



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 112/2023

Ennallistettujen soiden tilan seuranta

Kokemuksia vesienpalautuksen seurannasta ja kaukokartoitusmenetelmistä

Aleksi Räsänen, Aleksi Isoaho, Lauri Ikkala, Roosa Hautala, Otto Bigler, Kaapro Keränen, Sirkku Ahonen ja Santtu Kareksela

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 112/2023

Ennallistettujen soiden tilan seuranta

Kokemuksia vesienpalautuksen seurannasta ja
kaukokartoitusmenetelmistä

**Aleksi Räsänen, Aleksi Isoaho, Lauri Ikkala, Roosa Hautala, Otto Bigler, Kaapro
Keränen, Sirkku Ahonen ja Santtu Kareksela**



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment



Viittausohje:

Räsänen, A., Isoaho, A., Ikkala, L., Hautala, R., Bigler, O., Keränen, K., Ahonen, S. & Kareksela, S. Ennallistettujen soiden tilan seuranta : Kokemuksia vesienpalautuksen seurannasta ja kauko-kartoitusmenetelmistä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 112/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 57 s.

Aleksi Räsänen ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-3629-1837>



ISBN 978-952-380-832-4 (Painettu)

ISBN 978-952-380-833-1 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-833-1>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Aleksi Räsänen, Aleksi Isoaho, Lauri Ikkala, Roosa Hautala, Otto Bigler,

Kaapro Keränen, Sirkku Ahonen ja Santtu Kareksela

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023

Julkaisuvuosi: 2023

Kannen kuva: Aleksi Isoaho

Tiivistelmä

Aleksi Räsänen¹, Aleksi Isoaho^{1,2}, Lauri Ikkala², Roosa Hautala³, Otto Bigler³, Kaapro Keränen^{1,4}, Sirkku Ahonen⁵ ja Santtu Kareksela⁶

¹ Luonnonvarakeskus, Oulu

² Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö, Teknillinen tiedekunta, Oulun yliopisto

³ Metsätieteiden osasto, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, Helsingin yliopisto

⁴ Maantieteen tutkimusyksikkö, Luonnontieteellinen tiedekunta, Oulun yliopisto

⁵ Metsähallitus Metsätalous Oy, Ranua

⁶ Metsähallitus Luontopalvelut, Hämeenlinna

Soiden ennallistamistoimenpiteiden vaikutusten todentaminen edellyttää seurantaa. Tässä raportissa esittelemme Ennallistettujen soiden tilan seurannan kehittämisen -hankkeen keskeisiä tuloksia. Selvitimme hankkeessa, (1) minkälaiset hydrologiset, ekologiset ja kaukokartoitusseurantamenetelmät ovat toimivia vesienpalautuskohteiden seurannassa ja (2) voidaanko kaukokartoitusaineistojen avulla seurata perinteisen ennallistamisen (ojien täyttäminen ja patoaminen) onnistumista.

Pilotoimme vesienpalautuskohteiden seurantaa kahdeksalla suolla Pohjois-Pohjanmaalla ja Pohjois-Savossa vuosien 2021–2023 aikana. Vesienpalautuksen seurantamenetelmien kehityksestä keskustelimme myös yhdessä kokemusasiantuntijoiden kanssa työpajoissa. Lisäksi testasimme satelliittikuvamenetelmien soveltuvuutta märkyiden ja kasvillisuuden seurantaan perinteisen ennallistamisen kohteilla.

Vesienpalautusseurannan osalta saimme hyviä tuloksia optisten satelliittikuvien sekä multispektri- ja lämpökameradronekuvien hyödyntämisestä soiden märkyiden maantieteellisen ja ajallisen vaihtelun mallintamisessa. Sen sijaan perinteisillä maastomenetelmillä, eli vedenpinnan tason mittauksilla ja kasvillisuusruutuinventoinneilla, saadut tulokset olivat epävarmempia. Maastomenetelmien osin epäonnistunut pilotointi toi kuitenkin arvokasta tietoa seurantakoealojen sijoittelun haasteellisuudesta, seurantoihin soveltuvien kohteiden vähäisyydestä ja esimerkiksi vedenpinnan tasoa mittaavien loggereiden laitteisto-ongelmista. Jatkossa vesienpalautuksen vaikutusten todentamiseen tarvittaisiin rimpinevoille suunnattu systemaattinen seurantaverkosto. Perinteisen ennallistamisen kohteilla saimme hyviä tuloksia satelliittikuvien käytöstä soiden vedenpinnan tason muutosten analysoinnissa. Sen sijaan emme saaneet kehitettyä toimivia menetelmiä kasvillisuusmuutosten tulkintaan.

Tulostemme perusteella etenkin satelliittikuvat voivat tuoda uusia mahdollisuuksia soiden märkyiden muutosten ja ennallistamistoimien vaikutusalueen mallintamiseen. Satelliittikuvia voi hyödyntää esimerkiksi kohteiden hoitoseurannassa ja soiden ennallistamisen vaikutusalueen mallintamisessa. Kaukokartoitusmenetelmät eivät kuitenkaan voi korvata maastossa tapahtuvaa seurantaa mutta voivat toimia niiden tukena ja pistemäisten maastohavaintojen ennustamisessa laajemmille alueille.

Asiasanat: Aapasuot, droonit, ekologia, ennallistaminen, hydrologia, kasvillisuus, kaukokartoitus, satelliittikuvaus, seurantatutkimus, suot

Abstract

Monitoring restored peatlands: Experiences of water flow route restoration and remote sensing methods

Aleksi Räsänen¹, Aleksi Isoaho^{1,2}, Lauri Ikkala², Roosa Hautala³, Otto Bigler³, Kaapro Keränen^{1,4}, Sirkku Ahonen⁵ and Santtu Kareksela⁶

¹ Natural Resources Institute Finland, Oulu

² Water, Energy and Environmental Engineering Research Unit, Faculty of Technology, University of Oulu

³ Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki

⁴ Geography Research Unit, Faculty of Science, University of Oulu

⁵ Metsähallitus Forestry Ltd, Ranua

⁶ Metsähallitus, Parks & Wildlife Finland, Hämeenlinna

To assess how peatland restoration affects the state of the peatlands, monitoring methods are needed. During the past four years, we tested different monitoring methods to assess the status of the restored peatlands. We investigated (1) what kind of hydrological, ecological, and remote sensing monitoring methods function well in monitoring such restoration sites in which water flow routes are directed towards undrained sites suffering from adjacent drainage, (2) whether remote sensing data can be used to monitor the success of traditional (i.e., ditch infilling and blocking) peatland restoration.

We piloted the monitoring of water flow route restoration in eight different mire sites in Northern Ostrobothnia and Northern Savo in central Finland during the years 2021–2023. We also discussed the development of water flow route restoration monitoring methods together with restoration experts in workshops. In addition, we tested satellite image methods for monitoring wetness and vegetation changes at traditional restoration sites.

In the water flow route monitoring, we obtained good results with the use of optical satellite images and multispectral and thermal camera drone images when modeling the geographical and temporal variation of the wetness patterns. However, the results obtained with traditional field inventory methods, i.e., water level measurements and vegetation plot inventories, were more uncertain. However, the unsuccessful piloting of field inventory methods brought valuable information about the challenges in placing the monitoring plots, the small number of suitable sites available for monitoring, and the hardware problems of the water level loggers. In the future, to verify the effects of water flow route restoration, a systematic monitoring network for flark fens is needed. In the traditional restoration sites, we obtained good results with the use of satellite images in the analysis of peatland water level changes. Instead, no well-functioning methods could be developed for the interpretation of vegetation changes with satellite imagery.

Based on our results, particularly satellite images bring new opportunities for modeling changes in the peatland wetness and the impacted area of restoration activities. However, remote sensing methods cannot replace field inventory methods but can serve as their support and in predicting point-based field observations to larger areas.

Keywords: Aapa mires, drones, ecology, hydrology, monitoring, peatlands, remote sensing, restoration, satellite imagery, vegetation

Sisällys

1. Johdanto	7
1.1. Seurantojen tarve ja tavoitteet	7
1.2. Perinteisen ennallistamisen ja vesienpalautuksen vaikutusten seuranta	8
1.3. Kaukokartoitusmenetelmät seurannassa	9
1.4. Hankkeen tavoitteet ja kysymykset	10
1.5. Ydinkohdat	10
2. Seurannan kehittäminen vesienpalautuskohteille	11
2.1. Seuranta vuosina 2021–2023	11
2.1.1. Ydinkohdat	16
2.2. Märkyden ja sen muutosten tulkinta vesienpalautuskohteilla	17
2.2.1. Periaatteet ja menetelmät vesienpalautuskohteiden märkyden tulkintaan yleisesti	17
2.2.2. Vedenpinnan tason kenttäaineistot	17
2.2.3. Satelliittikuva-aineistot	19
2.2.4. Dronekuvaus	23
2.2.5. Muut kaukokartoitusaineistot	26
2.2.6. Ydinkohdat	28
2.3. Menetelmiä kasvillisuuden muutosten pitkäaikaisseurantaan	29
2.3.1. Kasvillisuusinventointiaineistojen analyysit	29
2.3.2. Pintatyypin kaukokartoitusluokittelu	30
2.3.3. Pohdintaa kaukokartoitusmenetelmien toimivuudesta	31
2.3.4. Lopuksi	32
2.3.5. Ydinkohdat	32
2.4. Työpaja vesienpalautuksen vaikuttavuus- ja hoitoseurannoista	33
2.4.1. Ydinkohdat	34
2.5. Ehdotuksia hoito- ja vaikuttavuusseurantaan	35
2.5.1. Hoitoseuranta	35
2.5.2. Vaikuttavuusseuranta	37
2.5.3. Ydinkohdat	38
3. Kaukokartoituspohjaisen seurannan kehittäminen perinteisen ennallistamisen kohteilla	40
3.1. Dronekuvaaminen seurantojen tueksi	40
3.1.1. Ydinkohdat	42
3.2. Märkyden muutosten tulkinta kaukokartoitusaineistojen avulla	42
3.2.1. Johdanto	42

3.2.2. Menetelmät	42
3.2.3. Tulokset ja johtopäätökset	43
3.2.4. Ydinkohdat	43
3.3. Kasvillisuuden seuranta	44
3.3.1. Ydinkohdat	45
3.4. Tuloksia muilta alueilta ja muista hankkeista.....	45
3.4.1. Ydinkohdat	46
4. Yhteenveto ja johtopäätökset	47
4.1. Vesienpalautuskohteiden seuranta.....	47
4.2. Perinteisen ennallistamisen kohteiden seuranta	48
4.3. Kaukokartoitusaineistojen käyttö vesienpalautuksen ja ennallistamisen seurannassa	48
4.4. Hoitoseurantojen kehittäminen vesienpalautus- ja ennallistamiskohteille.....	49
4.5. Arvioita seurannan kustannuksista perustuen toteutuneisiin kuluihin	50
4.6. Parhaat käytännöt vesienpalautus- ja ennallistamiskohteiden tilan seurantaan	51
4.7. Toimenpidesuositukset	53
4.7.1. Hoitoseurannat	53
4.7.2. Vaikuttavuusseurannat	53
Viitteet.....	55

1. Johdanto

1.1. Seurantojen tarve ja tavoitteet

Suomi on keskiössä Euroopan boreaalisten soiden luonnon monimuotoisuuden turvaamisessa. Suomen suoluonnon tila on heikentynyt radikaalisti viimeisten vuosikymmenten aikana. Alkuperäisestä noin 10 miljoonan hehtaarin suoalasta on ojitettu metsätaloukseen yli puolet ja myös muut maankäyttömuodot ovat heikentäneet soiden hydrologista ja ekologista tilaa. Tämän seurauksena 74 % Suomen suoluontotyypeistä on uhanalaisia tai silmälläpidettäviä (Kaakinen ym. 2018) ja soita elinympäristönään käyttävistä lajeista 475 on uhanalaisia tai silmälläpidettäviä (Hyvärinen ym. 2019). Keskeisenä keinona luonnon monimuotoisuuden tilan edistämiseksi on nostettu esiin heikentyneiden elinympäristöjen ennallistaminen. Ennallistamisen tavoitteena on palauttaa suolle luonnollista tilaa vastaavat hydrologiset olosuhteet ja kasvillisuus.

Metsähallituksen Luontopalvelut ja myös muut toimijat ovat ennallistaneet soita Suomessa viime vuosikymmeninä kymmenillä tuhansilla suohehtaareilla vaikuttaen välillisesti vielä huomattavasti suurempaan pinta-alaan.

Perinteisesti ennallistamista on tehty erityisesti täyttämällä tai patoamalla ojia sekä poistamalla puustoa alun perin puuttomilta ojitetuilta soilta. Viime vuosina perinteisen ennallistamisen rinnalle on otettu käyttöön myös vesienpalautukset, joissa vettä ohjataan vesienpalautus uomien avulla kuivahtaneelle mutta ojittamattomalle avosuolle ympäröiviltä ojitetuilta alueilta (Autio ym. 2018). Vesienpalautuksen kohteena olevaa avosuota ei alun perin ole syystä tai toisesta ojitettu, johtuen usein arviosta, että aluetta ei saada metsittymään. Kuitenkin ympäröivän alueen ojitus on vaikuttanut avosuohon kuivattavasti, sillä suolle alun perin valuneet vedet on ohjattu kiertämään avosuoa reunoja myöten. Vesienpalautuksessa pyritäänkin palauttamaan vesienpalautus uomien avulla suolle alun perin kuuluneet vedet.

Soiden ennallistaminen tulee lisääntymään merkittävästi tulevina vuosina. Soiden ennallistaminen on keskeinen osa esimerkiksi Helmi-elinympäristöohjelmaa, jossa perinteiselle ennallistamiselle on asetettu 59 300 hehtaarin ja vesienpalautukselle 400 kohteen tavoitteet vuoteen 2030 mennessä.

EU:n biodiversiteettistrategiassa ja mahdollisessa tulevassa ennallistamisasetuksessa on asetettu vielä Helmi-ohjelmaakin suurempia tavoitteita. Ensimmäisen luonnoksen perusteella ennallistamisasetuksen arvioitiin Suomessa tarkoittavan noin 1–3 miljoonan suohehtaarin ennallistamista vuoteen 2050 mennessä (Räsänen ym. 2023). Uusien tavoitteiden myötä myös valuma-alueitasoinen suunnittelu ja toiminta tulee todennäköisesti korostumaan. Tämä lisää myös vesienpalautuksen kaltaista toimintaa ja toisaalta lisää tarvetta vaikutusalueiden tarkastelumenetelmille. Lisäksi ennallistamisasetukseen tulee vaatimuksia eri elinympäristötyyppien kokonaistilan selvittämiseksi: tällä hetkellä suuri osa Suomen luontotyypin ja erityisesti soiden pinta-alasta on tuntemattomassa tilassa (Räsänen ym. 2023).

Mittavilla ennallistamistoimilla saavutetaan haluttu vaikutus vain, jos elinympäristöjen tila muuttuu toivottuun suuntaan. On kuitenkin edelleen epäselvää, missä määrin ja missä ajassa ennallistetut suot palautuvat luonnontilaisen kaltaiseksi hydrologialtaan ja lajistoltaan, vai palautuvatko ollenkaan, sekä kuinka laajoja nämä muutokset ovat. Puutteellinen tietämys johtuu

osin siitä, että ennallistamisen vaikutukset ovat vaikeasti mitattavissa tai arvioitavissa objektiivisesti. Lisäksi seurantatietoa on kertynyt toistaiseksi vasta keskipitkältä ajalta, noin 20 vuodelta.

Seurannassa haasteena on yleistettävyyden sekä ekologien, hydrologien ja muiden tietojen yhdistämisen vähäisyys: soiden ennallistamistutkimukset ovat usein käytännön syistä rajoittuneet tiettyihin suotyyppisiin tai ennallistamisen ensi vuosiin, joiden pohjalta on vaikea tuottaa yleistettävää tietoa ennallistamisen pitkäaikaisista vaikutuksista (Haapalehto ym. 2017, Andersen ym. 2017). Tarvitaan kuitenkin uusia toimivia ja kustannustehokkaita menetelmiä ennallistettujen soiden tilan seurantaan sekä entistä pidempiä seuranta-aikasarjoja. Esimerkiksi suojelualueiden ulkopuolella ennallistamisen vaikutusten arviointia ja seurantaa ei käytännössä tehdä lainkaan.

1.2. Perinteisen ennallistamisen ja vesienpalautuksen vaikutusten seuranta

Perinteisen soiden ennallistamisen ekologisia vaikutuksia valtion suojelualueilla seurataan valtakunnallisessa soiden ennallistamisen seurantakoealaverkostossa, joka toimii hyvänä alustana laaja-alaisen, erilaisia suotyyppisiä ja niiden vaikutusalueita tarkastelevan seurannan toteuttamiseksi. Verkoston ylläpitämisestä ja seurantojen toteutuksesta vastaa Metsähallituksen Luontopalvelut ja verkoston laaduntarkkailu on kansallisen soiden ennallistamisen asiantuntijaryhmän SuoELOn vastuulla. Seurantaverkoston avulla tapahtuva vaikuttavuusseuranta (kasvit ja hydrologia sekä erillisenä verkostona perhoset ja osin muut selkärangattomat eläimet) vastaa siihen, kuinka hyvin ja millä aikavälillä ennallistaminen palauttaa soita kohti luonnontilaa. Koska palautumista ei voi käytännössä mitata maastossa jokaisella suolla, seuranta on toteutettu otostamalla ja seurantasoilta saatavia tuloksia yleistetään muille vastaavan tyyppisille soille.

Seurantaverkoston kohteiden aineistojen keräämisen lisäksi jokaisella ennallistetulla suolla tehdään hoitoseurantaa, jolla silmämääräisten havaintojen perusteella varmistetaan, että palautumisen edellytykset ovat kullakin kohteella olemassa. Hoitoseurannassa arvioidaan ennallistamistoimien tekninen onnistuminen ja määritetään tarvittaessa täydentävät toimenpiteet. Lisäksi sillä kerätään tietoa, miten ennallistaminen on edennyt teknisesti oikein toteutetuilla kohteilla. Siten hoitoseurannan avulla saadaan arvokasta tietoa, jota voidaan käyttää ennallistamismenetelmien ja toimintatapojen kehittämisessä. Maastossa tehtävä hoitoseuranta on verrattain työlästä eikä tuota kohteen palautumisesta kvantitatiivisesti mitattua tietoa, jota voitaisiin systemaattisesti tarkastella ja analysoida. Hoitoseurannassa tehtävä päätös kohteen ennallistamisen onnistumisesta on yksittäisen henkilön subjektiivinen näkemys eikä perustu vakioituihin mittauksiin. Toisaalta ennallistamiskohteiden yksilöllisyydestä johtuva tarve kohdekohtaisesti sovellettavalle hoitoseurannalle on tunnistettu aikaisemmassa seurantaohjeistuksen laadinnassa (Hyvärinen ja Aapala 2009) sekä uudelleen seurantaoppaan päivitystyöpassa (9/2023). Ennallistamisen seurantaoppaan hoitoseurantojen ohjeistus onkin edelleen suurimmalta osin toimiva ja riittävä.

Vesienpalautuksen odotetaan nousevan merkittäväksi soiden luontoarvoja ja vesistöjen tilaa parantavaksi toimenpiteeksi Helmi-ohjelman myötä. Sen vaikutukset – sekä positiiviset että mahdollisesti negatiiviset (esimerkiksi viereisten metsätalousalueiden vettyminen) – ovat kuitenkin huonosti tunnettuja, eikä vesienpalautuskohteiden seurantamenetelmiä ole toistaiseksi

vakiinnutettu. Itse vesienpalautuksestakin on toimenpiteenä vasta vähän kokemuksia, eikä vaikutusten seurannan käynnistäminen onnistu ilman tarkkaa toimenpiteen tuntemusta ja kohdekohtaista suunnittelua. Ensimmäisten vesienpalautusten toteutuksessa on yhtäältä todettu tarve heti toimenpiteiden toteutuksen jälkeen tehtävälle hoitoseurannalle eli mahdollisten ongelmien kuten veden leviämisen ja liettymisen kartoitukselle. Toisaalta on tarve pidempiaikaisen luontotyyppeihin kohdistuvien vaikutusten seurannan kehittämiseksi. Koska toteutetuilla vesienpalautuskohteilla on huomattu vaihtelua esimerkiksi toimenpiteiden toteutuksen ja vesien leviämisen suhteen, seurannan suunnittelu ja toteutus vaatii kohteiden lisätarkastelua ja yhteistyötä käytännön toimijoiden sekä tutkijoiden kanssa.

1.3. Kaukokartoitusmenetelmät seurannassa

Nykyisten seurantojen avulla pystytään arvioimaan erityisesti laadullisia muutoksia eli sitä, miten ennallistaminen parantaa kasviyhteisöjen tai suon hydrologian tilaa. Pistemäisellä laaduntarkkailulla ei kuitenkaan pystytä osoittamaan luontotyyppin tilan paranemisen laajuutta kokonaisuutena yksittäisen suon ennallistamisen jälkeen: emme pysty aiemmin käytetyillä menetelmillä määrällisesti osoittamaan kuinka suurelta alalta suon ennallistamistoimet tiettyjen luontotyyppien piirteitä palauttavat, koska on osittain epäselvää kuinka laajalle vaikutukset ennallistettavalla alalla tai sen välittömällä vaikutusalueella ulottuvat. Ojien tukkiminen tai vesienpalautus oletettavasti palauttaa vesitaloutta ja suon tilaa toimenpidealuetta laajemmalla alueella, mutta on toistaiseksi selvittämättä, kuinka laajasti ennallistaminen vaikuttaa esimerkiksi aapasuoluontotyyppeihin ennallistamisen toimenpidekuvioiden ulkopuolella. Erityisen oleellista vaikutusalueen määrittely on vesienpalautustoimien vaikuttavuuden kannalta, sillä vesienpalautuksessa toteutettava toimenpide on pistemäisempi verrattuna perinteiseen ennallistamiseen.

Yksi potentiaalinen tapa kehittää seurantaa on kaukokartoitusmenetelmien käyttö. Droneista, satelliiteista ja muista kaukokartoitusmenetelmistä saatavien aineistojen avulla voidaan saada mitattavaa ja objektiivista tietoa yksittäisen kohteen muutoksista ennallistamisen jälkeen, jos tieto on systemaattisesti kerättyä ja jos kaukokartoitushavainnot voidaan kalibroida ja validoida maastohavaintoaineistojen avulla. Kaukokartoitusaineistoissa on suuri joukko muuttujia, joita voidaan liittää suon tilaan, esimerkiksi märkyyteen tai kasviyhteisön koostumukseen. Joitain aineistoja on olemassa jo pitkältä aikaväliltä (ilmakuvat, karkeamman alueellisen erottelukyvyyn satelliittikuvat), kun taas joitain aineistoja on saatavilla vain viimeisiltä vuosilta (laserkeilaus, dronekuvat, tarkemman alueellisen erottelukyvyyn satelliittikuvat). Merkittävä osa aineistosta on ilmaista. Keskeinen haaste on valita tarkasteltavien kysymysten kannalta toimivimmat aineistot, määrittää niistä soiden tilaa kuvaavat muuttujat ja rakentaa siten menetelmä, joka nyt ja tulevaisuudessa kertoo tarvittavalla tarkkuudella ekosysteemin muutoksista ennallistamisen jälkeen. Tavoitteista riippuen oleellisia muuttujia voi löytyä eri mittakaavoja tarkastellen ja aineistolähteitä yhdistellen.

1.4. Hankkeen tavoitteet ja kysymykset

Kuvaamme tässä raportissa Ennallistettujen soiden tilan seurannan kehittäminen -hankkeen keskeisiä tuloksia ja havaintoja. Hankkeen tavoitteena oli nimensä mukaisesti kehittää ja kokeilla menetelmiä ennallistettujen soiden tilan seurantaan. Hankkeen painopisteet olivat etenkin vesienpalautuskohteiden seurannassa ja kaukokartoitusmenetelmien kokeilussa perinteisen ennallistamisen seurannassa. Tarkemmat tutkimuskysymyksemme olivat seuraavat:

1. Minkälaiset ekologiset, hydrologiset ja kaukokartoitusseurantamenetelmät ovat toimivia vesienpalautuskohteiden hoito- ja vaikuttavuusseurannassa?
2. Miten satelliitti- ja muiden kaukokartoitusaineistojen avulla voidaan seurata perinteisen ennallistamisen onnistumista?

Raportin luvussa 2 kuvaamme seurantamenetelmäkokonaisuuden, jota kokeilimme vesienpalautuskohteiden seurannassa ja pohdimme, millä tavoin vesienpalautuskohteiden hoito- ja vaikuttavuusseuranta voitaisiin tehdä. Luvussa 3 keskityimme perinteisen ennallistamisen seurannassa kokeiltujen kaukokartoitusmenetelmien kuvaukseen. Koostamme hankkeen annin yhteen ja esitämme toimenpidesuosituksia luvussa 4.

