



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 94/2024

# Ekologiset, hydrologiset ja kaukokartoitushavainnot suolunnon ja soiden ennallistamisen seurannassa

EkoSuo-hankkeen loppuraportti

Aleksi Räsänen, Aleksi Isoaho, Lassi Päckilä, Priscillia Christiani, Anssi Lensu, Aapo Jantunen, Parvez Rana, Petra Korhonen, Lauri Ikkala, Kaapro Keränen, Saara Heikkinen, Santtu Kareksela, Hannu Marttila ja Merja Elo



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 94/2024

# **Ekologiset, hydrologiset ja kaukokartoitushavainnot suoluonnon ja soiden ennallistamisen seurannassa**

EkoSuo-hankkeen loppuraportti

**Aleksi Räsänen, Aleksi Isoaho, Lassi Päckilä, Priscillia Christiani, Anssi Lensu,  
Aapo Jantunen, Parvez Rana, Petra Korhonen, Lauri Ikkala, Kaapro Keränen,  
Saara Heikkinen, Santtu Kareksela, Hannu Marttila ja Merja Elo**



Ympäristöministeriö  
Miljöministeriet  
Ministry of the Environment

### Viittausohje:

Räsänen, A., Isoaho, A., Päckilä, L., Christiani, P., Lensu, A., Jantunen, A., Rana, P., Korhonen, P., Ikkala, L., Keränen, K., Heikkinen, S., Kareksela, S., Marttila, H. & Elo, M. 2024. Ekologiset, hydrologiset ja kaukokartoitushavainnot suoluonnon ja soiden ennallistamisen seurannassa : EkoSuo-hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 94/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 25 s.

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



ISBN 978-952-380-987-1 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-987-1>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Aleksi Räsänen, Aleksi Isoaho, Lassi Päckilä, Priscillia Christiani, Anssi Lensu, Apoo Jantunen, Parvez Rana, Petra Korhonen, Lauri Ikkala, Kaapro Keränen, Saara Heikkinen, Santtu Kareksela, Hannu Marttila ja Merja Elo

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2024

Julkaisuvuosi: 2024

Kannen kuva: Lauri Ikkala

## Tiivistelmä

Aleksi Räsänen<sup>1,2</sup>, Aleksi Isoaho<sup>1,3</sup>, Lassi Päckilä<sup>3</sup>, Priscillia Christiani<sup>1,2</sup>, Anssi Lensu<sup>4</sup>, Aapo Jantunen<sup>4</sup>, Parvez Rana<sup>1</sup>, Petra Korhonen<sup>3</sup>, Lauri Ikkala<sup>4,5</sup>, Kaapro Keränen<sup>1,2</sup>, Saara Heikkinen<sup>1,2</sup>, Santtu Kareksela<sup>6</sup>, Hannu Marttila<sup>3</sup>, Merja Elo<sup>7,4</sup>

<sup>1</sup> Luonnonvarakeskus, Oulu

<sup>2</sup> Maantieteen tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto

<sup>3</sup> Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto

<sup>4</sup> Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto

<sup>5</sup> Geologian tutkimuskeskus, Kokkola

<sup>6</sup> Metsähallitus Luontopalvelut, Hämeenlinna

<sup>7</sup> Suomen ympäristökeskus, Jyväskylä

Ekologiset, hydrologiset ja kaukokartoitushavainnot suoluonnon ja soiden ennallistamisen seurannassa (EkoSuo) -hanke vastasi seuraaviin tutkimuskysymyksiin: (i) Miten soiden ennallistamisen hydrologiset muutokset selittävät suon kasvillisuuden muutoksia? (ii) Miten ennallistetun suon kasvillisuuden muutoksia voidaan havaita kaukokartoituksen avulla? (iii) Miten soiden tilan muutosta voidaan ennustaa maantieteellisesti ja ajallisesti?

Hankkeen pääasiallisena aineistona toimi valtakunnallinen soiden ennallistamisen seuranta-verkosto, joka kattaa kasvillisuus- ja hydrologiahavainnot 60 ennallistetulta, 60 luonnontilaiselta ja 30 ojitetulta suokohteelta sekä kymmenen vuoden ennallistamisen jälkeisen seuranta-jakson. Lisäksi aineistona käytettiin optisia satelliittikuvia, uhanalaisten suokasvilajien esiintymätietoja sekä maanlaajuisia ympäristömuuttujien paikkatietoaineistoja. Menetelminä hyödynnettiin yhdistettyjä lajien levinneisyysmalleja hydrologia-kasvillisuus- ja kaukokartoitus-kasvillisuus-yhteyksien tutkimisessa, random forest -koneoppimismallia kasvillisuus- ja märkyyssuutosten kaukokartoitusanalyseissa sekä MaxEnt-koneoppimismallia ennustettaessa uhanalaisten lajien potentiaalisia elinympäristöjä tulevaisuuden ilmasto- ja ennallistamisskenaarioissa.

Tulosten perusteella hydrologinen ennallistaminen on välttämätöntä kasvillisuuden ennallistamiselle, mutta ei takaa sitä. Satelliittikaukokartoituksella voidaan seurata ennallistamisen jälkeisiä muutoksia avoimilla ja vähäpuustoisilla soilla. Pohja- ja kenttäkerroksen kasvillisuusmuutokset selittävät satelliittikuvissa havaittuja muutoksia vain osittain, todennäköisesti tärkeimpiä selittäjiä ovat muutokset puustossa, märkydessä ja ojalinjoilla. Hankkeessa kehitettiin toimiva koneoppimismalli ja automatisoitu helppokäyttöinen sovellus avosoiden märkyyssuutosten sekä ennallistamistoimenpiteiden vaikutusalueen analyysiin. Hankkeessa havaittiin, että ilmastonmuutos muuttaa uhanalaisille suokasvilajeille suotuisia elinympäristöjä, mutta ennallistaminen voi toimia sopeutumisstrategiana.

Hanke korostaa pitkäaikaisten maastoseuranta-aineistojen tärkeyttä ennallistamisen vaikutusten ja luonnon tilan seurannassa. Kaukokartoitusseuranta voi käyttää täydentämään mutta ei korvaamaan maastohavaintoja. Jatkossa ennallistamisen seuranta tulee jatkaa ja laajentaa, jotta saadaan käsitys pitkäaikaista ja laaja-alaisista muutoksista erilaisilla kohteilla.

**Asiasanat:** hydrologia, ilmastonmuutos, kasvillisuus, kaukokartoitus, satelliittikuvat, soiden ennallistaminen

## Abstract

Aleksi Räsänen<sup>1,2</sup>, Aleksi Isoaho<sup>2,3</sup>, Lassi Päckilä<sup>3</sup>, Priscillia Christiani<sup>1,2</sup>, Anssi Lensu<sup>4</sup>, Aapo Jantunen<sup>4</sup>, Parvez Rana<sup>1</sup>, Petra Korhonen<sup>3</sup>, Lauri Ikkala<sup>4,5</sup>, Kaapro Keränen<sup>1,2</sup>, Saara Heikkinen<sup>1,2</sup>, Santtu Kareksela<sup>6</sup>, Hannu Marttila<sup>3</sup>, Merja Elo<sup>7,4</sup>

<sup>1</sup> Natural Resources Institute Finland, Oulu

<sup>2</sup> Geography Research Unit, University of Oulu

<sup>3</sup> Water, Energy and Environmental Engineering Research Unit, University of Oulu

<sup>4</sup> Department of Biological and Environmental Science, University of Jyväskylä

<sup>5</sup> Geological Survey of Finland, Kokkola

<sup>6</sup> Metsähallitus Parks & Wildlife, Hämeenlinna

<sup>7</sup> Finnish Environment Institute, Jyväskylä

The project 'Ecological, hydrological, and remote sensing observations to monitor peatlands and restoration outcomes (EkoSuo)' answered the following research questions: (i) How hydrological changes in post-restoration peatlands explain vegetation changes? (ii) How can the vegetation changes be monitored with remote sensing data? (iii) How can the changes in the state of peatlands be predicted spatiotemporally?

The main data of the project was the Finnish national peatland restoration monitoring network data spanning vegetation and hydrology observations from 60 restored, 60 pristine and 30 drained peatlands, and ten-year post-restoration monitoring period. In addition, the datasets included optical satellite imagery, presence data of red-listed peatland plant species, and country-wide GIS datasets of environmental variables. The methods included joint species distribution models in analyzing hydrology-vegetation and remote sensing-vegetation-associations, random forest machine learning model in remote sensing analysis of vegetation and wetness changes, and MaxEnt machine learning model in predicting the potential habitats of red-listed species in future climate and restoration scenarios.

According to the results, hydrological restoration is a prerequisite for the recovery of vegetation but does not guarantee it. Satellite remote sensing is usable to monitor post-restoration changes in peatlands with little or no trees. Ground vegetation changes explain only partly the changes seen in satellite imagery; probably, more important explanators are changes in tree canopy, wetness, and ditch lines. The project developed an automated machine learning model and automatized easy-to-use application to analyze wetness changes and impacted area of restoration measures in open peatlands. It was also observed that climate change modifies suitable habitats for red-listed peatland plant species, but restoration can act as an adaptation strategy.

The project emphasizes the importance of long-term field monitoring datasets to monitor restoration outcomes and the state of the ecosystems. Remote sensing can be used to complement, not replace field-based monitoring. In the future, the monitoring of restoration actions need to be continued and expanded to gather knowledge about long-term and large-extent changes in different types of sites.

