

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.

Author(s): Aleksi Räsänen, Merja Elo, Aleksi Isoaho, Lassi Päckilä, Hannu Marttila, Anna-Kaisa Ronkanen, Lauri Ikkala, Kaapro Keränen, Santtu Kareksela

Title: Soiden ennallistamisen seuranta: mitä olemme oppineet ennallistamisen vaikutuksista soiden hydrologiaan ja kasvillisuuteen?

Year: 2024

Version: Published version

Copyright: The Author(s) 2024

Rights: CC BY-NC-ND 4.0

Rights url: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Please cite the original version:

Räsänen, A., Elo, M., Isoaho, A., Päckilä, L., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Ikkala, L., Keränen, K., & Kareksela, S. (2024). Soiden ennallistamisen seuranta: mitä olemme oppineet ennallistamisen vaikutuksista soiden hydrologiaan ja kasvillisuuteen? *Luonnon Tutkija*, 127(4).
<https://journal.fi/luonnontutkija/article/view/155010>

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.

Soiden ennallistamisen seuranta: mitä olemme oppineet ennallistamisen vaikutuksista soiden hydrologiaan ja kasvillisuuteen?

ALEKSI RÄSÄNEN, MERJA ELO, ALEKSI ISOAHO, LASSI PÄKKILÄ, HANNU MARTTILA,
ANNA-KAISA RONKANEN, LAURI IKKALA, KAAPRO KERÄNEN JA SANTTU KAREKSELA

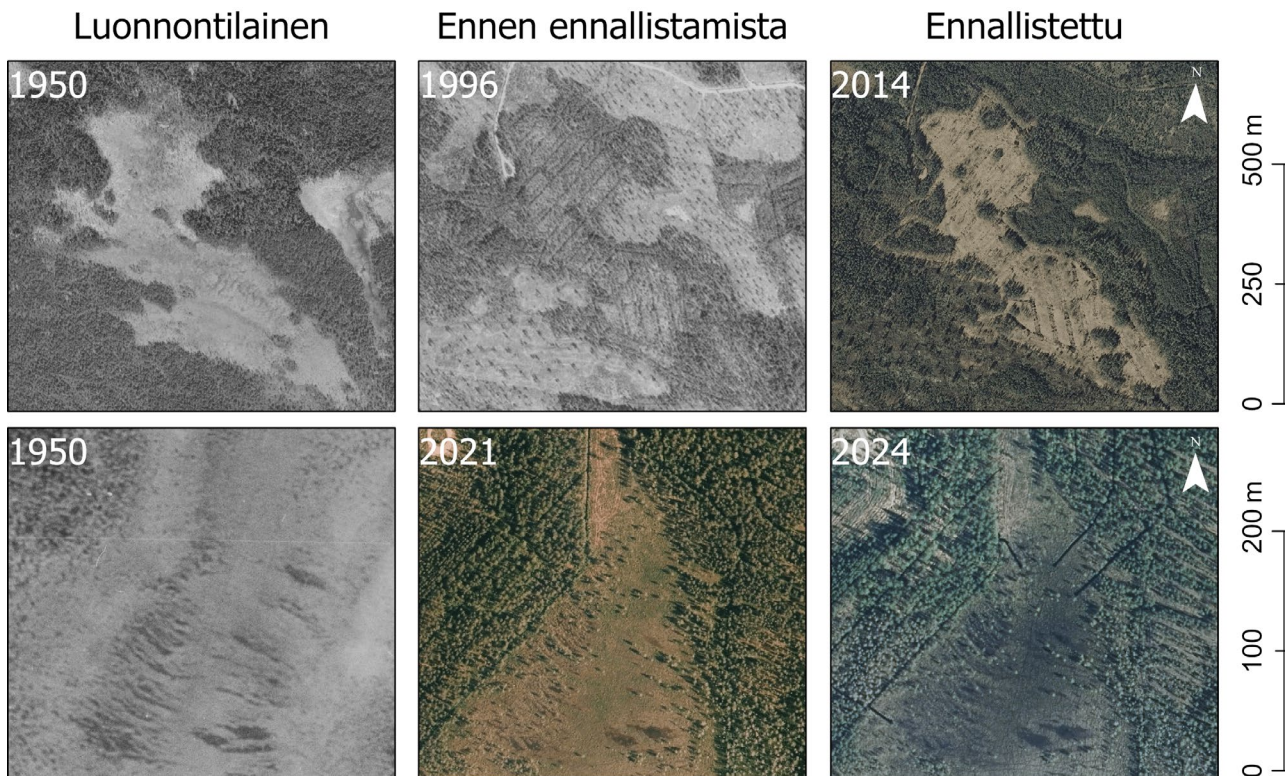
Suomessa soiden ennallistamisen onnistumista on seurattu laajasti Metsähallituksen Luontopalveluiden seurantaverkostossa vuodesta 2007. Tässä artikkelissa koostamme seurantaverkoston avulla kerätyn kymmenvuotisseurannan tulokset ennallistamisen aikaansaamista muutoksista hydrologiassa ja kasvillisuudessa. Lisäksi kerromme viimeaikaisesta kehityksestä ennallistettujen kohteiden kaukokartoitusseurannassa.

ENNALLISTAMISEN TAVOITTEENA on palauttaa ekosysteemi lähemmäksi sen alkuperäistä toiminnallisuutta ja rakennetta, jotka ovat heikentyneet ihmisen aiheuttaman häiriön seurauksena (Gann ym. 2019). Ekosysteemien ennallistamisesta ja ennallistamiseen liittyvästä tutkimuksesta on tullut välttämättömyys kaikkialla viimeisten vuosikymmenten aikana (Wortley ym. 2013; Romanelli ym. 2018), kun havahduttiin ekosysteemien heikentyneeseen tilaan ja nykyisten suojelutoimien riittämättömyyteen ekosysteemien tilan parantamisessa (Suding ym. 2015). Samalla ennallistaminen on noussut merkittävään asemaan kansainvälisissä luonnonsuojelusopimuksissa, viimeisimpänä Euroopan unionin (EU) biodiversiteettistrategiaan kuuluvassa ennallistamisasetuksessa (<https://ym.fi/ennallistamisasetus>). Määrällisiltä tavoitteiltaan kunnianhimoisen ennallistamisasetuksen toteuttaminen edellyttää Suomelta paitsi ennallistamismenetelmällistä huippuosaamista myös laadukasta vaikutusten seurantaa.

Suomessa ennallistamistoimet ja ennallistamisen onnistumisen seuranta ovat keskittyneet erityisesti soihin: Suomen alkuperäisestä noin 10 miljoonan hehtaarin suoalasta on oji-

tettu metsätalouskäyttöön yli puolet ja lisäksi soita on raivattu maatalousmaiksi ja turvetuotantoalueiksi (Vasander ym. 2003). Suot ovat keskeisiä valuma-alueiden osia, jolloin vesien virtausreittien muuttaminen niitä ympäröivillä alueilla voi aiheuttaa laaja-alaisia vaikutuksia myös suoalueen ojittamattomilla osilla heikentäen suoekosysteemin alkuperäistä toimintaa (Sallinen ym. 2019; Ikkala ym. 2022). On arvioitu, että 74 % Suomen suotyypeistä ja 475 suoalajeista on joko uhanalaisia tai silmälläpidettäviä (Kaakinen ym. 2018; Hyvärinen ym. 2019). Tulevaisuudessa luontotyypeistämme juuri soille kohdistuu entistä suurempia ennallistamispaikkeitä: Suomessa EU:n ennallistamisasetus voi johtaa jopa yli kahden miljoonan suohehtaarin ennallistamiseen vuoteen 2050 mennessä (Räsänen ym. 2023a). Soiden muodostaessa huomattavan osan Suomen ennallistamistavoitteista tarvitaan myös kustannustehokkaita seurantamenetelmiä laajojen suoaluekokonaisuuksien tilan muutosten luotettavaan havainnointiin.

