0,71

Kokonaisfosforihuuhtoumat

Vuotuiset kokonaisfosforin huuhtoumat Nummelan koealueiden salaojista vaihtelivat välillä 0,2–4,9 kg ha⁻¹ (kuva 3.12a). Pintakerrosvalunnan mukana kokonaisfosforia 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:n ojaväleillä salaojista keskimäärin 80–90 %. Kokonaistyyntypen tapaan 32 m ojavälillä salaojien osuus oli noin 60 %.

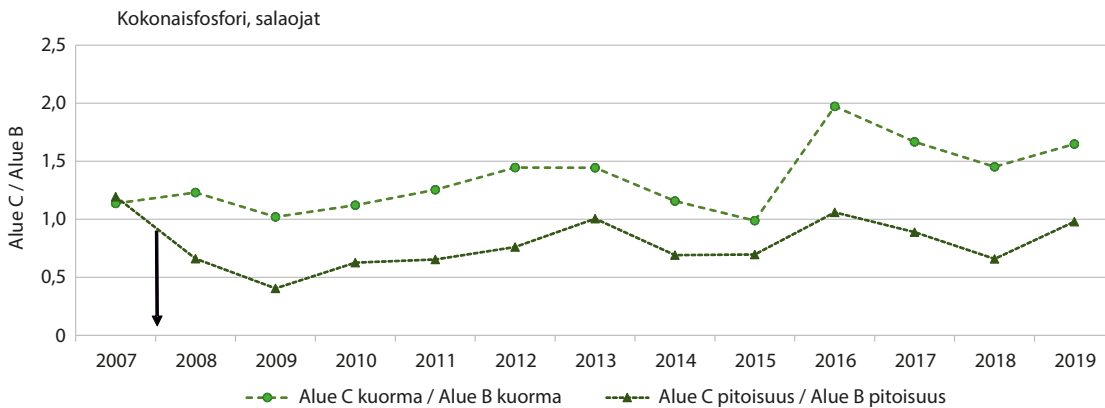


Kuva 3.12. Kokonaisfosforin vuotuiset huuhtoumat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

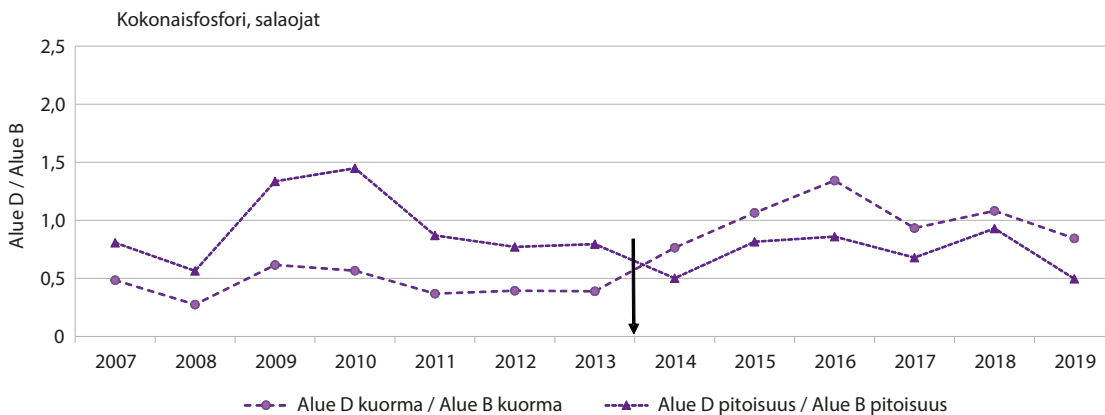
Täydennysojituksen vaikutus kokonaisfosforin huuhtoutumiseen

Salaojavalunnan kokonaisfosforipitoisuuden suhdeluku (C/B) oli kaikilla täydennysojituksen jälkeisillä jaksoilla pienempi kuin ennen ojitusta (kuva 3.13). Salaojavalunnan suhteellinen (C/B) kokonaisfosforikuormitus oli ojitusta seuranneilla kahdeksalla jaksolla keskimäärin ojitusta edeltäneeseen nähden 1,1-kertainen ja viimeisillä neljällä jaksolla 1,5-kertainen.

Täydennysojituksen jälkeen suhteelliset (D/B) kokonaisfosforipitoisuudet ovat olleet keskimäärin alempia kuin ennen ojitusta (kuva 3.14), tällöin suhdeluku (D/B) oli 0,94 ja sen jälkeen 0,71. Lisääntynyt salaojavalunta kuitenkin kasvatti kokonaisfosforihuuhtoumia suhteessa vertailualueeseen B. Täydennysojituksen jälkeen huuhtoumien suhdeluku (D/B) oli edeltäneeseen tilanteeseen nähden keskimäärin 2,3-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 on merkitty nuolella.

Liukoinen fosfori

Liukoisen fosforin pitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen epäorgaanisen fosfaattifosforin (liukoisen fosforin) pitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (13 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 $\mu\text{g l}^{-1}$.

Taulukko 3.5. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen epäorgaanisen fosforin pitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$) Nummellan koekentällä ajanjaksolla 6/2007–5/2020.

Liukoisen fosforin pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$)				
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	10 / 50 / 1040	7 / 81 / 881	3 / 80 / 547	0 / 41 / 1348
Painotettu pitoisuus	56	109	104	56
Pintakerrosvalunta min/Md/max	9 / 67 / 622	9 / 100 / 1364	5 / 100 / 456	3 / 43 / 280
Painotettu pitoisuus	77	140	125	54

Salaojavalunnan liukoisen fosforin 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 määrityksen 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.

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.

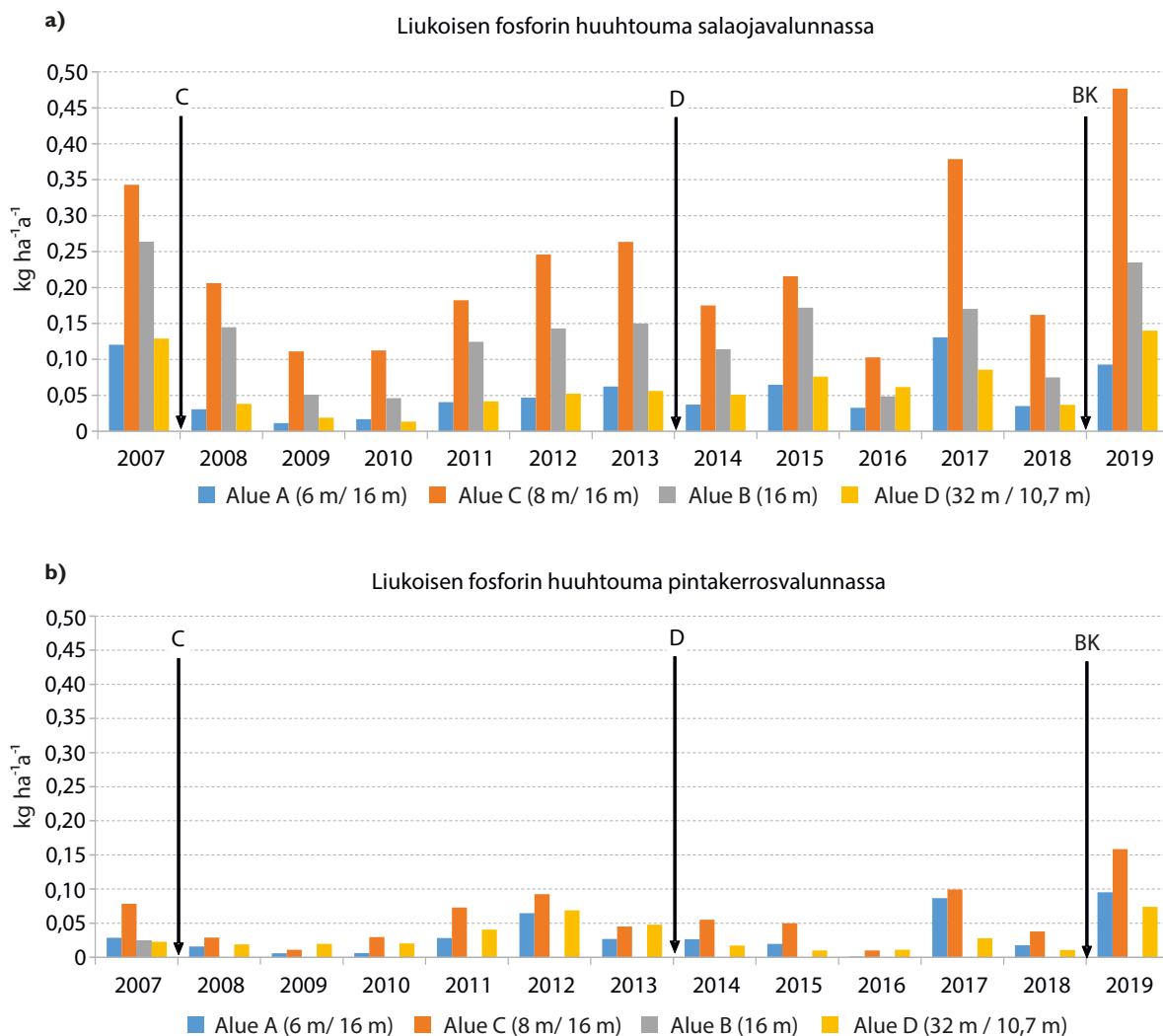
Taulukko 3.6. Salaoja- ja pintakerrosvalunnan liukoisen fosforin pitoisuuksien minimi-, mediaani (Md)- ja maksimi-arvot sekä valunnalla painotettu pitoisuus (mg l^{-1}) Nummellan koekentällä ajanjaksoilla 6/2007–5/2014 ja 6/2014–5/2020. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

Liukoisen fosforin pitoisuus ($\mu\text{g l}^{-1}$)				
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2020	
	Alue B	Alue D	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	3 / 74 / 298	10 / 49 / 1348	6 / 88 / 547	0 / 40 / 235
Painotettu pitoisuus	100	72	110	47
Pintakerrosvalunta min/Md/max	7 / 87 / 456	3 / 40 / 168	32 / 100 / 310	9 / 50 / 280
Painotettu pitoisuus	121	49	131	62

Liukoisen fosforin huuhtoumat

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

Nummellan koalueilla liukoisen fosforin huuhtoumat salaojavalunnassa vaihtelivat välillä 0,01–0,48 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.15a). Pintakerrosvalunnan mukana huuhtoutui 0,001–0,16 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.15b). Kuormituksesta 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä tuli salaojien kautta keskimäärin noin 75 % ja 32 m ojavälillä noin 55 %.

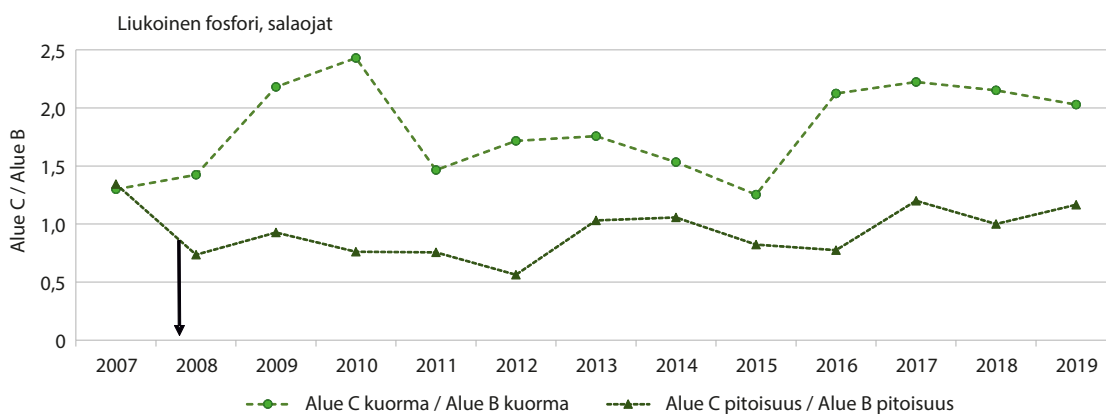


Kuva 3.15. Liukoisen fosforin vuotuiset huuhtoumat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

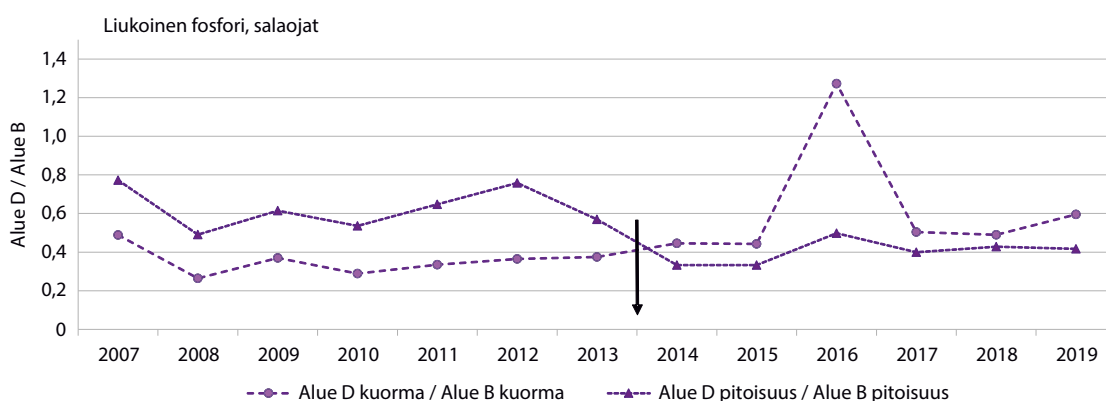
Täydennysojituksen vaikutus liukoisen fosforin huuhtoutumiseen

Kokonaisfosforipitoisuuksien tapaan myös alueen C salaojavalunnan suhteelliset (C/B) liukoisen fosforin pitoisuudet olivat täydennysojituksen jälkeisinä vuosina kalibrointijaksoa alempia (kuva 3.16). Alueen C salaojien liukoisen fosforin kuormat (C/B) sen sijaan ovat olleet täydennysojituksen jälkeen kalibrointijaksoa suurempia, keskimäärin 1,4-kertaisia.

Alueella D salaojavalunnan liukoisen fosforin pitoisuudet suhteessa alueeseen B olivat täydennysojituksen jälkeen aikaisempaa alempia, suhdeluku (D/B) oli 0,6 (kuva 3.17). Liukoisen fosforin huuhtoumat nousivat alueella D ojituksen jälkeen suhteessa alueeseen B. Tutkimusjaksojen suhdelukujen (D/B) keskiarvo oli ennen ojitus ja 0,36 ja sen jälkeen 0,63, erityisen kuormittava oli jakso 6/2016–5/2017, tällöin suhde (D/B) oli 1,27. Jakso oli ainoa, jolla alueen D salaojavalunnan liukoisen fosforin huuhtouma oli suurempi kuin alueella B. Suurempi huuhtouma johtui pääosin alueen D suuremmasta valunnasta. Joului-maaliskuussa alueen D salaojavalunnat olivat alueeseen B verrattuna moninkertaiset.



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



Kuva 3.17. Alueiden D ja B vuotuisen liukoisen fosforin pitoisuuksien mediaanien sekä liukoisen fosforin kuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

Kiintoaine

Kiintoainepitoisuus

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuden mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet (13 mittausvuotta) on esitetty taulukossa 3.7. Kalibrointijakson ja kahdeksan tutkimusjakson (kaikki alueet) aikana salaojavalunnan kiintoainepitoisuuksien vuosimediaanit vaihtelivat välillä 260–1080 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 6/2007–5/2020.

Kiintoainepitoisuus (mg l ⁻¹)				
	Alue A	Alue C	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	20 / 449 / 3310	24 / 400 / 2710	80 / 515 / 4640	60 / 531 / 4430
Painotettu pitoisuus	670	631	834	845
Pintakerrosvalunta min/Md/max	20 / 618 / 4490	0 / 668 / 3240	20 / 573 / 4140	10 / 528 / 4730
Painotettu pitoisuus	790	847	449	612

Salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuudet olivat keskimäärin melko lähellä toisiaan ja alueilla A, C ja D salaojavalunnan painotettu kiintoainepitoisuus oli pintakerrosvaluntaa alempi. Erilaisten ja eri-ikäisten ojitusten kiintoainepitoisuuksissa ei näyttänyt olevan eroja, vaan korkeita pitoisuuksia mitattiin sekä yli 60 vuotta vanhan ojaston että 6–12 vuotta vanhojen täydennysojitettujen ojastojen salaojavesissä.

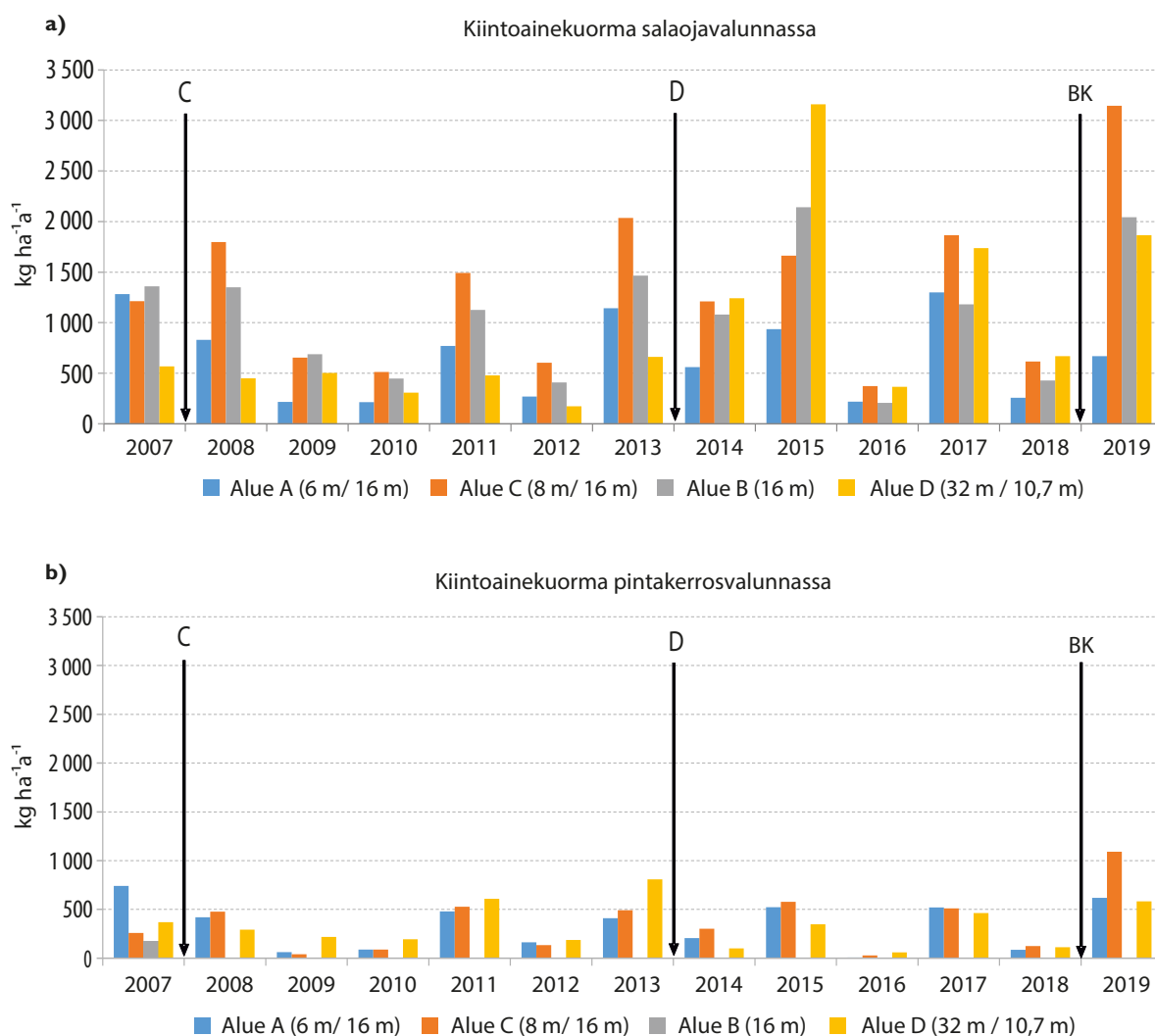
Vertailualueen B ja täydennysojitetun alueen D salaoja- ja pintakerrosvalunnan kiintoainepitoisuuksien mediaanit ja vaihteluvälit sekä valunnalla painotetut pitoisuudet ennen täydennysojitusta ja sen jälkeen on esitetty taulukossa 3.8.