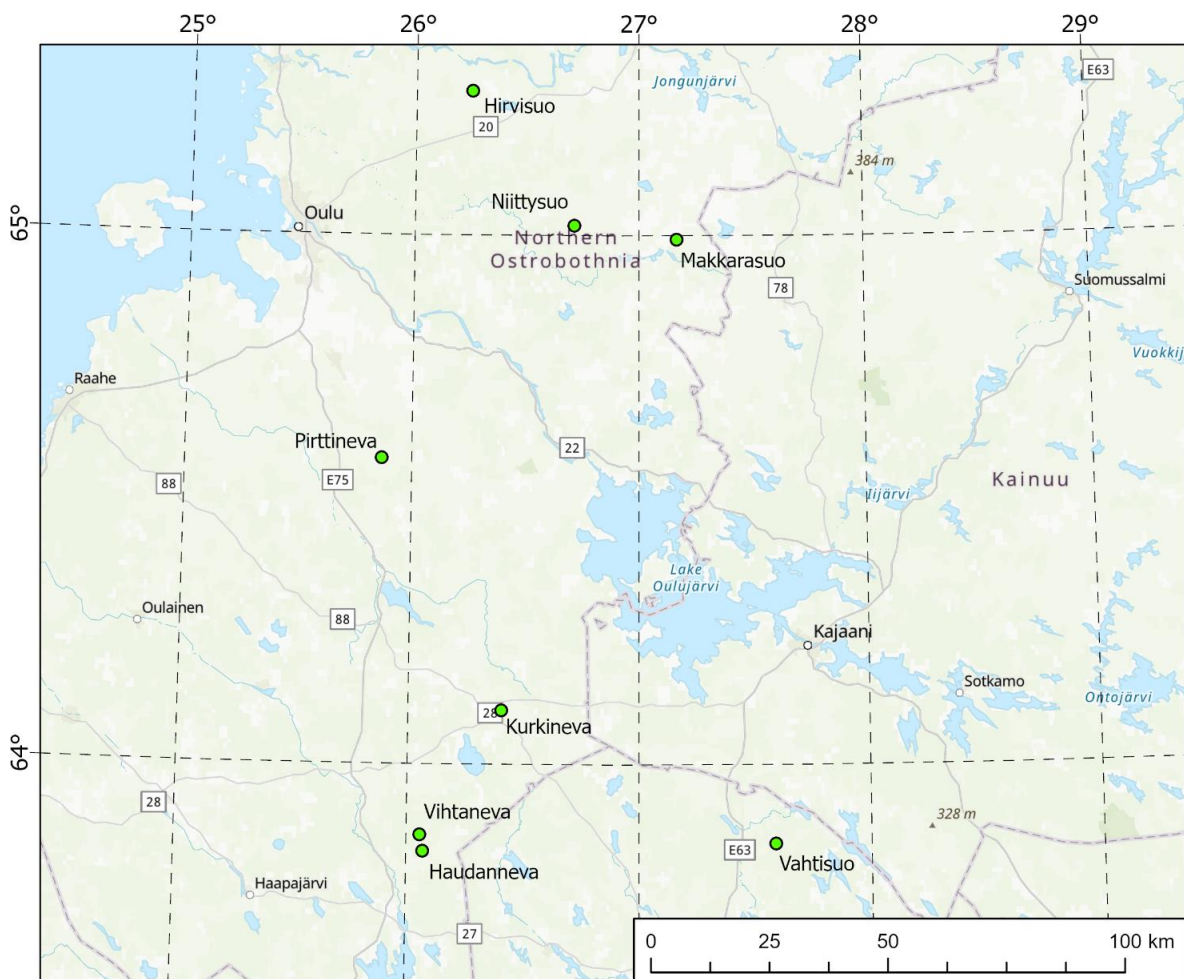
1.5. Ydinkohdat

- Soiden ennallistamisen seuranta on välttämätöntä, jotta saadaan tietoa ennallistamisen vaikutuksista.
- Vesienpalautuskohteiden ekologisen ja hydrologisen vaikuttavuuden seuranta ei ole tehty aiemmin. Vesienpalautus on ennallistamismenetelmä, jossa vettä johdetaan ympäröiviltä metsäojitusalueilta kuivahtaneelle mutta ojittamattomille avosoille.
- Kaukokartoitusmenetelmien avulla voidaan kerätä objektiivista, mitattavaa ja maantieteellisesti kattavaa tietoa soiden tilan muutoksista ennallistamisen jälkeen.
- Tavoitteenamme oli pilotoida ekologiaa, hydrologia ja kaukokartoitusmenetelmiä vesienpalautuskohteiden seurannassa ja arvioida kaukokartoitusmenetelmien toimivuutta perinteisen ennallistamisen (ojien täyttäminen ja patoaminen) seurannassa.

2. Seurannan kehittäminen vesienpalautuskohteille

2.1. Seuranta vuosina 2021–2023

Koska aikaisempia seurantoja vesienpalautukselle ei ollut, kokeilimme hankkeessa kokonaan uudenlaista seurantamenetelmäkokonaisuutta. Pilotoimme seurantaan vuosina 2021–2023 Pohjois-Pohjanmaalla ja Pohjois-Savossa 12 suokohteella, jotka sijaitsevat kahdeksalla eri suolla (Taulukko 1, Kuva 1). Tarkastelimme valitun seurantakohdejoukon avulla kasvillisuuden ja hydrologian eroja eri-ikäisillä vesienpalautuskohteilla. Kohteet sisälsivät vanhoja ja uusia vesienpalautuskohteita sekä kohteita, joille vesienpalautusta ei ole vielä tehty. Luonnontilais-ten verrokkien valitseminen vesienpalautuskohteille on haastavaa, emmekä pystyneet ottamaan niitä myöskään resurssisyistä mukaan seurantaan.



Kuva 1. Vuosina 2021–2023 toteutetun vesienpalautuksen seurantapilotin kohteiden sijainnit.

Teimme vaikutusten seurantaan eri etäisyyksillä vesienpalautuspuoman päästä, minkä oli tarkoitus auttaa vesienpalautuksen vaikutusalueen laajuuden tulkinnessa. Teimme seurantaan kasvillisuusruutujen, vedenpinnan mittausten, dronejen ja satelliittikuva-aineistojen avulla. Seurantaan kuuluivat myös maastokäyntien yhteydessä tekemämme yleiset havainnot vesienpalautuspuomien toimivuudesta.

Taulukko 1. Vuosina 2021–2023 toteutetun vesienpalautuksen seurantapilotin kohteet.

Kohde	Seuranta-aika	Vesienpalautus	Kunta
Makkarasuo 1	2021–2023	Onnistunut vesienpalautus ~1985 hakkuiden yhteydessä	Utajärvi
Makkarasuo 2	2021–2023	Epäonnistunut vesienpalautus 1990 kunnostusojituksen yhteydessä Epäonnistunut vesienpalautus 2021*	Utajärvi
Makkarasuo 3	2021–2023	Onnistunut vesienpalautus 1990 uudistusojituksen yhteydessä	Utajärvi
Makkarasuo 4	2021–2023	Epäonnistunut vesienpalautus 1990	Utajärvi
Pirttineva	2021	Onnistunut vesienpalautus 1992–2005 välillä kunnostusojituksen yhteydessä	Liminka
Hirvisuo	2021	Vesienpalautus 2010	Oulu
Niittysuo 1	2021	Vesienpalautus 2014 keväällä	Utajärvi
Niittysuo 2	2021	Ei vesienpalautusta	Utajärvi
Vahtisuo	2021	Vesienpalautus 2018 syksyllä	Sonkajärvi
Haudanneva	2021	Vesienpalautus 2018 syksyllä	Pyhäjärvi
Vihtaneva	2021–2023	Vesienpalautus 2021 mutta vesienpalautusmaat pääosin tutkimusalueen ulkopuolella	Pyhäjärvi
Kurkineva	2021–2023	Vesienpalautus 2021 mutta vesienpalautusmaat pääosin tutkimusalueen ulkopuolella	Pyhäntä

*Makkarasuolla tehtiin useita vesienpalautustoimia vuosina 2021–2022 mutta seuranta-alueiden ulkopuolella.

Keräsimme maastoseurannan avulla tietoa vesienpalautuksen oletetun vaikutusalueen kasvillisuudesta ja hydrologiasta. Koeasetelma oli systemaattinen ja vakioitu. Kunkin kohteen seuranta koostui 12 pisteestä (Kuvat 2–4), joista kuudessa pisteessä vedenpintaa seurattiin automaattisen loggerin ja kuudessa pisteessä manuaalimittausten avulla. Teimme manuaalimitauksia vuosien 2021–2023 aikana kolme tai neljä kertaa kesässä. Vuoden 2022 keskikesällä ja vuoden 2023 aikana teimme manuaalimitauksia myös loggeripisteissä. Vuonna 2021 tutkimme jokaisen pisteen yhteydessä kasvillisuutta 1 m × 1 m kasvillisuusruudun avulla. Lisäksi tarkastelimme pisteissä suon mätäs-, väli- ja rimpipintojen määrällistä suhdetta. Sijoitimme pisteet 25–300 m etäisyydelle kaivetun tai oletetun vesienpalautusmaaston päästä seuraavalla tavalla (Kuva 3):

- Referenssipiste on vesienpalautusmaaston pää tai muu vastaava paikka
 - Referenssipisteestä tehdään 300 m viiva oletettua lineaarista veden virtausreittiä pitkin. Veden virtausreitti arvioidaan ilmakuvien ja maastomallista muodostetun vedenvirtausmallin avulla
 - Viivan avulla muodostetaan sektori, jonka avauskulma on 35 astetta ja jonka maksimietäisyys on 300 m referenssipisteestä siten, että viiva on sektorin keskellä
- Sektorin sisään asetetaan 12 otantapistettä seuraavasti
 - Keskelle sektoria 25, 100, 200 ja 300 m päähän
 - Sektorin oikeaan ja vasempaan laitaan 50, 100, 200 ja 300 m päähän
- Jokaisessa otantapisteteessä tehdään kasvillisuusanalyysi 1 m × 1 m kasvuruudun avulla, vedenkorkeuden mittaaminen ja suon pintatyyppien määrällisen suhteen laskeminen
 - Vedenkorkeuden mittausta paikka etsitään GNSS (global navigation satellite systems) -laitteen avulla ja asetetaan lähimmälle alimmalle suopinnalle eli tilanteen mukaan rimpeen tai välipinnalle

- b. Kasvillisuusruutu asetetaan 2 m päähän vedenkorkeuden mittauspaikasta, pois päin referenssipisteestä
 - i. Kasviruudussa saa olla korkeintaan 10 % mätäspintaa
 - ii. Jos mätästä on > 10 %, kasviruutua siirretään soiden ennallistamisoppaassa kuvatun menetelmän mukaisesti naapurisoluuun
 - iii. Jos yksikään kahdeksasta naapurisolusta ei ole sopiva, tehdään iso siirto eli siirretään kasviruutua 2 m vedenpinnan tason mittauspaikasta kohti referenssipistettä
 - c. Jos seurantapiste osuu kivennäismaalle, uomaan tai kulkukelvottomaan rimpeen/alikkoon, sitä siirretään lähimpään sopivaan kohtaan
 - d. Mätäs-, väli- ja rimpipintojen määrällistä suhdetta tarkastellaan kahdeksan metrin janalla, joka alkaa vedenkorkeuden mittauspisteestä ja kulkee vedenpinnan mittauspisteestä tarkasteltuna kasviruudun vasemman alakulman kautta
 - e. Vedenpinnan mittauspisteen ja kasvillisuusruudun kahden kulman tarkka sijainti mitataan RTK (real-time kinematic) -GNSS-laitteen avulla
4. Vedenkorkeus mitataan joko loggerilla tai manuaalisella mittauksella
- a. Loggerit asetetaan seuraaviin kohtiin
 - i. Keskelle sektoria 25 ja 200 m päähän
 - ii. Oikeaan ja vasempaan laitaan 100 ja 300 m päähän
 - b. Muissa pisteissä vedenpintaa mitataan manuaalisesti

Perustimme maastohavaintoverkoston vuonna 2021 kasvukauden alkuvaiheessa toukokuun lopussa, jolloin merkitsimme pisteet maastoon, aloitimme loggeriseurannan ja suoritimme ensimmäiset vedenpinnan tason manuaalimittaukset. Kasvukauden huippuvaiheessa heinäkuussa teimme kasvillisuusinventoinnit ja manuaalimittaukset. Viimeisen manuaalimittauksen teimme lokakuussa 2021.

Vuosina 2022 ja 2023 jatkoimme seurantaa niillä kolmella suolla, joille oli suunniteltu tehtävän vesienpalautus talven 2021–2022 aikana (Taulukko 1). Kohteista Vihtanevalla ja Kurkinevalla vesienpalautustoimenpiteet tehtiin onnistuneesti, mutta kaivetut vesienpalautusuomat eivät olleet sijainniltaan optimaalisia seurannan kannalta (Kuva 4). Toisin sanoen vesienpalautusuomien päät eivät sijoittuneet seurantaverkkojen alkupisteisiin. Esimerkiksi Kurkinevan droneseuranta-alue kattoi kolme vesienpalautusuomaa, joista kaksi eivät juurikaan tuoneet vettä avosuolle ja kolmas taas sijaitsi seuranta-alueen laidalla eikä siitä ollut saatu kunnollista kuvausta ennen toimenpidettä. Kolmannella vuosien 2022–2023 seurantasuolla Makkarasuolla seurantakohteiden lähellä olevia vesienpalautusuomia ei saatu kaivettua niin pitkäksi kuin alun perin suunniteltiin ja muut vesienpalautusuomat eivät sijainneet seurantakohteiden läheisyydessä. Siten Makkarasuolla talvena 2021–2022 toteutetun vesienpalautuksen oletettu vaikuttavuus oli seurantakohteilla melko pieni.

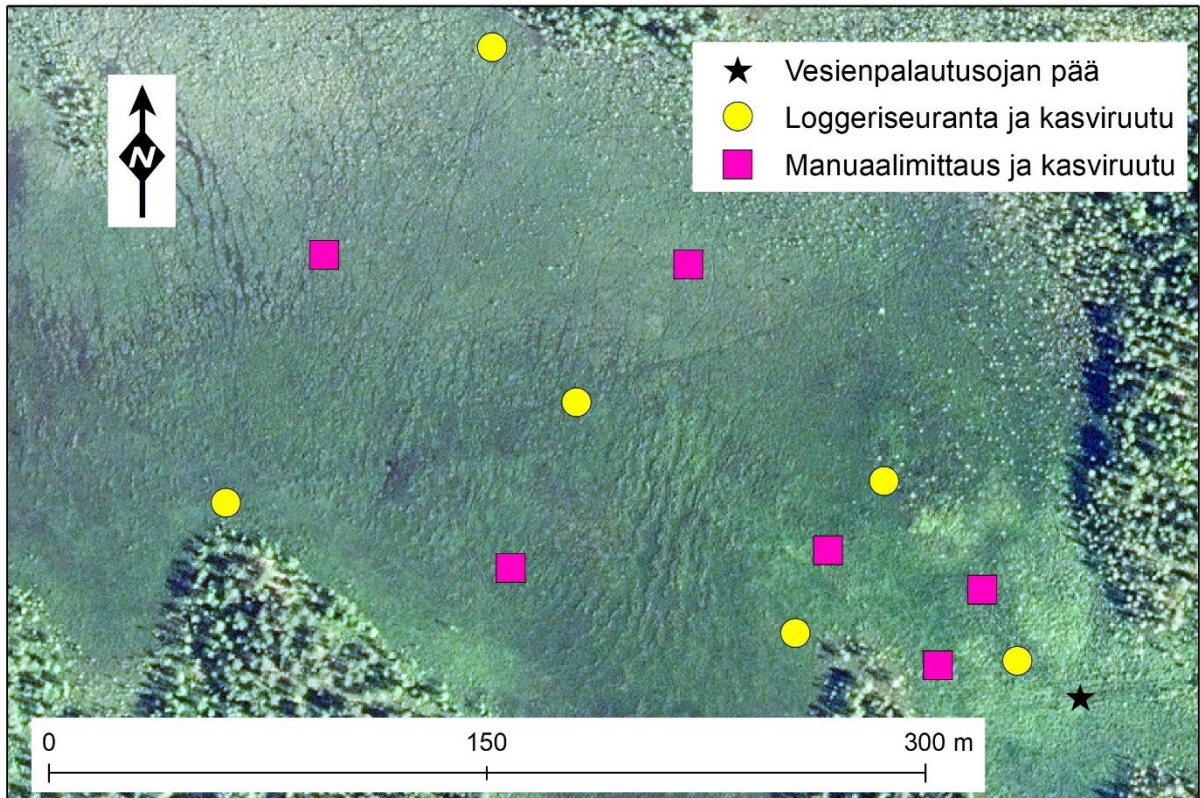
Vuosien 2022–2023 teimme aikana seurantakäyntejä 3–4 kertaa kesässä toukokuun ja lokakuun välisenä aikana. Kiersimme kahden maastopäivän aikana kolmella suolla sijainneet kuusi seurantakohtetta. Varmistimme seurantakäynneillä loggerien toimivuuden ja teimme manuaalimittaukset. Vuoden 2022 ensimmäisellä seurantakäynnillä nostimme loggeriputket ylös suosta ja sukittimme ne sukkahousuilla. Teimme sukituksen, koska vuonna 2021 kerätyssä loggeriaineistossa oli useita laatuongelmia, joiden oletimme johtuvan putkiin tehtyjen reikien

tukkeutumisesta turpeella. Sukituksen tarkoitus oli estää vesireikien tukkeutuminen turpeella. Vuosille 2022 ja 2023 lisäsimmme loggerien määrää ja asetimme niitä manuaaliputkien välittömään (etäisyys noin metri) läheisyyteen.

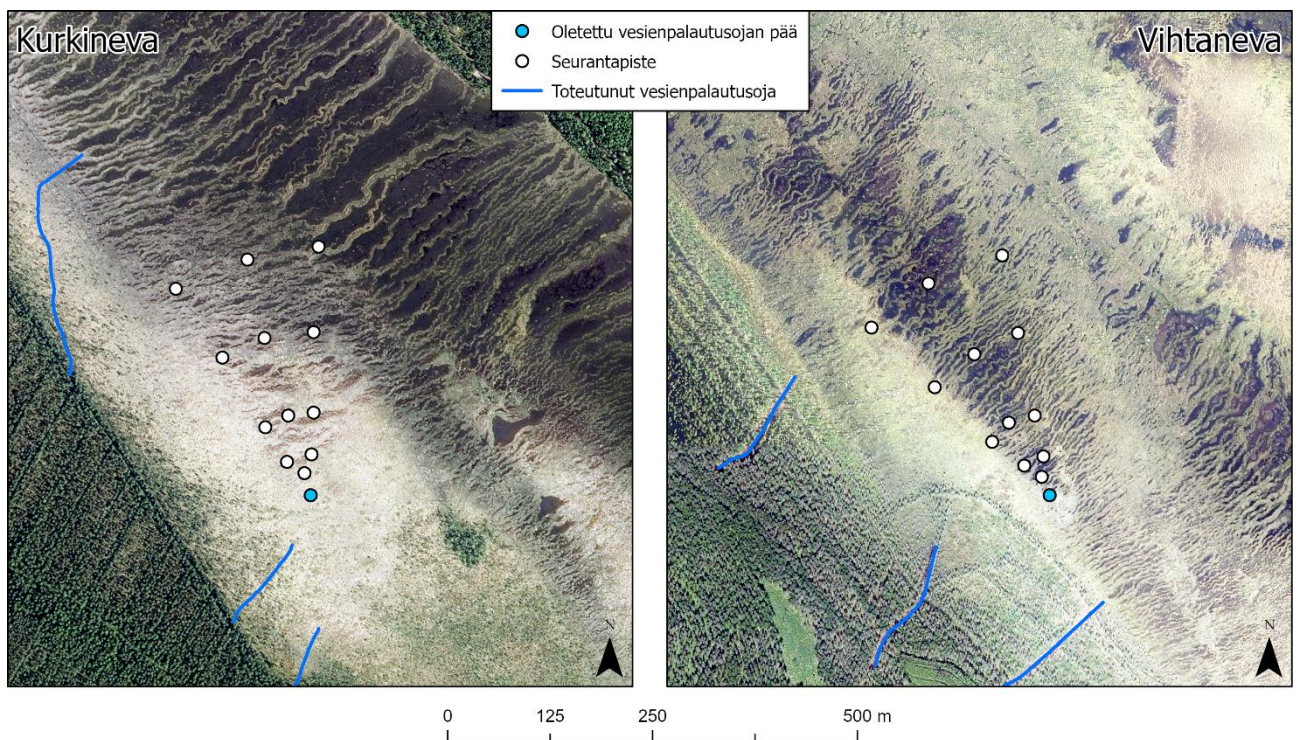
Kaukokartoitusseurantamme koostui drone- ja satelliittikuvatarkasteluista. Ennustimme kaukokartoitusseurannan avulla pistemäiset maastohavainnot jatkuviksi aineistoiksi koko maastoseurantaverkoston kattamille alueille. Tutkimme dronekuvien avulla tarkan spatiaalisen mitatakaan muutoksia. Suoritimme dronekartoituksia seurannan aikana neljästi: touko- ja elokuussa vuosina 2021 ja 2022. Ajoitimme kuvaukset samaan ajankohtaan kuin maastotyöt siten, että ensimmäiset kuvaukset olivat kevättulvan aikaan ja toiset kuvaukset kesän kuivimpaan aikaan. Mitoitimme dronelentoalueiden koot siten, että koko maastohavaintoverkko saatiin katettua.



Kuva 2. Kasviruutu ja vedenpinnan tason loggeri seurantapisteellä.



Kuva 3. Vesienpalautuksen seurantapilotin maastohavaintoverkko Pirttinevan seurantakohteessa. Taustalla Maanmittauslaitoksen ilmapäät.



Kuva 4. Toteutuneet seuranta-alueet ja vesienpalautusmaat Kurkinevalla ja Vihtanevalla.

Keräsimme dronejen avulla näkyvän valon, multispektri- ja lämpökamera-aineistot. Lisäksi muodostimme näkyvän valon kameran avulla kohteista Structure from Motion (SfM) -tekniikalla maanpinnan korkeudesta kertovan maastomallin. Käytimme dronekartoituksissa RTK-

paikannustekniikkaa ja maatukipisteitä, jolloin aineistojen sijaintivirhe oli korkeintaan muutamien senttimetrin. Tutkimme multispektrikuvan avulla erityisesti kasvillisuutta ja märkyyttä, lämpökamerakuvan avulla märkyyttä ja maastomallin avulla suon pinnan korkeuserojen vaihtelua ja virtausverkkoa.

Kohdistimme satelliittikuvaseurannan suokompleksien koko avosualueille. Kehitimme analyysejä varten Google Earth Engine¹ -skriptejä, jotka hyödyntävät optisia Landsat- ja Sentinel-2- sekä suuren laskennallisen läpimitan Sentinel-1-tutka-aineistoja (Taulukko 2). Skriptit mahdollistavat automatisoidut seurannat usealta eri kohteelta. Teimme seurannassa kokeiluja myös PlanetScope (Planet Team 2023) ja Worldview-3 (Maxar Technologies Inc., Westminster, Colorado, USA) -satelliiteilla, joiden tuottama alueellinen erottelukyky on muutaman metrin luokkaa mutta saatavuus on rajoitetumpaa. Laskimme optisista aineistoista märkyydestä ja kasvillisuudesta kertovia indeksejä, jotka sisälsivät muun muassa normalisoidun kasvillisuusindeksin (NDVI; Normalized Difference Vegetation Index) ja normalisoidun kosteusindeksin (NDMI; Normalized Difference Moisture Index). Seurasimme tutka-aineiston avulla suon märkyyttä takaisinsironnan voimakkuuden avulla.

Taulukko 2. Satelliittikuvaseurannassa käytetyt aineistot.

Tuottaja	Aineisto	Tyyppi	Alueellinen erottelukyky	Saatavuus	Kuvausvuodet
ESA	Sentinel-2	Optinen	10–20 m	2 päivän välein ¹	2017-
NASA	Landsat	Optinen	30 m	8 päivän välein ^{1,2}	1982-
ESA	Sentinel-1	Tutka	10 m	2 päivän välein	2015-
Planet Team	PlanetScope	Optinen	3 m	1 päivän välein ¹	2016-
DigitalGlobe	WorldView-3	Optinen	1–4 m	Vaihtelee ³	2014-

¹ Hyvä aineisto vaatii pilvettömät olosuhteet. Pilvettömien ja vähäpilvisten kuvien määrä vaihtelee vuosittain.

² Kahdeksan päivän saatavuusväli koskee viimeisimpiä vuosia. 1980–2000-luvuilla saatavuusväli on paljon harvempi.

³ Kuvaamista voi tilata haluttuihin paikkoihin haluttuina aikaväleinä.

2.1.1. Ydinkohdat

- Pilotoimme vesienpalautuksen seurantaa kahdeksalla eri suolla Pohjois-Pohjanmaalla ja Pohjois-Savossa vuosien 2021–2023 aikana.
- Teimme hydrologista seurantaa vedenpinnan tason loggeri- ja manuaalimittausten avulla vuosina 2021–2023, kasvillisuusseurantaa kasvuruutujen ja pintatyyppitutkimuslinjojen avulla vuonna 2021. Seurantaa tehtiin jokaisella seurantakohteella 12:ssa eri pisteessä.
- Teimme kaukokartoitusseurantaa dronejen ja satelliittikuvien avulla. Dronejen avulla keräsimme multispektri-, lämpökamera- ja korkeusmalliaineistoja vuosina 2021–2022.

¹ Google Earth Engine (Gorelick ym. 2017) on Googlen tarjoama kaukokartoitusaineistojen prosessointipalvelu, jossa voidaan tehdä erilaisia analyysejä kaukokartoitusaineistoille ilman, että kuvat ladataan omalle koneelle. Palvelussa on vapaasti käytettävissä useita eri ilmaisia kaukokartoitusaineistoja, kuten Landsat- ja Sentinel-satelliittikuvat.

2.2. Märkyden ja sen muutosten tulkinta vesienpalautuskohteilla

2.2.1. Periaatteet ja menetelmät vesienpalautuskohteiden märkyden tulkintaan yleisesti

Onnistunut vesienpalautusuoma ohjaa yläpuolisen valuma-alueen vesiä takaisin luonnollisille veden virtausreiteille. Käytännössä tämä näkyy vedenpinnan tason nousuna ja veden lisääntyneenä virtauksena suon läpi. Lisäksi onnistuneen toimenpiteen on tarkoitus palauttaa kasvukauden aikana tapahtuvaa vedenpinnan tason muutosta luonnontilaisen kaltaiseksi, jolloin keskikesän kuivina kausina vedenpinnan taso ei laske yhtä merkittävästi kuin kuivahtaneilla kohteilla. Toimenpide on oletettavasti epäonnistunut, jos nämä kriteerit eivät täyty. Pahimmin epäonnistuneissa vesienpalautuksissa uoma voi jopa johtaa vesiä pois avosuolta ja sillä voi olla paikallinen kuivattava vaikutus.

Vesienpalautuksen toimenpiteiden vaikutusalueet vaihtelevat, koska yksi uoma voi ohjata huomattavasti suuremman määrän vettä suolle kuin toinen. Oleellista on kuitenkin vesienpalautusomien yhteisvaikutus koko suoymittakaavan mittakaavassa.

Märkyden tulkinnessa haasteita tuottavat vuosien väliset ja vuosien sisäiset erot. Suon kevään ja kesän aikainen märkyys riippuu hyvin voimakkaasti talven lumimäärästä, kevään ajankohdasta sekä kevään ja kesän sademäärästä ja lämpötilasta. Esimerkiksi huomattavan kuiva kesä vuonna 2018 kuivatti voimakkaasti soita ja kesänaikainen vedenpinnan taso oli tuona vuonna huomattavasti alempana kuin keskimääräisenä kesänä (Rinne ym. 2020, Jussila ym. 2023). Jos vedenpinnan tason seuranta tehdään vesienpalautuskohteella yhden kesän ajan ennen vesienpalautusta ja yhden kesän ajan vesienpalautuksen jälkeen, havaitut muutokset vedenpinnasta voivat johtua vesienpalautuksen lisäksi vuosien välisestä erosta. Kun seuranta tehdään usean vuoden ja ajan ja kun mukana on kuivahtaneita kontrollikohteita ja luonnontilaisia verrokkikohteita, voidaan sulkea pois vuosien väliset erot.

Vastaavasti vuoden sisäisten erojen takia märkyden seuranta ei voi tehdä pelkästään kerran kesässä, vaan seuranta-aineistoja tulee kerätä useamman päivän ajalta läpi kesän tai jatkuvatoimisesti. Vesienpalautuksen vaikuttavuuden kannalta on oleellista seurata etenkin keskikesän kuivan ajan vedenpinnan tason muutoksia.