**Keywords:** climate change, hydrology, peatland restoration, remote sensing, satellite imagery, vegetation

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Hankkeen tavoitteet ja tulokset.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Kasvillisuuden ja hydrologian pitkäaikaisseurannat .....</b>	<b>9</b>
3.1. Soiden ennallistamisen seurantaverkosto.....	9
3.2. Hydrologiset muutokset ja kasvillisuusmuutokset .....	10
3.3. Kasvillisuuden ja hydrologian väliset yhteydet .....	10
<b>4. Kaukokartoitusseuranta .....</b>	<b>12</b>
4.1. Johdanto .....	12
4.2. Kasvillisuuden pitkäaikaisseuranta.....	12
4.2.1. Kasvillisuusgradienttien seuranta .....	12
4.2.2. Yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten ryhmien seuranta .....	13
4.3. Vaikutusalueen määrittäminen.....	16
<b>5. Ennallistaminen muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa .....</b>	<b>18</b>
<b>6. Johtopäätökset.....</b>	<b>20</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>23</b>

# 1. Johdanto

Suomen suoluonnon tila on heikentynyt merkittävästi etenkin metsätalousojitusten takia: alkuperäisestä noin 10 miljoonan hehtaarin suoalasta on ojitettu yli puolet. Keskeinen keino suoluonnon tilan parantamiseksi on ennallistaminen, joka tulee lisääntymään merkittävästi lähivuosina. Esimerkiksi Helmi-elinympäristöohjelman tavoitteena on ennallistaa noin 60 000 hehtaaria metsäojitettuja soita vuoteen 2030 mennessä. EU:n tuoreessa ennallistamisasetuksessa tavoite on vielä huomattavan paljon korkeampi. Alustavien arvioiden mukaan Suomessa tarve voi olla jopa yli kahden miljoonan suohehtaarin ennallistamiselle vuoteen 2050 mennessä (Räsänen ym. 2023).

Ennallistamisessa on määrällisten tavoitteiden lisäksi oleellista keskittyä vaikuttavuuteen. On epäselvää, missä määrin ja missä ajassa ennallistetut suot palautuvat luonnontilaisen kaltaiseksi hydrologialtaan ja lajistoltaan, vai palautuvatko ollenkaan, sekä kuinka laajoja nämä muutokset ovat alueellisesti. Puutteelliseen tietämykseen vaikuttaa ennallistamisen vaikutusten vaikea mitattavuus. Esimerkiksi suojelualueilla toteutettava ennallistamiskohteiden hoito-seuranta (Hyvärinen & Aapala 2009) on työlästä ja subjektiivista, sillä se perustuu asiantuntijoiden tekemiin maastohavaintoihin. Suojelualueiden ulkopuolella ennallistamisen vaikutusten seuranta tehdään hyvin vähän.

Soiden ennallistamisen seurantatutkimukset ovat usein rajoittuneet vähäisiin määriin kohteita tai vain muutama vuoteen (esim. Andersen ym. 2017). Tällaisten tutkimusten avulla ei saada tuotettua yleistettävää tietoa pitkäaikaisvaikutuksista. Vastaavasti usein ennallistamisen vaikutukset kasvillisuuteen ja hydrologiaan selvitetään erikseen, eikä näitä tietoja yhdistetä toisiinsa.

Yksi potentiaalinen tapa kehittää seuranta on kaukokartoituksen hyödyntäminen. Etenkin satelliittikaukokartoituksen avulla saadaan objektiivista, pitkäaikaista ja ajallisesti lähes jatkuvaa tietoa soilla tapahtuvista muutoksista. Kuitenkin satelliittikuva-aineistojen hyödyntäminen ennallistamisen onnistumisen seurannassa on ollut melko vähäistä (Räsänen ym. 2023).

Kaukokartoitusmenetelmien ja ennallistamisen seurannan kehittämisessä yleensä on olennaista hyödyntää kattavia maastohavaintoaineistoja. Ennallistamisen vaikutusten arviointiin on perustettu valtakunnallinen Metsähallituksen Luontopalveluiden 150 kohteen valtakunnallinen soiden ennallistamisen seurantaverkosto (Hyvärinen & Aapala 2009). Tästä seurantaverkostosta on valmistunut vuonna 2022 aineisto, joka kattaa maastossa havainnoidun kasvillisuuden (Elo ym. 2024c) ja hydrologian (Päkkilä ym. 2024a, 2024b) muutokset 10 vuotta ennallistamisen jälkeen. Tämä mahdollistaa ennallistamisen pitkäaikaisten vaikutusten arvioinnin, kasvillisuus-hydrologiayhteyksien tutkimisen sekä kaukokartoitusmenetelmien kehittämisen.

## 2. Hankkeen tavoitteet ja tulokset

Ekologiset, hydrologiset ja kaukokartoitushavainnot suoluonnon ja soiden ennallistamisen seurannassa (EkoSuo) -hankkeen tavoitteina oli (1) hyödyntää paremmin systemaattisesti kerättyjä seuranta-aineistoja, (2) kehittää soiden ennallistamisen ja tilan seurantaan uusia skaalautuvia ja kustannustehokkaita menetelmiä ja (3) ennustaa satelliittikuvien ja muiden aineistojen avulla maastohavainnoilla mitattua ennallistetun suon tilan paranemaa koko ennallistamisen kohdealueelle ja muille ennallistetuille soille. Hankkeen tutkimuskysymykset olivat:

1. Miten soiden ennallistamisen hydrologiset muutokset selittävät suon kasvillisuuden muutoksia?
2. Miten ennallistetun suon kasvillisuuden muutoksia voidaan havaita kaukokartoituksen avulla?
3. Miten lajien levinneisyysmallien ja kaukokartoituksen avulla voidaan ennustaa maastohavainnoilla (hydrologialla, kasvillisuudella) mitattua suon tilan muutosta niin maantieteellisesti (koko ennallistetulle alueelle, muille ennallistetuille soille) kuin ajallisesti?

Vastasimme tutkimuskysymyksiin kolmen työkokonaisuuden avulla. Ensimmäiseksi selvitimme hydrologisten muutosten ja kasvillisuusmuutosten välisiä yhteyksiä ennallistetuilla soilla (Luku 3). Toiseksi kokeilimme kustannustehokkaita ja skaalautuvia satelliittikaukokartoitusmenetelmiä ennallistamisen jälkeisten kasvillisuusmuutosten seurannassa (Luku 4). Kolmanneksi käytimme lajien levinneisyysmalleja arvioidessamme uhanalaisten suolajien potentiaalisia elinymäristöjä eri ilmasto- ja ennallistamisskenaarioissa (Luku 5) sekä kehitimme satelliittikaukokartoitusmenetelmiä ennallistamisen vaikutusalueen määrittämisessä (Luku 4). Suuressa osassa työtä käytimme systemaattisesti kerättyä soiden ennallistamisen seurantaverkoston aineistoa (Luku 3.1).

Hankkeen seitsemän tavoiteltua ja saavutettua tulosta olivat seuraavat.

1. Kasvillisuuden ja hydrologian pitkäaikaisseurantojen yhdistäminen ja niiden potentiaalinen arviointi soiden monimuotoisuuden ja hydrologian sekä niiden palautumisen seurannassa
  - Hyödynsimme soiden ennallistamisen seurantaverkoston (Luku 3) tuloksia (Päkkilä ym. 2024a, 2024b). Kirjoitimme kasvillisuuden ja hydrologian yhteyksistä tieteellisen artikkelin (Elo ym. 2024b). Lisäksi Aapo Jantunen (2024) kirjoitti aiheesta pro gradu -työnsä.
2. Skaalautuvat ja kustannustehokkaat menetelmät soiden ja Natura-luontotyyppien tilan seurantaan
  - Arvioimme, miten satelliittikaukokartoituksella voidaan seurata soiden tilaa ja ennallistamisen jälkeisiä muutoksia suokasvillisuudessa ja soiden märkyydessä (Luku 4). Kirjoitimme aiheesta viisi tieteellistä artikkelia (Isoaho ym. 2023, 2024a, 2024b, 2024d, Räsänen ym. 2024a). Lisäksi Aleksi Isoaho (2025) kirjoitti aiheesta väitöskirjan. Lisäksi Kaapro Keränen (2024), Saara Heikkinen (tekeillä) valmistelivat aiheeseen liittyen pro gradut. Teimme konseptuaalisen ehdotuksen satelliittikuvien käytöstä hoitoseurannassa (Isoaho ym. 2024c) ja automaattisen sovelluksen ennallistamisen jälkeisten alueellisten muutosten havainnointiin avosoilla (Isoaho ym. 2024d).