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 6/2014–5/2020. Ojavälit, alue B 16 m ja alue D 32 m / 10,7 m.

Kiintoainepitoisuus (mg l ⁻¹)				
	6/2007–5/2014		6/2014–5/2020	
	Alue B	Alue D	Alue B	Alue D
Salaojavalunta min/Md/max	80 / 440 / 3000	80 / 420 / 1780	118 / 609 / 4640	60 / 614 / 4430
Painotettu pitoisuus	738	651	954	942
Pintakerrosvalunta min/Md/max	20 / 520 / 2380	40 / 420 / 1700	50 / 604 / 4140	10 / 580 / 4730
Painotettu pitoisuus	247	551	767	736

Kiintoainekuormat

Salaojavesien mukana kulkeutuneen maa-aineksen määrä vaihteli paljon eri vuosien välillä. Maa-ainesta kulkeutui salaojavalunnassa vuosittain 170–3160 kg ha⁻¹ a⁻¹ ja pintakerrosvalunnassa 6–1090 kg ha⁻¹ a⁻¹ (kuva 3.18). Salaojien osuus mitatusta kokonaiskuormituksesta 8, 10,7 ja 16 m ojaväleillä oli 80–95 %. Ojavälin ollessa 32 m salaoja- ja pintakerrosvalunnan osuudet olivat likimain yhtä suuret.

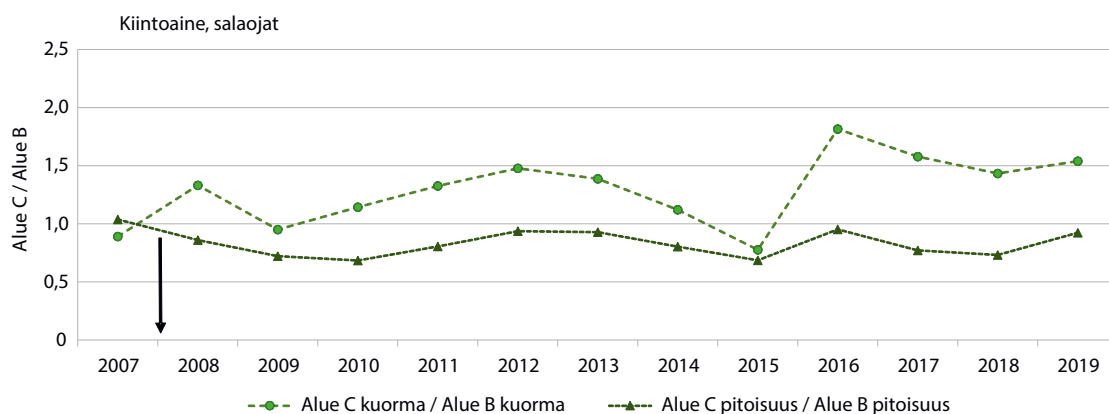


Kuva 3.18. Vuotuiset kiintoainekuormat (kg ha⁻¹) salaojavalunnassa (a) ja pintakerrosvalunnassa (b). Alueiden C ja D täydennysojitusten ajankohdat sekä biologisen kuohkeutuksen (BK) alkamisen ajankohta alueella D on merkitty nuolella.

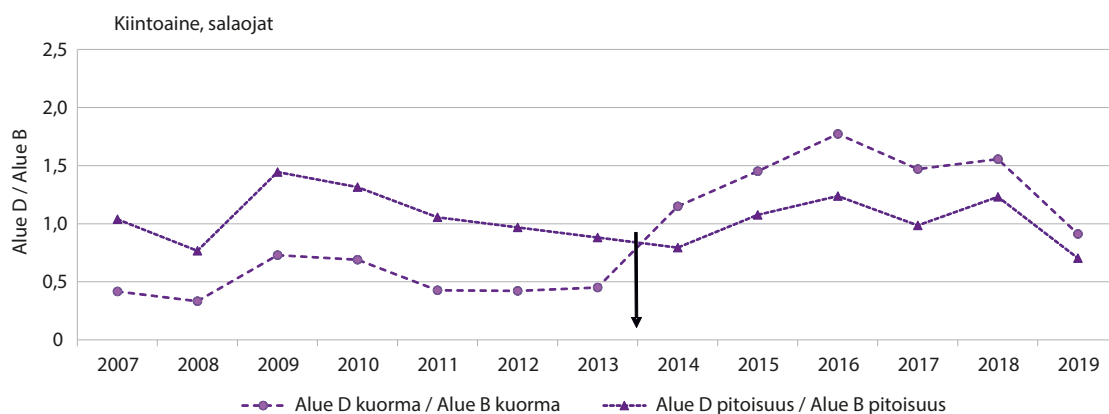
Täydennysojituksen vaikutus kiintoaineen huuhtoutumiseen

Samoin kuin fosforipitoisuudet 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 lisäsi kuitenkin kiintoainehuuhtoumaa, ja suhde (C/B) oli ojituksen jälkeen aiempaan nähden keskimäärin 1,5-kertainen.

Alueella D kahden ojituksen jälkeisten vuosijaksojen kiintoainepitoisuudet olivat keskimäärin alempia kuin ennen ojitusta, mutta ero oli pienempi kuin alueella C (kuva 3.20.). Samoin lisääntyneet salaojavalunnat nostivat myös kiintoainekuormaa ojituksen jälkeen alueella D, joskin nousu suhteessa vertailualueeseen B oli aluetta C suurempi. Huuhtoumien suhde (D/B) oli ojituksen jälkeen edeltäviin vuosiin verrattuna keskimäärin 2,8-kertainen.



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

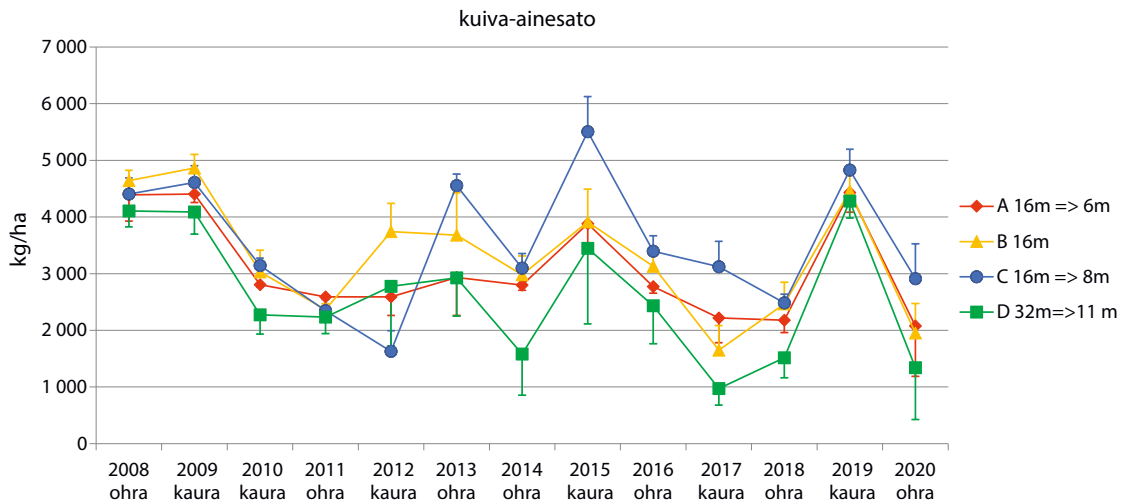


Kuva 3.20. Alueiden D ja B vuotuisten salaojavaluntojen kiintoainepitoisuuksien mediaanien sekä kiintoainekuormien suhde. Alueen D täydennysojituksen ajankohta on merkitty nuolella.

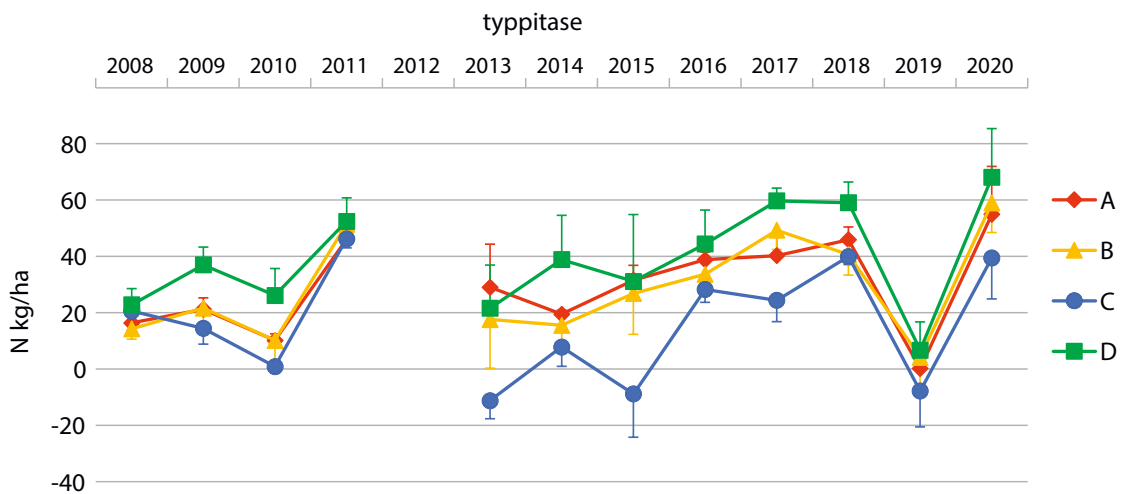
3.1.1.7 Sato

Alueet B ja C tuottivat parhaat sadot lähes kaikkina vuosina, kun taas alue D huonoimmat (kuva 3.21). Alueen D huonoimmat sadot saattavat johtua siitä, että märkyys on vuosikymmenten aikana heikentänyt maan rakennetta tai siitä, että alueella D on selvästi muita alueita alhaisempi maan fosforipitoisuus (kuva 3.1). Alueen D sadot eivät parantuneet täydennysojituksen jälkeisinä vuosina, kunnes vuonna 2019 kaurasato oli lähes yhtä hyvä kuin muillakin alueilla. Runsas ja epätasainen jälkiversonta saattoi vääristää vuoden 2020 satomäärityksiä, joten vasta tulevana vuosina selviää, paranevatko alueen D sadot pysyvästi. Alueen D hyvään satoon vuonna 2019 ovat voineet vaikuttaa sekä täydennysojitus että fosforilannoitus, joka annettiin kaikille alueille.

Satojen vaihtelun takia myös typpitase (kuva 3.22) on vaihdellut paljon eri vuosina. Alueen D huonon satotason takia typpitase on ollut kaikista suurin, eli sato ei ole käyttänyt kaikkea lannoitteenä annettua tyyppiä, vaan sitä on jäänyt peltoon.



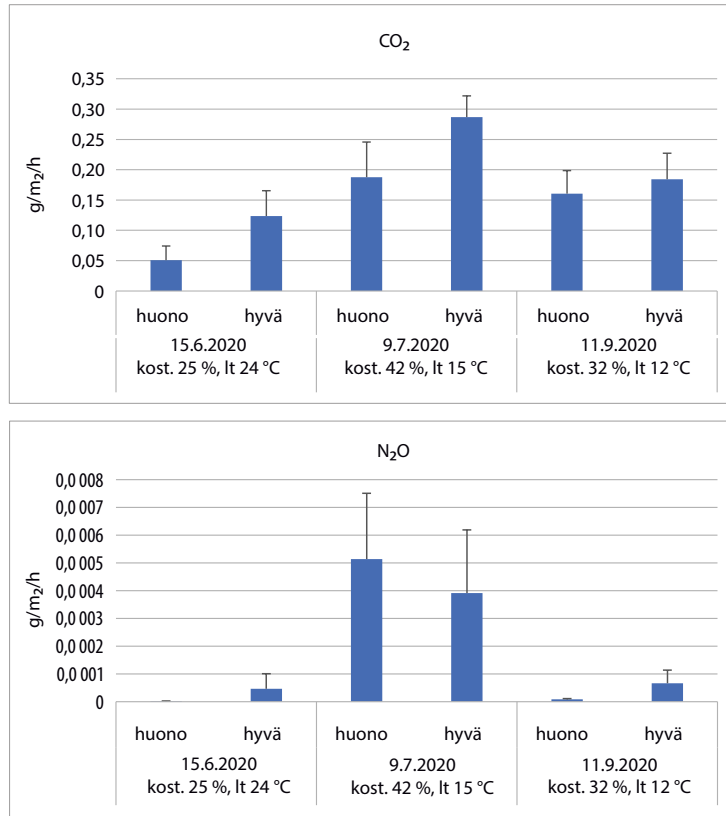
Kuva 3.21. Nummelan kentän keski-sadot ja satojen keskihajonnat eri alueilla vuosina 2008–2020.



Kuva 3.22. Typpitaseet Nummelan koekentän alueilla A–D vuosina 2008–2020. Vuonna 2012 kauranäytteet olivat itäneitä eikä typpianalyysiä tehty.

3.1.1.8 Kasvihuonekaasupäästöt

Kasvihuonekaasupäästöjen ensimmäiset mittaukset (kuva 3.23) viittaavat siihen, että hyvä- ja huonorakenteisen maan päästöt ovat erilaiset. Olosuhteet vaikuttavat päästöihin ratkaisevasti. Tulokset osoittavat, että maan rakenteen vaikutusta päästöihin on tarpeen tutkia uudessa hankkeessa.



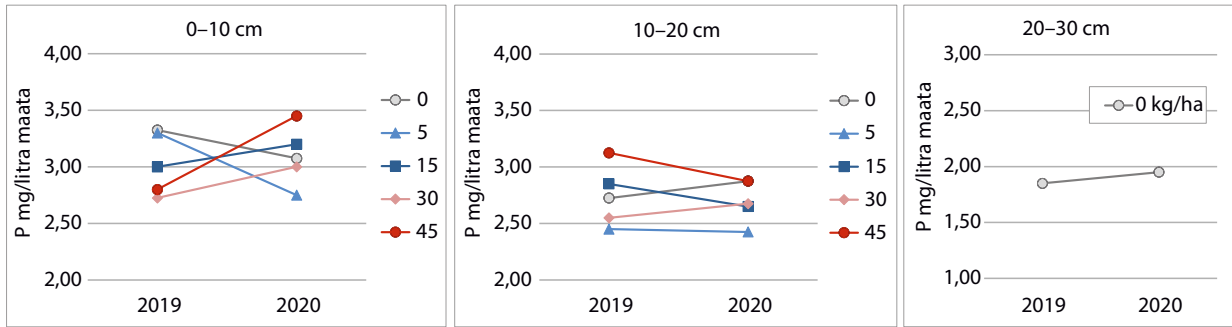
Kuva 3.23. Nummelan kentältä tehdyt kasvihuonekaasumittaukset hyvä- ja huonorakenteiselta savimaalta. Metaanin määrät olivat mitättömät eikä niitä esitetä.

3.1.2 Kuohkeutusko

Maan kuohkeutusko on monivaiheinen ja monivuotinen. Koe käynnistettiin Vesihave-hankkeessa toteuttamalla maan biologinen kuohkeutus syväjuurisen nurmen avulla. Koe jatkuu VesiHave2-tutkimushankkeessa.

3.1.3 Fosforin porraskoe

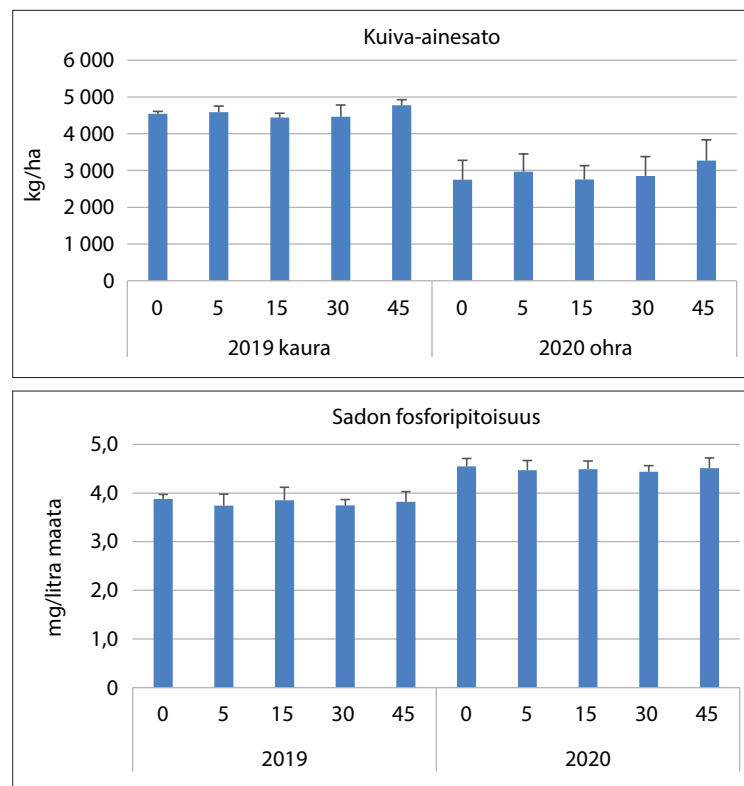
Fosforin porraskokeessa yksi fosforilannoituskerta nosti pintamaan (0–10 cm) fosforipitoisuutta, kun fosforia oli annettu 15 kg ha⁻¹ tai enemmän. Nousu oli erittäin selvä 45 kg ha⁻¹ lannoitemäärällä. Pienillä lannoitemäärillä pintamaan fosforipitoisuus laski. Syvemmillä (10–20 cm:n ja 20–30 cm:n syvyydessä) maan fosforipitoisuus pysyi liki samana tai hieman laski kaikilla lannoitusmäärillä (kuva 3.24).



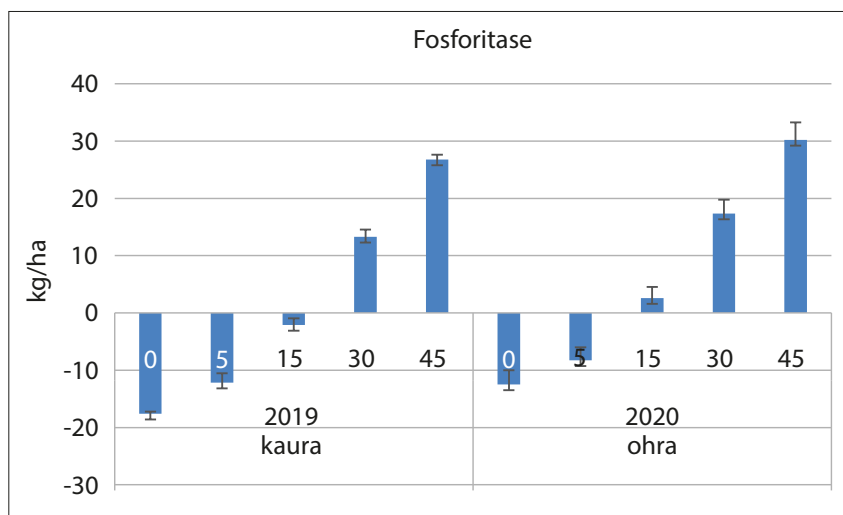
Kuva 3.24. Maan fosforipitoisuuksien muutos ($P \text{ mg l}^{-1}$ maata) yhden fosforilannoituskerran jälkeen eri syvyyksissä. Fosfori oli uutettu happamalla ammoniumasetaalilla eli suomalaisella menetelmällä.