2.2.2. Vedenpinnan tason kenttäaineistot

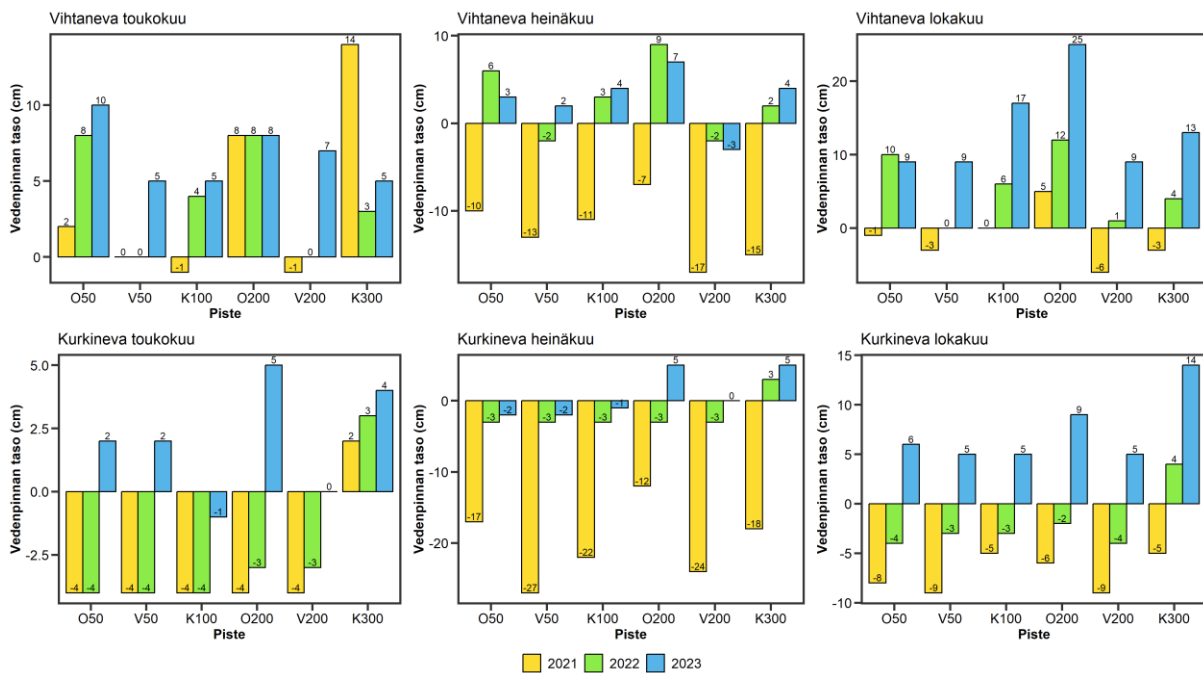
Vedenpinnan tason kenttäaineistojen keräämiseen käytimme jatkuvatoimisia etäluettavia Odyssey Extreem -loggereita ja manuaalisia kertamittauksia. Mittausten avulla tutkimme, miten vedenpinnan taso vaihtelee seurantakohteiden välillä, seurantakohteiden sisällä seurantapistettäin sekä vuosien ja kasvukauden vaiheiden välillä.

Loggerimittauksissa oli huomattava määrä laatuongelmia, jotka todennäköisesti johtuivat loggeriputkien tukkeutumisesta tai loggereiden toimimattomuudesta. Ongelmien takia emme saaneet loggeriaineistojen avulla kerättyä luotettavaa ja systemaattista aineistoa eikä aineistoa siksi käytetty analyysissä.

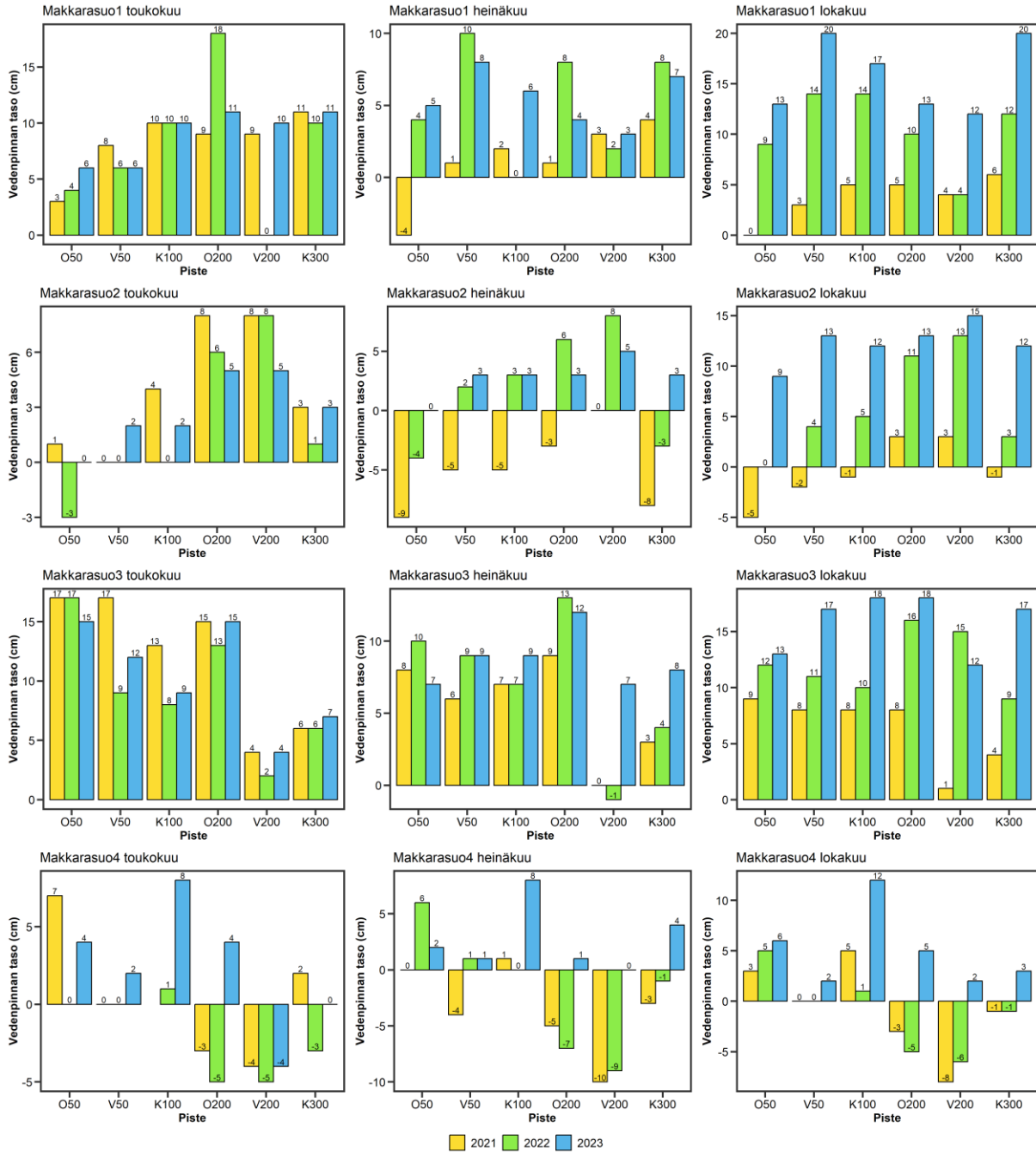
Manuaalisten mittausten perusteella talven 2021–2022 aikana toteutetuilla vesienpalautuskohteilla vedenpinnan taso oli korkeammalla vesienpalautuksen jälkeen vuosina 2022–2023

kuin ennen vesienpalautusta vuonna 2021 (Kuvat 5–6). Ero oli suuri etenkin keskikesän kuuvaan aikaan sekä Kurkinevan ja Vihtanevan kohteilla, joissa vesienpalautuksen oletettu vaikutavuus oli suurempi kuin Makkarasuolla. Vaikka Vihtanevalla ja Kurkinevalla seuranta-alueiden välittömässä läheisyydessä olevat vesienpalautusuoimat eivät juurikaan nostaneet soiden vedenpinnan tasoa, soiden ylemmissä osissa kaivetut uomat toivat jonkin verran lisää vettä myös seuranta-alueille. Vuoden 2023 lokakuun mittauksissa vesi oli yleisesti todella korkealla kaikilla kohteilla, mikä johtui kyseisen vuoden runsaista syysateista. Luotettavien kontrollikohteiden puutteen takia emme kuitenkaan pystyneet varmasti todentamaan, johtuivatko vuosien väliset erot sääolosuhteista vai vesienpalautuksen toimivuudesta. Sähävainoainetojen analyysin avulla olisimme voineet analysoida tarkemmin vuosittaisten sääolosuhteiden vaikutusta vedenpinnan tasoon. Kuitenkin aapasoilla luonnontilainenkin vaihtelu kasvukauden aikaisessa märkydessä on suurta, joten kaikki vaihtelu ei johdu sääolosuhteista.

Teimme jokaisella seuranta-kohteella manuaalimittauksia seuranta-ajankohdasta riippuen 6–12 pisteellä. Seurantapisteen välillä oli eroja vedenpinnan tasossa mutta ei systemaattisia eroja vedenpinnan tason ajallisessa vaihtelussa. Siten vedenpinnan tason mittausaineistojen avulla emme päässeet kiinni vesienpalautuksen vaikutusalueen suuruuteen. Jos seurantaverkon sijainti olisi ollut optimaalinen suhteessa vesienpalautusuoiman päähän, tilanne olisi voinut olla eri (ks. kuva 4).



Kuva 5. Vedenpinnan tason manuaalimittaukset Vihtanevalla ja Kurkinevalla kasvukausien 2021–2023 aikana. X-akselilla seurantapisteen on ilmaistu suunnan (K=keski, O=oikea, V=vasen) ja referenssipiste-etäisyyden (metreinä) avulla.



Kuva 6. Vedenpinnan tason manuaalimittaukset Makkarasuolla kasvukausien 2021–2023 aikana. X-akselilla seurantapisteen on ilmaistu suunnan (K=keski, O=oikea, V=vasen) ja referenssipiste-ettäisyyden (metreinä) avulla.

2.2.3. Satelliittikuva-aineistot

Johdanto

Satelliittikuvien avulla voidaan kerätä pitkäaikaisseuranta-aineistoa soiden märkyytilanteesta maantieteellisesti isoilta alueilta. Aineistojen etuna on hyvä ajallinen saatavuus: hyvälaatuisia kuvia on olemassa ainakin 1980-alkaen ja viimeisiltä vuosilta on saatavilla useita kuvia kesän ajalta. Aineistojen heikkoutena on suhteellisen karkea alueellinen erottelukyky. Vapaasti saatavilla olevissa aineistoissa pikselikoko on parhaimmillaan 10–30 metriä (Taulukko 2). Tämä

pikselikoko riittää hyvin märkyystilanteen arvioimiseen koko suon tasolla tai vähintään useiden aarien kokoisilla alueilla mutta se on riittämätön havaitsemaan pienpiirteistä märkyystason vaihtelua esimerkiksi rimprien ja jänteiden välillä.

Vedenpinnan tason spatiotemporaalinen mallinnus

Vesienpalautuksen seurannassa käytimme pääasiassa optisia satelliittikuvia, sillä perinteisen ennallistamisen seurannan kokeiluissa havaitsimme niiden toimivan paremmin ja olevan helpommin prosessoitavissa kuin maanpinnan kosteustutkimuksissa laajasti käytetyt suuren laiskennallisen läpimitan tutka-aineistot (ks. raportin osion 3.2).

Hyödynsimme Google Earth Enginen pilvilaskentakapasiteettia ja tarkastelimme vesienpalautuksen alueellista vaikutusta alkukesällä (korkea vedenpinnan taso) ja keskikesällä (matala vedenpinnan taso) (Isoaho ym. 2023b). Valitsimme kohteiksi neljä samankaltaista hankkeen seurantakohtetta, joissa vesienpalautukset oli tehty aikaisintaan vuonna 2018 (Haudanneva, Vah-tisuo, Vihtaneva ja Kurkineva). Vesienpalautuskohteiden lisäksi teimme samat tarkastelut kahdelle perinteisen ennallistamisen avosuokohteelle (Hydrologia-LIFE-hankkeen kohteet, vuonna 2019 ennallistettu Utajärvellä, Olvassuolla sijaitseva Iso Leväniemi ja 2020 ennallistettu Nurmeksessa, Mujejärvellä sijaitseva Loukkusuo). Valitsimme kohteille lähistöltä samankaltaiset oijttamattomat kontrollikohteet, joille ei tehty ennallistamistoimenpiteitä seuranta-aikaan.

Koostimme kaikista kohteista alku- ja keskikesän olosuhteita kuvaavat satelliittikuvat jokaiselle seuranta-ajan vuodelle (2017–2023). Teimme tämän laskemalla pikseleittäin värikanavien heijastuslukujen ja valittujen spektri-indeksien mediaaniarvot aikajaksoille 1.5.–15.6. ja 1.7.–15.8. Tämän jälkeen laskimme vuosikohtaisista mediaaneista mediaanit ennen ja jälkeen ennallistamisen, erikseen alku- ja keskikesille. Teimme kohteille myös ajallista tarkastelua. Teimme ennallistamiskohteille ennallistamisen oletetulle vaikutusalueelle ja kontrollikohteille satunnaisesti sijoitettuja buffereita, joille kerättiin heijastus- ja spektri-indeksidataa Landsat 7–9 ja Sentinel-2 satelliiteista kasvukausilta 2013–2023.

Mallinnuksessa hyödynsimme hankkeessa manuaalimitattua vedenpinnan tasoa hankkeen neljältä kohteelta kasvukausilta 2021–2023 ja Hydrologia-LIFE:n kahdelta kohteelta loggeriaineistoa kasvukausilta 2019–2022. Mallinsimme myös kontrollikohteiden vedenpinnan tason ennallistamiskohteiden mittausaineiston avulla. Mallinnusalgoritmiksi valitsimme random forest -regression (Breiman 2001). Ennustimme muodostetulla mallilla vedenpinnan tason kaikille mediaanikuville. Tämän jälkeen laskimme ennustekarttojen välisen erotuksen, joista tarkasteltiin ennallistamisen alueellista vaikuttavuutta. Ennustimme samalla mallilla vedenpinnan tason buffereista kerätylle datalle. Sen avulla tarkasteltiin muutoksia vedenpinnan tasossa ja sen ajallisessa vaihtelussa. Teimme ennustetuille bufferikohtaisille vedenpinnan tasolle myös bootstrap-testit, joiden avulla tarkasteltiin, oliko ennallistamisella tilastollisesti merkitsevä vaikutus ennustettuun vedenpinnan tasoon.

Tulostemme perusteella optiset satelliittikuvat toimivat hyvin avosoiden märkyiden ajallisen ja alueellisen vaihtelun mallintamisessa (Isoaho ym. 2023b). Onnistuneiden vesienpalautusomien ympäristö muuttui satelliittiaineistoon perustuvien mallien mukaan märemmäksi välittömällä vaikutusalueella vesienpalautusomien päissä (Kuva 7). Valituilla kontrollikohteilla niin selkeitä muutoksia vedenpinnan tasolla ei ollut pääsääntöisesti havaittavissa. Mallinnusten avulla pystyimme myös havaitsemaan perinteisen ennallistamisen alueelliset vaikutukset. Bufferiaineiston perusteella ennallistaminen nosti mallinnettua vedenpinnan tasoa ja

ennallistamisen vaikutukset olivat tilastollisesti merkitseviä. Menetelmä kykeni suhteellisen hyvällä tarkkuudella ennustamaan vedenpinnan tasoa -30 ja 10 cm välillä suonpintaan nähden, mutta tätä alempia ja ylempiä vedenkorkeuksia malli ei pystynyt ennustamaan.

Satelliittikuvien visuaalinen tulkinta

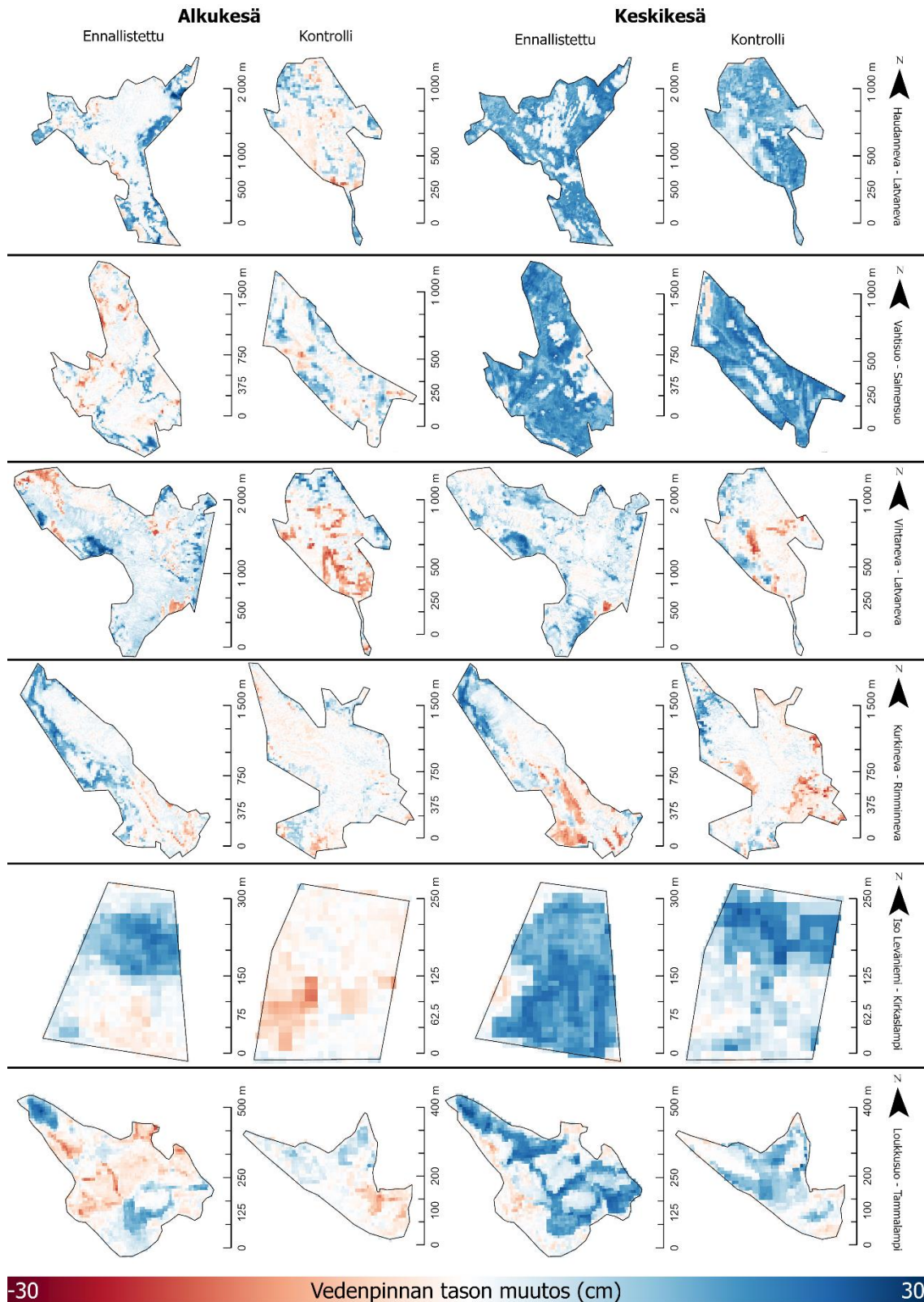
Tehdyissä kokeiluissamme huomasimme, että satelliittikuvien visuaalista tulkintaa voidaan käyttää vesienpalautusuoman toimivuuden arviointiin hoitoseurannan tukena. Toimivan vesienpalautusuoman vaikutusalue on nähtävissä etenkin Sentinel-2:n väärävärikuviista. Esimerkiksi Makkarasuolle kaivettiin useita uusia vesienpalautusuoja talvella 2021–2022. Uomista oletettavasti toimivien ei ollut kenttä- ja droneseuranta-alueen sisällä. Huomasimme uoman vaikutuksen 10 m erottelukyvyn omaavan väärävärikuvan avulla (Kuva 8) ja kävimme todentamassa vaikutuksen maastossa kesällä 2023. Kyseinen vesienpalautusuoja aiheutti paikallista tulvimisvaikutusta, joka oli voimakkaimmillaan keväällä mutta näkyvissä myös kuivimpaan aikaan heinä-elokuussa. Yleisesti Makkarasuolle kaivettiin useita vesienpalautusuoja, joilla on vettä lisäävä vaikutus. Uomat eivät kuitenkaan sijainneet seurantaverkostomme välittömässä läheisyydessä ja niiden toimivuuden pystyimme havainnoimaan ainoastaan satelliittikuvien visuaalisen tulkinnan ja maastokävelyiden avulla.

Kokeilut tarkan alueellisen erottelukyvyn satelliittikuvilla

Teimme vesienpalautuskohteilla kokeiluja vesienpalautusuojen hydrologisen vaikutusalueen automaattisesta mallinnuksesta R-tilasto-ohjelmalla kirjoitetun algoritmin avulla. Tarkastelussa hyödynsimme 3 metrin erottelukyvyn PlanetScope-satelliittikuvia, jotka on otettu vesienpalautuskohteilta kevättulvan aikaan ennen ja jälkeen vesienpalautuksen. Mallinsimme, miten laajalla alueella vedenpinta on noussut vesienpalautusuojen lähellä ja miten alue rajautuu. Alustavien tarkastelujen perusteella algoritmi toimii kohtalaisen hyvin mutta sen kehittäminen vaatii vielä jatkotyötä seuraavissa hankkeissa.

Tilasimme hankkeessa tarkan alueellisen erottelukyvyn (näkyvä valo ja lähi-infrapuna 1,2 m; lyhytaaltainen infrapuna 3,7 m) WorldView-3-satelliittikuvan Pallaksella sijaitsevilta ennallistettavilta soilta. Tilatut kuvat otettiin heinäkuun puolessa välissä 2023. Pallaksen Välisuo ja Matosuo ennallistetaan LIFE PeatCarbon -hankkeen yhteydessä keväällä 2024. LIFE PeatCarbon -hankkeessa teimme kohteille laajat vedenpinnan tason ja pintakosteuden mittaukset sekä kasvillisuusinventoinnit heinäkuun lopussa 2023. Tilasimme kuvat maksimissaan 5 %:n pilvipeittävyydellä. Harmiksemme lyhytaaltaisen infrapun kuvan vähäiset pilvet peittivät kokonaan Matosuon, joissa suurin osa mittauspisteistä sijaitsi. Yhdistimme kerätyn kenttäaineiston tilattuun satelliittikuvaan niiltä osin kuin oli mahdollista, minkä jälkeen tarkastelimme satelliittikuvainformaation ja kenttämittausaineiston välistä korrelaatioita.

Yksittäisiä spektrikanavia tarkasteltaessa alustavien tulosten mukaan märkyyden kanssa parhaiten korreloivat lähi-infrapun, punaisen ja lähi-infrapun välinen sekä lyhytaaltaisen infrapun kanavat. Lisäksi vedenpinnan tason ja pintakosteuden välinen korrelaatio oli voimakasta. Syvällisempi aineistoanalyysi jatkuu LIFE PeatCarbon -hankkeen yhteydessä.



Kuva 7. Mallinnettu vesienpalautuksen ja perinteisen ennallistamisen spatiotemporaalinen vaikutus vedenpinnan tasoon tutkimuskohteilla. Kohteista neljä ylintä riviä edustavat vesienpalautuskohteita ja kaksi alinta riviä perinteisen ennallistamisen kohteita (Isoaho ym. 2023b).



Kuva 8. Väärävärivuvat Sentinel-2:n multispektrikuvista Makkarasuolta toukokuun lopulta 2021 (vasen) ja 2022 (oikea). Toimiva vesienpalautusuoma ja sen välitön vaikutusalue ympyröity.

2.2.4. Dronekuvaus

Johdanto

Dronekuvauksen avulla voidaan kerätä useita erityyppisiä aineistoja, jotka kertovat soiden märkyydestä ja kasvillisuudesta. Dronekartoituksella tarkoitetaan systemaattista kuvaustapaa siten, että suuren kuvallisuuden avulla tuotetaan kohteesta kolmiulotteinen malli ja haluttuja ortokorjattuja lopputuotteita, kuten ortomosaiikkikuva ja pintakorkeusmalli. Tuotettu aineisto mahdollistaa niin kvantitatiivisen kuin kvalitatiivisen näkökulman alueelliseen seurantaan tarkalla alueellisella erottelukyvyllä. Droneaineistot soveltuvat etenkin pienipiirteisten, jopa senttimetrin tasoon, muutosten tulkintaan. Droneaineistojen keruu laajemmilta alueilta on kuitenkin työlästä ja aikaa vievää sekä kertyvä aineistomäärä suuri.

Droneaineistojen keruussa oleellista on aineiston keruun ajankohta. Periaatteessa droneilla voidaan kerätä aineistoja mihin vuodenaikaan tahansa, mutta kuvaaminen vaatii sateettomat ja valaistuksellisesti tasaiset sääolosuhteet. Lisäksi kuvaaminen ja kuvien käsittely vaativat aikaa ja asiantuntemusta. Näiden rajoitteiden takia droneilla ei voi kerätä ajallisesti ja alueellisesti yhtä kattavia aineistoja kuin satelliiteilla. Oleellista olisikin keskittyä kuvaamisessa tärkeimpiin alueisiin ja ajankohtiin. Tärkeimpiä alueita lienevät vesienpalautusomien välittömät vaikutusalueet, kun taas ajallisesti kuvia olisi hyvä kerätä sekä märkänä (kevät) tulva-aikana ja kuivana (keskikesän) ajankohtana.

Vedenpinnan tason spatiaalinen vaihtelu

Tutkimme, miten droneaineistot korreloivat kenttämitatun vedenpinnan tason kanssa. Testaamiamme aineistoja olivat yksittäiset spektrikanavat, erilaiset märkyy- ja kasvillisuusindeksit, sekä SfM-tekniikan avulla luodusta korkeusmallista johdettu topografinen märkyysoindeksi.

Toimivimpien muuttujien kanssa mallinsimme alueellista vedenpinnan tasoa ja vesienpalautusomien vaikutusaluetta.

Kenttämitattu vedenpinnan taso korreloi voimakkaasti lämpökamera- ja multispektriaineiston kanssa ja mahdollisti spatiaalisen mallintamisen koko dronekuvausalueelle keskikesän kuivana kautena (Isoaho ym. 2023a). Voimakkain korrelaatio löytyi lämpöaineiston ja optisen aineiston perusteella lasketusta TVDI-märkyyksindeksistä (Temperature Vegetation Dryness Index). Optisesta aineistosta yksittäiset spektrikanavat korreloivat vedenpinnan tason kanssa huomattavasti enemmän kuin märkyyden ja kasvillisuuden seurantaan kehitetyt spektriset indekset. Erityisesti punainen kanava oli herkkä vedenpinnan tasolle. Droneaineiston avulla rakensimme lineaarisen regressiomallin hyvällä sovituksella (selitysaste 0,69, keskivirhe 3,85 cm). Mallissa selittävinä muuttujina olivat TVDI, punainen kanava sekä vihreän ja infrapunakanavan avulla laskettu normalisoitu vesi-indeksi. Mallin avulla tarkastelimme vedenpinnan tason ja vesienpalautusomien vaikutuksen alueellisuutta (Kuva 9, Isoaho ym. 2023a).

