

☞ **Satelliittikuvien muutostulkinta aapasoiden ennallistamisen hoitoseurannan priorisoinnissa**

Prioritising restoration monitoring of aapa mires using satellite image change detection

Aleksi Isoaho, Lauri Ikkala & Aleksi Räsänen

Aleksi Isoaho, Biotalous ja ympäristö, Luonnonvarakeskus (Luke), Paavo Havaksen tie 3, 90570 Oulu, alexi.isoaho@luke.fi; Lauri Ikkala, Ympäristöratkaisut -yksikkö, Geologian tutkimuskeskus (GTK), PL 97, 67101 Kokkola; Aleksi Räsänen, Maantieteen tutkimusyksikkö, Luonnontieteellinen tiedekunta, Oulun yliopisto, PL 8000, 90014 Oulun yliopisto

Suoluonnon ennallistaminen tulee lisääntymään merkittävästi tulevina vuosina. Tämä lisää tarvetta myös kustannustehokkaille ennallistamisen vaikutusten seuranta-menelmille. Viime vuosina kaukokartoituksen potentiaalia soiden ennallistamisen seurannassa on tutkittu useassa eri hankkeessa. Tutkimuksissa on havaittu, että etenkin avosoiden pintamärkyuden muutoksia voidaan seurata kohtalaisen tarkasti optisten satelliittikuvien avulla. Tässä artikkelissa esittelemme toimintamallin, jota voidaan hyödyntää ennallistetuilla avosoilla hoitoseurannan priorisoinnissa, etenkin aapasoiden vesienpalautuskohteilla. Ensin satelliittikuvien muutostulkinnalla todetaan vettyneet ja vettymättömät alueet, joista voidaan päätellä epäonnistuneet ennallistamistoimenpiteet ja mahdollisuuksien mukaan myös mahdolliset metsätalouden vettymishaitta-alueet. Tämän jälkeen tehdään priorisoidusti kenttä- tai droonitarkastelu ongelma-alueille ja toteutetaan tarvittaessa korjaavia ennallistamistoimenpiteitä. Tulevaisuuden suurien ennallistusalojen kannalta olisi tärkeää ymmärtää, mitkä tekijät vaikuttavat ennallistamisen onnistumiseen ja miten ennallistamismenetelmiä voidaan kehittää tämän perusteella.

Avainsanat: hydrologia, kasvillisuus, kaukokartoitus, Landsat, optinen, Sentinel-2, turvemaat

1 Johdanto

Euroopan Unionin ennallistamisasetus (Regulation (EU) 2024/1991) hyväksyttiin Euroopan parlamentissa 17.06.2024. Asetuksen myötä ekosysteemien ennallistaminen tulee lisääntymään – Suomessa etenkin soilla. Alustavan karkean arvion mukaan noin 1,0–2,6 miljoonaa hehtaaria suota pitää ennallistaa vuoteen 2050 mennessä (Räsänen ym. 2023), mikä tulee olemaan valtava työ ennallistamisen suunnittelijoille ja toteuttajille. Lisäksi asetuksessa edellytetään ennallistamisen vaikutusten seuraamista, jotta onnistumista voidaan arvioida luotettavasti.

Ennallistamisella pyritään palauttamaan ihmisen toiminnan seurauksena muuttuneen luontotyypin tila luonnontilaisen kaltaiseksi (Gann ym. 2019). Soiden ennallistamista toteutetaan lähtökohtaisesti ojen tukkimisella ja patoamisella sekä jossain tapauksissa puuston raivaamisella (esim. Andersen ym. 2017). Viime aikoina Suomessa on toteutettu soiden ennallistamista myös vesienpalautuksella, jossa vettä johdetaan johdeuomia pitkin ojitetuilta alueilta ojittamattomille avosoille (Granqvist 2024). Vesienpalautuksen ajatellaan olevan kustannustehokas tapa ennallistaa reunaojituksen kuivatusvaikutuksen alla olevia avosuo-kohteita (Kareksela ym. 2021). Ennallistamistoimenpiteillä pyritään palauttamaan kohteiden vesitalous, minkä tarkoitus on käynnistää laajempi ekosysteeminuutos.

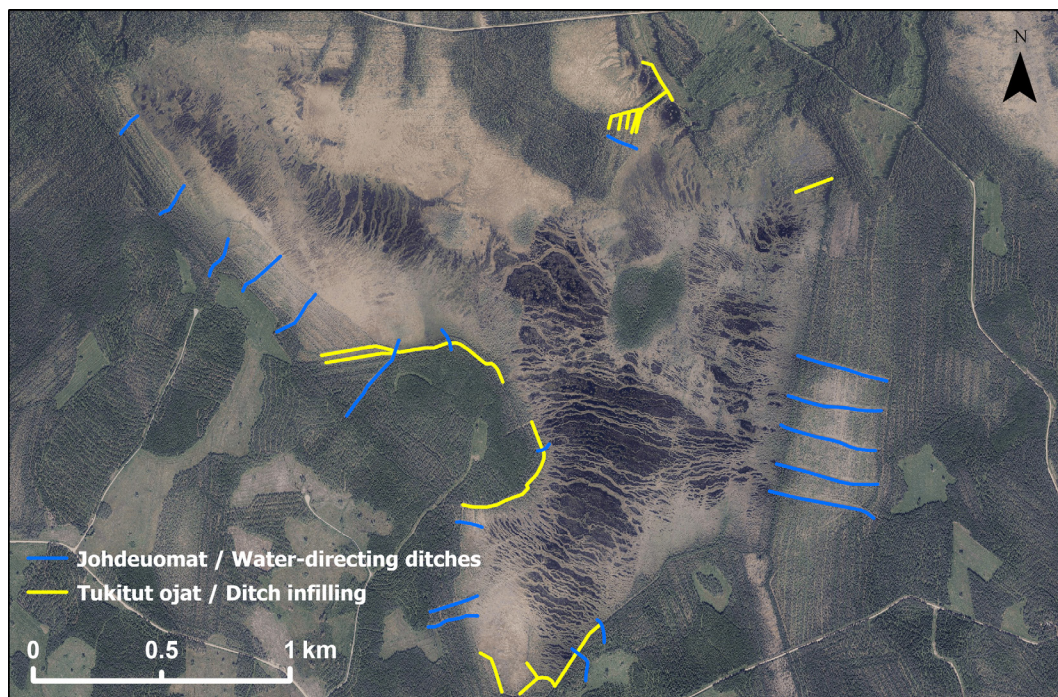
Tähän mennessä valtaosa soiden ennallistamisesta Suomessa on toteutettu valtion suojelualueilla, joilla vaikutusten seuranta koostuu Metsähallituksen Luontopalvelujen jokaisella kohteella toteuttamasta hoitoseurannasta ja erilliseen seurantaverkostoon valikoiduilla kohteilla tehtävästä systemaattisesta vaikuttavuusseurannasta. Hoitoseurannassa tehdään maastossa silmämääräisiä havaintoja ennallistamisen teknisestä onnistumisesta, tarvittavista toimenpiteiden korjaustarpeista sekä märkyyden ja kasvillisuuden muutoksista. Hoitoseuranta toteutetaan yleensä yksi ja kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen, haastavilla kohteilla tiheämmällä aikavälillä. Vaikka hoitoseurannasta varten on tehty systemaattinen seurantaohje, ongelmana on silmämääräisen seurannan subjektiivisuus, koska hoitoseurantaan

ei kuulu mittauksia. Lisäksi maastokäyntien avulla ei voida todentaa suon olosuhteiden muuttumista isoilla alueilla, sillä etenkin aapasuot voivat olla satojen hehtaarien kokoisia ja myös ennallistamistoimia voidaan kohdentaa hyvinkin laajoille alueille (Kuva 1), joiden kattava tarkastelu jalan on mahdotonta.

Lisääntyvä tarve ennallistamisen seurannalle tarkoittaa, että tulevaisuudessa maastossa tapahtuvaa hoitoseurannaa ei välttämättä voida tehdä jokaisella kohteella. Lisäksi se tarvitsee tuekseen kvantitatiivista seurannaa koko vaikutusalueelta. Kaukokartoitus voi tuoda ratkaisuja näihin haasteisiin, sillä sen avulla voidaan kerätä systemaattista ja objektiivista havaintoaineistoa laajoilta alueilta. Kaukokartoituksella voidaan myös pyrkiä skaalaamaan erilaisia kentällä tehtäviä mittauksia alueellisesti, jolloin nähdään ennallistamisen vaikutusten alueellinen vaihtelu.

Suomen ympäristöministeriön rahoittamissa SOSE (2021–2023) ja EkoSuo (2022–2024) -hankkeissa kehitettiin ja tutkittiin kaukokartoituspohjaisia menetelmiä, joilla soiden ennallistamista voidaan seurata. Hankkeissa kokeiltiin monipuolisesti etenkin erilaisia drooni- ja satelliittikuva-aineistoja erityyppisillä ennallistamiskohteilla hyödyntäen kattavia märkyyden- ja kasvillisuusmuutoksista kertovia maastohavaintoaineistoja. Kohteet sisälsivät sekä perinteisen ennallistamisen kohteita, joilla toimenpiteet koostuivat ojen tukkimisesta ja patoamisesta sekä puuston poistosta sekä aapasoiden vesienpalautuskohteita, joissa ennallistetaan ojittamattomia mutta reunaojituksen kuivattamia avosoita johdeuomien avulla (Kuva 1).

Tässä kirjoituksessa teemme lyhyen synteesin kaukokartoituksen käytöstä ennallistamisen seurannassa keskittyen etenkin satelliittikuva-aineistoihin ja ehdotamme, miten satelliittikuvaseurannaa voidaan käyttää hoitoseurannan tukena. Kerromme, (1) mitä drooni-, lentokone- ja satelliittikuvilla voidaan soiden ennallistamisessa seurata, (2) miten satelliittikuvilla voitaisiin avustaa ja priorisoida hoitoseurannaa ja (3) mitkä ovat seurantaan liittyvät rajoitukset ja jatkokehitystarpeet



Kuva 1. Ennallistamistoimet Pyhäjärven Vihtanevalla ($63^{\circ} 52' P$, $26^{\circ} 4' I$). Kohteella toteutettiin vesienpalautusta ympäri aapasuokompleksia johdeuomien avulla sekä ojien tukkimista usealla eri kohdealueella. Toimet toteutettiin talven 2021–2022 aikana. Taustalla Maanmittauslaitoksen ilmakuva vuodelta 2022.

Figure 1. Restoration measures in Vihtaneva, Pyhäjärvi ($63^{\circ} 52' N$, $26^{\circ} 4' E$). The restoration measures have been conducted around the aapa mire complex in several different areas with water-directing ditches and ditch infilling during the winter 2021–2022. The background aerial photo from 2022 is from National Land Survey of Finland.

2 Aineistot

2.1 Aineistolähteet

Kaukokartoitusaineistoja soiden ennallistamisen seurantaan voidaan tuottaa droneilla, lentokoneilla ja muilla miehitetyillä ilma-aluksilla sekä satelliiteilla. Jokaisella näistä aineistoista on omat hyvät ja huonot puolensa.

Tarkinta, jopa senttimetrialuokan resoluutioon yltävää kuvaa suon pinnasta saadaan droneilla, mutta droniaineistoja ei ole valmiiksi saatavilla, vaan niiden tuottamisesta pitää huolehtia itse. Systemaattiseen seurantaan kelpaavien aineistojen kerääminen ja käsittely on verraten työlästä ja vaatii asiantuntemusta. Droneiden yleistymisen tuoreuden takia aineistoja ei ole vielä käytetty pitkäaikaisseurantaan. Tutkimuksissa on kuitenkin

havaittu, että droneiden avulla voidaan mallintaa esimerkiksi vedenpinnan tason (Isoaho ym. 2023) sekä suon pintatyyppejä ja kasvyhteisöjen (Räsänen & Virtanen 2019; Räsänen ym. 2020) alueellista vaihtelua sekä veden virtausreittejä (Ikkala ym. 2022). Laajemmin droniaineistojen hyödynnettävyyttä kokeiltiin Hydrologia LIFE (2017–2023) -hankkeessa (Ikkala & Similä 2024). Keskeisenä tuloksena oli, että yksinkertaisillakin droneilla saadaan helposti kerättyä alueellisesti kattavaa tietoa soista ja kuvien visuaalisilla tulkinnoilla pystytään tekemään huomioita muun muassa vesien kulkureiteistä ja patojen toimivuudesta. Droneiseurannalla on kuitenkin merkittäviä rajoitteita kuten laitteiston herkkyyden teknisille ongelmille ja kuvattavan alueen rajallisuus, jotka käytännössä tekevät useamman neliökilometrin kokoisen alueen (esimerkiksi Vihtaneva,

ks. Kuva 1) kuvaamisesta kokonaisuudessaan epämielekästä. Systemaattisten aineistojen tuottamiseen myös tarvitaan kehittyneempiä laitteita ja osaamista laadunhallinnasta. Lisäksi vesisade ja muuttuvat valaistusolosuhteet aiheuttavat merkittävän lisärajoitteen seurannan toteuttamiseen.

Suomessa Maanmittauslaitos kerää lentokoneiden avulla koko maan kattavia ilmakeu- ja laserkeilausaineistoja kolmen–kuuden vuoden välein. Etenkin ilmakeu-aineistoja on käytetty soiden pitkäaikaismuutosten tulkintaan (esim. Tahvanainen 2011; Talvitie ym. 2023). Lisäksi vanhimpien kuvien avulla voidaan tulkita, miltä suo näytti ennen ojitusta. Ilmakeuvien vahvuksina ovat niiden kohtalaisen tarkka, 50 senttimetrin spatiaalinen erottelukyky ja pitkät aikasarjat. Heikkoutena sekä ilmakeuvissa että laserkeilausaineistossa on harva päivitystahti, eikä kuvaus tapahdu aina samaan aikaan kasvukaudesta. Ennallistamisen jälkeinen ilmakeu saattaa täten olla saatavilla vasta usean vuoden jälkeen ennallistamisesta. Siksi lentokoneilla kerätyt ilmakeuvat soveltuvat parhaiten pitkien aikasarjojen seurantoihin, kun tuloksilla ei ole kiire ja tietyn vuoden kuva ei ole välttämätön.

Kolmas vaihtoehto kaukokartoitus pohjaiselle seurannalle on satelliittikuvien hyödyntäminen. Satelliitit keräävät Suomen alueelta tiheällä toistuvuudella aineistoja, jotka soveltuvat kvantitatiiviseen seurantaan ja jotka eivät vaadi käyttäjältä maastokäyntiä aineiston tuottamiseen. Aineistojen heikkoutena tosin on kohtalaisen karkea spatiaalinen erottelukyky (ilmaisaineistoissa ≥ 10 metriä), joka tosin on tutkimustemme mukaan riittävä laaja-alaisten muutosten havaitsemiseen isoilla, avonaisilla suoalueilla (Isoaho ym. 2024b). Viimeisen 10 vuoden aikana satelliittiaineistojen saatavuus on lisääntynyt merkittävästi ja aineistojen laatu on parantunut ja monipuolistunut. Vuonna 2013 Yhdysvaltain avaruusjärjestö NASA laukaisi Landsat 8 -satelliitin, joka tuottaa 30 metrin resoluutiossa globaalisti kattavaa aineistoa 16 päivän välein (USGS 2024). Vastaavasti Euroopan avaruusjärjestö ESA laukaisi vuonna 2015 Sentinel-2-satelliitin, joka tuottaa vielä korkeamman resoluution (10–30 m) aineistoa globaalisti viiden päivän välein (ESA 2024). Viime vuosien aikana näiden aineistojen ajallinen tiheys on kaksinkertaistunut, sillä ESA

ja NASA ovat molemmat laukaisseet edellä mainituille sisarsatelliitit (ESA 2024; USGS 2024). Lisäksi ajallista kattavuutta Suomessa parantaa pohjoinen sijainti, koska satelliittien kiertoradat lähenevät toisiaan suurilla leveysasteilla, tuottaen osittain päällekkäisiä kuvia jopa peräkkäisinä päivinä. Aikasarjojen kattavuutta voidaan yhä parantaa käyttämällä keskenään vertailukelpoisia Sentinel-2 ja Landsat -aineistoja yhtäaikaaisesti (Zhang ym. 2018). Optisten kuvien lisäksi seurannassa voidaan hyödyntää tutka-aineistoja (synthetic aperture radar, SAR). Koska tutkasignaali läpäisee pilvet, SAR-aineistoja on saatavilla myös pilvisiltä päiviltä toisin kuin optisia satelliittiaineistoja. SAR-aineistojen heikkoutena on kuitenkin niiden tulkinnan monimutkaisuus.

2.2 Satelliittikuvien käyttö ennallistamisen seurantatutkimuksissa

Optisilla satelliittikuvilla voidaan seurata pintamärkyydessä tapahtuvia ajallisia muutoksia erityisesti avosoilla (Räsänen ym. 2022; Burdun ym. 2023; Isoaho ym. 2024b). Aineistojen rajoitteiksi on huomattu, että kohteessa olevan vedenpinnan taso ei saa laskea liian alas, koska tällöin yhteys kaukokartoituksella havainnoitavaan suon pintamärkyyteen katkeaa, ja toisaalta puustoisuuden eli latvuspeittävyuden tulee olla riittävän pieni, jotta suon pinta näkyy kuvissa riittävästi (Burdun ym. 2023). Kun optiset aineistot yhdistetään SAR-aineistoihin, vedenpinnan tasossa tapahtuvia muutoksia voidaan mallintaa hieman tarkemmin, mutta SAR-aineiston lisäarvo vaikuttaisi olevan melko vähäinen (Räsänen ym. 2022; Isoaho ym. 2024b).

Vastaavalla tavalla optisilla satelliittiaineistoilla voidaan mallintaa vedenpinnan tason alueellisia muutoksia ennallistamisen jälkeen (Isoaho ym. 2024b). Menetelmä soveltuu parhaiten kohteille, jotka ovat kohtuullisen märkiä ja vähäpuustoisia, kuten esimerkiksi reunaojitetujen aapasoiden avosualueet. Muutoskartoista voidaan käytännössä määrittää ennallistamisen välittömät vaikutusalueet, ja toisaalta myös ennallistamisen jälkeinen vedenpinnan tason nousu alueellisesti. Mallinnus vaatii kentältä kerättyä aineistoa vedenpinnan korkeuksista. Vaikka märkysmallinnus saattaa olla siirrettävissä kohteelta

toiselle, parhaan lopputuloksen saa, kun aineisto on kerätty mallinnettavalta kohteelta (Isoaho ym. 2024b; Keränen ym. 2024).

Olemme kokeilleet Metsähallituksen ennallistettujen soiden seurantaverkostoaineiston avulla, miten satelliittiaineistolla voidaan selittää kasvillisuudessa tapahtuvaa ajallista vaihtelua (Isoaho ym. 2024a). Havaitimme, että kasvillisuusaineistosta johdettuja märkyyteen ja ravinteisuuteen liittyviä ajallisia gradientteja voitiin avosoilla ja rämeillä mallintaa ja seurata laajan satelliittiaineiston avulla, kun taas korvissa tämä ei onnistunut. Gradienttien tulkinta on kuitenkin haastavaa, ja yksittäisten satelliittimuuttujien suhteet gradientteihin eivät ole kovin suoraviivaisia.

Vastaavasti olemme myös tutkineet kaukokartoitusmuuttujien reagointia ennallistamiseen sekä kaukokartoitusmuuttujien ja kasvilajien tai kasvien toiminnallisten ryhmien esiintymismuutosten välisiä yhteyksiä käyttämällä bayesilaisia lajien yhdistettyjä levinneisyysmalleja (Räsänen ym. 2024). Pääsääntöisesti kaukokartoitusmuuttujien ja kasvilajien tai toiminnallisten ryhmien väliset yhteydet jäivät melko heikoiksi ja vaikeasti tulkittaviksi, mutta toisaalta kaukokartoitusmuuttujat paransivat kasviyhteisömallin ennustetarkkuutta. Kaukokartoitusmuuttujilla oli myös selkeitä vasteita ennallistamiseen, ja kymmenen vuoden aikajaksolla muuttujien arvot siirtyivät kohti luonnontilaisia.

3 Menetelmät ja tulokset

Edellä mainitut tutkimustulokset osoittavat, että suon pinnassa tapahtuvia muutoksia voidaan havaita satelliittikuva-aineistojen avulla. Erityisesti avosoiden pintamärkyyden seuranta on satelliittipohjaisesti mahdollista. Mutta miten satelliittiseurantaa tulisi toteuttaa siten, että se parhaiten tukisi mahdollisesti kevennettävää hoito-seurantaa, jossa tavoitteena on yhtäältä todentaa ennallistamisen alueellinen onnistuminen ja toisaalta vähentää maastohavaintojen määrää?

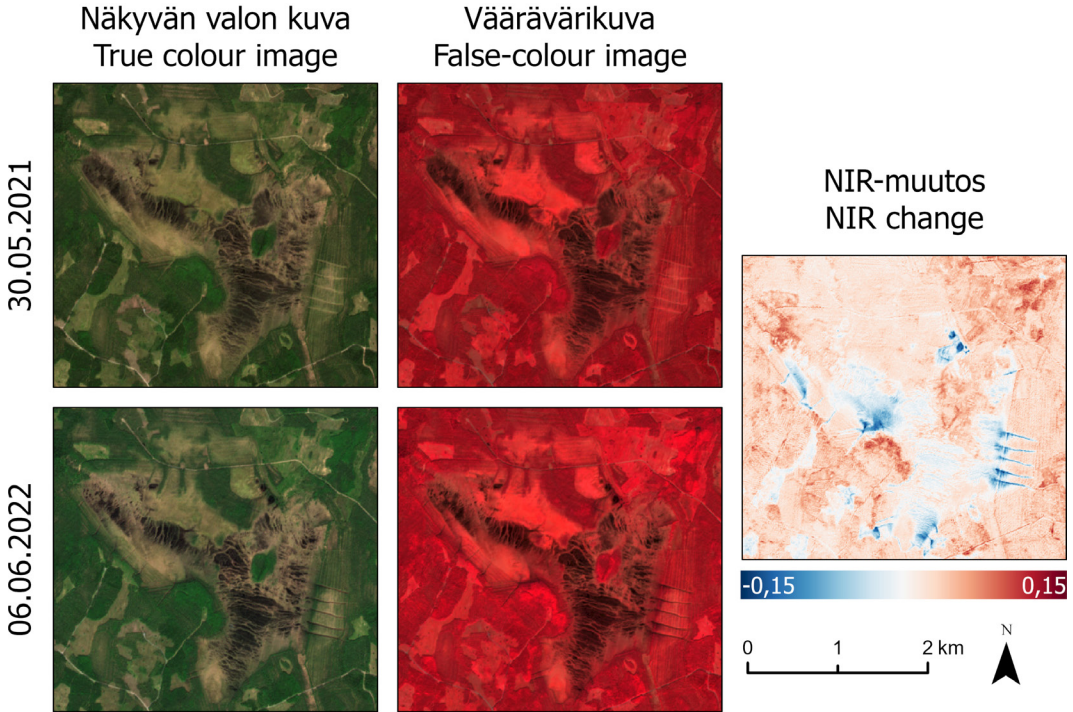
Erityisesti aapasoille toteutettava vesienpalautus on ennallistamistoimenpiteenä sellainen, joka voi vaikuttaa varsinaista toimenpidealuetta laajemmalle siten, että vaikutus on selkeästi satelliittiaineistoilla havaittavissa. Vesienpalautuksessa ohjataan vettä kaivettavia johdeuomia

pitkin ojitetulta alueelta ojitamattomana säilyneelle mutta kuivahtaneelle avosuolle (Granqvist 2024). Usein johdeuomia toteutetaan yksittäisiin, otollisiin kohtiin ympäri suota (ks. Kuva 1). Hoitoseurannan työmäärää vähentäisi, jos satelliittikuvilla voitaisiin selvittää etukäteen ne ennallistamistoimenpiteet, joiden alueilla tavoiteltua vettymistä ei näytä tapahtuvan sen sijaan, että maastokäynti toteutettaisiin kaikilla toimenpidealoilla. Lisäksi satelliittitarkasteluilla voidaan joskus osoittaa mahdollinen vettyminen ojitetun metsätalouden puolella eli alueella, jolla ei haluta tapahtuvan vedenpinnan tason nousua.

Satelliittikuvien muutostulkinnalla tarkoitetaan ennen ja jälkeen ennallistamisen otettujen kuvien vertailua ja siitä tehtäviä johtopäätöksiä. Yleensä tarkasteltavana muuttujana ovat esimerkiksi erilaiset spektri-indeksit, jotka toimivat indikaattoreina jollekin kohteessa tapahtuvalle muutokselle (Asokan & Anitha 2019). Hyvin yksinkertainen muutostulkinta soiden ennallistamisessa toteutetaan siten, että (1) haetaan aineistojen tarjoajalta kuvat ennen ja jälkeen ennallistamisen ja (2) tarkastellaan visuaalisesti kuvien välillä olevaa eroa (Kuva 2). Tulkintaa voidaan helpottaa vaihtamalla tavallisesta valokuvasta infrapunan ja näkyvän valon aallonpituuksia hyödyntävään väärävärikuvaan, jolloin märkyyden muutokset voivat tulla selkeämmin näkyville. Lisäksi ennen–jälkeen-kuvien välille voidaan laskea erotuskuva spektri-indeksin tai yksittäisen kanavan heijastusarvoista, esimerkiksi lähi-infrapunakanavasta (NIR), jolloin muutos on vielä selkeämmin näkyvissä.

Kuvan 2 NIR-muutoksesta voidaan huomata, että alueita muuttuu sinisemmäksi tietyissä kohdissa eli johdeuomien päissä. Lisääntynyt veden määrä alueella pienentää kohteen heijastavuutta, mikä tekee alueesta kuvassa tummemman sinisen. Muutostulkintaa varten tehtävässä kuvien valinnassa on tärkeää, että kuvat ovat mahdollisimman vertailukelpoisia. Jos ennen-kuva on valittu kevättulvien jälkeiseen märkään aikaan ja jälkeen-kuva taas kuivana heinä-elokuun hetkenä, jolloin kasvillisuus on huipussaan, tulos voi näyttää huomattavan erilaiselta (Kuva 3).

Kuvassa 3 osoitettu esimerkki näyttää, että vertailukelpoisten kuvien tulkinta vaatii asian-tuntijaosaamista aineistojen valikoinnin ja käy-

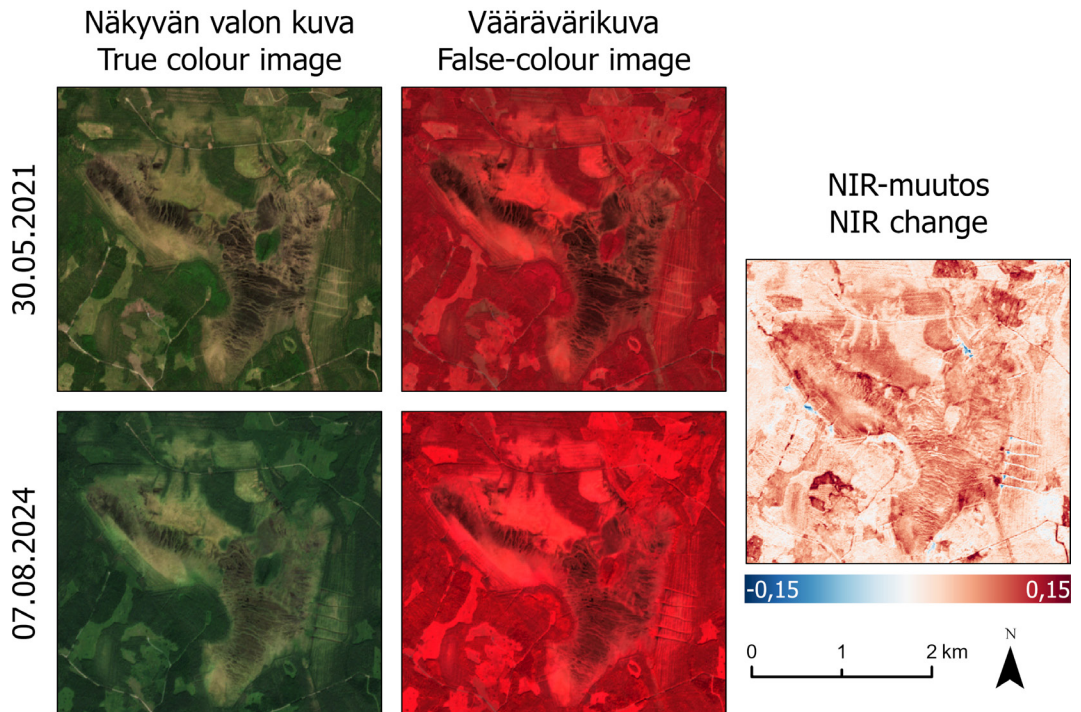


Kuva 2. Esimerkki Sentinel-2-satelliittikuvien oikeaoppisesta muutostulkinnasta Vihtanevalla ($63^{\circ} 52' P$, $26^{\circ} 4' I$). Kuvissa tarkastellaan alkukesän tilannetta, jolloin vedenpinnan taso on suhteellisen korkealla ja kasvukausi on alkuvaiheessa, minkä takia ennallistamisen merkyyssvaikutus on parhaiten havaittavissa. Lähi-infrapun (NIR) heijasteen muutoskuvassa negatiiviset arvot tarkoittavat avosoilla lähtökohtaisesti märkyyden lisääntymistä ja positiiviset arvot märkyyden vähentymistä.

Figure 2. An example of proper Sentinel-2 satellite image change detection in Vihtaneva ($63^{\circ} 52' N$, $26^{\circ} 4' E$). The images assess early summer conditions when the water table is relatively high and the growing season is in its early stages, which is why the impact in wetness can be easily noticed. In the near infrared (NIR) change subfigure, negative values within open mire generally indicate an increase in wetness and positive value indicate a decrease in wetness.

tön osalta. Tämän takia satelliittiaineistojen käyttöön tarvitaan käyttöliittymä, jossa voidaan tuottaa asianmukaista mahdollisimman vertailukelpoisten kuvien muutostulkintaa käyttäjäystävällisesti. Tätä tarvetta varten olemme kehittäneet Google Earth Engine -sovelluksen (Kuva 4), johon käyttäjä syöttää tarkastelualan sijainnin, ja sovellus tulostaa satelliittikuvista ennen-jälkeen -väärävärivärikuvat sekä muutokset muutamasta keskeisestä satelliittimuuttujasta. Kuvat luodaan satelliittikuva-aikasarjojen avulla käyttämällä kaikkia suhteellisen pilvettömiä Landsat 8–9 ja Sentinel-2-satelliittikuvia ennen ja jälkeen käyttäjän määrittämän ennallistamisvuoden. Kuva-aikasarjoista lasketaan heijastusarvojen pikseli-

kohtaiset 40. persentiilit, eli niin sanotut ”edustavat” keskiarvokuvat ennen- ja jälkeen-ajanjaksoille. Esimerkkitaapauksessamme (Kuva 4) kuva-aikasarjoissa on hyödynnetty alkukesän (1.5.–15.6.) kuvia usealta vuodelta. Sovelluksen eri versiot ovat olleet kokeilukäytössä Metsähallituksen Luontopalveluiden ennallistamissuunnittelijoilla kesällä 2024, Euroopan ekologisen ennallistamisen (SERE 2024) konferenssin kaukokartoitustyöpajan osallistujilla, SuoELO:n syksyllä 2024 järjestetyssä kokouksessa ja lokakuussa 2024 Helmi-ohjelman järjestämässä Suokahvila-tilaisuudessa. Sovelluksen ensimmäinen julkinen versio pyritään julkaisemaan vuoden 2025 aikana.



Kuva 3. Esimerkki Sentinel-2-satelliittikuvien harhaanjohtavasta muutostulkinnasta Vihtanevalla ($63^{\circ} 52' P$, $26^{\circ} 4' I$). Vertailu tehdään huonosti vertailukelpoisilla kuvaushetkillä (märkä alkukesän hetki, jolloin kasvillisuutta on vähän, vs. kuiva keskikesän hetki, jolloin kasvillisuus on huipussaan), mikä vääristää tulkintaa ja siitä tehtäviä johtopäätöksiä. Lähi-infrapunan (NIR) heijasteen muutoskuvassa negatiiviset arvot tarkoittavat avosoiden lähtökohtaisesti märkyyden lisääntymistä ja positiiviset arvot kasvillisuuden lisääntymistä sekä märkyyden vähentymistä.

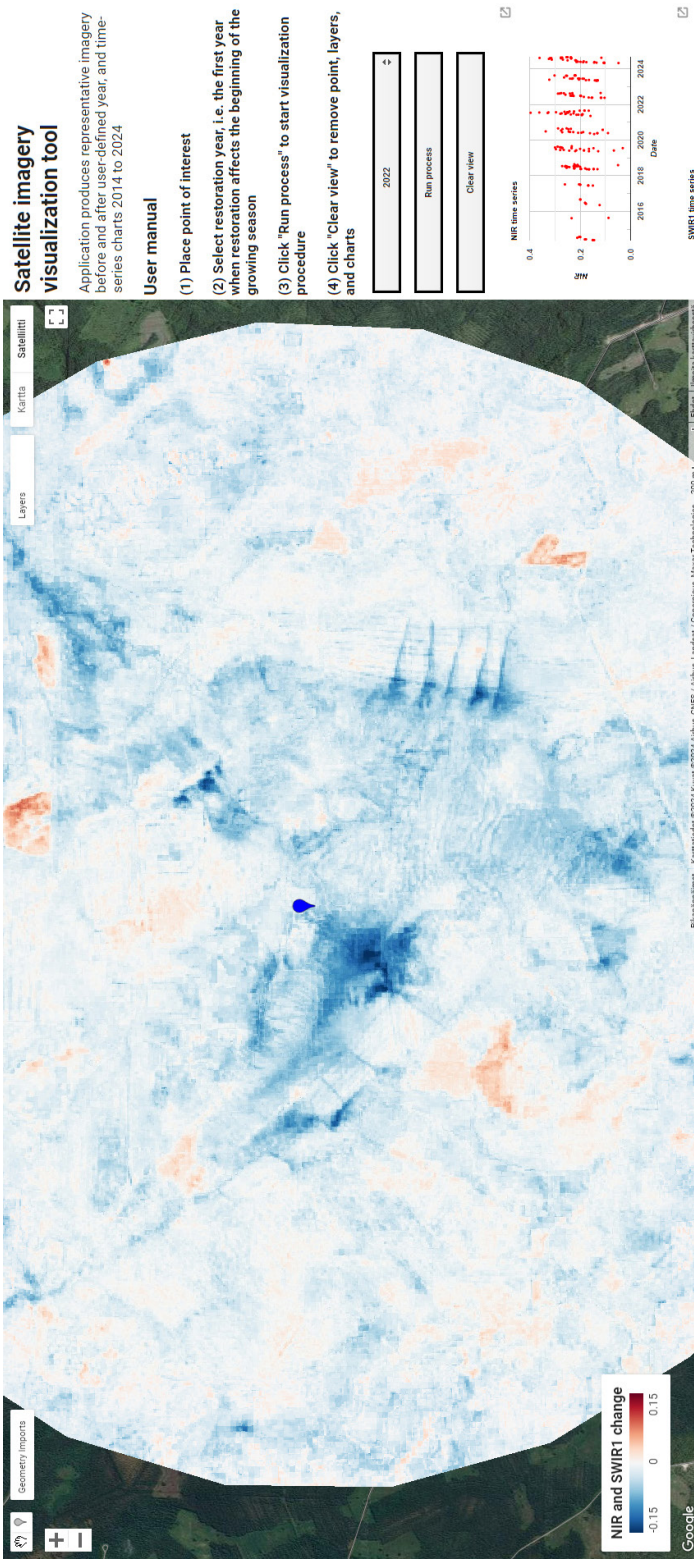
Figure 3. An example of misleading Sentinel-2 satellite image change detection in Vihtaneva ($63^{\circ} 52' N$, $26^{\circ} 4' E$). The comparison is conducted using poorly comparable images (wet early summer with little vegetation vs. dry midsummer when vegetation is at its peak), which distorts interpretation and conclusions. In near infrared (NIR) change subfigure, negative values within open mire generally indicate an increase in wetness and positive value indicate an increase in vegetation and a decrease in wetness.

Kuvista 2 ja 4 voidaan todeta, että Vihtanevan vesienpalautustoimenpiteet näyttävät pääsääntöisesti onnistuneen muutostulkinnan perusteella. Alueella on tosin tehty myös useampia toimenpiteitä, joiden vaikutus vaikuttaa vähäiseltä. Lisäksi vaikuttaisi siltä, että esimerkiksi Vihtanevan lounaisosassa vesienpalautus aiheuttaa mahdollisesti puuston kasvua haittaavaa vettymistä ojitetuille metsätalousalueille, joilta vettä ohjataan kohti ojittamatonta avosuota. Nämä ongelmakohtat ovat sellaisia, jotka tulisi todentaa maastokäynnin avulla.

Hoitoseurantaa voidaan tässä tapauksessa tehostaa hyödyntämällä dronikuvausta havaituilta ongelmaloilta, jolloin maastossa vietetty aika

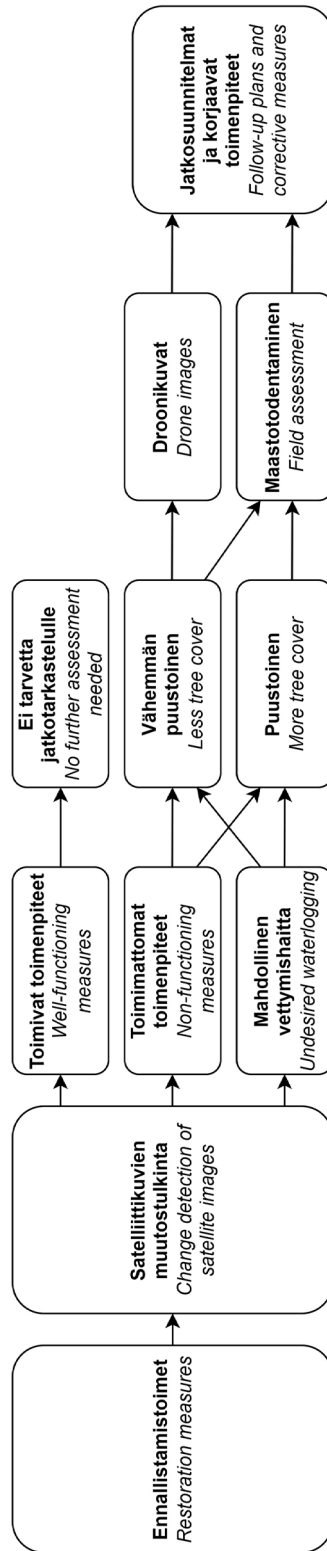
minimoidaan. Tarkoilla dronikuvilla voidaan mahdollisesti todentaa, miksi ennallistamisella ei ole toivottuja vaikutuksia kyseisillä aloilla. Tulevaisuudessa ennallistamisalojen kasvaessa maastossa tapahtuvaa hoitoseurantaa voitaisiin pyrkiä näin priorisoimaan kaukokartoitushavaintojen perusteella (Kuva 5).

Kuvassa 6 on esimerkki neljältä kohteelta, joilla näytetään, mille alueille suurilla avosoiden tulisi priorisoida kenttäseurannat muutostulkinnan perusteella. Kenttäseurantarpeiden otaksutus syyt on esitetty Taulukossa 1.



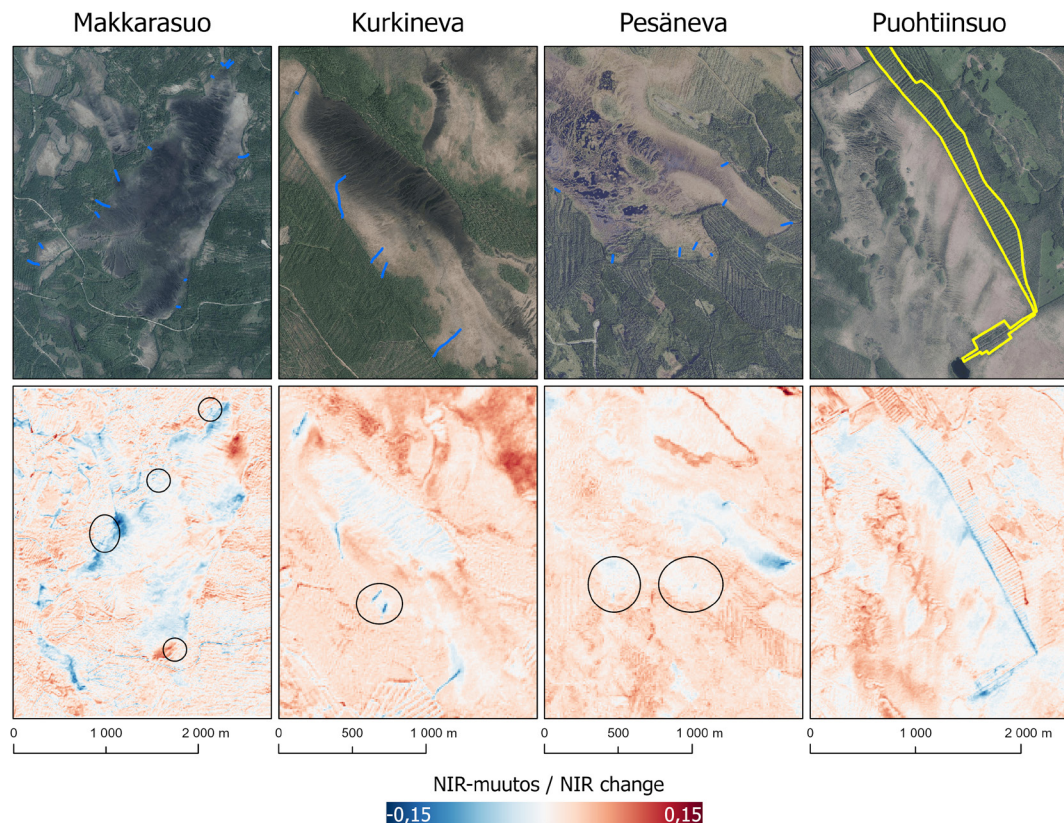
Kuva 4. Soiden seurannan Google Earth Engine -sovelluksen kehitysversion käyttöliittymä. Käyttäjät valitse tarkasteltavan paikan ja ennallistamisen ensimmäisen vaikutusvuoden. Tämän jälkeen sovellus tuottaa keskiarvoistetut satelliittimosaikit ennen ja jälkeen ennallistamisen (ks. Pitkänen ym. 2024; Isoaho ym. 2024b) visualisoituina väärivärikuviksi. Sovellus myös laskee muutokset lähi-infrapunan (NIR) ja lyhytaaltoisen infrapunan (SWIR) aallonpituusalueilla sekä tulostaa niistä visualisoinnit ja aikasarjakuvaajat. Satelliittikuvien rajallisen saatavuuden takia sovellus toimii vuoden 2016 jälkeen ennallistetuille kohteille. Kuvassa tarkastellaan Vihtanevaa ($63^{\circ} 52' P$, $26^{\circ} 4' I$) ennallistamisvuonna 2022.

Figure 4. The user interface of development version of the Google Earth Engine application for peatland monitoring. The user selects a location and the first impact year of the restoration. The application produces averaged satellite mosaics before and after restoration (see Pitkänen et al. 2024; Isoaho et al. 2024b) visualised as false colour images. Additionally, the application calculates the changes in near infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) wavelengths and produces their visualisations and time series charts. Due to the limited availability of satellite imagery, application functions only for sites that have been restored after 2016. In the figure, the mire under assessment is Vihtaneva ($63^{\circ} 52' N$, $26^{\circ} 4' E$) with restoration year set to 2022.



Kuva 5. Ehdotamme ennallistettujen soiden hoitoseurannan kaukokartoitusohjattu toimintamalli reunaojitetuille avosoille, erityisesti vesienpalautuskohteille.

Figure 5. Our proposed remote sensing-guided operational model for monitoring restored peatlands, particularly for sites undergoing restorations with water-directing ditches.



Kuva 6. Esimerkki satelliittikuvien muutostulkinnasta ja priorisoitavat maastoseuranta-alueet seuraavilla ennallistetuilla avosoilla: Makkarasuo ($65^{\circ} 0' P$, $27^{\circ} 10' I$), Kurkineva ($64^{\circ} 6' P$, $26^{\circ} 24' I$), Pesäneva ($63^{\circ} 48' P$, $24^{\circ} 51' I$) ja Puohtiinsuo ($62^{\circ} 44' P$, $31^{\circ} 4' I$). Kohteilla on tukittu reunaojia ja tehty vesienpalautustöitä. Siniset viivat Maanmittauslaitoksen ilmakuvissa (ylärivi) ovat veden johdeuomia ja keltainen rajaus Puohtiinsuolla on ojien tukkimisaluetta. Alemmassa rivissä on lähi-infrapun (NIR) muutokset ja mustat ympyrät rajaavat suositellut maastotarkastelualueet (ks. Taulukko 1). Jotta priorisointia voitaisiin aidosti toteuttaa, on erityisen tärkeää, että muutostulkitsijalla on käsitys siitä, miten toimenpiteet oli suunniteltu ja miten niiden haluttiin lähtökohtaisesti vaikuttavan.

Figure 6. An example satellite image change detection and areas that need to be prioritised for field assessment in the following sites: Makkarasuo ($65^{\circ} 0' N$, $27^{\circ} 10' E$), Kurkineva ($64^{\circ} 6' N$, $26^{\circ} 24' E$), Pesäneva ($63^{\circ} 48' N$, $24^{\circ} 51' E$) ja Puohtiinsuo ($62^{\circ} 44' N$, $31^{\circ} 4' E$). Sites have undergone ditch infilling and excavation of water-directing ditches. Blue lines in the aerial photos by the National Land Survey of Finland (upper row) are water-directing ditches and yellow delineations in Puohtiinsuo are ditch infilling areas. Bottom row contains near infrared (NIR) changes and black circles delineate areas that are recommended to be assessed in the field (see Table 1). For effective prioritisation, it is particularly important for the interpreter to understand how the measures have planned and how they are intended to impact.

4 Tulosten tarkastelu

Satelliittikuvien muutostulkinta ei toimi jokaisella kohteella yhtä hyvin. Jos ennallistamisen yhteydessä poistetaan puustoa, satelliittikuvien mittaama punainen ja lähi-infrapunaheijaste kasvaa, jolloin puuston poiston vaikutuksia voi olla hankala erottaa heijastetta vähentävästä kasvaneesta märkydestä (ks. Kuva 6 Puohtiin-

suo). Lisäksi satelliittikuvista ei välttämättä aina kyetä havaitsemaan alueellisia muutoksia avosoillakaan. Jotta kaukokartoituksella voidaan havaita ennallistamisen vaikutuksia suoalueella, muutosten on oltava riittävän suuria. Teknisten yksityiskohtien kuten ojien tukkimisen tai patojen pitävyyden tarkasteluihin tarvitaan korkean resoluution drooniseurantaa (ks. Ikkala & Similä 2024). Puustoisilla kohteilla puolestaan suon

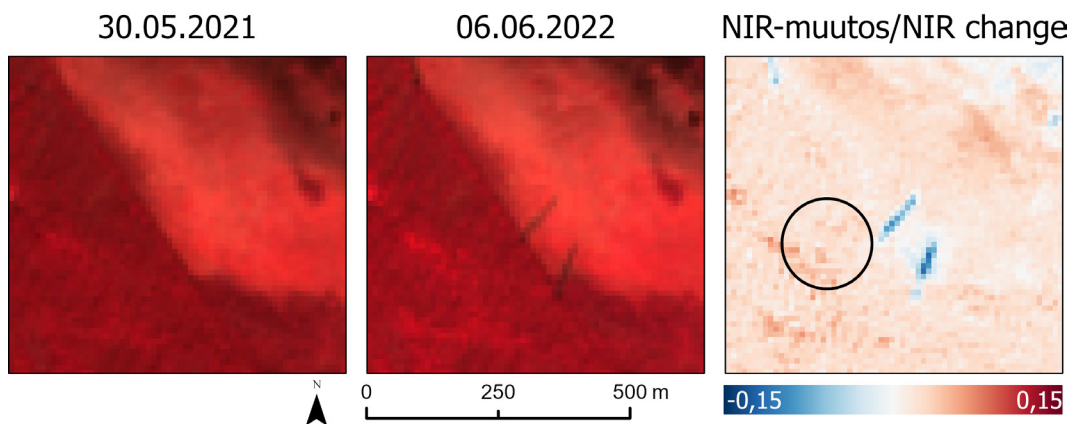
Taulukko 1. Priorisoinnin syyt muutostulkituilta kohteilta. Alueilla viitataan Kuvassa 6 oleviin muutostulkinnan perusteella ympyröityihin alueisiin.

Table 1. The reasons for prioritisation of change detection sites. The areas refer to the marked areas in the bottom row of Figure 6.

Kohdesuo / Target mire	Syyt maastotodentamiselle / Reasons for field assessment
Makkarasuo	Pohjoisimmassa alueessa on mahdollista vettymishaittaa metsätalousalueella. Läntisimmällä alueella on mahdollista vettymishaittaa, eikä vesienpalautus vaikuta yhtä voimakkaasti kuin ympärillä olevilla toimenpiteillä. Toisiksi pohjoisimmalla ja eteläisimmällä alueella toimenpiteen vaikutus on heikko. <i>The northernmost area has possible undesired waterlogging in the forestry area. The westernmost area has possible waterlogging in the forestry area and the water-directing ditch does not impact as strongly as the nearby water-directing measures. In the second northernmost and in the southernmost area, the rewetting impact is weak.</i>
Kurkineva	Alueen vesienpalautusten vaikutus on heikko. <i>The rewetting impact is weak.</i>
Pesäneva	Alueen vesienpalautusten vaikutus on heikko. <i>The rewetting impact is weak.</i>
Puohtiinsuo	Priorisointia on hankala toteuttaa. Suurin ennallistamisvaikutus on luonnollisilla valumareiteillä, jotka näkyvät ilmakuvassa tummina juovina. Vettymistä on myös Puohtiinsuon eteläosan ojantäyttöalueen lounaisosassa ojitamattomalla suoalueella. <i>Prioritisation is difficult to implement. The strongest restoration impacts are observed in natural flow routes, which can be seen as dark lines. There is a clear rewetting in the undrained area located southwest of the ditch infilling area of southern Puohtiinsuo.</i>

pinta ei näy riittävästi kaukokartoituskuivissa. On myös mahdollista, että pilvisyyden takia ei ole saatavissa hyvää satelliittikuva-aineistoa ennallistamisen jälkeisenä alkukesänä. Tällöinkin hoitoseuranta on joka tapauksessa toteutettava ilman kaukokartoituksen avulla tehtävää priorisointia.

Metsätalousalueiden vettymishaitta on joissain tapauksissa satelliittikuvista todennettavissa mutta ei aina, sillä ojitus on yleensä kasvattanut puustoon tiheän latvuksen (Kuvat 5, 7). Täten kenttätarkastelua tulee tehdä tulevaisuudessakin vähintäänkin niillä aloilla, joissa on (1) korkea riski vettymishaittaan ja (2) haittaa ei voida satel-



Kuva 7. Alue Pyhännän Kurkinevalla ($64^{\circ} 6' N$, $26^{\circ} 24' E$), jossa kenttäkäytien perusteella on havaittu vettymishaittaa (musta ympyrä). Haittaa ei kuitenkaan nähdä satelliittikuvien muutostulkinnalla suuren latvuspeittävyuden takia. Lähellä olevat johdeuomat ohjaavat huonosti vettä suolle, joten alue tulisi ehdotetun toimintamallin mukaan todentaa maasto- tai droonityönä.

Figure 7. An area in Kurkineva in Pyhäntä ($64^{\circ} 6' N$, $26^{\circ} 24' E$), in which, based on the field work, there is undesired waterlogging in the forestry area (black circle). The waterlogging cannot be detected with satellite image change detection due to the high tree cover. The nearby water-directing ditches do not direct water properly to the open mire; therefore, according to the proposed operational model, the area should be assessed with field work or a drone flight.

liittikuvista todentaa. Satelliittikuvien muutostulkinta ei siten voi täysin korvata kenttäseurainta edes optimaalisilla eli märillä ja vähäpuustoisilla kohteilla, mutta sitä voidaan käyttää kenttätoiminnan ohjaamiseen ja tehostamiseen.

Meidän ja muiden tutkimustulosten perusteella (esim. Elo ym. 2024) on nähtävissä, että ennallistamisen onnistumisella on suurta vaihtelua kohteiden sisällä ja kohteiden välillä. Joillakin kohteilla vaikutusalueet voivat olla laajoja, mutta toisaalta joissakin kohteissa kasvilajikohtaiset ennallistamisvasteet voivat olla hyvinkin heikkoja. Jotta tulevaisuudessa kyettäisiin tekemään ekologisesti vaikuttavaa ja laaja-alaista ennallistamista, on kyettävä tunnistamaan syyt ennallistamisen onnistumisen vaihtelun takana. Tämä vaatii esimerkiksi hoitoseurantalomakkeiden systemaattista analysointia ja toisaalta myös monitieteistä tutkimusta, jossa yhdistetään ennallistamisvaste, ennallistamistoimenpiteet ja niiden onnistuneisuus sekä kohdekohtaiset ympäristötekijät, joilla voisi olla vaikutusta vasteeseen. Kun tunnistetaan onnistuneen ennallistamisen keskeiset tunnusmerkit, näitä oppeja voidaan viedä myös tuleville ennallistamiskohteille.

5 Johtopäätökset

Uusimmat soiden kaukokartoitustutkimukset osoittavat, että optisia satelliittiaineistoja voidaan käyttää soiden ennallistamisen vaikutusten seurantaan. Optimaaliset seurantakohteet ovat vähäpuustoisia ja märkiä kuten aapasoiden puuttomat osat, jotka on reunaojitettu metsäojitusten yhteydessä. Satelliittikuvien muutostulkinnalla voidaan näyttää ennallistamisen vaikutusalue ja tukea käytännön seurantatyötä. Vaikka satelliittikuvien muutostulkinta ei voi täysin korvata kenttäseurainta, sen avulla voidaan vähentää maastoseurannan tarvetta ja priorisoida toteutettavaa hoitoseurainta.

Kiitokset

Kiitämme Suomen ympäristöministeriötä SOSE (VN/28337/2021-YM-2) ja EkoSuo (VN/14352/2022) -hankkeiden rahoittamisesta. Kiitämme eri sidosryhmiä erinomaisesta yhteistyöstä viime vuosien aikana.

Kirjallisuus

- 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. <https://doi.org/10.1111/rec.12415>.
- Asokan, A. & Anitha, J. 2019. Change detection techniques for remote sensing applications: A survey. *Earth Science Informatics* 12(2): 143–160. <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00380-5>.
- 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., Uemaa, 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113736>.
- Elo, M., Kareksela, S., Ovaskainen, O., Abrego, N., Niku, J., Taskinen, S., Aapala, K. & Kotiaho, J. S. 2024. Restoration of forestry-drained boreal peatland ecosystems can effectively stop and reverse ecosystem degradation. *Communications Earth & Environment* 5(1): 680. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01844-3>.
- ESA. 2024. S2 Mission. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K. & Dixon, K. W. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27(S1): S1–S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>.
- Granqvist, A.-L. 2024. Vesienpalautus suojeleusoille: Opas käytännön toimijoille. Etelä-Pohjanmaan ELY-Keskus 09/2024.
- Ikkala, L., Ronkanen, A.-K., Ilmonen, J., Similä, M., Rehell, S., Kumpula, T., Pääkkilä, L., Klöve, B. & Marttila, H. 2022. Unmanned Aircraft System (UAS) Structure-From-Mo-

- tion (SfM) for Monitoring the Changed Flow Paths and Wetness in Minerotrophic Peatland Restoration. *Remote Sensing* 14(13): 3169. <https://doi.org/10.3390/rs14133169>.
- Ikkala, L., & Similä, M. 2024. Ennallistettujen soiden seurannan kehittämisehdotukset – Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia hoitoseurannan ja hydrologisen seurannan parantamiseksi ja kaukokartoitus-seurannan perustamiseksi. Metsähallituksen Luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 251. <https://julkaisut.metsa.fi/wp-content/uploads/sites/2/2024/04/a251.pdf>.
- Isoaho, A., Elo, M., Marttila, H., Rana, P., Lensu, A. & Räsänen, A. 2024. Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery. *Science of The Total Environment* 957: 177697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177697>.
- Isoaho, A., Ikkala, L., Marttila, H., Hjort, J., Kumpula, T., Korpelainen, P. & Räsänen, A. 2023. Spatial water table level modelling with multi-sensor unmanned aerial vehicle data in boreal aapa mires. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 32: 101059. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101059>.
- Isoaho, A., Ikkala, L., Päckilä, L., Marttila, H., Kareksela, S., & Räsänen, A. 2024. Multi-sensor satellite imagery reveals spatiotemporal changes in peatland water table after restoration. *Remote Sensing of Environment* 306: 114144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114144>.
- Kareksela, S., Ojanen, P., Aapala, K., Haapalehto, T., Ilmonen, J., Koskinen, M., Laiho, R., Laine, A., Maanavilja, L., Marttila, H., Minkinen, K., Nieminen, M., Ronkanen, A.-K., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Tolvanen, A., Tuittila, E.-S. & Vasander, H. 2021. Soiden ennallistamisen suoluonto-, vesistö-, ja ilmastovaikutukset. Vertaisarvioitu raportti. Suomen Luontopaneelin julkaisuja, 2021/3b. <https://doi.org/10.17011/jyx/SLJ/2021/3b>.
- Keränen, K., Isoaho, A., Räsänen, A., Hjort, J., Kumpula, T., Korpelainen, P. & Rana, P. 2024. Multi-resolution remote sensing for flark area detection in boreal aapa mires. *International Journal of Remote Sensing* 45(13): 4324–4343. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2359732>.
- Pitkänen, T. P., Balazs, A. & Tuominen, S. 2024. Automatized Sentinel-2 mosaicking for large area forest mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 127: 103659. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103659>.
- 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. <https://doi.org/10.1002/rse2.140>.
- Räsänen, A., Jantunen, A., Isoaho, A., Ikkala, L., Rana, P., Marttila, H., & Elo, M. (2024). Changes in satellite-derived spectral variables and their linkages with plant species after peatland restoration. [Submitted manuscript].
- 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. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-586-6>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102866>.
- Räsänen, A. & Virtanen, T. 2019. Data and resolution requirements in mapping vegetation in spatially heterogeneous landscapes. *Remote Sensing of Environment* 230: 111207. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.02>.
- Regulation (EU) 2024/1991. (2024). Regulation 2024/1991 of the European Parliament and of the Council on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-74-2023-INIT/en/pdf>.
- Tahvanainen, T. 2011. Abrupt ombrotrophication of a boreal aapa mire triggered by hydrological disturbance in the catchment: Ombrotrophication of aapa mires. *Journal of Ecology* 99: 404–415. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01778.x>.

- Talvitie, P., Räsänen, A. & Silvan, N. 2023. Changes in the open water hollows in Häädetkeidas and Kauhaneva mires during 1947–2017 based on remote sensing. *Suo-Mires & Peat* 74(1–2): 71–96.
- USGS. 2024. What are the acquisition schedules for the Landsat satellites? <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-acquisition-schedules-landsat-satellites>.
- Zhang, H. K., Roy, D. P., Yan, L., Li, Z., Huang, H., Vermote, E., Skakun, S. & Roger, J.-C. 2018. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. *Remote Sensing of Environment* 215: 482–494. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.031>.

Summary: Prioritizing restoration monitoring of aapa mires using satellite image analysis

Restoration of peatlands will increase significantly in the coming years. This will also increase the need for cost-efficient monitoring methods for restoration. In the recent years, the potential of remote sensing in peatland restoration monitoring has been studied in several projects. It has been found that especially the changes in the surface wetness can be relatively well monitored with optical satellite imagery in open peatlands. In this article, we present an operational model that can be used for prioritising the general monitoring of restored open peatlands, especially the aapa mires restored with water-directing measures. Firstly, wetted, and non-wetted areas are interpreted with satellite imagery change detection which can be used to identify failed restoration measures, and when possible, undesired waterlogged forestry areas. Following this, prioritised field or drone assessments are conducted at problem areas, and corrective measures can be planned and implemented. From the perspective of the large restoration needs in the future, it would be critical to understand which factors affect the success of restoration, and how the restoration methods could be further developed.

Keywords: hydrology, Landsat, optical, peatlands, remote sensing, Sentinel-2, vegetation