Soiden ennallistamisen tavoitteena on muuttaa soiden hydrologiset olosuhteet luonnontilaisen kaltaiseksi, mikä edesauttaa alkupe-



Kuva 1. Ilmakuvat (© Maanmittauslaitos) tavanomaisen ennallistamisen (ylärivi) ja vesienpalautuksen (alarivi) kohteilta ennen ojitusta, ojituksen aikana ja ennallistamisen jälkeen. Ylärivin kuvat ovat Helvetinjärven kansallispuistosta vuonna 2010 ennallistetulta kohteelta. Alarivin kuvat ovat Utajärven Makkarasuolta, jonne tehtiin vesienpalautusta vettä ohjaavien ojien avulla vuonna 2021.

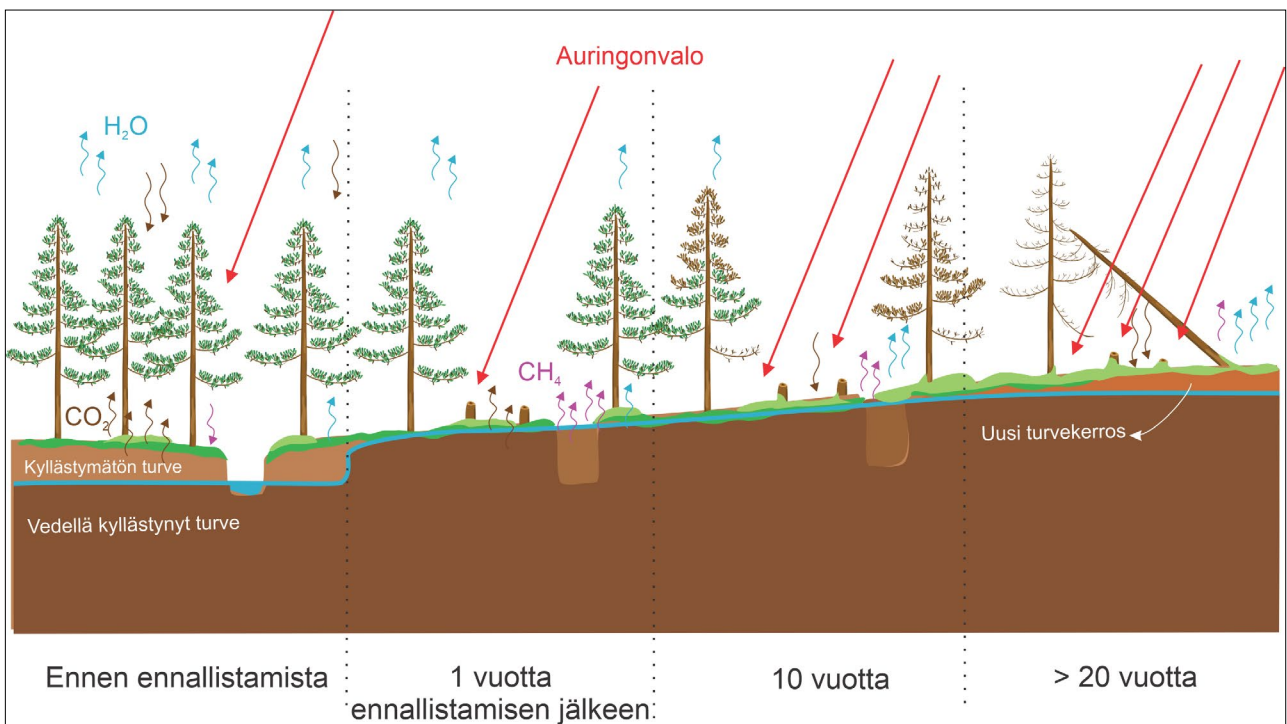
räisen suolajiston ja -elämistön palaamista ennallistettavalle kohteelle (Haapalehto ym. 2011; Aapala ym. 2013). Koska valtaosa soista on ojitettu nimenomaan metsätaloukseen, myös ennallistaminen on keskittynyt metsäojitetuille soille. Näitä soita ennallistetaan täyttämällä ja patoamalla ojia sekä poistamalla ennallistettavilta kohteilta ojituksen jälkeen kasvanutta puustoa (Kuvat 1 ja 2) (Haapalehto ym. 2011; Aapala ym. 2013). Toimenpiteillä pyritään nostamaan paikallista vedenpintaa (Kuva 3). Lisäksi viime aikoina on pyritty ennallistamaan vesien virtausreitit ja ohjattu soiden ojittamattomille mutta kuivahtaneille osille vettä vesienpalautuksen avulla (Kuva 1) (Isoaho ym. 2024a; Räsänen ym. 2023b).

Soiden ennallistamista on perinteisesti seurattu maastohavaintojen ja -mittausten avulla keskittymällä muutoksiin veden määrässä ja laadussa sekä kasvillisuudessa (Haapalehto ym. 2011, 2017; Menberu ym. 2016; Kareksela

ym. 2021). Vedenpinnan tason muutoksia on seurattu mittakaivoista joko manuaalisin mittauksin tai vedenpinnan korkeusantureiden avulla (Menberu ym. 2016). Lisäksi vesinäytteitä on otettu säännöllisesti suoveden ja valunnan laadun muutosten ymmärtämiseksi. Kasvillisuusseurannoissa taas yleisimmin käytetty menetelmä on ollut pysyvät, yleensä neliömetrin kokoiset, kasvuruodut, joiden avulla on tutkittu, miten kasvillisuus muuttuu ennallistamisen jälkeen (Haapalehto ym. 2011, 2017). Seurannoissa on havaittu, että soiden hydrologia ja vedenpinnan taso palautuvat ennallistamisen jälkeen muutamassa vuodessa lähelle luonnontilasta (Menberu ym. 2016). Myös suoveden laatu palautuu noin viidessä vuodessa lähemmäksi luonnontilasta kuin mitä se oli ennen ennallistamista. Sen sijaan kasvillisuusmuutokset ovat hitaampia (Kuva 4), etenkin harvinaisten suolajien osalta (Haapalehto ym. 2011, 2017). Seuranta on kuitenkin keskittynyt pääosin vain



Kuva 2. Yksittäiset, osana kartoitusprosessia otetut dronikuvat Nurmeksen Mujejärven Loukkusuolta (ennen ja jälkeen ennallistamisen). Kuvassa erottuvat tukitut ojat, kuopat, joista maa-ainesta on otettu tukkimiseen, sekä umpeen kasvanut ojanpätkä, jossa maan kantavuus ei riittänyt kaivinkonetyöskentelyyn. Kuvat: Maarit Similä.



Kuva 3. Kaavakuva muutoksista haihdunnassa, auringonvalon määrässä suon pinnalla, vedenpinnan tasossa, turpeen turpoamisessa ja kertymisessä sekä kasvihuonekaasujen vaihdossa metsäojitetun kohteen ennallistamisen jälkeen. Kuva: Ismail.

muutamiin vuosiin ennallistamisen jälkeen ja pitkäaikaisseuranta on ollut harvinaisempaa.

Perinteinen maastossa tapahtuva seuranta on verraten työlästä ja keskittyy vain pieneen osaan suon pinta-alasta. Laajojen muutosten ymmärtämiseksi tarvitaan usein tarkan, mutta pistemäisen maastoseurannan tueksi laaja-alaisempaa (mutta karkeampaa) havaintotietoa maastoseurannan ulkopuolelle jäävistä soista

ja suon osista. Viime vuosina onkin kehitetty satelliitti- ja drooniaineistoja hyödyntävää kaukokartoituseuranta, jonka avulla pistemäiset maastohavainnot voidaan yleistää koko suon tasolle. Soilla kaukokartoitustutkimusta on tehty sekä hydrologiaan että kasvillisuuteen liittyen, mutta ennallistamiseen liittyvät tutkimukset ovat olleet melko vähäisiä ja keskittyneet pääosin hydrologisiin muuttujiin kuten

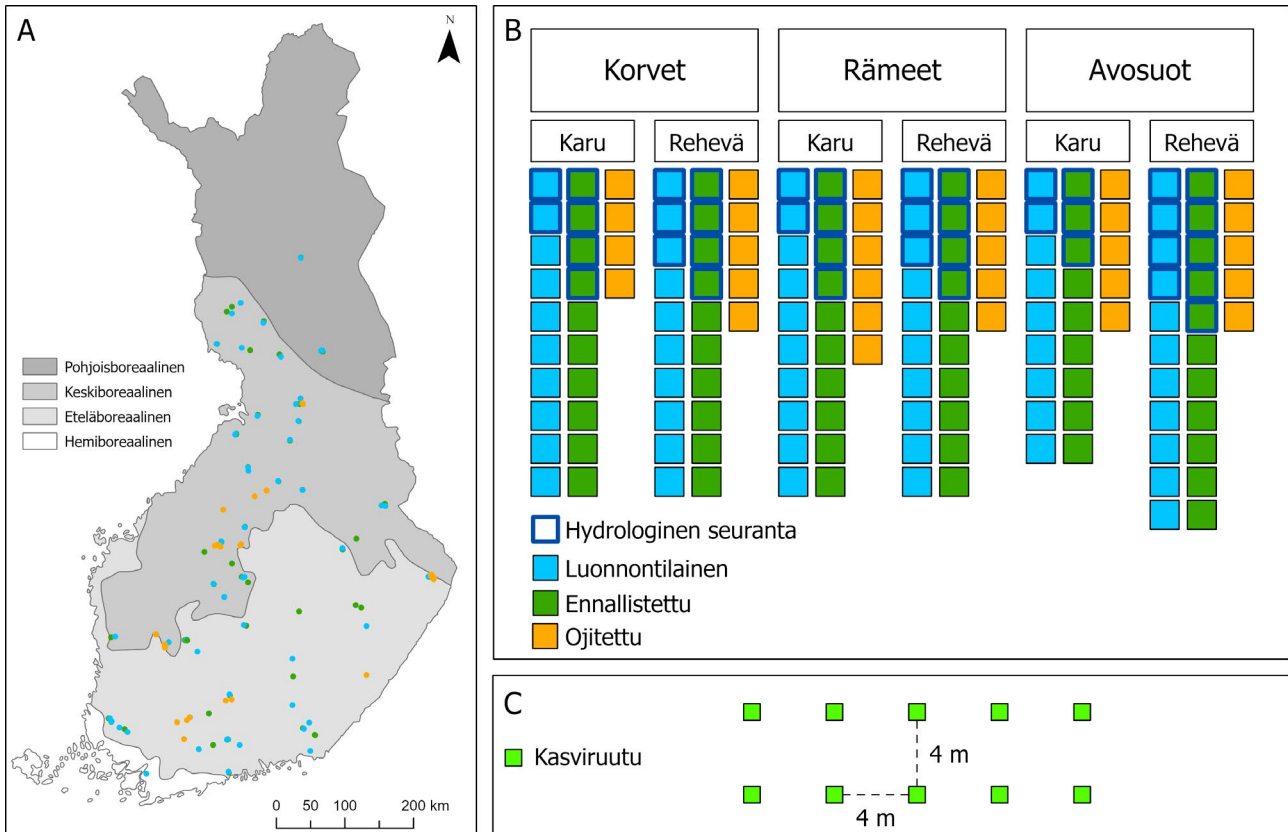
veden virtausreitteihin ja kosteusolosuhteisiin (esim. Ikkala ym. 2022; Räsänen ym. 2023b; Isoaho ym. 2024a).



Kuva 4. Utajärven Olvassuolla 22 vuotta aiemmin tuktutujen ojien sijainnit erottuvat edelleen selvästi vuonna 2019 otetusta dronikuvasta. Kuva: Lauri Ikkala.

Suomessa soiden ennallistamisen vaikutuksia on seurattu etenkin Metsähallituksen Luontopalveluiden 150 kohteen seurantaverkostossa jo vuodesta 2007 alkaen. Maailman mittakaavassa ainutlaatuisesta seurantaverkostosta on juuri valmistunut kymmenvuotisseuranta-aineisto, jonka avulla voidaan tarkastella soiden ennallistamisen pitkäaikaisvaikutuksia.

Tässä artikkelissa raportoimme soiden ennallistamisen seurantaverkoston kymmenvuotisseurannan tuloksia hydrologian ja kasvillisuuden sekä näiden keskinäisten kytkösten osalta. Lisäksi esittelemme viimeaikaisia kaukokartoitustutkimuksiamme, joissa olemme kehittäneet menetelmiä sekä hydrologisten muuttujien että kasvillisuuden seurantaan. Kaiken kaikkiaan artikkelimme koostaa Suomen merkittävät viimeaikaiset soiden ennallistamisen seurantatutkimukset.



Kuva 5. Metsähallituksen Luontopalveluiden soiden ennallistamisen seurantaverkosto. Alakuvassa A on esitetty seurantaverkoston kohteiden sijainnit Suomessa. Alakuvassa B on kuvattu kohteiden jakautuminen tyyppiryhmiin, ravinteisuustasoihin sekä luonnontilaisiin, ennallistettuihin ja ojitettuihin kohteisiin. Lisäksi tarkemman hydrologisen seurannan kohteet on merkitty. Alakuva C on kaaviokuva jokaisen kohteen kasviruutuotannasta.

Tarkemmat tutkimuskysymyksemme ovat:

- 1) Miten ennallistettujen soiden hydrologia ja kasvillisuus ovat muuttuneet kymmenessä vuodessa ennallistamisen jälkeen?
- 2) Miten hyvin kaukokartoituksen avulla voidaan seurata ennallistettujen soiden hydrologisia ja kasvillisuuden muutoksia?
- 3) Miten seuranta tehdään ja kehitetään Suomessa?

Ennallistamisen vaikutusten seuranta

Soiden ennallistamisen vaikutuksia seurataan Suomessa Metsähallituksen Luontopalveluiden soiden ennallistamisen seurantaverkoston avulla (Kuvat 5 ja 6). Verkostoon kuuluu 150 kohdetta, joista 60 on ennallistettu vuosien 2007 ja 2014 välisenä aikana ja niiden seuranta aloitettiin jo ennen ennallistamista. Seurantaverkoston kohteet on jaettu kolmeen päätyyppiryhmään: korvet, rämeet ja avosuot, jotka edelleen on jaettu kahteen eri ravinteisuustasoon. Näistä jokaisesta kuudesta ryhmästä seurantaan on otettu mukaan kymmenen kohdetta. Jokaiselle ennallistetulle kohteelle on ojitettua verrokkikohde, joka sijaitsee lähellä ennallistettua kohdetta ja joka kuuluu samaan ryhmään. Lisäksi jokaisella kuudella ryhmällä on viisi ojitettua muttei ennallistettua verrokkikohdetta. Tässä kuvatun tutkimusasetelman lisäksi seurantaan kuuluu pienempi joukko ravinteikkaita lettosoitia.