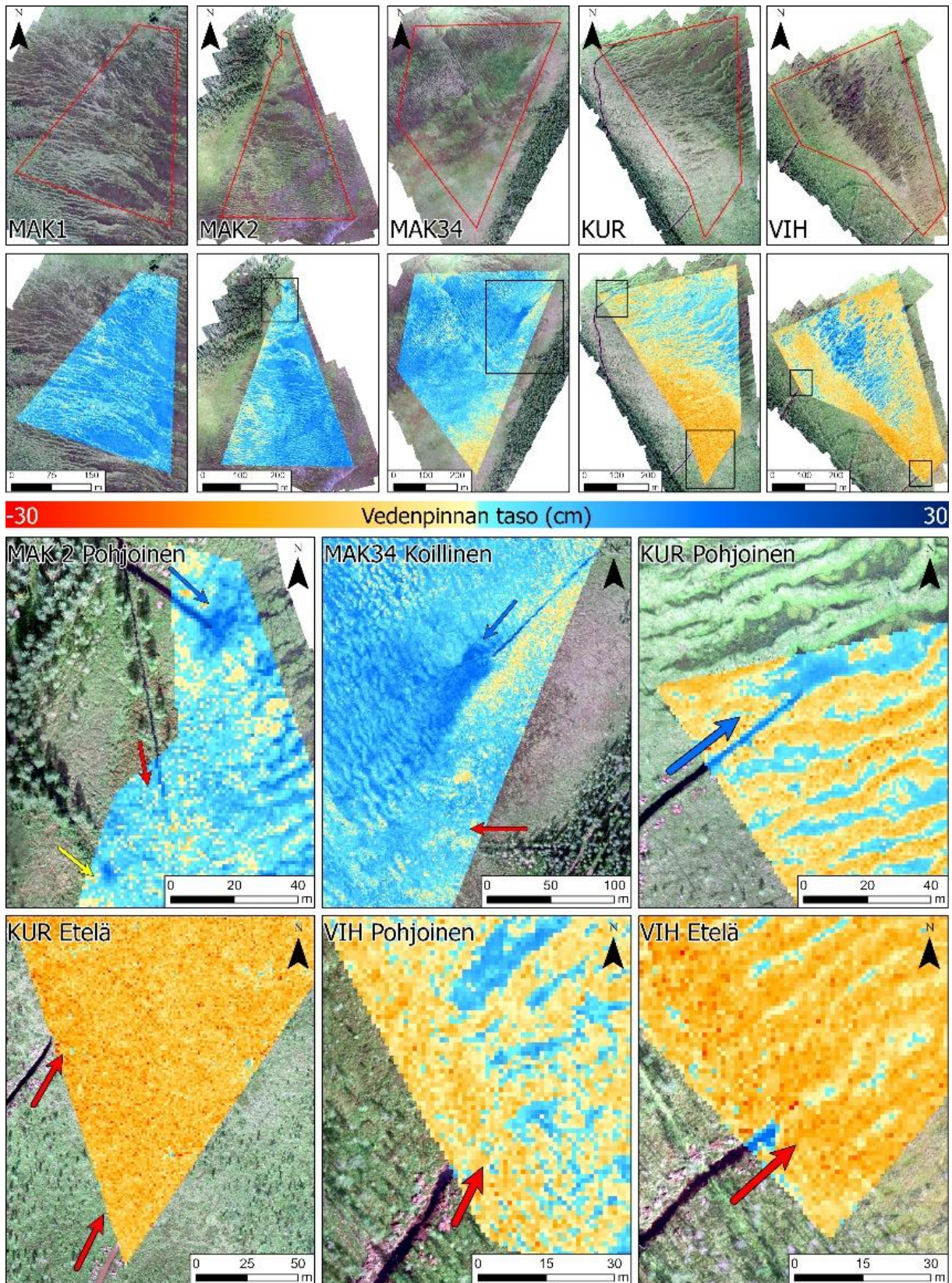
Topografinen märkyyksindeksi korreloi vedenpinnan tason kanssa pääsääntöisesti heikosti tai negatiivisesti (Isoaho 2022, Isoaho ym. 2023a). Mahdollisia syitä heikkoon tai teorian kannalta vääränsuuntaiseen korrelaatioon on useita. Paikalliset, dronekuvausalueen kattavat topografiset märkyyksindeksit, eivät ole välttämättä keskenään vertailukelpoisia; esimerkiksi Vihtanevalta tehtävä paikallinen märkyyksindeksi ei ole vertailukelpoinen Kurkinevan vastaavaan. Vertailukelpoisuutta varten korkeusmallin pitäisi kattaa koko suon yläpuolinen valuma-alue. Ikkala ym. (2022) onnistuivat joltain osin yhdistämisessä, mutta tämän hankkeen kohteiden dronekorkeusmallien yhdistäminen laajempaan avoimeen korkeusmalliin oli haastavaa, ellei mahdotonta johtuen epäsäännöllisistä korkeuseroista dronemallin ja Maanmittauslaitoksen korkeusmallin välillä. Lisäksi havaitsimme, että veden virtausreitit ja mallintavien eri algoritmien toimivuudessa avosoilla on suuria eroja (Ahonen 2021).

Suonpinnan korkeusmuutokset

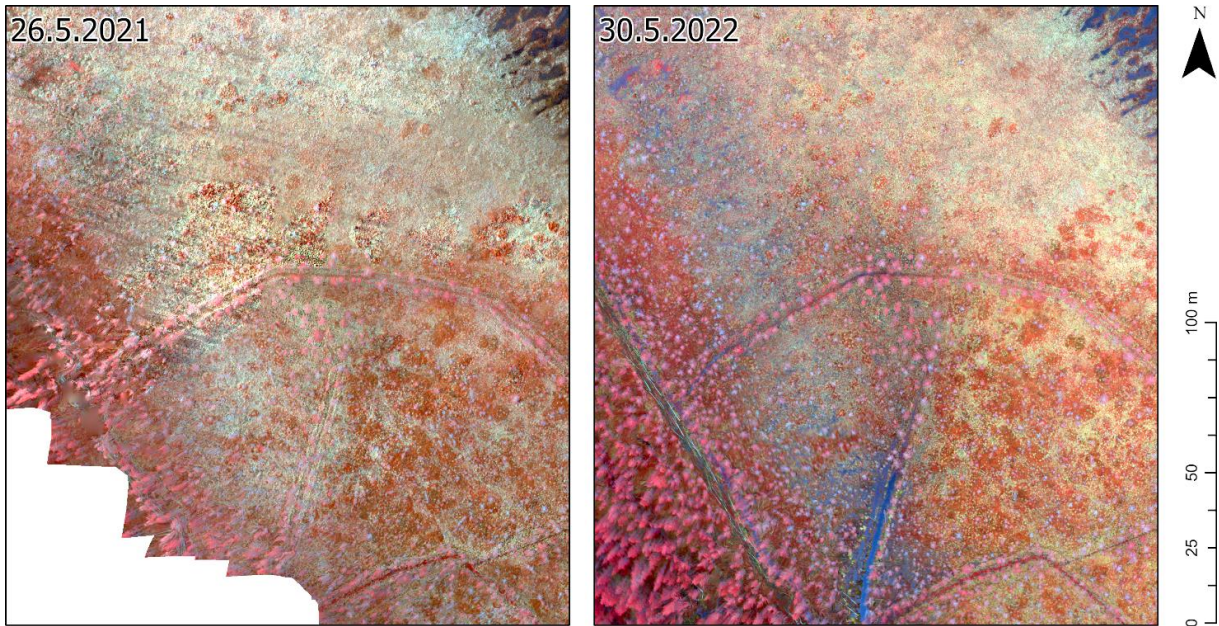
Systemaattisesti luotujen korkeusmallien avulla tarkastelimme suon pinnan korkeusmuutoksia. Laskimme vuosien 2021 ja 2022 korkeusmallien erotuksen kuvausajakohtaisesti. Lisääntynyt märkyys oletettavasti paisuttaa turvetta kohottaen suonpintaa (Ikkala 2023) ja vesienpalautuskohteilla oli huomattavissa suon pinnan kohoamista rajatuilla alueilla (Isoaho 2022). Muutokset saattoivat osaltaan johtua kuitenkin kartoitusvirheistä, koska kuvauksissa käytettyjen maatukipisteiden sijainti mitattiin ainoastaan kerran, ensimmäisten kuvausten yhteydessä keväällä 2021. Topografinen muutos ei myöskään korreloinut vedenpinnan tason muutosten kanssa.

Visuaalinen tulkinta

Droneaineistosta tuotettuja ortokuvia pystyimme joltain osin käyttämään vesienpalautuksen toimivuuden visuaaliseen tarkasteluun. Tulkitsimme kuvista myös yleistä märkyyden muutosta muun muassa digitoimalla rimprien muotoja ja vertailemalla niitä toisen kuvausajankohdan rimpriin (Isoaho 2022). Onnistuneen vesienpalautusomien märkyyttä lisäävä vaikutus oli myös nähtävissä multispektriaineiston väärävariortokuvien ennen-jälkeen-tarkastelussa (Kuva 10). Kokemustemme perusteella visuaalinen kuvatulkinta oli helpointa kasvukauden alussa otetuille kuville, koska kasvillisuus ei tällöin häirinyt tulkintaa. Elokuun kuville visuaalinen tulkinta oli huomattavasti haasteellisempaa runsaamman kasvipeitteen takia.



Kuva 9. Ennustettu vedenpinnan taso elokuun 2022 droneaineistoilla (Isoaho ym. 2023a). Nuolten väri kuvaa vesienpalautusuoaman toimivuutta sinisen tarkoittaessa toimivaa, keltaisen epävarmaa ja punaisen toimimatonta.



Kuva 10. Onnistuneen vesienpalautusuoaman näkyvä märkyyttä lisäävä vaikutus vääräväridronekuvassa Vihtanevalla. Kuvan alaosassa näkyvä vesienpalautusuoama on kaivettu talvella 2021–2022.

Lopuksi

Yleisesti suurin haaste droneaineistojen käytössä olivat erilaiset laatuongelmat. Lämpökamera-aineisto ei ollut kalibroitu muuten kuin elokuun 2022 osalta, mikä osaltaan esti tulosten perusteella lupaavan TVDI-märkyyksindeksin käytön muilta ajankohdilta. Muilta hetkiltä otettuja lämpökamerakuvia olisi myös pitänyt georeferoida joltain osin uusiksi, koska näissä oli jonkun verran alueellisia vääristymiä ja epätarkkuuksia sijainnissa. Osaltaan ongelmia aiheuttivat myös kuvausten aikana vaihtelevat sääolosuhteet, jotka aiheuttivat muun muassa pilvivarjoja ja heikensivät vertailukelpoisuutta eri ajankohtina otettujen kuvien välillä.

2.2.5. Muut kaukokartoitusaineistot

Muista aineistoista kokeilimme Maanmittauslaitoksen ilmakuvia ja laserkeilausaineistoja. Seuraavassa arvioimme niiden soveltuvuutta etenkin vesienpalautuksen seurantaan. Luvun lopussa keskustelemme vielä usean eri aineistolähteen yhdistämisen hyödyistä.

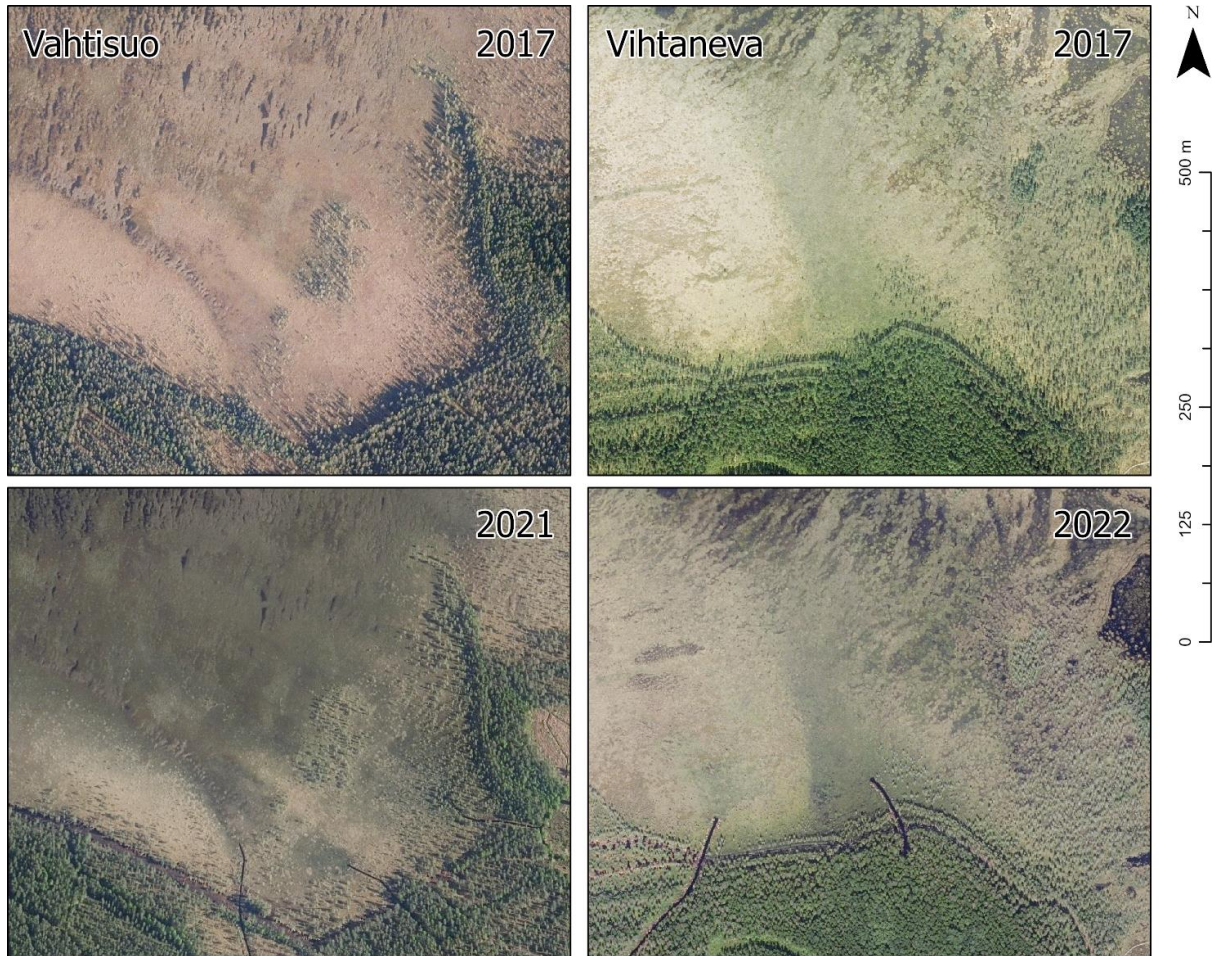
Kokemustemme mukaan Maanmittauslaitoksen ilmakuvat soveltuvat hyvin yleispiirteiseen alueiden tarkasteluun, mutta niistä on vähän apua systemaattisessa seurannassa. Systemaattisessa seurannassa ilmakuvien suurin heikkous on niiden vaihteleva kuvausajankohta. Osa kuvista otetaan keväällä ja osa kesällä eikä yhden alueen kuvausajankohtaa ole vakioitu. Tällöin eri vuosina otetut kuvat eivät välttämättä ole vertailukelpoisia. Esimerkiksi vesienpalautusta edeltävä kuva voidaan olla otettu keskellä kesää kuivana ajankohtana, kun taas vesienpalautuksen jälkeinen kuva voidaan olla otettu kevättulvan aikaan. Siten kuvien avulla ei voida tehdä kvantitatiivista seuranta. Lisäksi kuvien ongelmana on harva päivitystahti. Nykyohjelman mukaan kuvauksia tehdään joka kolmas vuosi Pohjois-Lappia lukuun ottamatta (Maanmittauslaitos 2023). Siten vesienpalautuksen jälkeisen tilanteen ilmakuvaa voi joutua odottamaan muutaman vuoden.

Vaikka ilmakuviin ajallinen kattavuus on heikko, niiden avulla voidaan joissain tilanteissa tehdä visuaalista tulkintaa vesienpalautusomien toimivuudesta ja suon märkyiden muutoksista (Kuva 11). Ilmakuviin vahvuutena satelliittikuviin verrattuna on niiden alueellinen erottelukyky. Siinä missä Sentinel-2-satelliittikuviin pikselikoko on 10 metriä, ilmakuviin pikselikoko on 0,5 metriä tai jopa alle. Siten kuvien avulla voi havaita tarkemmin tapahtuneet muutokset. Vastaavasti dronekuviin verrattuna ilmakuviin ei tarvitse erikseen kerätä ja niiden laatu on valmiiksi varmistettu ja maantieteellinen kattavuus laajempi.

Havaittiin, että historialliset ilmakuvat ovat erittäin tärkeä aineisto vesienpalautuskohteisiin tutustuttaessa ja alueen historian tutkimisessa. Niistä näkee muun muassa luonnonmukaiset virtausreitit sekä alueiden yleisen märkyiden historiallisesti. Seurannassa historiallisia ilmakuvia voi hyödyntää vertailemalla vesienpalautuksen jälkeistä tilannetta tilanteeseen ennen ympäröivien kuivattavien ojien kaivamista.

Ilmakuviin lisäksi kokeilimme, miten hyvin laserkeilausaineistosta lasketun korkeusmallin avulla muodostetut virtausverkostot ja märkyysindeksit toimivat märkyiden seurannassa. Teimme kokeiluja sekä avoimesti saatavilla olevalla laserkeilausaineistolla, jonka tarkkuus on 0,5 pistettä neliömetrillä ja maksullisella aineistolla, jonka tarkkuus on 5 pistettä neliömetrillä. Kokemustemme perusteella näistä aineistoista tehdyistä korkeusmalleista lasketut virtausverkostot ja märkyysindeksit eivät sovellu hyvin vesienpalautuskohteiden seurantaan. Paljon rimpipintaa sisältävien soiden sisäiset virtausverkot ja märkyysvaihtelut erottuvat kuva-aineistosta paremmin kuin korkeusmallilaskelmista. Matalan veden aikaan suuri osa veden virtauksesta soilla tapahtuu pinnan alla eikä pintavaluntana, jota korkeusmallitarkastelut mallintavat. Vesi virtaa soilla esimerkiksi jänteiden läpi, mutta korkeusmallipohjainen mallinnus ei osaa mallintaa tätä tarkasti. Lisäksi suot ovat osin hyvin tasaisia, jolloin pienikin virhe korkeusmallissa luo paljon epävarmuutta virtausanalyysiin. Tarkasteluissa ongelmia aiheuttavat myös suon pinnan epämääräisyys ja soilla oleva matala kasvillisuus. Useissa tilanteissa laserkeilausaineistot eivät pysty mallintamaan suon pintaa samalla tavalla kuin se tulkittaisiin maastossa. Esimerkiksi matalan varpu- ja sarakasvillisuuden pinta voi näyttäytyä aineistoissa maanpintana. Vaikka korkeusmallit eivät ole kovinkaan hyödyllisiä vesienpalautuksen seurannassa, niitä on hyvä käyttää tukena vesienpalautuksen suunnittelutyössä. Niiden avulla voi esimerkiksi tarkastella alueen potentiaalisia virtausreittejä, valuma-alueen suuruutta ja ojitusalueen ja ojittamattoman alueen välistä korkeuseroa, jotka ovat oleellisia tekijöitä vesienpalautusomien sijaintea suunnitellessa.

Koska erityyppiset aineistot tuovat erityyppistä tietoa, usein on järkevää käyttää useampaa eri kaukokartoitustietolähdettä seuranta- ja selvitystyössä. Esimerkiksi satelliittikuvasta tehdyn havainnon voi varmistaa ilmakuviin. Tarvittaessa kohteen voi myös käydä tarkastamassa maastossa tai dronekuvauksen avulla. Vastaavasti dronekuva-analyysimme avulla havainnollistimme, että tarkan mittakaavan vedenpinnan tason seurannassa on hyödyllistä yhdistää erityyppisiä droneaineistoja, etenkin lämpökamera- ja multispektriaineistoja.



Kuva 11. Vesienpalautusuumien paikallinen vaikutus pintamärkyyteen Maanmittauslaitoksen ilmakuvien perusteella Vihtanevalla ja Vahtisuoalla. Kuvasta havaitsee, kuinka vesienpalautusuoat ovat lisänneet suon märkyyttä välittömällä vaikutusalueellaan.

2.2.6. Ydinkohdat

- Vesienpalautuksen on tarkoitus nostaa suovedenpinnan tasoa kohti suon luonnontilaista tilannetta.
- Vedenpinnan tason maastomittaustemme perusteella vesienpalautus nostaa vedenpintaa mutta soiden vedenpinta vaihtelee voimakkaasti myös luontaisesti.
- Vedenpinnan tason mittauksissamme etäluettavat loggerit toimivat erittäin epäluotettavasti, joten käytimme analyyseissämme ainoastaan manuaalimitattuja aineistoja.
- Satelliittikuvien avulla voidaan luotettavasti mallintaa avosoiden vedenpinnan tason ajallisia vaihteluita ja vesienpalautuksen hydrologista vaikutusalueetta. Kuvia voidaan hyödyntää sekä kvantitatiivisessa mallintamisessa että visuaalisissa tarkasteluissa.
- Hyvälaatuisia ja melko tarkkoja (10–30 metrin erottelukyky) satelliittikuvia on avoimesti saatavilla ja kuvia on saatavilla parhaimmillaan muutaman päivän välein.
- Dronemultispektri- ja lämpökamera-aineistot toimivat hyvin vedenpinnan tason maantieteellisesti tarkan mittakaavan yhden ajankohdan mallintamisessa. Aineistoja voidaan hyödyntää sekä kvantitatiivisessa mallintamisessa että visuaalisissa tarkasteluissa.
- Dronekartoituksissa oleellista on rajata kuvattava alue ja kuvausajankohta vaatii harkintaa. Kuvien käsittely voi olla työlästä. Käyttämässämme aineistoissa oli joitakin laatuongelmia.

- Maastomallien avulla ei voida luotettavasti ennustaa veden virtausreittejä tai vedenpinnan tasoa vesienpalautuskohteilla. Maastomallit voivat soveltua ennallistamisen jälkeisten topografisten muutosten havainnointiin. Lisäksi maastomallien avulla voidaan mallintaa vesienpalautuskohteiden yläpuolisia valuma-alueita.
- Maanmittauslaitosten ilmakuvat soveltuvat hyvin vesienpalautuksen vaikutusten visuaaliseen tarkasteluun, mutta kuvien heikko ajallinen saatavuus haittaa niiden hyödyntämistä. Aineistoja ei voida käyttää kvantitatiivisessa mallintamisessa.

2.3. Menetelmiä kasvillisuuden muutosten pitkäaikaisseurantaan

Vesienpalautuksen tavoitteena on ennallistaa muuttunutta suoluontoa. Tämä tarkoittaa etenkin luontaisen kaltaisen kasvilajiston ja ravinteisuustason palauttamista. Optimaalisessa tilanteessa vesienpalautus tuokin lisää ravinteisia valumavesiä suolle, mikä edesauttaa ravinteisille avosoille ominaisten ympäristöolosuhteiden palautumista.

2.3.1. Kasvillisuusinventointiaineistojen analyysit

Kasvillisuusaineistoanalyysit on kuvattu yksityiskohtaisesti Roosa Hautalan (2022) pro gradu -työssä. Tässä raportissa kerromme analyysin päähavainnot.

Tutkimme vesienpalautuskohteiden kasvillisuutta vuonna 2021 kerättyjen kasviruutuaineistojen ja mittajana-aineistojen avulla. Tunnistimme neliömetrin kokoisista kasviruuduista jokaisen putkilokasvi- ja sammallajin sekä arvioimme niiden peittävyden visuaalisen tulkinnan avulla. Analysoimme aineiston avulla kasvilajien esiintymisessä ja runsaudessa olevia eroja seurantakohteiden välillä ja seurantakohteiden sisällä. Kahdeksan metrin mittaisten mittajanojen avulla tutkimme mätäs-, väli- ja rimpipintojen suhteellista runsautta jokaisella seurantapisteellä.

Keskityimme vertailussa erityisesti tutkimaan, miten suokasvillisuus eroaa eri-ikäisillä vesienpalautuskohteilla ja kuivahtaneilla kontrollikohteilla, joille vesienpalautusta ei ole toteutettu. Lisäksi selvitimme, vaikuttaako etäisyys vesienpalautusosan päästä, etäisyys kivennäismaasta ja suonpintojen suhteellinen osuus pisteen lähellä kasvilajien esiintymiseen ja runsauteen. Menetelminä käytimme kasviyhteisöanalyysissä yleisesti käytettyä ordinaatioanalyysiä, yksisuuntaista varianssianalyysiä ja lineaarista regressiomenetelmää. Ordinaation avulla tutkimme lajiyhteisön koostumusta, kun taas varianssi- ja regressionanalyysin avulla tutkimme yksittäisten taustatekijöiden vaikutusta kasvillisuuteen.

Tulostemme perusteella kohteet, joille oli tehty vesienpalautus, olivat nykytilanteessa pääosin suotyypeiltään ruoho- ja saravaltaisia rimp- ja ruoppanevoja. Sen sijaan kontrollikohteet olivat nykytilanteessa pääosin vähemmän ravinteisia rahkasammalvaltaisia lyhytkorsinevoja. Etenkin ruoho- ja saravaltainen kasvillisuus, karike ja paljas turve sekä välipintasammalet olivat runsaampia vesienpalautuskohteilla ja etenkin vesienpalautusosan lähetyvillä kuin kontrollikohteilla. Erityisen hyvin tehtyä vesienpalautusta indikoi karikkeen tai paljaan turpeen esiintyvyys. Sen sijaan ruohojen keskimääräinen peittävyys vesienpalautuskohteilla oli kontrollikohteita suurempaa vasta 30 vuotta vesienpalautustoimenpiteiden jälkeen. Kaiken kaikkiaan eroja kohteiden välillä löytyi etenkin toiminnallisten kasviryhmien välillä, kun taas

trofiatasovaatimusten avulla jaotelluissa kasvilajeissa ei ollut eroja vesienpalautus- ja kontrol-likohteiden välillä.

Kasvillisuusanalyysimme ilmeisenä heikkoutena oli seurattavien kohteiden melko pieni määrä, pitkäaikaisseurannan puute ja luonnontilaisten, siis kuivahtamattomien, kontrollikohteiden puute. Siten aineiston avulla on hyvin vaikea sanoa, miten vesienpalautus muuttaa kasvilajis-toa ajan myötä ja muuttuuko lajisto tyypillisen kuivahtaneen kohteen lajistosta kohti luon- nontilaista verrokkia. Aineiston avulla saatiin kuitenkin viitteitä, että vesienpalautus lisää ruo- hovaltaisen kasvillisuuden, mesotrofisten lajien ja ruoppapinnan esiintyvyyttä. Muutokset ovat hitaita ja voivat näkyä vasta vuosikymmenten jälkeen. Lisäksi vesienpalautus voi lisätä luhta- kasvillisuuden lisääntymistä, etenkin melko pian vesienpalautustoimenpiteen jälkeen.