3. Mallinnustulokset, miten soiden ennallistaminen ja ilmastonmuutos tulevat vaikuttamaan suokasvilajien esiintymiseen
  - Arvioimme lajien levinneisyysmallien avulla, miten uhanalaisten suokasvilajien potentiaaliset elinympäristöt muuttuvat ajallisesti ja maantieteellisesti eri ilmasto- ja ennallistamiskenaarioissa (Luku 5). Aiheesta on valmisteltu tieteellinen artikkeli (Christiani ym. 2024).
4. Soiden ennallistamisen vaikutusalueen määrittely kaukokartoituksen avulla
  - Arvioimme, miten vaikutusalueen voi määrittellä sekä perinteisen ennallistamisen että vesienpalautuksen kohteille. Parhaiten toimiva menetelmä oli automatisoitu sovellus, jota esittelemme Luvussa 4.3 (Isoaho ym. 2024d). Lisäksi kehitimme menetelmiä maastohavaintojen ja eri kaukokartoitusaineistojen väliseen skaalaamiseen (Keränen 2024, Keränen ym. 2024, Heikkinen, julkaisematon).
5. Uudet työkalut ja menetelmät, jotka tukevat soiden ennallistamisen käytännön arviointityötä ja hoitoseurannan kehittämistä
  - Kehitimme automatisoidun sovelluksen, jota voi käyttää avosoiden märkyysmuutosten seurannassa (Isoaho ym. 2024d). Sovellusta on pilotoitu useassa eri tapahtumassa. Lisäksi olemme kirjoittaneet kaksi yleistajuista suomenkielistä artikkelia ennallistamisen seurannasta ja hoitoseurannan kehittämisestä (Isoaho ym. 2024c, Räsänen ym. 2024b).
6. Selkeät kehittämissuositukset, toimintamallit ja työkalut ministeriöiden ja muiden julkisten toimijoiden käyttöön.
  - Esitämme tämän raportin lopussa selkeitä kehittämissuosituksia. Lisäksi olemme kirjoittaneet kaksi suomenkielistä artikkelia ennallistamisen seurantaan ja sen kehittämiseen liittyen (Isoaho ym. 2024c, Räsänen ym. 2024b). Olemme myös viestineet tuloksistamme aktiivisesti eri tilaisuuksissa.
7. Uusi tutkimustieto soiden monitavoitteisen käytön suunnittelua varten
  - Koko hanke vastasi tähän tavoiteltuun tulokseen.



ennallistamisen jälkeen. Anturimittaukset on kalibroitu manuaalimittausten avulla neljä kertaa mittausjakson aikana. Manuaalimittausten kanssa samaan aikaan on kerätty suovesinäytteet ja kohteen alapuolisen uoman vesinäytteet, joista on mitattu useita vedenlaadun indikaattoreita. Tämän lisäksi kasvillisuusinventointien yhteydessä jokaisen kasvuruudun nurkassa olevasta putkesta on mitattu suon vedenpinnan taso.

### 3.2. Hydrologiset muutokset ja kasvillisuusmuutokset

Hydrologinen ennallistuminen on varsin nopeaa: vedenpinnan korkeus palautuu tavoitellulle tasolle lähes kaikilla kohteilla heti ennallistamisen jälkeisenä vuonna (Menberu ym. 2016). Kuitenkin ennallistetut suot ovat herkempiä kuivuusjaksoille kuin luonnontilaiset suot (Päkkilä ym. 2024a, 2024b). Ravinnekkuormitus lisääntyy välittömästi ennallistamisen jälkeen, mutta laskee seuraavina vuosina. Yleisesti ottaen hydrologinen ennallistuminen ja vedenlaadun vaikiintuminen on nähtävissä viiden vuoden jälkeen ennallistamisesta, mutta osalla kohteilla vedenlaatu ei ole palautunut vielä kymmenessäkään vuodessa (Päkkilä ym. 2024a, 2024b).

Kymmenen vuoden seurantajakson aikana useat ojituksesta aikoinaan hyötyneet lajit vähentyivät, kun taas ojituksesta kärsineet lajit runsastuivat. Ennallistetut kohteet eivät kuitenkaan kasvillisuudeltaan vastanneet luonnontilaisia soita. Muutos kohti luonnontilaista oli suurempaa korvilla sekä rehevillä rämeillä ja rehevillä avosoilla, mutta maltillisempaa karuilla rämeillä ja karuilla avosoilla (Elo ym. 2024a). Ennallistamisen vaikutus kasvillisuuteen vaihteli myös suotyypin sisällä ja jopa kohteiden sisällä (Haapalehto ym. 2017). Esimerkiksi joillain karuilla ennallistamiskohteilla kasvillisuus muuttui kohti ojitettuja verrokkeja. Ojitetuilla verrokeilla kasvillisuus muuttui entistäkin erilaisemmaksi luonnontilaisten soiden kasvillisuuteen verrattuna kymmenen vuoden seurantajakson aikana (Elo ym. 2024a).

### 3.3. Kasvillisuuden ja hydrologian väliset yhteydet

Tutkimme kasvillisuuden ja hydrologian välisiä yhteyksiä kymmenen vuoden seurantajaksolla 40 kohteella, jotka sisältyvät intensiiviseen hydrologiseen seurantaan, käyttäen Bayesilaiseen tilastotieteeseen perustuvia yhdistettyjä lajien levinneisyysmalleja (Hierarchical Modelling of Species Communities, HMSC, Ovaskainen ym. 2017) ja lineaarisia regressiomalleja. Kasvilajihavaintojen lisäksi hyödynsimme mallinnuksessa alku- (1.5.–15.6.) ja keskikesän (1.7.–15.8.) vedenpinnan tasoa sekä suovedenlaatua. Tavoitteenamme oli selvittää, (1) selittääkö ennallistamisen jälkeinen vedenpinnan taso kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuusmuutoksia, ja (2) minkä lajien yhteydet vedenpinnan tason kanssa ovat voimakkaimmat (Elo ym. 2024b).

Tulostemme perusteella 70 % kasvilajiyhteisöjen ennallistamisvasteesta selittyy vedenpinnan tasolla 2–5 vuotta ennallistamisen jälkeen, suotyypillä ja näiden interaktiolla. Sen sijaan ennallistamista edeltävä vedenpinnan taso ei ollut selkeästi yhteydessä ennallistamisvasteen kanssa. Vedenpinnan taso paransi lajikohtaisia ennusteita usealle lajille, joista suurin osa hyötyi ennallistamisesta. Myös vedenlaatumuuttujien ja kasvilajien välillä oli selkeitä assosiaatioita (Elo ym. 2024b).

Tulokset osoittavat, että heikko kasvillisuuden palautuminen pystytään joillain kohteilla selittämään vedenpinnan tason riittämättömällä nousulla. Tämä ei kuitenkaan päde kaikkiin kohteisiin. Siten voidaan todeta, että vedenpinnan tason palautuminen on edellytys, muttei takaa kasvillisuuden ennallistamista. Heterogeeniset kasvilaji–hydrologia-yhteydet indikoivat, että

ennallistamisessa tulee huomioida kohteiden väliset erot ja mahdolliset rajoitteet lajien leviämässä uusille kohteille (Elo ym. 2024b).

Tutkimme samalla mallinnusmenetelmällä myös kasviruutujen nurkkakaivoista mitattua vedenpinnan tasoaineistoa (Jantunen 2024). Tässä aineistossa on mukana kaikki seurantaverkoston kohteet, myös ojitetut kontrollit. Tämän mallinnuksen tulokset olivat linjassa edeltävien tulosten kanssa. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että vedenpinnan tason nostaminen ei näyttäisi onnistuvan karuilla rämeillä ja avosoilla, jotka eivät saa vettä ympäröiviltä valuma-alueilta, yhtä usein kuin rehevimmillä suotyypeillä. Aineiston heikkous on kuitenkin se, että mittauksia on tehty vain neljä kertaa kymmenen vuoden aikana, joten yksittäiset mittaukset ovat hyvin riippuvaisia kuluneen vuoden ja edellisten päivien säästä.

## 4. Kaukokartoitusseuranta

### 4.1. Johdanto

Kaukokartoituksen avulla on mahdollista seurata soilla tapahtuvia muutoksia kustannustehokkaasti ja automatisoidusti. Aiemmissa ennallistamisen seurantaan liittyvissä tutkimuksissa on keskitytty lähinnä soiden märkydessä tapahtuvien muutosten havainnointiin (esim. Räsänen ym. 2023). Tässä hankkeessa keskityimme pääasiassa kasvillisuusmuutosten seurantaan, mutta teimme joitain jatkotarkasteluja märkyysseurantaan liittyen. Laajemmin märkyysseurannasta on kirjoitettu esimerkiksi edellisessä raportissamme (Räsänen ym. 2023), jossa käsitelimme jo osittain EkoSuo-hankkeessa tehtyä työtä.

### 4.2. Kasvillisuuden pitkäaikaisseuranta

Kasvillisuuden pitkäaikaisseurannassa hyödynsimme soiden ennallistamisen seurantaverkostoaineistoa (Luku 3.1) kahdessa erillisessä analyysissä: (1) kasvillisuusgradienttien muutosten seuranta ja (2) yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien muutosten seuranta. Molemmissa analyyseissä hyödynsimme optisia satelliittikuvia (Euroopan avaruusjärjestön Sentinel-2-aineistot ja Yhdysvaltain avaruusjärjestön Landsat-aineistot). Laskimme satelliittikuvista useita eri piirteitä, jotka on aiemmissa tutkimuksissa todettu hyödyllisiksi soilla tapahtuvien muutosten analysoinnissa. Laskimme satelliittikuvista edustavat mediaanikuvat alkukokesän (1.5.–15.6.) ja keskikokesän (1.7.–15.8.) ajankohdille kuvaamaan tilanteita ennen ennallistamista sekä 2, 5 ja 10 vuotta ennallistamisen jälkeen eli kasvillisuusinventointien ajankohdille. Jokaisen kohteen kasvillisuuden arvioimme keskiarvoistamalla kohteen kymmenen kasvillisuusruudun havainnot (Osio 3.1) ja laskimme satelliittikuvapiirteet 15 metrin säteisen ympyrän alueelta, jonka keskellä kasvillisuusruudut sijaitsivat.

