

Turvepeltojen hiilipäästöt kuriin innovatiivisella vesienhallinnalla (Vesihiisi)

Hiilestä kiinni -tutkimus- ja innovaatio-ohjelman hanke 2021–2024

VN/28613/2020

Toimiva säätösalaoitus turvepeltojen hiili- ja ravinnepäästöjen vähentäjänä (Turvecontrol)

Makera-hanke 2020–2024

VN/4618/2020

Loppuraportti

14.5.2024

Sisällys

1. Hankkeen tavoitteet.....	1
2. Osapuolet ja yhteistyö.....	1
3. Hankkeen toteutus ja tulokset	2
3.1 Menetelmät ja aineisto.....	2
3.1.1 Työpaketti 1 (Vesienhallinnan vaikutus hiilipäästöihin).....	2
3.1.2 Työpaketti 2 (Vesitalousmallinnus).....	3
3.1.3 Työpaketti 3 (Kaukokartoitus).....	3
3.1.4 Työpaketti 4 (Taloudelliset toteuttamisedellytykset).....	4
3.1.5 Työpaketti 5 (Vesienhallinnan automatisointi).....	5
3.2 Tulokset.....	5
3.2.1 Työpaketti 1 (Vesienhallinnan vaikutus hiilipäästöihin).....	5
3.2.2 Työpaketti 2 (Vesitalousmallinnus).....	6
3.2.3 Työpaketti 3 (Kaukokartoitus).....	8
3.2.4 Työpaketti 4 (Taloudelliset toteuttamisedellytykset).....	8
3.2.5 Työpaketti 5 (Vesienhallinnan automatisointi).....	9
3.3 Toteutusvaiheen arviointi.....	10
3.4 Julkaisut.....	11
4. Tulosten arviointi	14
4.1 Tulosten käytännön sovellettavuus	14
4.2 Tulosten tieteellinen merkitys.....	16
5. Hankkeen budjetti.....	17
6. Tiivistelmä ja toimintasuositukset	18
7. Viitteet	19

1. Hankkeen tavoitteet

Vesihäisi-hanke tähtäsi hiilipäästöjen vähentämiseen tavanomaisesti viljelyiltä turvopelloilta vesienhallinnan avulla. Korkean pohjavedenpinnan on todettu olevan tehokkain keino hidastaa turpeen hajoamista ja vähentää siitä johtuvia hiilipäästöjä ilmakehään ja vesistöihin. Hankkeen tavoitteena oli edistää vesienhallinnan käyttöä päästövähennysmenetelmänä tuottamalla lisätietoa sen vaikutuksista sekä käytännön menetelmiä turvopeltojen päästövähennyspotentiaalin kartoittamiseen ja pohjavedenpinnan säätöön.

Vesihäisi-hankkeen tavoitteena oli

- tuottaa kirjallisuuteen ja uusiin mittauksiin perustuva tarkennettu arvio vesienhallinnan mahdollisuuksista vähentää hiilen häviämistä turvopellosta ilmakehään ja vesistöihin sekä selvittää vesienhallintakeinojen käytön vaikutuksia käytännön viljelyyn (Työpaketti 1)
- tuottaa hydrologisilla simulaatioilla tietoa vedenpinnan säätelymenetelmien soveltuvuudesta eri olosuhteisiin (Työpaketti 2)
- kehittää maankosteuden mittaamiseen perustuvia kaukokartoitusmenetelmiä, joita voidaan käyttää pohjaveden nostosta hyötyvien turvopeltojen tunnistamisessa ja vesienhallinta-automaation toteuttamisessa (Työpaketti 3)
- arvioida vesienhallinnan maatilatason taloudellisia edellytyksiä ja vaikutuksia sekä tunnistaa kannustimia vedenpinnansäädön käyttöönottoon (Työpaketti 4)
- toteuttaa turvopeltojen vesienhallintaan soveltuva automatisoitu, verkottunut ja etähallittava säätökaivojärjestelmä, joka tarjoaa myös mahdollisuuden altakasteluun (Työpaketti 5)

Turvecontrol-hanke alkoi vuotta aiemmin kuin Vesihäisi-hanke. Se koostui Vesihäisi-hankkeen työpaketeista 1 ja 2 supistettuina ja liitettiin osaksi Vesihäisi-hanketta. Turvecontrol-hankkeen tutkimukselliset tavoitteet sisältyvät siis Vesihäisi-hankkeeseen eikä niitä eroteltu toisistaan tutkimuksen aikana eikä tässä loppuraportissakaan.

2. Osapuolet ja yhteistyö

Vesihäisi-hanke toteutettiin Luonnonvarakeskuksen, Maanmittauslaitoksen, Oulun yliopiston ja Salaojayhdistyksen yhteistyönä vuosina 2021–2024. Kaikki osapuolet osallistuivat tutkimustyöhön ja toivat hankkeeseen oman asiantuntemuksensa. Tutkijat kokoontuivat hankkeen aikana kahden kuukauden välein (yhteensä 18 kertaa) Teams-kokoukseen, jossa tehtiin tilannekatsaus ja käsiteltiin ajankohtaiset asiat. Yhteistyötä osapuolten ja työpakettien kesken tehtiin myös erillisissä palaverissa.

Luonnonvarakeskus johti hanketta ja vastasi työpaketissa 1 kenttäkokeen hoidosta ja aineiston keruusta ja käsittelystä, työpaketissa 2 vesitalousmallinnuksesta ja työpaketissa 4 vesienhallinnan taloudellisten toimintaedellytysten selvittämisestä. Luke ja Maanmittauslaitos

kehittivät kaukokartoitusmenetelmiä työpaketissa 3 ja Oulun yliopisto vesienhallinnan automatisointia työpaketissa 5. Salaojayhdistys toimi asiantuntijana työpaketeissa 1, 4 ja 5.

Hankkeen tutkijoita olivat

Luke	Maanmittauslaitos	Oulun yliopisto	Salaojayhdistys
Kristiina Lång	Lauri Markelin	Enso Ikonen	Helena Äijö
Jaakko Heikkinen	Roope Näsi	Toni Liedes	Olle Häggblom
Merja Myllys	Joel Pitkänen	Janne Torvela	Minna Mäkelä
Mika Tähtikarhu	Arttu Kivimäki	Joni Vasara	
Timo Räsänen		Jyrki Savela	
Jere Kaivosoja			
Heikki Lehtonen			
Kauko Koikkalainen			
Antti Miettinen			
Henrik Wejberg			
Domna Tzemi			
Janne Rämö			

Turvecontrol-hankkeessa vuonna 2020 ennen Vesihiisi-hankkeen alkua olivat mukana Lukesta Merja Myllys, Jaakko Heikkinen ja Mika Tähtikarhu sekä Salaojayhdistyksestä Helena Äijö.

3. Hankkeen toteutus ja tulokset

3.1 Menetelmät ja aineisto

Hankkeessa tehtiin kokeellista tutkimusta, mallinnusta, menetelmäkehittelyä, taloudellisia laskelmia ja tuotekehitystä.

3.1.1 Työpaketti 1 (Vesienhallinnan vaikutus hiilipäästöihin)

Työpaketti 1 toteutettiin Jokioisilla sijaitsevalla koekentällä, jossa mitattiin turvepellon kasvihuonekaasupäästöjä ja ravinnehuuhtoumia ohut- ja paksuturpeisella alueella erilaisen pohjavedenkorkeuden vallitessa kahden vuoden ajan. Tutkimuksen aikana koekentällä viljeltiin monivuotista nurmea.

Kentällä oli kaksitoista noin 0,5 hehtaarin suuruista koeruutua, joista jokaisella oli oma salaojastonsa. Koeruutujen pohjavedenkorkeutta säädettiin kolmella tavalla: tavanomainen salaojitus (ojitusyvyys 1,2 m, vesi virtaa vapaasti pois pellolta), säätösalojitus (pohjavettä padotetaan ojitusyvyyttä korkeammalle tasolle eli estetään virtaamasta pois pellolta lukuun ottamatta lyhyitä ajanjaksoja ennen viljelytoimia) ja altakastelu (pumpataan lisävettä padotettuun ojaan pohjavedenpinnan muutoin laskiessa). Padotus oli säädetty säätösalojitus- ja altakasteluruuduissa 30 cm maan pinnan alapuolelle. Koekenttä oli jaettu kolmeen alueeseen, joista yhdellä oli ohut turvekerros (40–60 cm) ja kahdella paksu (100–150

cm). Turve oli keskimukaisesti maatumutta (maatumisaste 4–6 von Postin asteikolla), salaojasyvytydellä kuitenkin maatumempaa (maatumisaste 6–8). Kullakin alueella oli neljä koeruutua, joista kahdella oli tavanomainen salaojitus ja kahdella säätösalojitus. Lisäksi toisella paksuturpeisista alueista säätösalojitettuja koeruutuja kasteltiin ympäröivältä metsäalueelta valuvalla vedellä, jota pumpattiin säätökaivoon valtaojan reunaan kaivetusta kaivosta.