2.3.2. Pintatyyppien kaukokartoitusluokittelu

Kenttäaineistojen lisäksi tutkimme, voiko suokasvillisuuden muutoksia seurata kaukokartoi- tusaineistojen avulla. Keskityimme luokittelemaan suon pintatyyppiä, jotka eroavat kasvilli- suuden suhteen toisistaan. Märimmillä ja usein avovesipintaisilla rimpipinnoilla kasvillisuus koostuu pääasiassa saroista sekä mären paikan rahka- ja muista sammalista, välipinnoilla kas- villisuus koostuu pääosin välipintarahkasammalista ja ruohovartisista kasveista, kun taas kui- vimilla mätäspinoilla kasvillisuus koostuu pääasiassa rämerahkasammalista ja varvuista.

Teimme droneaineistojen avulla seurantakohteille suonpintaluokituksen (Kuva 12), jossa koko dronekuva-alue jaettiin kolmeen suon pintatyyppiin (mätäspinta, välipinta, rimpipinta) kenttä- tukiaineistojen, dronekuvien visuaalisen tulkinnan ja koneoppimisalgoritmien avulla. Luokit- telussa käytimme GEOBIA-menetelmää (Geographic Object-Based Image Analysis; Blaschke ym. 2014). Aluksi segmentoimme dronekuvat pinta-alaltaan vähintään neliömetrin segment- teihin ArcGISin Mean Shift -algoritmillä. Tämän jälkeen muodostimme harjoitteluaineiston luokittelemalla manuaalisesti monikulmion muotoisia alueita eri suon pintatyypeistä. Seg- mentoitua aineistoa ja harjoitteluaineistoa käyttäen luokittelimme dronekuvat eri pintatyypp- peihin random forest -luokittelijalla (Breiman 2001).

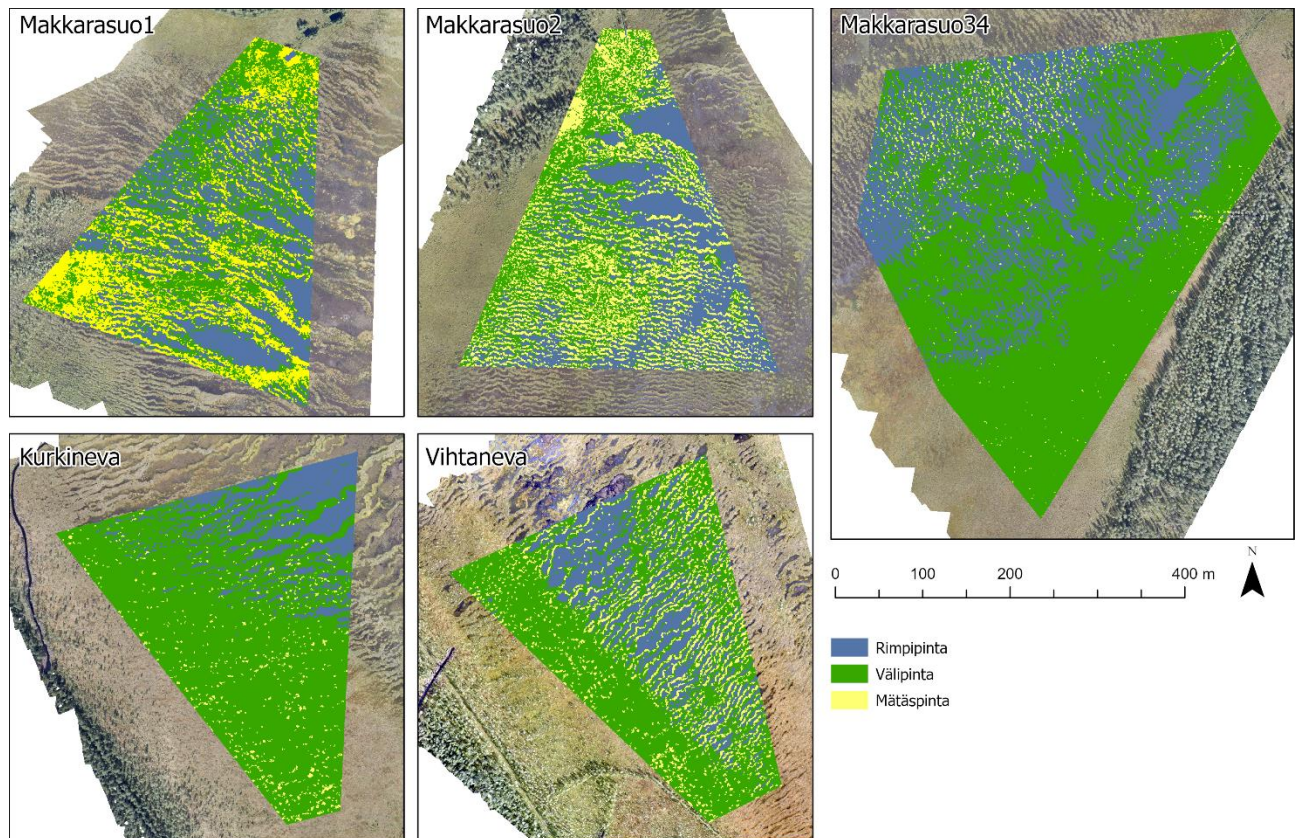
Tulostemme perusteella etenkin rimpipinnat on helppo erottaa mutta väli- ja mätäspintojen erottelu toisistaan on haastavampaa. Esimerkiksi Kurkinevalla mätäspintaa oli luokiteltuna huomattavasti vähemmän kuin sitä todellisuudessa suolla oli (Isoaho 2022). Erottamiseen tar- vitaan hyvät maastotukiaineistot, sillä pelkän kuvatulkinnan perusteella on hankala päätellä, miten välipinta eroaa mätäs- ja rimpipinnoista milläkin suolla.

Jatkotarkastelussa tutkimme, kuinka satelliittiaineistojen spatiaalinen ja spektrinen erottelu- kyky vaikuttaa rimpipinta-alan mallintamisen tarkkuuteen. Tarkastelimme myös kuvaushetken ja tutkittavan suon vaikutusta mallin ennustekykyyneen. Tutkimusalueina käytimme seuraavia hankkeen seurantakohteita: Vihtaneva, Kurkineva, Haudanneva, Niittysuo ja Vahtisuo. Satel- liittikuva-aineistoista valitsimme tarkasteluun Landsat 8–9:n, Sentinel-2:n ja PlanetScopen. Landsat- ja Sentinel-aineistoista käytimme näkyvän valon, lähi-infrapun ja lyhytaaltoisen infrapun kanavia, kun taas Planetscopesta lyhytaaltoisen infrapun kanavia ei ole saata- villa. Yksittäisten kanavien lisäksi tutkimme kasvillisuus- ja märkyyksindeksien toimivuutta.

Mallien pohja-aineistona käytimme dronekuvia, joista luotiin GEOBIA-menetelmällä binääri- nen maanpeiteluokitteluaineisto kuvaamaan rimpi- ja ei-rimpipintoja. Muodostimme tutki- muskohteille tutkimusruudukot käyttämällä Landsatin 30 metrin pikseleitä pohjaruutuina. Laskimme ruuduille rimpiluokituksen avulla rimpien prosentuaalisen osuuden ja lisäksi

satelliittiaineistoista kanavien ja indeksien arvot. Kerätyn aineiston avulla rakensimme random forest -regressiomallin ja ennustimme rimpien prosentuaalista osuutta satelliittiaineistoilla. Teimme mallinnuksia sekä sensori- ja kohdekohtaisesti että myös yhdistämällä eri kohteiden aineistoja yhteen. Mallien avulla ennustimme myös pikselikohtaisen rimpien %-osuuden koko suolle.

Parhaisiin ennustetuloksiin pääsimme käyttämällä Sentinel-2- ja Planetscope-aineistoja, kun taas Landsatin ennustetarkkuus oli hieman heikompi. Landsat- ja Sentinel-2-aineistojen lyhytaaltoisten infrapunakanavien poisto malleista heikensi ennustekykyä vain vähän. Parhaaseen lopputulokseen pääsimme käyttämällä kohdekohtaisia malleja. Eri kohteet yhdistävissä malleissa tarkkuus oli pääsääntöisesti selvästi heikompi. Ennustekyky vaihteli kohteiden välillä. Esimerkiksi Vihtanevan, Kurkineva ja Haudannevan rimpipintojen osuutta pystyttiin ennustamaan suuremmalla tarkkuudella kuin Niittysuon ja Vahtisuon. Yleisesti toukokuun aineistoilla oli parempi ennustekyky kuin elokuun aineistoilla.



Kuva 12. Droneaineistosta kenttätukiaineistojen, dronekuvien visuaalisen tulkinnan ja koneoppimisalgoritmien avulla luokiteltu suon pintatyyppi (mätäspinta, välipinta, rimpipinta) tutkimussoilla (Isoaho 2022).

2.3.3. Pohdintaa kaukokartoitusmenetelmien toimivuudesta

Pintatyyppiluokittelua yksityiskohtaisempaa suokasvillisuuden kaukokartoitusta emme hankkeessa kokeilleet. Syynä tähän oli pääosin maastoaineistoista tehdyn kasvillisuus seurannan melko hajanaiset tulokset. Jos tulokset olisivat olleet selkeämpiä, olisimme esimerkiksi voineet ennustaa eri toiminnallisten ryhmien tai kasviyhteisöjen esiintymistä tutkimussoillamme. Lisäksi rajoitteena toimi kasvillisuus seurantaruuutujen melko vähäinen määrä suokohteilla. Jotta yhdeltä suolta voitaisiin tehdä luotettavia karttoja kasviyhteisöistä, toiminnallisista ryhmistä

tai kasvillisuusgradien-teista, maastohavaintopisteitä olisi hyvä olla vähintään kymmeniä. Vastaavasti emme voineet kaukokartoitusseurannan avulla tehdä tulkintaa suokasvillisuudesta tapahtuvasta muutoksesta kolmivuotisseurantakohteilla, sillä muutokset kasvillisuudessa ovat hitaampia kuin muutokset hydrologiassa. Kolmen vuoden seuranta-aika ei ole riittävä muutosten havaitsemiseksi. Toisaalta rajoitteena toimi myös se, että teimme resurssirajoitteiden takia kasvirituseurannan ainoastaan yhtenä vuonna.

2.3.4. Lopuksi

Kaiken kaikkiaan kasvillisuusseurannassa havaitsimme, että on huomattavan vaikea seurata laaja-alaisia, sijainniltaan osin hankalasti ennustettavia ja melko hienovaraisia muutoksia. Tulostemme perusteella noin kymmenellä kasvirituudulla muutamaan suon pisteeseen keskittyvä näytteistäminen ei välttämättä ole paras tapa vesienpalautuskohteiden seurannassa. Kattavamman kuvan saamiseksi yhden suon kasvillisuutta pitäisi seurata pidempään ja suolla tulisi olla enemmän kuin noin kymmenen kasvirituuta. Tällöin myös tarkastelutarkkuutta tulisi pienentää ja keskittyä esimerkiksi ravinteikkuuden ja kosteuden muutoksiin reagoivien indikaattorilajien tai joidenkin toiminnallisten kasviryhmien runsauden muutoksiin. Lisäksi seurannassa tulisi olla mukana kontrollikohteita, joille ei ole tehty vesienpalautusta.

2.3.5. Ydinkohdat

- Vesienpalautuksen tärkein tavoite on ennallistaa suoluontoa eli palauttaa suon alkuperäistä kasvilajistoa ja alkuperäinen ravinteisuustaso.
- Kasvillisuusseurannassamme saimme heikkoja viitteitä, että vesienpalautus palauttaa ruohovaltaisen kasvillisuuden, mesotrofisten lajien ja ruoppapinnan esiintyvyyttä.
- Käytetyllä menetelmällä ei pystytty todentamaan vesienpalautuksen vaikutusalueen kokoa tai muutoksen määrää suhteessa etäisyyteen vesienpalautuspisteestä (vesienpalautusoman pää).
- Kasvillisuusanalyysimme heikkoutena oli seurantaan saatavilla olevien kohteiden vähäisyys sekä pitkäaikaisseurannan ja luonnontilaisten kontrollikohteiden puute: tarvitaan enemmän vesienpalautuksia edustavan seurantakohdejoukon muodostamiseksi (seuranta ennen ja jälkeen toimien ja kontrollikohteet).
- Kasvillisuusseurannan haasteena on lisäksi vesienpalautuksen vaikutusten tarkemman kohdentumisen vaikea ennustettavuus sekä kasvillisuuden muutosten hitaus.
- Koska kasvillisuusanalyysin tulokset olivat melko epäselviä, keskityimme kaukokartoitusanalyseissamme soiden pintatyyppien (mätäspinta, välipinta, rimpipinta) kartoitukseen.
- Pintatyyppikarttoja voidaan tehdä luotettavasti droneaineistojen avulla ja etenkin mätäs- ja rimpipintojen erottaminen on melko suoraviivaista. Satelliittikuvien avulla voidaan ennustaa rimpipintojen esiintyvyyttä laajemmille alueille.
- Vesienpalautuskohteiden kasvillisuuden seuranta maastomenetelmin ja kaukokartoituksen avulla vaatii lisäselvitystyötä kuten muutosten tulkintaa helpottavien indikaattorien määrittämisen.

2.4. Työpaja vesienpalautuksen vaikuttavuus- ja hoitoseurannoista

Työpaja vesienpalautuskokemuksista järjestettiin Sukevalla 22.–23.8.2023. Keskustelimme työpajassa vesienpalautuksen suunnittelusta, toteutuksesta ja seurannasta. Ensimmäisenä päivänä teimme maastoretken Vahtisuon vesienpalautuskohteelle. Lisäksi ensimmäisenä päivänä esiteltiin vesienpalautushankkeiden tuloksia, mukaan lukien tämän hankkeen tulokset. Päivän keskustelut liittyivät hankkeiden antiin, Vahtisuon kohteeseen ja vesienpalautukseen yleensä. Toisena päivänä pidimme työpajan siitä, miten vesienpalautuksen suunnittelua, toteutusta ja seurantaa voisi kehittää. Työpajaan osallistui ensimmäisenä päivänä 15 henkilöä ja toisena päivänä 12 henkilöä. Osallistujat tulivat Metsähallituksen Luontopalveluista, Metsähallitus Metsätalous Oy:stä, Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta, Suomen metsäkeskuksesta, Tapio Oy:stä, ympäristöministeriöstä, Suomen ympäristökeskuksesta ja Luonnonvarakeskuksesta.

Tässä raportissa esittelemme työpajan tärkeimpiä anteja vesienpalautuksen hoito- ja vaikuttavuusseurantaan liittyen. Työpajassa korostettiin, että soiden ekologisesta tilasta, suolajiston ja -elinympäristöjen monimuotoisuudesta sekä tilan paranemisesta ja muuttumisesta tarvitaan tietoa. Tieto on arvokasta itsessään ja arvioitaessa sitä, saavutetaanko vesienpalautustoimenpiteillä sille asetetut tavoitteet. Lisäksi tietoa käytetään EU:lle tehtävässä Natura-luontotyyppien ja -lajien raportoinnissa. Siten on oleellista, että vesienpalautuksen vaikuttavuutta tulee seurata seurantaverkoston avulla.

Työpajassa pohdittiin, että keskeisintä on tarkastella, miten vesi liikkuu suolla. Oleellista on, virtaako vesi vesienpalautus uomasta kohti suon keskikohtaa ja edelleen suon läpi kohti alapuolista valuma-alueetta. Veden virtausreitit eivät näy kaukokartoitusaineistoilla välttämättä kovin hyvin. Parhaiten virtausverkkoihin pääsee kiinni ehkä lämpökamerakuvien avulla. Lisäksi optisten drone- ja satelliittikuvien avulla voidaan tulkita paikallisia märkytyksessä tapahtuvia muutoksia. Kuitenkin selkeästi havaittavat muutokset voivat näkyä vasta viiveellä. Lisäksi kaukokartoitustulkinta voi johtaa harhaan. Esimerkiksi rahkasammalvaltaisilla alueilla voi olla vedenpinnan tasossa suuriakin muutoksia, jotka eivät välttämättä erotu pinnasta otetuista kuva-aineistoista. Voi muodostua jopa kelluvia rahkasammalikkoja.

Veden liikkumisen havainnointiin paras keino onkin käydä tutustumassa tilanteeseen paikan päällä saappaat jalassa. Havainnointia tulee toistaa. Yksi kerta vesienpalautusta seuraavana vuonna ei riitä, sillä virtausreitit voivat muuttua. Havaintojen tekoon tarvitsee asiantuntemusta ja lisäksi havaintojen tulee olla kattavia. Ei riitä, että suota tarkastelee yhdestä kohdasta, vaan havaintoja tulisi tehdä mahdollisuuksien mukaan koko suon alueella. Esimerkiksi jos näyttää siltä, että vesi ei virtaa vesienpalautus uomassa kohti avosuota, suota kiertelemällä kannattaa varmistaa, että vesi ei kulkeudu ei-toivottuun paikkaan. Riittävän laajojen maastohavaintojen jälkeen voi olla mahdollista päätellä veden kulkureitit esimerkiksi kuivempan mätäs- tai välipintaan, jossa muutos ei välttämättä ole helposti silmillä havaittavissa.

Maastohavaintojen lisäksi vedenpinnan korkeusmittaukset tukevat virtausten tarkasteluja. Niiden avulla voidaan määrittää suovedenpinnan gradientit, jotka määräävät virtauksen pääsuunnat suolla.

Koska märkytyksen lisääntyminen nostaa suon pintaa ylemmäksi, tarkat korkeusmittaukset voivat tukea seurantaa. Mittauksia voi tehdä maastossa RTK-GNSS-laitteiden avulla ja lisäksi RTK-droneaineistoista tehtyjen maastomallien avulla. RTK-droneaineistojen tarkkuus avoimilla

paikoilla riittää havaitsemaan 5–10 cm korkeusmuutoksia. Tätä pienempien muutosten havaitseminen ei todennäköisesti ole mahdollista droneaineistojen tuottamiseen liittyvien maiden virhelähteiden takia. Droneaineistojen tukena olisi hyvä aina käyttää maan pinnalla olevia tukipisteitä, joille on mitattu tarkat sijainnit. Tukipisteiden koordinaatit tulee mitata RTK-laitteella joko jokaisen kartoituksen yhteydessä tai sitten ne on kiinnitettävä paalulla tukevasti turpeen alla olevaan kivennäismaahan.

Työpajassa pohdittiin lisäksi, että kasvillisuudessa tapahtuvat muutokset ovat hitaita. Suokasvilajit ovat stressinsietäjiä, jotka reagoivat muutoksiin hitaasti. Siten vaikka suon hydrologiset olosuhteet muuttuvat, muutokset eivät näy lajistossa nopeasti eikä uutta lajistoa ilmesty heti paikalle. Muutosten selkeä näkyminen voi kestää 20 vuotta tai jopa kauemmin. Tämän takia työpajassa pohdittiin, että kasvillisuusmuutosten havainnoinnissa tulisi keskittyä vanhoihin kohteisiin. Seurantakohteita tulisi olla paljon, jotta voidaan tehdä tilastollisesti edustavia havaintoja kasvillisuuden muutoksesta. Lisäksi tulisi tehdä pitkäaikaista seuranta uusilla vesienpalautuskohteilla.

Kasvillisuusmuutosten havainnoimisessa voisi kasvilajien sijaan keskittyä kasvittomien pintojen laajuuden havainnoimiseen ja suon pintarakenteen muutoksiin, kuten rimpipintojen määrään ja laajuuteen. Vesienpalautuksen tulisi pitkällä aikavälillä lisätä kasvittomia ruoppapintoja ja avovettä. Ne ovat tyypillisiä pintoja rimpinevoilla, joille tehdään iso osa vesienpalautuksista. Rimpinevoja ei tällä hetkellä ole mukana ennallistamisen seurantaverkostossa, joten niiden pitkäaikaisseurannoille ja ennallistamisseurannoille olisi suuri tarve. Seurantaverkostosta rimpinevat jätettiin pois, koska niillä tehtävä seuranta on haastavaa. Rimpinevoilla on hankala liikkua märkyiden takia ja alueilla liikkuminen jättää saman tien jälkiä. Siksi seurantakohteilla voi tarvita pitkospuita. Lisäksi rimpinevoja on ojitettu vain vähän metsätalouskäyttöön, joten niiden ennallistamistakaan ei ole tehty paljoa perinteisen ennallistamisen menetelmin.

Kasvillisuuden sijaan ekologisen vaikuttavuuden seurannassa voisi etenkin lyhyellä tähtäimellä keskittyä linnusto- ja hyönteisseurantaan, sillä nämä eliöryhmät reagoivat nopeasti muutoksiin etenkin kohteilla, joilla on paljon avovettä.

2.4.1. Ydinkohdat

- Vesienpalautuksen suunnittelun, toteutuksen ja seurannan työpaja järjestettiin elokuussa 2023.
- Työpajassa korostettiin, että soiden ekologisesta tilasta, suolajiston ja -elinympäristöjen monimuotoisuudesta sekä tilan paranemisesta ja muuttumisesta tarvitaan tietoa.
- Vesienpalautuksen seurannassa oleellista on keskittyä veden virtauksen seurantaan. Seuranta voi tehdä maastohavaintojen ja esimerkiksi dronelämpökamera-aineistojen avulla.
- Kasvillisuudessa tapahtuvat muutokset ovat hitaita, sillä suokasvit ovat stressinsietäjiä.
- Kasvillisuusmuutosten havainnoinnin sijaan voisi keskittyä suon pintarakenteen sekä ruoppapintojen muutosten havainnointiin ja mahdollisesti myös linnusto- ja hyönteisseurantaan.

2.5. Ehdotuksia hoito- ja vaikuttavuusseurantaan

2.5.1. Hoitoseuranta

Hoitoseuranta tarkoittaa jokaisella vesienpalautuskohteella toteutettavaa toimenpiteiden teknisen onnistumisen todentamista, ja sen on ainakin alkuvaiheissa suunniteltu perustuvan silmä-määräisiin maastohavaintoihin, dronekuvien visuaaliseen tulkintaan ja satelliittikuvaseurantaan. Hoitoseurannan tulee ainakin alkuvaiheissa olla adaptiivista, siten että eri seuranta-menettelmien hyödyllisyyttä tarkastellaan kriittisesti suhteessa niiden kustannuksiin, työmäärään, niillä saatavaan tietoon ja tiedon käyttökelpoisuuteen käytännön toimien ohjaamisessa. Soiden ennallistamisen seurantaoppaan ohjeistusta mukaillen myös vesienpalautuksen hoitoseurannan tulisi auttaa selvittämään, onko vesienpalautus onnistunut teknisesti ja onko ennallistamiskehitys käynnistynyt halutulla tavalla, auttaa havaitsemaan mahdolliset ongelmat ja kehittämään vesienpalautuksen suunnittelua ja menetelmiä saatujen kokemusten pohjalta (Hyvärinen ja Aapala 2009). Soiden ennallistamisen seurantaohjeessa kuvatut hoitoseurannan vaiheet ja huomioitavat asiat pätevät suurelta osin varsin hyvin myös vesienpalautuskohteille. Tämän hankkeen puitteissa osallistuttiin myös soiden ennallistamisen oppaiden päivitystä koskevaan työpajaan (9/2023), jossa todettiin subjektiivisen ja tapauskohtaisen arvioinnin olevan välttämätöntä hoitoseurannan suunnittelussa, sillä huomioitavat asiat ovat osin suokohtaista. Tämä johtopäätös pätee hyvin vesienpalautuskohteille ja myös tämän hankkeen tulokset tukevat tätä. Koska aiemman hoitoseurantaohjeistuksen koettiin suo-opastyöpajassa olevan edelleen huomattavan pätevä ja toisaalta ennallistamisoppaan päivitystyön ollessa joka tapauksessa käynnissä muilla tahoilla (muun muassa Hydrologia-LIFE-hankkeen kautta), tässä hankkeessa on keskitytty erityisesti hoitoseurantaa täydentävien kaukokartoitusmenettelmien testaamiseen ja hiomiseen.

Myös elokuussa 2023 järjestetyssä vesienpalautuksen kokemustyöpajassa pohdittiin, että hoitoseurantaa voisi toteuttaa maastossa tapahtuvien seurantakäyntien ja satelliittikuvaseurannan yhdistelmänä. Lisäksi apuna voi käyttää muiden kaukokartoitustuotteiden, etenkin Maanmittauslaitoksen ilmakuvien ja laserkeilausaineistojen visuaalista tulkintaa, jos aineistoja on saatavilla ennen ja jälkeen vesienpalautuksen. Lisäksi hoitoseurannan apuna voi käyttää dronekuvausta etenkin märillä tai muuten vaikeakulkuisilla kohteilla. Koska kuvaus vaatii asiantuntemusta, aikaa ja kuvauskaluston, droneseurantaa ei voi toteuttaa jokaisella vesienpalautuskohteella. Droneseurannan ohella toinen mahdollinen osalle kohteista suositeltava hoitoseurannan muoto on vedenpinnan tason mittaukset loggereiden avulla. Loggereita tulisi olla mielellään vähintään kaksi: yksi vesienpalautuspuoman välittömällä vaikutusalueella ja yksi keskeimmällä suota epäsuoremmalla vaikutusalueella.

Kuten ennallistettujen soiden hoitoseurannasta on ohjeistettu, seuranta tulee suunnitella osin kohdekohtaisesti toimenpiteiden suunnittelun yhteydessä (Hyvärinen ja Aapala 2009). Tällöin tulee suunnitella ja kirjata ylös, mihin asioihin toimenpiteiden jälkeisinä vuosina kiinnitetään erityistä huomiota juuri kyseisellä kohteella eli minkä asioiden tai suon kohtien suhteen toimenpiteiden onnistumista tarkastellaan. Huomioitavien asioiden ja tavoitteiden määrittelyllä ennen toimenpiteitä vähennetään onnistumisen tulkinnan subjektiivisuutta. Tällöin voidaan myös myöhemmin kootusti tarkastella, minkä tarkasteltavien elementtien suhteen toimenpiteet yleensä onnistuvat tai tavoitteet eivät täyty, tai kehittää seurannan ohjeistusta mahdollisesti havaitun tarpeen mukaan.

Maastoseurannassa ensimmäinen vesienpalautuksen jälkeinen seurantakäynti tehdään vesienpalautusta seuraavana kesänä. Ensimmäinen seurantakäynti tulisi tehdä silloin, kun alueella on mahdollisimman paljon vettä. Yleensä tämä tarkoittaa kevättulvatilannetta, mutta tulvia voi olla myös myöhemmin lumettomana aikana. Ensimmäisellä kerralla arvioidaan, toimiiko vesienpalautus niin kuin sen pitäisi toimia, eli vesi virtaa suolle eikä epätoivottaviin paikkoihin. Lisäksi tarkastellaan mahdollisia toimenpiteiden korjaustarpeita, esimerkiksi vesienpalautus-uoman riittävyttä tai sen pidentämisen tarvetta.