Sadoissa oli vain hyvin vähän eroja, ja sadon fosforipitoisuudet olivat lähes samat kaikilla lannoitusportilla, vaikka fosforilannoitemäärä vaihteli nolasta 45 kg ha^{-1} :iin (kuva 3.25). Luonnonvarakeskuksen vanhoissa fosforin porraskokeissa satovasteet pysyivät aluksi pieninä (Saarela 1995), joten saattaa olla, että lannoituksen vaikutus satoon ilmenee vasta muutaman vuoden päästä.

Koska sadot olivat lähes samat mutta lannoitusmäärät erilaiset, pellon fosforitaseet vaihtelivat. Fosforitaseet olivat lähellä nolaa eli lannoitus oli parhaiten tasapainossa, kun fosforilannoitemäärä oli 15 kg ha^{-1} . Suuremmilla lannoitemäärillä maahan jäi ylimääräistä fosforia. (kuva 3.26)



Kuva 3.25. Keskimmäiset kauran (2019) ja ohran (2020) kuiva-ainesadot fosforin porraskokeessa sekä sadon fosforipitoisuus.



Kuva 3.26. Pellon fosforitase eri lannoitusportailta.

3.1.4 Muiden hankkeiden kokeet

Tulokset julkaistaan yhteistyöhankkeiden omissa julkaisuissa, ja tässä esitetään vain tähänastisten tulosten lyhyt kuvaus.

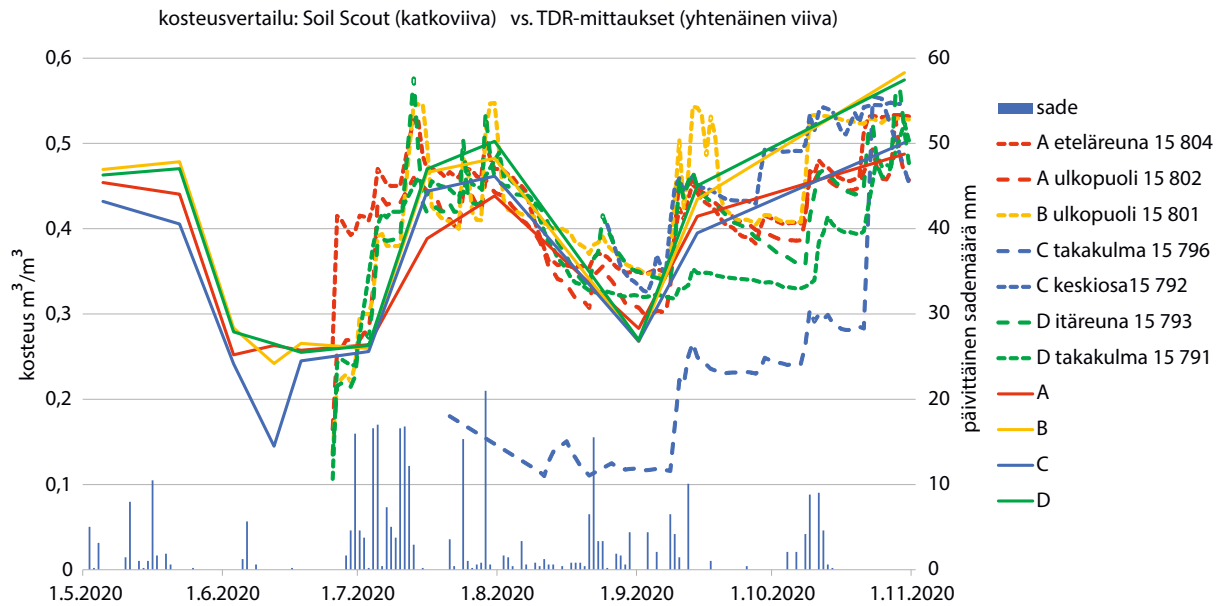
3.1.4.1 Rakennekalkituskoee

Alueen A rakennekalkitus tehtiin syksyllä 2018. Vuosi 2019 oli vähäsateinen eikä rakennekalkitus juurikaan vaikuttanut pintakerros- eikä salaojavalunnan kautta tulleeeseen kiintoainekuormaan. Sen sijaan runsassateisena vuonna 2020 rakennekalkitun alueen A kiintoainepitoisuudet niin pintakerros- kuin salaojavesissä olivat pienemmät kuin vertailualueen, ja myös kiintoainekuormat olivat selvästi pienemmät. On siis mahdollista, että rakennekalkituksen eroosiota vähentävä vaikutus tulee esille vasta hyvin märissä oloissa. On myös mahdollista, että kyse oli muusta vaihtelusta. Varmistuksen saamiseksi Samassa vedessä -hanke pyrkii jatkamaan seuranta.

3.1.4.2 Maan kosteuden jatkuvatoimisen mittauksen kokeilu

Nummelan kentällä tehdyssä Soil Scout- ja TDR-mittausten vertailussa kumpikin menetelmä reagoi herkästi maan kosteuden muutoksiin (kuva 3.27), ja menetelmät vaikuttivat yhtä luotettavilta ilmaisemaan maan kosteutta tilavuusprosentteina mittaushetkellä. Jatkuvatoiminen Soil Scout -mittaus luonnollisesti rekisteröi myös lyhytaikaiset vaihtelut käsin tehtävien TDR-mittausten välillä. Absoluuttisia arvoja ei pystytty vertaamaan, koska mittaustaikat ja -syvyudet eivät olleet täysin samoja.

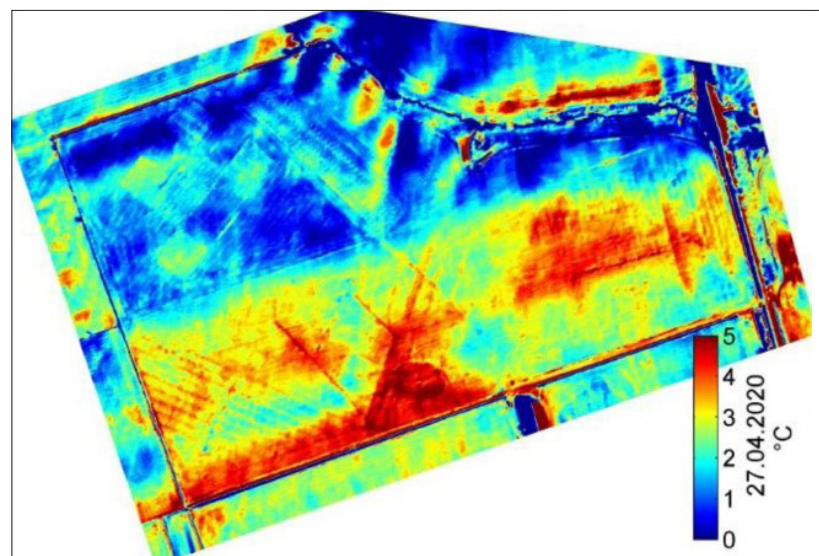
Kummankin menetelmän toimivuudelle on riskinä esim. huono kontakti anturin ja maan välillä, jolloin tulokseksi saadaan selvästi poikkeavia kosteuslukemia. Poikkeavuuksien löytymistä helpottaa – ja tuloksen luotettavuutta parantaa – toistomittausten lisääminen. TDR-menetelmässä toistoja lisätään painamalla, ja se on selvästi edullisempaa kuin Soil Scoutia käytettäessä. Kummassakin menetelmässä on siis omat etunsa.



Kuva 3.27. Maan kosteus 20 cm:n syvyydellä olevien Soil Scout -antureiden (katkoviiva) ja 0–30 cm:n syvyydestä tehtyjen TDR-mittausten (yhtenäinen viiva) mukaan. Mittauksia ei tehty samoista paikoista, mutta samalla värillä piirretyt viivat kuvaavat samaa aluetta.

3.1.4.3 Drone-lämpökamerakuvaus

Nummelan kentän lämpökamerakuvausissa erottuvat mm. salaojat, erilainen kasvillisuus ja myös kosteuserot. Aikaisin keväällä otetuissa kuvissa märät kohdat olivat kylmempää, koska niiden lämpeneminen vaatii paljon energiaa. Kesällä märät kohdat olivat puolestaan lämpimämpiä, koska vesi varastoi energiaa. Tulvien tulkitseminen edistyy MORE-hankkeen jatkuessa. Kuvassa 3.28 on esimerkki lämpökamerakuvasta.



Kuva 3.28. Nummelan kentän lämpökamerakuva 27.4.2020.

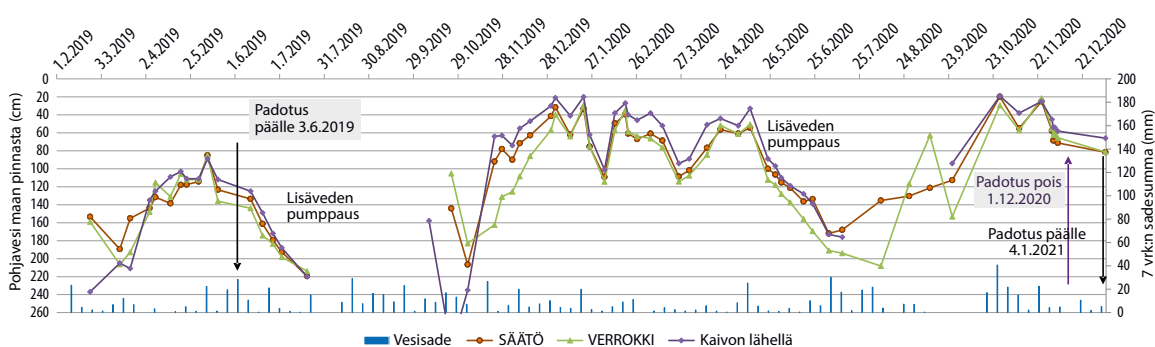
3.2 Sievin säätösalojituskentän tulokset

3.2.1 Sääolot

Vuonna 2019 Sievin koekenttää lähellä olevilla Ilmatieteen laitoksen havaintoasemilla (Ylivieska ja Toholampi) sadannaksi (korjaamaton) mitattiin 504 mm ja vuonna 2020 618 mm. Vuosina 2015–2018 koekentän sadanta vaihteli välillä 390–550 mm. Ilmatieteen laitoksen mittausten mukaan alueen keskimääräinen vuosisadanta (1981–2010) on ollut 550–600 mm. Sadanta kasvukaudella 2019 (syysruis, 20.4.–4.9.) oli 188 mm ja kasvukaudella 2020 (ohra, 27.5.–1.9.) 170 mm. Terminen kasvukausi alkoi vuonna 2019 20.4. ja päättyi 27.10. Tehoisa lämpösumma oli n. 1385 °C vrk. Vuonna 2020 terminen kasvukausi alkoi 21.5. ja päättyi 11.10. Tehoisa lämpösumma oli 1200 °C vrk. Lämpötilan vaihtelua ja lumen sulantaa tapahtui lähes koko talvikauden 2019. Runsaita sulanta- ja valuntajaksoja oli useita.

3.2.2 Pohjavedenpinnan syvyys koekentällä

Pohjavedenpinnan syvyyttä mitattiin molemmilla alueilla eri etäisyyksille (0,2–7,5 m) sala-ojista asennetuista pohjavesiputkista. Säätökaivossa valuntavettä alettiin padottaa 3.6.2019 ja padotus oli päällä marraskuun 2020 loppuun paitsi kylvön aikaan toukokuussa 2020. Padotus laitettiin uudelleen päälle 4. tammikuuta 2021. Padotus oli asennettu 0,5 metrin etäisyydelle maanpinnasta. Kasteluvettä pumpattiin säätösalojitetulle alueelle heinäkuussa 2019 ja kesä-heinäkuussa 2020. Mittausten mukaan pohjaveden pinta oli säätösalojitetulla alueella lähempänä maan pintaa kuin vertailualueella, tosin ero pieneni, kun etäisyys säätökaivosta kasvoi (kuva 3.29). Pohjavedenpinta oli säätöalueella keskimäärin 7 cm korkeammalla kuin tavanomaisen ojituksen alueella. Vesi nousi sateiden alkaessa säätöalueella nopeammin lähemmäksi maanpintaa padotuksen ansiosta. Se myös pysyi pidempään lähempänä maanpintaa.

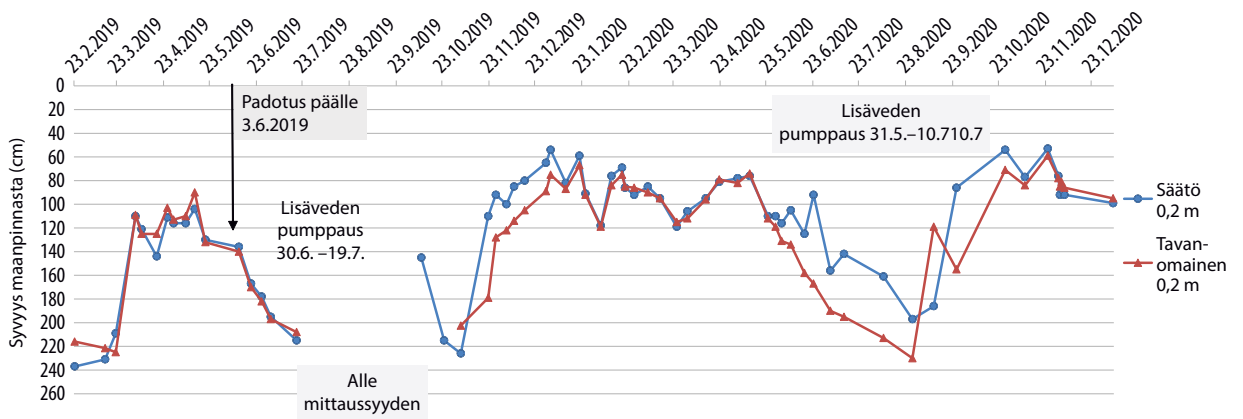


Kuva 3.29. Pohjavedenpinnan syvyydet (mediaanien keskiarvot) säätösalojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla vertailualueella 23.2.2019–6.1.2021. Säätökaivon padotus laitettiin päälle 3.6.2019. Säätösalojitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä 30.6.–19.7.2019 ja 31.5.–10.7.2020. Kuvassa on myös koekentän 7 vrk:n sadesummat.

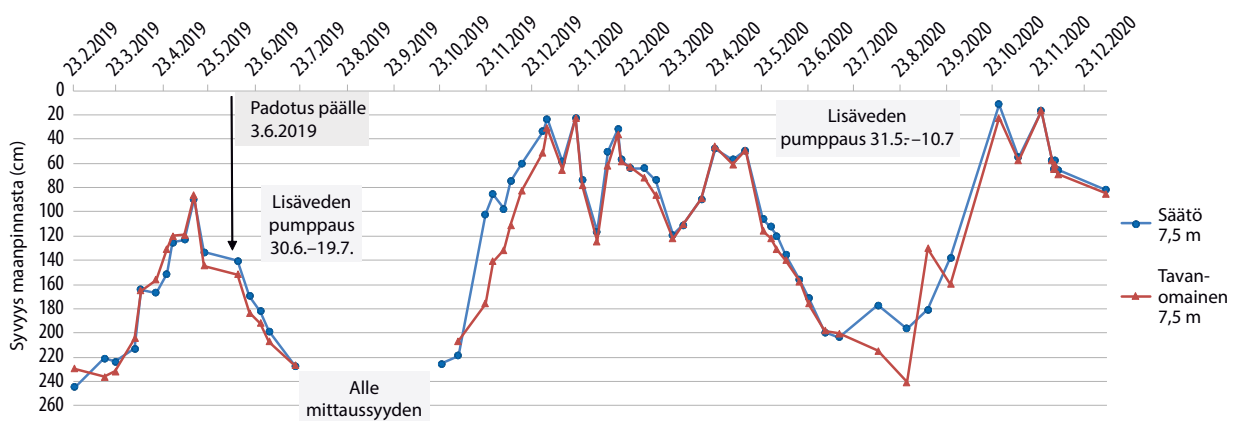
3.2.3 Pohjaveden syvyydet eri etäisyyksillä salaojasta

Pohjavedenpinnan vaihtelu oli suhteellisen pientä eri etäisyyksillä salaojasta. Salaojan kohdalla vesi oli keskimäärin hieman syvemmällä kuin imuojien puolivälissä ja erityisesti märkinä aikoina salaojan kohdalla vesi oli alempana (kuvat 3.30 ja 3.31).

Salaojitusta padottamalla ja lisävedtä pumppaamalla pystyttiin pohjavedenpintaa pitämään korkeammalla kuin tavanomaisesti ojitetulla alueella. Säätosalaojitetulla alueella vesi oli kuitenkin vain hieman ylempänä. Pellon maalajista ja syvistä läpäisevistä kerroksista johtuen padotus ei pysynyt ylhäällä kovin pitkään sulannan ja sadannan jälkeen. Muoviseinäisiä ei pystynyt estämään pohjaveden liikettä maaperässä, vaan pohjavettä virtasi seinämän alta. Pohjaveden nopea lasku kuivina kausina on tullut esille myös muilla säätosalaojituksen tutkimusalueilla Suomessa (esim. Paasonen-Kivekäs ym. 2000, Bärlund ym. 2004, Yli-Halla ym. 2020).



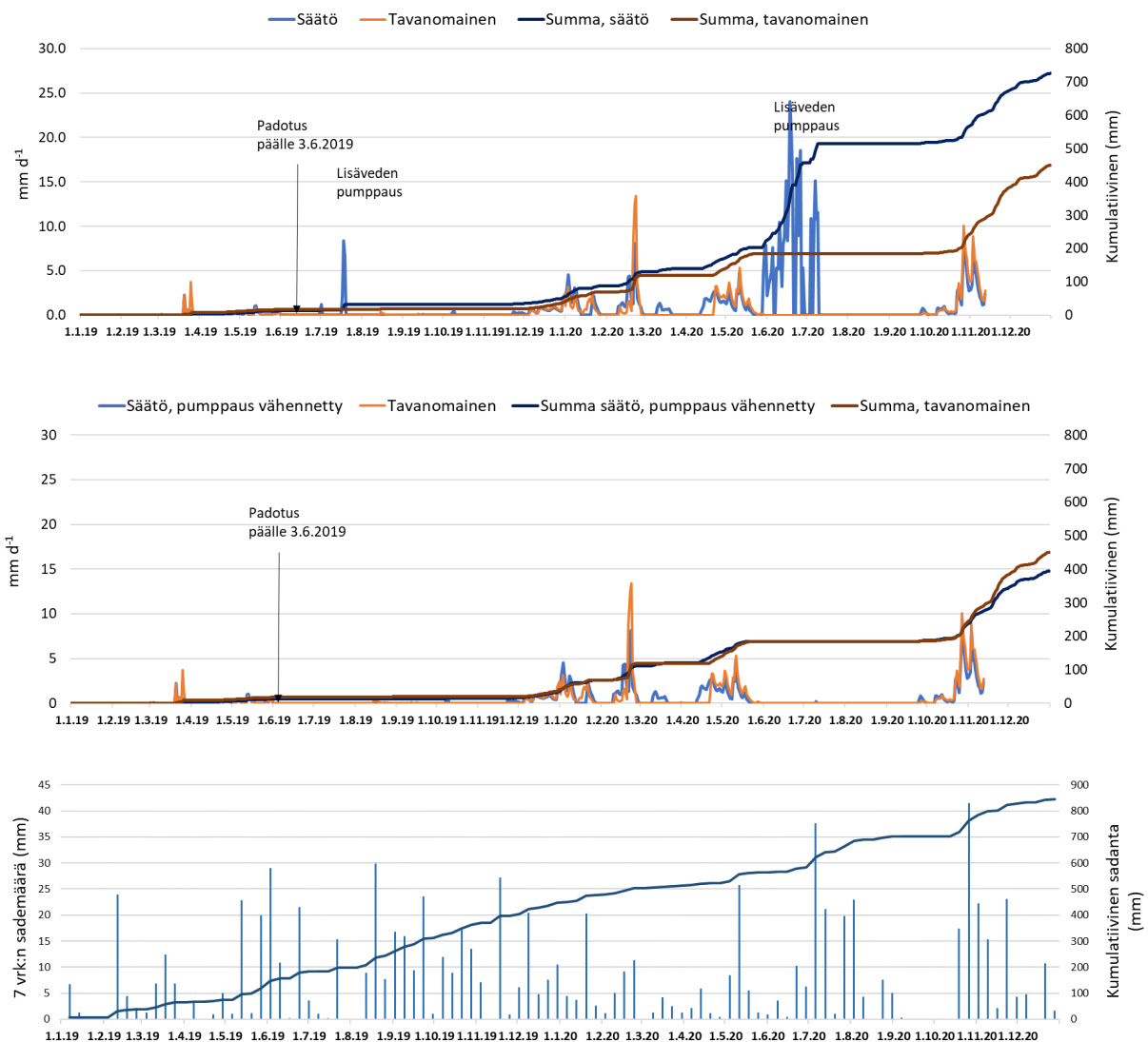
Kuva 3.30. Pohjavedenpinnan syvyydet (mediaanit) 0,2 metrin etäisyydellä salaojista säätosalaojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla alueella 23.2.2019–6.1.2021. Säätoikaivon padotus laitettiin päälle 3.6.2019. Säätosalaojitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä heinäkuussa 2019 ja kesä-heinäkuussa 2020.