Jokaiselta koeruudulta tuleva salaojavalunnan määrä mitattiin, ja valumavesistä analysoitiin laboratoriossa seuraavat pitoisuudet: kok-N, DON, NO₃-N, NH₄-N, kok-P, PO₄-P, DOC, TOC ja kiintoaines. Jokaisen ojaiston alueelta mitattiin paljaan maan kasvihuonekaasupäästöjä (CO₂, CH₄, N₂O) kahden viikon välein eri olosuhteissa, ja lisäksi hiilipäästöjä seurattiin jatkuvatoimisesti neljässä koeruudussa automaattikammioilla. Näiden mittausten perusteella laskettiin ympäristökuormitus eri kosteustiloissa ohut- ja paksuturpeisella pellolla.

Säädön onnistumista seurattiin jatkuvatoimisesti mittaamalla pohjaveden korkeutta ja maan kosteutta. Lisäksi mitattiin pellon kantavuutta eri kosteusoloissa ja määritettiin säilörehusadon määrä. Taustatiedoksi määritettiin maan hydrauliset ominaisuudet.

3.1.2 Työpaketti 2 (Vesitalousmallinnus)

Työpaketin 1 pohjavesi-, maankosteus-, ja valuntamittausaineistoja yhdistettiin prosessipohjaiseen hydrologiseen malliin. Mallinnuksella analysoitiin turvepeltojen hydrologian systeemistä toimintaa ja laajennettiin mittausaineistojen analysointia koepellon olosuhteita laajemmalle. Malli kalibroitiin ja validoitiin ohut- ja paksuturpeiselle alueelle käyttäen maaperämittausaineistoja sekä yllä mainittuja hydrologisia aikasarjoja. Tämän jälkeen mallilla tuotettiin simulaatioskenaarioita säätösalojituksen toiminnasta eri olosuhteissa, mukaan lukien turvekerroksen paksuus, kaltevuusolosuhteet, salaojitusparametrit (ojaväli ja -syvyys) ja säätöparametrit (padotuskorkeus ja säätöaikataulu). Mallinnus toteutettiin hydrologisella 3D-mallilla (Tähtikarhu ja Okkonen 2023). Työssä käytettiin puolentoista vuoden ajalta kertynyttä aineistoa (elokuu 2021–helmikuu 2023).

3.1.3 Työpaketti 3 (Kaukokartoitus)

Työpaketti 3:ssa selvitettiin kaukokartoituksen (droonit, satelliittiaineistot) soveltuvuutta turvepeltojen kosteusolojen ja pohjaveden pinnan tason arvioimiseen. Tutkimuslohkosta kerättiin kolmena vuonna kattavasti drooniaineistoja erilaisilla kameroilla (RGB, multispektri, hyperspektri, lämpökanavat), sekä käsiteltiin Sentinel-1 ja -2-satelliittikuva-aineistoja. Näitä aineistoja verrattiin säätösalojitusjärjestelmän mittaustietoihin eri ajankohtina ja eri olosuhteissa. Lisäksi tutkimuslohkolle tehtiin traktorilla toteutettu maaperäskannaus. Satelliittikuvilta tarkasteltiin 12 eri lohkoa homogeenisina yksikköinä aikasarjoina. Sentinel-2-kuvilta laskettiin lisäksi OPTRAM-malli (Optical Trapezoid Model), joka pyrkii mallintamaan maaperän kosteutta ja minimoimaan kasvillisuuden vaikutuksen. Mallissa määritetään ”kuiva ja kostea reuna, ja malli antaa arvon kullekin kuvapikselille sen mukaan, miten kaukana se on kyseisistä reunoista. Drooniaineistoista laskettiin ortomosaiikkeja, 3D-malleja sekä erilaisia

kasvillisuusindeksejä. Koska tutkimuspellon kasvillisuus oli epätasainen, kehitettiin menetelmiä epätasaisen kasvillisuuden vaikutuksen eliminointiin. Rikkoutuneen SWIR-alueen hyperspektrikameran sekä lämpödatan haasteellisen käsittelyn takia keskityttiin droonien RGB- ja multispektriaineistoihin.

3.1.4 Työpaketti 4 (Taloudelliset toteuttamisedellytykset)

Aineistoina työpaketti 4:ssä käytettiin Pro Agrian kasvikohtaisia Tuottopehtoori-katelaskelmia vuodelta 2020, Salaojayhdistyksen keräämiä salaojasuunnittelijoiden aineistoja salaojituksen ja sääätosalaojituksen toteutustavoista ja kustannuksista, Ruokaviraston vuoden 2022 paikkatietoa sisältäviä kasvulohkoja ja Geologian tutkimuskeskuksen 1:20 000 maaperäaineistoa. Yhdistämällä kasvulohkot ja maaperäaineisto saatiin tieto turvepelloilla viljeltävien kasvilajien pinta-aloista. Turvepelloiksi laskettiin lohkot, joiden pinta-alasta yli 80 prosenttia oli turvetta. Katelaskelmia päivitettiin vuosien 2023–2027 C2-alueen maataloustukien osalta, koska tarkastelussa oli C2-tukialue ja etenkin Pohjois-Pohjanmaalle tyypilliset maatilat.

Turvepeltojen vesienhallintatoimien taloudellisten toteuttamisedellytysten ja niiden käytöstä aiheutuvien maatilatason taloudellisten vaikutusten arvioimiseksi muodostettiin katetuottolaskelmia tyypillisimmille turvemailla viljeltäville kasveille. Kannattavuuslaskelmiin otettiin mukaan rehukaura, rehunurmi, ruokaperuna, rypsi ja sokerijuurikas.

Kasvikohtaisia katelaskelmia muunneltiin ottaen huomioon vesienhallintatoimien investointikustannus poistoiheen sekä työnmenekki ja muut vuotuiset kulut. Katelaskelmien avulla arvioitiin, kuinka suurta sadonlisää erityisesti sääätosalaojituksesta ja altakastelusta tulisi saada, jotta investoinnit näihin voisivat olla viljelijälle kannattavia. Tuloksista tehtiin johtopäätöksiä liittyen tilatason kannattavuuteen ja ilmastopolitiikan mahdollisuuksiin kannustaa vesienhallintainvestointeihin ja niiden käyttöön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi.

Dynaamiseen optimointiin perustuvaa maatilatason optimointimallia (DEMCROP; Purola & Lehtonen 2022; Tzemi & Lehtonen 2022) käytettiin, kun arvioitiin, millaisilla hiilikorvauksilla eri vesienhallintatoimet voivat tulla kannattaviksi viljelijälle 30 vuoden aikajaksolla, joka usein vastaa lähes viljelijän työuran pituutta. Tarkastelussa oli mukana neljä vesienhallintatoimea: avo-ojien padotus, salaojitus, sääätosalaojitus ja altakastelu. DEMCROP –malli hyödyntää mm. viljelykiertojen esikasviarvoja (Peltonen-Sainio ym. 2024), jotka perustuvat laajaan aineistoon sadoilta tuhansilta peltolohkoilta Suomessa. DEMCROP –malli optimoi pellon ja tuotantopanosten käyttöä (huomioiden kalkituksen, lannoituksen ja kasvinsuojelun satovasteet) olettaen, että viljelijä pyrkii maksimoimaan nettonykyarvoa 30 vuoden aikajaksolla. Vaikka tämän oletuksen voidaan katsoa yliarvioivan viljelijän rationaalisuutta, tämä oletus tuottaa mallin ratkaisuihin johdonmukaisia tuloksia siitä, millaisilla hiilikorvauksen hinnoilla vesienhallintatoimet voivat olla viljelijälle kannattavia.

3.1.5 Työpaketti 5 (Vesienhallinnan automatisointi)

Työpaketissa tehdyn tutkimuksen lähtökohtana toimi ESKE-hankkeessa suunniteltu etäohjattava säätösalaojakaivo, jota jatkokehitettiin tässä hankkeessa toimimaan ennakoivasti ja täysin automaattisesti. Kehitystyötä tehtiin erityisesti säätömenetelmien ja niiden vaatimien mittausten sekä toimilaitteiden yhteensovittamiseksi. Myös energianhallinnan ja pilvipohjaisen tietojärjestelmän osalta tehtiin kehitystyötä.

Työpaketissa muodostettiin massataseperustainen mallirakenne sadannan, kuivatuksen ja pohjaveden pinnankorkeuden lyhyen ajan dynamiikalle. Malli viritettiin aiemman koekohteen datan perusteella (pohjavesimittaukset, sadanta, pellon geometria, jne.), ja sille suunniteltiin ennustava säätö. Säädön toimintaa tarkasteltiin simuloinnein reaaliaikaisen sadantadatan perusteella.