Ensimmäisellä hoitoseurantakerralla tulee lisäksi arvioida, milloin seuraavat maastokäynnit tulisi tehdä. Tarvittaessa vierailuja tulee tehdä jopa vuosittain tai esimerkiksi viiden vuoden päästä. Jatko seuranta olisi hyvä tehdä keskemällä kesää kuivempaan ajankohtana, jotta saadaan tietoon vesienpalautuksen toimivuus myös muuna kuin tulva-aikana. Hoitoseurannan lisäksi maastossa tulee tehdä yksi toteutusseurantakäynti yhdessä urakoitsijan kanssa heti kun koneet ovat käyneet suolla. Tällöin tarkastetaan, että urakka on tehty sovitusti.

Ensimmäisen maastoseurantakäynnin jälkeen oleellinen maastoseurantakerta tehdään kymmenen vuotta vesienpalautustoimen jälkeen. Tämä seurantakäynti pitäisi siis tehdä kuivaan kesäaikaan. Kymmenvuotisseurannan tavoitteena on arvioida, että vesienpalautus toimii edelleen niin kuin pitää ja että jatkotoimille ei ole tarvetta.

Hoitoseurantakäyntien tulisi kattaa mahdollisimman laaja alue, ei pelkästään yhtä pistettä kuten vesienpalautus-uoman päätä. Seurannassa etenkin ongelmakohtat tulisi käydä katsomassa laajemmalla alueella, varsinkin jos vesienpalautus ei näytä toimivan odotetusti. Hoitoseurannassa tehtävä tulkinta vaatii kokemusta ja on jokseenkin subjektiivista, mutta täysin objektiivista ja varmaa hoitoseurantamenetelmää on vaikea kehittää.

Optimaalisessa tilanteessa tarkastelu pitäisi ulottaa koko valuma-alueelle, mutta tämä ei yleensä ole mahdollista, sillä valuma-alueet voivat olla huomattavan suuria. Oleellista on joka tapauksessa rajata valuma-alue, jotta veden virtausreitit voidaan mallintaa. Rajauksen voi tehdä manuaalisesti peruskarttaa ja ilmakuvaa tulkitsemalla tai käyttämällä valmiita työkaluja, kuten Metsäkeskuksen (2023a) valuma-alueen rajaustyökalua, joka hyödyntää Maanmittauslaitoksen kahden metrin maastomallia. Valuma-alueen rajaus ei kuitenkaan ole yksiselitteistä ja etenkin tasaisilla alueilla rajojen piirto on epävarmaa sekä manuaalisilla että automaattisilla menetelmillä. Lisäksi rajauksessa ongelmia voi tuottaa myös siltarumpujen paikat, jotka eivät aina näy Maanmittauslaitoksen maastomallissa. Siten valuma-alueen rajauksessa kannattaa käyttää useaa eri menetelmää ja hyödyntää lisäksi virtausverkoston mallinnusta. Virtausverkoja pääsee tarkastelemaan esimerkiksi Metsäkeskuksen (2023b) Suometsänhoidon paikka-tietoaineistoilla. Nykyisen valuma-alueen rajauksen lisäksi tärkeää on hahmotella luonnontilaisen eli ojittamattoman tilanteen valuma-alue. Tätä rajausta voi tehdä joko vanhoja ilmakuvia ja karttoja tarkastelemalla tai korkeusmallia suodattamalla. Suodatuksella voidaan häivyttää ojat aineistoista (Sallinen ym. 2019), mutta se ei huomioi turvemaiden tapahtunutta maanpinnan painumista. Valuma-alueen rajaus tulee tehdä jo vesienpalautusta suunnitellessa ja rajauksen teossa voi hyödyntää Metsäkeskuksen asiantuntijoita.

Vesienpalautuskohteiden hoitoseurannassa on hyvä käyttää satelliittikuvien visuaalista tulkintaa maastokäyntien tukena. Visuaaliseen tulkintaan voi käyttää esimerkiksi Sentinel Hub EO Browseria (ESA 2023). Lisäksi hoitoseuranta varten voidaan kehittää Google Earth Engine -skripti märkyiden seuranta varten. Satelliittikuvatulkinnalla voidaan tarkastella etenkin suon märkydessä tapahtuvia muutoksia. Kuvien avulla voidaan tulkita, mitkä vesienpalautus-uomat

tuovat vettä suolle ja nostavat suovedenpintaa. Satelliittikuvaseuranta mahdollistaa kohteiden jatkuvatoimisemman seurannan ja siten seurannan maastokäyntien välissä. Lisäksi satelliittikuvien avulla voi kohdentaa maastohavaintojen tekoa: jos kuvissa näkyy jotain odottamatonta, tämä on hyvä käydä tarkastamassa maastossa, vaikka seurantakäynti ei muuten olisi suunnitteilla. Siten jokaiselle kohteelle olisi hyvä tehdä satelliittikuvien tulkintaa vuosittain.

2.5.2. Vaikuttavuusseuranta

Vaikuttavuusseurannan avulla tutkitaan systemaattisin ja kvantitatiivisin menetelmin ennallistamisen ekologista ja hydrologista vaikuttavuutta. Työpajassa todettiin, että vesienpalautuskohteista etenkin rimpinevoille tarvitaan pitkäkestoinen seurantaverkosto, sillä rimpinevoilla ennallistamisen vaikuttavuutta ei vielä seurata. Vesienpalautuskohteet ovat keskenään erilaisia ja siksi seurantakohteita tulee olla useita. Vastaavasti seuranta kannattaa keskittää yhdelle suotyypille, jotta tuloksista saadaan tarpeeksi edustavia. Ehdotammekin, että seurantaverkoston tarvitaan vähintään kymmenen rimpinevakohdetta ja niille luonnontilaiset ja kuivahtaneet verrokkikohteet.

Eri-ikäisten vesienpalautusten vertailun sijaan seuranta olisi hyvä toteuttaa uusien kohteiden kertymisen myötä ennen-jälkeen toimenpiteiden kontrolloituna seurantana (niin sanottu before-after control-impact -menetelmä). Usean kohteen seurantaverkoston muodostamiseksi tarvittava kehitystyö tulisi kohdentaa oleellisten ekologisten muuttujien ja niiden mittaamistavan tunnistamiseen sekä näiden tarkasteluun sopivan, kustannustehokkaan, kohteille rakennettavan seuranta-asetelman suunnitteluun. Koska vesienpalautuksen vaikutusten kohdentuminen voi olla laajaa ja toisaalta ennalta-arvaamatonta, seurantamenetelmän tulee olla toteutettavissa suhteellisen laajalla alueella. Lisäksi tulee huomioida tarve edustavan ja seurannan kannalta toimivan kohdejoukon löytämiseen, kun uusia kohteita syntyy vesienpalautustyön etenemisen myötä.

Seurannan kannalta olisi hyvä sijoittaa yhden kohteen seuranta-asetelma siihen kohtaan, johon vesienpalautusuoma tullaan kaivamaan. Etukäteen on kuitenkin hyvin vaikea tietää varmasti, mihin uomat kaivetaan. Lisäksi kohteilla on suuria eroja sen suhteen, mitkä vesienpalautusuomat tuovat eniten vettä suolle. Tällöin ei ole tarkoituksenmukaista sijoittaa laajaa seuranta-asetelmaa yhden uoman läheisyyteen. Sen sijaan asetelma pitäisi hajauttaa usean uoman oletetulle välittömälle vaikutusalueelle ja osa seurantapisteistä pitäisi lisäksi sijoittaa kauemmaksi uomien päistä.

Oleellisia seurattavia tekijöitä on etenkin ruoppa- ja avovesipintojen laajuus. Sen sijaan kasvilajiston seurannan osalta työpajoissa pohdittiin, että aluksi olisi hyvä odottaa perinteisen ennallistamisen seurantaverkoston kymmenvuotisseurannan tulokset. Niiden avulla voidaan pohtia tarkemmin, mikä on sopiva taso lajihavainnoille, eli kannattaako lajit havainnoida lajitasolla vai riittääkö esimerkiksi yleisempi lajiryhmätaso, kuten toiminnalliset kasviryhmät. Yksi vaihtoehto on keskittyä vain keskeisiin indikaattorilajeihin tai uhanalaiseen suolajistoon.

Kasvillisuusseurannan otostaminen tuottaa myös haasteita vesienpalautuskohteilla. Kohteet ovat laajoja ja etenkin rimpinevat ovat spatiaalisesti heterogeenisiä: pienen alueen sisältä voi löytyä rimp-, väli- ja mätäspintoja. Tällöin yksittäisten kasviryöyhien avulla ei välttämättä päästä kiinni koko suon tasolla tapahtuviin muutoksiin. Ideaalilanteessa kasviryöyhiä olisikin useita ja ne olisi jaoteltu suon eri pinnoille ja osiin. Ruudut voitaisiin otostaa esimerkiksi ositetun satunnaisotannan tai linjojen avulla.

Joissain tilanteissa matalalla dronelennolla otetut kuvat voisivat toimia kasviruutuja parempana menetelmänä, niiden salliessa huomattavasti laajemman ja useampia tarkastelupisteitä sisältävän kohteen sisäisen otannan. Tällöin tulee kuitenkin pystyä määrittelemään tarkasteltavat kasvillisuuden piirteet tai indikaattorit, jotka voidaan havaita dronekuvista mutta jotka ovat riittävän tarkkoja esimerkiksi ravinteikkuuden muutosten tulkintaan. Lajitason kasvillisuusmuutosten havainnointiin tarvittaneen kuitenkin kasvilajiruutuja.

Myös muuten lämpö- ja multispektrikameralla tehtävää droneseurantaan voisi ottaa vaikuttavuuden seurannan tueksi, mutta hankaluutena on sopivan dronekuvausalueen rajaaminen, sillä vesienpalautuksen oletettu vaikutusalue voi olla suuri eikä välttämättä helposti etukäteen rajattavissa. Tämän takia satelliittikuvien avulla tapahtuva seuranta tulee ottaa droneseurannan tueksi. Tällöin droneaineistoilla voidaan tehdä pienipiirteisen tason seuranta vesienvirtausreiteissä ja kasvittomien pintojen laajuudessa. Satelliittikuvaseurannalla voidaan taas päästä paremmin kiinni laajojen alueiden märkyyksimuutoksiin ja mahdolliseen vesienpalautuksen vaikutusalueeseen. Lisäksi seurannassa voisi tehdä suonpinnan korkeuden mittauksia maastossa tehtävien RTK-mittausten ja RTK-dronejen avulla.

Ekologisten vaikutusten osalta oleellisia seurattavia eliöryhmiä voisivat kasvien lisäksi olla linnut ja mahdollisesti hyönteiset. Linnustoseuranta voisikin olla hyvä tapa aloittaa seuranta.

Hydrologisista seurannoista oleellista olisi vedenpinnan tason ja veden virtauksen seuranta. Vedenpinnan tason seurannassa otostaminen tuottaa samalla tavalla haasteita kuin kasvillisuusseurannassa. Ei ole selkeää, minne mittauspisteet kannattaa sijoittaa. Alapuolisen vesistön vedenlaadun seurannalla saadaan arvokasta tietoa vesienpalautuskohteiden ravinnetasapainosta.

Seurannan kannalta on keskeistä, että ennallistamisen suunnittelija, toteuttaja ja seurannan toteuttaja olisivat jatkuvassa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa, jotta kaikki vaiheet saadaan toteutettua koordinoitusti. Hankkeessamme näin ei ollut, ja tämä aiheutti ongelmia seuranta-asetelman sijoittelussa ja toimivat vesienpalautusmaat jäivät asetelmien ulkopuolelle.

2.5.3. Ydinkohdat

Hoitoseuranta

- Hoitoseuranta tarkoittaa jokaisella vesienpalautuskohteella toteutettavaa toimenpiteiden teknisen onnistumisen ja toivotunlaisen ennallistamiskehityksen todentamista.
- Laadukkaasti toteutettu hoitoseuranta auttaa havaitsemaan mahdolliset ongelmat sekä kehittämään ennallistamisen suunnittelua.
- Kohteet ovat erilaisia ja myös hoitoseurannassa tarkkailtavat muutokset ja huomion kohteet voivat vaihdella kohteittain: oleellista on huomiota vaativien tekijöiden ja kohtien tunnistaminen kohdekohtaisesti jo toimenpiteitä suunniteltaessa sekä seuranta-suunnitelman ja myöhemmin havaintojen tallentaminen niiden jatkohyödyntämisen mahdollistamiseksi.
- Oleellisia maastossa tehtäviä hoitoseurantakertoja ovat ensimmäinen seurantakerta vesienpalautustoimenpiteen jälkeisen kevättulvan aikaan ja kymmenvuotisseurantakäynti keskellä kesää.
- Maastossa tehtävää hoitoseurantaan tulee täydentää ja mahdollisesti korvata satelliittikuvien analysoinnin ja visuaalisen tulkinnan avulla. Lisäksi seurannassa voi hyödyntää dronekuvauksia.

Vaikuttavuusseuranta

- Vaikuttavuusseurannan avulla tutkitaan systemaattisin ja kvantitatiivisin menetelmin ennallistamisen ekologista ja hydrologista vaikuttavuutta.
- Vesienpalautuksen kohteena olevat rimpinevat eivät ole mukana perinteisen ennallistamisen seurantaverkostossa, ja vesienpalautus poikkeaa toimenpiteen pistemäisyyden ja vaikutusalueen laajuuden osalta perinteisestä ennallistamisesta, joten vesienpalautukselle tarvitaan oma seuranta vaikutusten laadun ja laajuuden selvittämiseksi.
- Seurantakohteita tulee olla vähintään kymmenen ja lisäksi tarvitaan kontrollikohteet, joille ei tehdä vesienpalautustoimia. Seurannan tulee olla pitkäaikaista ja vaikutusalueen laajuuden huomioivaa.
- Käytännössä yhdellä suolla seurantaa tulee tehdä kohtalaisen laajalla alueella.
- Seurannassa tulee hyödyntää monipuolisesti eri menetelmiä, sisältäen hydrologiset (veden liikkeet, vedenpinnan taso), ekologist (kasvillisuusmuutokset, ruoppapintojen laajuus, mahdollisesti linnut ja hyönteiset) ja kaukokartoitusmenetelmät (dronekartoitukset, satelliittikuvat).
- Vesienpalautuskohteiden kasvillisuuden seuranta maastomenetelmin ja kaukokartoituksen avulla vaatii lisäselvitystyötä kuten muutosten tulkintaa helpottavien indikaattorien määrittämisen. Erityisesti tulisi selvittää mahdollisuuksia kohteen ravinteikkouden muutosten laaja-alaiseen tarkkailuun.

3. Kaukokartoituspohjaisen seurannan kehittäminen perinteisen ennallistamisen kohteilla

3.1. Dronekuvaaminen seurantojen tueksi

Hydrologia-LIFE-hankkeessa kerättiin kokemuksia dronekuvauksesta perinteisen ennallistamisen seurannassa. Tässä osiossa käymme läpi hankkeen päähavaintoja. Kokemuksista voi lukea tarkemmin hankkeesta tuotetusta raportista (Ikkala ja Similä 2023).

Dronetoimintaa varten kuvaajat täytyy kouluttaa laitteiston käyttöön ja heidän tulee suorittaa verkossa Traficommin oppimateriaaliin pohjautuva teoriakoe. Teoriakokeen suoritettuaan lentäjällä on lupa toimia EU:n droneasetuksen avoimen kategorian sääntöjen puitteissa. Sääntöihin sisältyy 120 m maksimilentokorkeus sekä vaatimus lennokin pitämisestä jatkuvasti näköyhteydessä. Lennot tulee myös suorittaa etäällä asutuksesta ja ihmisistä, mikä ei yleensä suokohteilla tuota ongelmia. Lisäksi toimintaa rajoittavia ilmatilavyöhykkeitä on perustettu esimerkiksi lentokenttien ympärille.

Hoitoseurannan apuvälineiksi sopivat parhaiten edullisten dronejen integroidut näkyvän valon kamerat. Niiden avulla voidaan tuottaa maan päällä tehtäviä havaintoja tukevia yksittäisiä kuvia, jotka eivät välttämättä sovellu systemaattisempiin analyyseihin. Jos halutaan tuottaa geometrisesti tarkkoja aineistoja, drone on suositeltavaa varustaa RTK/PPK (Post-processing Kinematic) -paikantimella, mikä poistaa tai vähentää työläiden maatumapisteiden tarvetta. Edulliset laitteet ovat myös helpommin korvattavissa, jos niiden kanssa ilmenee teknisiä ongelmia.

Dronen voi yksinkertaisimmillaan lennättää suolla yksittäisiin mielenkiintoisiin paikkoihin, kuten ojalinjan päähän, jolloin kohteen tilanteen voi tarkistaa ja dokumentoida yksittäisten, vapaasti otettujen valokuvien avulla. Pitkänomaiset kohteet, kuten ojalinjat voi puolestaan dokumentoida videotallenteena. Kuvauspisteet ja lentoreitit on mahdollista tallentaa ohjaimeen siten, että kuvaus voidaan toistaa täsmälleen samanlaisena kuin aiemmin.

Yksittäiset kuvat ja videot tulevat kyseeseen erityisesti hoitoseurannassa, suunnittelijoiden uudenlaisena apuvälineenä. Kun halutaan tuottaa laajempia, georeferoituja aineistoja, kuvataan yleensä sadoista toistensa kanssa limittyvistä kuvista koostuvia kartoitusaineistoja, jotka yhdistetään jälkikäsitellyssä kolmiulotteiseksi malliksi. Dronekartoitusten lentäminen on jopa helpompaa kuin yksittäisten kuvien, koska lentäjän tarvitsee vain määritellä alueen rajat, lentokorkeus ja kuvalimitys, minkä jälkeen lento suoritetaan itsenäisesti.

Kolmiulotteinen malli sisältää ne pinnat, jotka kuvauksessa kameralle ovat näkyneet. Tyypillisesti katveisiin jää tiheän puuston alla oleva suonpinta. Avoimellakin paikalla tiheä varvikko, heinikko tai muu aluskasvillisuus saattaa estää varsinaisen suon pinnan näkymisen. Siksi dronekuvaukset ja -kartoitukset soveltuvat erityisesti avoimille ja vähäpuustoisille soille. Toisaalta dronet tukevat eniten havainnointia kaikkein märimmillä soilla, missä kulkeminen maastossa olisi hankalaa, varsinkin ennallistamisen jälkeen.

Kolmiulotteiselle pistepilvimallille voidaan suorittaa erilaisia analyysejä. Tyypillisesti kiinnostavimpia lopputuotteita ovat kuitenkin rasterimuotoiset ortomosaiikkikuvat ja pintakorkeusmallit. Ortomosaiikkikuvassa yksittäiset kuvat on koostettu yhteen laajaksi kokonaisuudeksi, jossa

jokaista pikseliä tarkastellaan suoraan ylhäältä päin, jolloin kovalta voidaan tehdä mittatarkkoja tulkintoja.

Hoitoseurannassa dronekuvausta voidaan käyttää teknisen toteutuksen onnistumisen arviointiin. Kuva-aineistot mahdollistavat havaintojen tekemisen kaikessa rauhassa toimistolla, jolloin ongelmalliseksi tiedettyjä kohtia voi palata tarkastelemaan yhä uudelleen. Dronekartoitusten avulla kohteesta saadaan parempi yleiskuva, kun taas perinteinen hoitoseuranta ja muut maan pinnalta tehtävät mittaukset rajoittuvat aina suon yksittäisiin pisteisiin tai kulkureitteihin.

Veden leviäminen suolle ja virtaussuunnat havaitaan parhaiten korkean veden, kuten kevätulvan, aikaan. Myös mahdolliset ojien täytöt ja patoamiset sekä täyttömassojen nostopaikat ja ohjausomien kaivu saadaan dokumentoitua tarkasti. Ennallistamisen aiheuttamista muutoksista ensimmäisinä näkyvät muutokset suon pinnan märkydessä ja veden virtausreiteissä. Dronekuvien tulkinta voi vaatia ensin maastossa suoritettavan silmämääräisen kalibroinnin. Kasvillisuus muuttuu hitaasti, jolloin tarvitaan pitkiä aikasarjoja. Kasvillisuus kannattaa kartoittaa keskellä kesää runsaimman kasvillisuuden aikaan. Kuitenkin puustoisilla kohteilla dronekuvista nähdään nopeasti vedenpinnan noston aiheuttama puiden kuoleminen. Toisaalta, jos ennallistamisessa puustoa on poistettu, senttimetritason erottelukyvyn aineistot mahdollistavat taimettumisen seurannan.

Dronekuvausta voidaan käyttää myös vaikuttavuusseurannan toteuttamiseen. Tällöin kyseen tulevat yleensä kehittyneemmät laitteet ja systemaattisemmat menetelmät. Multispektri-, hyperspektri- ja lämpökameroilla voidaan tuottaa esimerkiksi suon pinnan märkydestä kertovia aineistoja (ks. osio 2.2.4). Lisäksi dronekartoituksella tuotetusta kolmiulotteisesta mallista voidaan tuottaa rajoituksin maanpintamalli, jota voidaan käyttää ennallistamisen topografiin ja hydrologisiin analyyseihin (Ikkala ym. 2022). Maanpinta tiheään kasvillisuuden alla voidaan saada tuotettua droneen asennettavan laserkeilaimen avulla. Kehittyneempien työkalujen käyttö on kuitenkin työläämpää ja asiaan vaaditaan syvempää perehtymistä, minkä vuoksi ne eivät sovellu yleiseen hoitoseurantaan. Aikasarjavertailut spektrisillä aineistoilla vaativat radiometrisen kalibroinnin. Lisäksi kuvausten yhteydessä on kerättävä riittävän laajoja kalibrointi- ja validointiaineistoja suon pinnalla, esimerkiksi märkyystarkastelujen tapauksessa suon pintakosteusnäytteitä tai vedenkorkeushavaintoja.

Hydrologia-LIFE-hankkeessa kerättyjen kokemusten perusteella dronetoiminnan haasteet voidaan jakaa operointihaasteisiin ja teknisiin haasteisiin. Operointihaasteisiin lukeutuivat muun muassa vaihtelevat sää- ja valaistusolosuhteet, laitteiston testaamiseen varattava aika ja tuotettujen aineistojen raskaus (siirto verkon yli ja tallennus). Merkittävimpiä teknisiä haasteita olivat dronen ja kauko-ohjaimen väliset yhteysongelmat, laitteiden jumitumiset sekä aluksen paikannukseen ja kompassiin liittyvät tekniset ongelmat. Erityisesti hoitoseurannan apuna dronekuvaukset hoituivat muiden töiden ohessa mutta ne jätettiin tyypillisesti päivän viimeiseksi työtehtäväksi. Teknisten ongelmien ja huonon sään vuoksi kuvaukset saattoivat kuitenkin vaatia erillisen käynnin kohteella, mikä sekoitti yleistä töiden järjestelyä. Siten dronekuvauksia voi käyttää hoitoseurantojen tukena, mutta ne eivät sovellu korvaamaan näitä täysin eivätkä toteutettavaksi jokaisen hoitoseurantakäynnin yhteyteen. Seurannan lisäksi droneja voidaan käyttää ennallistamisen suunnitteluun ja viestinnällisiin tarkoituksiin.

3.1.1. Ydinkohdat

- Hoitoseurantaan sopivat parhaiten edullisten dronet ja niihin integroidut kamerat.
- Yksinkertaisimmillaan dronen voi ohjata kuvaamaan ja videoimaan ennallistamisen onnistumisen tulkinnan kannalta oleellisia hoitoseurantasuunnitelmassa määriteltyjä suon kohtia.
- Vaikuttavuusseuranta varten tarvitaan kalliimpia laitteita, erityyppisiä sensoreita ja systemaattisia kartoitusmenetelmiä.
- Droneseuranta soveltuu parhaiten avoimille tai vähäpuustoisille soille ja etuna on suhteellisten laajojen alueiden seuraaminen ja kuva-aineistot, jotka mahdollistavat erilaisia jatkoanalyysyjä kuten märkyiden muutosten määrällisen todentaminen.
- Veden leviämisen ja kulkureittien havainnointi onnistuu parhaiten kevättulvan aikaan, kasvillisuuden havainnointi taas keskellä kesää.
- Seurannan haasteina ovat esimerkiksi vaihtelevat sääolosuhteet, laitteisto-ongelmat ja esimerkiksi ostopalveluna toteuttamisen vaatimat resurssit.
- Droneseurantakokemuksista voi lukea tarkemmin Hydrologia-LIFE -hankkeessa tuotetusta raportista (Ikkala ja Similä 2023).

3.2. Märkyiden muutosten tulkinta kaukokartoitusaineistojen avulla

3.2.1. Johdanto

Osana hanketta tutkimme, miten hyvin perinteisen ennallistamisen kohteilla ja myös muilla soilla voidaan seurata soiden muutoksia kaukokartoitusaineistojen avulla. Keskityimme etenkin märkyiden muutosten havainnointiin. Koska soiden märkyttä on mitattu pitkäaikaisesti vedenpinnan tason mittausten avulla, yhdistimme satelliittikaukokartoitusaineistojen aikasarjat vedenpinnan tason mittauksiin.

Kokeilimme optisia (Landsat, Sentinel-2) ja synteettisen apertuurin tutkasatelliittikuvia (Sentinel-1) vedenpinnan tason seurannassa yhteensä 50 ennallistetulla tai ojittamattomalla suo-kohteella (Räsänen ym. 2022). Kohteista 44 kuului Metsähallituksen Luontopalveluiden soiden ennallistamisen seurantaverkostoon ja kuusi Luonnonvarakeskuksen soiden ennallistamisen seuranta-kohteisiin. Selvitimme, kuinka hyvin soiden vedenpinnan tason ajallista muutosta voidaan seurata satelliittikuva-aineistolla, parantaako optisen ja tutka-aineiston yhteiskäyttö ennustetarkkuutta yhden aineistolähteen käyttöön verrattuna ja onko ennustetarkkuudessa eroja aineistolähteiden, suotyyppien sekä ennallistettujen ja ojittamattomien kohteiden välillä.

3.2.2. Menetelmät

Jaoimme tarkastellut suo-kohteet kolmeen suotyyppiin ja kahteen käsittelytyyppiin: korvet (9 ennallistettua ja 5 ojittamatonta kohdetta), rämeet (15 ennallistettua ja 8 ojittamatonta) ja avosuot (7 ennallistettua ja 6 ojittamatonta). Teimme analyysit erikseen jokaiselle suokohteelle ja lisäksi yhdistetyt analyysit kuudelle eri suo- ja käsittelytyypin yhdistelmälle (Räsänen ym. 2022).

Soiden vedenpinnan tasoa mitattiin automaattisten loggereiden avulla vuosien 2008–2020 lumettomien kausien aikana. Jokaiselta suokohteelta aineistoa oli vähintään kahden kesän ajalta mutta miltään kohteelta aineistoa ei ollut koko seuranta-ajalta.

Yhdistimme päiväkohtaiset vedenpinnan tason keskiarvot satelliittikuva-aineistojen kanssa. Laskimme optisista satelliittikuva-aineistoista 21 ja tutka-aineistoista kymmenen eri indeksiä, joista jokainen on havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa toimivaksi soiden märkyyden seurannassa tai tunnistamisessa. Laskimme indekseistä keskiarvon 25 metrin säteisen ympyrän alueelta vedenpinnan tason mittauspisteeseen ympäriltä.

Käytimme vedenpinnan tason ajallisten vaihtelun mallinnuksessa random forest -koneoppimismenetelmää (Breiman 2001), jossa mitattu vedenpinnan taso oli selitettävä muuttuja ja satelliittikuvaindeksit selittäviä muuttujia. Pääanalyysissämme suoritimme tarkastelun niille ajankohdille, joilta oli saatavilla sekä optista että tutka-aineistoa. Valitsimme päivät optisten kuvien saatavuuden avulla ja etsimme päivämäärälle lähimmän tutkakuvan. Analyysissä kohdekohtainen päivien lukumäärä vaihteli välillä 20–71. Teimme tälle aineistolle kolme erillistä analyysia, joissa selittävät muuttujat olivat (1) optinen aineisto, (2) tutka-aineisto ja (3) aineistojen yhdistelmä.

3.2.3. Tulokset ja johtopäätökset

Keskimääräinen selitysaste malleissa oli 42,7 %, kun mallit ajettiin erikseen jokaiselle suokohteelle ja selittävinä muuttujina käytettiin molempia aineistolähteitä. Selitysaste oli lähes yhtä hyvä (42,1 %) pelkän optisen aineiston malleille, mutta selkeästi huonompi (20,8 %) tutka-aineiston malleille. Kun yhdessä mallissa oli kaikkien yhden suo- ja käsittelytyypin suot mukana, tutka-aineistomallien selitysaste oli lähempänä mutta edelleen heikompi kuin kahden muun mallin selitysaste. Selitysaste oli keskimäärin korkeampi avosoille ja rämeille kuin korville sekä korkeampi ojittamattomille kuin ennallistetuille kohteille. Selitysasteissa oli kuitenkin paljon kohdekohtaista vaihtelua ja joillain kohteilla tutka-aineistot toimivat parhaiten. Lisäksi tärkeimmät selittävät satelliittikuvaindeksit vaihtelivat kohdekohtaisesti.

Tutkimuksemme perusteella soiden vedenpinnan tason ajallista vaihtelua voi ennustaa kohtalaisella tarkkuudella satelliittikuva-aineistojen avulla etenkin vähäpuustoisilla soilla. Lisäksi tuloksemme kertovat, että optiset kuva-aineistot vaikuttavat toimivan paremmin kuin tutka-aineistot ja että aineistojen yhdistäminen tuo vain vähän etua pelkkään optiseen kuva-aineistoon verrattuna (Räsänen ym. 2022).

3.2.4. Ydinkohdat

- Selvitimme soiden ennallistamisen seurantaverkostoaineistohavaintojen avulla, miten hyvin vedenpinnan tasoa voi seurata satelliittikuvien avulla.
- Tulostemme perusteella optiset satelliittikuvat toimivat tutkasatelliittiaineistoja paremmin vedenpinnan tason seurantaan.
- Vedenpinnan tason seuranta onnistuu hyvin avoimilla ja vähäpuustoisilla soilla. Runsaspuustoisilla soilla satelliittikuvat toimivat heikommin.

3.3. Kasvillisuuden seuranta

Tässä hankkeessa keskityimme kaukokartoitusaineistojen käytössä lähinnä märkyden seurantaan. Kasvillisuuden seurannan osalta teimme joitakin testejä mutta emme vielä onnistuneet kehittämään toimivaa seurantamenetelmää. Osaltaan tämä johtuu hyvän maastovalidointiaineiston puutteesta. Metsähallituksen Luontopalveluiden soiden seurannan ennallistamisverkoston kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen tilanteesta kertova kasvillisuusaineisto valmistui vasta hankkeen loppuvaiheessa, joten sitä ei voitu hyödyntää. Kasvillisuusmuutosten seurannassa pitkä seuranta-aika on oleellinen, koska kasvillisuudessa tapahtuvat muutokset ovat hitaampia kuin hydrologiset muutokset.

Kasvillisuusmuutosten seurannassa haasteena on se, että kasvillisuuden osalta ei ole olemassa vedenpinnan tason tai märkyden kaltaisia selkeitä ja kaukokartoitettavia indikaattoreita soiden ennallistamisen seurantaan. Keskeisten indikaattoreiden kehittäminen olisikin selkeä jatkokkehitystarve. Indikaattoreiden tulisi olla yhtäältä ekologisesti relevantteja eli niiden tulisi kuvastaa muutosta suon ekologisessa tilassa ja toisaalta kaukokartoitettavia eli indikaattorissa tapahtuvan muutoksen tulisi olla havaittavissa kaukokartoitusaineistoilla.

Kaukokartoitusaineistoilla havaittavien muutosten tulee olla kohtalaisen selkeitä joko spatiaalisesti, jolloin muutos tapahtuu isolla alueella, tai voimakkuudeltaan, jolloin yhdellä alueella tapahtuva muutos on iso. Tällaisia selkeitä isoja muutoksia ovat esimerkiksi alueen puustoisuudessa tai maanpeite- tai suotyypissä, kuten saravaltaisen suon muuttuminen rahkasammalvaltaiseksi suoksi, tapahtuvat muutokset. Sen sijaan vähemmän selkeitä muutoksia, kuten yksittäisten lajien runsaussuhteiden muutoksia, kaukokartoitusaineistoilla ei välttämättä havaita. Koska kaukokartoitusaineistot kuvataan ylhäältä alaspäin, puustoisilla alueilla niiden haasteena on, että niillä havaitaan lähinnä puustossa tapahtuvat muutokset ja aluskasvillisuudessa tai maanpinnassa havaittavien muutosten tulkinta on hankalampaa.

Kasvillisuuden seurannassa haasteena on lisäksi soiden väliset erot. Havaitimme jo märkyden seurannassa, että soiden välillä on hyvin paljon eroja, miten hyvin suon märkyttä voidaan ennustaa ja mitkä kaukokartoitusindikaattorit toimivat parhaiten. Tämä haaste korostuu kasvillisuuden seurannassa, sillä erityyppiset kasviyhteisöt ovat kaukokartoitettavilta ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia. Vastaavasti tietyn indikaattorin tietty arvo voi tarkoittaa eri asiaa esimerkiksi rimpinevalla kuin mäntyrämeellä. Tällöin on vaikea, ellei jopa mahdoton tehtävä löytää yleispäteviä kaukokartoitusindikaattoreita ennallistamisen jälkeisille kasvillisuusmuutoksille. Sen sijaan indikaattoreiden ja lähestymistapojen pitäisi olla suotyypikohtaisia tai joissain tapauksissa jopa suokohdekohtaisia.

Kaiken kaikkiaan kaukokartoitusaineistojen keskeinen haaste on, että vaikka aineistoilla voidaan havaita muutoksia, muutoksia tulee osata tulkita. Tämä haaste korostuu etenkin kasvillisuusmuutosten analysoinnissa: kaukokartoitusaineistoilla mahdollisesti havaittu muutos pitää pystyä yhdistämään tiettyyn kasvillisuudesta kertovaan indikaattoriin. Yleisesti ottaen kaukokartoitusindeksit kertovat esimerkiksi seurattavan kohteen heijastuksessa tai takaisinsironnan voimakkuudessa tapahtuvista muutoksista eivätkä suoraan suon ekosysteemin muutoksesta. Joidenkin kaukokartoitusindeksien on havaittu toimivan tiettyjen ominaisuuksien, kuten vehreyden tai märkyden, seurannassa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kaukokartoitus mitaa näitä muutoksia. Sen sijaan kaukokartoitusaineistoja voidaan käyttää muutosta epäsuorasti ilmaisevina proksiaineistoina.

Seurantaverkoston kasvillisuusseurantojen toimivuutta tarkastelimme lisäksi erikseen asiantuntijoiden kanssa keskustelemalla. Syyskuussa 2022 järjestetyn seurantatyöpajan yhteydessä pohdittiin tulosten käytettävyyden lisäksi perinteisen ennallistamisen vaikuttavuusseurannan eli niin sanotun soiden ennallistamisen seurantaverkoston kattavuutta. Vaikka laadullinen ja toisaalta maantieteellinen kattavuus onkin hyvällä tasolla, suotyypien ja seurattujen kohteiden lähtötilanteissa on puutteita.

Seuranta ei sisällä määrimpiä rimpisiä nevoja. Nämä suotyypit on alun perin tietoisesti jätetty seurantaverkoston ulkopuolelle, koska niiden saavutettavuuteen maastoseurannoissa liittyy haasteita, rimpinevojen ollessa kasvukaudella usein hyvin märkiä ja vaikeakulkuisia.

Seurantaverkoston ennallistamisseurantakohteiden otantaa ei ole satunnaistettu vaan seurantaan on valittu aikanaan kohteita, jotka ovat olleet potentiaalisia ennallistamisen onnistumisen kannalta. Niistä saatava tieto ennallistamisen vaikutuksista ei suoraan päde kohteille, jotka ovat ojituksen aikana pidemmälle muuttuneita. Tämä on aikanaan ollut myös ainakin osittain tietoinen päätös, ennallistamisen kohdistuessa tuolloin lähinnä suojelualueille ja kohteille, joilla ennallistumispotentiaalin on katsottu olevan hyvä.

Tulevaisuudessa, esimerkiksi EU:n ennallistamisasetuksen tavoitteiden kautta, ennallistamista tullaan tekemään todennäköisesti huomattavan paljon nykyistä enemmän myös suojelualueiden ulkopuolella ja myös pidemmälle muuttuneilla kohteilla. Seurantaverkoston tuloksia tulisi täydentää määrimpiä rimpinevoja, lettoja ja lähtötilanteeltaan pidemmälle muuttuneita soita sisältävillä aineistoilla tai tällaisia kohteita tarkastelevilla suppeampialaisilla lisätutkimuksilla. Lisäksi työpajassa todettiin, että lähtötilanteen vaikutukseen kiinnitetään erityistä huomiota kymmenen vuotta ennallistamisesta -kasvillisuusaineistojen analysoinnissa, joka on parhaillaan käynnissä.

3.3.1. Ydinkohdat

- Kokeilimme erityyppisiä lähestymistapoja kasvillisuusmuutosten kaukokartoitukseen mutta emme vielä löytäneet sopivaa menetelmää.
- Suotyypit ja suot ovat keskenään hyvin erilaisia, minkä takia yleispätevien seurantamenetelmien kehittäminen on haastavaa.
- Jatkamme menetelmien kehitystyötä uusissa hankkeissa.
- Kaukokartoitusseurantaa varten tulee kehittää kasvillisuusmuutosindikaattoreita, jotka kuvastavat muutosta suon ekologisessa tilassa ja joissa tapahtuva muutos voidaan havaita kaukokartoitusaineistoilla.
- Jatkossa kasvillisuusseurantaa tulee tehdä ennallistamisen seurantaverkoston lisäksi rimpinevoilla, letoilla ja pidemmälle muuttuneilla kohteilla.

3.4. Tuloksia muilta alueilta ja muista hankkeista

Kaukokartoituksen käyttö soiden ennallistamisen seurannassa yleistyy kovalla vauhdilla ja tällä hetkellä myös muissa maissa on käynnissä useita teemaan liittyviä hankkeita. Joitain mielenkiintoisia tuloksia on jo julkaistu. Osana tutkimushanketta olimmekin mukana kirjoittamassa katsausartikkeliä tähän mennessä tehdystä soiden ennallistamisen seurannan kaukokartoitustutkimuksesta (Ikkala ym. 2023). Katsausta varten kävimme läpi kaikki tutkimukset, joissa on tehty soiden ennallistamisen seurantaa kaukokartoitusmenetelmin. Koska näitä

artikkeleita ei ole julkaistu kovin monta, yhteensä alle 20, kävimme artikkelissa lisäksi läpi kaukokartoitusmenetelmiä, joita on käytetty soiden seurannassa muuten ja joita voi potentiaalisesti käyttää ennallistamisen seurannassa. Artikkelissa kävimme läpi menetelmiä, joita on käytetty tai voi käyttää soiden märkyiden, kasvillisuuden, topografian ja turpeen koostumuksen sekä kasvihuonekaasujen seurantaan. Seuraavassa käymme läpi joitain katsauksen löydöksiä ja esittelemme muutaman muualla julkaistun artikkelin tarkemmin.

Märkyiden seurantaan on yleisesti käytetty sekä optisia että tutka-satelliittiaineistoja. Vaikka aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että tutka-aineistot soveltuvat optisia aineistoja paremmin märkyiden seurantaan, viimeaikaiset tutkimukset, mukaan lukien oma tutkimuksemme (ks. osio 3.2.) haastaa tämän tulkinnan. Esimerkiksi Burdun ym. (2023) saivat hyviä tuloksia vähäpuustoisten ja kohtalaisen märkien soiden vedenpinnan tason seurannassa optisesta Sentinel-2-aineistosta lasketun OPTRAM-indeksin avulla. Burdun ym. (2023) käyttivät niin sanottua parhaan pikselin menetelmää, jossa he etsivät suolta sen Sentinel-2-pikselin, joka korreloi parhaiten vedenpinnan tason havaintoaineiston kanssa. Mielestämme parhaan pikselin menetelmä ei kuitenkaan sovellu ennallistettujen kohteiden seurantaan, sillä ennallistamisen vaikutus ei ylety koko suolle vaan vedenpinnan tason ajallinen muutos on erilainen suon eri osissa (Isoaho ym. 2023b). Toisessa tutkimuksessa Jussila ym. (2023) seurasivat onnistuneesti rimpinevojen avovesipinnassa tapahtuvia muutoksia Sentinel-2-aineiston lyhytaaltoisen infrapunaheijastuksen avulla.

Kasvillisuusseurannan osalta selvisi, että tähän mennessä ei ole tehty kaukokartoitustutkimusta kasvivyhteisöjen muutoksesta ennallistamisen jälkeen. Sen sijaan vähäinen tutkimus on keskittynyt selkeämmin havaittavien muutosten seurantaan. Esimerkiksi Ball ym. (2023) tekivät maanpeiteluokittelun Pohjois-Skotlannissa alueelle, jolla on tehty paljon metsäojitettujen soiden ennallistamista. He pystyivät kohtalaisen hyvällä tarkkuudella luokittelemaan eri aikaan ennallistetut suot toisistaan ja havaitsivat, että ennallistetuilta soilta mitatut kaukokartoitusindeksien arvot lähenevät luonnontilaisilta soilta mitattuja indeksiarvoja ajan saatossa. Tutkimuksessa tutkittiin lähinnä siten ennallistettujen kohteiden kaukokartoitettavuutta eikä indekseissä tapahtuvia muutoksia sidottu tiettyyn ekosysteemivasteeseen. Vastaavasti joissain muissa tutkimuksissa on tutkittu kaukokartoituksen avulla soiden pitkäaikaismuutoksia ja muutoksia tyypillisimpien suonpintojen esiintymisessä (esim. Steenvoorden ym. 2022). Lisäksi kaukokartoitusmenetelmiä on käytetty tietyn ajallisen hetken suokasvillisuuden kartoitukseen. Tutkimuksissa on muun muassa kehitetty menetelmiä suokasvivyhteisöjen ja tai kasvien toiminnallisten ryhmien havaitsemiseen (esim. Räsänen ym. 2020).

Kaiken kaikkiaan kasvillisuustutkimuksissa on havaittu, että usean eri aineistolähteen yhdistäminen tuo parempia tuloksia kuin vain yhden aineistolähteen käyttö. Siten kasvillisuuden seurannassa tulisi mahdollisuuksien mukaan yhdistää esimerkiksi optisia kaukokartoitusaineistoja, kasvillisuuden kolmiulotteisesta rakenteesta kertovia aineistoja kuten laserkeilausta, topografiasta kertovia aineistoja ja mahdollisesti myös tutkasatelliittikuvia.

3.4.1. Ydinkohdat

- Kaukokartoituksen käyttö ennallistettujen soiden seurannassa yleistyy vauhdilla.
- Kaukokartoitusta on hyödynnetty etenkin soiden märkyysmuutostutkimuksessa.
- Kaukokartoitusta ei ole käytetty suoraan ennallistamisen jälkeisten kasvillisuusmuutosten analysointiin mutta jonkin verran kasvillisuuden pitkäaikaismuutosten havainnointiin.

4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tieto soiden ennallistamisen vaikuttavuudesta ja erityisesti vaikutusten yleistettävyydestä ja mittakaavasta on vielä monin paikoin puutteellista. Ennallistettujen soiden tilan seurannan kehittäminen -hankkeessa tavoitteenamme oli testata ja kehittää menetelmiä ennallistettujen soiden tilan seurantaan. Keskeinen osa hanketta oli kokeilla kasvillisuus-, hydrologia- ja kaukokartoitusmenetelmiä vesienpalautuskohteiden seurannassa. Lisäksi kokeilimme hankkeessa kaukokartoitusmenetelmiä perinteisen ennallistamisen seurantaan.

4.1. Vesienpalautuskohteiden seuranta

Vesienpalautuskohteiden seurannassa havaitsimme, että avosoiden märkydessä tapahtuvia muutoksia voidaan seurata kohtalaisen luotettavasti optisten satelliittikuva-aineistojen avulla. Lisäksi pienipiirteiset yhden ajankohdan sisäiset alueelliset märkyserot voidaan havaita droneilla kuvatuilla lämpökuva- ja optisilla aineistoilla. Muilla kaukokartoitusmenetelmillä (korkeusmallit, ilmakuvat, laserkeilausaineistot) tehdyissä kokeiluissa emme löytäneet hyvin toimivia lähestymistapoja. Maastohavaintoaineistokokeiluissa saimme viitteitä siitä, että vesienpalautuksen jälkeisen märkyden lisääntymisen voi havaita vedenpinnan tason mittausten avulla. Tätä havaintoa emme kuitenkaan pystyneet varmistamaan, sillä meillä ei ollut luotettavia kontrolliaineistoja eikä seurantakoealoja pystytty sijoittamaan optimaalisesti vesienpalautuksen vaikutusalueen suhteen. Kasvillisuuden seurantamenetelmien kokeilussa emme saaneet yhtä selkeitä tuloksia, mikä johtui osaltaan seurantakoealojen epäonnistuneesta sijoittelusta, liian pienestä aineistosta ja lyhyestä seuranta-ajasta.

Koska seurantamenetelmätestauksen tulokset olivat vaihtelevia, emme tehneet niiden pohjalta valmista ohjeistusta, miten hoito- ja vaikuttavuusseuranta tulee jatkossa tehdä. Sen sijaan ehdotamme mahdollisia tapoja tehdä seuranta ja kirjoitamme eri seurantatapojen hyvistä ja huonoista puolista. Tulostemme pohjalta on selvää, ettei perinteistä hoitoseurannan maastoarviointia ole mahdollista kokonaan korvata kaukokartoitusmenetelmin. Vaikka kaukokartoitusmenetelmät antavatkin yleensä maastossa tehtävää tarkastelua objektiivisemmän ja helpommin määrällistettävän käsityksen kohteen märkyden muutoksista, tarvitaan esimerkiksi lajiston ja ravinnetasojen muutosten tarkasteluun edelleen perinteistä, maastossa tapahtuvaa ja kohdekohtaisesti sovellettua tarkastelua. Ehdotammekin, että hoitoseuranta voi tehdä jatkossa maastokäyntien, satelliittikuvien ja tarvittaessa dronekuvausten avulla, niiden avulla saatavia tietoja yhdistäen.

Erityisesti vesienpalautuksen yleisen ekologisen vaikuttavuuden seurantamenetelmän kehittäminen vaatii vielä jatkotyötä. Oleellista olisi kehittää menetelmä rimpinevoille, joilla myöskään perinteisen ennallistamisen seuranta ei ole vielä tehty. Seurannassa tulisi olla mukana riittävä määrä vesienpalautuskohteita ja kontrollikohteita ja siinä voisi hyödyntää monipuolisesti kasvillisuuden, kaukokartoituksen ja hydrologian seurantamenetelmiä. Tässä hankkeessa havaitsimme, että nykyisellä varsin heterogeenisella ja niukalla toteutettujen kohteiden joukolla ei pystytty luomaan kokonaisuutta, joka kunnolla toimisi pitkäaikaisen seurannan kohdeverkoston. Suunnitelmaa ekologisen vaikuttavuuden seurannaksi voidaan kuitenkin jatkaa muiden hankkeiden yhteydessä.

4.2. Perinteisen ennallistamisen kohteiden seuranta

Perinteisen ennallistamisen kohteilla havaitsimme samansuuntaisesti kuin vesienpalautuskohdeilla, että optisilla satelliittikuva-aineistoilla voidaan havaita suon vedenpinnan tasossa tapahtuvia muutoksia. Lisäksi havaitsimme, että parhaaseen ennustetarkkuuteen päästään, kun optisia aineistoja tarkastellaan yhdessä tutkasatelliittikuva-aineistojen kanssa. Tuloksemme osoittivat myös, että ennustetarkkuudessa ja parhaiten toimivissa kaukokartoitusindikaattoreissa on suuria eroja soiden välillä. Ennustetarkkuus oli hyvä etenkin avoimilla ja vähäpuustoisilla soilla, kun taas runsaspuustoisilla soilla ennustetarkkuus oli huomattavan paljon heikompi.

Perinteisen ennallistamisen hoitoseurantojen osalta olisi vesienpalautusseurannan tavoin hyvä pyrkiä maastotarkasteluja ja kaukokartoitusmenetelmiä yhdistelevään kokonaisuuteen: erityisesti laajempien avosoiden kohdalla kaukokartoitusmenetelmät voivat yksinkin antaa kohtuullisen kuvan toimenpiteiden onnistumisesta, mutta erityisesti puustoisilla kohteilla tarvitaan maastossa tapahtuvaa arviointia. Toisaalta maastokäynnin tarpeellisuutta voidaan tapauskohtaisesti arvioida ennallistamiskohteen mahdollisten erityistä tarkastelua vaativien erityispiirteiden kuten ravinteikkuuden palautumisen tai lajiesiintymien perusteella.

Märkyystarkastelujen lisäksi teimme kokeiluja, miten kasvillisuudessa tapahtuvia muutoksia voidaan seurata. Useista kokeiluista huolimatta emme löytäneet seurantaan soveltuvaa menetelmää. Osin ongelmat johtuivat siitä, että meillä ei ollut käytössä tarpeeksi laadukasta maastohavaintoaineistoa. Kasvillisuuden seurantamenetelmien osalta jatkamme työtä muissa hankkeissa, joissa hyödynnämme vasta tämän hankkeen loppupuolella valmistunutta ennallistamisen seurantaverkoston kymmenvuotisseuranta-aineistoa.

Lisäksi työpajoissa ja asiantuntijakeskusteluissa havaittiin tarve täydentää perinteisen ennallistamisen seurantaverkostoa lisäaineistoilla ja -tutkimuksilla erityisesti koskien märmpien rimpinevojen ennallistamista ja toisaalta huomattavan pitkälle ojituksen muuttamien soiden ennallistamista.

4.3. Kaukokartoitusaineistojen käyttö vesienpalautuksen ja ennallistamisen seurannassa

Kaiken kaikkiaan seurantakokeilujemme perusteella etenkin optiset satelliittikuvat ja osin myös droneaineistot toimivat hyvin ennallistamisen seurannassa avoimilla tai vähäpuustoisilla soilla mutta kaukokartoitushavaintojen tueksi tarvitaan asiantuntevia maastohavaintoja tai hyvälaatuisia maastomittauksia.

Kaukokartoituksen avulla voidaan havaita, millaisia muutoksia soilla on tapahtunut ja miten laajoja muutokset ovat. Siten aineistojen avulla voidaan mallintaa ennallistamisen vaikutusalueen suuruutta. Kehitimme satelliittikuva-analyysia hyödyntävän menetelmän märkyysmuutosten vaikutusalueen suuruuden mallintamiseen mutta emme pystyneet kehittämään vastaavaa luotettavaa menetelmää kasvillisuusmuutoksille.

Koska satelliittikuvia on laajasti saatavilla, niitä voi hyödyntää sekä joka kohteella tehtävässä hoitoseurannassa että valituilla kohdejoukoilla tehtävässä vaikuttavuuden seurannassa. Satelliittikuville voi sekä tehdä visuaalista tulkintaa esimerkiksi ESAn (2023) Sentinel Hubissa että kvantitatiivisia analyyseja esimerkiksi kehittämiemme Google Earth Engine -skriptien avulla.

Lisäksi kehitettyjä menetelmiä voidaan hyödyntää myös luonnontilaisten soiden esimerkiksi ilmaston muutoksesta johtuvien muutosten tarkastelussa. Satelliittikuvaseuranta onkin yksi potentiaalisimmista seurantamenetelmistä soiden seurannassa tulevana vuosina.

Dronekuvien ottaminen ja analysointi vaatii satelliittikuvia enemmän resursseja ja asiantunte-
musta, joten dronekuvat soveltuvat lähinnä vaikuttavuuden seurantaan. Vaikka droneilla on
helppo käydä räpsimässä kuvia, aineistojen analysointi ja olosuhteiden vakiointi aiheuttavat
huomattavia haasteita, jotka vähentävät kuvauksella saatujen aineistojen vertailukelpoisuutta.
Dronekuvien otossa on myös oleellista kohdentaa kuvausala siten, että se kattaa ennallistami-
sen kannalta tärkeimmät kohteet. Lisäksi oleellista on valita sopivimmat sensorit. Meidän ko-
keilujemme perusteella etenkin lämpökamera- ja multispektriaineistot sekä tietyin rajauksin
droneaineistoista muodostettavat korkeusmallit ovat hyödyllisiä vaikuttavuuden seurannassa.
Dronekuvauksia voi hyödyntää etenkin hyvin märillä tai muilla kohteilla, joilla on hankala liik-
kua.

Satelliitti- ja droneaineistojen lisäksi seurannassa voi hyödyntää myös Maanmittauslaitoksen
ilmakuvia ja laserkeilausaineistoja, mutta näiden aineistojen heikkoutena on rajoitettu ajalli-
nen saatavuus.

Koska suot ovat keskenään hyvin erilaisia, yleispätevien kaukokartoitusindikaattorien kehittä-
minen soiden tilan seurantaan on hyvin hankalaa. Tietyille ekosysteemin ominaisuuksille, ku-
ten avosoiden vedenpinnan tasolle tai rimpipinnan laajuudelle voidaan kehittää indikaatto-
reja, jotka toimivat lähes yleispätevästi. Sen sijaan toisille ominaisuuksille, kuten kasviyhtei-
söissä tapahtuville muutoksille, indikaattoreiden kehittäminen on lähestulkoon mahdotonta.
Jatkotyössä onkin tärkeää määritellä erityyppisille soille indikaattoreita, jotka ovat relevantteja
suoekosysteemin kannalta ja lisäksi kaukokartoitettavissa. Siten soiden tilaa ei voi seurata yh-
den indikaattorin avulla, vaan tarvitaan useita toisiaan täydentäviä suotyyppi- ja ominaisuus-
kohtaisia indikaattoreita.