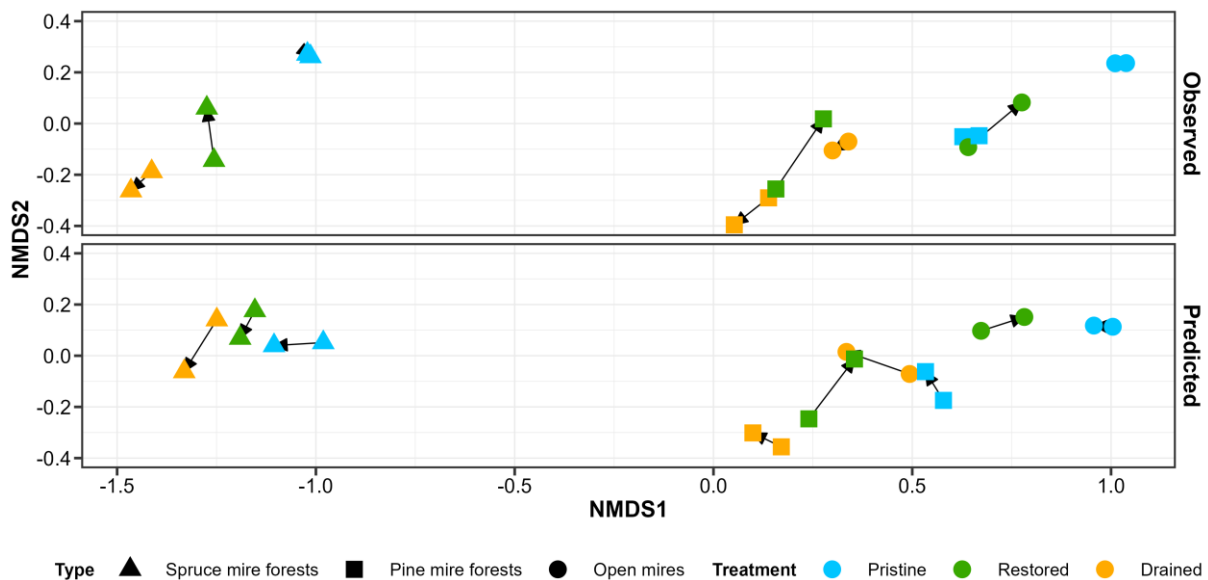
#### 4.2.1. Kasvillisuusgradienttien seuranta

Laskimme aluksi ennallistamisverkoston kasvillisuushavainnoista suotyyppikohtaisesti (korvet, rämeet, avosuot) ei-metrisen moniulotteisen skaalauksen (non-metric multidimensional scaling, NMDS) avulla kaksi akselia, jotka kertoivat suokasvillisuuden jakautumisesta märkyys- ja ravinteisuusgradientteille. Tämän jälkeen ennustimme kasvillisuusgradientteja ja niillä tapahtuvia muutoksia ennallistetuilla, luonnontilaisilla ja ojitetuilla kohteilla random forest -koneoppimisregressiolla, jossa selittävinä muuttujina olivat satelliittikuvapiirteet. Tavoitteenamme oli määrittää optimaaliset satelliittikuvapiirteet sekä arvioida kasvillisuusgradienttien ja niiden muutosten ennustettavuutta (Isoaho ym. 2024b).

Tulostemme mukaan suotyyppien välillä on eroja tärkeimmissä piirteissä. Tärkeimpiä muuttujia olivat esimerkiksi punaisen ja lähi-infrapuna-alueen heijastavuus sekä eri heijastavuusalueita yhdistelevät spektri-indeksit. Sekä alkukokesän että keskikokesän olosuhteita kuvaavat piirteet osoittautuivat tärkeiksi. Pystyimme ennustamaan märkyksestä kertovaa gradienttia ja siinä tapahtuvia ennallistamisen jälkeisiä muutoksia hyvin etenkin avosoilla ja rämeillä, mutta näiden suotyyppien ravinteisuusgradientin sekä korprien kasvillisuusgradienttien ennustaminen ei toiminut yhtä hyvin (Kuva 2; Isoaho ym. 2024b).

Tuloksemme kertovat, että satelliittikuvien avulla voidaan osittain ennustaa karkean tason kasvillisuusmuutoksia avoimilla ja vähäpuustoisilla soilla. Lisäksi mallien toimivuudessa sekä

tärkeimmissä satelliittikuvapiirteissä on eroja suotyyppien ja -kohteiden välillä. Tuloksemme osoittavat myös multitemporaalisen kaukokartoituksen hyödyt: suo näyttää hyvin erilaiselta alkukesän kuin keskikesän aikaan, joten malleissa on hyvä hyödyntää kasvukauden eri aikaa otettuja satelliittikuvia. Myös muiden ajankohtien tai lyhempien kasvukauden hetkien kuvien hyödyntämisestä voi harkita tulevaisuudessa tutkimuksissa. Ongelmia tuottaa kuitenkin pilvipeite, jonka takia hyvälaatuisia kuvia ei useinkaan ole saatavilla loppukesästä ja syksyltä tai samalta tarkalta kasvukauden hetkeltä (Isoaho ym. 2024b).

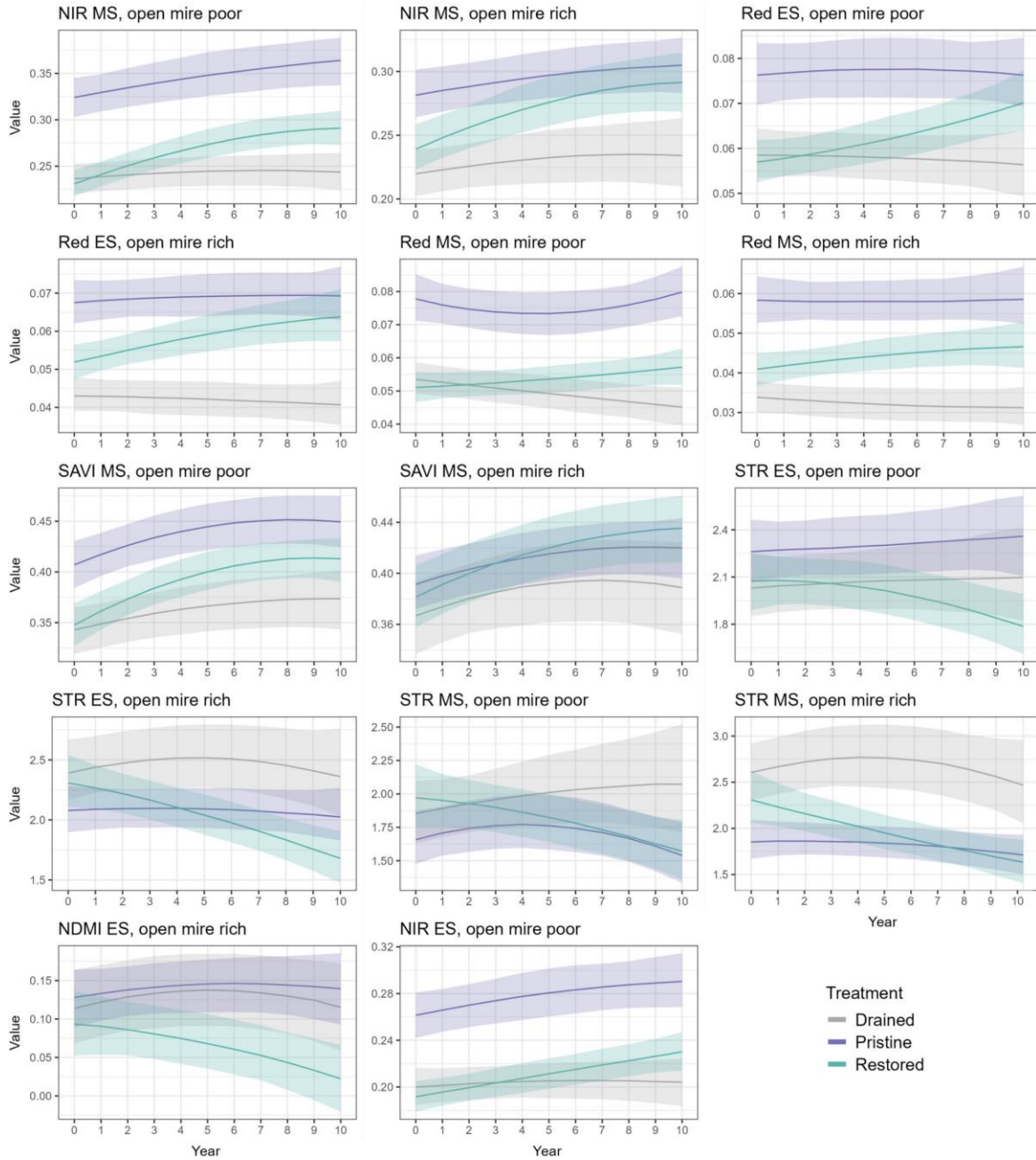


**Kuva 2.** Kaksilulotteinen kuvaaja maastoaineistojen perusteella havaituista (observed) ja satelliittikuvien avulla ennustetuista (predicted) muutoksista kasvillisuusgradienilla (märkytydestä kertova NMDS1 ja ravinteisuudesta kertova NMDS2). Pisteet kertovat keskiarvoiset NMDS-akselien arvot eri suotyypeille (korvet, spruce mire forests; rämeet, pine mire forests; avosuot, open mires) ja käsittelyille (luonnontilainen, pristine; ennallistettu, restored; ojitettu, drained) seurantajakson alussa ja lopussa. Kuvan lähde: Isoaho ym. (2024b) (CC BY 4.0 -lisenssi).