Säätökaivo ja siihen liittyvä infrastruktuuri (ohjattava venttiili, kaivon pintamittaus, maaperän kosteusmittaus ja pohjavesiputki pintamittauksineen, aurinkopaneeli ja energiavarastointi, tiedonsiirto ja pilvipalvelun kytkentä) toteutettiin Kannuksen koekohteessa. Dynaaminen malli sovitettiin koekohteen tilanteeseen pellon geometriaa ja aiempia mittaustietoja hyödyntäen. Dynaamista mallia laajennettiin mahdollisuudella ylä- ja alapuolisen kaivon mittauksiin (useamman kaivon järjestelmä). Malli linearisoitiin, ja sille muodostettiin ennustavan säädön algoritmi rajoitetun lineaarisen ohjelmoinnin (LP) optimointia käyttäen. Oulun yliopistolla reaaliaikaisesti Matlab-ohjelmistossa laskettava säätöalgoritmi kytkettiin järjestelmään, ja säädön seuraamiseen ja hallintaan rakennettiin käyttöliittymä kaupalliseen thinger.io IoT-ympäristöön. Säätojärjestelmän toimintaa seurattiin, viritettiin ja arvioitiin kesän ja syksyn 2023 mittausdatan perusteella.

3.2 Tulokset

3.2.1 Työpaketti 1 (Vesienhallinnan vaikutus hiilipäästöihin)

Padottamalla vettä peltoon vähennettiin vuosittaista salaojavaluntaa 65 prosenttia. Koska padotuksen vaikutus valumavesien ravinnepitoisuuteen oli vähäinen, myös ravinnekuormitus väheni 65 prosenttia. Tämä osoittaa, että salaojavalunnan kautta syntyvää ravinnekuormitusta pystytään vähentämään merkittävästi yksinkertaisella keinolla. Jos patoluukkuja avataan harvemmin ja lyhyemmiksi ajoiksi kuin tässä tutkimuksessa, lienee mahdollista päästä vielä suurempiin päästövähennyksiin. Tutkimuksen aikana huomattiin, että viljelytoimien onnistumiselle riittää, että padotus avataan vain kaikkein märimpinä aikoina.

Salaojavalunnan mukana paksuturpeiselta tavanomaisesti ojitetulta pellolta huuhtoutui hiiltä reilut 200–300 kg/ha vuodessa, ohutturpeiselta alle 200 kg vuodessa. Padottamalla huuhtoumaa pystyttiin vähentämään noin kolmasosaan. Paksuturpeiselta pellolta tulevien valumavesien hiilipitoisuus oli kolminkertainen ja fosforipitoisuus kuusinkertainen verrattuna ohutturpeisen pellon valumavesien pitoisuuksiin, joten päästövähennystoimia kannattaa ensi sijassa kohdentaa syväturpeisille pelloille.

Korkea pohjavesi ei neljän säilörehusadon perusteella vaikuttanut satoihin normaalioloissa, mutta sato hieman heikkeni, kun padotus pidettiin päällä määristä oloista huolimatta. Kantavuusmittausten mukaan pellon kantavuus oli kaikkina mittausajankohtina riittävä viljelytoimille. Maankosteus- ja pohjaveden korkeusmittausten mukaan maanpinnan kosteusolot vaikuttivat riippuvan enemmän säätilasta ja haihdunnan määrästä kuin pohjaveden syvyydestä. Korkean pohjavesi ei näyttänyt vaikuttavan roudan sulamiseen keväällä.

Automaattisten kasvihuonekaasukammioiden mittaukset osoittivat odotetusti, että pohjaveden pinnan laskeminen lisää CO₂-päästöjä. Lisääntyminen ei kuitenkaan ole suoraviivaista vaan tasaantuu pohjaveden pinnan laskiessa. Tulokset osoittivat myös, että CO₂-päästöt ovat hyvin lämpötilariippuvaisia; valtaosa päästöistä tapahtuu muutaman kesäkuukauden aikana. Tutkittu turvepelto menetti hiiltä ilmakehään keskimäärin 5900 kg/ha kasvukauden aikana, joten ilmakehään vapautui hiiltä noin 30-kertaisesti verrattuna salaojavalunnan mukana vesistöihin huuhtoutuneeseen hiileen. Hiilidioksidipäästöt vähenivät noin 40 % nostettaessa vedenpintaa 80 cm:stä 30 cm:iin.

Metaanin osalta tulokset osoittivat, että aktiivisessa viljelykäytössä olevalta pellolta metaanipäästöjä syntyi ainoastaan poikkeusolosuhteissa lähinnä aikaisin keväällä ja syksyllä. Valtaosan kasvukaudesta turvepeltokin toimi metaanin nieluna. Kokonaisilmastovaikutuksen osalta metaanin osuus oli tutkitulla pellolla kuitenkin olematonta verrattuna CO₂-päästöihin.

Manuaalikammioilla mitattujen N₂O-päästöjen osuus kokonaisilmastovaikutuksesta on noin 8–7 %. Merkittävä osa N₂O-päästöistä tapahtuu kasvukauden ulkopuolella toisin kuin CO₂-päästöistä. CO₂:n ja CH₄:n osalta manuaalikammioilla tehdyt mittaukset olivat linjassa automaattikammioittausten kanssa.

3.2.2 Työpaketti 2 (Vesitalousmallinnus)

Vesitalousmallinnus toi ilmi, että turvepeltojen hydrauliset ominaisuudet poikkeavat niin kivennäismaiden kuin eloperäisten metsämaiden ominaisuuksista. Tulokset osoittavat, että turvepeltojen hydrologia ja pohjavedenpinnat muodostuvat eri osatekijöiden tuloksena, yksittäiset peltolohkot kytkeytyvät valuma-alueen hydrologiaan, ja peltolohkot voivat poiketa toisistaan oleellisesti. Salaojavaluntamäärät olivat suuria, ja ohutturpeisella alueella ne jopa ylittivät tarkastelujakson sadantamäärään (1031 mm). Tämä osoittaa, että tällä koekentällä erityisesti ohutturpeiset alueet mutta myös paksuturpeiset ottivat vastaan vettä pellon ulkopuolelta. Tämä johtui hydraulisesta gradientista, joka muodostui pellon pohjavedenkorkeuden ja ympäröivien turvemetsien korkeampien pohjavedenkorkeuksien välille. Paksuturpeisella alueella valunta oli huomattavasti vähäisempää kuin ohutturpeisella, mikä osoittaa eroavaisuuksia alueiden ja niiden hydraulisten ominaisuuksien välillä.

Tulosten perusteella säätösaloitus voi vähentää huomattavasti salaojavalunnan määrää – ohutturpeisella alueella yli 800 mm tutkimusjakson aikana. Ohutturpeisen alueen pohjavedenpinnat ja maankosteudet eivät kuitenkaan reagoineet merkittävästi suureen

valuntamuutokseen, sillä pohjavedenpintojen ero tavanomaisesti salaojitettujen ja säätösalaajitettujen alueiden välillä oli keskimäärin vain 1–17 cm. Tämä osoittaa, että säätösalaajitus ei pidättänyt vettä peltoalueella tehokkaasti vaan muutti valuntareittejä. Käytännössä siis salaojavalunnan vähentyessä vaakasuuntaiset pohjavesivirtailut alueelta voivat voimistua, minkä vuoksi pohjavedenpinnat eivät välttämättä nouse toivotulla tavalla padotuksesta huolimatta. Paksuturpeisella alueella säätösalaajituksen aiheuttama valuntamuutos oli pienempi (460 mm), mutta vaikutus pohjavedenpintoihin suurempi (10–21 cm) kuin ohutturpeisella alueella. Mallinnusten mukaan tämä johtui enimmäkseen hydraulisten ominaisuuksien eroista.

Simulaatioskenaarioiden mukaan turvepeltojen pohjavedenpinnat muodostuvat usean osatekijän summana, ja näistä ympäröivän topografian vaikutus sekä ojitusparametrit voivat olla suurimpia. Simulaatioiden mukaan säätösalaajitus soveltuisi paremmin sellaisille paksuturpeisille alueille, jotka saavat vettä ympäristöstään kuin sellaisille ohutturpeisille alueille, joissa tapahtuu herkästi poisvirtaamaa. Turpeiden hydraulisissa ominaisuuksissa sekä muissa valuma-alueiden keskeisissä ominaisuuksissa on kuitenkin paljon vaihtelevuutta. Tässä hankkeessa saadut tulokset antavat työkaluja säätösalaajituksen kohdentamiseen valuma-alueitasolla, mutta niiden yleistettävyyden varmistamiseksi tarvitaan laajamittaisia kaukokartoitukseen perustuvia tutkimuksia.

Kun säätösalaajituksen padotus avattiin, pohjavedenpinta laski nopeasti. Säätösalaajituksen kokonaisuuden kannalta haasteeksi muodostuu kevään tehokkaan kuivatuksen jälkeen se, että pohjavedenpintaa ei pysty nostamaan säätösalaajituksella haihdunnan ylittäessä sadannan ja alueelle ympäristöstä tulevan valunnan määrän. Kuitenkin pohjaveden olisi tärkeää olla korkealla juuri kesäisin, koska suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä tapahtuu kesäaikaan.

Kesäajalla pohjavedenpintoja voitaisiin nostaa kastelutoimenpiteillä. Simulaatioiden mukaan pohjavedenpintaa voitaisiin nostaa 50, 100 ja 150 mm kastelumäärillä noin 0,2, 0,5 ja 0,7 m, vastaavasti. Kastelumäärän vaikutus pohjavedenpintoihin riippuu turpeen silloisesta kosteustilasta ja hydraulisista ominaisuuksista. On kuitenkin mahdollista, että pohjavedenpinta lähtee kastelun jälkeen laskemaan, riippuen vaakasuuntaisista virtauksista. Simulaatioiden mukaan vaakasuuntaisten virtausten vaikutus oli tällä peltolohkolla suurempaa ohut- kuin paksuturpeisella alueella. Simulaatioiden mukaan pohjavedenpinta voi laskea 10 päivässä noin 0,2 m pintamaassa (syvyys maan pinnasta <0,4 m), mutta huomattavasti hitaammin pohjamaassa. Paksuturpeisella alueella tehdyn kastelukokeen perusteella pohjavedenpinta pysyi kastelluilla ruuduilla läpi tarkastelujakson korkeammalla kuin vertailulohkoilla, mikä on linjassa simulaatiotulosten kanssa. Tähän ovat voineet vaikuttaa myös erot koeruutujen hydrologiassa, sillä kastelua tehtiin vain muutamien viikkojen ajan.

Kastelutoimenpiteiden haasteena on suuri tarvittava veden määrä ja siihen liittyvät kustannukset. Esimerkiksi 100 mm kastelumäärä 0,5 ha alueelle vaatisi 500 m³ vettä (eli esimerkiksi varastoaltaan, jonka dimensiot ovat 5×10×10 m³), jollei lähistöllä ole soveltuvaa

vesistöä. Tämän lisäksi on huomioitava haihduntatappiot varastoaltaasta, ja se että kastelumäärän on ylitettävä kesäajan sadannanvajausta (noin 55 mm tässä), jotta pohjavedenpintaa saadaan nostettua.

3.2.3 Työpaketti 3 (Kaukokartoitus)

Kasvuston vaikutus kyettiin melko hyvin eliminoimaan, ja kaukokartoitusaineistosta löydettiin korrelaatioita vedenpinnan korkeuteen. Käytännöllisimmäksi Sentinel-2 satelliittikuvia hyödyntäväksi menetelmäksi nousi OPTRAM-malli, mutta kasvuston epätasaisuus vaikutti kuitenkin lopputuloksiin. Lisäksi haastetta aiheutti tarve suodattaa säätösalaajitusjärjestelmän mittaustietoja sekä pellon etelälaitaa varjostava puusto.

Pellon pinnan suhteellinen kosteus erottui selkeästi perinteisillä kosteusindeksilaskelmilla niin satelliitti- kuin drooniaineistoistakin. Tutkimuspeltolohkon suhteelliset alueelliset erot olivat helposti erotettavissa. Kosteusvaihtelun suhteellisiin eroihin päästiin siis erittäin tehokkaasti kiinni kaukokartoitusmenetelmin. Syvempien kerrosten tulkintaan vaikuttaa kuitenkin merkittävässä määrin pintakerroksen tila kasvillisuuden sekä kosteuden suhteen.

Tulosten perusteella satelliittiaineistoista voi vertailla eri peltolohkojen välisiä kosteusilanteita, sekä tunnistaa suhteellisesta märkyydestä kärsiviä peltolohkoja. Vertailussa olennaista on tarkasteluajankohta sekä paikallisten sateiden huomiointi. Lohkon sisäinen kosteuden vaihtelu on myös havaittavissa kaukokartoitusmenetelmin. Salaajituksen säätäminen eri osissa peltoa voisi olla mahdollista perustuen esimerkiksi satelliittikuva-aineistoon, jos pellon pintakosteustieto on tähän riittävä. Tapauskohtaiset haasteet kuten peitekasvillisuus sekä pellon varjopaikat aiheuttavat kuitenkin epävarmuuksia automatisoitaviin tulkintoihin. Droonilla tehtävä lämpökamerakuvaus tuo hyvin esiin pellon lohkojen välisiä suhteellisia eroja. Lämpökuvaus on kuitenkin hyvin herkkä kuvausolosuhteille, joka tekee eri ajankohtien lämpökuva-aineistojen vertailun haastavaksi.

3.2.4 Työpaketti 4 (Taloudelliset toteuttamisedellytykset)

Nurmia viljellään turvepelloilla selvästi eniten, liki 94 000 hehtaaria. Viljoja viljellään turvepelloilla yhteensä noin 61 000 ha, enimmäkseen Etelä-Suomessa. Öljykasvien viljelypinta-ala turvepelloilla on noin 2100 ha ja perunan 500 ha. Sokerijuurikasta viljellään turvepelloilla lähinnä Satakunnassa noin 100 ha alalla. Kesantoalaa on turvepelloilla huomattavasti, liki 29 000 ha.

Näistä kasveista ruokaperunalla kahdeksan prosentin sadonlisä riittäisi tekemään säätösalaajitus- tai altakasteluinvestoinnista kannattavan, mikäli satotaso on jo ennen investointia korkea (35 t/ha). Muilla kasveilla vesienhallintatoimenpiteiden kannattavuuteen vaadittavat sadonlisät olivat selvästi korkeampia. Koska ruokaperunaa ei suositella viljeltäväksi jatkuvasti samalla loholla, vaan esimerkiksi 2–4 vuonna kymmenestä, ei vesienhallintainvestointi todennäköisesti ole pelkän satohyödyn vuoksi kannattava ruokaperunalohkoillekaan, ellei perunasta saatava hinta ole tavallista korkeampi (esim. siemenperuna), tai jos altakastelun satohyöty on selvästi suurempi kuin 10 %. Ei voida pitää

realistisena sitä, että sääätösalaojitusta tai altakastelua voitaisiin laajassa mitassa lisätä pelkkien satohyötyjen kannustamana.

Jos turvepellon ilmasto- ja vesistö päästöjä halutaan vähentää vesienhallintatoimilla, olisi päästövähennyksistä maksettava viljelijöille. Tällöin viljelijällä olisi syy investoida vesienhallintatoimiin ja pitää pohjavedenpintaa tavallista korkeammalla.

Jos vedenpinnan korkeus 30 cm maanpinnan alla vähentäisi kasvihuonekaasupäästöjä noin 10 t CO₂-ekv./ha vuodessa ja siitä saatava päästövähennyspalkkio olisi 20 €/t CO₂-ekv., niin sääätösalaojitus tulisi kannattavaksi perunan lisäksi myös viljaa viljelevällä tilalla. Jos päästövähennyspalkkio olisi suurempi tai jos altakastelu toisi yli 6 prosentin sadonlisäyksiä, niin altakastelukin olisi kannattava investointi.

Jos päästövähennyspalkkio ylittää 30 €/t CO₂-ekv. ja jos vuodessa saavutetaan 10 t CO₂-ekv./ha päästövähennys pitämällä pohjavettä 30 cm maanpinnan alapuolella, maatilan kannattaa sääätösalaojittaa kaikki turvepellot, vaikka hehtaarisadot alenisivat.

Jos maatilalla ei ole mahdollista viljellä korkean hehtaarituoton kasveja kuten perunaa, sarkaojien padotus tulee viljelijälle kannattavaksi ainakin kaukana tilakeskuksesta sijaitsevilla lohkoilla (joilla on suurin viljelykustannus), jos päästövähennyspalkkio on 20 €/t CO₂-ekv. tai enemmän. Etenkin ennestään heikkotuottoisilla turvepelloilla ei silloin kannata tavoitella hyvää satoisuutta, vaan päätuote olisi päästövähennys.

3.2.5 Työpaketti 5 (Vesienhallinnan automatisointi)

Työpaketin tuloksena syntyi IoT-pohjaisesti toteutettu ja käytännön kokein toimivaksi osoitettu automaattisen sääätösalaojakaivon konsepti. Tulokset osoittavat, että sääätösalaojajärjestelmän automaattiohjauksen toteuttaminen on teknisesti mahdollista toteuttaa luotettavasti ja kohtuullisin kustannuksin. Tarkoitusta varten suunniteltu venttiilitoimilaite toimi säätökokeiden aikana hyvin ja kulutti vain vähän energiaa, mikä on erityisen tärkeää käytännön sovellettavuuden kannalta. Tiedonsiirto- ja energiainfrastruktuuri toimivat likimain moitteettomasti jopa leudoissa talviolosuhteissa. Kovilla pakkasilla energiansyötössä esiintyi jonkin verran toimintahäiriöitä. Mittalaitteet (pinnakorkeusmittaus säätökaivossa ja pohjavesiputkessa sekä kosteusanturit) toimivat luotettavasti säätötarkoituksia ajatellen. Kaapelointiin ja mittausten ryömimiseen/kalibrointiin täytyy vielä kiinnittää huomiota.

Vesienhallinnan infrastruktuuri mahdollistaa mittausten ja ohjausten seurannan reaaliajassa pilvipalvelun kautta. Käyttäjä voi ohjata venttiiliä myös manuaalisesti pilvipalvelun kautta, esimerkiksi kännykällä. Data tallentuu pilvipalveluun, ja aikatazon trendejä voi tarkastella jälkeenpäin. Käyttäjä voi siis valita, käyttääkö hän vain kaivon manuaalista etäohjausta vai hyödyntääkö myös ennustavaa säätöä. Systemin perustoiminnallisuus ja laitteisto ovat kummassakin tapauksessa samat.

Automaattinen säätö toteutettiin malliperustaisena ennustavana optimisäätönä (MPC). Sääennusteina käytettiin ilmatieteenlaitoksen 9 vrk sadantaennusteita, jotka kytkettiin dynaamiseen vesitasemalliin. Mallin avulla optimoitiin tulevat ohjausventtiilin muutokset puolen tunnin säätövälein. Ohjaukset toteutettiin automaattisesti langattoman tietoliikennelinkin kautta. Säätö oli toiminnassa kesäkuusta-marraskuuhun. Säädön avulla voitiin ajaa pohjaveden pinta haluttuun asetusarvoonsa. Säädön toimintaa rajoitti merkittävästi salaojajärjestelmän kuivatuskyky sekä sääennusteiden epätarkkuus. Kuivina aikoina säätö ehdotti laskennallista kastelua, mutta sitä ei ollut koekohteessa mahdollista toteuttaa. Rankan sadejakson/tulvan aikana pellon salaojajärjestelmä oli täysitehoisesti käytössä, eikä säätövaraa enää ollut. Salaojajärjestelmän rajallinen kuivatusteho ja kasteluun tarvittavat suuret vesimäärät korostavat entisestään hyvien pitkäaikaisennusteiden huomioimisen (ennakoinnin) tärkeyttä vesienhallinnan toteuttamisessa.

3.3 Toteutusvaiheen arviointi

Tutkimusyhteistyö eri organisaatioiden ja työpakettien välillä sujui koko hankkeen ajan hyvässä hengessä, ja työpaketit tukivat toisiaan.

Kolmen vuoden kesto oli lyhyt aika tutkimushankkeelle, jossa tehtiin kokeellista tutkimusta kenttäkokeessa; kun kokeen perustamiseen meni aikaa hankkeen alussa ja tulosten käsittelyyn lopussa, niin dataa ei ehtinyt kertyä kovin monissa olosuhteissa. Varsinkin mallinnustyöpaketti joutui validoimaan tulokset melko lyhytaikaisen mittausdatan perusteella ja käyttämään aiemmassa hankkeessa tuotettuja hydraulisen johtavuuden mittauksia uusia analyysejä odotellessa. Taloustyöpaketti joutui odottamaan tietoja korkean pohjavedenpinnan satovaikutuksista viimeiseen syksyyn asti.

Kenttäoloissa kohdattiin monenlaisia ulkopuolisista tekijöistä johtuvia vastoinkäymisiä, jotka edellyttivät nopeita ratkaisuja ja vaativat lisätyötä; jyräjät katkoivat mittalaitteiden johtoja ja sorkkaeläimet kaatoivat laitteita, mistä aiheutui katkoksia dataan. Mittalaitteet jouduttiin suojaamaan aidoilla tai verkoilla. Koekentän kylvö jouduttiin uusimaan ensimmäisen kylvön epäonnistuttua kuivuuden takia, minkä takia satotuloksia ei saatu kuin yhtenä vuotena. Altakastelupumput saatiin toimimaan kumpanakin vuonna vasta loppukesästä, joten kastelumäärät jäivät vähäisiksi eikä kastelun todellisesta potentiaalista vedenpinnan nostoon saatu kunnon mittaustuloksia. Kasvihuonekaasumittaukset olivat talvella vaikeita, koska routa väänsi laitteita, lumi hankaloitti työtä, ja mittauksessa tarvittava vesi jäättyi. Automaattisen säätösalaojakaivon etäohjaus- ja automaattitoimintojen käytännön testausta haittasi testauspaikan salaojajärjestelmän huono kunto. Droonikuvauksissa yksi keskeinen hyperspektrisensori rikkoutui kuvauskauden alussa, minkä takia iso osa sinä vuonna kerätystä drooniaineistosta oli käyttökelvotonta.

Hankkeen toteuttamista helpotti yhteistyö muiden hankkeiden kanssa; esim. Vesihäiri-hanke hyötyi siitä, että koeruudut oli perustettu jo Turvecontrol-hankkeessa. Säätoikaivon automatisointihanke puolestaan hyötyi siitä, että merkittävä osa käytännön testaamistyöstä pystyttiin tekemään yhteistyössä PeltoSäätö-hankkeen kanssa.

Hanke vastasi sille asetettuihin tavoitteisiin lähes kokonaisuudessaan. Kenttäkokeen onnistumista edistivät 1) kentän sopivuus; ohuen ja paksun turpeen viljelyn ympäristövaikutuksia pystyttiin tutkimaan samoissa oloissa, 2) kentän sijainti Luonnonvarakeskuksen toimipaikan läheisyydessä, minkä takia kenttää oli helppo hoitaa, 3) Luonnonvarakeskuksessa meneillään ollut maaperätutkimusmenetelmien modernisointihanke, jonka ansiosta kentälle saatiin monipuolinen ja laadukas instrumentointi.

3.4 Julkaisut

Tieteelliset julkaisut, lähetetty arvioitavaksi

- Heikkinen, J., Honkanen H., Lång, K., Myllys, M. Mitigation of greenhouse gas emissions by optimizing groundwater level in boreal cultivated peatland (TP1)
- Salla, A., Salo, H., Tähtikarhu, M., Marttila, H., Läpikivi, M., Liimatainen, M., Koivusalo, H. Simulating controlled drainage and hydrological connections in a cultivated peatland field (TP2, yhteistyöjulkaisu)
- Vélez, S., Ariza-Sentís, M., Panic, M., Ivošević, B., Stefanović, D., Kaivosoja, J., Valente, J. Speeding up UAV-based crop variability assessment through a data fusion approach using spatial interpolation for site-specific management. Precision Agriculture, 1.4. (TP3)

Tieteelliset julkaisut, käsikirjoitukset

- Myllys, M., Mäkelä, M., Häggblom, O. Controlled drainage diminishes substance leaching from thin and thick layered cultivated peat soils. (TP1)
- Tähtikarhu, M., Räsänen, T., Hyväluoma, J., Piayda, A., Myllys, M. Field experiments and process-based simulations show how controlled drainage, peat thickness and groundwater fluxes can impact the hydrology of cultivated peat soils (TP2)
- Tähtikarhu, M., Hyväluoma, J., Exploring the relative importance of subsurface drainage parameters, drainage control schedule, peat thickness and topography on groundwater levels in cultivated peat soils (TP2)
- Näsi, R., Korhonen, P., Kivimäki, A., Oliveira, R., Peltola, O., Puttonen, E., Kaivosoja, J., Myllys, M., Honkavaara, E., Shurpali, N., Quantifying Greenhouse Gas Emission Potential from Organic Soils in Finnish Grass Production: A Satellite-Based Assessment of Cultivation Intensity. (TP3)
- Rämö, J., Miettinen, A., Wejberg, H., Tzemi, H. & Lehtonen, H. Carbon Incentives and Farm Economics: A Study of Peatland Drainage Optimization (TP4)

Raportit

- Wejberg, H., Miettinen, A., Lehtonen, H. Vesienhallinnan taloudelliset edellytykset turvepelloilla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus xx/2024. (TP4)

Konferenssiesitykset, webinaarit yms.

- Merja Myllys: Säätosalaoitus ja muut vedenkorkeuden säätömekanismit, toimivatko turvemailla. Neuvojawebinaari 23.9.2021.
- Heikki Lehtonen: Millaisia kannustimia tarvitaan turvepeltojen päästöjen vähentämiseksi? Luken turvepeltowebinaari 27.1.2022.
- Heikki Lehtonen: Kasvintuotantotilojen talous ilmastonmuutoksessa – ennakkointi kannattaa. MTK Varsinais-Suomen podcast 10/2022.
- Heikki Lehtonen: Ilmastotoimien ja -ohjauksen merkitys kotieläintalouden taloudelle. MURU-hankkeen webinaari 28.2.2023.
- Antti Miettinen: Is payment for paludiculture a cost-effective policy instrument to reduce greenhouse gas emissions from agriculture? XVII EAAE Congress, Rennes, France, September 1, 2023, OS2.7: Sustainability along the supply chain.
- Mika Tähtikarhu: How peat thickness, groundwater fluxes, and controlled drainage can impact the hydrology of agricultural fields? American Geophysical Unionin (AGU) konferenssi Kaliforniassa 11.-15.12.2023.
- Merja Myllys: Padotus pitää vedet ja ravinteet turvepellossa. Maataloustieteen päivät 10.-11.1.2024.
- Mika Tähtikarhu: Kuinka turpeen paksuus, pohjavesivirtaukset ja säätosalaoitus vaikuttavat turvepeltojen hydrologiaan? Simulaatioiden ja kenttäkokeiden yhdistäminen. Maataloustieteen päivät 10.-11.1.2024.
- Henrik Wejberg: Turvepeltojen vesienhallintatoimien kannattavuus maatiloilla ja kannustimet päästövähennyksiin. Maataloustieteen päivät 10.-11.1.2024.
- Toni Liedes: IoT-pohjaisen säätosalaojakaivon kehittäminen. Maataloustieteen päivät 10.-11.1.2024.
- Jere Kaivosoja/Roope Näsi: Turvepellon vesitalouden kaukokartoitus. Maataloustieteen päivät 10.-11.1.2024.
- Jaakko Heikkinen: Vedenpinnan tason vaikutus turvepellon hiilidioksidi- ja metaanipäästöihin. Maataloustieteen päivät 10.-11.1.2024.
- Ikonen, E., J. Torvela, M. Törmälä, J. Savela, M. Pylvänäinen, J. Vasara and T. Liedes. Subsurface drainage and irrigation automation for cultivated land groundwater management. Automation Days, 28-29 March 2023, Helsinki, Finland.
- Ikonen, E., T. Liedes and J. Vasara (2023). Model predictive controlled subsurface drainage and irrigation for peatland groundwater management. 22nd IFAC World Congress, 9-16 July 2023, Yokohama, Japan.
- Turvepeltojen viljelyn ympäristökuormituksen vähentäminen vesienhallinnalla – vaikutukset kuormitukseen, viljelyyn ja viljelyn kannattavuuteen. Vesihiisi-hankkeen viljelijäwebinaari 21.3.2024.
- Minna Mäkelä, Merja Myllys, Olle Häggblom: Padotus pitää veden ja ravinteet turvepellossa. Salaoituksen neuvottelupäivät 4.4.2024.

Ammattilehtiartikkelit

- Liimatainen, M., Lötjönen, T., Liedes, T., Läpikivi, M., Marttila, H., Joki-Tokola, E. (2023) Turvemaat ja niiden kestävä viljely vesienhallinnan keinoin. Vesitalous 1/2023, pp. 18–22.
- Liimatainen, M., Lötjönen, T., Liedes, T., Läpikivi, M., Marttila H. (2024) Valuma-alueen veden varastointi maatalouden kastelukäyttöön. Vesitalous 1/2024, pp. 5–8.
- Hankkeen tutkijat: Säätosalaajitus vähentää turvepeltojen viljelyn ympäristökuormaa - Vesihiisi-hankkeen kokemuksia. Salaojayhdistyksen jäsenjulkaisu 2024.

Hankkeen esittelyt

- IV Maaperätieteiden päivät 16.9.2021
- Hiilestä kiinni -aamukahviwebinaari 14.10.2021
- MMM:n sidosryhmätilaisuus 3.11.2021
- Ilmastoviisaan maatalouden virtuaalinen tiedonvaihtopäivä 17.3.2022
- Maataloustieteen päivät (posterit) 14.-15.6.2022

Työpakettien esittelyt

- Maatila 2030 webinaari, 30.11.2021 (TP3)
- Luonnonvarakeskuksen peltopäivät Ruukissa 16.8.2022 (TP5)
- Suopäivä 20.5.2022 Helsingissä (TP5)
- Oulun yliopiston järjestämä Twitter-konferenssi "What does science say about summer" 9.6.2022 (TP5)
- Vesihave-hankkeen vierailu Kannuksen pilotointikohteessa 20.6.2022 (TP5)
- Nivalan Maaseutunäyttely 19–20.8.2022 Nivalassa (TP5)
- ProAgrian järjestämä pellonpiennartilaisuus 19.9.2022 Ruukissa (TP5)
- MaatalousKonemessut 13.–15.10.2022 Helsingissä (TP5)
- ELY:n webinaarit 25.1.2022 ja 5.–6.10.2022 (TP5)
- Hiilestä kiinni aamukahviwebinaari - teemana valuma-alue suunnittelu 18.4.2023 (TP2)
- KoneAgrian Innovaatiotori 12.-14.10.2023 Tampereella (TP5)

Hankkeen koekentän esittelyt

- MMM:n maankäyttösektorin toimenpidekokonaisuuden seurantar ryhmä 23.8.2022
- Hydrotekniska sällskapet i Sverige 6.10.2022
- Pellonpiennarpäivä 6.7.2023

Muuta

- Osallistuminen Hiilestä kiinni -tutkijaleirille Pajulahdessa 19.–20.4.2023 (Merja Myllys, Heikki Lehtonen, Antti Miettinen)
- Osallistuminen Hiilestä kiinni -T&I-ohjelman kokoontumiseen 14.9.2023 (Heikki Lehtonen)

4. Tulosten arviointi

4.1 Tulosten käytännön sovellettavuus

Työpaketti 1 (Vesienhallinnan vaikutus hiilipäästöihin) tuottamat tulokset sääätosalaoituksen aikaansaamasta ravinnehuuhtoumien merkittävästä vähenemisestä ovat käytettävissä maatalouspolitiikan päätöksenteossa. Tulokset ohjaavat päästövähennystoimien tehokkainta kohdentamista ensisijaisesti syväturpeisille pelloille, joiden valumavesien ravinnepitoisuudet ovat suuret.

Hanke tuotti tiedotusmateriaalia sääätosalaoituksen myönteisistä ympäristövaikutuksista ja vähäisistä vaikutuksista käytännön viljelyyn. Tiedon lisäyksen avulla on mahdollista muuttaa viljelijöiden asenteita myönteisemmiksi sääätosalaoitusta kohtaan. Sääätosalaoituksen yleistyminen parantaisi ympäristön tilaa; salaojavalunnan väheneminen vähentää ravinnehuuhtoumia vesistöihin ja korkea vedenpinta kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään. Ravinnehuuhtoumien vähentäminen on helpompaa kuin kasvihuonekaasupäästöjen, koska salaojavalunnan vähentäminen on helpompaa kuin korkean vedenpinnan ylläpitäminen.

Hankkeen tulokset hyödyttävät kansallista kasvihuonekaasuinventaaariota. Mitatut päästöt olivat samansuuruisia kuin kasvihuonekaasuinventariossa käytetyt päästökertoimet turvemaille. Hankkeesta saatiin tietoa myös pohjaveden pinnan tason vaikutuksesta kasvihuonekaasupäästöihin, minkä siirtäminen päästölaskentaan vaatisi kuitenkin koko maan kattavaa aineistoa peltomaiden pohjaveden korkeuksista.

Työpaketti 2:n (Vesitalousmallinnus) mallinnustyö osoitti, että turvepellot kytkeytyvät ympäröivien alueiden hydrologiaan, mitä ei ole helppo havaita kentällä. Löydöksellä on suoraa käytännön vaikutusta, sillä sääätosalaoituksen vaikutukset pohjavedenpintoihin voivat käytännössä riippua siitä, kuinka peltoalue purkaa pellon vesivarastoa ympäristöön. Toisaalta sääätosalaoitus toimii tehokkaammin alueilla, jotka ottavat vastaan vettä ympäristöstä. Löydös kytkee turvepeltojen vesienhallinnan tarkastelun valuma-alueen pohjavesivalunnan kautta. Vaikka salaojavalunta ja salaojien kautta kulkeutuva vesistökuormitus voivat oleellisesti vähentyä sääätosalaoituksen ansiosta, voivat vedet ja kuormitus kulkeutua peltoalueelta pois muita virtausreittejä pitkin. Tällöin esimerkiksi haluttua kuormitusvähennystä ja pohjavedenpinna nostoa ei välttämättä saada kokonaisuudessaan aikaiseksi. Tämä osoittaa myös systeemisen hydrologisen tarkastelun arvon (yksittäisten komponenttien tarkastelun sijaan) ja oleellisuuden vesien ja kuormitusten hallinnan kannalta.