Kuva 3.31. Pohjavedenpinnan syvyydet (mediaanit) 7,5 metrin etäisyydellä salaojista säätosalaojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla alueella 23.2.2019–6.1.2021. Säätoikaivon padotus laitettiin päälle 3.6.2019. Säätosalaojitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä heinäkuussa 2019 ja kesä-heinäkuussa 2020.

3.2.4 Salaojavalunnat

Sievin koealueiden salaojavalunta (vuorokausi ja kumulatiivinen) sekä sadanta vuosina 2019–2020 on esitetty kuvassa 3.32. Säättösalojitetulla alueella padotus aloitettiin 3.6.2019. Säättösalojitetulle alueelle pumpattiin kasteluvettä heinäkuussa 2019 ja vuonna 2020 31.5–9.7. välisenä aikana yhteensä 26 päivänä. Käytössä ollut polttomoottorikäyttöinen pumppu oli siinä määrin tehokas, että kasteluvettä purkautui säättökaivosta valtaojaan. Säättösalojitusalueen mitatussa salaojavalunnassa on pumppausajankohtina nähtävissä selvät piikit, jotka kasvattivat vuoden 2020 valuntaa huomattavasti tavanomaisesti salaojitettuun alueeseen verrattuna. Veden syöttö salaojiin tulee toteuttaa pienellä teholla, jotta vesi ehtii imeytyä maahan ja vältetään ylivuoto padotuskaivosta.



Kuva 3.32. Vuorokausivalunta ja kumulatiivinen valunta Sievin koealueilla 1.1.2019–31.12.2020: säättösalojitetun (salaojakastelu) ja tavanomaisesti salaojitetun alueen mitattu salaojavalunta (ylin kuva) ja salaojavalunta, josta säättösalojitetun alueen mitatusta valunnasta on vähennetty kasteluveden pumppauksen aiheuttama valunta (keskimmäinen kuva). Viikkosadanta ja kumulatiivinen sadanta Sievin koekentällä (korjaamaton) (alin kuva).

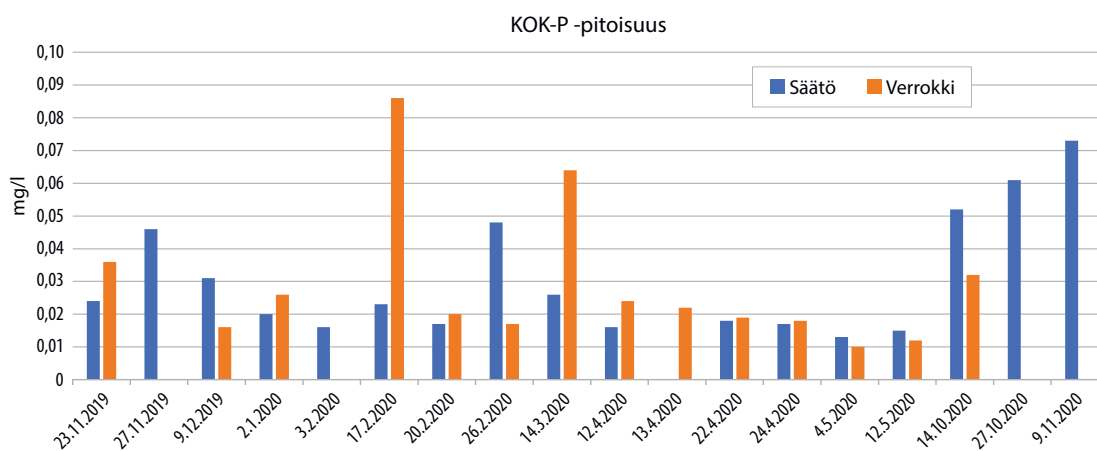
Kuvassa 3.32 on esitetty vuorokausivalunta ja kumulatiivinen salaojavalunta tilanteessa, jossa kasteluveden pumppausajankohtien valunta on poistettu säätösalaajitetun alueen mittausaineistosta. Näin arvioitu valunta kuvaa salaojavaluntaa, joka olisi tullut pelkästä säätösalaajituksesta. Tällöin koealueiden kumulatiiviset valunnat olivat hyvin yhteneväiset marraskuulle 2020, jonka jälkeen tavanomaisen ojituksesta purkautui noin 50 mm enemmän valuntaa kuin säätösalaajituksesta joulukuun loppuun mennessä. Säätösalaajituksessa valunnan vähenemä marras-joulukuussa oli noin 25 %, kun se koko mittausjakson aikana oli arvion mukaan noin 12 %.

3.2.5 Salaojavalunnan laatu

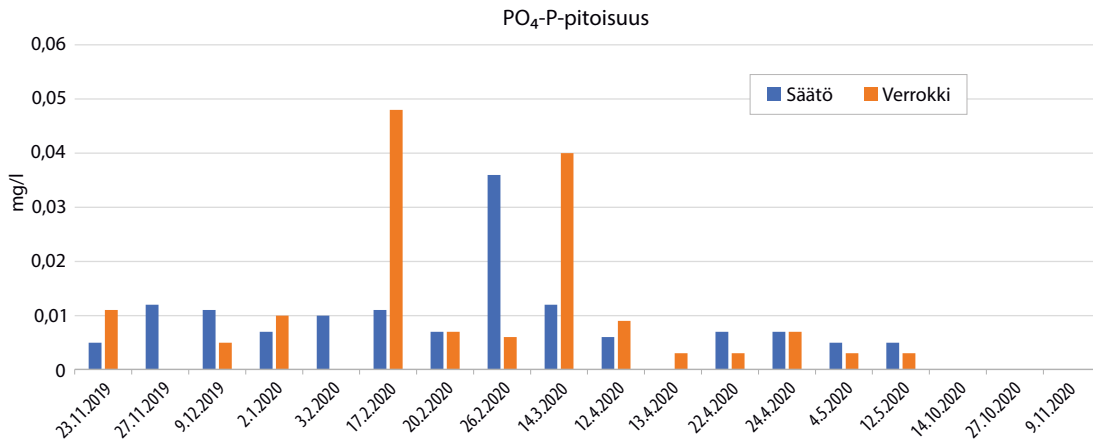
Salaojaveden pitoisuusmittauksia oli saatavilla marraskuusta 2019. Pitoisuudet oli määritetty kokoomanäytteistä, jotka otettiin säätöalueen ja vertailualueen kokooajaputkista purkautuneesta vedestä. Ravinne- ja kiintoainepitoisuudet noin vuoden mittausjaksolta on esitetty kuvissa 3.33–3.36.

Syksyn 2019 ja vuoden 2020 aikana molemmilta alueita mitattiin verrattain matalia kokonaisfosforin (Kok-P) pitoisuuksia (alle 0,09 mg l⁻¹) (kuva 3.33). Korkeimmat Kok-P-pitoisuudet mitattiin vertailualueen salaojavalunnassa helmi-maaliskuussa ja säätöalueella loka-marraskuussa 2020. Korkeimmat liukoisen epäorgaanisen fosforin (PO₄-P) pitoisuudet mitattiin molemmilta alueita helmi-maaliskuussa. Liukoisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli säätösalaajitetulla alueella keskimäärin 0,41 ja tavanomaisen ojituksen alueella 0,36 (kuva 3.34).

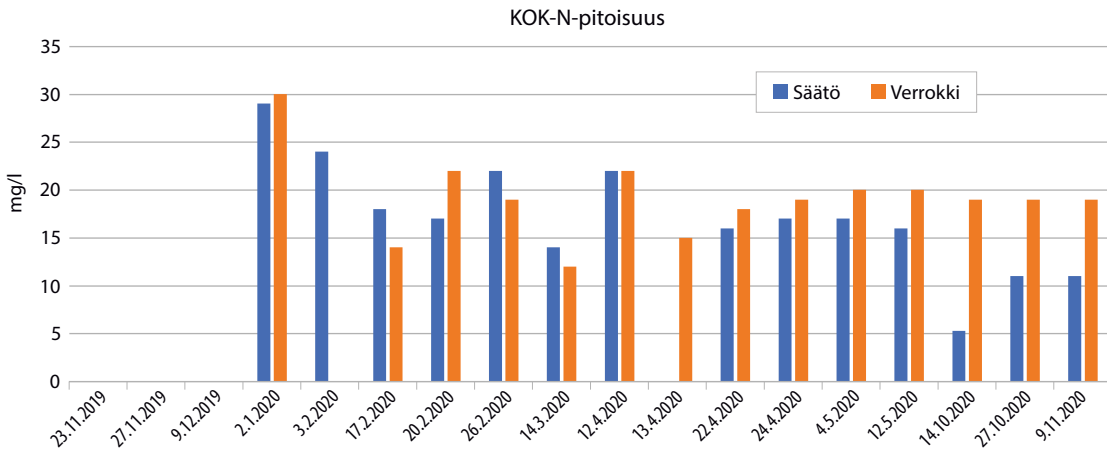
Säätösalaajitetun ja tavanomaisen ojituksen alueiden salaojavalunnan kokonaistypen pitoisuudet olivat verrattain korkeita (12–30 mg l⁻¹), mutta alueiden väliset erot olivat pieniä syksyä 2020 lukuun ottamatta (kuva 3.35). Tällöin säätösalaajitetulla alueella typpipitoisuudet olivat selvästi pienemmät kuin tavanomaisesti salaojitetulla alueella. Kiintoainepitoisuudet olivat mittausjaksolla lähellä toisiaan. Pitoisuudet vaihtelivat pääosin välillä 7–27 mg l⁻¹, mutta syksyllä molempien alueiden salaojaveden kiintoainepitoisuus ensin nousi aiempaa suurempiin arvoihin ja pian sen jälkeen analysoitiin mittausjakson alimmat pitoisuudet (kuva 3.36).



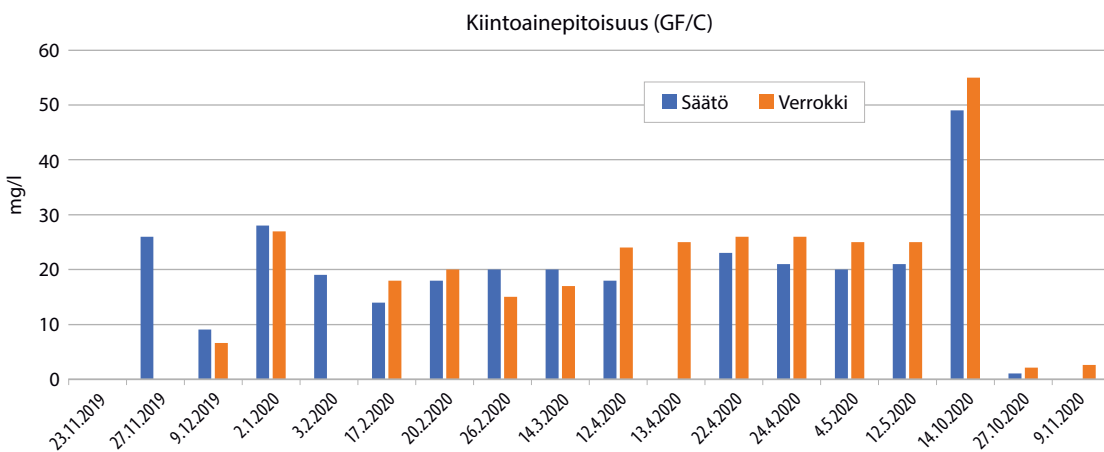
Kuva 3.33. Kokonaisfosforipitoisuudet säätösalaajitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 23.11.2019–9.11.2020.



Kuva 3.34. Liukoisien epäorgaanisen fosforin (PO₄-P) pitoisuudet säätösalojitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 23.11.2019–9.11.2020.



Kuva 3.35. Kokonaistyyppipitoisuudet säätösalojitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 23.11.2019–9.11.2020.



Kuva 3.36. Kiintoainepitoisuudet säätösalojitetun ja vertailualueen salaojavalunnassa 23.11.2019–9.11.2020.

3.2.6 Sato

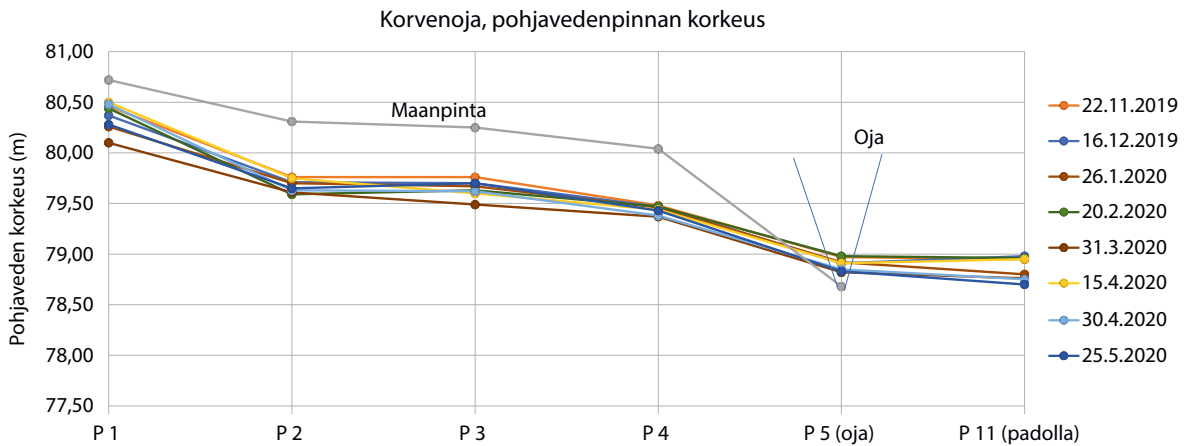
Kesällä 2019 Sievin koekentällä kasvoi ruista ja kesällä 2020 ohraa. Taulukossa 3.9 on esitetty keskimääräiset sadot molemmilla koalueilla sekä erikseen salaojien kohdalla ja ojien puolivälissä. Keskimääräiset ruissadot koalueilla olivat 8700 ja 9100 kg ha⁻¹. Vuoden 2020 ohrasato oli 4500–4900 kg ha⁻¹. Säätosalaoja-alueen sadot olivat vertailualueita suurempia molempina vuosina. Vuonna 2019 satoero oli suurin ojien puolivälissä. Eri mittauksen välinen hajonta oli säätosalaojitetulla alueella vertailualueita pienempää. Satojen hajonta ja pohjavedenpinnan syvyyden hajonta olivat suurta.

Taulukko 3.9. Ruissato 2019 ja ohrasato 2020 keskimäärin (kuiva-aine) sekä hajonta säätosalaoituksen ja tavanomaisen ojituksen alueilla kokonaisuudessaan, salaojien kohdalla (0 m) ja ojien puolivälissä (7,5 m).

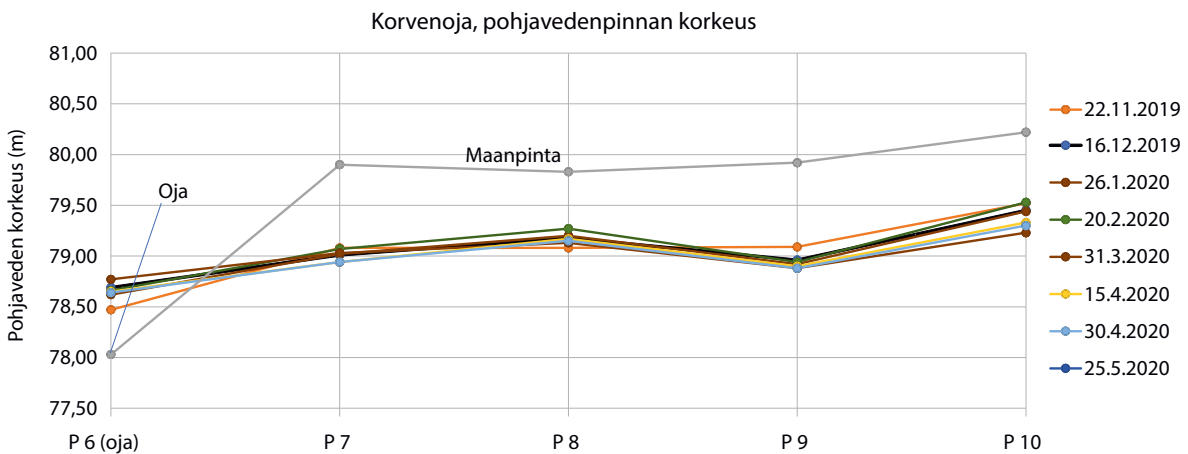
Menetelmä	Sato kg/ha 2019		Sato kg/ha 2020	
	Sato	Hajonta	Sato	Hajonta
Säättö				
0 m	9171	1302	4961	599
keskiarvo	9091	1129	4886	630
7,5 m	9010	978	4810	677
Tavanomainen				
0 m	8951	1499	4597	952
keskiarvo	8708	1292	4563	894
7,5 m	8465	1056	4528	873

3.3 Valtaojan padotuskokeen tuloksia

Sievin Korvenojan settipatoa alettiin säätää syyskuussa 2019. Patoon sahattiin painekylälästettyjä lankkuja, jotka asennettiin oikean padotustason aikaansaamiseksi. Vedenpinta alueella säädettiin korkeuteen +79.00. Peltojen pinnankorkeus vaihtelee välillä +79.50 – +81.00. Matalassa maastonkohdassa kuivavara on noin 0,50 m. Pohjavedenpinnan syvyys ojaa ympäröivillä pelloilla, eli vastaava taso ojassa, on salaojasyvyydessä noin 3,20 ha peltoalueella. Pohjavesiputkien mittausalue on maanpinnasta 3,0 m alaspäin. Pohjavedenpinnan muutoksia voidaan tutkia laajalla, noin 50 hehtaarin alueella. Mitatut pohjavedenpinnan korkeudet ajanjaksolla 4.11.2019–25.5.2020 on esitetty kuvissa 3.37 ja 3.38. Ojalinjojen sijainti pellolla on esitetty kuvassa 2.13 (kohta 2.3). Syksystä 2019 vuoden 2020 alkukeksään asti Korvenojan settipadon padotus toimi hyvin ja vesi pysyi ojassa. Kesän kuluessa haihdunta kuivatti ojan lähes kokonaan.