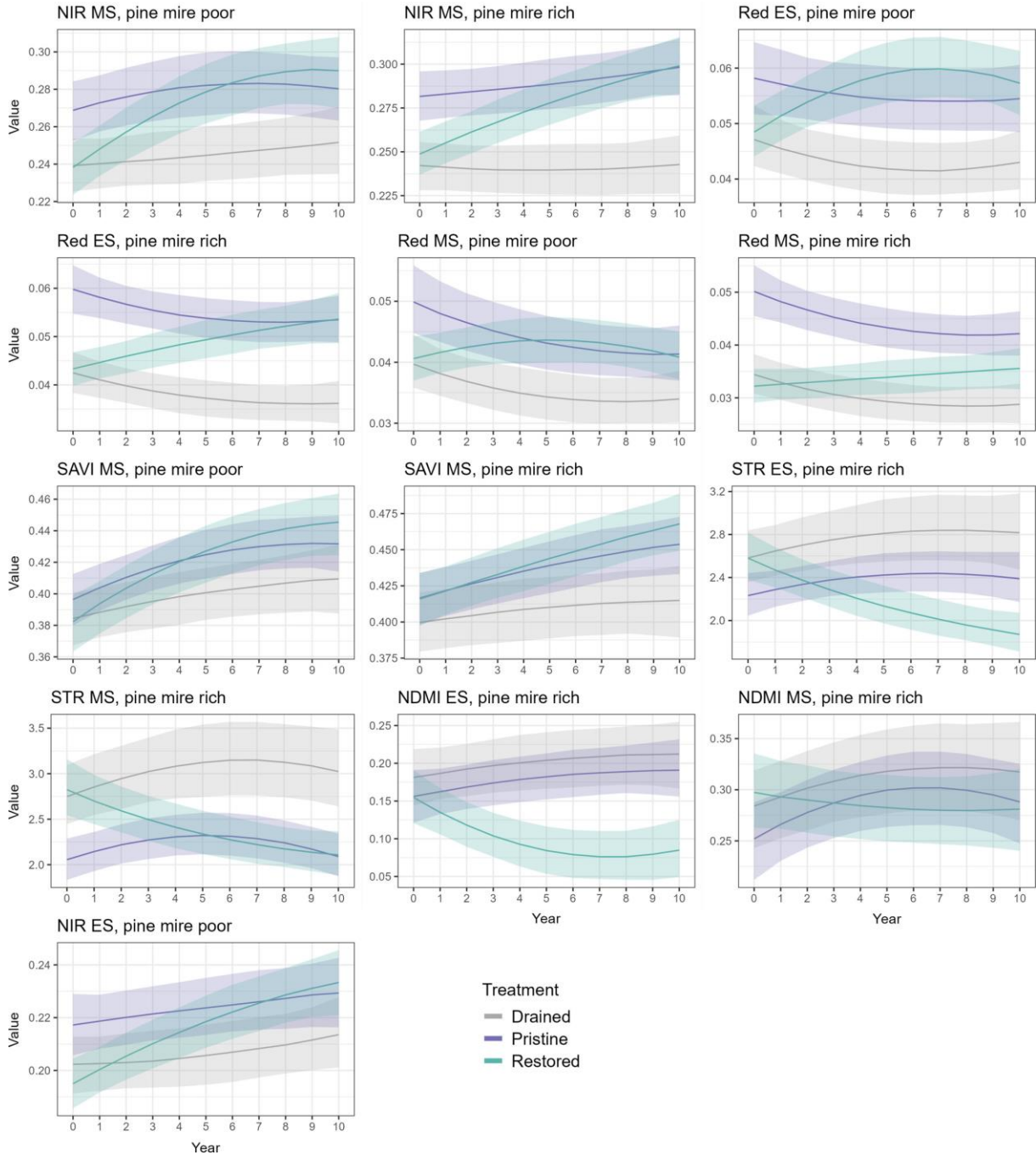
#### 4.2.2. Yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten ryhmien seuranta

Yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien seurannassa hyödynsimme HMSC-mallinnusta. Lisäsimme satelliittikuvapiirteet mallien selitettäviksi muuttujiksi. Tämän avulla pystyimme tutkimaan, (1) miten satelliittikuvapiirteet muuttuvat ennallistamisen jälkeen, (2) parantavatko satelliittikuvapiirteet yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien ennusteita ja (3) millaisia yhteyksiä satelliittikuvapiirteiden ja yksittäisten kasvilajien tai toiminnallisten lajiryhmien välillä on (Räsänen ym. 2024a).

Tulostemme mukaan etenkin punaisen ja lähi-infrapuna-alueen heijastavuus kasvaa ennallistamisen jälkeen avosoilla ja rämeillä ojitettuja soita vastaavista arvioista kohti luonnontilaisten soiden arvoja (Kuvat 3 ja 4). Muilla testatuilla muuttujilla (lyhytaaltoisen infrapunan muunnettu heijastavuus STR, normalisoitu kosteusindeksi NDMI, maaperämuokattu kasvillisuusindeksi SAVI) ja suotyypeistä korvilla tulokset eivät olleet yhtä selkeitä. Satelliittikuvapiirteet paransivat yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien ennusteita pääasiassa marginaalisesti. Vastaavasti löysimme heikkoja yhteyksiä satelliittikuvapiirremuutosten ja kasvillisuusmuutosten välille (Räsänen ym. 2024a).



**Kuva 3.** Satelliittikuvapiirteiden muutokset ajassa ojitetuilla (drained), luonnontilaisilla (pristine) ja ennallistetuilla (restored) avosoilla, jotka on jaettu reheviin (rich) ja karuihin (poor). Kuvajaajat esitetään vain niille satelliittikuvapiirteille, jotka reagoivat ennallistamiseen positiivisesti tai negatiivisesti suurella todennäköisyydellä. Muuttujat: lähi-infrapunarefleksanssi (near infrared, NIR), punainen reflektanssi (Red), soil-adjusted vegetation index (SAVI), muunnettu lyhytaaltoinen infrapunarefleksanssi (shortwave infrared transformed reflectance, STR), normalisoitu kosteusindeksi (normalized difference moisture index, NDMI). Kaudet: alkukesä (ES), keskipäivä (MS). Kuvan lähde: Räsänen ym. (2024a) (CC BY 4.0 -lisenssi).



**Kuva 4.** Satelliittikuvapiirteiden muutokset ajassa ojitetuilla (drained), luonnonlaisilla (pristine) ja ennallistetuilla (restored) rämeillä, jotka on jaettu reheviin (rich) ja karuihin (poor). Kuvaajat esitetään vain niille satelliittikuvapiirteille, jotka reagoivat ennallistamiseen positiivisesti tai negatiivisesti suurella todennäköisyydellä. Muuttujat: lähi-infrapunarefleksansi (near infrared, NIR), punainen reflektanssi (Red), soil-adjusted vegetation index (SAVI), muunnettu lyhytinfrapunarefleksansi (shortwave infrared transformed reflectance, STR), normalisoitu kosteusindeksi (normalized difference moisture index, NDMI). Kaudet: alkukesä (ES), keskikesä (MS). Kuvan lähde: Räsänen ym. (2024a) (CC BY 4.0 -lisenssi).

Tulosten perusteella punaisen ja lähi-infrapunan heijastavuudessa tapahtuvia muutoksia voidaan käyttää ennallistumisen indikaattoreina avoimilla ja vähäpuustoisilla soilla. Heijastavuudessa tapahtuvat muutokset johtuvat todennäköisesti etenkin puuston poistosta, mutta myös märkyysmuutoksista, ojen tukkimisesta ja vähittäisestä kasvittumisesta sekä kenttä- ja

pohjakerroksen kasvillisuusmuutoksista. Kasvillisuusmuutosten rooli heijastavuusmuutosten selittäjinä on tämän tutkimuksen perusteella vähäinen, mutta toisaalta kasvillisuusgradienttitulokset (Osio 4.2.1) kertovat, että kasvillisuusmuutokset näkyvät satelliittikuvapiirteissä. Osataan kasvillisuus- ja satelliittikuvapiirremuutosten välinen kohtalaisen epämääräinen yhteys johtuu mittakaavaerosta: satelliittikuvapiirteet on laskettu noin 700 m<sup>2</sup> kokoiselta alueelta, josta kasvuruudut kattavat vain 10 m<sup>2</sup>. On mahdollista, että kasvillisuusmuutosten rooli satelliittikuvapiirremuutosten selittäjänä kasvaa ajan kuluessa, kun ennallistetun suon puusto- ja märkyysolosuhteet vakiintuvat sekä kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuusmuutokset jatkuvat (Räsänen ym. 2024a).