Tämän koekentän tulosten mukaan sääätosalaoitus voisi onnistua nostamaan pohjavedenpintaa nimenomaan paksuturpeisella alueella. Tulosten yleistettävyys kannattaisi kuitenkin todentaa esimerkiksi toteuttamalla sääätosalaoitusta eri alueilla sijaitsevilla paksuturpeisilla alueilla (esimerkiksi hyödyntäen Maatu-hankkeen turpeensyvyysaineistoa), ja todentamalla säädön vaikutus kaukokartoitusmenetelmillä. Koska vaakasuuntaisista virtausreittien parametreista ja niiden organisoitumisesta maisematasolla on nykyisellään

melko vähän tietoa, olisi kaukokartoitustarkastelu hyödyksi, jotta voitaisiin arvioida sääätösalaojituksen onnistumista laajassa skaalassa.

Vesienhallintatoimien käytännön toteutuksessa on otettava huomioon, että pohjavedenpintojen nostaminen kasvukaudella ei onnistu haihdunnan ylittäessä sadannan ja ympäristöstä tulevan valunnan määrän. Jotta kasvukauden pohjavedenpinnat pysyisivät korkealla, padotus on laitettava päälle kevätulannan jälkeen heti, kun riittävä kuivavara on saavutettu, tai on tai käytettävä kastelumenetelmiä sääätösalaojituksen tukena.

Työpaketti 3:n (Kaukokartoitus) kehittämää maankosteuden tunnistusmenetelmää voidaan valmistuessaan hyödyntää esimerkiksi sääätösalaojakaivojen automaatiikan ohjauksen tukena. Viljelijä voisi saada tietoa pellon kantavuudesta ennen kuin tuo raskaat koneensa pellolle. Mikäli viljelijöille maksetaan korkean vedenpinnan ylläpitämisestä turvemaidella, kaukokartoitus voisi tuoda yhden keinon lisää viranomaisseurantaan.

Työpaketti 4:n (Taloudelliset toteuttamisedellytykset) laskelmat ovat viranomaisten käytettävissä ympäristöohjauskeinojen laadinnassa. Ne myös auttavat viljelijää suunnittelemaan vesienhallintainvestointien tekoa.

Päästövähennyspalkkioilla (julkisista tai yksityisistä varoista) on mahdollista kannustaa viljelijöitä pitkän aikavälin vesienhallintatoimiin, joilla vähennetään kasvihuonekaasupäästöjä. Jos maatilalla on mahdollisuus viljellä korkeiden hehtaarituohtojen kasveja, satohyödyt voivat tehdä investoinnin sääätösalaojitukseen tai altakasteluun kannattaviksi. Tulosten mukaan ne viljaa tuottavat tilat tai muut viljelytilat, joilla ei ole mahdollisuuksia rehunurmea tai viljaa arvokkaampien kasvien viljelyyn ja joiden pellot on avo-ojitettu, todennäköisesti siirtyvät turvepelloilla kustannuksiltaan edulliseen avo-ojien padotukseen, jos päästövähennyspalkkio on vähintään 20–30 €/t CO₂-ekv. (noin 200–300 €/ha) vuodessa. Tämä puolestaan johtaa todennäköisesti heikentyneisiin satoihin tai ainakin epävarmaan pellolle pääsyyn eri työvaiheissa kuten korjuuaikana, sillä vedenpinnan säätömahdollisuudet ovat heikot. Tämä voi vähentää paikallista tai alueellista viljan tarjontaa kunnissa, joissa turvemaiden osuus maatalousmaasta on suuri. Jos viljelijöille maksetaan korkean vedenpinnan ylläpitämisestä turvemaidella, isot palkkiot päästövähennystonnin kohden voivat johtaa siihen, että hyviä satoja ei tavoitella sääätöpadotetuilla pelloilla, vaan päätuote ja motiivi viljelijälle voi olla päästövähennys.

Työpaketti 5:n (Vesienhallinnan automatisointi) kehittämän sääätösalaojakaivon automaatiolla on ilmeisiä etuja saavutettavissa silloin kun pohjaveden pintaa halutaan hallita: korottaa pidempiaikaisesti, vaihdella kantavuustarpeen mukaan, kastella kuivuuden ehkäisemiseksi, tms. Etuja ovat mittauksiin perustuva systemaattisuus toiminnassa sekä työmäärän merkittävä väheneminen säädön toteutuksessa (vs. manuaalinen tai etäohjattu toiminta). Myös reagointikyky ja -nopeus sään äkillisiin muutoksiin paranee huomattavasti. Lisäksi inhimillisten virheiden, kuten tarpeettomasti auki jääneiden säätöventtiilien, riski vähenee oleellisesti.

Salaojajärjestelmän toimintamoodoja voivat olla pellon vesitaseen monitorointi etälaitteiston kautta, etäohjaus manuaalisesti tai automaattinen säätö. Lisäksi automaatio voi tarjota tietoa itsensä tai salaojajärjestelmän toimintakunnosta. Automaattisen säädön demonstroinnit ovat osoittaneet kehitetyn järjestelmän olevan toimintakykyinen ja korostivat ennakoivan ohjauksen merkitystä vesienhallinnassa.

Maa- ja metsätalousministeriö valitsi Vesihiisi-hankkeen Motiva Oy:n kanssa toteutettavaan **Vaikuttavuuskiihdyttämöön**, jonka tarkoituksena on edistää tulosten käytäntöön vientiä varsinaisen tutkimushankkeen päätyttyä. Vesihiisi-hankkeen tavoitteena on löytää tuotteistaja automaattiselle säätösalaajakaivolle sekä edistää säätösalaajituksen yleistymistä tiedottamalla viljelijöille sen eduista ja suosittamalla viranomaisille säätösalaajitusta edistävien tukijärjestelmien kehittämistä.

4.2 Tulosten tieteellinen merkitys

Turvepeltojen viljelyn aiheuttamasta **ravinnehuuhtoumasta** on tehty vain vähän tieteellistä tutkimusta, ja vesienhallintakeinojen käytöstä kuormituksen vähentämisessä vieläkin vähemmän. Tämän tutkimuksen tulokset merkittävästä vähennyspotentiaalista täyttävät tätä tietoaukkoa.

Kasvihuonekaasujen osalta hankkeen tulokset olivat linjassa aikaisempien tutkimustulosten kanssa ja vahvistivat olemassa olevaa käsitystä päästöjen suuruudesta ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Hankkeessa käytettiin kasvihuonekaasujen mittaamiseen automaattikammioita, jotka eivät ainakaan toistaisesti ole vielä yleisesti käytössä. Hankkeessa saatiin osoitettua selkeästi pohjaveden pinnantason vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin.

Hanke tuotti ensimmäistä kertaa arvion ohut- ja paksuturpeisten turvepeltojen **hydrologian** toiminnasta systeemisesti. Tulokset osoittavat kuinka turvepellot kytkeytyvät valuma-aluekokonaisuuteen ja kuinka sillä on merkitystä käytännön vesienhallintatoimenpiteiden onnistumisen kannalta. Työ muodostaa myös ensimmäisen arvion säätösalaajitusten vaikutuksista ohut- ja paksuturpeisilla pelloilla.

Hanke tuotti arvokasta lisätietoa ja aineistoa turvepeltojen maankosteuden määrittämiseen eri syvyyksiltä **kaukokartoituksen** avulla. Kaukokartoitusmenetelmin saatavaa tietoa turvelohkojen kosteudesta voidaan skaalata kattamaan isompiakin alueita, kuten koko maakuntaa tai jopa koko maata koskevaksi. Tällainen tieto voi olla eräänä tietolähteenä, kun tarkennetaan erilaisten turvelohkojen kasvihuonekaasupäästöjä alueellisesti.

Suomen tilanteeseen ja olosuhteisiin sovitettua **taloudellista analyysiä** useiden eri vesienhallintatoimien kannattavuusedellytyksistä ja vaikutuksista maatalojen tuotantoon ja talouteen ei aiemmin ole tehty. Eri vesienhallintavaihtoehtojen taloudellinen analyysi otti huomioon aiempaa perusteellisemmin turvemailla viljeltävän kasvilajin. Tärkeää tehdyssä analyysissä oli myös viljelykiertojen ja niihin liittyvien esikasviarvojen huomiointi; vesienhallintatoimet ja niihin kannustavat sadonlisät ja päästövähennyspalkkiot vaikuttavat

myös viljelykiertoihin, mitä ei ole juuri lainkaan otettu huomioon kansainvälisessä kirjallisuudessa.

Automaattisia ennakoivia säätösalaojitettujen turvepeltojen vesienhallinnan järjestelmiä ei aiemmin tiettävästi ole kehitetty eikä demonstroitu, eli automaattisen säätösalaojakaivon kehitystyön tuloksilla on uutuusarvoa. Akateemista jatkotutkimusta tulisi suunnata ainakin käytäntöön soveltuvien säätömenetelmien edelleen kehittämiseen, oppimis- ja mukautumisominaisuuksien kehittämiseen ja valuma-alueitasoisten automaattijärjestelmien kehittämiseen. Tulosten jatkohyödyntäminen edellyttää toisaalta laitevalmistajien (jälkiasennettava säätökaivo, ml. venttiilitoimilaite ja mittalaitteet) aktiivista panosta, toisaalta loppukäyttäjän tarpeiden hyvää hahmottamista isommassa pellon hallinnan kokonaisuudessa.

Hankkeen aikana ilmeni aiheita, jotka kaipaavat **lisätutkimusta**. Vesitalousmallinnuksessa erityisesti vaakasuuntaisia virtausreittejä kontrolloivista parametreista tarvitaan lisätietoa, sillä vaakasuuntaiset virtaukset näyttävät dominoivan pohjavedenpinnan noston onnistumista. Tietoa tarvitaan, jotta pystytään löytämään vedenpinnan nostoon sopivat peltolohkot, olipa kyse tavanomaisesta viljelystä tai pellon vettämisestä kosteaviljelyä vai ennallistamista varten. Tietoa puuttuu myös vedenpidätykseen liittyvistä prosesseista turvepellon suurissa kosteusvaihteluissa. Myös altakastelussa ilmenneen valumavesien suuren ravinnepitoisuuden syyn selvittäminen sekä automaattisen säätösalaojakaivon ohjaus mittaustietoa hyödyntävän vesitasemallin avulla vaatii lisätutkimusta. Kaukokartoitusmenetelmien käyttö turvepeltojen kosteustilan tunnistamisessa pintamaata syvemmältä (10–50 cm) vaatii myös lisää tutkimustyötä, ja tässä hankkeessa tehtyjä taloudellisia analyysejä olisi aiheellista kohdistaa ilmasto- ja ympäristöpolitiikan eri vaihtoehtoihin ja eri alueilla oleviin maataloihin, koska tilanteet ja olosuhteet Suomessa vaihtelevat.

5. Hankkeen budjetti

Vesihäisi-hankkeen päärahoittaja oli Maa- ja metsätalousministeriön Häilestä kiinni –tutkimus- ja innovaatio-ohjelma, ja rahoitusta myönsivät myös Salaojituksen tukisäätiö ja Suoviljelysyhdistys.

Turvecontrol-hankkeen päärahoittaja oli Maa- ja metsätalousministeriön Makera-rahasto, ja rahoitusta myönsi myös Salaojituksen tukisäätiö.

Hankkeiden toteutuneet kustannukset ja rahoitusosuudet olivat seuraavanlaiset:

Kustannukset €	Vesihäisi	Turvecontrol
palkkauskustannukset	732 913	153 016
matkakulut	6 821	1 242
ostopalvelut	50 158	56 756
yleiskustannukset	616 417	115 446
muut kustannukset	18 713	42 949
arvonlisäverot	934	23 173
yhteensä	1 425 956	392 582

Rahoitus €

Maa- ja metsätalousministeriö	948 700	219 987
Organisaatioiden omarahoitus	397 256	152 596
Salaojituksen tukisäätiö	50 000	20 000
Suoviljelysyhdistys	30 000	
yhteensä	1 425 956	392 582

6. Tiivistelmä ja toimintasuositukset

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää, paljonko turvemaiden viljelyn aiheuttamia ravinnehuuhtoumia ja kasvihuonekaasupäästöjä pystytään vähentämään vesienhallintakeinoilla tavanomaisia viljelykasveja viljeltäessä ja miten vesienhallintakeinojen käyttö vaikuttaa käytännön viljelyyn. Hankkeessa selvitettiin myös vesienhallintakeinojen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ja taloudellisia toteuttamisedellytyksiä. Siinä kehitettiin myös automaattinen säätösalaojakaivo vesienhallintatoimien käytön helpottamiseksi ja tehtiin menetelmäkehittelyä turvepellon kosteustilan selvittämiseksi kaukokartoitusmenetelmillä.

Turvepeltojen viljelyn ympäristövaikutukset johtuvat turpeen – eloperäisen aineksen – hajoamisesta mikrobien hajotustoiminnan seurauksena. Suuria hehtaariohtaisia kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään ja ravinnepäästöjä vesistöihin on vähennettävä, jotta Suomi pystyy saavuttamaan hiilineutraalisuustavoitteensa vuoteen 2035 mennessä ja jotta vesistöjen tila paranee EU:n vesipuitedirektiivin mukaisesti.

Tutkimushankkeen koekentällä vesienhallintakeinona käytettiin säätösalaojitusta (padotusta), ja sen avulla salaojien kautta tulevaa valuntaa ja ravinnehuuhtoumaa pystyttiin vähentämään noin 65 % eli kolmasosaan tavanomaisen salaojituksen huuhtoumasta.

Padotuksen aikaansaama korkeampi pohjavedenpinta esti turpeen hajoamista niin, että vuosittaiset kasvihuonekaasupäästöt vähenivät 40 %, jos vedenpinta nousi 80 cm:stä 30 cm:iin. Kasvihuonekaasupäästöt olivat suurimmillaan lämpiminä aikoina, mutta koska samaan aikaan voimakas haihdunta alensi pohjavedenpintaa, päästövähennys jäi pieneksi. Joka tapauksessa kasvihuonekaasupäästöt olivat sitä pienemmät, mitä korkeammalla pohjavesi oli.

Altakastelulla pohjavedenpintaa pystyttiin pitämään hieman korkeammalla kuin pelkällä padotuksella, mutta koska kastelujaksot jäivät lyhyiksi, kastelun vaikutuksista ei saatu selkeää käsitystä.

Hydrologinen tarkastelu osoitti, että pelto on yhteydessä ympäristöön, mistä voi olla sekä hyötyä että haittaa; ympäristöstä pellolle virtaava vesi auttaa pitämään pohjavettä korkealla, mutta padottamalla aikaansaatu korkea vedenpinta saattaa aiheuttaa veden virtausta ympäristöön.

Taloudellisten toteuttamisedellytysten tarkastelu osoitti, että mahdollinen sadonlisä ei riitä kattamaan vesienhallinnan kustannuksia kuin kaikkein arvokkaimmilla viljelykasveilla, vaan viljelijöille on maksettava vesienhallinnalla aikaansaaduista päästövähennyksistä.

Hankkeessa kehitetty automaattien säätösalaajakaivo on valmis tuotteistamista varten, ja hankkeessa otettiin edistysaskelia kaukokartoituksella tehtävän maankosteuden tunnistusmenetelmän kehityksessä.

Käytännön viljelytoimien onnistumiseen korkealla vedenpinnalla ei ollut juurikaan vaikutusta sillä maanpinnan kosteusolot vaikuttivat riippuvan lähinnä säätilasta ja haihdunnan määrästä.

Tutkimustulosten perusteella esitetään seuraavat toimentasuositukset:

- Säätösalaajituksen ja altakastelun käytön lisäämiseksi tarvitaan taloudellisia kannusteita. Ympäristöhyödyt ovat selvät, ja ne saavutetaan melko edullisesti.
- On panostettava tutkimukseen, joka tuottaa keinoja vedenpinnan nostoon sopivien alueiden tunnistamiseen. Tutkimus palvelee päästövähennyksiin pyrkimistä, olipa tavoitteena tavanomainen viljely tai pellon vettäminen joko kosteaviljelyä tai ennallistamista varten.
- Vesistökuormituksen vähennystoimet kannattaa ensisijaisesti kohdentaa paksuturpeisille pelloille, koska niiden valumavedet ovat ravinnepitoisempia kuin ohutturpeisten ja niiden hydrologia soveltuu vedenpinnan korkealla pitämiseen paremmin kuin ohutturpeisten.
- On lisättävä tiedotusta vesienhallintakeinojen toteutuksesta ja vaikutuksista viljelijöille, neuvojille, opettajille ja salaojasuunnittelijoille, jotta vesienhallintatoimien käyttö yleistyisi ja ympäristöhaitat vähenisivät
- Vesienhallintatoimien automatisointimahdollisuus on tuotava viljelijöiden saataville, jotta menetelmien käyttö helpottuisi

7. Viitteet

Tähtikarhu, M. and Okkonen, J., 2023. Analyzing Groundwater Recharge and Vadose Zone Dynamics by Combining Soil Moisture and Groundwater Level Data with a Numerical Model in Subarctic Conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 28, 05023001. <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-584>

Peltonen-Sainio, P., Niemi, M., Jauhiainen, L. 2024. Legacy effects of crop sequencing on biomass and their variability on farmers' fields in Finland are shaped by weather, farm conditions and rationales for land use. *Agricultural Systems* 215 (2024) 103850. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103850>

Purola, T. & Lehtonen, H. 2022. Farm-Level Effects of Emissions Tax and Adjustable Drainage on Peatlands. *Environmental Management* 69: 154–168. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01543-1>

Tzemi, D. & Lehtonen, H. 2022. The use of pre-crop values to improve farm performance: the case of dairy farms in southwest Finland, *International Journal of Agricultural Sustainability*. <https://doi.org/10.1080/14735903.2022.2131042>