Jokaiselta kohteelta on mitattu muutoksia kasvillisuudessa ja hydrologiassa. Kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuusseuranta koostuu kymmenestä neliömetrin kokoisesta kasviryudusta, jotka sijaitsevat kahden linjan varrella neljän metrin etäisyyksillä toisiinsa nähden (Kuva 5C). Ennallistetuilla ja ojitetuilla kohteilla linjat on suunnattu ojien suuntaisesti siten, että etäisyys lähimpään ojaan on vähintään kymmenen metriä. Seurantakehikon ensimmäisen ruudun paikka valittiin satunnaisesti. Jokaisella

kasvillisuusseurantaruudulla inventoitiin kaikki putkilokasvi- ja sammallajit ja niiden %-peittävydet arvioitiin silmämääräisesti. Inventoinnit tehtiin ennen ennallistamista sekä kaksi, viisi ja kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen kasvukauden (kesä-elokuu) aikana. Verrokkikohteilla tehtiin myös neljä seurantakertaa, samoina ajankohtina kuin ennallistetuilla kohteilla. Jokaisella kohteella on lisäksi 200 m² ympyränmuotoinen puustokoeala ja kolme 12 m² ympyränmuotoista taimikoealaa, mutta näitä tietoja emme tässä käsittele.



Kuva 6. Ennallistamisseurantaverkostoon kuuluva korpi Muuramen Tikkamäessä 15 vuotta ennallistamisen jälkeen kesällä 2024. Kuvassa näkyy rakkasammalen voimakas runsastuminen erityisesti entisessä ojassa. Kuva: Merja Elo.

Hydrologisessa seurannassa jokaiselta kohteelta mitattiin suon vedenpinnan taso kasvillisuushavaintojen yhteydessä kasvillisuusruudun nurkasta. Lisäksi tarkempaan hydrologiseen seurantaan valittiin 46 kohdetta, joista 27 on ennallistettuja ja 19 ojitattomia. Näiltä kohteilta mitattiin vedenpinnan

tasoa automaattisten antureiden avulla sulan maan aikaan neljänä vuotena ennen ennallistamista sekä viitenä ensimmäisenä, seitsemäntenä ja kymmenentenä vuotena ennallistamisen jälkeen. Lisäksi näistä kahdeksalle kohteelle rakennettiin virtaaman mittausta varten mittapadot, joilta virtaamaa seurattiin jatkuvatoimisesti roudattomana kautena. Kohteilta tehtiin myös vedenpinnan tason automaattimittauksen kalibrointia ja laadun varmennusta varten manuaalimittaukset neljä kertaa mittausjakson aikana. Kasvillisuushavaintojen yhteydessä kohteilta kerättiin suovesinäytteet, joista mitattiin seuraavat kuusi muuttujaa: pH, UV-absorbanssi, sähkönjohtavuus (EC), liukoinen fosfori (P), typpi (N) ja liuennut orgaaninen hiili (DOC). Lettokohteilla suovedestä mitattiin lisäksi alkaliniteetti, rauta (Fe), natrium (Na), kalium (K), kalsium (Ca) ja magnesium (Mg). Mittapadoilta otetuista vesinäytteistä määritettiin lämpötila, pH, UV-absorbanssi, EC, DOC, liukoinen N, P, fosfaattifosfori (PO₄-P), ammoniumtyppi (NH₄+N), nitraatti-nitriittityppi (NO_{2/3}-N), kiintoaines (SS), rauta (Fe), natrium (Na), kalium (K), kalsium (Ca) ja magnesium (Mg).

Ennallistamisverkoston koealoilta kerättyjä aineistoja analysoitiin tilastollisin menetelmin. Kasvillisuusanalyseissa olemme hyödyntäneet HMSC-malleja (Hierarchical Modelling of Species Communities; Ovaskainen ym. 2017), jotka perustuvat Bayesilaiseen tilastotieteeseen ja kuuluvat niin sanottuihin yhdistettyihin lajien levinneisyysmalleihin (joint species distribution models).

Hoitoseuranta

Seurantaverkoston lisäksi Metsähallituksen Luontopalvelut toteuttaa soiden ennallistamiskohteilla hoitoseurantaa, jossa suunnittelijat seuraavat silmämääräisten maastohavaintojen avulla, miten hyvin ennallistaminen on suolla onnistunut ja onko ennallistumisen edellytykset olemassa. Hoitoseurannasta saatavien havaintojen perusteella suunnitellaan korjaavat toimenpiteet, joilla ennallistumista pyritään

ohjaamaan tavoiteltuun suuntaan. Aineistoa kerätään jokaiselta ennallistetulta suolta vähintään kaksi kertaa (vuosi ja kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen). Tarvittaessa seuranta tehdään useammin tai jatketaan kymmenvuotisseurannan jälkeen. Hoitoseurantaa varten on kehitetty systemaattinen ohjeistus (Hyvärinen & Aapala 2009). Aineistoa on kerätty yli 400 kohteelta ja yli 30 000 hehtaarin alueelta eri suotyypeistä ympäri Suomen.

Kaukokartoitusseurannan kehittäminen

Viime vuosien aikana kaukokartoitusmenetelmiä on kehitetty useassa eri hankkeessa. Omissa tutkimuksissamme olemme hyödyntäneet etenkin drooni- ja satelliittikuva-aineistoja. Soiden ennallistamisen seurantaverkoston tukeutuen olemme tutkineet, miten hyvin kohteissa mitattua vedenpinnan tasoa (Räsänen ym. 2022), märkyyttä ja ravinteisuutta ilmentäviä kasvillisuusgradientteja (Isoaho ym. 2024b) sekä yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien peittävyysä (Räsänen ym. 2024) voidaan mallintaa satelliittikuvien avulla. Vedenpinnan tason mallintamisessa olemme hyödyntäneet sekä optisia, näkyvän, lähi-infrapun ja lyhytaaltoisen infrapun aallonpituuksien heijasteita mittaavia, satelliittikuvia että synteettisen apertuurin tutkasatelliittikuvia. Kasvillisuustutkimuksissa olemme käyttäneet ainoastaan optisia satelliittikuvia. Laskimme kasvillisuusgradientit tilastollisesti kasvillisuuden %-peittävyysaineistoista käyttämällä ei-metristä moniulotteista skaalausta (Kruskal 1964). Kasvillisuusgradientit kertovat kohteiden kasvilajiston rakenteesta ja kasvillisuudessa tapahtuvista muutoksista. Mallinsimme vedenpinnan tason ja kasvillisuusgradienttien tutkimuksissa selittävien kaukokartoitusmuuttujien ja maastohavainnoista laskettujen vastemuuttujien välisiä suhteita random forest -koneoppimismallilla (Breiman 2001). Yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien ennustamisessa ja ennallistamisen jälkeisiä spektrissä heijasteissa tapah-

tuvia muutoksia analysoidessamme hyödynsimme HMSC-malleja.

Muussa kaukokartoitustutkimuksessa olemme kokeilleet eri drooniaineistoja etenkin vedenpinnan tason (Isoaho ym. 2023) ja veden virtausverkkojen sekä topografisten märkyyssennusteiden (Ikkala ym. 2022) alueellisessa mallintamisessa sekä perinteisen ennallistamisen että vesienpalautuskohteilla. Lisäksi olemme tutkineet, miten hyvin optisten ja tutkasatelliittikuvien avulla voidaan mallintaa vesienpalautuksen aiheuttamia muutoksia vedenpinnan tason alueellisessa vaihtelussa avosoilla (Isoaho ym. 2024a) ja miten hyvin märkien rimpipintojen peittävyttä voidaan kartoittaa optisten drooni- ja satelliittikuvien yhdistelmän avulla (Keränen ym. 2024).

Kaukokartoitustutkimusten tulokset esitellään osiossa Hydrologian ja kasvillisuuden kaukokartoitus. Kaukokartoituksen mahdollisuuksia on esitelty laajemmin kahdessa raportissa (Räsänen ym. 2023b; Ikkala & Similä 2024).

Vaikutusten seurannan ja kehitystyön tuloksia

Hydrologiset vaikutukset ja muutokset vedenlaadussa

Pitkäaikaisseurantojen perusteella soiden hydrologinen ennallistuminen on varsin nopeaa. Märkyydeltään tavanomaisena vuonna vedenpinnan korkeus palautuu ennallistamista seuraavana vuonna tavoiteltuun tasoon lähes kaikilla kohteilla (Menberu ym. 2016). Vedenpinnan korkeus kuitenkin vaihtelee ennallistetuilla kohteilla selvästi enemmän kuin luonnontilaisilla soilla. Etenkin vuosien 2018 ja 2019 kuivuusjaksojen aikana ennallistetut kohteet olivat yleisesti ottaen herkempiä vedenpinnan laskulle kuin seuratut luonnontilaiset vastaavana ajankohtana (Päkkilä ym. julkaisematon). Vedenlaadun palautuminen luonnontilaiselle tasolle on sen sijaan monimutkaisempaa ja siihen vaikuttaa suuresti suotyppi, ravinteikkuus ja itse ennallistamistoimenpiteet sekä kohteen ai-

kaisempi maankäyttö. Esimerkiksi mahdolliset metsänlannoitukset lisäävät ravinteiden huuhtoutumista. Ravinnekormitus alapuolisiin vesiin lisääntyy lähes poikkeuksetta välittömästi ennallistamistoimien jälkeen mutta laskee sitä seuraavina vuosina. Yleisesti voidaan todeta, että hydrologinen ennallistuminen sekä vaste vedenlaadun vakiintumiseen voidaan nähdä viiden vuoden jälkeen ennallistamisesta. Kuitenkin kaikilla seurantaverkoston kohteilla esimerkiksi ravinteiden ja hiilen pitoisuudet olivat edelleen viisi vuotta ennallistamisesta jonkin verran korkeammalla kuin vastaavilla luonnontilaisilla kohteilla (Menberu ym. 2017). Osalla kohteista laatu on kuitenkin palautunut kymmenessä vuodessa (Päkkilä ym. 2024). Tämä kuvaakin hyvin pitkäaikaisseurantojen tärkeyttä ekosysteemien muutosten tulkinnassa. Seuranta-aineistojen ja kertyvien aikasarjojen merkitys tulee todennäköisesti jatkossa korostumaan tulkittaessa ennallistamisen aikaansaamia muutoksia nopeasti muuttuvassa ilmastossa.

Paikallisen vaikutuksen seurannassa yksinkertaiset vedenpinta-anturit jatkuvatoimisella seurannalla antavat riittävästi tietoa ennallistamisen vaikutuksesta alueen hydrologiaan. Talviaikainen seuranta sekä alueellinen vaihtelu suoalueen sisällä ovat vielä puutteellisesti tutkittuja. Tästä syystä rinnalle on otettu myös kaukokartoitustyökaluja (ks. osio Hydrologian ja kasvillisuuden kaukokartoitus). Osalle suotyypeistä myös edustavan mittauspaikan valinta on tärkeää, etenkin korpi- ja rämeikohteilla.

Valuma-alueen vaikutusten seuranta ennallistamistoimenpiteiden osalta on myös tärkeää, mutta tulosten tulkintaa vaikeuttavat valuma-alueiden laaja-alaisuus ja maankäyttömuotojen moninaisuus. Ennallistamisesta on havaittu olevan hyötyä pienten valuma-alueiden tasolla (Menberu ym. 2018). Jatkotutkimuksissa tulisi vielä keskittyä vaikutuksiin suuressa mittakaavossa isoilla valuma-alueilla.

Suolta pois virtaavan veden laadun seuranta on myös oleellinen osa soiden ennallistamisen vaikutusten seurantaa. Käytännön vaikeutena

on edustavan mittauspaikan löytäminen, koska tyypillisesti soilla on useampi ulosvirtausreitti alapuolisiin vesistöihin. Seurantaverkoston mittausten perusteella olemme selvittäneet suoveden ja valumaveden pitoisuuksien välisen vuorosuhteen, mikä mahdollistaa jatkossa kustannustehokkaamman näytteenoton ja kuormituksen arvioinnin pelkästään suovesinäytteenoton avulla (Päkkilä ym. 2024).

Kasvillisuusvaikutukset

Ennallistaminen on johtanut keskimäärin toivottuun muutokseen kasvillisuudessa jo nyt toteutetulla melko lyhyellä seuranta-ajanjakolla. Kymmenen vuoden aikana ojituksesta hyötyneet lajit, kuten metsän yleisammalet seinäsammal (*Pleurozium schreberi*) ja metsäkerrossammal (*Hylocomium splendens*) vähenivät, kun taas ojituksesta kärsineet lajit, kuten useat rahkasammalet (*Sphagnum* sp.), runsastuivat (Elo ym. 2024a). Myös muut kuin ojituksesta kärsineet lajit saattoivat hyötyä ennallistamisesta. Esimerkiksi tupasvilla (*Eriophorum vaginatum*) runsastui selvästi, todennäköisesti ennallistamisesta johtuvan ravinnepiikin seurauksena. Ennallistetut kohteet eivät kuitenkaan vastanneet kasvillisuudeltaan luonnontilaisia verrokkeja. Tämä ei liene yllättävää ottaen huomioon, että kymmenen vuotta on varsin lyhyt aika boreaalisten soiden kehityshistoriasa. Tulokset ovat yhdenmukaisia aiempien tutkimustulosten kanssa (esim. Haapalehto ym. 2011, 2017; Hedberg ym. 2012; Maanavilja ym. 2014).

Mielenkiintoista on, että eri suotyypien välillä on suurta vaihtelua ennallistamisen vaikutuksessa. Yleisesti ottaen ennallistaminen on johtanut suurempaan muutokseen kohti luonnontilaisia soita korvissa sekä rehevillä rämeillä ja avosoilla. Sen sijaan karuilla rämeillä ja avosoilla muutos on ollut keskimäärin maltillisempaa (Elo ym. 2024a). Tämä on linjassa sen kanssa, että myös ojitus muuttaa kasvillisuutta nopeammin ravinteikkailla suotyypeillä (Laine

et al. 1995).

Ennallistamisen vaikutusten vaihtelu ei rajoitu suotyyppeihin: samallakin suotyypillä ennallistamisella saattaa olla erilaisia vaikutuksia kasvillisuuteen. Erityisesti joidenkin karujen räme- ja avosukohteiden kasvillisuus muuttui ennallistamisesta huolimatta samankaltaisemmaksi ojitettujen, ei-ennallistettujen verrokkien kasvillisuuden kanssa. Joillain kohteilla kasvillisuuden palautumisen hitaus pystyttiin selittämään sillä, ettei vedenpinnan taso ollut noussut kunnolla ennallistamisen jälkeen mutta ei kaikilla (Elo ym. 2024b). Näyttää siis siltä, että vedenpinnan tason palautuminen on edellytys kasvillisuuden ennallistumiselle, mutta se ei kuitenkaan yksin takaa sitä (Elo ym. 2024b). Siten ennallistettavien kohteiden valinnalla on suuri merkitys ja tämä vaatii tarkempaa tutkimusta.

Ojitettujen, ei-ennallistettujen soiden kasvillisuus puolestaan muuttui entistäkin erilaisemmiksi 10 vuoden kuluessa verrattuna luonnontilaisiin soihin, vaikka alkuperäisestä ojituksesta oli kulunut jo 50–60 vuotta. Tämä muutos näkyi esimerkiksi metsäsammalten ja metsävarpujen lisääntymisenä. Siten metsäojitettujen soiden ennallistuminen itsekseen vaikuttaa epätodennäköiseltä (Allan ym. 2024) ja ennallistaminen on sitä helpompaa, mitä aikaisemmassa ojitussuunnitelman vaiheessa se tehdään. Nähtäväksi jää, johtaako turpeen häviäminen ja painuminen erityisesti ojien ympäristössä vaikeasti palautettavaan muutokseen suossa.

Hydrologian ja kasvillisuuden kaukokartoitus

Ennallistamisen jälkeen soiden heijastavuus kasvaa etenkin näkyvällä ja lähi-infrapunan aallonpituusalueella. Muutos näkyy selvästi vähäpuustoisilla rämeillä ja avosoilla, kun taas runsaspuustoisissa korvissa muutoksia on vaikeampi havaita, koska satelliitti- ja droonikuvat havainnoivat ja mittaavat puustoisilla kohteilla lähinnä puiden latvuuksia. Heijastavuuden kasvuun vaikuttaa etenkin puuston poisto, ojalintojen tukkiminen ja myöhempi kasvittuminen,

märkyiden lisääntyminen sekä kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuuden muutokset (Räsänen ym. 2024).

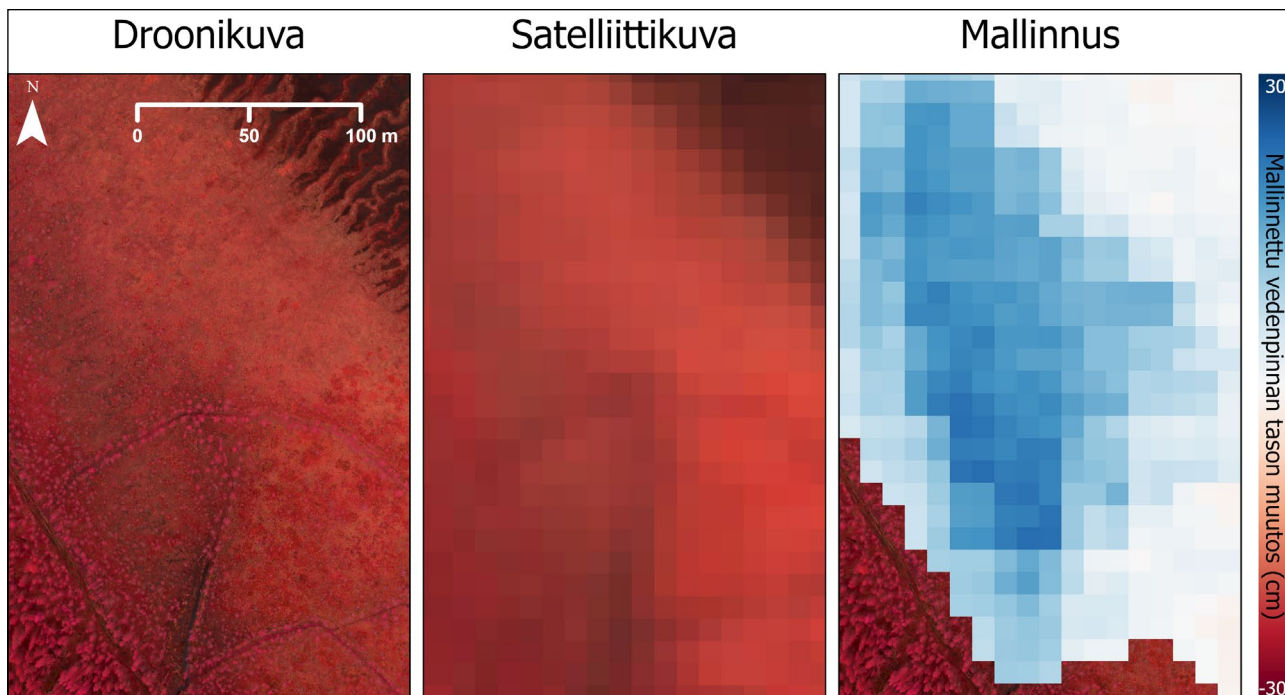
Etenkin avosoiden vedenpinnan tason ja märkyiden alueellista rakennetta ja siinä tapahtuvia ajallisia muutoksia voidaan mallintaa hyvinkin tarkasti satelliitti- ja dronikuvien avulla (Kuva 7) (Räsänen ym. 2022; Isoaho ym. 2023, 2024a). Sen sijaan puustoisilla soilla mallintaminen on huomattavan paljon epävarmempaa. Vedenpinnan tason ajallisten muutosten havainnoinnissa mallinnus onnistui hieman paremmin ojittamattomilla kohteilla kuin ennallistetuilla kohteilla (Räsänen ym. 2022).

Vedenpinnan tason mallintamisessa tulee yhdistää useita eri kaukokartoitusaineistoja. Satelliittikuvaseurannassa parhaaseen lopputulokseen päästiin yhdistämällä optisia aineistoja ja tutka-aineistoja. Optiset aineistot toimivat kuitenkin erillistarkasteluissa selvästi tutka-aineistoja paremmin (Räsänen ym. 2022; Isoaho ym. 2024a). Droniseurannassa vedenpinnan tason alueellista rakennetta mallinnettiin tarkimmin lämpökuvien ja optisten kuvien yhdis-

telmällä (Isoaho ym. 2023). Myös topografiaan perustuvat märkyiden mallinnukset osoittautuvat lupaaviksi menetelmiksi ojien tukkimisen tarkasteluun (Ikkala ym. 2022), joskin mallintaminen on hankalaa tasaisilla suoalueilla. Lisäksi topografiset analyysit huomioivat vain veden maan pintakerroksen virtausreitit eivätkä esimerkiksi pohjaveden imeytymistä tai purkautumista.

Kasvillisuuden kaukokartoitustutkimusten tulokset osoittivat, että kasvillisuusgradientteja ja niillä tapahtuvia ajallisia muutoksia voidaan ennustaa kohtalaisen tarkasti optisia satelliittikuvia käyttäen avosoilla tai vähäpuustoisilla soilla (Isoaho ym. 2024b). Sen sijaan puustoisilla soilla ennustaminen on huomattavan paljon epävarmempaa. Asteittaisten kasvillisuusmuutosten osalta ongelmana on kuitenkin muutosten tulkinta: vaikka kasvillisuuden vaihtuminen kertoo ympäristön kannalta oleellisista tekijöistä (märkyys ja ravinteisuus), sitä ei ole helppo mitata maastossa.

Yksittäisten kasvilajien ja toiminnallisten kasvilajiryhmien osalta havaitsimme, että tie-



Kuva 7. Esimerkki satelliittikuvien avulla mallinnetusta vesienpalautuksen aikaansaamasta vedenpinnan tason muutoksesta Pyhäjärven Vihtanevalla. Vasemmalla on vääräväridronokuva alueelta, keskellä Sentinel-2 väärävärisatelliittikuva ja oikealla satelliittikuvien avulla mallinnettu vedenpinnan tason muutos.

tyt optiset kaukokartoitusmuuttajat parantavat HMSC-mallien ennustekykyä etenkin joidenkin sara- (kuten juurtosaran, *Carex chordorrhiza*) ja varpulajien (esim. juolukan, *Vaccinium uliginosum*) osalta varsinkin vähäpuustoisilla soilla ja avosoilla (Räsänen ym. 2024). Kaukokartoitusmuuttujien aiheuttama ennustekyvyn lisäys on kuitenkin melko pieni. Vaikka tulokset havainnollistavat kaukokartoitusmuuttujien ja kasvilajien välisiä yhteyksiä, ne eivät kuitenkaan ole sellaisenaan sovellettavissa yksittäisten kasvilajien tai toiminnallisten kasvilajiryhmien tarkkaan kaukokartoitusperustaiseen havainnointiin. Ongelmana on etenkin erot mittakaavoissa: kasvillisuusmuutoksia havainnoitiin jokaisella kohteella kymmenellä yhden neliömetrin kokoisella kasvuruudulla, kun taas tarkimmissa vapaasti saatavilla olevissa korkean resoluution satelliittiaineistoissa yhden kuva-alkion koko on 100 neliometriä.

Yksittäisten kasvilajien sijaan kaukokartoituse seuranta soveltuu paremmin suokasvillisuuden päätasojen muutoksiin. Tutkimuksissamme rimpipintojen peittävyttä voitiin arvioida erittäin tarkasti drooni- ja satelliittikuvien yhdistelmän avulla, joskin tutkimuskohteiden välillä ilmeni eroja mallien toimivuudessa (Keränen ym. 2024). Vastaavasti aiemmissa tutkimuksissa on esimerkiksi pystytty havaitsemaan pitkäaikaismuutoksia suokasvillisuuden päätasossa (Kolari ym. 2022; Steenvoorden ym. 2022), kuten rimpipintojen muuttuminen kuivemmiksi rahkasammalvaltaisiksi välipinnoiksi (Kolari ym. 2022).

Johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet

Soiden ennallistamisen seurantaverkoston kymmenvuotisen havainnoinnin perusteella suoekosysteemien rakenne ja toiminta lähtevät palautumaan kohti luonnontilaista melko pian ennallistamisen jälkeen. Kuitenkaan vielä kymmenen vuodenkaan kuluttua ennallistamisesta suot eivät ole luonnontilaisen kaltaisia. Tarvitaankin pidempiaikaista seurantaa, jotta voidaan saada selville, milloin ennallistetut

kohteet muistuttavat läheisesti luonnontilaisia verrokkeja eli milloin ennallistamiselle asetetut tavoitteet voidaan katsoa saavutetuiksi, vai saavutetaanko niitä koskaan täysin.

Soiden hydrologia palautuu ja lähtevän veden laatu vakiintuu noin viiden vuoden sisällä ennallistamisen jälkeen. Kuitenkaan ennallistetut kohteet eivät ole yhtä vastustuskykyisiä kuivuusjaksoille tai muille äärisäille kuin luonnontilaiset suot. Kasvillisuuden osalta tutkimuksemme kertovat, että ennallistaminen käynnistää muutoksen kohti luonnontilaisten soiden kasvillisuutta mutta ennallistettujen kohteiden kasvillisuus eroaa merkittävästi luonnontilaisten verrokkien kasvillisuudesta vielä kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen. Lisäksi kohteiden ja suotyypin välillä on suuria eroja kasvillisuusmuutoksissa.

Kaukokartoitus soveltuu etenkin avosoilla ja vähäpuustoisilla soilla tapahtuvien ajallisten ja alueellisten muutosten seurantaan. Helpoimmin seurattavia muutoksia ovat soiden märkyys, vedenpinnan taso ja suokasvillisuuden päätasojen runsaussuhteet. Kaukokartoituse seurannasta saa tukea myös kasviyhteisöjen, niiden vaihtumissuuntien ja yksittäisten kasvilajien muutosten seurantaan mutta tulokset eivät ole yhtä selviä kuin hydrologisten muutujien ja kasvillisuuden päätasojen osalta.

Soiden ennallistamisen seurantaverkosto ja kaukokartoitusmenetelmien kokeilut ovat tuottaneet arvokasta tietoa soiden ennallistamisen vaikutuksista ja ennallistamisen seurantamahdollisuuksista. Tähänastiset tutkimukset eivät kuitenkaan ole tuoneet vastauksia läheskään kaikkiin soiden ennallistamisen vaikutusten ja seurannan kannalta oleellisiin asioihin. Nostammekin esille muutaman jatkotutkimustarpeen.

1) Ennallistamisen seurantaverkosto on tuottanut arvokasta pitkäaikaista seurantatietoa soilta. Kuitenkin etenkin kasvillisuuden osalta on voitu havaita, että kymmenen vuotta ei ole riittävän pitkä seurantajakso. Kasvillisuusmuutokset voivat kestää kymmeniä vuosia mutta

on vielä epäselvää, palautuuko ennallistettujen soiden kasvillisuus koskaan ojitettujen soiden kaltaiseksi ja kohdistuuko mahdollinen epätäydellinen palautuminen erityisesti tietyn tyyppiin soihin tai lajeihin. Pitkäaikaisempi, vuosikymmeniä kestävä seuranta, voi tarjota tähän vastauksia.

2) Soiden hydrologia ja kasvillisuus muuttuu paitsi kuivatuksen ja ennallistamisen myös ilmastomuutoksen takia (esim. Antala ym. 2022; Sallinen ym. 2023). Ennallistamisen ja ilmastomuutoksen aiheuttamien muutosten yhteisvaikutuksista on kuitenkin hyvin vähän tutkimuksia. Onkin mielenkiintoista selvittää, voidaanko ennallistamisen avulla estää tai hidastaa ilmastomuutoksen haitallisia vaikutuksia suoluonnolle.

3) Soiden ennallistamisen seurantaverkosto on tuottanut arvokasta tietoa päätyyppiryhmiä edustavilta soilta. Se ei kuitenkaan koske kaikkia Suomen suotyypppejä. Tutkimuksen ulkopuolelle ovat toistaiseksi jääneet etenkin letot ja mären rimpinevat. Lettojen ja rimpinevojen osalta tarvitaan tutkimusta ja pitkäaikaista seurantaa, miten ennallistaminen vaikuttaa niiden kasvillisuuteen ja hydrologiaan.

4) Hydrologisen seurannan osalta tulisi myös panostaa talviaikaisiin mittauksiin etenkin Etelä-Suomen kohteissa, koska muuttuvassa ilmastossa suoalueet saattavat olla hydrologisesti toimivia myös talviaikana. Lisäksi seurannassa tulee myös panostaa ajallis-alueellisen vaihtelun seurantaan yhdistämällä perinteisiä sekä kaukokartoitusmenetelmiä hydrologisten ilmiöiden muutosten ymmärtämiseksi.

5) Ennallistamisen aiheuttamien kasvillisuusmuutosten kaukokartoituksesta tarvitaan lisätutkimusta. Kaukokartoitettavien ja ennallistamiskologisesti tarkoituksenmukaisten indikaattorien kehittämiselle on selvä tarve. Lisäksi drooneja ja maastohavaintoja yhdistäviä kasvillisuusseurantamenetelmiä tulee kehittää.

Matalalla tapahtuvien droonilentojen avulla voidaan mahdollisesti korvata kasvirituuttujen työläitä inventointeja. Toisaalta drooniaineistoja voidaan käyttää yhä enemmän skaalaamaan maastohavaintoja satelliittikuvaseurantaan soveltuviksi.

6) Hoitoseurannassa on kerätty mittava aineisto soiden ennallistamisen onnistumisesta. Aineisto ei kuitenkaan ole samalla tavalla riippumaton kuin vaikuttavuusseuranta-aineisto, koska hoitoseurannan havainnot johtavat usein korjaaviin toimenpiteisiin. Aineistoa ei ole vielä hyödynnetty tutkimuskäytössä. Aineistoa voisi käyttää esimerkiksi ennallistamisen tekniseen onnistumiseen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen, kunhan aineiston luonne huomioidaan.