### 4.3. Vaikutusalueen määrittäminen

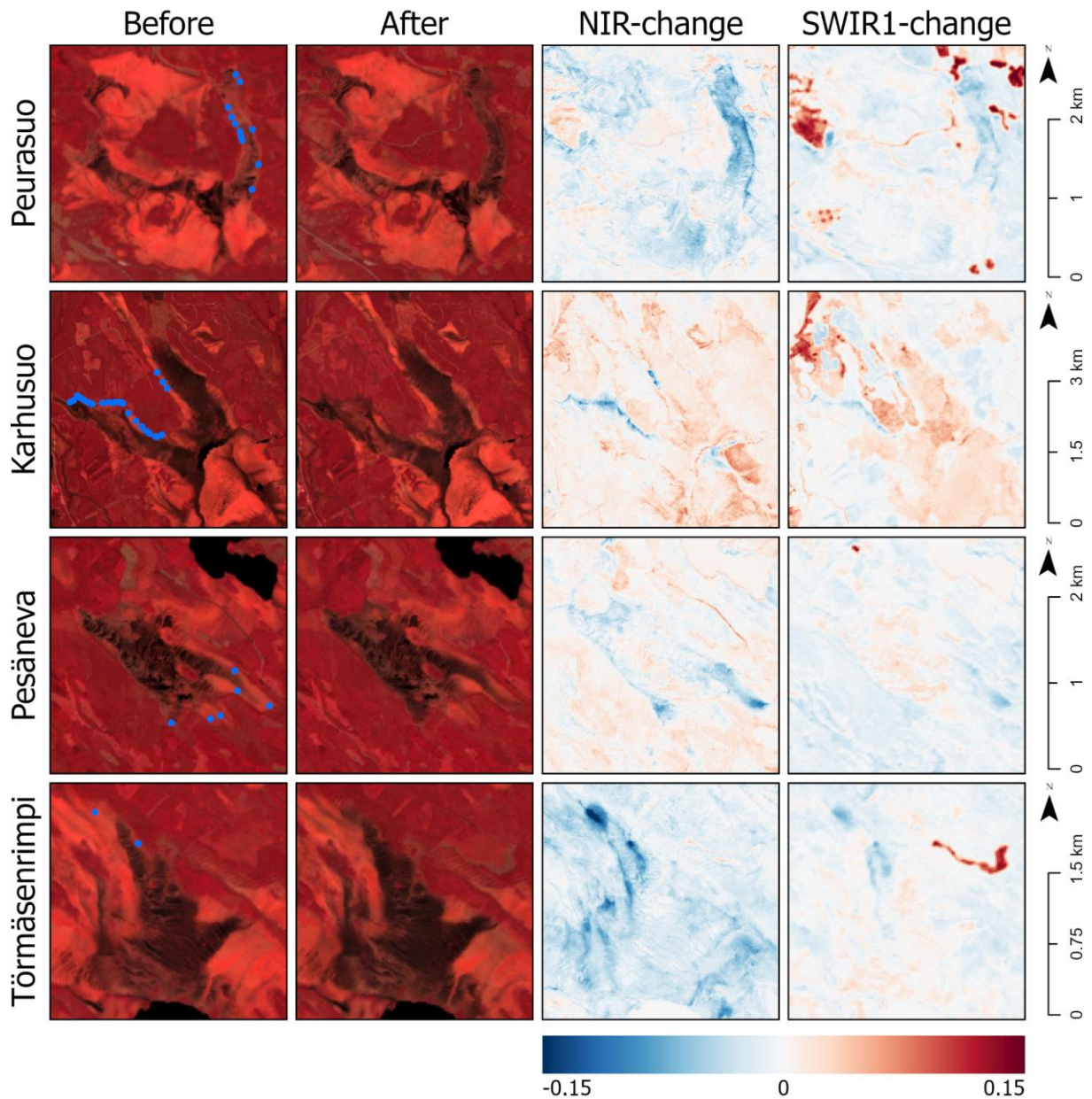
Tutkimuksemme ovat osoittaneet, että optisten satelliittikuvien ja koneoppimismallien avulla voidaan ennustaa suon vedenpinnan tasossa tapahtuvia muutoksia etenkin avoimilla soilla (Räsänen ym. 2022, Isoaho ym. 2024a). Sen sijaan synteettisen apertuurin (SAR) tutka-aineistot parantavat vedenpinnan tason ennusteita vain hieman. Myöhemmässä tutkimuksemme pystyimme näyttämään, miten vedenpinnan taso nousee alueellisesti ennallistamisen ja vesienpalautuksen jälkeen (Isoaho ym. 2024a). Tämän seurauksena kokeilimme hankkeen aikana ja varsinkin sen loppuvaiheessa eri menetelmiä vesienpalautuskohteilla ja avosoilla tapahtuvaan ennallistamistoimenpiteiden vaikutusalueen mallinnukseen. Mallinnuksen tavoitteena oli rajata suolta se alue, jolla vedenpinnan taso nousee ennallistamisen jälkeen.

Kokeilimme useita eri tapoja, joilla rajauksen voi tehdä automaattisesti, mutta emme saaneet automaattitoimenpiteitä toimimaan riittävän luotettavasti. Tämän takia päädyimme kehittämään automatisoidun Google Earth Engine -pohjaisen satelliittikuvasovelluksen (testiversio osoitteessa <https://aleksiisoaho.users.earthengine.app/view/optical-satellite-before-after-visualisation>, Isoaho ym. 2024d, Kuva 5), jolla vedenpinnan tason muutostarkastelua voi tehdä käyttäjätasoisesti ja jolla voi arvioida manuaalisesti vaikutuksen laajuutta. Sovelluksessa käyttäjä määrittää tarkasteltavan kohteen ja ensimmäisen ennallistamisvaikutusvuoden. Sovellus laskee automaattisesti edustavat, usealta vuodelta keskiarvoistetut satelliittikuvat tilanteille ennen ja jälkeen ennallistamisen sekä ennallistamisen aiheuttaman muutoksen valittuihin satelliittikuvapiirteisiin. Muutoskuvien avulla voi arvioida, vaikuttaako ennallistaminen vedenpinnan tasoon toivotusti. Sovellus auttaa suuntaamaan maastotöitä niille alueille, joilla ennallistamisen vaikutukset näyttävät olevan epätoivottuja tai joilla tarvitaan varmennusta satelliittikuvahavaintoihin (Isoaho ym. 2024c, 2024d).

Vaikutusalueen määrittämiseen liittyen olemme myös tutkineet, miten avosoiden märkyysolosuhteita voidaan skaalata mittakaavasta toiseen. Havaitimme, että droonikuvien ja maastovahaintojen avulla määritettyä rimpipinnan peittävyttä voidaan skaalata satelliittikuvien avulla maantieteellisesti laajemmalle alueelle (Keränen 2024, Keränen ym. 2024). Vastavasti suon pintamärkyyttä kuvaavaa OPTRAM-satelliittikaukokartoitusmallia voidaan skaalata tarkempaan mittakaavaan drooniaineistojen avulla (Heikkinen, julkaisematon).

Koska satelliittikaukokartoitus soveltuu lähinnä avoimien ja vähäpuustoisten soiden seurantaan, emme ole saaneet vaikutusalueen mallinnusta toimimaan runsaspuustoisilla soilla, joilla maanpintaa ei näy kuvissa. Vastavasti kasvillisuuden ja ekologisten muutosten vaikutusalueen mallinnukseen tarvittaisiin alueellisesti kattavamaa maastohavaintoaineistoa kasvillisuusmuutoksista. Metsähallituksen ennallistamisen seurantaverkoston kymmenen ruutua per

suokohde eivät riitä luotettavien kaukokartoitusennustemallien kalibrointiin ja validointiin ja lisäksi ne ovat liian pienellä alueella suon sisällä.



**Kuva 5.** Esimerkki vesienpalautuksen alueellisista vaikutuksista neljällä avosuokohteella (Isoaho ym. 2024d). Soilla tarkastellaan edustavia ennen (before) ja jälkeen (after) väärävarikuvia, sekä niiden välistä lähi-infrapunakanavan (NIR) ja lyhytinfrapunakanavan (SWIR1) muutosta. Lisääntynyt märkyys avosoilla näkyy näillä aallonpituuskanavilla negatiivisena muutoksena. Siniset pisteet osoittavat vesienpalautusojien sijainteja. Kehitetyllä Google Earth Engine -sovelluksella voidaan tulostaa samat kuvat samoilla väriasetuksilla.

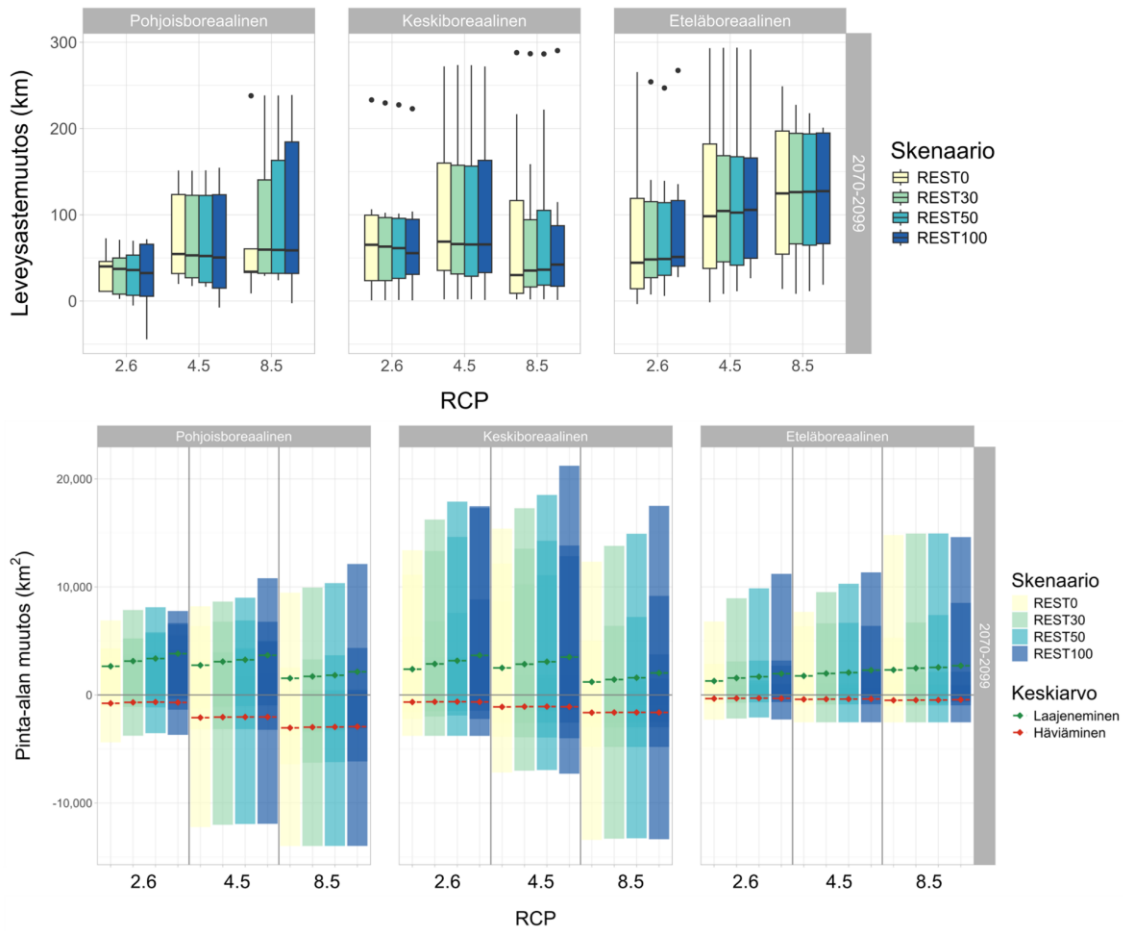
## 5. Ennallistaminen muuttuvissa ilmasto-olosuhteissa