Kuva 3.37. Pohjavedenpinnan korkeudet Korvenojaan rajoittuvalla peltoalueella, linja 1.



Kuva 3.38. Pohjavedenpinnan korkeudet Korvenojaan rajoittuvalla peltoalueella, linja 2.

3.4 Mallintamistulokset

3.4.1 Mallin kalibrointi ja validointi

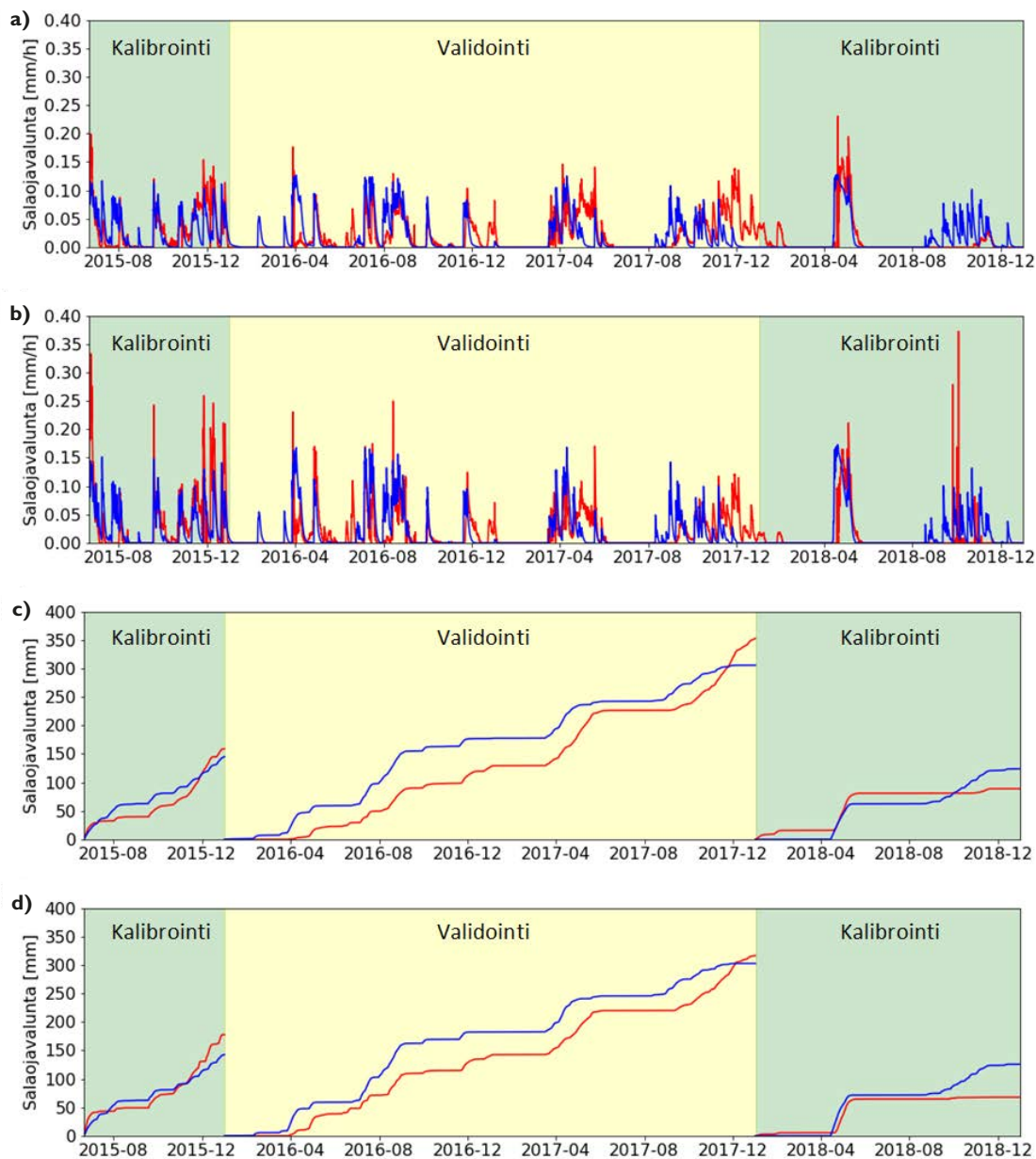
Sievin koekentän simuloitava maaprofiili parametrisoitiin maanäytteiden vedenpidätyskäyrän (pF-käyrä) mittaustulosten mukaan (liite 3). Kalibrointi ja validointi tehtiin ajanjaksolle ennen säätösalaajituksen toteuttamista, jolloin koko koekentällä oli tavanomainen salaajitus. Kalibrointi ja validointi tehtiin vertaamalla FLUSH-mallin tuloksia salaajavalunnan ja pohjavedenpinnan syvyyden mittauksiin vuosilta 2015–2018. Kalibroinnissa ja validoinnissa mallitulokset eroteltiin aurakoneella ja kaivavalla koneella tehtyjen ojitusten alueisiin (Äijö ym. 2017), koska molemmilta oli mitattu erikseen salaajavaluntaa ja pohjavedenpinnan syvyyksiä.

Maanäytteiden vedenpidätyskäyrän mittaustuloksiin sovitettiin van Genuchtenin (1980) vedenpidätyskäyrän parametrit, joita käytettiin mallinnuksessa. Maan kokonaishuokoisuus saatiin suoraan maanäytteiden mittaustuloksista. Mallissa residuaalikosteudelle annettiin arvo $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Alkuarvot makrohuokosten osuuksille saatiin maanäytteiden mittaustuloksista olettaen, että makrohuokokset tyhjenevät vedestä 10 cm imulla (esim. Jarvis 2007, Häggblom ym. 2019). Kalibroittavat parametrit olivat pohjamaan (yli 1 metrin syvyydessä) hydrauliset ominaisuudet, makrohuokosten osuus kokonaishuokoisuudesta ja makrohuokosten hydrauliset ominaisuudet. Lisäksi kalibroitiin sadannan korjauskertoimet erikseen lumisateelle ja vesisateelle. Hydraulinen johtavuus (maamatriisille ja makrohuokostolle) kalibroitiin kaikille maakerroksille pohjautuen kirjallisuudesta otettuihin alkuarvoihin (Andersson & Wiklert 1970, Turunen ym. 2013). Simuloidun profiilin parametrien arvot on esitetty liitteessä 4.

Kuvassa 3.39 nähdään, että mallinnettu salaojavalunta vastaa suurelta osin mitattua salaojavaluntaa. Suurimmat erot mitatun ja mallinnetun salaojavalunnan välillä (esim. talvi 2017–2018) johtuivat lumen kertymisestä ja sulamisen ajoittumisesta. Simulaatioissa käytetty korjaamaton sadanta oli Ilmatieteen laitoksen Ylivieskan havaintoasemalta. Sadannan korjauskertoimina käytettiin 1,1 vesisateelle ja 1,2 lumisateelle. Korjattu vuosisadanta oli Ylivieskan havaintoasemalla 20 % pienempi kuin Sievin koekentän mitattu korjaamaton sadanta.

Mallinnetuista ja mitatuista pohjavedenpinnan syvyyksistä eri kohdissa peltoaluetta laskettiin keskiarvot kullekin mittauspäivälle. Simulaatiotuloksia verrattiin mittauksiin niiden päivien osalta, kun mittaukset oli tehty (kuva 3.40). Mallinnettujen pohjavedenpintojen suurimmat erot mittauksiin nähden ajoittuivat validointijakson alkuun (2016 alkuvuosi), jolloin pohjavedenpinta laski selvästi salaojasyvyyden alapuolelle, noin 2 metrin syvyyteen.

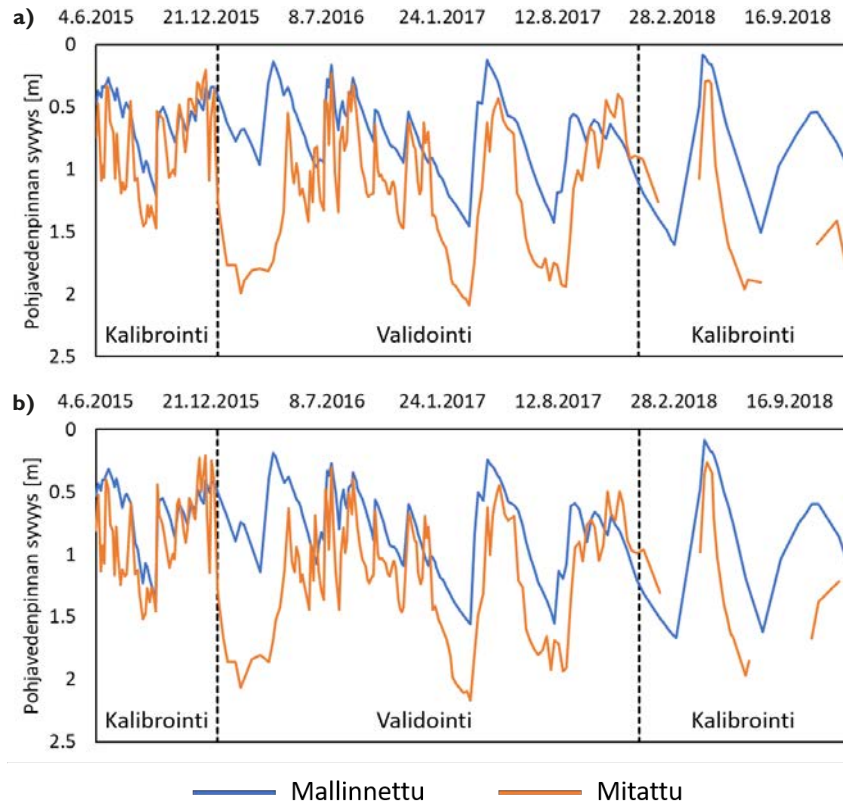
Taulukkoon 3.10 on koottu mallinnustulosten hyvyysluvut. Nash-Sutcliffe (NSE) luku kuvaa simulaatiotulosten vastaavuutta mitattuun salaojavaluntaan verrattuna (Nash & Sutcliffe 1970). Pohjavedenpinnan syvyyden vastaavuutta mittauksiin nähden arvioitiin keskimääräisen absoluuttisen virheen (MAE) kautta. Salaojavaluntamittauksia oli joka tunnilta ja pohjavedenpinnan havaintoja noin kolmen päivän välein. Tämän takia simuloidut tunnittaiset pohjavedenpinnan syvyydet keskiarvoistettiin päivittäisiksi arvoiksi ja vertailu tehtiin niiden päivien osalta, jolloin havaintoja oli saatavilla. Ero mitatun ja mallinnetun pohjavedenpinnan välillä oli suurimmillaan talviaikaan, jolloin mitattu pohjavedenpinta laski yli 1,5 metrin syvyyteen, mutta mallinnettu pohjavedenpinta pysyi selvästi korkeammalla (kuva 3.40). Syviä pohjavedenpintoja esiintyi pääasiassa validointikaudella. Taulukkoon 3.10 on laskettu validointijaksolle pohjavedenpinnan absoluuttinen keskivirhe ajalle, jossa talvikuukausia ei ole otettu mukaan.



Kuva 3.39. Mitattu (punainen) ja mallinnettu (sininen) ja tunnittainen salaojavalunta (mm h^{-1}) a) aurasalaojakoneella ojitetuilla koealueilla ja b) kaivavalla salaojakoneella ojitetuilla koealueilla, sekä kumulatiivinen salaojavalunta kalibrointi- ja validointijaksoilla c) aurakoneen lohkoilla ja d) kaivavan koneen lohkoilla.

Taulukko 3.10. Hyvyysluvut salaojavalunnalle (NSE) ja pohjavedenpinnan syvyydelle (MAE). Suluissa olevat MAE-arvot on laskettu siten, että talvikuukaudet on jätetty pois.

	Salaojavalunta		Pohjavedenpinta	
	Aura	Kaivava	Aura (m)	Kaivava (m)
Kalibrointi	0,41	0,36	0,38	0,35
Validointi	0,25	0,23	0,47 (0,44)	0,44 (0,41)



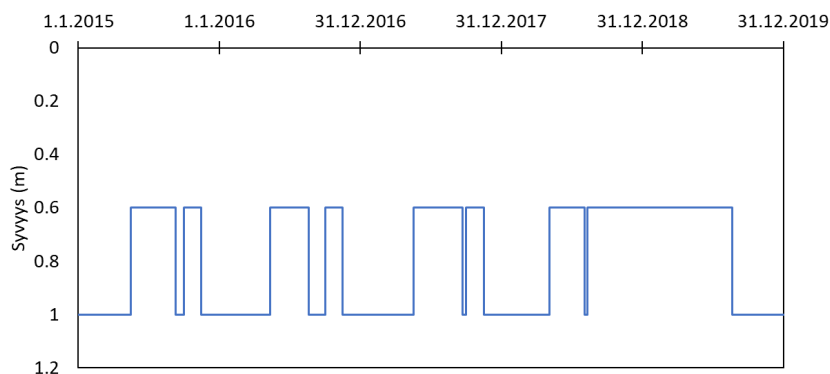
Kuva 3.40. Mitattujen ja mallinnettujen pohjavedenpinnan syvyyksien (m) keskiarvot maanpinnasta a) aurasalajakoneella ojitetuilla lohkoilla ja b) kaivavalla salajakoneella ojitetuilla lohkoilla.

3.4.2 Säätosalaojitusskenaario

Testatulla mallilla simuloitiin Sievin peltoalueen vesitasetta vuosina 2015–2019 tilanteissa, joissa pelto oli tavanomaisesti salaojitettu ja säätosalaojitettu. Kasvukaudet ja viljelykasvit on esitetty taulukossa 3.11. Säätosalaojitusta simuloitaessa sääto oli päällä kuvassa 3.41 esitettyinä ajankohtina. Säädön padotussyvyys oli 0,6 m maanpinnasta. Salaojituksen kuitussyvyys ilman säätoa oli 1,0 m. Sääto laitettiin päälle kaksi viikkoa ennen kylvöä ja pois päältä kaksi viikkoa ennen puintia. Kasvukauden lisäksi sääto oli päällä loppusyksyllä 1,5 kuukautta.

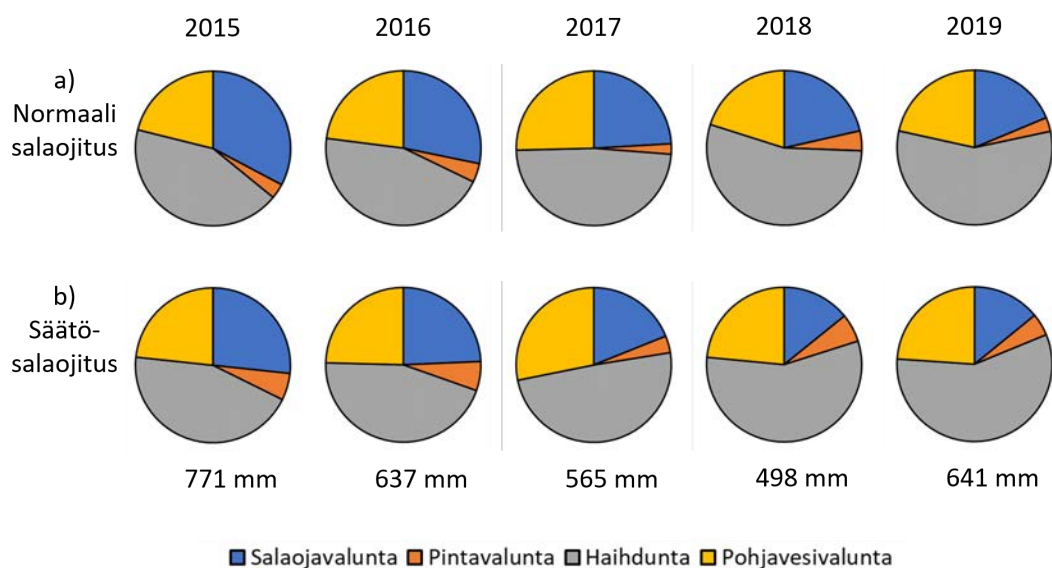
Taulukko 3.11. Viljelyajat ja -kasvit simulaatiojaksoilla vuosina 2015–2019.

Vuosi	Viljely (kylvö–puinti)	Kasvi
2015	31.5.–24.9.	Ohra
2016	26.5.–2.9.	Ohra
2017	1.6.–5.10.	Ohra
2018	18.5.–18.8.	Ohra
2019	24.8.–4.9.	Syysruis



Kuva 3.41. Säätojaksot vuosille 2015–2019. Sinisellä viivalla on merkitty kuivatussyvyyden vaihtelu 0,6 ja 1,0 metrin välillä.

Kuvasta 3.42 ja taulukosta 3.12 nähdään vuosittaisen vesitaseen muutos tavanomaisen salaojituksen ja säättösalaojituksen välillä. Säättösalaojituksessa salaojavalunta väheni (14–35 %), kun taas pintavalunta, pohjavesivalunta ja haihdunta kasvoivat. Suurin prosentuaalinen kasvu oli pintavalunnassa (39–75 %), mutta pintavalunnan absoluuttiset vuotuiset määrät olivat kuitenkin pieniä (2–7 % sadannasta) laskennallisessa vesitaseessa.



Kuva 3.42. Vuosittainen vesitase 2015–2019 a) tavanomaisella salaojituksella ja b) säättösalaojituksella.

Taulukko 3.12. Vesitaseen eri valuntakomponenttien ja haihdunnan vuotuinen muutos säättösalaojituksessa tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna.

Vuosi	Salaojavalunta	Pintavalunta	Haihdunta	Pohjavesivalunta
2015	-20 % (-48 mm)	75 % (+17 mm)	1 % (+5 mm)	8 % (+13 mm)
2016	-14 % (-25 mm)	54 % (+14 mm)	0 % (+1 mm)	7 % (+10 mm)
2017	-23 % (-28 mm)	59 % (+7 mm)	1 % (+2 mm)	9 % (+12 mm)
2018	-35 % (-44 mm)	39 % (+10 mm)	2 % (+6 mm)	14 % (+17 mm)
2019	-22 % (-23 mm)	65 % (+11 mm)	5 % (+15 mm)	15 % (+19 mm)

Sievin koekentällä tehtyjen mittausten perusteella arvioitiin, että säätösalaajitetulta alueelta (ilman kasteluveden pumppausta) salaojavaluntaa vuosina 2019 ja 2020 tuli hieman yli 10 % vähemmän kuin tavanomaisesti ojitetulta alueelta. Vähemmän oli noin puolet vuoden 2019 simulaatiotuloksesta. Eroa selittää muun muassa se, että simulaatioissa säädössä käytetty padotus vaikutti samalla tavalla kaikissa salaojissa. Todellisuudessa padotus toteutettiin vain kokoojaojan laskuaukossa ja sen vaikutus näytti vähenevän siirryttäessä säätökaivosta kauemmaksi peltoalueelle.

Kokeelliset tutkimukset eri maissa ovat osoittaneet, että säätösalaajituksen vaikutus salaojavalunnan määrään on vaihdellut paljon eri maaperä- ja ilmasto-olosuhteissa ja samallakin koalueella eri vuosina. Tuloksiin ovat vaikuttaneet myös ojituksen toteutus, säätötoimenpiteet ja muut koejärjestelyt (Carstensen ym. 2020). Valunnan vähennäminen on ollut keskimäärin muutamia kymmeniä prosentteja tavanomaiseen ojitukseen verrattuna. Söderfjärdenin koekentällä (hapan sulfaattimaa) Pohjanmaalla säätösalaajitusalueelta salaojavaluntaa tuli 15 % enemmän kuin tavanomaisesti ojitetulta alueelta (Yli-Halla ym. 2020). Suuremman valunnan oletettiin johtuvan koalueen ominaisuuksista. CROP-WATN-mallilla tehdyissä simulaatioissa Lapualla sijaitsevalle peltoalueelle salaojavalunnan ja pintavalunnan vuosisumman vähennäminen oli suurimmillaan n. 10 % tavanomaiseen salaojituksen verrattuna (Paasonen-Kivekäs ym. 2000).

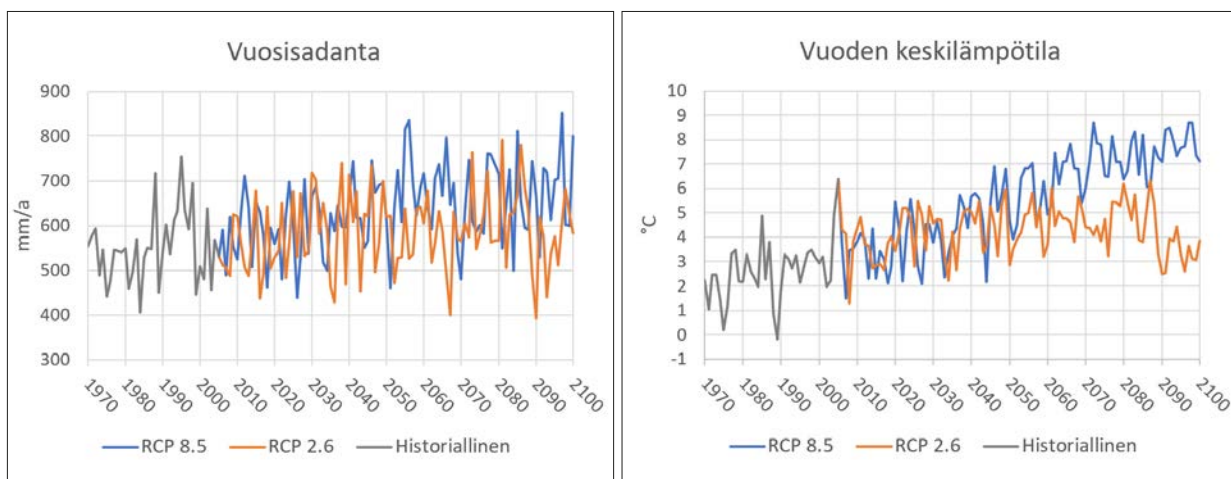
3.4.3 Ilmastonmuutoksen vaikutus säätösalaajitukseen

Kalibroidulla ja validoidulla mallilla tutkittiin ilmastonmuutoksen vaikutusta kahdella päästöskenaariolla (RCP 2.6 ja RCP 8.5) säätösalaajituksen toimintaan. Molempien päästöskenaarioiden (RCP 2.6 ja RCP 8.5) mukaan vuosisadanta kasvaa ja vuoden keskilämpötila nousee (kuva 3.43). Muutokset ovat huomattavampia RCP 8.5 skenaariossa, jossa päästöjen kasvu kiihtyy. Suuremmista vuosisateista ja korkeammasta lämpötilasta huolimatta potentiaalisen haihdunnan ei ennusteta kasvavan tulevaisuudessa, koska globaali säteily pienenee lisääntyneen pilvisyyden takia (esim. Salla 2020).

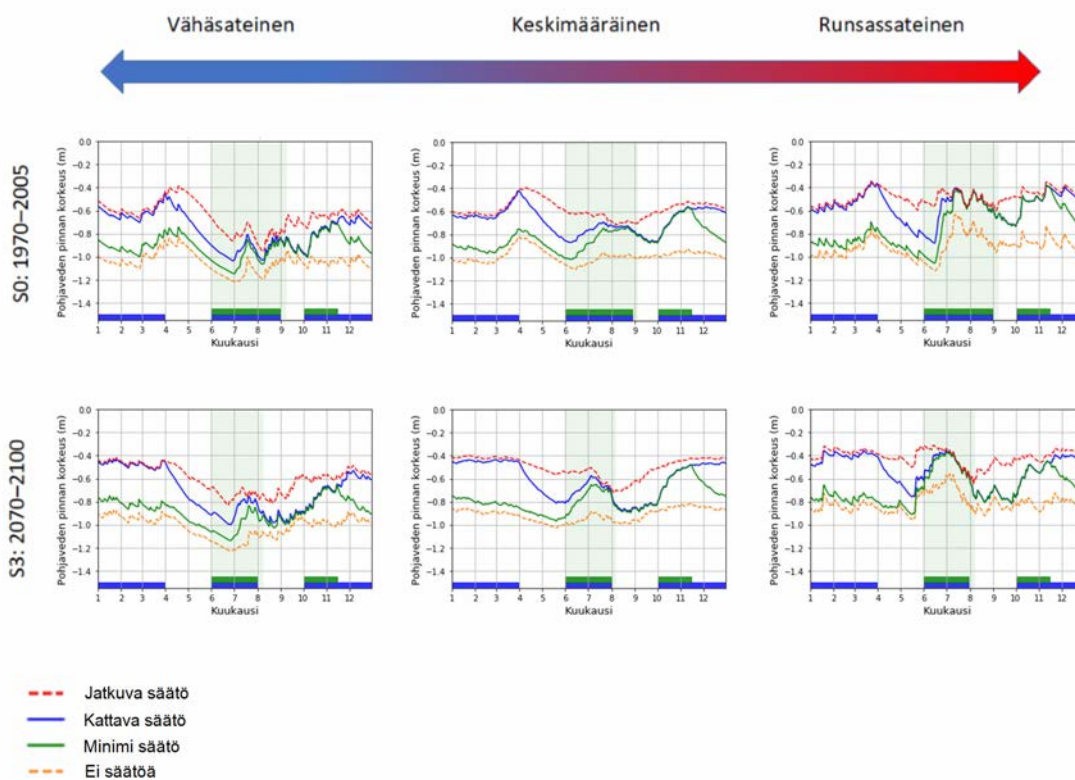
Tarkasteltavien ajanjaksojen vuosista (taulukko 2.4.) muodostettiin keskiarvoiset vuodet kullekin ajanjaksolle. Näin voitiin verrata, kuinka hydrologiset muuttujat kehittyvät ajanjaksolta toiseen. Ääripäiden, eli kuivien ja runsassateisten vuosien, tulosten erottamiseksi tarkasteluja tehtiin erikseen neljälle kuivimmalle ja märimmälle vuodelle keskimääräisen vuoden lisäksi (kuva 3.44).

Kuvassa 3.44 on tarkasteltu, kuinka vähäsateisina ja runsassateisina vuosina esiintyvien pohjavedenpintojen tasot eri säätöskenaariolla muuttuvat keskimääräisen sateiseen vuoteen nähden. Kuvassa 3.44 seurataan säädön vaikutuksen ajallista kehittymistä historialliselta jaksolta (S0) kaukaiseen tulevaisuuteen (S3).

Säädön vaikutus pohjavedenpinnan tasoon kaukaisessa tulevaisuudessa kasvaa alkuvuodesta, mutta pienenee loppuvuoden osalta. Säädön vaikutus kasvukauden aikaiseen pohjavedenpintaan kasvaa tulevaisuudessa eniten vähäsateisina vuosina: Kasvukauden lopussa jatkuvan säädön ja tavanomaisen salaojituksen välinen ero pohjavedenpinnan tasossa on historiallisella jaksolla noin 0,2 m ja kaukaisen tulevaisuuden jaksolla miltei 0,4 m.



Kuva 3.43. Ilmastonmuutoskenaarioiden vaikutus vuosisadantaan ja lämpötilaan päästökkenaarioilla RCP 2.6 ja RCP 8.5 Sievin alueella.



Kuva 3.44. Keskimääräiset pohjavedenpinnat vähäsateisille, keskisateisille ja runsassateisille vuosille ajanjaksoille S0 ja S3. Ajanjakson S3 tulokset ovat päästökkenaariosta RCP 8.5. Pysty akselin negatiivinen korkeusasma on sama kuin etäisyys maanpinnasta.

Kattavan säädön vesitasekomponenttien muutosta tavanomaisen salaojituksen skenaarioon on verrattu taulukossa 3.13. Säädön salaojavaluntaa vähentävä vaikutus laskee historiallisen aikajakson 19 %:sta kaukaisen tulevaisuuden 13 %:iin, ja samalla pohjavesivaluntaa lisäävä vaikutus laskee 45 %:sta 43 %:iin. Säättö näyttää vähentävän pintavalunnan määrää, mutta toisaalta kaikilla aikajaksoilla keskimääräinen pintavalunta oli alle 1 mm a⁻¹. Kattava säättö on säättöskenaarioista se, joka olisi tehtyjen simulaatioiden mukaan optimaalisin ratkaisu viljelyn ja vesistökuormituksen näkökulmasta. Huomionarvoista on se, että simuloinnissa ei ole huomioitu säädön vaikutusta maan kantavuuteen, joka tavallisesti edellyttää säädön poistamista viljelytoimenpiteiden aikana kasvukauden alussa ja lopussa.

Taulukkoon 3.13 verrattuna suurin ero on havaittavissa pintavalunnan osuudessa. Vuotuiset pintavaluntamäärät ovat kuitenkin molemmissa tapauksissa pieniä muihin vesitasekomponentteihin verrattuna (40 mm a⁻¹). Sievin koekentällä on näköhavaintojen mukaan esiintynyt pintavaluntaa etenkin keväällä, mutta sitä ei ole koeasetelmassa mitattu. Pintavalunnan mallinnuksessa oli haasteita simuloitavan 2D profiilin johdosta, mistä johtuen simulaatioissa pintavalunnan määrä jäi pieneksi. Ilmastonmuutossimulaatioissa pintavaluntaa muodostui laskentaverkon vasemmanpuoleisen avo-ojan kautta sekä laskentaverkon vaakatasossa läpyleikkaavan pintavaluntakeräimen kautta (kuva 2.15). Sievin mitatun ajan (2015–2019) simulaatioissa pintavalunta muodostui vain läpyleikkaavan pintavaluntakeräimen kautta (kuva 2.15).

Taulukon 3.13 ja taulukon 3.12 vesitasekomponenttien tulokset eroavat toisistaan, koska ensimmäisessä tarkastellaan keskimääräisiä vuosia (noin 30 vuoden keskiarvot) ja jälkimmäisessä yksittäisiä vuosia. Kuitenkin on huomattava, että taulukossa 3.13 on skenaariotulokset, joissa säättö on päällä pitemmän ajan kuin taulukon 3.12 skenaariossa. Kuitenkaan salaojavalunta ei vähene enenevässä määrin säättöajan pidentyessä.

Taulukko 3.13. Säättöskenaarion (kattava säättö) vesitasekomponenttien muutos (%) suhteessa tavanomaiseen salaojitukseen. Päästöskenaariolla RCP 8.5.

Ajanjakso	Salaojavalunta	Pintavalunta	Pohjavesivalunta	Haihdunta
Historiallinen	-19 %	-38 %	45 %	3 %
Nykytulevaisuus	-16 %	-45 %	44 %	2 %
Lähitulevaisuus	-14 %	-13 %	44 %	1 %
Kaukainen tulevaisuus	-13 %	-39 %	43 %	1 %

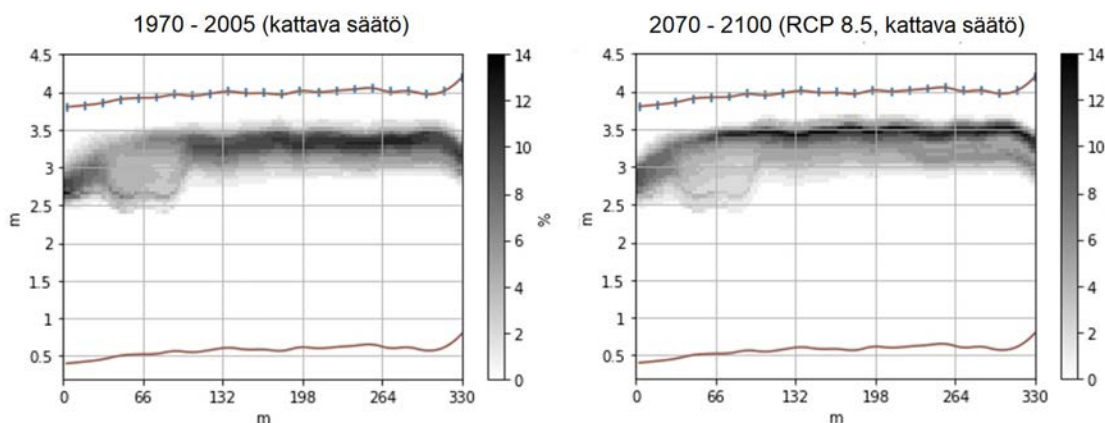
3.4.4 Valtaojan kuivatusvaikutus

Ilmastoaikasarjojen simulaatioissa peltoprofiilin vasempaan reunaan oli asetettu 1,5 m syvä avo-oja (kuva 2.15), jonka tarkoitus oli kuvata mahdollisen valtaojan kuivatusvaikutusta. Ojan vaikutusalue käy ilmi kuvan 3.45 pohjavedenpintojen sijoittumisesta simuloitavan peltoalueen pituusprofiiliin, joka ulottui yli 300 metrin päähän valtaojasta. Kuvassa on esitetty tunnitaiten pohjavedenpinnan korkeuksien esiintymistiheys ajanjaksoilla 1970–2005 ja 2070–2100 säättöskenaariossa 1. Pohjavedenpinnantasot laskevat alle salaojasyvyyden (1 m).

Vettä ei padotettu avo-ojassa vaan simulaatioissa veden annettiin virrata vapaasti pohjavesivaluntana avo-ojaan.

Simuloitava peltoalue on suhteellisen tasainen (keskikaltevuus alle 0,2 %). Myös tasisella pellolla pellon viereinen avo- tai valtaoja, joka ulottuu alle salaojasyvyyden, saa aikaan syvempiä pohjavedenpintoja jopa 100 metrin säteellä verrattuna muuhun kauempan peltoalueeseen (> 100 metrin etäisyydellä ojaista). Tulokset antavat viitteitä siitä, että padottamalla vettä valtaojassa, voitaisiin vähentää pohjavesivaluntaa pellolta ojaan ja näin ehkäistä pohjavedenpinnan laskua alle salaojasyvyyden.

Pohjavedenpinnat pellon pituusprofiilissa



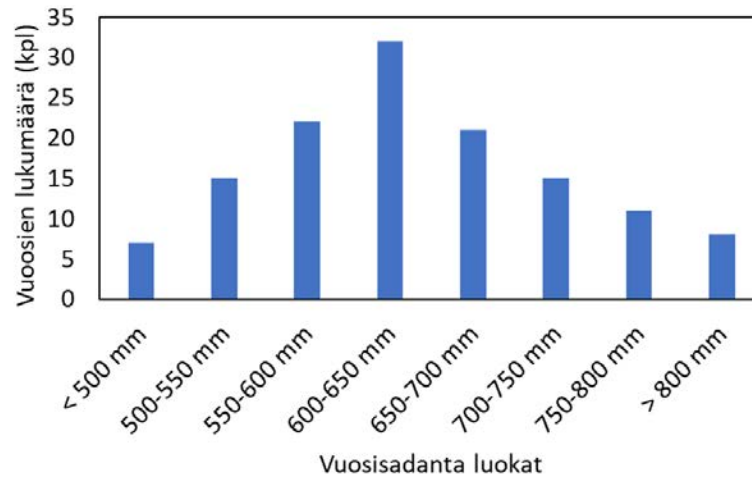
Kuva 3.45. Pohjavedenpintojen sijoittuminen pellon pituusprofiilissa. X-akseli osoittaa etäisyyden valtaojasta (m). Y-akseli osoittaa korkeustason (m), johon on merkitty maanpinta (ruskea viiva pisteillä) ja läpäisemätön pohja (yhtenäinen ruskea viiva) sekä pohjavedenpinta (harmaan sävyillä). Pohjavedenpintojen esiintymistiheys on merkitty %-palkin värityksellä.

3.4.5 Hydrologisten vuosien tarkastelu

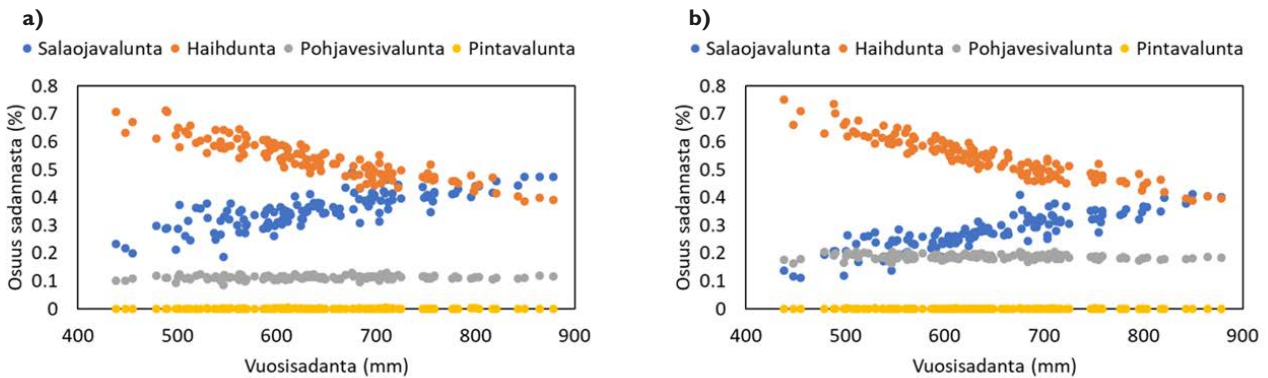
Ilmastoaikasarjojen mukaisia simulaatiotuloksia tarkasteltiin tarkemmin sen mukaan, miten hydrologia muuttuu vuosisadannan suhteen. Jatkuvan säädön skenaarion (RCP 2.6) 130 vuoden vuosisadannoista muodostuu kuvan 3.46 mukainen jakauma.

Kuvasta 3.47 voidaan nähdä sadannan jakautuminen vesitasekomponentteihin (haihdunta, salaojavalunta, pohjavesivalunta ja pintakerrosvalunta) tavanomaisen salaojituksen ja säätösalojituksen skenaarioissa, kun vuosisadannan suuruus muuttuu. Kummassakin skenaariossa (tavanomainen salaojitus ja säätösalojitus) vesitasekomponentit käyttäytyvät vuosisadannan muuttuessa samansuuntaisesti: Pohjavesivalunnan vuosittainen määrä ei muutu sadannan mukaan toisin kuin salaojavalunta, joka kasvaa vuosisadannan kasvaessa. Haihdunta puolestaan pienenee vuosisadannan kasvaessa.

Muutos tavanomaisen salaojituksen ja säätösalojituksen välillä näkyy selvästi salaojavalunnan ja pohjavesivalunnan suhteessa: Säätösalojitusskenaariossa pohjavesivalunnan osuus sadannasta kasvaa ja salaojavalunta pienenee. Haihdunnassa ei tapahdu suuria muutoksia tavanomaisen salaojituksen ja säätösalojituksen välillä. Kuivempina vuosina haihdunta kuitenkin lisääntyy säätösalojitusskenaariossa.



Kuva 3.46. Ilmastoskenaarion (RCP 2.6) mukaiset vuosisadannat luokiteltuna aikaväliltä 1970–2100.



Kuva 3.47. Vesitasekomponentit vuosisadannan mukaan a) tavanomaiselle salaojitukselle ja b) säätösalaojitukselle.

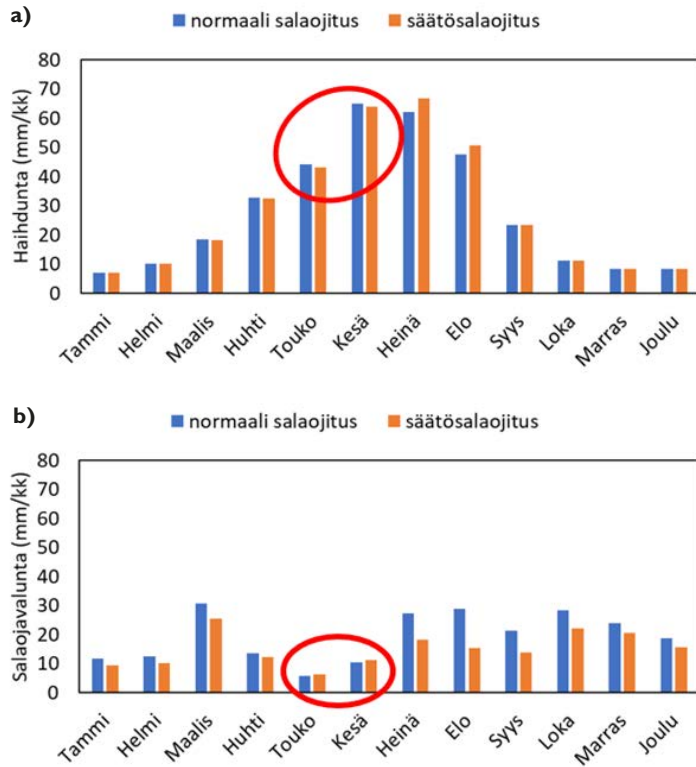
Kuvan 3.48 keskimääräisistä kuukausittaisista haihdunnoista nähdään, että laskennallinen haihdunta on syys–huhtikuussa lähes sama tavanomaisella salaojituksella ja säätösalaojituksella. Heinä–elokuussa haihdunta on säätösalaojituksessa selvästi suurempi tavanomaiseen salaojitukseen verrattuna.

Kuukausittaiset salaojavalunnat ovat suurempia tavanomaisen salaojituksen skenaariossa kuin säätösalaojituksen skenaariossa (kuva 3.48b). Kuitenkin touko–kesäkuussa salaojavalunta on aavistuksen suurempi säätösalaojituksessa verrattuna tavanomaiseen salaojitukseen. Vastaavasti haihdunta on touko–kesäkuussa suurempi tavanomaisessa salaojituksessa kuin säätösalaojituksessa.

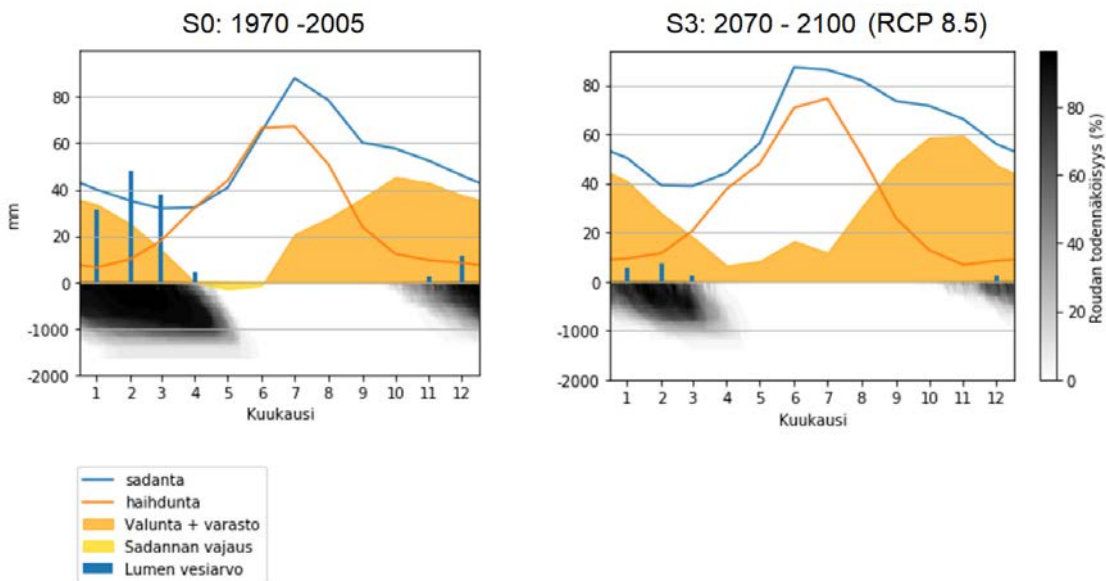
Kuvassa 3.49 on visualisoitu simuloitu ilmastonmuutoksen vaikutus hydrologiseen vuoteen päästöskenaarion RCP 8.5 mukaisesti. Kuvassa verrataan historiallista aikajaksoa 1970–2005 (S0) ja kaukaisen tulevaisuuden aikajaksoa 2070–2100 (S3). Jälkimmäisellä aikajaksolla valunta + varasto on suurempi koko vuonna heinäkuuta lukuun ottamatta. Alkuvuoden lumen vesiarvo vähenee 25–40 mm ja roudan sulaminen aikaistuu noin kuukaudella.

Lumen vesiarvon suuri pieneneminen selittää kevään pohjavedenpinnan huipun katoamisen (kuva 3.44) kaukaisessa tulevaisuudessa (S3: 2070–2100).

Kuvassa 3.49 esitetty haihdunta kuva mallin simuloimaa todellista haihduntaa. Malli-simulaatioissa lähtötietoina käytetty potentiaalinen haihdunta on suurempi. Jos haihdunta olisi lähempänä potentiaalisen haihdunnan tasoa, kuvaan 3.49b muodostuisi sadannan vajuus ja kuivatustarvetta kesäkuukausina ajanjaksolla S3 ei vajuuden johdosta ilmenisi.



Kuva 3.48. Keskimääräiset (130 vuoden) kuukausittaiset a) haihdunnat ja b) salaojavalunnat tavanomaiselle salaojitukselle (sininen) ja säätösalaajitukselle (oranssi).



Kuva 3.49. Ilmastonmuutoksen vaikutus hydrologiseen vuoteen (RCP 8.5) ajanjaksolla 1970–2005 (vasemalla) ja ajanjaksolla 2070–2100 (oikealla).

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vesitalouden hallinta vesiensuojelussa (VesiHave) -tutkimushankkeessa selvitettiin, voidaan peltoalueiden vesistökuormitusta vähentää ja pellon tuottokykyä nostaa täydennysojituksella, sääätosalaojituksella, salaojakastelulla, valtaoajan padotuksella, biologisella kuohkeutuksella ja fosforilannoituksella. Sääätosalaojituksen vaikutuksia peltoalueen hydrologiaan tarkasteltiin eri ilmastoskenaarioissa. 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. Nummelan koalueella täydennysojitus nopeutti pohjavedenpinnan laskua ja vähensi pintamaan märkyysongelmia. Kuivatustilan parantaminen täydennysojituksella oli välttämätön, mutta ei yksinomaan riittänyt satotason nostamiseksi vaan tarvittiin lisäksi muita perusparannustoimenpiteitä ja parempi maan ravinnetila.

Maan rakenteen parantamiseksi Nummelassa toteutettiin viisi vuotta täydennysojituksen jälkeen biologinen kuohkeutus syväjuurisia kasveja käyttäen. Kasvuston perustaminen on pitkäaikainen prosessi, jonka vaikutukset maan rakenteeseen ja satoon voidaan arvioida vasta muutamien vuosien päästä.

Ravinnetilan parantamisen vaikutusta satoon tutkittiin Nummelan koalueella fosforilannoitekokeessa. Maan viljavuusfosfori oli alkujaan 2–3 mg l⁻¹. Satovaste näkyi vasta lannoitemäärillä 30 ja 45 kg ha⁻¹. Suurimmat lannoitemäärät nostivat pintakerroksen (0–10 cm) fosforipitoisuutta, mutta syvemmillä maassa ei näkynyt muutoksia. Fosforitase oli pienillä lannoitemäärillä negatiivinen, lähellä nolaa lannoitemäärällä 15 kg ha⁻¹ ja sitä suuremmilla määrillä selvästi positiivinen.

Täydennysojitus muutti valunta- ja kuormitusreittejä pellolta valtaojaan. Ojitus lisäsi salaojavalunnan osuutta salaojavalunnan ja pintakerrosvalunnan summasta. Ravinne- ja kiintoainepitoisuudet olivat pintakerros- ja salaojavalunnassa melko lähellä toisiaan. Kuormituksen muutos määräytyi pääasiallisesti valunnan mukaan, joten salaojien kautta tuleva vesistökuormitus kasvoi täydennysojituksen jälkeen. Pintavalunta 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.

Korkea satotaso ja oikein mitoitettu lannoitus ovat oleellisia ravinnetaseiden ja huuhtoutumariskin pienentämiseksi. Pellon kasvukunnon parantaminen vaatii perusteellista selvitystyötä siihen vaikuttavista tekijöistä, kuten ojituksesta, maan rakenteesta, kalkituksesta ja ravinnetilasta, jotta toimenpiteet voidaan ajoittaa ja kohdistaa optimaalisesti. Jos kasvukunto päästetään huonoon tilaan, sen parantaminen saattaa olla pitkäaikaista ja kallista.

Säätösalaajitus ja salaajakastelu

Sievin koekentän tulokset osoittavat, että säätösalaajituksella pystytään pitämään pohjavedenpintaa kasvukauden alussa hieman korkeammalla kuin tavanomaisesti salaajitetulla alueella (vertailualueella). Kuivina kausina pohjavedenpinta laski selvästi alle salaajitus-syvyyden. Pohjavedenpinnan pitäminen tavanomaista salaajitusta korkeammalla säätösalaajituksella edellyttää, että huonosti vettä läpäisevä kerros sijaitsee kohtuullisen lähellä salaajisyvyyttä, jotta lohkolta ei tapahdu voimakasta pohjavesivirtausta ympäröiville alueille.

Salaajakastelu, jossa vettä pumpattiin salaajiin, nosti pohjaveden pintaa ja hidasti pohjaveden laskua. Kastelu on aloitettava riittävän ajoissa ja ennen kuin pohjavedenpinta laskee alle salaajisyvyyden. Veden syöttö salaajiin tulee toteuttaa pienellä teholla, jotta vesi ehtii imeytyä maahan ja vältetään ylivuoto padotuskaivosta. Kasteluveden pumppaus poltto-moottorikäyttöisellä pumpulla on mahdollista, mutta se osoittautui työlääksi ja kalliiksi.

Sievissä satotasot (ruis ja ohra) olivat säätösalaajitetulla alueella hieman korkeammat kuin vertailualueella.

Mittausten (kesäkuu 2019 – joulukuu 2020) perusteella säätösalaajitus ei juurikaan vähentänyt salaajavaluntaa ja sen mukana tulevaa kuormitusta. Ravinne- ja kiintoainepitoisuuksissa ei ollut havaittavissa systemaattisia eroja eri ojitusalueiden välillä. Mallilla saatujen simulointitulosten (2015–2019) mukaan säätösalaajitus vähensi vuotuista salaajavaluntaa. Mallinnustulosten perusteella pohjavesivalunta lisääntyi ja tietyissä olosuhteissa myös pintavalunta. Säädön vaikutukset valuntaoloihin saadaan käytännössä esille vasta monivuotisilla mittauksilla.

Simulaatiotulosten mukaan säädön vaikutus salaajavalunnan vähenemiseen riippuu ennen kaikkea sen ajoituksesta eikä niinkään padotuksen kestosta. Syksyaikaisella säädöllä oli suurin vaikutus salaajavalunnan vähenemiseen, mikä oletettavasti vähentää kuormitusta valtaojaan.

Säätösalaajituksen toteuttamiskelpoisuuteen vaikuttaa oleellisesti pellon kaltevuus, hydrologiset olosuhteet lohkolta ja sitä ympäröivillä alueilla, paikalliset maaperäolosuhteet sekä sääolosuhteet. Säädön vaikutukset riippuvat kasvukauden sääolosuhteista, erityisesti sadannan määrästä ja sen ajallisella jakautumisesta.

Säätösalaajituksen ja salaajakastelun soveltuvuus tulee arvioida tapauskohtaisesti sekä ensi-, täydennys- ja uusintaajituksessa. Ojaväli tulee olla tavanomaista pienempi salaajakastelua käytettäessä.

Valtaojan padotus

Valtaojan padotus settipadolla piti vedenpinnan valtaojassa keväällä ja alkukesästä padotustasossa, kunnes se haihdunnan seurauksena kuivui lähes kokonaan. Keväällä pohjavedenpinnan korkeudet pelloilla molemmin puolin valtaojaa noudattivat pitkälti maanpinnan muotoa ja laskivat alkukesän aikana vähitellen.

Matemaattisella mallilla saatujen simulatiotulosten mukaan valtaojan vaikutus näkyi tasaisella alueella jopa 100 metrin etäisyydellä alemmina pohjavedenpintoina kuin kauempana peltoalueella. Tämä osoittaa, että padottamalla vettä valtaojassa tasaisilla alueilla voidaan hidastaa pohjavedenpintojen laskua.

Valtaojan tilavuus on kasteluveden varastointia varten melko rajallinen. Vaikka onnistuttaisiin varastoimaan kevätvalunnasta osa, niin vesimäärä riittää vain alkukasvukaudelle pienelle peltoalueelle. Riittävä kasteluveden saanti edellyttää, että vettä pystytään keräämään ja varastoimaan peltoalueen ulkopuolisilta alueilta, kuten metsä- ja suoalueilta. Investointi kastelujärjestelmiin on perusteltua vain silloin, jos kasteluvettä on riittävästi saatavilla.

Valtaojan padotuksen vesiensuojelullinen merkitys perustuu siihen, että vedenpinnan laskua ojassa ja sitä ympäröivillä peltoalueilla voidaan hidastaa, mikä parantaa kasvien veden saantia. Padotuksen vaikutusalue on sitä suurempi mitä tasaisempi peltoalue on. Sievissä padotus settipadolla toimi tehokkaasti. Patokorkeutta ja patotyyppiä valittaessa on otettava huomioon paikalliset ekologiset näkökohdat. Valtaojan perkaushankkeen yhteydessä tulee arvioida laajasti myös padotuksen hyödyt ja haitat sekä tuotannon että ympäristön kannalta. Perkaushankkeissa tulisi nykyisin käyttää luonnonmukaisen vesirakentamisen menetelmiä mahdollisuuksien mukaan.

Säätösalaajituksen vaikutus pellon hydrologiaan eri ilmastomuutoskenaarioissa

Säätösalaajituksen ja tavanomaisen ojituksen vaikutuksia vesitaseen komponentteihin eri ilmastomuutoskenaarioissa tarkasteltiin matemaattisella mallilla.

Tässä tutkimuksessa käytetyt ilmastomuutoskenaariot (RCP 2.6 ja RCP 8.5) ovat esimerkkejä laajasti käytössä olevista skenaarioista. Niiden tuottamat säämuuttujien aikasarjat vuosille 1970–2005 poikkesivat selvästi Sievin seudun mitatuista havainnoista, minkä vuoksi käytetty sääaineisto korjattiin havaintojen perusteella. Ilmastoajaksarjat osoittautuivat käytännölliseksi, kun halutaan arvioida muutoksen suuntaa nykyhetken ja tulevaisuuden välillä. Hankkeessa todettiin, että ilmastoskenaarioiden tuottamia aikasarjoja voidaan hyödyntää peltomittakaavan tutkimuksissa, vaikka tarkasteltava alue on pienempi kuin ilmastomallien käyttämä resoluutio (50 km x 50 km). Aikasarjojen epävarmuuden takia tässä hankkeessa ei keskitytty tulosten absoluuttisiin arvoihin vaan muutossuunnan vertailuun. Tällä vältettiin siirtämästä lähtötietojen epävarmuutta simulaatiotuloksiin.

Ilmastomuutoskenaarioiden mukaan vuosisadanta kasvaa ja vuoden keskilämpötila nousee. Selkeä muutos on, että tulevaisuudessa kasvukausi pitenee ja talven lumipeitteinen aika lyhenee. Suuremmasta vuosisadannasta ja korkeammasta lämpötilasta huolimatta potentiaalisen haihdunnan ei ennusteta kasvavan tulevaisuudessa, koska globaali säteily pienenee lisääntyneen pilvisyyden takia.

Tulevaisuuden aikajaksoissa vuodet muuttuvat sateisemmiksi haihdunnan pysyessä melko samankaltaisena, minkä seurauksena vuotuinen valunta kasvaa. Salaajituksen säädöllä salaojavaluntaa voidaan vähentää, jolloin kuitenkin pohjavesivalunta lisääntyy. Säätösalaajituksen merkitys tulevaisuudessa kasvaa, koska pohjavedenpinta pysyy mallinnustulosten mukaan pitemmän aikaa säätösalaajituksen vaikutusalueella eli maanpinnan ja salaajasyvyyden välissä. Etenkin kuivina vuosina talvisen säädön vaikutus alkukasvukauden pohjavedenpintojen tasoon kasvaa tulevaisuudessa.

FLUSH-malli osoittautui joustavaksi työkaluksi ilmastomuutoksen, kuivatusjärjestelmien ja pellon vesitalouden säätövaihtoehtojen laskennalliseen tarkasteluun. FLUSH-malli soveltuu savimaiden lisäksi myös hieta- ja hiesumaiden hydrologian tarkasteluun. Kalibrointi- ja vali-

dointitulosten mukaan suurimmat epävarmuudet simulaatiotuloksissa ajoittuivat talviaikaan, etenkin lumen sulamisen ajoittumiseen. Simulaatioissa padotus vaikutti samalla lailla kaikissa salaojissa, vaikka todellisuudessa säädön vaikutus oli suurimmillaan lähellä säätökaivoa.

Jatkotutkimustarpeet

Peltoalueiden vesitalouden hallinta on keskeinen tekijä vesiensuojelussa. Paikallis- ja peruskuivatus-toimenpiteiden ensisijainen tavoite on pellon tuottokyvyn nosto ja satopotentiaalinen hyödyntäminen, mikä vähentää ravinteiden huuhtoutumisriskiä. Yhdistämällä valtaojan padotusta ja säätösalaajitusta sekä salaojakastelua voidaan parantaa kasvuolosuhteita, ja sitä kautta vähentää ravinnehuuhtoumia. Ilmastomuutokseen sopeutumisessa ja ääri-ilmiöiden lisääntyessä säädön tarve korostuu.

Vesitaloudellisten toimenpiteiden vaikutusten arviointi muuttuvissa olosuhteissa edellyttää pitkäaikaista (10–20 vuotta) ja systemaattista kokeellista tutkimusta sekä peltoalueen että valuma-alueen tasolla. Lähtötilanteen kartoitus jää usein tekemättä lyhytaikaisissa hankkeissa, sillä se vaatii vähintään 2–3 vuoden seurannan ennen kuin toimenpiteitä tehdään. Veden ja ravinteiden kulkeutumisreittien ja -prosessien todentaminen edellyttää erittäin mittavia koejärjestelyjä, jotta saadaan mahdollisimman yksikäsitteistä tietoa peltoalueiden vesitalouden hallintaan vesiensuojelussa. Lisäksi tarvitaan laskennallista tutkimusta, jonka avulla voidaan analysoida toimenpiteiden vaikutuksia erilaisissa hydrologisissa, maaperä-, viljely- ja sääolosuhteissa sekä tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa.

Lisää tietoa tarvitaan

- säätösalaajituksesta, salaojakastelusta ja valtaojien padottamisen toteuttamisesta ja vaikutuksista pellon hydrologiaan, satotasoon, maan ominaisuuksiin ja vesistökuormitukseen
- padotuksen toteuttamismahdollisuuksista perkaushankkeiden yhteydessä luonnontukan vesirakentamisen menetelmiä käyttäen
- valuma-alueen vesitalouden hallinnasta vesiensuojelussa huomioimalla eri maankäyttömuotojen vuorovaikutus
- perus- ja paikalliskuivatuksen vuorovaikutusten laskennallisesta kuvaamisesta
- pohjavedenpinnan syvyyden merkityksestä kasvien vedensaantiin, maan kantavuuteen ja kasvihuonekaasupäästöihin
- säätökaivon padotuskorkeuden moottoriavusteisesta säädöstä säätökaivon vedenkorkeuden perusteella automaattisesti tai kauko-ohjattuna
- säätösalaajituksen soveltuvuudesta eri maalajeille ja peltoalueille
- säätösalaajitukseen soveltuvien alueiden määrästä Suomessa
- kasteluveden pumppauksen toteuttamisesta mahdollisimman kustannustehokkaasti
- automaattisten vedenlaatumittareiden käyttömahdollisuuksista valumavesien laadun mittauksessa
- pellon biologisen ja mekaanisen kuohkeutuksen pitkäaikaisvaikutuksista
- eri ilmastoskenaarioiden vaikutusten arvioinnista
- vesistökuormituksesta muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa ja toimenpiteiden pitkäaikaisista vaikutuksista.

Kirjallisuusviitteet

- Andersson, A.V., Wiklert, P. 1970. Markfysikaliska undersökningar i odlad jord. Grundförbättring, 23: 1–2, 3–76.
- 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.
- Carstensen, M.V., Hashemi, F., Hoffmann, C., Zak, D., Audet, J., Kornvang, B. 2020. Efficiency of mitigation measures targeting nutrient losses from agricultural drainage systems: A review. *Ambio* 49: 1820–1837. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01345-5>
- EURO-CORDEX. 2020. <https://www.euro-cordex.net/>
- Hägglom, O., Härkönen, L., Joensuu, S., Keskiarja, V., Äijö, H. 2020. Maa- ja metsätalouden vesitalouden suuntaviivat muuttuvassa ympäristössä. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2020:6, 69 s. [verkkojulkaisu]. [viitattu 6.3.2021]. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162211/MMM_2020_6.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- 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
- Jarvis, N. J. 2007. A review of non equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523–546.
- Joukainen, S., Yli-Halla, M., 2003. Environmental impacts and acid loads from deep sulfidic layers of two well-drained acid sulfate soils in western Finland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 95:1. S. 297–309.
- Karvonen, T. 2016. Matemaattiset mallit maan vesi- ja ravinnetalouden säädössä. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. (toim.). *Maan vesi- ja ravinnetalous, ojitus kastelu ja ympäristö*. Salaojayhdistys ry, Helsinki, ss. 429–451.
- 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/pxweb/fi/LUKE/LUKE__02%20Maatalous__02%20Rakenne__12%20Viljelysmaan%20hoito%20ja%20kastelu/05_Ojitettu_pelto_puutarha_ala_alueet.px/table/tableViewLayout1/
- Myllys, M. 2019. Säätsalaojituksessa hyötyä turvemilla. Salaojayhdistys ry:n jäsenjulkaisu 1/2019. S. 14–18.
- Nash, J. ja Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10, pp. 282–290.
- Nousiainen, R., Warsta, L., Turunen, M., Huitu, H., Koivusalo, H., Pesonen, L., 2015. Analyzing subsurface drain network performance in an agricultural monitoring site with a three-dimensional hydrological model. *J. Hydrol.*, 529, 82–93.

- Ovaska, S., Liski, E., Äijö, H., Häggblom, O., Paasonen-Kivekäs, M. 2021. Perusparannukset ja ravinnetase suomalaisessa peltoviljelyssä. PERA-hankkeen loppuraportti. Käsikirjoitus. Julkaistaan Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote -sarjassa.
- 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.
- Ruokavirasto 2021. [verkkoaineisto]. [viitattu 6.3.2021]
<https://www.ruokavirasto.fi/viljelijat/tuet-ja-rahoitus/ymparistokorvaus/peltomaan-laaturasti/>
- Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Kämäräinen, M. 2016. Projections for the duration and degree days of the thermal growing season in Europe derived from CMIP5 model output. *International Journal of Climatology*, 36(8), 3039-3055.
- Saarela, I. 1995. Fosforilannoituksen porraskokeet 1977–1994. MTTK:n tiedote 16/1995.
- Salla, A. 2020. Säättösalaojitus tulevaisuuden ilmastoskenaarioissa. Diplomityö, Aalto-yliopisto, 56 + 1 s.
- 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., Mylly, 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.
- Seuna, P., Kauppi, L. 1981. Influence of sub-drainage on water quantity and quality in a cultivated area in Finland. *Vesihallitus, Vesitutkimuslaitoksen julkaisuja* 43: 32–47.
- Turtola, E. 2000. Ojitus, muokkaus ja lannoitus ratkaisevia fosforikuormitukselle. Salaojakeskus. Salaojakeskus ry:n jäsenjulkaisu 1: s. 14–21.
- Turtola, E., Paajanen, A. 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management*, 28, pp. 295-310.
- Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Mylly, M., Alakukku, L., Äijö, H., Puustinen, M., ja Koivusalo, H. 2013. Modeling water balance and effects of different subsurface drainage methods on water outflow components in a clayey agricultural field in boreal conditions. *Agricultural Water Management*, 121, pp. 135-148.
- 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. 2008. Pellon vesitalouden optimointi. Väiliraportti 2008. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 29. 100 s.
- 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.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 44. S. 892–898.

- Warsta, L., Karvonen, T., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., ja Taskinen, A. 2013. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. *J. Hydrol.*, 476, pp. 395–409.
- 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>
- Åström, M., Österholm, P., Bärlund, I., Tattari, S. 2007. Hydrochemical effects of surface liming, controlled drainage and lime-filter drainage on boreal acid sulfate soils. *Water, air, and soil pollution*. Vol. 179. S. 107-116.
- Äijö, H., Myllys, M., Nurminen, J., Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Korpelainen, E., Salo, H., Sikkilä, M., Alakukku, L., Koivusalo, H., Puustinen, M. 2014. Salaojitustekniikat ja pellon vesitalouden optimointi. Loppuraportti 2014. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 31. 126 s.
- Äijö H., Myllys, 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., Myllys, 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.

Liitteet

LIITE I a. Nummelan koekentän viljelytoimet vuosilta 2007–2011.

	2007	2008	2009	2010	2011
Kevätmuokkaus	10.–11.5.2007 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	9.–10.5.2008 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	27.5.2009 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	4.–5.6.2010 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)	26.–27.5.2011 joustopiikkiäkeellä 2x (Potila magnum 820)
Kevätkylvö	11.5.2007 Roope-kaura 150 kg/ha	10.5.2008 Roope-kaura 170 kg/ha	28.5.2009 Eerik-ohra 248 kg/ha	5.6.2010 Roope-kaura 160 kg/ha	27.5.2011 Ohra Annabell 234 kg/ha
Kylvölannoitus	Suomen salpietari 150 kg/ha	Suomen salpietari 100 kg/ha	Suomen salpietari 350 kg/ha	Urea 174 kg/ha = 80 kg N	Suomen salpietari 350 kg/ha (N 27 %)
Lannanlevitys keväällä	10.5.2007 liete 721 m ³ , koko kenttä	9.5.2008 liete 721 m ³ , koko kenttä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä
Torjunta- ainekäsittely	11.6.2007 MCPA	26.6.2008 MCPA	29.6.2009 MCPA 0,58 l/ha ja Ally classic 13,7 g/ha	6.7.2010 MCPA 1 l/ha	27.6.2100 Arianne S, glyfosaatilla pesäke- käsittely 27.9.2011
Puinti	7.–8.9.2007	24.9.2008	11.9.2009	7.9.2010	17.9.2011
Syysmuokkaus	22.–24.10.2007 kultivointi	26.9.2008 lautasmuokkaus	5.10.2009 kultivointi	2.11.2010 lautasmuokkaus Amazonella	kultivointi
Lannanlevitys syksyllä	16.–22.10.2007 liete 430 m ³ , koko kenttä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä

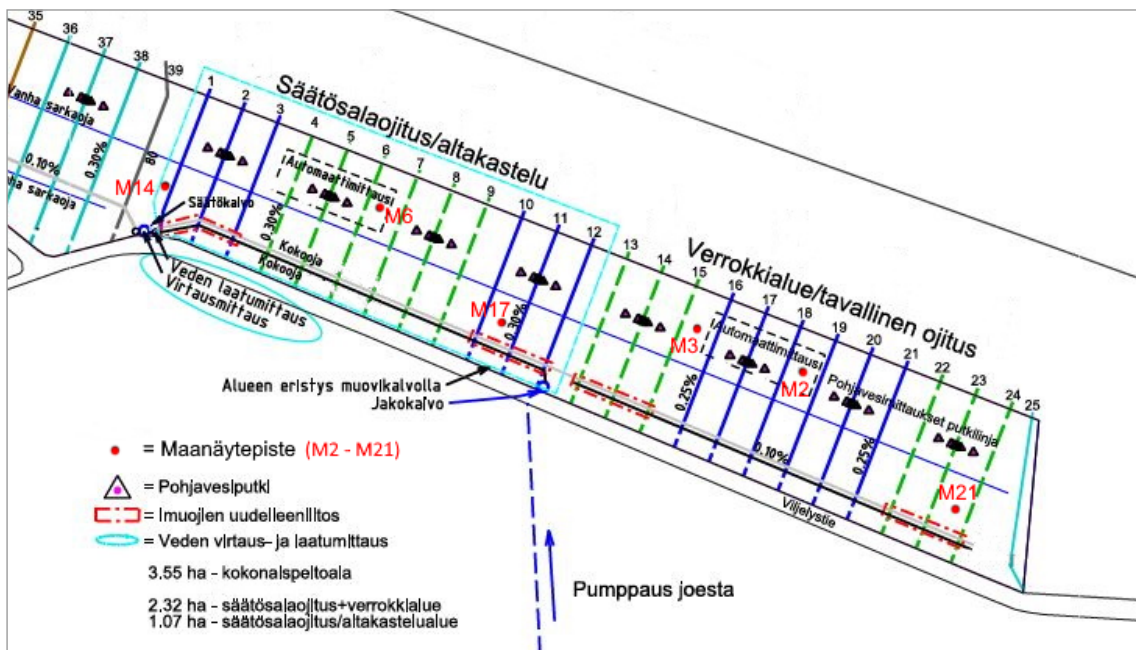
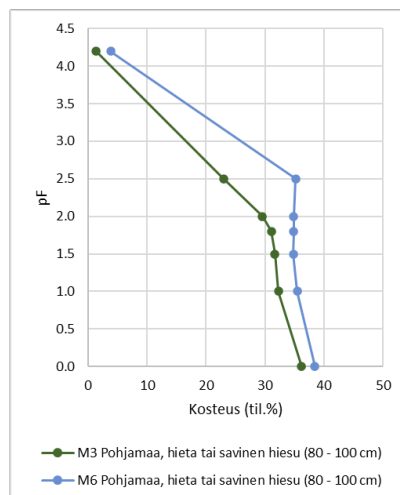
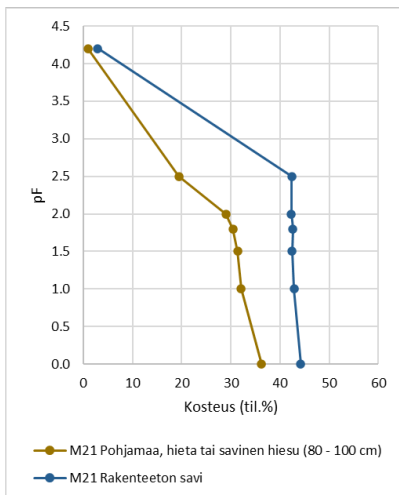
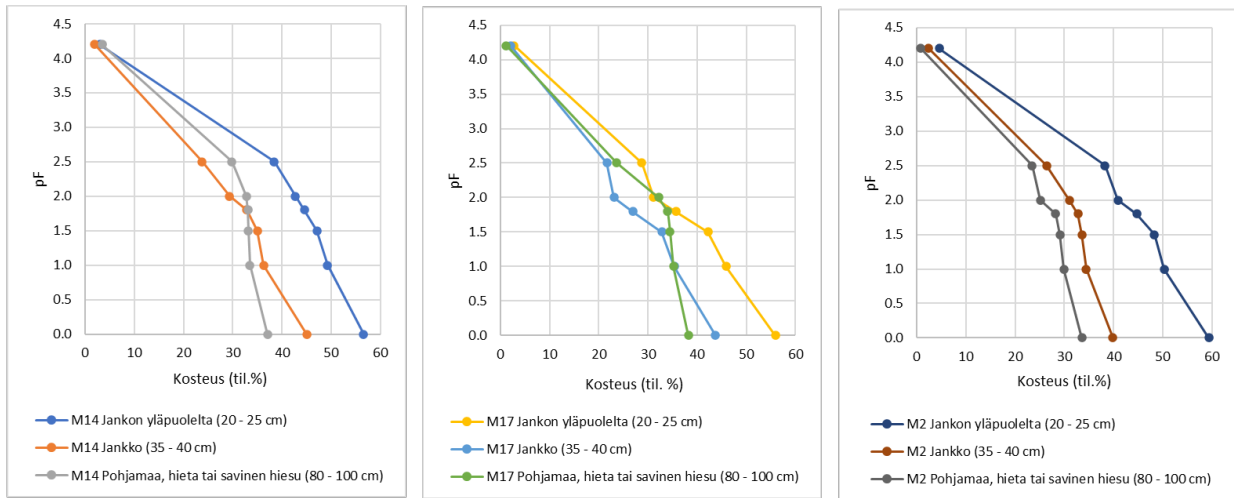
LIITE I b. Nummelan koekentän viljelytoimet vuosilta 2012–2015.

	2012	2013	2014	2015
Kevätmuokkaus	Joustopiikkiäes juuri ennen kylvöä	28.–29.5.2013 Muokkaus Catross + Potila Magnum 2 x	2 x 4.–5.6.2014 Potila Magnum (joustopiikkiäes)	Joustopiikkiäes juuri ennen kylvöä
Kevätkylvö	30.5.2012 Roope-kaura 146 kg/ha	28.–29.5.2013 Wolmari-ohra 190 kg/ ha	5.6.2014 Aukusti-ohra 189 kg/ha	28.5.2015 Vivian-kaura 190 kg/ha
Kylvölannoitus	Can27, 300 kg/ha (N 27 %)	Can27, 300 kg/ha	Can27 + Mg, 290 kg/ha	Can27, 300 kg/ha
Lannanlevitys keväällä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä	ei lietettä
Torjunta- ainekäsittely	2.7.2012 MCPA 1 l/ha	24.6.2013 MCPA 1 l/ha	7.7.2014 MCPA 1 l/ha glyfosaatti pesäkekäsittely 4.9.2014	4.7.2015 Ariane S
Puinti	12.10.2012	14.9.2013	4.9.2014	8.10.2015
Syysmuokkaus	ei tehty märkyyden takia	27.9.2013 kevytmuokkaus	19.9.2014 kultivointi	11.11.2015 kultivointi
Lannanlevitys syksyllä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä	ei syyslevitystä

LIITE 2. Sievin salaojakentän viljelytoimet vuosilta 2018–2020.

	2018	2019	2020
Kevätmuokkaus			
Miten ja milloin tehtiin	Joustopiikkiäestys (Väderstad 6 m) 23.5		Kyntö 25.5.2020 Joustopiikkiäestys (Väderstad 6 m) 26.5
Mitä kylvettiin			
Laji,lajike ja milloin	Ohra Kaarle kylvö 23.5.2020	KWS Eterno Syysruis 70 kg/ha kylvetty syksyllä	Ohra Aukusti, samalla nurmi timotei, kylvö 27.5
Kylvölannoitus			
Mikä lannoite, kuinka paljon/ha	Y3 300 kg/ha	YaraMila Pellon Y3 150 kg/ha syksyllä, keväällä 20.5 salpietari 300 kg/ha	YaraMila Pellon Y3 400 kg/ha
Lannanlevitys			
Mitä levitettiin, kuinka paljon/ha ja milloin	Ei lietelantaa		Ei lietelantaa
Torjunta-aine käsittely			
Mikä aine ja milloin	5.7 korrensäade Moddus Evo + rikka-aineet MCPA&	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
Puinti			
Milloin	18.8.	4.9.	1.9.
Syysmuokkaus			
Miten tehtiin ja milloin	Kyntö (paluuaura) 22.8, Syysrukiin kylvö 23.–24.8	Lietelanta 20 tn/ha, kevytmuokkaus lapiorullaäes	Nurmikasvipteite

LIITE 3. Sievin salaojakoekenttä, vedenpidätyskäyrät ja maanäytesteet säätösalojitetulla alueella ja tavanomaisesti ojitetulla alueella (verrokkialue).



LIITE 4. Sievin salaojakoekenttä, simuloitavan profiilin parametrien arvot.

Mallisovelluksessa käytetyt parametrien arvot. Mittauksista saadut parametrit olivat matriisin vedenpidätyskäyrän parametrit (α_M ja n_M), kokonaishuokosuus (θ_{sat}), makrohuokosten osuus kokonaishuokosuudesta (w) syvyyteen 1,15 m. Kalibroittavat parametrit olivat salaojasyvyyden alapuolisen kerroksen parametrit (kerros 1,15–3,4 m), makrohuokosten vedenpidätyskäyrän parametrit (α_F ja n_F), skaalauskerroin huokossysteemien välisessä veden vaihdossa (γ_w), sekä makrohuokoston horisontaalisen johtavuuden kerroin ($K_{h,mult}$).

Profiilin osat

Parametri	Syvyys [m]	0–58,5 m	–121,5 m	–191,25 m	–247,5 m	–315	–390
α_M [$m\ h^{-1}$]	0–0,25	15,87		6,42		8,40	
	0,25–0,4	8,79		5,06		4,19	
	0,4–1,15	0,81	0,18	1,12	1,74	4,98	1,47
	1,15–3,4	0,576					
n_M [-]	0–0,25	1,13		1,39		1,21	
	0,25–0,4	1,28		1,54		1,23	
	0,4–1,15	1,46	2,75	1,54	1,40	1,26	1,64
	1,15–3,4	1,12					
θ_s [$m^3\ m^{-3}$]	0–0,25	0,566		0,559		0,594	
	0,25–0,4	0,450		0,437		0,398	
	0,4–1,15	0,371	0,385	0,383	0,362	0,336	0,363
	1,15–3,4	0,560					
θ_R [$m^3\ m^{-3}$]	0–3,4	0,1					
K_{sat} [$m\ h^{-1}$]	0–0,25	0,1070		0,2021		0,1672	
	0,25–0,4	0,1521		0,1380		0,0580	
	0,4–1,15	0,0258	0,0185	0,0184	0,0313	0,0271	0,0354
	1,15–3,4	0,0005					
w [-]	0–0,2	0,073		0,101		0,091	
	0,2–0,4	0,087		0,083		0,054	
	0,4–1,0	0,036	0,030	0,030	0,040	0,037	0,042
	1,0–3,4	0,002					
γ_w [-]	0–1,15	0,01					
	1,15–3,4	0,1					
$K_{h,mult}$ [$m\ h^{-1}$]	0–1,15	10					
	1,15–3,4	90					
α_F [$m\ h^{-1}$]	0–1,15	10					
	1,15–3,4	7					
n_F [-]	0–1,15	1,8					
	1,15–3,4	2,0					

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry

ISBN 978-952-5345-46-9