Kiitokset

Ympäristöministeriö, Euroopan Unioni, Maa- ja vesitekniikan tuki ry ja Luonnonvarakeskus ovat rahoittaneet tutkimustamme.

Kirjallisuus

- Aapala K ym. (toim) 2013 Ojitettujen soiden ennallistamisopas. Metsähallituksen luonnon-suojelujulkaisuja. Sarja B 188.
- Allan JM ym. 2024 Meta-analysis reveals that enhanced practices accelerate vegetation recovery during peatland restoration. *Restor Ecol* 32: e14015.
- Antala M ym. 2022 Impact of climate change-induced alterations in peatland vegetation phenology and composition on carbon balance. *Sci Total Environ* 827:154294.
- Breiman L 2001 Random forests. *Mach Learn* 45: 5–32.
- Gann GD ym. 2019 International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restor Ecol* 27(S1): S1–S46.
- Elo M ym. 2024a A large-scale and long-term experiment to identify effectiveness of ecosystem restoration. *Commun Earth Environ*

- 5: 680.
- Elo M ym. 2024b Effective hydrological restoration is a prerequisite, but not a guarantee, for the recovery of vegetation communities in boreal forestry-drained peatlands. Lähetetty arvioitavaksi.
- Haapalehto T ym. 2011 The effects of peatland restoration on water table depth, elemental concentrations, and vegetation: 10 years of changes. *Restor Ecol* 19: 587–598.
- Haapalehto T ym. 2017 Recovery of plant communities after ecological restoration of forestry drained peatlands. *Ecol Evol* 7: 7848–7858.
- Hedberg P ym. 2012 Vegetation recovery after multiple-site experimental fen restorations. *Biol Conserv* 147: 60–67.
- Hyvärinen E & Aapala K (toim) 2009 Metsien ja soiden ennallistamisen sekä harjumetsien paahdeympäristöjen hoidon seurantaohje. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 118.
- Hyvärinen E ym. (toim) 2019 Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2019. Ympäristöministeriö ja Suomen ympäristökeskus.
- Ikkala L & Similä M (toim) 2024 Ennallistettujen soiden seurannan kehittämisehdotukset – Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia hoitoseurannan ja hydrologisen seurannan parantamiseksi ja kaukokartoitukseen perustamiseksi. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 251.
- Ikkala L ym. 2022 Unmanned Aircraft System (UAS) Structure-From-Motion (SfM) for Monitoring the Changed Flow Paths and Wetness in Minerotrophic Peatland Restoration. *Remote Sens* 14: 3169.
- Isoaho A ym. 2023 Spatial water table level modelling with multi-sensor unmanned aerial vehicle data in boreal aapa mires. *Remote Sens Appl Soc Environ* 32: 101059.
- Isoaho A ym. 2024a Multi-sensor satellite imagery reveals spatiotemporal changes in peatland water table after restoration. *Remote Sens Environ* 306: 114144.
- Isoaho A ym. 2024b Monitoring changes in boreal peatland vegetation after restoration with optical satellite imagery. *Sci Total Environ*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177697.
- Kaakinen E ym. 2018. Suot. Teoksessa: Kontula T & Raunio A (toim). Suomen luontotyyppien uhanalaisuus. Luontotyyppien punainen kirja: Osa I – tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristö 5. Suomen ympäristökeskus ja ympäristöministeriö.
- Kareksela S ym. 2021 Soiden ennallistamisen suoluonto-, vesistö-, ja ilmastovaikutukset. Vertaisarvioitu raportti. Suomen Luontopaaneelin julkaisuja 3b/2021.
- Keränen K ym. 2024 Multi-resolution remote sensing for flark area detection in boreal aapa mires. *Int J Remote Sens* 45: 4324–4343.
- Kolari T ym. 2022 Ongoing fen–bog transition in a boreal aapa mire inferred from repeated field sampling, aerial images, and Landsat data. *Ecosystems* 25: 1166–1188.
- Kruskal J B 1964 Nonmetric multidimensional scaling: a numerical method. *Psychometrika* 29: 115–129.
- Laine J ym. 1995 Ecological effects of peatland drainage for forestry. *Environ Rev* 3: 286–303.
- Maanavilja L ym. 2014 Impact of drainage and hydrological restoration on vegetation structure in boreal spruce swamp forests. *Forest Ecol Manage* 330: 115–125.
- Menberu M ym. 2016 Water-table-dependent hydrological changes following peatland forestry drainage and restoration: Analysis of restoration success. *Water Resour Res* 52: 3742–3760.
- Menberu M ym. 2018 Effects of drainage and subsequent restoration on peatland hydrological processes at catchment scale. *Water Resour Res* 54: 4479–4497.
- Ovaskainen O ym. 2017 How to make more out of community data? A conceptual framework and its implementation as models and software. *Ecol Lett* 20: 561–576.
- Päkkilä L ym. 2024 Leaching from restored peatlands: Is there a connection between

porewater and runoff quality? Lähetetty arvioitavaksi.

Räsänen A ym. 2022 Monitoring peatland water table depth with optical and radar satellite imagery. *Int J Appl Earth Obs* 112: 102866.

Räsänen A ym. 2023a Euroopan unionin ennallistamisasetusehdotuksen luontotyyppi- ja turvemaatavoitteiden vaikutukset Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 112/2023. Luonnonvarakeskus.

Räsänen A ym. 2023b Ennallistettujen soiden tilan seuranta: Kokemuksia vesienpalautuksen seurannasta ja kaukokartoitusmenetelmistä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2023. Luonnonvarakeskus.

Räsänen A ym. 2024 Changes in satellite-derived spectral variables and their linkages with plant species after peatland restoration. *Restor Ecol*. DOI: 10.1111/rec.14338.

Romanelli J P ym. 2018 Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. *Ecol Eng* 120: 311–320.

Sallinen A ym. 2019 Undrained peatland areas disturbed by surrounding drainage: a large scale GIS analysis in Finland with a special focus on aapa mires. *Mires Peat* 24: 1–22.

Sallinen A ym. 2023 Recent and future hydrological trends of aapa mires across the boreal climate gradient. *J Hydrol* 617: 129022.

Steenvoorden J 2022 There and back again: Forty years of change in vegetation patterns in Irish peatlands. *Ecol Indic* 145: 109731.

Suding K ym. 2015 Committing to ecological restoration. *Science* 348: 638–640.

Vasander H ym. 2003 Status and restoration of peatlands in northern Europe. *Wetlands Ecol Manag* 11: 51–63.

Wortley L, Hero J M & Howes M 2013 Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restor Ecol* 21: 537–543.

Kirjoittajat

Aleksi Räsänen työskentelee apulaisprofessorina Oulun yliopiston maantieteen tutkimusyksikössä ja erikoistutkijana Luonnonvarakeskuksessa.

Merja Elo työskentelee erikoistutkijana Suomen ympäristökeskuksessa.

Aleksi Isoaho työskentelee tutkijana Luonnonvarakeskuksessa.

Lassi Päckilä työskentelee väitöskirjatutkijana Oulun yliopiston vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikössä.

Hannu Marttila työskentelee apulaisprofessorina Oulun yliopiston vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikössä.

Anna-Kaisa Ronkanen työskentelee kehittämisspällikkönä Suomen ympäristökeskuksessa.

Lauri Ikkala työskentelee erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksessa.

Kaapro Keränen työskentelee tutkimusavustajana Luonnonvarakeskuksessa.

Santtu Kareksela työskentelee palveluomistajana Metsähallituksen Luontopalveluissa.

Vastaava kirjoittaja: aleksi.rasanen@oulu.fi



Kuva: Heikki Mikkola