Arvioimme lajien levinneisyysmallien avulla, miten ilmastonmuutos- ja ennallistamisskenaariot tulevat vaikuttamaan uhanalaisten kasvilajien potentiaaliin elinympäristöihin tulevaisuudessa. Teimme maanlaajuisen MaxEnt-koneoppimismallinnuksen 25 hehtaarin hilassa lajikohdaisesti 24 suokasvilajille, joilla oli yli 10 havaintoa 2000-luvulla (Hyvärinen ym. 2019). Mallin selittävinä muuttujina olivat ilmastosta, soiden ojituksesta, kallioperästä, topografiasta, suotyypistä ja puustosta kertovat piirteet, jotka laskettiin Ilmatieteen laitoksen, Suomen ympäristökeskuksen, Maanmittauslaitoksen, Luonnonvarakeskuksen ja Geologian tutkimuslaitoksen aineistoista. Teimme ennusteet lajeille suotuisista elinympäristöistä kolmelle eri ilmastoskenaariolle (RCP2.6, 4.5 ja 8.5), neljälle eri ennallistamisskenaariolle (metsäojitetuista soista ennallistetaan 0, 30, 50 ja 100 %) ja kahdelle eri ajanjaksolle (2040–2069 ja 2070–2099). Mallinnuksessa oletettiin, että ennallistettu suo vastaa elinympäristöltään luonnontilaista suota (Christiani ym. 2024).

Tulostemme perusteella ilmasto- ja ojitustietomuuttujat ovat tärkeimmät ennustajat lajien potentiaalisille elinympäristöille. Tämän perusteella voi olettaa, että ilmastossa, ojituksessa ja ennallistamisessa tapahtuvat muutokset vaikuttavat lajien levinneisyyteen. Tulevaisuuskenaarioennusteissa selvisi, että ilmastonmuutos siirtää lajien potentiaalisia elinympäristöjä kohti pohjoista (Kuva 6). Lisäksi lajit menettävät nykyisiä elinympäristöjään. Muutokset ovat suurimpia voimakkaimman lämpenemisen skenaariossa ja myöhemmällä ajanjaksolla, mutta näkyviä myös heikomman lämpenemisen skenaariossa. Ennallistaminen auttaa lisäämään lajeille potentiaalista elinympäristöä ja vähentää lajien tarvetta siirtyä kohti pohjoista. Siten ennallistaminen voi toimia proaktiivisena sopeutumisstrategiana (Christiani ym. 2024).

Oletuksemme, että ennallistettu suo vastaa elinympäristöltään luonnontilaista suota on karkea yleistys, sillä ennallistaminen muuttaa suoelinympäristöä hitaasti ja varsinkin kasvillisuusmuutokset vievät aikaa. Siten ennallistamisskenaarioiden ennusteet ovat varsin optimistisia: todennäköisesti 100 % ennallistamisskenaariolla vain pieni osa elinympäristöstä palautuu uhanalaisille kasvilajeille suotuisaksi (Christiani ym. 2024).

MaxEnt-ennusteissa epävarmuutta tuovat myös mahdollisesti puutteelliset lajihavainnot. Lajihavainnot painottuvat ojituksen läheisiin alueisiin ja laajoilta ojittamattomilta soilta ei välttämättä ole lajihavainnoja. Tämä voi johtua siitä, että näitä alueita ei ole kattavasti inventoitu. Käytännössä tämä aiheutti ongelmia ennustettaessa potentiaalisen elinympäristön muutoksia 100 % ennallistamisskenaariossa, sillä aineistossa oli melko vähän havainnoja kasvilajeista niistä 25 hehtaarin ruuduista, joissa ei ollut ollenkaan ojitettua suota (Christiani ym. 2024).



**Kuva 6.** Eri ilmastonmuutos- (RCP 2.6, 4.5 ja 8.5) ja ennallistamisskenaarioiden (0 %, 30 %, 50 % ja 100 % ennallistaminen (REST)) vaikutukset uhanalaisten suokasvilajien potentiaaliin elinympäristöihin ajanjaksolla 2070–2099 (Christiani ym. 2024). Yläriivi: potentiaalisen elinympäristön maantieteellisen keskikohdan muutos pohjois-eteläsuuntaisesti. Alarivi: uusi (positiiviset arvot) ja menetetty (negatiiviset arvot) potentiaalinen elinympäristö verrattuna nykytilanteeseen. Kuvaajat kuvaavat kaikkien lajien tilannetta siten, että laatikot ja viikset kuvaavat hajontaa. Lajit on jaettu niiden tämänhetkisen pääasiallisen esiintymisen mukaan pohjois-, keski- ja eteläboreaalisiin lajeihin.

## 6. Johtopäätökset

Tulostemme perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen ennallistettujen soiden hydrologia on palautunut lähelle luonnontilaa, mutta ennallistetut suot eivät ole yhtä resiliентtejä kuivuusjaksoille kuin luonnontilaiset suot.
- Kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen kasvillisuus on muuttunut kohti luonnontilaista suokasvillisuutta, mutta ei vastaa sitä.
- Hydrologinen ennallistuminen on edellytys kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuuden palautumiselle kohti luonnontilaa, mutta ei takaa sitä.
- Satelliittikaukokartoitus soveltuu hyvin ennallistamisen jälkeen tapahtuvien muutosten seurantaan avoimilla ja vähäpuustoisilla soilla, mutta huonosti puustoisten soiden seurantaan.
- Etenkin märkyyden seuranta onnistuu satelliittikaukokartoituksen avulla hyvin ja kaukokartoitusaineistojen avulla voidaan määrittää ennallistamisen vaikutusalue märkyyden leviämisen osalta.
- Kehittämäämme automatisoitua satelliittikuvasovellusta voidaan käyttää ennallistamistoimenpiteiden toimivuuden arviointiin ja suuntaamaan hoitoseurannan maastotöitä.
- Satelliittikaukokartoitusta voidaan käyttää myös kasvillisuusmuutosten ennustamiseen, mutta kasvillisuusmuutosten heterogeenisyyden takia niiden ennustaminen ei ole suoraviivaista.
- Kasvillisuusmuutosten vaikutusalueen määrittelyä varten tarvittaisiin alueellisesti kattavia maastohavaintoaineistoja sekä mahdollisesti myös pitkäaikaisempaa seuranta-ennallistamiskohteilta.
- Lajien levinneisyysmalleja voidaan käyttää arvioimaan suolajien potentiaalisia elinympäristöjä tulevaisuuden ilmasto- ja ennallistamiskenaarioissa.
- Mallinnustemme perusteella ilmastonmuutos tulee voimakkaasti muuttamaan uhanalaisten suokasvilajien potentiaalisia elinympäristöjä.
- Ennallistamisen avulla voidaan luoda lisää uhanalaisille lajeille suotuisia elinympäristöjä, joten ennallistaminen toimii ilmastonmuutoksen sopeutumisstrategiana.

Yleisemmällä tasolla tuloksemme osoittavat pitkäaikaisten ennallistamisen seuranta-aineistojen tärkeyden ennallistamisen vaikutusten ja luonnon tilan seurannassa. Maastohavainnot ovat oleellisia, jotta saadaan objektiivista ja tarkkaa tietoa luonnossa tapahtuvista muutoksista. Kaukokartoitusseuranta on kustannustehokasta. Vaikka se ei voi korvata maastossa tapahtuvaa seuranta-aineistoa, sen avulla voidaan skaalata maastohavainnot laajemmille alueille.