4.4. Hoitoseurantojen kehittäminen vesienpalautus- ja ennallistamiskohteille

Hoitoseurantojen käytännön toteuttamisen ohjeistukseen tulisi kiinnittää huomiota ennallis-
tamisen seurantaoppaan päivitystyössä. Ohjeistusta tulisi tukea koulutusten avulla. Hoitoseu-
ranta tulisi toteuttaa riittävän kunnianhimoisesti, jotta siitä saatavaa tietoa voidaan soveltaa
toimivien käytänteiden ja toisaalta haasteellisten tilanteiden tunnistamiseksi. Ohjeistuksesta
tulee esimerkkien avulla käydä ilmi, miten hoitoseurantatietoa tullaan hyödyntämään. Tällä
hetkellä on epäselvää, kuinka usein hoitoseuranta vaikuttaa ennallistamiskohteen pidemmän
aikavälin suunnitteluun ja jatkotoimenpiteisiin. Tätä seurantojen ja päätösten välistä suhdetta
tulisi selkiyttää. Hoitoseurantojen päivitystyötä varten tulisivatkin ensi tilassa koota yhteen tähän
mennessä kertynyttä hoitoseuranta-aineistoa ja tarkastella mihin alla olevista kohdista voi-
daan jo kertyneen aineiston avulla vastata, mitä tietoa tarvitaan lisää ja miten tiedon keruuta
tulee mahdollisesti muokata.

Yhtenä hoitoseurantojen tavoitteena tulisi olla parhaiten toimivien ennallistamisen ja vesien-
palautuksen käytäntöjen analysointi, raportointi sekä koottu esittely kohdetyypeittäin ja me-
netelmittäin. Lisäksi oleellista on epäonnistuneiden tai huonosti toimivien käytäntöjen analy-
sointi, jotta toimintatapoja voidaan tarvittaessa korjata.

Hoitoseurannan sujuvoittamista varten tulisi kehittää maastossa arvioitavia indikaattoreita, jotka ovat relevantteja ennallistamisen onnistumisen kannalta mutta joissa olevien muutosten havainnointi ei vaadi mahdollittoman pitkäaikaista hoitoseurantakokemusta. Hoitoseurannan ensisijaisena tavoitteena tulisi kuitenkin olla kohdekohtaisten päätösten tukeminen.

Hoitoseuranta tulisi suunnitella siten, että sen avulla voidaan todeta toivottujen vaikutusten toteutuminen tai että tavoitteet eivät toteutuneet. Tavoitteiden toteutumattomuus ei sinänsä tarkoita tarvetta lisätoimenpiteille vaan tämä tarve tulee arvioida tapauskohtaisesti. Jatkotoimenpiteiden tarpeeseen vaikuttavat muun muassa kohteen luontoarvot eli esimerkiksi lajiston ja luontotyypin uhanalaisuus.

Hoitoseurannan tulisi toisin sanoen johtaa seuraavanlaiseen päätöksentekoprosessiin:

1. ennallistamisen suunnitteluvaiheessa määritetään tavoitteet ja niiden mukaisesti seurattavat asiat
2. seurataan tavoitteiden täyttymistä ja todetaan myös toteutumattomat tavoitteet matalalla kynnyksellä
3. jos keskeiset tavoitteet eivät täyty, tehdään päätös jatkotoimenpiteiden tarpeellisuudesta perustuen kohteen luonto- tai muiden arvojen merkittävyyteen
4. raportoidaan hoitoseurannan tulos ja päätöksentekoprosessi valmiiseen pohjaan päivitetyn seurantaoppaan mukaisesti

4.5. Arvioita seurannan kustannuksista perustuen toteutuneisiin kuluihin

Tähän asti perinteisen ennallistamisen seurantaverkoston ja Metsähallituksen Luontopalveluiden hoitoseurantatyötä on tehty ympäristöministeriön myöntämällä budjettirahalla eli erillistä rahoitusta seurantoihin ei ole ollut. Tämä on luonteva tapa hoitoseurantojen rahoitukseen, koska seurannan voi nähdä suunnittelun ja toteutuksen lisäksi luontevana osana ennallistamiskokonaisuutta. Vaikuttavuusseurannan ja seurantaverkoston osalta olisi kuitenkin luontevampaa, että se olisi erillisesti rahoitettu kokonaisuus, jolloin sen toteutus ei kilpailisi muun toiminnan kanssa. Soiden ennallistamisen seurantaverkostoa on budjettirahan lisäksi rahoitettu myös erillishankkeiden, lähinnä Suoverkosto-LIFEn ja sitä seuranneen Hydrologia-LIFEn kautta. Lisäksi varsinkin aineistojen analysointia ja siihen liittyviä kuluja on liitetty osaksi 2024 käynnistyvää Priodiversity LIFE -hanketta.

Hoitoseurannan kustannuksia ei erikseen seurata. Siksi niitä ei pystytty tätä työtä varten arvioimaan kokonaisuutena. Kuitenkin esimerkiksi yksittäisen maastokäynnin kustannusten voidaan arvioida olevan alle 500 € sisältäen palkka- ja matkakulut.

Seurantaverkoston vuosittaiset kustannukset vaihtelevat jonkin verran vuosien välillä riippuen kullekin vuodelle osuvasta kohdemäärästä. Kasvillisuusseurannat (suunnittelu, maastotyöt, mikroskopoinnit ja lajimääritykset) ovat vuositasolla maksaneet ostopalveluna 2021–2023 välillä noin 50 000 € vuodessa (sis. ALV 24 %) kohteita ollessa vuosittain noin 28. Tällöin kasvillisuusseurannan teettäminen ostopalveluna maksaisi pyöristettynä noin 2 000 €/kohde/seurantakerta. Tämän päälle on tullut pienissä määrin Luontopalveluiden omaa työtä maastoseurantojen auttamisessa. 2 000 € kohdekohtaisella kustannuksella laskien noin 20 kohteen vesienpalautusseurannan (10 vesienpalautuskohdetta ja 10 kontrollikohdetta) maastotyön kustannukset olisivat noin 40 000 € per seurantakerta. Kohteita perustettaessa aikaa ja työvoimaa

tarvittaneen enemmän, jolloin seurannan perustamisen maastotöiden kustannusten voisi karkeasti arvioida olevan noin 60 000 € luokkaa.

Vesinäytteiden keruu on tehty Luontopalveluiden omana työnä ja sen kokonaiskustannukset ovat noin 5 000–20 000 € vuodessa noin 5–20 seurantakohteelle ja 4–7 näytteenhakukerralle vuodessa sisältäen laboratorioanalyysit kilpailutettuna ostopalveluna ja näytteiden haun Luontopalveluiden omana työnä. Järkevinä logistisina kokonaisuuksina toteutettuna hydrologinen seuranta kustantaisi siis noin 1 000 €/kohde/vuosi.

Tässä hankkeessa hankimme dronekuvauspalvelun Itä-Suomen yliopistolta. Ensimmäisenä vuonna 12 kohteen kuvaaminen maksoi noin 19 000 € (sis. ALV 24 %) ja toisena vuonna kuuden kohteen kuvaaminen noin 12 000 € (sis. ALV 24 %). Kaikki kohteet kuvattiin molempina vuosina kahteen kertaan. Kuvaamisen voi siis kohteiden määrästä ja lähekkäisyydestä riippuen arvioida maksavan noin 1 500–2 000 €/kohde kuvattaessa kaksi kertaa vuodessa. Tämä on suhteellisen iso kustannus verrattuna maastossa Luontopalveluiden omana työnä tekemään hoitoseurantaan, jota on myös mahdollista osittain yhdistää muihin maastotöihin. Kaupalliselta toimijalta hankittuna dronekuvauspalvelu on todennäköisesti vielä kalliimpaa. Toisaalta kilpailutuksen kautta isompia määriä hankkien yksikkökustannus on todennäköisesti alempi kuin pienille määrille tai yksittäiskuvauksille. Hankkeessamme suunniteltiin myös dronen ja kuvauskaluston hankkimista mutta tästä luovuttiin, koska laitteiston ja osaavan henkilökunnan riittävyys ja esimerkiksi kaluston huolto ja siihen liittyvät kustannukset nähtiin ostopalvelua hankalamminkin hallittavana kokonaisuutena ja lopulta potentiaalisesti ostopalvelua kalliimpaa ratkaisuna. Lisäksi tulee huomioida kuvamateriaalin käsittelyyn ja analysointiin tarvittava työmäärä. Tätä tarvetta ja parhaita menetelmiä on arvioitu tarkemmin Hydrologia-LIFEn raportissa (Ikkala & Similä 2023).

4.6. Parhaat käytännöt vesienpalautus- ja ennallistamiskohteiden tilan seurantaan

Ehdotamme seuraavia menetelmiä ennallistettujen soiden tilan seurantaan. Osa näistä menetelmistä havaittiin toimiviksi hankkeemme aikana, osa menetelmistä on havaittu toimiviksi jo aiemmin, kun taas osa menetelmistä vaatii jatkotarkasteluja.

Toimiviksi varmennettuja menetelmiä ovat:

- Optiset satelliittikuvat, etenkin Sentinel-2-kuvat, ovat erittäin hyvin toimiva aineistolähde avointen tai vähäpuustoisten soiden vedenpinnan tason ajallisten ja alueellisten muutosten seurantaan. Käyttämämme koneoppimismenetelmät pystyvät arvioimaan kohtalaisen luotettavasti, miten vedenpinnan taso muuttuu soilla ennallistamistoimien jälkeen. Menetelmä vaatii tuekseen maastohavaintoja joko seurattavalta suolta tai samantyyppisiltä, mielellään lähellä sijaitsevilta soilta. Jo nyt keräämiemme maastoaineistojen avulla voimme ennustaa vedenpinnan tason vaihtelua myös muille kuin tutkimussoillemme.
- Dronekuvausta voidaan käyttää märkyiden tai vedenpinnan tason tarkan mittakaavan tarkasteluissa avoimilla tai vähäpuustoisilla soilla. Havaitsimme, että etenkin lämpökamera- ja multispektriaineiston yhdistäminen toimii tässä tarkoituksessa hyvin. Oleellista dronekuvauksessa tehtävissä tarkasteluissa on kuvauksen ajankohdan ja kuvattavan alueen valinta. Menetelmä vaatii tuekseen maastohavaintoaineistoja.

- Suon pintatyyppien laajuudessa tapahtuvia muutoksia voidaan seurata droneaineistoja ja osin myös karkeampierottelukykyisiä satelliittikuvia sekä koneoppimismenetelmiä hyödyntävien luokitteluiden avulla. Systemaattisesti kerätyillä ja kalibroiduilla droneaineistoilla päästään kiinni hyvinkin pienipiirteisiin muutoksiin pintatyyppien esiintymisessä. Menetelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi rimpinevoilla ruoppapinnan laajuusmuutoksia tutkittaessa. Menetelmä tarvitsee tuekseen maastohavaintoja tai dronekuvien visuaalista tulkintaa.
- Satelliitti- ja ilmakuvien visuaalinen tulkinta auttaa havaitsemaan etenkin avoimilla tai vähäpuustoisilla soilla tapahtuvia muutoksia. Etenkin kevättulvan ja keskikesän aikaan otettujen väärärisatelliittikuvien visuaalista tulkintaa kannattaa hyödyntää, sillä satelliittikuva-aineistoja on saatavilla ajallisesti kattavasti. Kuvista voidaan havaita muun muassa vesienpalautuksen jälkeinen muutos soiden märkytydessä. Visuaalisen tulkinnan avulla tehtävät havainnot on hyvä varmentaa maastokäynnillä.
- Perinteiset asiantuntijan maastossa tehdyt seurantakäynnit ovat oleellisia ennallistamistoimenpiteiden toimivuuden varmentamisessa. Kaukokartoitusmenetelmät eivät voi korvata seurantakäyntejä kokonaan. Menetelmän heikkoutena on asiantuntijavetoisuus: tarvitaan vankkaa osaamista, jotta maastossa osataan kiinnittää huomio oikeisiin asioihin.
- Vedenpinnan tason loggeriseuranta on havaittu toimivaksi menetelmäksi perinteisen ennallistamisen kohteiden märkyysvaihteluiden seurannassa. Suosittelemme loggeriseurantaa myös vesienpalautuskohteille, vaikka omassa vesienpalautusseurannassamme emme saaneet loggeriseurantaa toimimaan laiteongelmien takia.

Seuraavat menetelmät ovat lupaavia mutta niiden toimivuuden varmentaminen vaatii vielä jatkotutkimustyötä:

- Sijaintitarkoista RTK-droneaineistoista muodostettuja maastomalleja voidaan käyttää suon mikrotopografiassa tapahtuvien muutosten ja vesienpalautuksen jälkeisen suonpinnan kohoamisen havaitsemiseen. Dronekuvien tueksi tarvittaneen maastossa tehtyjä senttimetritarkkoja RTK-mittauksia suonpinnan korkeudesta.
- Dronelämpökamerakuvia voidaan hyödyntää veden virtausreittien havaitsemiseen ja mallintamiseen. Virtausreittien mallintaminen on keskeistä ennallistamisen alueellista kohdentumista ja ennallistamisen vaikutusaluetta mallinnettaessa. Tarpeellista jatkotutkimusta on ajallisten muutosten tarkastelu sekä ennen- ja jälkeen-tilanteiden mallintaminen. Menetelmää voi kokeilla etenkin pohjavesivaikutteisilla soilla.
- Kasvillisuusmuutosten havainnoinnissa kasvuruudut, kasvillisuuslinjat ja muut systemaattiset otantamenetelmät ovat tärkeitä, jotta saadaan kvantitatiivista tietoa kasvillisuuden muutoksista. Otannan sijoittaminen ja oikean menetelmän valitseminen vaatii vielä jatkoselvitystä sekä vesienpalautuskohteilla että muilla kohteilla, kuten letoilla.
- Tarkan alueellisen erottelukyvyn satelliittikuvia ja droneaineistoja voidaan käyttää ennallistamisen vaikutusalueen automaattisessa rajauksessa.

4.7. Toimenpidesuosituksset

Keräämiemme oppien ja tulosten perusteella esitämme toimenpidesuosituksia sekä hoito- että vaikuttavuusseurantaan. Toimenpiteet soveltuvat sekä suojelualueilla että niiden ulkopuolella oleville kohteille. Emme ehdota suoraan, mitkä toimet tulisi sisällyttää seurantaan, sillä saamiemme tuloksia ei ole pilotoitu käytännön seurantatyössä. Siten perinteisen ennallistamisen ja vesienpalautuksen hoitoseurantasuosituksset liittyvät hyväksi havaittujen menetelmien jalkauttamiseen ja jatkopilotointiin yhdessä suunnittelijoiden kanssa. Vaikuttavuusseurantasuosituksset taas liittyvät vesienpalautuksen vaikuttavuusseurantaverkoston ja uusien menetelmien tai lähestymistapojen kehittämiseen.

4.7.1. Hoitoseurannat

Suositus 1: Satelliittikuvien visuaalisen tulkinnan kokeilu suunnittelijoiden toimesta hoitoseurannassa. Ohjeistuksen kehittäminen ja pilotointi vie noin kaksi henkilötyökuukautta.

Suositus 2: Automattisen ja avoimesti saatavilla olevan Google Earth Engine -skriptin kirjoittaminen hoitoseurannan satelliittikuva-analyyysiin. Skriptin ja ohjeistuksen kirjoittaminen vie noin kolme henkilötyökuukautta.

Suositus 3: Maastokäyntejä, satelliittikuvaseurantaa sekä tarvittaessa ilmakuvia ja droneseurantaa hyödyntävän vesienpalautuksen ja perinteisen ennallistamisen hoitoseurantatoimintatavan ja päätöksentekoprosessin jatkojalostus yhdessä ennallistamissuunnittelijoiden kanssa. Osana työtä tulee analysoida jo kerätty hoitoseuranta-aineisto. Arvioitu vaadittava työmäärä on noin neljä henkilötyökuukautta.

4.7.2. Vaikuttavuusseurannat

Suositus 1: Vaikuttavuusseurantaverkoston perustaminen rimpinevoille. Tarvitaan vähintään kymmenen vesienpalautuskohdetta sekä viisi luonnontilaista ja viisi kuivahtanutta kontrollikohdetta. Seurantaa tehdään ekologisin, hydrologisin ja kaukokartoitusmenetelmin. Arvioitu vaadittava työmäärä seurantaverkoston suunnitteluun, kohteiden perustamiseen ja ensimmäisiin analyyseihin on noin 30 henkilötyökuukautta. Lisäksi muihin kuluihin (maastotyöt ja materiaalihankinnat) tarvitaan noin 60 000 €.

Suositus 2: Vaikuttavuusseurantamenetelmien jatkokehittäminen kaukokartoitus- ja kasvillisuusseurantamenetelmien osalta. Tämä sisältää erityyppisten kasvillisuusseurantamenetelmien kokeilun ja lupaavaksi todettujen kaukokartoitusmenetelmien, kuten dronelämpökamerakuvausten ja vaikutusalueen mallinnusten, lisäpilotoinnin valituilla kohteilla. Arvioitu vaadittava työmäärä on noin 24 henkilötyökuukautta. Lisäksi muihin kuluihin tarvitaan noin 10 000 €.

Suositus 3: Keskeisten soiden tilaa kuvaavien ekologisten ja hydrologisten indikaattorien kehittäminen vesienpalautus- ja ennallistamiskohteille. Indikaattoreiden tulee olla relevantteja suoekosysteemin kannalta ja lisäksi niissä tapahtuvien muutosten tulee olla havaittavissa kaukokartoituksen avulla. Työ voidaan tehdä pääosin asiantuntijatyönä, mutta indikaattorit on hyvä myös validoida empiiristen aineistojen avulla. Arvioitu vaadittava työmäärä on noin 12 henkilötyökuukautta.

Kiitokset

Kiitämme ympäristöministeriötä hankkeen rahoituksesta sekä lukuisia suunnittelutyöhön osallistuneita asiantuntijoita muun muassa Metsähallituksesta, Luonnonvarakeskuksesta, Suomen ympäristökeskuksesta, Suomen metsäkeskuksesta, Tapio Oy:stä, Etelä-Pohjanmaan ELY-keskuksesta ja Helsingin yliopistosta.

Viitteet

- Ahonen, S. 2021. Pintaveden liikkeiden ja veden kertymisen tarkastelu dronemaastomallin avulla: Soiden ennallistamisen seuranta vesienpalautuskohteella. Opinnäytetyö, metsätalousinsinööri (AMK). Metsätalous, Rovaniemen ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021120924641>. Viitattu 13.11.2023. 49 s. + liitteet.
- Andersen, R., Farrell, C., Graf, M., Muller, F., Calvar, E., Frankard, P., Caporn, S. & Anderson, P. 2017. An overview of the progress and challenges of peatland restoration in Western Europe: Peatland restoration in Western Europe. *Restoration Ecology* 25(2): 271–282. DOI: 10.1111/rec.12415
- Autio, O., Jämsen, J., Rinkineva-Kantola, L. & Joensuu, S. 2018. Veden palauttaminen kuivuneille suojelusoille kunnostusajituksen yhteydessä. Raportteja 10 | 2018. Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-314-668-6>. Viitattu 13.11.2023. 47 s.
- Ball, J., Gimona, A., Cowie, N., Hancock, M., Klein, D., Donaldson-Selby, G. & Artz, R.R. 2023. Assessing the Potential of using Sentinel-1 and 2 or high-resolution aerial imagery data with Machine Learning and Data Science Techniques to Model Peatland Restoration Progress—a Northern Scotland case study. *International Journal of Remote Sensing* 44(9): 2885–2911. DOI: 10.1080/01431161.2023.2209916
- Blaschke, T., Hay, G.J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., Feitosa, R.Q., van der Meer, F., van der Werff, H., van Coillie, F. & Tiede, D. 2014. Geographic object-based image analysis—towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87: 180–191. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45: 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324
- Burdun, I., Bechtold, M., Aurela, M., De Lannoy, G., Desai, A.R., Humphreys, E., Kareksela, S., Komisarenko, V., Liimatainen, M., Marttila, H., Minkkinen, K., Nilsson, M. B., Ojanen, P., Salko, S.-S., Tuittila, E.-S., Uuemaa, E. & Rautiainen, M. 2023. Hidden becomes clear: Optical remote sensing of vegetation reveals water table dynamics in northern peatlands. *Remote Sensing of Environment* 296: 113736. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113736
- ESA 2023. Sentinel Hub EO Browser. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Euroopan Avaruusjärjestö ESA. Viitattu 13.11.2023.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
- Hyvärinen, E. & Aapala, K. (toim.) 2009. Metsien ja soiden ennallistamisen sekä harjumetsien paahdeympäristöjen hoidon seurantaohje. Metsähallituksen luonnonuojelujulkaisuja. Sarja B 118. ISBN: 978-952-446-728-5 (pdf). 114 s.
- Hyvärinen, E., Juslén, A., Kempainen, E., Uddström, A. & Liukko, U.M. (toim.) 2019. Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus. Helsinki. <http://hdl.handle.net/10138/299501>. Viitattu 13.11.2023. 704 s.

- Ikkala, L. 2023. Airborne remote sensing as a tool for monitoring topographical and hydrological changes on northern degraded and restored peatlands. Doctoral dissertation. Acta Universitatis Ouluensis. C 869. <http://urn.fi/urn:isbn:9789526235844>. Viitattu 13.11.2023. 112 s.
- Ikkala, L., & Similä, M. (toim.) 2023. Ennallistettujen soiden seurannan kehittämisehdotukset – Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia hoitoseurannan ja hydrologisen seurannan parantamiseksi ja kaukokartoitusseurannan perustamiseksi. [Julkaisematon käsikirjoitus].
- Ikkala, L., Ronkanen, A.-K., Ilmonen, J., Similä, M., Rehell, S., Kumpula, T., Päckilä, L., Klöve, B. & Marttila, H. 2022. Unmanned aircraft system (UAS) structure-from motion (SfM) for monitoring the changed flow paths and wetness in minerotrophic peatland restoration. *Remote Sensing* 14(13): 3169. DOI: 10.3390/rs14133169
- Ikkala, L., Ismail, Wolff, F., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Alekseychik, P., Rana, P., Tolvanen, A., Haghighi, A.T., Kohv, M., Osborne, C. & Räsänen, A. 2023. Remote sensing methods for northern peatland restoration monitoring — A literature review. Lähetetty arvioitavaksi.
- Isoaho, A. 2022. Dronekartoituksen hyödyntäminen ennallistettujen soiden hydrologian seurannassa. Pro gradu -tutkielma. Maantieteen tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202212203836>. Viitattu 13.11.2023. 113 s.
- Isoaho, A., Ikkala, L., Marttila, H., Hjort, J., Kumpula, T., Korpelainen, P. & Räsänen, A. 2023a. Spatial water table level modelling with multi-sensor unmanned aerial vehicle data in boreal aapa mires. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 32: 101059. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101059
- Isoaho, A., Ikkala, L., Päckilä, L., Marttila, H., Kareksela, S. & Räsänen, A. 2023b. Optical satellite imagery reveals spatiotemporal changes in peatland water table after restoration. Käsikirjoitus lähetetty arvioitavaksi.
- Jussila, T., Heikkinen, R. K., Anttila, S., Aapala, K., Kervinen, M., Aalto, J. & Vihervaara, P. 2023. Quantifying wetness variability in aapa mires with Sentinel-2: towards improved monitoring of an EU priority habitat. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. DOI: 10.1002/rse2.363
- Haapalehto, T., Juutinen, R., Kareksela, S., Kuitunen, M., Tahvanainen, T., Vuori, H. & Kotiaho, J.S. 2017. Recovery of plant communities after ecological restoration of forestry-drained peatlands. *Ecology and Evolution* 7(19): 7848–7858. DOI: 10.1002/ece3.3243
- Hautala, R. 2022. Vesien palauttaminen aapasoille: kuinka kasvillisuusanalyysi tukee ennallistamistoimien ekologisen vaikuttavuuden arviointia. Pro gradu -tutkielma. Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma, Helsingin yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-202211153798>. Viitattu 13.11.2023. 88 s.
- Kaakinen, E., Kokko, A., Aapala, K., Autio, O., Eurola, S., Hotanen, J.-P., Kondelin, H., Lindholm, T., Nousiainen, H., Rehell, S., Ruuhijärvi, R., Sallantausta, T., Salminen, P., Tahvanainen, T., Tuominen, S., Turunen, S., Vasander, H. & Virtanen, K. 2018. Suot. Teoksessa: Kontula, T. & Raunio, A. (toim.). Suomen luontotyyppien uhanalaisuus. Luontotyyppien punainen kirja: Osa I – tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristö 5 | 2018. Suomen ympäristökeskus ja ympäristöministeriö, Helsinki. s. 117–170.

- Maanmittauslaitos 2023. Maanmittauslaitoksen ilmakekuva. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/ilmakuva>. Maanmittauslaitos 11.7.2023. Viitattu 13.11.2023.
- Metsäkeskus 2023a. Valuma-alueen rajaustyökalu. <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/aineistot-paikkatieto-ohjelmille/tyokalut>. Suomen metsäkeskus. Viitattu 13.11.2023.
- Metsäkeskus 2023b. Suometsänhoidon paikkatietoaineistot. <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/luontotietoaineistot/vesiensuojelu>. Suomen metsäkeskus. Viitattu 13.11.2023.
- Planet Team 2023. Planet Application Program Interface: In Space for Life on Earth. San Francisco, CA. <https://api.planet.com>. Planet Inc. Viitattu 13.11.2023.
- Rinne, J., Tuovinen, J.-P., Klemmedtsson, L., Aurela, M., Holst, J., Lohila, A., Weslien, P., Vestin, P., Łakomic, P., Peichl, M., Tuittila, E.-S., Heiskanen, L., Laurila, T., Li, X., Alekseychik, P., Mammarella, I., Ström, L., Crill, P. & Nilsson, M.B. 2020. Effect of the 2018 European drought on methane and carbon dioxide exchange of northern mire ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 375: 20190517. DOI: 10.1098/rstb.2019.0517
- Räsänen, A., Aurela, M., Juutinen, S., Kumpula, T., Lohila, A., Penttilä, T. & Virtanen, T. 2020. Detecting northern peatland vegetation patterns at ultra-high spatial resolution. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 6(4): 457–471. DOI: 10.1002/rse2.140
- Räsänen, A., Tolvanen, A. & Kareksela, S. 2022. Monitoring peatland water table depth with optical and radar satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112: 102866. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102866
- Räsänen, A., Kekkonen, H., Lehtonen, H., Miettinen, A., Wejberg, H., Kareksela, S., Tzemi, D., Aro, L., Kuningas, S., Louhi, P. & Ruuhijärvi, J. 2023. Euroopan unionin ennallistamisasetusehdotuksen luontotyyppi- ja turvemaatavoitteiden vaikutukset Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 76 s.
- Sallinen, A., Tuominen, S., Kumpula, T. & Tahvanainen, T. 2019. Undrained peatland areas disturbed by surrounding drainage: a large scale GIS analysis in Finland with a special focus on aapa mires. *Mires and Peat* 24 (38): 1–22. DOI: 10.19189/MaP.2018.AJB.391
- Steenvoorden, J., Limpens, J., Crowley, W. & Schouten, M.G.C. 2022. There and back again: Forty years of change in vegetation patterns in Irish peatlands. *Ecological Indicators* 145: 109731. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109731



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