Ennallistamisen seuranta-aineistoa tulee jatkaa ja laajentaa etenkin seuraavien jatkotutkimustarpeiden osalta:

1. Kymmenen vuotta on lyhyt aika ennallistamisen vaikutusten arviointiin etenkin kasvillisuusmuutosten osalta. Pidempi seurantajakso on välttämätön, jotta voitaisiin arvioida ennallistamisen kokonaisvaikutuksia kasvillisuuteen ja voidaanko näitä muutoksia seurata kaukokartoituksen avulla.
2. Maastohavainnot ennallistetun suon kasvillisuudesta keskittyvät pienelle alueelle. Kattavammat maastohavaintoaineistot laajemmalta alueelta, kaukokartoitusseurannan

tueksi mahdollistaisivat ennallistamisen vaikutusten laajuuden arvioinnin. Drooniaineistoja voidaan hyödyntää skaalaamaan ja tukemaan maastohavaintoja.

3. Kasvillisuuden kaukokartoitusseurannassa tulee keskittyä kehittämään kaukokartoitettavien ja ekologisesti relevantteja indikaattoreita. Kehittämistyötä tulee tehdä poikkitieteellisesti yhdistäen kaukokartoitus-, suoekologia- ja käytännön ennallistamisosajien tietämystä.
4. Ennallistamisen seuranta tulee laajentaa myös muille kuin tähän asti tutkituille suotyypeille. Esimerkiksi rimpinevoille tarvitaan lisää seuranta.
5. Toista keskeistä laajaa ennallistamisen seuranta-aineistoa eli Metsähallituksen Luontopalveluiden hoitoseuranta-aineistoa ei ole vielä hyödynnetty ennallistamisen vaikutusten seurannassa. Aineistoa voi käyttää esimerkiksi ennallistamisen tekniseen onnistumiseen vaikuttavien tekijöiden analysoinnissa, kunhan aineiston puutteet, kuten subjektiivisuus, huomioidaan.
6. Ilmastonmuutos vaikuttaa voimakkaasti soiden hydrologiaan ja kasvillisuuteen. Tarvitaan lisää tutkimusta, millaisia ennallistamisen ja ilmastonmuutoksen yhteisvaikutukset ovat.
7. Muuttuvassa ilmastossa suot ovat etenkin Etelä-Suomessa hydrologisesti aktiivisia talviaikana, joten jatkossa mittauksia tulee tehdä läpi vuoden ainakin osalla seurantakohteista.
8. Tarvitaan poikkitieteellistä ja aikaisempaa tietämystä monipuolisesti hyödyntävää tutkimusta siitä, missä ja millä kohteilla (a) ennallistaminen tulee todennäköisesti onnistumaan ja (b) ennallistamisen ympäristölliset ja yhteiskunnalliset vaikutukset ovat mahdollisimman positiivisia.

Jatkoseuranta- ja -tutkimustarpeiden tutkimustuloksemme tukevat EU:n ennallistamisasetuksen kunnianhimoisen toimeenpanon tarvetta etenkin soiden osalta. Ennallistamisen seuranta-verkoston kymmenvuotisseurannan tulokset osoittavat, että aktiiviset ennallistamistoimet ovat välttämättömiä suoluonnon tilan parantamiseksi ja ilmastonmuutoksen vaikutuksiin varautumiseksi.

## Kiitokset

Kiitämme hankkeen ohjausryhmää: Iida Höyhtyä, Inka Keränen, Anne Ojala ja Elisa Vallius. Lisäksi kiitämme tutkimusartikkelien kanssakirjoittajia ja muita yhteistyötahoja: Juha Aalto, Jan Hjort, Masoud Irannezhad, Valtteri Jokinen, Pasi Korpelainen, Timo Kumpula, Meseret Menberu, Jenni Niku, Otso Ovaskainen, Timo P. Pitkänen, Anna-Kaisa Ronkanen, Antti Sallinen, Teemu Tahvanainen, Sara Taskinen, ja Anne Tolvanen. Kiitämme myös tutkijoita, asiantuntijoita ja kenttätöntekijöitä, jotka ovat osallistuneet valtakunnallisen soiden ennallistamisen seurantaverkoston kehittämiseen ja ylläpitoon. Hanketta on rahoittanut ympäristöministeriön BIOMON-ohjelma (VN/14352/2022).

## Viitteet

- 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
- Christiani, P., Isoaho, A., Elo, M., Päckilä, L., Marttila, H., Aalto, J., Hjort, J., Tolvanen, A., Rana, P. & Räsänen, A. 2024. The impact of restoration and climate change on the potential habitats of red-listed peatland plant species. *Käsikirjoitus*.
- Elo, M., Kareksela, S., Ovaskainen, O., Abrego, N., Niku, J., Taskinen, S., Aapala, K. & Kotiaho, J.S. 2024a. Restoration of forestry-drained boreal peatland ecosystems can effectively stop and reverse ecosystem degradation. *Communications Earth & Environment* 5: 680. DOI: 10.1038/s43247-024-01844-3
- Elo, M., Isoaho, A., Korhonen, P., Marttila, H., Ovaskainen, O., Päckilä, L., Rana, P. & Räsänen, A. 2024b. Effective hydrological restoration is a prerequisite, but not a guarantee, for the recovery of vegetation communities in boreal forestry-drained peatlands. *Lähetetty arvioitavaksi*.
- Elo, M., Kareksela, S., Ovaskainen, O., Abrego, N., Niku, J., Taskinen, S., Aapala, K. & Kotiaho, J. 2024c. Restoration of forestry-drained boreal peatland ecosystems can effectively stop and reverse ecosystem degradation [Aineisto]. *Zenodo*. DOI: 10.5281/zenodo.13929067
- 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
- Hyvärinen, E. & Aapala, K. (toim.) 2009. Metsien ja soiden ennallistamisen sekä harjumetsien paahdeympäristöjen hoidon seurantaohje. *Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B* 118. ISBN: 978-952-446-728-5 (pdf). 114 s.
- Isoaho, A. 2025. Remote sensing of post-restoration changes in hydrology and vegetation in boreal peatlands. *Väitöskirja. Acta Universitatis Oulensis C Technica* 988.
- 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* 33: 101059. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101059
- Isoaho, A., Ikkala, L., Päckilä, L., Marttila, H., Kareksela, S. & Räsänen, A. 2024a. Multi-sensor satellite imagery reveals spatiotemporal changes in peatland water table after restoration. *Remote Sensing of Environment* 306: 114144. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114144
- Isoaho, A., Elo, M., Marttila, H., Rana, P., Lensu, A., & Räsänen, A. 2024b. Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery. *Science of the Total Environment* 957: 177697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177697
- Isoaho, A., Ikkala, L., Räsänen, A. 2024c. Satelliittikuvien muutostulkinta aapasoiden ennallistamisen hoitoseurannan priorisoinnissa. *Lähetetty arvioitavaksi*.

- Isoaho, A., Pitkänen, T.P. ... & Räsänen. 2024d. A. An automated Google Earth Engine application for detecting restoration impacted areas in open peatlands. Käsikirjoitus.
- Jantunen, A. 2024. Vedenpinnan tason vaikutus ennallistettujen soiden kasvillisuuden kehittymiseen. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto.
- Keränen, K. 2024. Modelling aapa mire flark coverage with multi-resolution remote sensing data. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto.
- 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.
- Menberu, M.W., Tahvanainen, T., Marttila, H., Irannezhad, M., Ronkanen, A.K., Penttinen, J. & Kløve, B. 2016. Water-table-dependent hydrological changes following peatland forestry drainage and restoration: Analysis of restoration success. *Water Resources Research* 52(5): 3742–3760. DOI: 10.1002/2015WR018578
- Ovaskainen, O., Tikhonov, G., Norberg, A., Blanchet, F.G., Duan, L., Dunson, D., Roslin T. & Abrego, N. 2017. How to make more out of community data? A conceptual framework and its implementation as models and software. *Ecology Letters* 20(5): 561–576. DOI: 10.1111/ele.12757
- Päkkilä, L., Marttila, H., Korhonen, P., Ikkala, L., Kareksela, S., Tahvanainen, T., Menberu, M.W., Irannezhad, M. & Ronkanen, A.-K., 2024a. Leaching from restored peatlands: Is there a connection between porewater and runoff quality? Lähetetty arvioitavaksi.
- Päkkilä, L., Marttila, H., Kareksela, S., Korhonen, P., Menberu, M.W. & Ronkanen, A.-K. 2024b. Long-term changes in restored peatland hydrology. Käsikirjoitus.
- 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., Isoaho, A., Ikkala, L., Hautala, R., Bigler, O., Ahonen, S., Keränen, K. & Kareksela, S. 2023a. Ennallistettujen soiden tilan seuranta : Kokemuksia vesienpalautuksen seurannasta ja kaukokartoitusmenetelmistä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 112/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 57 s.
- Räsänen, A., Kekkonen, H., Lehtonen, H., Miettinen, A., Wejberg, H., Kareksela, S., Tzemi, D., Aro, L., Kuningas, S., Louhi, P. & Ruuhijärvi, J. 2023b. Euroopan unionin ennallistamisasetusehdotuksen luontotyyppi- ja turvemaatavoitteiden vaikutukset Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 76 s.
- Räsänen, A., Jantunen, A., Isoaho, A., Ikkala, L., Rana, P., Marttila, H. & Elo, M. 2024a. Changes in satellite-derived spectral variables and their linkages with plant species after peatland restoration. *Restoration Ecology*. DOI: 10.1111/rec.14338
- Räsänen, A., Elo, M., Isoaho, A., Päkkilä, L., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Ikkala, L., Keränen, K. & Kareksela, S. 2024b. Soiden ennallistamisen seuranta: mitä olemme oppineet ennallistamisen hydrologisista vaikutuksista ja kasvillisuusvaikutuksista? *Luonnon tutkija* 4/2024: 23–35.



**Löydät meidät  
verkosta**

**luke.fi**



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki