

Ennallistettujen soiden seurannan kehittämissuositukset

**Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä
kokemuksia hoitoseurannan ja
hydrologisen seurannan parantamiseksi ja
kaukokartoitusseurannan perustamiseksi**

Lauri Ikkala ja Maarit Similä (toim.)



Lauri Ikkala
Oulun yliopisto/Geologian tutkimuskeskus
lauri.ikkala(at)gtk.fi

Maarit Similä
Metsähallitus, Luontopalvelut
maarit.simila(at)metsa.fi

Aineiston tuottamiseen on saatu Euroopan unionin LIFE-rahoitusta. Aineiston sisältö heijastelee sen tekijöiden näkemyksiä, eikä Euroopan komissio ole vastuussa aineiston sisältämien tietojen käytöstä.

Kansikuva: Ennallistettu Soikealamminneva Salamajärven kansallispuistossa, Kinnulassa. Kuva: Marko Haapalehto.

Översättning: Lingsoft Language Services

© Metsähallitus, Vantaa, 2024

ISSN-L 1235-6549
ISSN (verkkojulkaisu) 1799-537X
ISBN 978-952-377-120-8 (pdf)

Ennallistettujen soiden seurannan kehittämisehdotukset

Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia
hoitoseurannan ja hydrologisen seurannan
parantamiseksi ja kaukokartoitusseurannan
perustamiseksi



Hydrologia-LIFE



Kuvailulehti

Julkaisija Metsähallitus Julkaisuaika 24.4.2024
Luottamuksellisuus Julkinen Asianumero MH 3290/2024

Tekijä(t) Lauri Ikkala ja Maarit Similä (toim.)

Julkaisun nimi Ennallistettujen soiden seurannan kehittämisehdotukset – Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia hoitoseurannan ja hydrologisen seurannan parantamiseksi ja kaukokartoitusseurannan perustamiseksi

Tiivistelmä

Soiden ennallistaminen on tehokas keino hidastaa luontokatoa sekä edistää valunnan säätelyä, vedenpuhdistusta ja hiilensidontaa. Ennallistamistoimintaa ollaan lisäämässä voimakkaasti ja siksi tarvitaan entistä soveltuvampia, sujuvampia ja tehokkaampia seurantamenetelmiä osoittamaan ennallistamisen vaikutukset ja vastaamaan menetelmien kehittämistarpeisiin.

Valtion luonnonsuojelualueilla soiden ennallistamisen seuranta jakautuu tekniseen hoitoseurantaan ja pitkän aikavälin vaikuttavuusseurantaan, jossa tutkitaan seurantaverkoston avulla muutoksia soiden hydrologiassa ja kasvillisuudessa. Perinteisten seurantamenetelmien lisäksi kaukokartoituksella on suuri potentiaali havainnoinnin laajentamiseen yksittäisistä pisteistä tai suppeilta alueilta koko ennallistettavan suon alalle.

Tähän raporttiin on koottu Hydrologia-LIFE-hankkeessa syntyneitä ehdotuksia ja kehityssuosituksia ennallistettujen soiden seurantaan liittyen. Hankkeessa soiden seuranta kehitettiin keräämällä kyselyn ja työpajojen avulla ennallistamissuunnittelijoiden ja työmaiden ohjaajien kokemuksia hoitoseurannasta sekä hydrologisten mittausten ja näytteenoton toteuttamisesta. Lisäksi hankkeessa käsiteltiin ennallistettujen soiden seurantaverkostosta kertyneet 10-vuotisaineistot yli 40 kohteelta sekä analysoitiin hankkeessa ennallistetuilta kohteilta turve- ja huokosvesinäytteitä. Hankkeessa testattiin ja kehitettiin myös soiden seurantaan potentiaalisia kaukokartoitusmenetelmiä, joita koottiin kirjallisuuskatsauksen avulla. Lisäksi hankkeessa kuvattiin ja analysoitiin korkean resoluution drooniaineistoja yli 20 kohteelta.

Seurantojen kehittämisessä korostuivat ohjeistuksen päivittämisen ja jatkuvan kouluttamisen tarpeellisuus. Hoitoseurannat haluttiin jatkossakin pitää joustavana menetelmänä, mutta havainnoimisen yhdenmukaistamiselle koettiin silti tarvetta. Suoseurantaverkoston hydrologisten 10-vuotishavaintosarjojen perusteella ennallistettujen soiden vedenkorkeus saattaa olla herkempi vuosien väliselle vaihteluille kuin vastaavilla luonnontilaisilla kohteilla. Ennallistaminen aiheuttaa vedenlaatuun tilapäisen häiriön, joka tasoittuu 5–10 vuodessa ennallistamisen jälkeen. Verkoston ainutlaatuiset aineistot olisi syytä avata kaikkien tutkijoiden vapaaseen käyttöön.

Kaukokartoitus katsottiin hyväksi, maanpinnalta tehtävää seuranta täydentäväksi työkaluksi esimerkiksi suon pintakosteuden, kasvillisuuden, kasvihuonekaasutaseiden ja turpeen ominaisuuksien seurantaan, erityisesti avoimilla soilla. Kvantitatiivisten havaintojen muodostamiseksi tarvitaan kuitenkin yleensä myös suon pinnalta kerättäviä tukiaineistoja. Drooneilla on mahdollista tuottaa melko helposti korkean resoluution aineistoja, mutta niiden systemaattisempi käyttö vaatii aktiivista panostusta tekniseen kehitystyöhön ja laadunhallintaan.

Raportin tietoja voidaan käyttää tulevassa seurantaohjeistuksen päivitystyössä ja ympäristöhallinnon paikkatietojärjestelmiä uudistettaessa. Kaukokartoituskokemukset ja kirjallisuuskatsaus tukevat soiden teknisen seurannan lisäämistä. Kokemuksia voidaan soveltaa soiden ennallistamisen seurannan järjestämiseen muuallakin kuin valtion suojelualueilla.

Avainsanat suot, ennallistaminen, seuranta, hoitoseuranta, hydrologinen seuranta, seurannan kehittäminen, ohjeistus, Hydrologia-LIFE, kaukokartoitus, droonit

Sarjan nimi ja numero Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 251
ISSN-L 1235-6549 ISSN (verkkojulkaisu) 1799-537X
ISBN (pdf) 978-952-377-120-8
Sivumäärä 148 s. Kieli Suomi
Kustantaja Metsähallitus, Luontopalvelut

Presentationsblad

Utgivare	Forststyrelsen	Utgivningsdatum	24.4.2024
Sekretessgrad	Offentlig	Diarienummer	MH 3290/2024
Författare	Lauri Ikkala och Maarit Similä (red.)		
Publikation	Utvecklingsförslag för uppföljning av restaurerade myrar – Erfarenheter från projektet Hydrologi-LIFE för att förbättra skötseluppföljningen och den hydrologiska uppföljningen samt för att inrätta fjärranalysuppföljning		

Sammandrag

Restaurering av myrar är ett effektivt sätt att bromsa förlusten av biologisk mångfald och främja flödesreglering, vattenrening och kolbindning. Restaureringsverksamheten utökas kraftigt och därför behövs allt lämpligare, smidigare och effektivare uppföljningsmetoder för att påvisa restaureringens effekter och svara på metodernas utvecklingsbehov.

Uppföljningen av restaureringen av myrar i statens naturskyddsområden indelas i teknisk skötseluppföljning och långsiktig effektivitetsuppföljning, där man med hjälp av ett uppföljningsnätverk undersöker förändringar i myrarnas hydrologi och vegetation. Utöver de traditionella uppföljningsmetoderna har fjärranalys stor potential att utvidga observationen från enskilda punkter eller begränsade områden till hela den myr som restaureras.

I denna rapport ingår förslag och utvecklingsrekommendationer som uppkommit inom projektet Hydrologi-LIFE i anslutning till uppföljningen av restaurerade myrar. Inom projektet utvecklades uppföljningen av myrar genom att med hjälp av en enkät och workshoppar samla in erfarenheter av skötseluppföljning och genomförande av hydrologiska mätningar och provtagningar från dem som planerat restaureringarna och dem som lett arbetet på plats. I projektet behandlades dessutom material från uppföljningsnätverket för restaurerade myrar på över 40 platser under 10 års tid och det gjordes analyser av torv- och porvattenprover från de restaurerade myrar som ingick i projektet. Inom projektet testades och utvecklades också potentiella fjärranalysmetoder för uppföljning av myrar. Metoderna sammanställdes med hjälp av en litteraturöversikt. I projektet beskrevs och analyserades dessutom drönarmaterial med hög upplösning från över 20 platser.

I utvecklingen av uppföljningarna betonades behovet av uppdaterade anvisningar och kontinuerlig utbildning. Man ville fortsätta betrakta skötseluppföljningar som en flexibel metod, men upplevde ändå ett behov av att förenhetliga observationerna. Utifrån myrövervakningsnätverkets hydrologiska observationsserier som täcker 10 år kan vattenståndet i restaurerade myrar vara känsligare för variationer från år till år än i motsvarande orörda myrar. Restaureringen orsakar en tillfällig störning i vattenkvaliteten, som utjämnas inom 5–10 år efter restaureringen. Nätverkets unika material borde göras tillgängligt för alla forskare.

Fjärranalys ansågs vara ett bra verktyg som kompletterar uppföljningen på markytan, till exempel för att följa upp myrens ytfukt, vegetation, växthusgasbalans och torvens egenskaper, särskilt på öppna myrar. För att skapa kvantitativa observationer behövs dock i allmänhet också stödmaterial som samlas in från myrens yta. Drönare kan relativt enkelt producera material med hög upplösning, men för att använda dem mer systematiskt krävs aktiva satsningar på teknisk utveckling och kvalitetsledning.

Uppgifterna i rapporten kan användas i det kommande arbetet med att uppdatera uppföljningsanvisningarna och förnya miljöförvaltningens geografiska informationssystem. Erfarenheterna av fjärranalys och litteraturöversikten stöder en ökad teknisk uppföljning av myrarna. Erfarenheterna kan tillämpas på uppföljningen av restaureringen av myrar även på andra ställen än i statens skyddsområden.

Nyckelord myrar, restaurering, uppföljning, skötseluppföljning, hydrologisk uppföljning, utveckling av uppföljning, anvisningar, Hydrologi-LIFE, fjärranalys, drönare

Seriens namn och nummer	Forststyrelsens naturskyddspublikationer. Serie A 251		
ISSN-L	1235-6549	ISSN (online)	1799-537X
ISBN (pdf)	978-952-377-120-8		
Sidantal	148 s.	Språk	Finska
Förlag	Forststyrelsen, Naturtjänster		

Documentation Page

Published by	Metsähallitus	Publication date	24.4.2024
Sekretessgrad	Offentlig	Diarienummer	MH 3290/2024
Author(s)	Lauri Ikkala and Maarit Similä (eds)		
Title	Proposals for developing the monitoring of restored peatlands – Experiences gained in Hydrology LIFE project for developing general and hydrological monitoring as well as setting up monitoring by remote sensing		

Abstract

Peatland restoration is an effective means to slow down biodiversity loss as well as to promote flow regulation, water purification and carbon sequestration. Restoration activities are increasing significantly, and thus, more applicable, fluent and efficient monitoring methods are needed to show the restoration impacts and to respond to the development needs of the methods.

On the Finnish state-owned land, peatland restoration monitoring can be divided into technical general monitoring and impact monitoring which uses a monitoring network to study the long-term changes in peatland hydrology and vegetation. Besides the conventional monitoring methods, remote sensing has a strong potential to widen the observations from single points or limited areas to the whole peatland site.

This report gathers the proposals and development recommendations from the Hydrology LIFE project. During the project, peatland restoration monitoring was developed by gathering the experiences on general monitoring and hydrological fieldwork from the restoration planners and site managers using a poll survey and workshops. Furthermore, the 10-year hydrological data from over 40 sites in the monitoring network was processed and peat and pore water samples were gathered and analysed during the project. Also, remote sensing methods were introduced using a literature review and picked methods were tested and developed at the project sites. High-resolution drone data from over 20 sites were also gathered and analysed.

Updated guidelines and regular training were emphasized in the monitoring development needs. The survey respondents wanted to keep general monitoring flexible also in the future, but observing still needs uniforming. The 10-year observation data shows that the restored water levels might be more sensitive to interannual variability than the water levels at corresponding pristine sites. Restoration produces a temporary interference in the water quality, but it diminishes during 5–10 years after the restoration. The unique data from the monitoring network should be opened for free use by all researchers.

Remote sensing was considered an appropriate tool for supplementing the ground-level observations on peatland surface moisture, vegetation, greenhouse gas emissions and peat properties, on open peatlands in particular. To enable quantitative observations, however, usually also ground truth observations are needed. Drones are a rather easy way to produce high-resolution datasets, but their more systematic use requires resources for technical development and quality control.

The results of the report can be used in the development work of the monitoring guidelines and the environmental authority's geoinformation system. Remote sensing experiences and the literature review support increasing technical monitoring of peatlands. Experiences can be applied in organizing peatland restoration monitoring also outside the state-owned protection areas.

Keywords Peatlands, restoration, monitoring, general monitoring, hydrological monitoring, development of monitoring, guidelines, Hydrology LIFE, remote sensing, drones

Series name and no.	Nature Protection Publications of Metsähallitus. Series A 251		
ISSN-L	1235-6549	ISSN (online)	1799-537X
ISBN (pdf)	978-952-377-120-8		
No. of pages	148 pp.	Language	Finnish
Publishing co.	Metsähallitus, Parks & Wildlife Finland		

Sisällys

Lyhenteet.....	9
1 Johdanto	11
2 Menetelmät.....	14
3 Hoitoseurannan kehittämisehdotukset.....	16
3.1 Hoitoseuranta.....	16
3.2 Hoitoseurannan nykyiset käytännöt	17
3.3 Soiden hoitoseurantojen kehittäminen kyselyn, työpajamuistiinpanojen ja muiden kokemusten pohjalta.....	19
3.4 Hoitoseurantojen kehittämisen johtopäätökset	20
4 Hydrologisen seurannan kehittämisehdotukset.....	21
4.1 Hydrologinen seuranta.....	21
4.2 Hydrologisten seurantojen nykyiset käytännöt ja kehittäminen kyselyn, työpajamuistiinpanojen ja muiden kokemusten pohjalta.....	22
Vedenkorkeuden mittaukset.....	22
Vesinäytteen ottaminen ja lähettäminen.....	23
Näytteenottajan vaikutus.....	24
Vedenlaadun maastomittaukset.....	24
4.3 Havaintoja hydrologisista aineistoista.....	24
Ennallistamisen aiheuttamat hydrologiset muutokset.....	24
Aiempia havaintoja seurantaverkoston aineistoista.....	25
Havaintoja seurantaverkoston aineistoista kymmenen vuoden jälkeen...26	
Havaintoja turpeen, huokosveden ja valumaveden laatuojen yhteyksistä .	33
4.4 Hydrologisten seurantojen kehittämisen johtopäätökset	33
5 Kaukokartoitusseurannan perustamisehdotukset.....	34
5.1 Kaukokartoitus soiden ennallistamisen seurannassa.....	34
Kaukokartoituksen käyttöönotto.....	34
Sensorien mahdollisuudet.....	34
Kaukokartoitusmenetelmiä ennallistamisen seurantaan	36
Kaukokartoituksen ajankohdat	36
Kaukokartoitusaineistojen laatu	38
5.2 Avoimia aineistoja.....	38
5.3 Droonikuvaukset.....	40
5.4 Droonit soiden ennallistamisen seurannassa.....	43
Mitä voidaan kuvata?.....	43
Aluerajaukset.....	43
Ilma-alukset.....	44
Kuvausohjeistus.....	44
Aineistojen käsittely	46

Kokemuksia käyttöönnotosta	47
Tulosten hyödyntäminen.....	48
5.5 Tulokset: Näkyvän valon kuvaukset.....	49
5.6 Tulokset: Multispektri- ja lämpökuvaukset.....	54
5.7 Tulokset: Topohydrologinen analyysi.....	56
5.8 Kaukokartoitusseurannan perustamisen johtopäätökset	59
6 Yhteenveto ja suositukset.....	60
6.1 Yleisiä huomioita suo seurantojen kehittä-miseksi.....	60
6.2 Hoitoseuranta.....	60
6.3 Soiden ennallistamisen seurantaverkosto.....	61
6.4 Hydrologiset seurannat.....	62
6.5 Kaukokartoitus yleisesti.....	63
6.6 Drooniseuranta	65
Kiitokset.....	68
Lähteet.....	69
Liitteet	75
Liite 1. 10-vuotisvedenkorkeusvertailut seurantaverkoston kohteilta	75
Liite 2A. 10-vuotisvedenlaatuvertailut seurantaverkoston avosuokohteilta	83
Liite 2B. 10-vuotisvedenlaatuvertailut seurantaverkoston räme kohteilta.....	111
Liite 2C. 10-vuotisvedenlaatuvertailut seurantaverkoston korpikohteilta	127
Liite 3. Turpeen, huokosveden ja valumaveden laadun korrelaatiot.....	143
Liite 4. Droonilennot.....	145

Lyhenteet

CI	Luottamusväli (Confidence Interval)
DOC	Liennut orgaaninen hiili (Dissolved Organic Carbon)
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EU	Euroopan unioni
FAO	Elintarvike- ja maatalousjärjestö (Food and Agriculture Organization)
GPS	Global Positioning System
GRVI	Green Red Vegetation Index
GSD	Ground Sampling Distance
IQR	Kvartiilivälin pituus (Interquartile Range)
MK	Mustikkakorpi
MKmu	Mustikkakorpimuuttuma
NATA	Natura-alueiden tila-arviointi
PPK	Post-Processing Kinematic
RTK	Real-Time Kinematic
RhK	Ruoho- ja heinäkorpi
Rhtkg	Ruoho- ja heinäturvekangas
RRN	Relative Radiometric Normalization
SAKTI	Suojelualueiden kuviotietojärjestelmä
SASSI	Suojelualueiden suunnittelun ja seurannan tietojärjestelmä
SN	Saraneva
SNmu	Saranevamuuttuma
SR	Sararäme
SRmu	Sararämemuuttuma
SWC	Soil Water Content
SWI	Saga Wetness Index
UAS	Uncrewed Aerial System
UAV	Uncrewed Aerial Vehicle
VLOS	Jatkuva näköyhteys droniin (Visual Line Of Sight)

1 Johdanto

Soiden kuivattaminen on aiheuttanut maailmanlaajuisesti luontokatoa ja heikentänyt soiden ekosysteemipalveluja, kuten valunnan säätelyä, vedenpuhdistusta ja hiilensidontaa (Leifeld & Menichetti 2018, Page & Baird 2016). Soiden ennallistamisen on osoitettu olevan tehokas keino palauttaa edellisiä ja hidastaa luontokatoa (Haapalehto ym. 2017, Laine ym. 2016).

Kansainvälisesti soiden luonnontilan palauttamista ohjaavat esimerkiksi Yhdistyneiden kansakuntien ilmastosuojelun puitesopimus sekä Euroopan unionin (EU) luontodirektiivi ja biodiversiteettistrategia 2030 (Euroopan unioni 2020, Food and Agriculture Organization FAO 2020). Ennallistamistoinnin kasvaessa lisääntyy tarve seurata ennallistamisen vaikutuksia, jotta voidaan todeta tehtyjen toimenpiteiden vaikuttavuus, suorittaa tarvittavia teknisiä korjauksia ja kehittää ennallistamismenetelmiä (González ym. 2013, Suding 2011).

Suomessa ensimmäiset soiden ennallistamiskokeilut suoritettiin käsityönä 1970- ja 1980-luvuilla heti ojitusten jälkeen (Aapala ym. 2013). 1990-luvulla ennallistaminen muuttui pääasiassa konetyöksi. EU:n Life-rahoituksen ja kansallisen METSO-rahoituksen myötä ennallistamismäärät kasvoivat merkittävästi.

Vuoteen 2020 mennessä soita oli Suomessa ennallistettu jo yli 31 000 hehtaaria (Kareksela ym. 2021). Siinä missä ennallistaminen on 2020-luvulla Metsähallituksen Luontopalvelujen toiminnassa rutiinia luonnonsuojelualueilla, yhteiskunnallinen ympäristötietoisuuden lisääntyminen ja ymmärrys soiden heikosta tilasta sekä päästökauppa ovat lisänneet ennallistamistoimintaa myös yksityisillä mailla ja valtion monikäyttömetsissä.

Suunnitteilla oleva EU:n ennallistamisasetus tullee lisäämään ennallistamistoimintaa merkittävästi, mikä kasvattaa painetta perin-

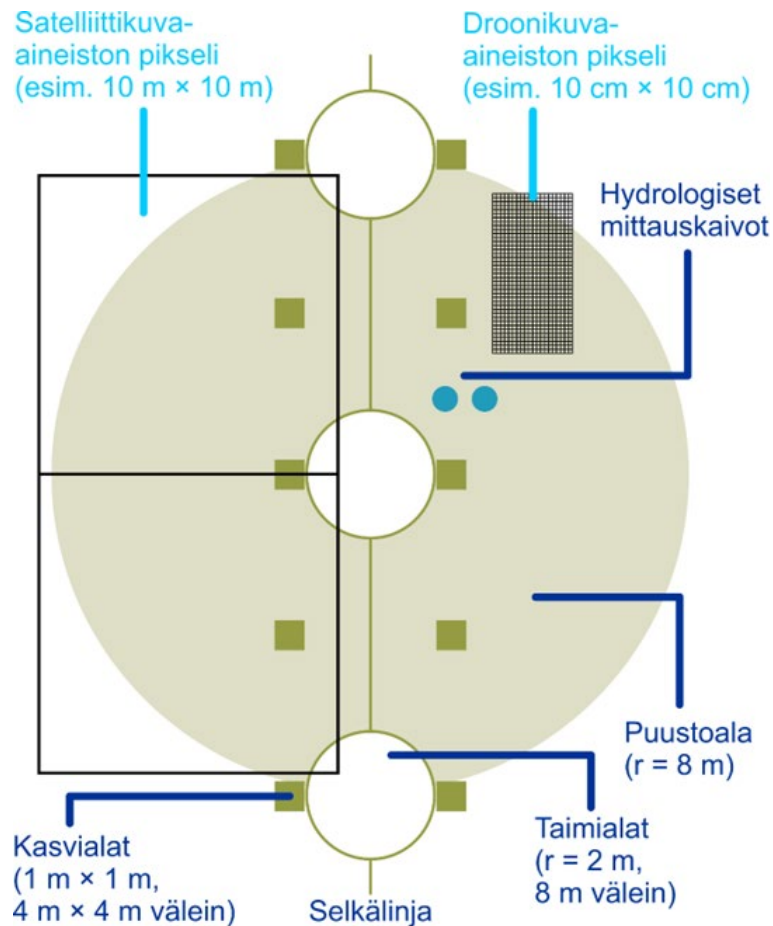
teisten ennallistamis- ja seurantamenetelmien kehittämiseen mutta myös uusien, laajoille alueille soveltuvien seurantamenetelmien käyttöönottamiseen.

Ennallistamisella tarkoitetaan aktiivista toimenpidettä, jolla edesautetaan taantuneen, vahingoittuneen tai tuhoutuneen ekosysteemin palautumista kohti jotakin sen aiempaa, taantumista edeltänyttä tilaa (Tolvanen 2011). Soita ennallistetaan tyypillisesti täyttämällä ja patoamalla kaivetut ojat. Ojalinjat voidaan raivata kaivinkonetta varten ja puustoa poistetaan myös ojien välisiltä alueilta tarvittaessa, koska se vaikuttaa alueen haihduntaan.

Ennallistamismenetelmistä julkaistiin vuonna 2002 opas (Heikkilä ym. 2002) ja myöhemmin vuonna 2013 päivitetty, perusteellisempi opas, jossa käsitellään myös seurannan järjestämistä (Aapala ym. 2013). Ennallistettujen soiden ja metsien seurantaohjeistus puolestaan koottiin yksien kansien väliin jo aiemmin vuonna 2007 (Päivinen & Aapala 2007). Ohjetta täydennettiin ja uudistettiin jo vuonna 2009 (kuva 1, Hyvärinen & Aapala 2009). Sen jälkeenkin seurantoja on kehitetty, ja ohje odottaa uudistamista. Ennallistamisen ja luonnonhoidon asiantuntijaryhmät (ELO, Metsä-ELO ja Suo-ELO) suunnittelivat seurantojen ohjeistuksen.

Hydrologia-LIFE-hankkeessa (LIFE16NAT/FI/000583) ennallistettiin soita sekä kunnostettiin puroja ja lintuvesiä 103 toimenpidekohteilla vuosina 2017–2023. Hankkeessa kehitettiin myös soiden seuranta parantamalla olemassa olevia menetelmiä ja selvittämällä uusia teknisiä mahdollisuuksia.

Hankkeen loppuvaiheessa järjestetyssä kyselyssä kartoitettiin vastaajien näkemyksiä suoseurantojen tavoitteista. Useimmissa vastauksissa keskeiseksi tarkoitukseksi kerrottiin ennallistamisen aiheuttamien suoluonnon muutosten arviointi. Näin kyetään mittaa-



Kuva 1. Perinteinen ja uudistuva suoseuranta. Kuvassa on esitetty kaukokartoitusaineistojen tyypillisiä pikselikokoja verrattuna perinteisiin seurattuihin aloihin. Kuva: Lauri Ikkala, muokattu lähteestä Hyvärinen & Aapala (2009).

maan ennallistamisen vaikutuksia ja kehittämään ennallistamismenetelmiä. Vaikutukset jakaantuvat kohteella havaittuihin primääriin ja kohteen ympäristössä (esim. alapuolisessa vesistössä) havaittaviin sekundääriin vaikutuksiin.

Seurantoihin kuuluu käytännönläheistä, silmämääräiseen tarkasteluun perustuvaa seuranta ennallistamisen teknisestä onnistumisesta (ns. hoitoseuranta) sekä pitkäjänteistä ja systemaattista suon hydrologian ja lajiston palautumisen seuranta (ns. vaikuttavuusseuranta, Päivinen & Aapala 2007).

Ennallistetuilla kohteilla on tyypillisesti hyvin tai erinomaisesti palautuneiden alueiden lisäksi kohtia, joissa ennallistuminen ei ole heti käynnistynyt tavoitteiden mukaisesti. Hoitoseurannan avulla havaittuja puutteita

voidaan tarvittaessa korjata. Jos selkeää korjausta vaativaa kohtaa ei ole, voi olla tarkoituksenmukaista seurata tilannetta pitempi aika ennen uutta korjaustarpeen arviointia. Soiden ennallistuminen on joka tapauksessa vähintään vuosikymmeniä kestävä prosessi.

Suoseurantaverkoston avulla tehtävä vaikuttavuusseuranta mahdollistaa tieteellisten päätelmien tekemisen sekä yksittäisiltä kohteilta saatujen tietojen yleistämisen valtakunnalliseksi ymmärrykseksi. Verkostoon sisältyy noin 160 suokohdetta, mikä on kansainvälisestikin merkittävä tutkimusasetelma ennallistamisen vaikutusten systemaattiseen tutkimiseen. Verkoston hydrologisia aineistoja ja kasvillisuusaineistoja on kerätty noin vuodesta 2013 alkaen.

Hydrologia-LIFE-hankkeessa ennallistetuille kohteille tehtiin ensimmäinen hoito-seuranta. Joillakin kohteilla seurattiin lisäksi systemaattisesti veden laatua ja vedenkorkeutta. Hankkeessa myös analysoitiin kymmenvuotisaikasarjoja suoseurantaverkoston kohteilta.

Kaukokartoituksen hyötyjä ja mahdollisuuksia ennallistamisen seurannassa selvitetiin hankkeessa kirjallisuuskatsauksen avulla sekä tuottamalla ja analysoimalla korkean resoluution drooniaineistoja. Kaukokartoitusta on käytetty soiden seurannassa pitkään, alkaen historiallisista ilmakuvista. Mittaustek-

nologian kehittyessä ja satelliittitoiminnan lisääntyessä kaukokartoitusaineistojen hyödyntäminen on noussut entistä tärkeämmäksi osaksi soiden seurantaa (Minasny ym. 2019). Viimeisimmän vuosikymmenen aikana droonit ovat lisääntyneissä määrin täyttäneet miehittyjen lentojen ja maanpinnalta tehtävän havainnoinnin väliin jäävää aukkoa (Dronova ym. 2021, Jeziorska 2019).

Tämä raportti kokoaa Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia hoitoseurannan ja hydrologisen seurannan kehittämiseksi sekä kaukokartoitusseurannan perustamiseksi.

2 Menetelmät

Tämän raportin pohjana toimivia aineistoja ja havaintoja on kerätty Hydrologia-LIFE-hankkeeseen liittyvissä ennallistamisen kenttätöissä ja työpajoissa, kertyneitä seuranta-aineistoja käsittelemällä ja tieteellisiä julkaisuja valmistelemalla.

Raportissa tarkastelluilla hankkeessa ennallistetuilla suokohteilla tehtiin ensimmäinen hoitoseuranta yleensä 1–2 vuotta toimenpiteiden jälkeen.

Hankkeen aikana hydrologiaa seurattiin ja analysoitiin lisäksi 46:lla pitkäaikaisseurannan kohteella, joista 27 oli ennallistettuja ja 19 luonnontilaisia verrokkeja. Kymmenvuotinen aikasarja tuli täyteen 43 kohteelta vuonna 2022. Tätä aineistoa analysoitiin tieteellistä julkaisua varten (Päkkilä ym. 2023a). Kahdeksalla kohteella seurataan vedenlaadun ja -korkeuksien lisäksi myös valuntaa. Huokosveden ja valumaveden välisiä yhteyksiä analysoitiin tieteellistä julkaisua varten (Päkkilä ym. 2023b). Kohteet kuuluvat pääosin valtakunnalliseen soiden ennallistamisen seurantaverkostoon.

Joiltakin hankkeessa ennallistetuilta kohteilta (6 kohdetta, 23 tutkimuspistettä), joissa oli havaittu erityisen korkeita tai matalia huokosveden ravinteiden ja liuenneen orgaanisen aineksen (Dissolved Organic Carbon, DOC) pitoisuuksia aiemmassa seurannassa, kerättiin lisäksi turvenäytteitä, joiden avulla analysoitiin turpeen koostumuksen vaikutusta huokosveden ja kohteelta poistuvan veden laatuun, jolloin voitiin nimetä tyypillisiä kohonneeseen vesistö päästöriskiin liittyviä suon ominaisuuksia (Päkkilä ym. 2023c).

Yhtenä hankkeen tavoitteena oli testata ja kehittää soiden ennallistamisen seurantaan uusia, kustannustehokkaita ja spatiaalisesti kattavia kaukokartoitusmenetelmiä ennallistamisen aiheuttamien paikallisten ja alueellisten muutosten osoittamiseksi suon vesitaloudessa ja kasvillisuudessa.

Käytännössä kaukokartoitusseurannan perustamisedellytyksiä tutkittiin tekemällä kirjallisuuskatsaus kaukokartoituksen käyttämisestä soiden ennallistamisen seurannassa (Ikkala ym. 2023) sekä kuvaamalla ja analysoimalla korkean resoluution droonianeistoja.

Drooniin kiinnitetyllä kameralla kuvattiin niin kutsuttuja näkyvän valon aineistoja eli tavallisia valokuva-aineistoja 43 tutkimuskohteessa, 27 suojealueella. Kohteet kuvattiin pääasiassa kerran ennen ennallistamista ja kerran ennallistamisen jälkeen. Valtaosa lennoista tehtiin hoitoseurantaa tukemaan ilman maan pinnalla tehtäviä kontrollimittauksia. Kontrollimittausten tehtävänä on kalibroida kuva-aineistoista luodun mallin geometria tai spektriaineistoilla tutkittava muuttuja, kuten maan pintakosteus.

Vaikuttavuusarvioinneissa kontrollimittauksia sen sijaan tehtiin. Menetelmäkehityskohteilla Mujejärven, Olvassuon ja Salamajärven alueilla (kussakin useita kuvausaloja) kerättiin myös kontrolliaineistoja, lennätettiin erikoislaitteita ja testattiin erilaisia analysointimenetelmiä. Erikoislaitteita olivat näkyvän valon ulkopuolisia aallonpituuksia tallentavat multispektri- ja lämpökamerat sekä drooniin asennettu laserkeilain. Tuotettua digitaalista maanpintamallia käytettiin myös topografiseen virtauskertymä- ja märkyysanalyysiin (Ikkala ym. 2022).

Satelliiteista ja miehitetyistä lentokoneista kerättävät aineistot jätettiin hankkeessa vähemmällä huomiolla katsausartikkelia lukuun ottamatta. Satelliittiaineistoja esiteltiin ja testattiin kuitenkin laaja-alaisemmin olemassa olevien seurantojen kehittämistä ja kaukokartoituksen käyttöönottoa varten järjestetyssä ”Suoseurantatyöpajassa” Jyväskylässä syksyllä 2022. Lisäksi näiden aineistojen käyttöönottoa on tutkittu laajemmin ympäristöministeriön erillisrahoittamassa Ennallistettujen so-

den tilan seurannan kehittäminen -hankkeessa (Räsänen ym. 2023).

Hydrologia-LIFE-hankkeessa kertyneitä kokemuksia koottiin Suoseurantatyöpajan lisäksi lukuisissa työpajoissa, joista merkittävimpinä kansainvälinen työpaja "Remotely sensed indicators for peatland restoration success" Oulussa ja Olvassuolla syksyllä 2019 ja droonilentäjille suunnattu "Näkyvän valon etätyöpaja" kesäkuussa 2020. Näissä työpajoissa kirjattuja muistiinpanoja on käytetty tämän raportin koostamiseen.

Talvella 2023 järjestettiin lisäksi hankkeen seurantojen parissa työskennelleille Suoseurantakysely, jossa 33 kysymyksen avulla (yleiset 2 kpl, hoitoseurannat 8 kpl, hydrologiset seurannat 11 kpl, drooniseurannat 12 kpl) koottiin kertyneitä kokemuksia seurantojen käytänteistä ja kehittämistarpeista. Vastajia oli yhteensä 18, joista 15 vastasi hoitoseurantaan, kahdeksan hydrologiaan ja kymmenen drooneihin liittyviin kysymyksiin. Kyselyn vastauksia on käytetty raportin ehdotusten koostamiseen.

3 Hoitoseurannan kehittämisehdotukset

Maarit Similä, Sakari Rehell ja Lauri Ikkala

3.1 Hoitoseuranta

Hoitoseurantaa tehdään kaikilla ennallistetuilla soilla. Kun ennallistamisen suunnitelun yhteydessä on määritelty ennallistamisen tavoitteet mahdollisimman konkreettisesti ja yksityiskohtaisesti, seurannalla on mahdollista selvittää, onko tavoitteet saavutettu (Hyvärinen & Aapala 2009). Hoitoseuranta on tarkoitettu kevyeksi ja joustavaksi seurantamenetelmäksi. Se on kuvailevaa: havaintoja tehdään silmämääräisesti tarkkojen mittausten sijaan. Ennallistettavat ja ennallistetut suot ovat keskenään hyvin erilaisia. Siksi yksi hoitoseuraajan haasteista on saada kerättyä jokaiselta kohteelta riittävät tiedot tavoitteiden täyttymisen arvioimiseksi.

Hoitoseuranta palvelee ennallistamisen toteutusta. Se mahdollistaa onnistumisen arvioinnin ja auttaa toimenpiteiden suunnittelijaa ja toteutuksen ohjaajaa hahmottamaan, millaiset keinot erilaisilla soilla toimivat ja miten ennallistamismenetelmiä pitää edelleen kehittää. Hoitoseurannan pohjalta pystytään myös tiedottamaan naapurimaanomistajia ja muita sidosryhmiä havainnoista.

Ensimmäinen hoitoseuranta tehdään, kun vedenpinta on noussut ennallistetulla suolla ja sen liikkumista voidaan havainnoida, pääsääntöisesti vajaan vuoden tai viimeistään kahden vuoden kuluessa ennallistamisesta. Ensimmäisessä hoitoseurannassa tarkastellaan toimenpiteiden teknistä onnistumista, ja tärkein tavoite on saada mahdolliset puutteet korjattua tuoreeltaan, ennen kuin ne aiheuttavat isompia ongelmia. Usein pieniä korjauksia patoihin tai vesien ohjaukseen voi tehdä saman tien, jos hoitoseurannan tekijällä on mukanaan lapio tai kuokka.

Jos ennallistamisen vaikutusten havaitaan olevan jollain tavalla odottamattomia tai ongelmallisia, eikä niitä saada korjattua hoitoseurantakäynnin yhteydessä, voidaan suunnitella lähiaikoina toteutettavat korjaustoimenpiteet. Jos ongelmat eivät ole akuutteja tai niiden kehittymistä halutaan vielä seurata, hoitoseuranta voidaan toistaa muutaman vuoden päästä.

Jos ongelmia ei ensimmäisellä hoitoseurantakerralla ole, toinen ohjeistuksen mukainen hoitoseurantakerta on noin kymmenen vuoden kuluttua ennallistamisesta, jolloin suon muutosten suunta on yleensä hyvin nähtävillä. 10-vuotishoitoseurannassa tarkastellaan silmämääräisesti ennallistamisen pitempiäaikaisia vaikutuksia ja suon luontaisten prosessien palautumista. Tavoitteena on päättää hoitoseuranta ja todeta ennallistamistyö ”valmiiksi”. Viimeistään tässä yhteydessä tarkistetaan Natura-luontotyyppien tila ja korjataan luontotyyppien edustavuudet ympäristöhallinnon paikkatietojärjestelmään.

Jos 10-vuotishoitoseurannan yhteydessä kuitenkin todetaan, että suo ei ole vielä ennallistunut toivotusti, arvioidaan, tarvitaanko täydentäviä toimenpiteitä ja pitääkö jatkossa vastaavanlaisella kohteella tehdä jotain toisin. Tarvittaessa tehdään korjauksista uusi työkohte ympäristöhallinnon paikkatietojärjestelmään.

Osa vuosina 2007–2019 ennallistetuista soista on mukana myös ennallistettujen soiden seurantaverkostossa, jossa seurataan kasvillisuuden ja vesitalouden lyhyt- ja pitkäaikaisia muutoksia ennallistamisen jälkeen.

Hoitoseurannassa huomiota kiinnitetään esimerkiksi (Hyvärinen & Aapala 2009):

- lajistoltaan tai luontotyypeiltään arvokkaisiin alueisiin
- vuotaviin patoihin
- veden kulkuun: ohjautuuko se alkuperäisille reiteilleen vai hakeutuuko edelleen täytetylle ojalle
- pohjavesivaikutteisten alueiden palautumiseen
- ravinteisten soiden palautumiseen tai ennallistamiseen: ohjautuuko oikeanlaatuista vettä oikeille alueille
- alkuperäisten purouomien ja piilopurojen palautumiseen
- alueisiin, joilla vesi on noussut odottamattoman paljon
- alueisiin, joihin ei näytetä saatavan riittävästi vettä
- kohtiin, joissa uhkana on suojelualueen ulkopuolisten maiden vettyminen
- muihin ongelmakohtiin, jotka vaativat korjausta tai seurantaa
- arvokkaisiin lajiesiintymiin: saatetaan tarvita useita seurantakäyntejä ennen 10-vuotishoitoseurantaa
- onko puuston kehitys tavoitteiden mukainen: ensimmäisellä hoitoseurantakeralla nähdään, onko vettä jossain liikaa ja puusto vaarassa kuolla, kun taas ei-toivottu taimettuminen ilmenee yleensä kymmenvuotishoitoseurantaan mennessä
- onko kenttä- ja pohjakerroksen kasvilisuuden kehitys tavoitteiden mukaista (näkyvillä yleensä vasta kymmenvuotishoitoseurannan yhteydessä).

Muita mahdollisuuksia hyödyntää hoitoseurantatietoja:

- ennallistamisen suunnittelun ja toteutuksen jatkuva kehittäminen (ns. hiljainen tieto), kun toimenpiteiden vaikutukset ovat näkyvissä ja käytetyt menetelmät tiedossa
- ennallistamisen vaikutuksista viestiminen sosiaalisessa mediassa ja tiedotusvälineille
- Natura-alueiden tila-arviointien (NATA) päivitykset: Natura-alueilla tehtyjen toimenpiteiden vaikutukset.

3.2 Hoitoseurannan nykyiset käytännöt

Ennallistamisen seurantaohjeessa (Hyvärinen & Aapala 2009) on hoitoseurannan ohjeistus ja seurantalomake. Se on tuorein kirjallinen versio ohjeistuksesta, mutta menetelmää on kehitetty edelleen Metsähallituksen eri luontopalvelualueilla, ja hoitoseurantakäytännöt vaihtelevat. Vaihtelua on myös hoitoseurantatietojen tallennuskäytännöissä.

Hydrologia-LIFE-hankkeessa alkuvuonna 2023 tehdyllä kyselyllä kartoitettiin eri alueiden nykyisiä hoitoseurantakäytäntöjä sekä ohjeistus- ja muutostarpeita. Vastauksia saatiin 15 (taulukko 1).

Hoitoseuranta tehdään siis eri kohteilla eri tavoin ja erilaisella tarkkuudella. Tallennuksessa on nykytilanteessa puutteita. Joidenkin hoitoseurantakäyntien havainnot ei ole välttämättä tallennettu mihinkään.

Taulukko 1. Hoitoseurannan työvaiheet ja nykyiset käytännöt vuonna 2023 tehdyn verkkokyselyn perusteella. Sarakkeisiin on koottu kaikki vaihtoehdot. Yleensä yksittäinen hoitoseuraaja käyttää vain osaa vaihtoehdoista.

Ennakovalmistelut ja -tarkastukset	Maastotyöt	Havaintojen tallennus ja muut toimistotyöt
<ul style="list-style-type: none"> • Mukaan alueen maastokartta ja ennallistamisen työmaakartat • Onko ennallistamissuunnitelmasta poikettu toteutusvaiheessa (ks. työkohteen dokumentointi) • Ilmakuvan tarkastelu • Tietojen tallennusta varten mukaan maastolaitte¹ ilman päivitettävää kuvioerää² tai erän kanssa • 10-vuotishoitoseuranta varten korkeusmallin tekeminen ja tarkastelu 	<p>Maastokierros</p> <ul style="list-style-type: none"> • Haasteelliset tai muuten keskeiset paikat • Kuvaus droonilla • Kuvaus maanpinnalta <p>Muistiinpanot</p> <ul style="list-style-type: none"> • Koordinaattipisteet maastolaitteelle • Kartalle havainnot • Hoitoseurantalomakkeen täyttö • Biotooppitiedot maastolaitteelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Paperilla mappiin • SAKTIin² • Toimenpidekuvioksi • Hoitoseurannan työkohteeksi • Korjaustarpeista toimenpideehdotus/työkohte • Seuraava hoitoseurantakerta SI-kohteeksi³ SASSiin⁴ tai toimenpide-ehdotukseksi SAKTIin

1 Metsähallituksen Luontopalveluissa käytössä oleva maastossa käytettävä tietojen tallennin.

2 Ympäristöhallinnon Suojelualueiden kuviotietojärjestelmään (SAKTI) luontotyyppitieto päivitetään kuviokohtaisena. Tietoja voidaan päivittää mm. maastolaitteelle otettavien, päivitettävien kuvioerien avulla.

3 Paikkatietojärjestelmään tallennettava Suunnittelu- ja inventointitarve-esitys.

4 Ympäristöhallinnossa käytettävä Suojelualueiden suunnittelun ja seurannan tietojärjestelmä.

3.3 Soiden hoitoseurantojen kehittäminen kyselyn, työpajamuistiinpanojen ja muiden kokemusten pohjalta

Hoitoseurantakyselyyn vastanneet pitivät vapaamuotoista hoitoseurantamenetelmää tarkoituksenmukaisena. Koska ennallistettuja soita on paljon, suot ovat luontaisesti erilaisia eri puolilla maata ja ojituksen vaikutukset vaihtelevat, kovin yhtenäistä ja kaavamaisista seurantamenetelmää ei pidetty edes mahdollisena. Moni vastaaja odotti, että hoitoseuranta säilyy jatkossakin kevyenä ja joustavana menetelmänä. Hoitoseurannan hyödyt arviointiin suurimmiksi silloin, kun suunnittelija, ennallistamisen toteutuksen ohjaaja ja seurannan tekijä ovat sama henkilö.

Vastaajat toivoivat, että **hoitoseurannoille määriteltäisiin minimitietosisältö ja yhtenäisen tietojen tallennustapa**. Tämä nähtiin tärkeäksi erityisesti uusien hoitoseuraajien työn helpottamiseksi.

Tällä hetkellä Metsähallituksessa ei ole käytössä maastotietokonetta, jolla hoitoseurantahavainnointia voisi tallentaa muuten kuin koordinaattipisteenä. Myöskään paikkatietojärjestelmässä ei ole hoitoseurantahavainnointia muuta tallennuspaikkaa kuin hoitoseurantakerroilta tehtävät työkohteet, joihin voi tallentaa sanallisia kuvauksia sekä pistetietoa työkohteiden ns. apukohteina.

Kun paikkatietojärjestelmää uudistetaan, tallennustavan yhtenäistämistä palvelisi esimerkiksi suuseurantakäyttöön kehitettävä mobiilisovellus, joka olisi yhteensopiva ympäristöhallinnon uudistettavan paikkatietojärjestelmän kanssa. Hoitoseurantaa palvelisi sekin, jos sovelluksen avulla pystyisi käyttämään maastossa avoimia paikkatietoaineistoja, kuten historiallisia ilmakuvia, korkeus- ja virtausmalleja sekä kohteelta kuvattuja droonaineistoja.

Ensimmäisen hoitoseurannan yhteydessä arvioidaan, milloin tarvitaan seuraava seurantakerta. Ensimmäisen ja 10-vuotishoitoseu-

rannan väliin tarvitaan ns. ylimääräinen hoitoseurantakerta esimerkiksi jos

- naapurimaanomistaja edellyttää säännöllistä seurantaa lyhyemmin aikavälein
- on vaarana, että vanha puusto alkaa kuolla liiallisen vedennousun seurauksena
- alueella on merkittävää virkistyskäyttöä
- uusilta ilmakuvilta havaitaan jokin huolestuttava muutos
- on kokeiltu uutta menetelmää ja siitä tarvitaan kokemuspohjaista tietoa.

Kun toimitaan suojelualueen rajalla, naapurimaanomistajalle on hyvä tarjota mahdollisuus osallistua hoitoseurantakäynteihin.

Ennallistettavia ja sitä myöten myös hoitoseurattavia soita on paljon. Käytännössä seurantaohjeessa (Hyvärinen & Aapala 2009) kuvailtuja 10-vuotishoitoseurantoja on toistaiseksi ehditty tekemään verrattain harvoilla kohteilla. **10-vuotishoitoseurantojen tekemiseen olisi kuitenkin tärkeä suunnata resursseja, koska ensimmäisen hoitoseurantakäynnin yhteydessä ei vielä pysty varmistumaan kasvillisuuden tai ravinteikkuuden muutoksista eikä vedenohjauksjärjestelyjen pitkäaikaisesta kestosta.**

Puulajikohtaisia puustotietoja ei nykyisin kerätä luontotyyppi-inventoinnissa, eikä ennallistettujen soiden puustotietojakaan ole todennäköisesti paikkatietojärjestelmään päivitetty viimeisimpien vuosien aikana korjuukohteita lukuun ottamatta. Biotooppitietojen päivytystä (ainakin ojitustilanne ja Natura-luontotyypin edustavuus) sen sijaan edellytetään ennallistamisen jälkeen.

Paikkatietojärjestelmään olisi syytä lisätä myös jonkinlainen arvioitavissa (tai jopa mitattavissa) oleva, hydrologian palautumista kuvaava muuttuja, joka palvelisi nimenomaan hoitoseurantaa. Parhaassa tapauksessa tämän muuttujan seuraaminen palvelisi myös ennallistamisen onnistumisen yleisempää arviointia ja ennallistamisen yleisempää kehittämistä.

Kohteiden, joiden ennallistamisessa tai ennallistumisessa on puutteita tai ongelmia, tulisi löytyä paikkatietojärjestelmästä nykyistä paremmin. Tämä tulee huomioida paikkatietojärjestelmää uudistettaessa.

Hoitoseurantojen hyödynnettävyyttä ennallistamisen onnistumisen yleisessä arvioinnissa voisi selvittää esimerkiksi opinnäytetyönä vertaamalla hoitoseurantahavainnointia hydrologisista aineistoista, kasvillisuusaineistoista ja kaukokartoitusaineistoista tehtäviin havaintoihin.

Lähdekohteilla ja rehevillä soilla veden laadun kenttämittarit helpottaisivat ennallistamisen suunnittelua ja seuranta. Mukana kannettavilla mittareilla voisi mitata ainakin veden lämpötilaa, pH:ta ja sähkönjohtavuutta. Ympäristöään kylmempi vesi kertoo kesällä pohjaveden purkautumisesta. Sähkönjohtavuuden ja pH:n mittauksen avulla voidaan puolestaan arvioida, ohjautuvatko kalkkivai- kutteiset, emäksiset tai muut vähemmän happamat vedet tavoitteiden mukaisesti.

Kaukokartoitusmenetelmistä (ks. luku 5) **toivotaan apua hoitoseurantojen tekemiseen ns. toimistotyönä.** Varsinkin avoimesti saatavilla olevat Maanmittauslaitoksen aineistot ja satelliittikuva-aineistot mahdollistavat ainakin jonkin tasoista suon tilan arviointia maastoon menemättä. Maanmittauslaitoksen tuotantoaikataulu ei kuitenkaan välttämättä vastaa seurannan tarpeisiin. Vastaavasti satelliittikuva-aineistojen käyttöä rajoittaa pilvisten kuvauspäivien suuri osuus ja aineistojen kohdalaisen karkea spatiaalinen erotuskyky, joka on tyypillisesti useita tai jopa kymmeniä metrejä.

Droonit ovat käytännöllinen apuväline määrillä ja vaikeakulkuisilla kohteilla. Kuvaus- aikataulun voi valita itse, ja droonien avulla saa usein paremman yleiskäsityksen alueesta kuin maan pinnalta tarkastellen. Droonin avulla voi myös selvittää, mitkä kohdat pitää käydä maastossa katsomassa tarkemmin. Droonilla otetuilla kuvilla on usein myös

viestinnällistä käyttöä. Hoitoseurannan yhteydessä droneilla kuvattiin hankkeessa lähinnä yksittäisiä valokuvia ja videoita. Myös systemaattisemmat droonikartoitukset tukisivat hoitoseuranta ja olisivat helppoja toteuttaa, mutta ne vaativat enemmän tallennuskapasiteettia sekä aineistojen prosessoinnin.

3.4 Hoitoseurantojen kehittämisen johtopäätökset

- Hoitoseurannat ovat jatkossakin tarpeen ennallistamisen onnistumisen tarkastamiseksi, kokemuksista oppimiseksi ja ennallistamismenetelmien hiomiseksi.
- Hoitoseurantojen nykyinen ohjeistus antaa hyvän muistilistan hoitoseurannassa havainnoitaville asioille. Kuitenkin ennallistamistoiminnan kehittyessä myös ohjeistusta on syytä päivittää aika ajoin.
- Hoitoseurannan minimietosisältö tulee määritellä ja tallennusohjeistus yhtenäistää.
- Hoitoseurantahavainnoille tulee edelleen yrittää kehittää uudistettavaan ympäristöhallinnon paikkatietojärjestelmään esimerkiksi aluemaista paikkatietomuuttujaa, jota voitaisiin hyödyntää ennallistamisen ja sen seurantojen systemaattisessa kehittämisessä sekä tiedolla johtamisessa.
- Kaukokartoitusmenetelmien hyödyntämisen hyviä käytäntöjä tulee jakaa ennallistamisen suunnittelijoiden ja seuraajien kesken.
- Droonin tulisi olla kaikkien halukkaiden käytettävissä soiden hoitoseuranta varten. Droonikuvausta ei pitäisi suunnittelijoiden mielestä kuitenkaan ottaa pakolliseksi osaksi hoitoseuranta, koska kuvaus on mahdollista vain melko tyyneellä säällä, eikä maastokauden aikataulu aina mahdollista sopivien kuvaussäiden odottelua.

4 Hydrologisen seurannan kehittämisehdotukset

Lassi Päckilä, Lauri Ikkala, Hannu Marttila, Petra Korhonen ja Maarit Similä

4.1 Hydrologinen seuranta

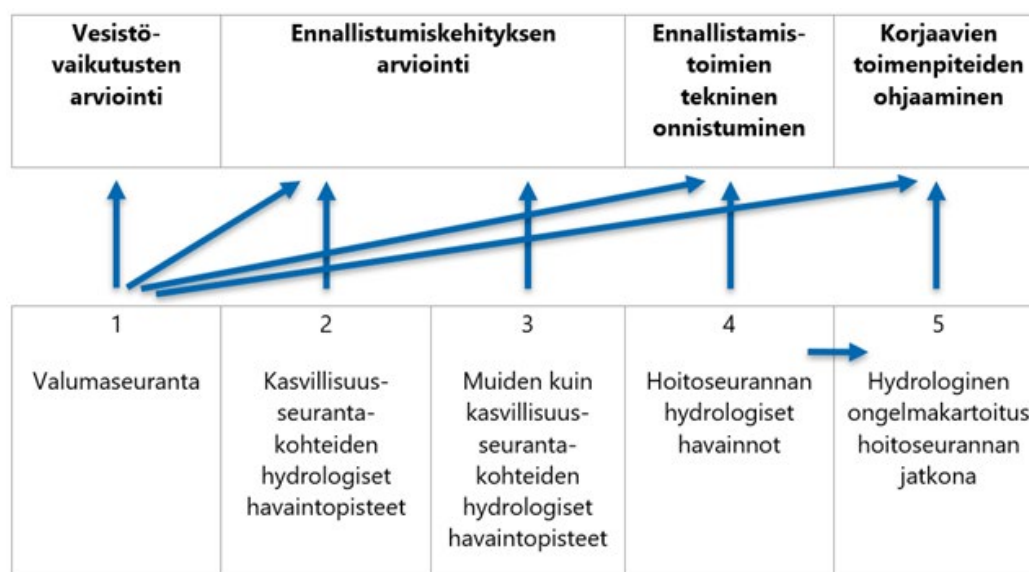
Soiden ennallistamisen ensisijaisena tavoitteena on lajiston ennallistumisen mahdollistavan luontaisen hydrologian palauttaminen (Hyvärinen & Aapala 2009). Muutokset hydrologiassa ovat yksi tärkeimmistä soiden ennallistamisessa seurattavista asioista, koska nämä luovat edellytykset suon ekologian ja ekosysteemipalveluiden palautumiselle. Ennallistamisen tavoitteiden asettaminen perustuu pitkälti yleispiirteiseen hydrologiseen analyysiin, jossa kuvataan alkuperäinen, nykyinen ja tavoiteltu vesien kulku alueella (Hyvärinen & Aapala 2009).

Tämänhetkiset hydrologiset seurantamenetelmät on koottu erilliseen seurantaohjeeseen (Hyvärinen & Aapala 2009). Nykyisten seurantakäytänteiden mukaisesti hydrologisia

muutoksia seurataan ennen ennallistamista ja sen jälkeen (ks. myös kuva 2):

- automaattisilla vedenkorkeusantureilla
- maastokäynneillä, joissa otetaan vesinäytteet suoveden pitoisuuksista ja mitataan vedenpinnankorkeus manuaalisesti automaattisten mittausten kalibrointia varten neljä kertaa vuodessa
- valuntaseurannoilla valikoiduilla kohteilla
- hoitoseurannan silmämääräisillä arvioinneilla.

Pitkäaikainen seuranta ennallistamisen jälkeen mahdollistaa ennallistamisen hitaampien ja pitkäaikaisempien vaikutusten ymmärtämisen.



Kuva 2. Hydrologisen seurannan osa-alueet. Hydrologia-LIFE-hankkeessa väliaikaisia hydrologisia havaintopisteitä (3) sijoitettiin myös muualle kuin kasvillisuusseuranta-kohteiden yhteyteen. Kuva: Lauri Ikkala (muokattu lähteestä Hyvärinen & Aapala 2009).

4.2 Hydrologisten seurantojen nykyiset käytännöt ja kehittäminen kyselyn, työpajamuistiinpanojen ja muiden kokemusten pohjalta

Vedenkorkeuden mittaukset

Vedenkorkeuksia mitataan jatkuvatoimisesti sulan maan aikaan vedenkorkeuskaivoista antureilla eli dataloggereilla sekä käsityönä vesinäytteitä haettaessa (neljä kertaa maastokaudella). Anturit mittaavat vedenkorkeuden 30 minuutin välein. Hydrologisessa seurannassa on ennallistettujen soiden lisäksi niiden luonnontilaisia vertailukohteita. Anturit on ennallistamisaloilla sijoitettu ojien välisille sarka-alueille, koska näillä on suurin riski jäädä ennallistamisessa ympäristöönsä kuivemiksi. Hankkeessa saran antureille asetettiin laitepareja myös viereiseen ojaan. Näin voidaan tulkita eroja vedenpinnan korkeudessa ja hydrologisissa gradienteissa ojalinjosten ja sarkojen välillä.

Vesikaivot upotettiin suohon noin 0,5–0,9 metrin syvyyteen. Vedenkorkeuksien mittauksilla tehdyn kyselyn perusteella kaivot pysyvät paikallaan melko vakaasti, mutta toisaalta liikkumistakin oli havaittu. Seurantaohjeistuksen (Hyvärinen & Aapala 2009) mukaan kaivon lähistölle asennetaan puinen merkkipaalu, jonka avulla talven aikana liikkuneen kaivon korkeus saadaan korjattua. Paaluja on hyödynnetty vaihtelevasti, ja kaikille hankkeen aikana lisätyille kaivoille paalua ei asennettu. Droonitoiminnan maastokäytökemusten (ks. luku 5.3) perusteella nämä paalut olisi syytä kiinnittää tukevasti turpeen alapuoliseen mineraalimaahan. Erityisesti routa saattaa liikuttaa putkea tai paalua pystysuunnassa siten, että se on keväällä ylempänä. Toisaalta rahkasammalten kasvu ja pitkällä aikavälillä turpeen kertyminen voivat aiheuttaa putken siirtymisen syvemmälle suhteessa aiempaan suon pintaan.

Jos kaivo peittyy sammalten alle, sitä on ohjeistettu jatkamaan lisäämällä toinen, lyhyempi putki alkuperäisen putken päälle (Hyvärinen & Aapala 2009). Hukkuneiden kaivojen etsinnän helpottamiseksi (ja etenkin silloin, kun havaintoja käytetään verrokkina kaukokartoitusaineistoilla) niiden koordinaatit on suositeltavaa mitata Real-Time Kinematic (RTK) -satelliittipaikannuslaitteen avulla. Hankkeessa kerättyjen kokemusten perusteella kesän aikana kasvaneiden sammalten on huomattu painuvan talvella niin, että putket löytyvät keväällä taas helposti, vaikka ne loppukesästä olisivatkin sammalten seassa piilossa. Lisäksi hirvien, porojen ja kettujen on havaittu liikuttelevan tai pureskelevan putkia.

Vedenpintakorkeusanturien tuottama aineisto sidotaan suon pintaan maastokäyntien yhteydessä tehdyillä manuaalisilla mittauksilla, jotka ovat ensiarvoisen tärkeitä seurannan tarkkuuden ja onnistumisen kannalta. Vedenkorkeus mitataan vesikaivoista yleensä puhallusputken avulla. Puhallusputki asetetaan kaivoon ja sitä lasketaan putkeen samalla puhaltaen. Putkessa olevasta mitta-asteikosta luetaan vedenpinnan syvyys putkessa siinä vaiheessa, kun puhallus aiheuttaa kuplivan äänen putken pään asettuessa vedenpinnan alapuolelle. Puhallusputken tulee olla riittävän pitkä toimiakseen myös kuivina kausina. Puhallusputken oltiin kyselyn perusteella tyytyväisiä menetelmän yksinkertaisuuden vuoksi, mutta ”piipparilaitettakin” (laitetta, joka päästää äänen osuessaan veteen) toivottiin testattavaksi.

Vedenkorkeuksien sitominen suon pintaan ei välttämättä ole yksiselitteistä, sillä suon pinta vesikaivon ympärillä ei ole tasainen ja pinnankorkeus elää vuodenkierrossa. Rahkasammalten kasvun ja painumisen lisäksi suonpinnan tason on havaittu vaihtelevan vuodenkierrossa vesipitoisuuden mukaan (Howie & Hebda 2018).

Pinnan spatiaalisen ja ajallisen vaihtelevuuden vuoksi vedenpinnan manuaalimitausten yhteydessä on tärkeää jokaisella kerralla mitata nk. putkimitta (pohjavesiputken

pään pystysuora etäisyys ympäröivästä suon pinnasta). Kyselyn perusteella maastohenkilöstö mielsi putkimitan määräytyvän kohtalaisen selkeästi ympäröivän rahkasammalpeitteen latvukseen. Kuitenkin latvusta joutuu keskiarvoistamaan silmällä, mikä luo mittaukseen oman subjektiivisuutensa. Yksittäisten rahkasammalten latvusten ei kerrottu vaikuttavan mittaukseen. Keskiarvoistus kerrottiin tehtävän tietyllä säteellä putkesta (esim. kämmenen mitta).

FAO (2020) on esittänyt idean polyvinyylikloridi (PVC) -kaulusrenkaasta, joka voidaan asettaa putken ympärille määräämään ympäröivän suon pinnan tason. Kaulus tulisi olla niin kevyt, että se ei paina suon pintaa alapäin, mutta niin painava, ettei se kellu, jos vesi nousee maanpintaa korkeammalle. Koska suonpinnan korkeus vaihtelee vuodentakierossa, kauluri olisi pikemminkin syytä asettaa putken ympärille joka mittauskerralla erikseen eikä asentaa kerran pysyväksi vertailukorkeudeksi. Lisäksi, jos suon pinta on eri korkeuksilla kaivon eri puolilla, pinnoista korkeampi määrää kaulurin asettumisen.

Vesinäytteen ottaminen ja lähettäminen

Vedenkorkeuden mittaamisen lisäksi maastokäynneillä otetaan vesinäytteet laboratorioanalyysiä varten. Maastokäynnit ovat tärkeitä ennallistamisen pitkäaikaisseurannassa: säännöllisesti ennalta määrättyinä ajankohtina otetut vedenlaadun näytteet mahdollistavat pitkän aikavälin muutoksien ja vuodenaajan vaihtelun vaikutusten ymmärtämisen ja dokumentoinnin.

Vesinäytteet pumpataan erillisestä näytteenottokaivosta yleensä yksinkertaisella lappopumpulla. Näytekaivon ympärillä on suodatinsukka, joka estää kiintoaineksen menemisen putkeen. Kuivana kautena osa näytteestä on joskus jouduttu ottamaan anurikaivosta. Yksi vastaaja ilmoitti ottaneensa näytteen pumpun ollessa rikki imemällä vettä putkeen (ei suuhun asti) ja päästämäl-

lä veden näytepulloon sitten letkun alaosaan. Pumppuletku ulottuu lähelle mittauskaivon pohjaa.

Kyselyn perusteella vesinäyte otetaan seuraavasti (yhdistetty eri vastauksista):

- 1) Mitataan vedenkorkeus.
- 2) Tilkalla vettä huuhdotaan näytepullot.
- 3) Kaivo tyhjennetään pumppauksella ylimääräiseen pulloon tai, jos veden riittävydestä on varmuus, maastoon (nk. näyte 1).
- 4) Odotetaan kaivon täyttyvän (10 min tai jos aikaa on, niin pidempäänkin).
- 5) Pumpataan näytepullo täyteen vettä (nk. näyte 2).
- 6) Näytteenottolomakkeelle kirjataan, onko pullossa vesi 1 vai 2 sekä mahdolliset epäselvyydet.

Jos näytettä 2 ei saada kuivuuden vuoksi, lähetetään laboratorioon näyte 1. Muuten näyte 1 kaadetaan pois. Jos veden riittävydestä on ollut epävarmuutta, yksi vastaaja kertoo tarkistaneensa asian puhallusputkella (puhaltamalla ilmaa aivan veden pintaan). Jos vettä ei ole riittänyt täyteen pullolliseen, on pullo lähetetty vajaana ja siitä on puristettu ylimääräiset ilmat pois. Vajaasta pullollisesta voidaan tehdä vain osa tilatuista analyyseistä.

Vesinäyte laitetaan kylmälaukkuun. Lämpimällä ilmalla kylmäpatruunoita kuljetetaan mukana myös maastossa kylmälaukussa tai repussa. Näyte lähetetään teipillä suljetussa kylmälaukussa laboratorioon samana päivänä. Ennen paketin lähetystä kylmäpatruunat vaihdetaan tuoreisiin ja paketti ympäröidään sanomalehdillä. Pääasiassa lähetykseen käytettiin Matkahuoltoa, mutta myös Postia. Osalle vastaajista toimitusaika ei ollut tiedossa, osa valitsi paketin toimituksen seuraavaan aamuun mennessä.

Olemassa oleva näytteenoton ohjeistus on epäselvä kuivien kausien osalta. Saattaa olla kyseenalaista, ovatko näytteet 1 ja 2 keskenään vertailukelpoisia. Kuivat kaudet ovat haastavia myös vedenkorkeuksien seurannalle, sillä näiltä osin aikasarjoihin jää puutteita.

Näytteenottajan vaikutus

Mittaus- ja näytetuloksiin vaikuttaa myös mittauksen suorittaja tai näytteenottaja. Kyselyn vastausten perusteella osalla kohteista sama henkilö teki mittaukset vuosien ajan, mutta vaihtuvuuttakin on ollut esimerkiksi lomien, määräaikaisten sekä työtehtävien vaihtumisen vuoksi. Yhdellä kohteella hydrologiset maastotyöt olivat huoltomiesten tehtävänä. Mittaajan vaikutusta tuloksiin voidaan pienentää selkeällä, kirjallisella ohjeistuksella ja säännöllisellä kouluttamisella. Myös esimerkiksi hydrologisen seurantapisteen valokuvaaminen ja putkimitan mittauspisteen dokumentointi kuvien avulla voisivat muuttaa seurantaa objektiivisemmaksi.

Vedenlaadun maastomittaukset

Kyselyssä kartoitettiin myös hydrologisia muuttujia, joista suunnittelijat kaipaivat tietoa heti kentällä ollessaan. Merkittävä osa kustannuksista muodostuu laboratorio-analyseistä. Maastomääritykset voisivat sujuvoittaa maastopäivien järjestelyä. Koska vesinäytteet joudutaan viemään postiin tai Matkahuoltoon niin hyvissä ajoin, että ne ehtivät saman päivän toimituksiin, näytteenottoa ei ole aina mahdollista yhdistää muihin maastotehtäviin. Parhaassa tapauksessa mittauksia olisi myös mahdollista suorittaa paikan päällä useammassa paikassa kuin näytteenottoa. Toisaalta laboratoriotyön siirtyminen maastomittauksiksi lisäisi kuitenkin maastotöiden määrää merkittävästi ja ennen kaikkea vaatisi maastomittauskalustoon investoimista.

Kaikkia laboratoriossa nyt määritettäviä muuttujia (esim. ravinnepitoisuus ja kiintoaineksen määrä) ei ole mahdollista siirtää maastomittauksiksi. Laadukkailla kenttämitareilla voidaan mitata pH, sähkönjohtavuus, lämpötila ja ultraviolettiabsorbanssi. pH olisi hyvä mitata kentällä siksikin, että se saattaa muuttua säilytyksen aikana ja se myös riippuu lämpötilasta. Lisäksi veden liikkeen havainnointiin kaivattiin kenttämenetelmää, esim.

liikenopeuden selvittämiseksi pintaturvekeroksessa.

4.3 Havaintoja hydrologisista aineistoista

Ennallistamisen aiheuttamat hydrologiset muutokset

Ojien tukkiminen ja patoaminen nostaa vedenpinnan tasoa suolla ja pienentää pinnan korkeuden vaihtelua yleensä jo ensimmäisinä kuukausina ja vuosina ennallistamisen jälkeen (Menberu ym. 2016). Ennallistamista seuraavina vuosina on tärkeä seurata suolla tapahtuvia muutoksia veden virtauksissa. Palautuvatko luonnolliset yhteydet yläpuoliseen valuma-alueeseen ja pohjavesiin? Ojien täyttäminen ja patoaminen sekä puuston poisto myös aiheuttavat suon pintakerrosten vesikemiaan häiriön, joka laantuu ennallistamista seuraavina vuosina (Menberu ym. 2017). Häiriön kesto riippuu kuitenkin ainakin toimien voimakkuudesta ja laajuudesta sekä suon rehevyydestä ja kasvillisuustyypistä. Ympäroivältä valuma-alueelta suolle virtaava vesi tuo mukanaan ravinteita ja hivenaineita, ja turpeessa virtaava vesi huuhtoo mukanaan humushappoja. Myös syvistä kerroksista suolle purkautuva pohjavesi voi mahdollistaa tiettyntyyppisten kasvien (esim. kalkinsuosijalajien) menestymisen suolla. Erilaisiin olosuhteisiin erikoistuneet kasvilajit ilmentävät suolla vallitsevaa hydrologiaa ja vedenlaatua. Seuraamalla kasvillisuutta voidaan saada viitteitä hydrologian muutoksista.

Ennallistamisen onnistumisen ymmärtäminen edellyttää, että ennallistetuilla kohteilla muutoksia seurataan pitkäaikaisesti ja niitä verrataan muutoksiin vastaavalla luonnontilaisella suokohteella. Näin voidaan sulkea pois esimerkiksi yksittäisen seurantavuoden sääolosuhteiden aiheuttama vaihtelu. Siksi on tärkeää varmistaa, että ennallistetun kohteen seurantaan yhdistetään luonnontilainen vertailukohde, ja näitä seurataan aina yhtäaikaista.

Ennallistamisen hydrologisessa seurannassa joidenkin lähekkäisten ja samankaltaisten, mutta eri aikaan ennallistettujen kohteiden verrokkeina on käytetty samoja luonnontilaisia kohteita. Näissä tapauksissa usein luonnontilaista vertailukohdetta on seurattu vain toisen ennallistetun kohteen seuranta-aikataulun mukaan, ja siten toinen ennallistetuista kohteista on jäänyt tiettyinä vuosina vaille vertailukohdetta. Erityisesti tilanne on ollut tämä yli viisi vuotta ennallistamisen jälkeen, kun seuranta harvenee.

Monilla kohteilla hydrologia palautuu kohti luonnontilaa hitaasti, ja seurannan onnistuminen olisikin syytä varmistaa tulevien seuranta-kausien maastotöitä suunniteltaessa. Luonnontilaisten verrokkien seuranta tulisi jatkossa ottaa ohjelmaan kaikkina niinä vuosina, joi- na vastaava ennallistettu suo on seurannassa.

Aiempia havaintoja seurantaverkoston aineistoista

Menberu ym. (2017) analysoivat ennallistamisen vaikutuksia suoveden laatuun 1–5 vuotta ennallistamisen jälkeen, jota verrattiin tilanteeseen ennen ennallistamista (vuosi 0). Ojitettujen kohteiden huokosveden kokonaisfosforin (P_{tot}), kokonaistypen (N_{tot}) sekä liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet olivat moninkertaiset verrattuna luonnontilaisiin vertailukohteisiin. Ennallistamisen seurauksena huokosveden ravinne- pitoisuudet kasvoivat ensimmäisenä ennallistamisen jälkeisenä vuonna, mutta niiden havaittiin pienenevän seuraavan neljän vuoden aikana pääasiassa matalammalle tasolle kuin ojitetussa tilanteessa ennen ennallistamista.

Tulokset ovat linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa (Haapalehto ym. 2014, Koskinen ym. 2017). Selvityksen perusteella ei-toivotut veden laadun muutokset vaimenivat nopeammin kuin joissakin aiemmissa valumatutkimuksissa on raportoitu (Sallantaus 2014). Tämä viittaa siihen, että valumaveden laadulliset muutokset ennallistamisen jälkeen johtuvat mitä todennäköisimmin pro-

sesseista ennallistamisesta häiriintyneillä alueilla, kuten täytetyillä ojalinjoilla. Siksi häiritettyjen kohtien tarkasteleminen suoalueella ennallistamisen jälkeen on tärkeää ja lisäksi enemmän häiriintyneitä kohtia tulisi ottaa paremmin huomioon tulevien soiden ennallistamistoimenpiteiden suunnittelussa.

Suurimmat huokosveden ravinnepitoisuudet havaittiin keskiravinteisilla ja ravinneköyhillä kohteilla, joiden huokosvesi on ravinteikkaita kohteita happamampaa. Tässä termeillä ravinneköyhä, keskiravinteinen ja ravinteikas viitataan suon ravinteisuustasoon, eikä suoraan suotyyppiin. Ravinteikkailla kohteilla ravinteet ovat korkeamman pH:n ansiosta helpommin kasvien hyödynnettävissä, ja ne siis käytetään tehokkaammin. Toisaalta ravinteikkailla kohteilla veden suurempi virtaus turpeessa saattaa lisätä ravinteiden huuhtoutumista.

Aineistosta havaittiin myös, että odotettua voimakkaammin tulvivilla kohteilla ravinteiden ja DOC:n pitoisuudet olivat huomattavasti korkeammat kuin paikoissa, joissa vedenpinta jäi suonpinnan alapuolelle. Ellei ennallistettava suotyyppi vaadi korkeita vedenkorkeuksia, kannattaisi ennallistamiskohteilla välttää turhaa suoalueen tulvittamista. Huokosveden ja valumaveden laatuja vertailtaessa huomattiin niiden korreloivan keskenään, ja suuret huokosveden ravinnepitoisuudet voivat johtaa myös suurempaan valunta-kuormaan. Tulokset osoittavat, että ennallistamistoimenpiteitä suunniteltaessa ja toteutettaessa on tärkeää ottaa huomioon kullekin suotyypille tyypilliset hydrologiset prosessit.

Tulokset viittaavat kuitenkin siihen, että ennallistaminen aiheuttaa vesistökuormitusta etenkin ennallistamista seuraavina vuosina. Siksi ennallistamisessa tulee pyrkiä ohjaamaan valumavesiä ennallistamisalueen sisälle tai ennallistamisalueen ulkopuolisille, ojittamattomille suoalueille, joissa liikkeelle läheneet ravinteet ja DOC voivat uudelleen pädäytyä kasvillisuuteen, jolloin vesistöihin kulkeutuu vähemmän ravinteita ja kiintoainesta.

Ennallistamisessa tulee huomioida soiden hydrologiset päämekanismit kunnostustoimenpiteitä suunniteltaessa. Pintavirtausreitit suolla ja sitä ympäröivällä valuma-alueella ennen ja jälkeen ennallistamisen voidaan arvioida digitaalisten korkeusmallien avulla (ks. luku 5.7). Tämä voi auttaa määrittämään, millaisilla teknisillä ratkaisuilla vesi saadaan jatkautumaan tasaisesti. Analyysin pohjalta voidaan suunnitella patojen ja pintavallien määrää, korkeutta ja sijoittelua. Etenkin jos suo ennallistetaan syystä tai toisesta pelkästään patoamalla eikä ojia täytetä, patojen riittävä koko ja määrä ovat erittäin tärkeitä.

Ojien täyttämistä ja patoamista voidaan tukea myös esimerkiksi istuttamalla sammalta ennallistamisalueelle (ojien varsille) tai siirtämällä turvetta ja suokasveja ennallistamisalueelle (Suomen luonnonsuojeluliitto 2023). Jos ennallistettavalla suolla on voimakkaita viettoja, veden ohjaaminen koko suoalueelle voi olla haastavaa ja veden liikkeet ympäröivältä valuma-alueelta ennallistamiskohteelle tulee suunnitella huolella.

Havaintoja seurantaverkoston aineistoista kymmenen vuoden jälkeen

Soiden ennallistamisen seurantaverkoston hydrologiaa seurataan 46 kohteella, joista 27 on aiemmin ojitettuja ja sittemmin ennallistettuja ja 19 luonnontilaisia vertailukohteita. Vuonna 2022 yhteensä 43 kohdetta oli seurattu vähintään 10 vuotta ennallistamisen jälkeen ja kahdeksalla oli seurattu myös valuntaveden määrää ja laatua. Valumaseuranta on tehty kahdella ravinneköyhällä korpikohteella sekä kolmella ravinneköyhällä ja kolmella keskivänteisellä avosuolla.

Tekstissä käytetään seuraavia lyhenteitä:

- MK, Mustikkakorpi
- MKmu, Mustikkakorpimuuttuma
- RhK, Ruoho- ja heinäkorpi
- Rhtkg, Ruoho- ja heinäturvekangas
- SN, Saraneva
- SNmu, Saranevamuuttuma

- SR, Sararäme
- SRmu, Sararämemuuttuma.

Havaintoja vedenpinnan tason aineistoista

Pääasiassa ennallistamistoimet nostivat vedenpinnan tasoa nopeasti ja taso säilyi tämän jälkeen lähellä suon pintaa, luonnontilaisen kaltaisella tasolla (Päkkilä ym. 2023a). Kuivemmat vuodet (esimerkiksi 2018, 2019 ja 2021) näkyivät vedenpinnan tason aineistoissa (kuvat 3, 4 ja 5). Esimerkiksi keskivänteisellä ennallistetulla rämeakohteella (Suo-63, SRmu, kuva 3) vedenpinta nousi ennallistamisen myötä suon pinnan tasoon, mutta seitsemäntenä (2018) ja kymmenentenä (2021) vuonna ennallistamisen jälkeen vedenpinta kävi keskikesällä syvällä, lähes ennallistamista edeltävällä tasolla, ja silloin huomattavasti luonnontilasta vertailurämettä syvemmällä. Toisaalta hydrologisesti kuivat vuodet 2018 ja 2021 näkyvät sekä ennallistetun ravinneköyhän korpikohteen Suo-7 (MKmu) ja sen luonnontilaisen vertailukohteen vedenpinnan syvyyden aineistoissa (kuva 4).

Kuvassa 5 on kuvattu vedenpinnan syvyyden aineisto keskivänteisellä korpikohteella Suo-24 (Rhtkg) ja sen vertailukohteella Suo-35 (RhK). Ennallistamista seuraavana vuotena vedenpinnan taso oli ennallistetulla kohteella korkealla, mutta jo toisena vuotena se laski luonnontilasta vertailukohtetta syvemmälle. Ennallistetun kohteen seitsemäntenä vuotena vedenpinnan taso oli edelleen syväällä suossa, mutta kymmenentenä vuotena se oli kohtuullisen korkealla verrattuna aiempiin vuosiin.

Pistemäisellä vedenpinnantason seurannallakin on siis mahdollista päästä ennallistamisen vaikutukseen kiinni ja tässä tapauksessa huomata ennallistamisen mahdollinen tekninen epäonnistuminen.

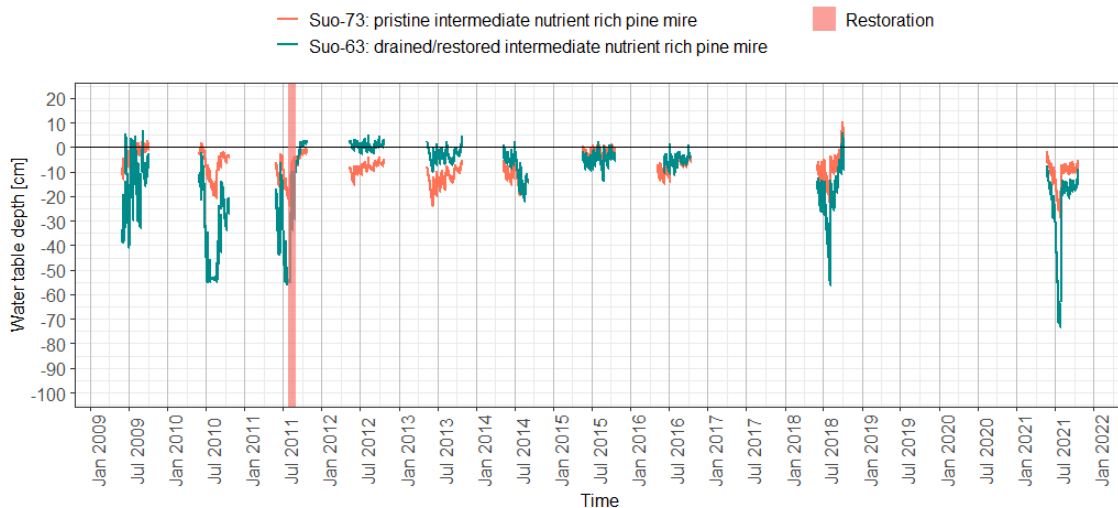
Luonnontilaisen vertailukohteen seuranta ei ole tehty kuvan 5 ennallistetun kohteen seitsemäntenä ja kymmenentenä vuonna. Kohteen aineisto korostaakin seurannan systemaattisuuden tärkeyttä: jos mittauksia ei

ole tehty luonnontilaisella vertailukohteella, ei ennallistamisen lopputuloksen onnistumiseen päästä kiinni.

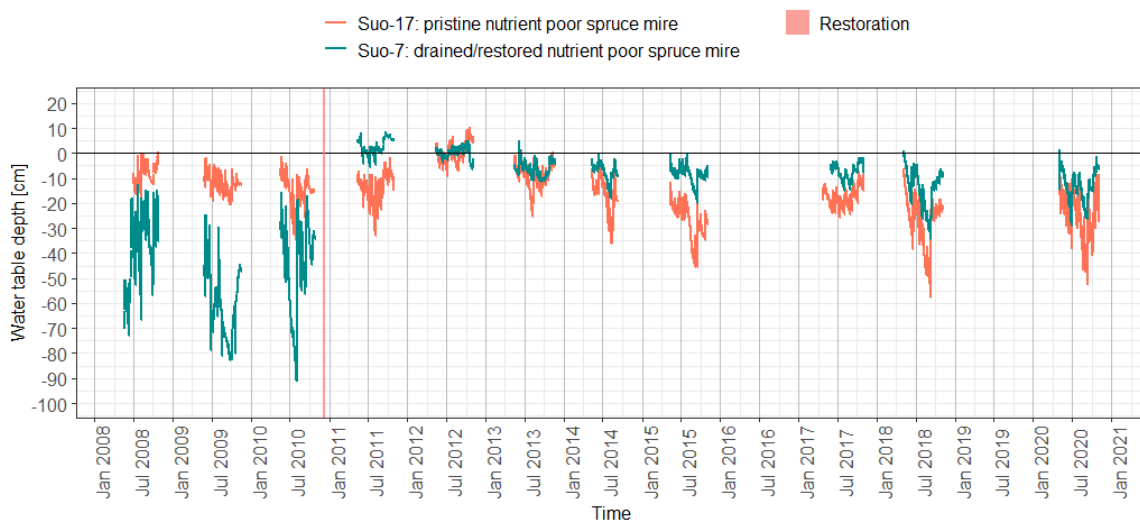
Samoin seurannan tekninen onnistuminen tulee varmistaa, sillä kohteella vedenpinnan taso on luultavasti monena mittauskautena laskenut anturin mittausalueen ulkopuolel-

le. Lisäksi esimerkiksi Suon 24 vedenlaadun aineisto on puutteellinen myöhemmin vuosina ennallistamisen jälkeen, koska kohteelta ei ole saatu vesinäytteitä kuivuuden takia.

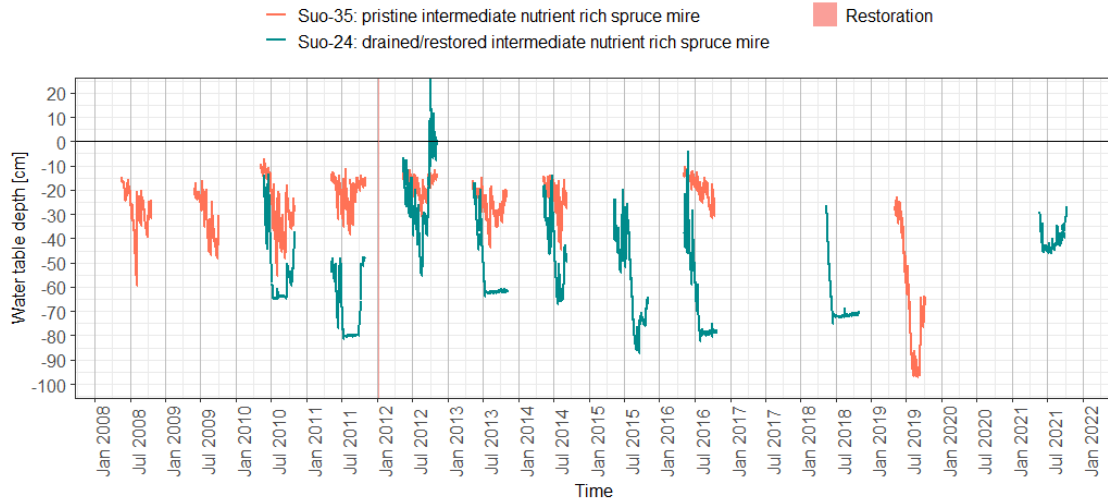
Vastaavat vedenpinnan tason kuvaajat kaikilta seuratuilta kohteilta löytyvät liitteestä 1.



Kuva 3. Vedenpinnan syvyys ojitetulla ja ennallistetulla keskiravinteisellä rämeellä Suo-63 (SRmu) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-73 (SR) (molemmat kohteet Kesonsuolla, Ilomantsissa). Taso 0 cm kuvaa suon pinnan tasoa ja negatiiviset vedenpinnan syvyyden arvot kuvaavat suon pinnan alapuolella olevaa vedenpinnan tasoa. Kuva: Lassi Päckilä.



Kuva 4. Vedenpinnan syvyys ravinneköyhällä ojitetulla ja ennallistetulla korpikohteella Suo-7 (MKmu) (Helvetinjärvi, Ruovesi) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-17 (MK) (Susimäki, Juupajoki). Taso 0 cm kuvaa suon pinnan tasoa ja negatiiviset vedenpinnan syvyyden arvot kuvaavat suon pinnan alapuolella olevaa vedenpinnan tasoa. Kuva: Lassi Päckilä.



Kuva 5. Vedenpinnan syvyys keskiravinteisella ojitetulla ja ennallistetulla korpikohteella Suo-24 (Rhtkg) (Raasi, Yläne) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-35 (RhK) (Talpaleensuo, Kalvola). Taso 0 cm kuvaa suon pinnan tasoa ja negatiiviset vedenpinnan syvyyden arvot kuvaavat suon pinnan alapuolella olevaa vedenpinnan tasoa. Kuva: Lassi Päckilä.

Havainnot vedenlaadun aineistoista

Suoveden ravinteiden (Ntot ja Ptot) ja liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet vaihtelivat enemmän ja olivat pääasiassa korkeammalla tasolla kuin saman suon valumaveden pitoisuudet (Päckilä ym. 2023a, kuva 6). Poikkeuksena aineistoissa on ennallistamista välittömästi seuraava vuosi, jolloin erityisesti fosforin pitoisuudet valumavedessä olivat suoveden pitoisuuksia korkeammalla tasolla.

Valuntaseurantakohteilla häiriö fosforin pitoisuuksissa jatkui vielä ajanjaksolla 1–5 vuotta ennallistamisen jälkeen, ja kohonneita pitoisuuksia nähtiin myös huokosvedessä. Kuitenkin seitsemännen ja kymmenennen ennallistamisen jälkeisen vuoden aineistoissa häiriö oli jo huomattavasti laantunut. Erityisesti valumaveden fosforipitoisuudet olivat lähes luonnontilaista vastaavalla tasolla ja pitoisuuksien vaihtelu suovettä pienempää.

Huomattavaa on myös, että luonnontilaisilla kohteilla huokosveden fosforipitoisuuden vaihtelu oli suurta ja että ojitetussa tilanteessa huokos- ja valumaveden pitoisuudet olivat kaikkien ravinteiden osalta korkeampia kuin luonnontilaisessa tilanteessa.

Ennallistamista seuraava vuosi näkyi valumaveden laadussa (ja sen vaihtelussa) myös kokonaistypen ja DOC:in osalta. Kuitenkin jo 1–5 vuotta ennallistamisen jälkeen valumaveden pitoisuudet palasivat huokosveden pitoisuuksia matalammalle tasolle ja pitoisuudet jatkoivat laskuaan myös seitsemäntenä ja kymmenentenä vuotena. Kymmenentenä vuotena Ntot- ja Ptot-pitoisuudet huokosvedessä olivat luonnontilaista vastaavalla tasolla (kuvat 8 ja 9). Silti esimerkiksi DOC:in pitoisuuksissa erityisesti huokosvedessä oli huomattavaa vaihtelua ajanjaksolla > 5 vuotta ennallistamisen jälkeen.

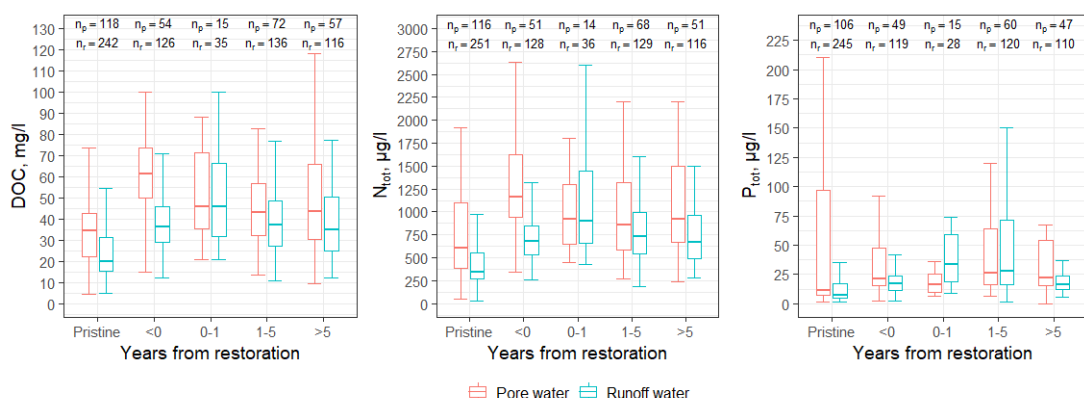
Kuivat ja kuumat kesät 2018 ja 2019 voivat selittää vedenlaadun käyttäytymistä, esimerkiksi Suolla 7, jossa valuntaseurantaa on myös tehty. Siellä DOC:in ja kokonaistypen pitoisuudet suovedessä olivat melko korkealla kuivina kesinä, vaikka lineaarinen regressiomalli osoitti, että pitoisuuksissa on laskeva trendi (kuvat 7 ja 8). Menberu ym. (2017) havaitsivat tutkimuksessaan näytteenottoa edeltävän kuukauden ilman lämpötilan olevan yksi tärkeimpiä ojitettujen kohteiden huokosveden DOC:in pitoisuuksia lisäävä ja selittävä

tekijä. Tutkimuksen mukaan ennallistetuilla kohteilla taas korkea näytteenottopäivän ja näytteenottoa edeltävän viikon maan lämpötila oli yksi tärkeimmistä DOC:in pitoisuuksia lisäävä ja selittävä tekijä.

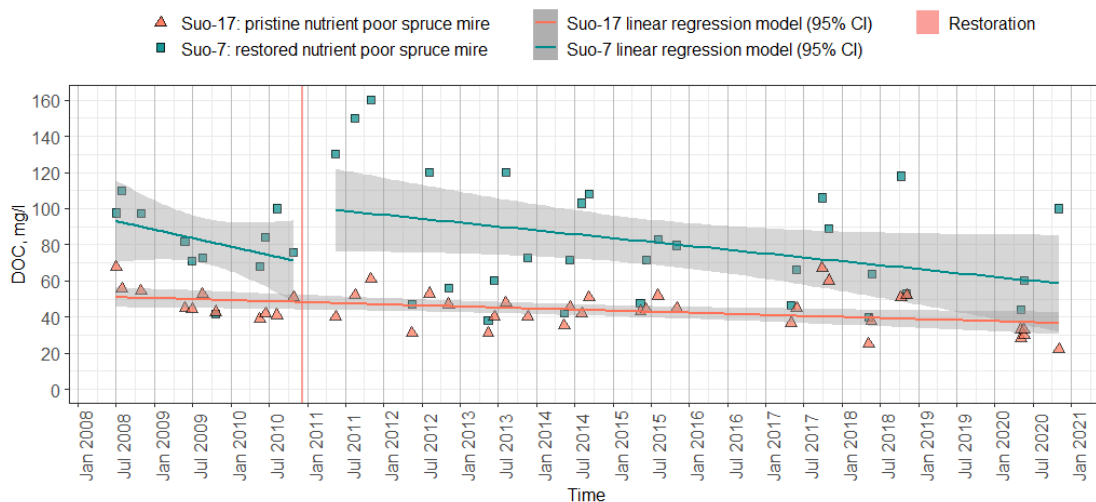
Kuivuuden vaikutus oli havaittavissa myös keskiravinteisella avosuolla Suo-105, jossa huokosveden kokonaistypen ja DOC:in pitoisuudet poikkeavat luonnontilaisesta hie- man vielä kymmenentenäkin mittausvuotena,

vaikka neljäntenä ja viidentenä vuotena pitoisuudet ovat olleet jo lähes luonnontilaisen suon tasolla (kuvat 10 ja 11). Kyseisellä kohteella seitsemäs ja kymmenes vuosi sijoittuvat kesille 2018 ja 2021.

Fosforin pitoisuuksien osalta taas häiriötä ei juuri havaittu edes ennallistamista seuraavana vuonna, pois lukien kolmannen ja neljännen vuoden poikkeamat (kuva 12). Yleisesti ravinnepitoisuudet olivat keskiravinteisella



Kuva 6. Liuenneen orgaanisen hiilen (DOC), liukoisen kokonaistypen (Ntot) ja kokonaisfosforin (Ptot) pitoisuudet luonnontilaisilla sekä ojitetuilla ja ennallistetuilla valuntaseuranta-kohteilla huokos- ja valumavedessä. Ajanjakso < 0 kuvaa ojitettua tilannetta, ja ajanjaksot 0–1, 1–5 ja > 5 kuvaavat ennallistettua tilannetta kymmenenteen ennallistamista seuraavaan vuoteen asti. Kuvaajasta on poistettu poikkeama-arvot (arvo > 1.5* IQR, (kvartiilivälin pituus, interquartile range)). Kuva: Lassi Päckilä.



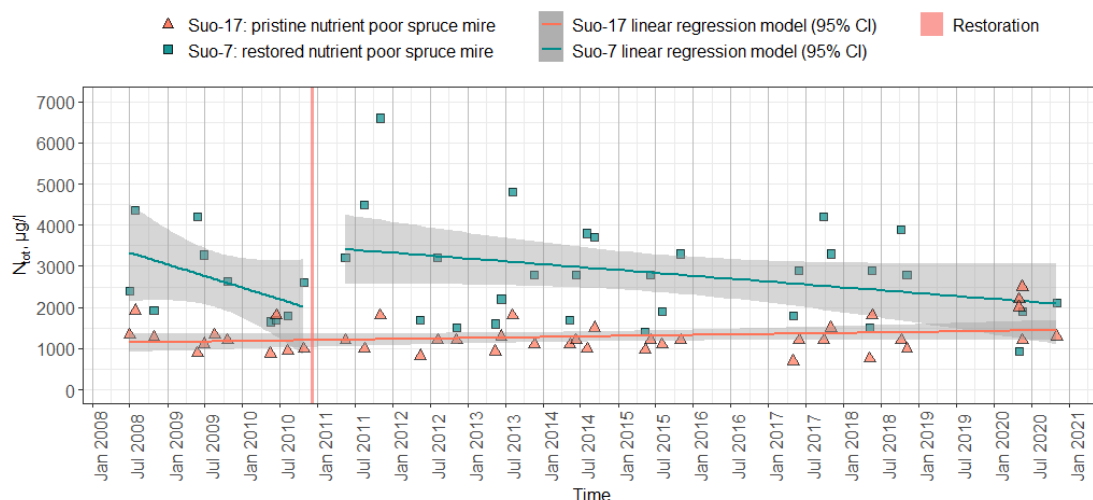
Kuva 7. Huokosveden liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet ja lineaarinen regressiomalli 95 %:n luottamusvälillä (confidence interval, CI) ravinnepöyhällä ojitetulla ja ennallistetulla korpikohteella Suo-7 (MKmu) (Helvetinjärvi, Ruovesi) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-17 (MK) (Susimäki, Juupajoki). Kuva: Lassi Päckilä.

avosuoparilla huomattavasti ravinneköyhää korpiparia matalampia.

Huokosveden ja valumaveden laatuojen yhteyksiä tutkittaessa huomattiin, että ne korreloivat keskenään, mutta hieman eri tavoin riippuen maankäyttömuodosta ja tarkasteltavasta parametrasta. Erityisesti DOC:n valu-

ma- ja huokosveden pitoisuudet korreloivat kaikilla kohteilla, myös ojitetussa ja ennallistetussa tilanteessa.

Ojitettujen soiden kokonaistypen pitoisuudet korreloivat hieman luonnontilaisia ja ennallistettuja kohteita heikommin. Kokonaisfosforin pitoisuudet taas korreloivat heikom-



Kuva 8. Huokosveden liukoisen kokonaistypen (Ntot) pitoisuudet ja lineaarinen regressiomalli 95 %:n luottamusvälillä ravinneköyhällä ojitetulla ja ennallistetulla korpikohteella Suo-7 (MKmu) (Helvetinjärvi, Ruovesi) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-17 (MK) (Susimäki, Juupajoki). Kuva: Lassi Päckilä.



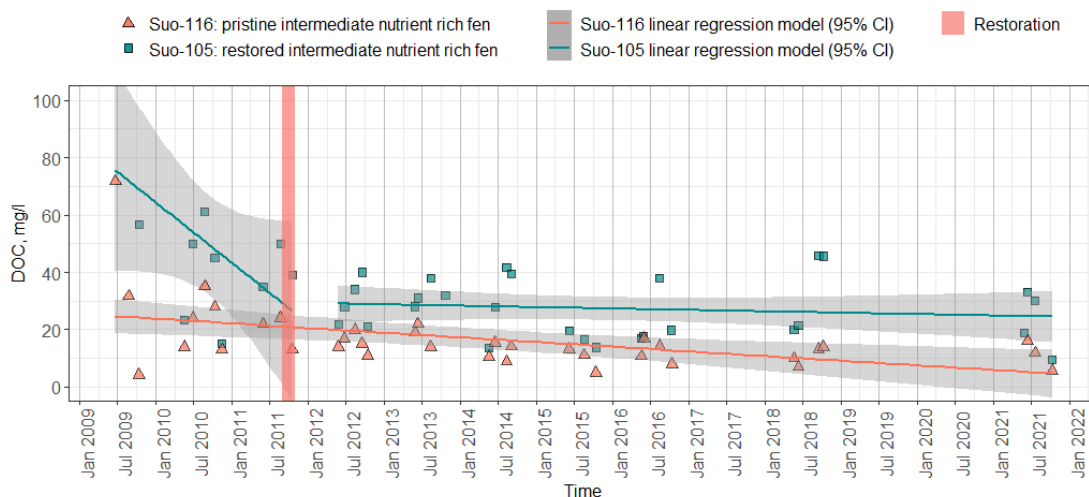
Kuva 9. Huokosveden liukoisen kokonaisfosforin (Ptot) pitoisuudet ja lineaarinen regressiomalli 95 %:n luottamusvälillä ravinneköyhällä ojitetulla ja ennallistetulla korpikohteella Suo-7 (MKmu) (Helvetinjärvi, Ruovesi) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-17 (MK) (Susimäki, Juupajoki). Kuva: Lassi Päckilä.

min ennallistetuilla soilla, ja erityisesti 4–10 vuotta ennallistamisen jälkeen, jolloin korrelaatio jäi tilastollisesti merkityksettömäksi.

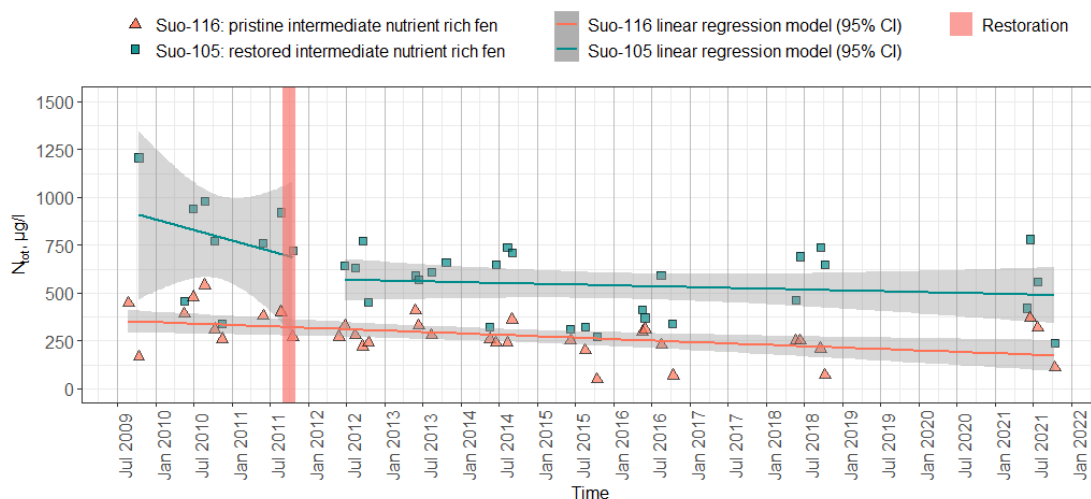
Ennallistamisen aiheuttamaa vesistökuormaa voidaan arvioida jonkinlaisella varmuu-

della seuraamalla pelkästään huokosveden laatua, mutta tähän tarvitaan myös arvion lannan määrästä.

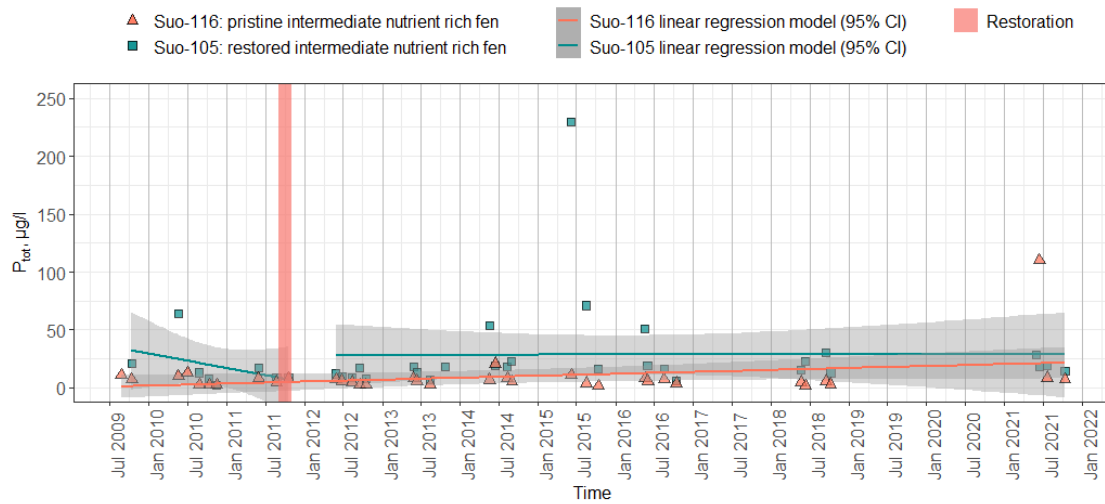
Vastaavat vedenlaadun kuvaajat kaikilta seuratuilta kohteilta löytyvät liitteestä 2.



Kuva 10. Huokosveden liuennan orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet ja lineaarinen regressiomalli 95 %:n luottamusväliällä keskivanteisella ojitetulla ja ennallistetulla avosuolla Suo-105 (SNmu) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-116 (SN) (molemmat kohteet Syötteellä, Taivalkoskella). Kuva: Lassi Päckilä.



Kuva 11. Huokosveden liukoisen kokonaistypen (Ntot) pitoisuudet ja lineaarinen regressiomalli 95 %:n luottamusväliällä keskivanteisella ojitetulla ja ennallistetulla avosuolla Suo-105 (SNmu) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-116 (SN) (molemmat kohteet Syötteellä, Taivalkoskella). Kuva: Lassi Päckilä.



Kuva 12. Huokosveden liukoisen kokonaisfosforin (P_{tot}) pitoisuudet ja lineaarinen regressiomalli 95 %:n luottamusvälillä keskiravinteisella ojitetulla ja ennallistetulla avosuolla Suo-105 (SNmu) ja sen luonnontilaisella vertailukohteella Suo-116 (SN) (molemmat kohteet Syötteellä, Taivalkoskella). Kuva: Lassi Päckilä.

Havainnot turpeen, huokosveden ja valumaveden laatu- ja yhteyksistä

Hydrologia-LIFE-projektissa kerättiin ja analysoitiin myös pintaturvenäytteitä (Päkkilä ym. 2023c). Alustavassa analyysissä vertailtiin huokosveden keskiarvoisia pitoisuuksia ja turpeen pitoisuuksia ja havaittiin, että huokosveden ja kuivan turpeen fosfori- sekä huokosveden ja märän turpeen typpipitoisuudet korreloivat positiivisesti.

Turpeen kuiva-aineen alumiini- ja rautapitoisuus korreloi voimakkaan positiivisesti turpeen kuiva-aineen fosforipitoisuuden ja huokosveden pH:n kanssa. Huokosveden fosforipitoisuus taas korreloi turpeen alumiinipitoisuuden kanssa, muttei rautapitoisuuden kanssa.

Huokosveden pH korreloi myös turpeen fosforipitoisuuden kanssa. Tarkasteltaessa ainoastaan ennallistettuja kohteita tai valumaveden ja turpeen laatu- ja yhteyksiä, tilastollisesti merkittäviä korrelaatioita löydettiin vähemmän. Huokosveden ja valumaveden laatu- ja yhteyksiä on löydetty yhteyksiä, ja vaikuttaa siltä, että pintaturpeen laatu voi vaikuttaa huokosveden laatuun ja siten myös ravinteiden huuhtoutumisen riskiin.

Turpeen, huokosveden ja valumaveden korrelaatiomatriisit löytyvät liitteestä 3.

4.4 Hydrologisten seurantojen kehittämisen johtopäätökset

- Hydrologisen seurannan ohjeistus antaa hyvän pohjan toiminnalle mutta kaipaa paikoin selkeyttämistä, varsinkin kuivien kausien toimintatapoihin.
- Suurempi määrä vedenkorkeusantureita sijoitettuna spatiaalisesti kattavasti, tai ainakin sekä ojalinjoille että sarkoil- le, auttaisi ymmärtämään hydrologista muutosta paremmin.
- Kymmenvuotisaikasarjat antavat kansainvälisestikin ainutlaatuisen työkalun ennallistamisen pitkäaikaisvaikutusten seurantaan. Jatkamalla seuranta voidaan selvittää myös luonnontilaisilla soilla tapahtuvia muutoksia ja pitkäaikaisia trendejä.
- Ennallistamistoimet muuttavat soiden hydrologiaa monelta osin luonnontilaisen kaltaiseksi, kun vedenpinta nousee, sen vaihtelu vähenee ja toimien aiheuttama vedenlaadun häiriö laantuu. Silti erilaiset suot reagoivat ennallistamiseen eri tavoin ja hydrologian palautuminen vie aikaa.
- Ennallistetun suon vedenpinnan taso näyttää vaihtelevan kuivina kausina herkemmin ja voimakkaammin kuin luonnontilaisten soiden vedenpinnan taso.
- Ennallistamistyöt aiheuttavat vedenlaatuun tilapäisen häiriön, joka kuitenkin tasoittuu viimeistään 5–10 vuodessa ennallistamisesta.

5 Kaukokartoitusseurannan perustamisedotukset

Lauri Ikkala, Petra Korhonen ja Maarit Similä

5.1 Kaukokartoitus soiden ennallistamisen seurannassa

Tämän alaluvun teksti perustuu Hydrologia-LIFE-hankkeen aikana valmistellun tieteellisen katsausartikkelin käsikirjoitukseen (Ikkala ym. 2023) ja hankkeessa kertyneisiin kokemuksiin.

Kaukokartoituksen käyttöönotto

Hoitoseurannan silmämääräiset havainnot rajoittuvat maastossa tehdyn kävelyreitillä varrelle. Myös perinteiset systemaattiset seuranta menetelmät, kuten hydrologiset mittaukset ja kasvillisuusruudut, tuottavat tietoa vain maaston yksittäisistä pisteistä ja ne ovat työläitä ja kalliita skaalata laajoille alueille. Kuitenkin soiden maaperä, hydrologiset olosuhteet, kasvillisuus ja kasvihuonekaasutase vaihtelevat huomattavasti suon eri osissa (Holden ym. 2011, Korrensalo ym. 2020, Page & Baird 2016, Zhang ym. 2020). Esimerkiksi vedenpinnan korkeus, veden kemiallinen koostumus ja kasvillisuuden kehittyminen riippuvat etäisyydestä täytettyyn ojalinjaan ennallistamisen jälkeen (Haapalehto ym. 2017).

Soiden spatiaalisen vaihtelun ymmärtäminen on mahdollista kaukokartoituksen avulla (Minasny ym. 2019). Kaukokartoitus tarkoittaa havaintojen tekemistä maan pinnasta siitä heijastuvaa tai emittoituvaa sähkömagneettista säteilyä mittaamalla (Schmugge ym. 2002). Kaukokartoituksessa mittalaite, kuten kamera tai muu sensori, kiinnitetään kohteen yläpuolella lentävään alustaan.

Kaukokartoitukseen käytettäviä alustoja ovat satelliitit, miehitetyt lentokoneet ja helikopterit sekä miehittämättömät dronit.

Lentokoneita on käytetty soiden tarkasteluihin jo vuosisadan ajan ja satelliittikuvaustakin useita vuosikymmeniä. Viimeisen kymmenen vuoden aikana dronit ovat paikanneet miehitettyjen ilmakuvausten ja maanpintamittausten väliin jäävää aukkoa.

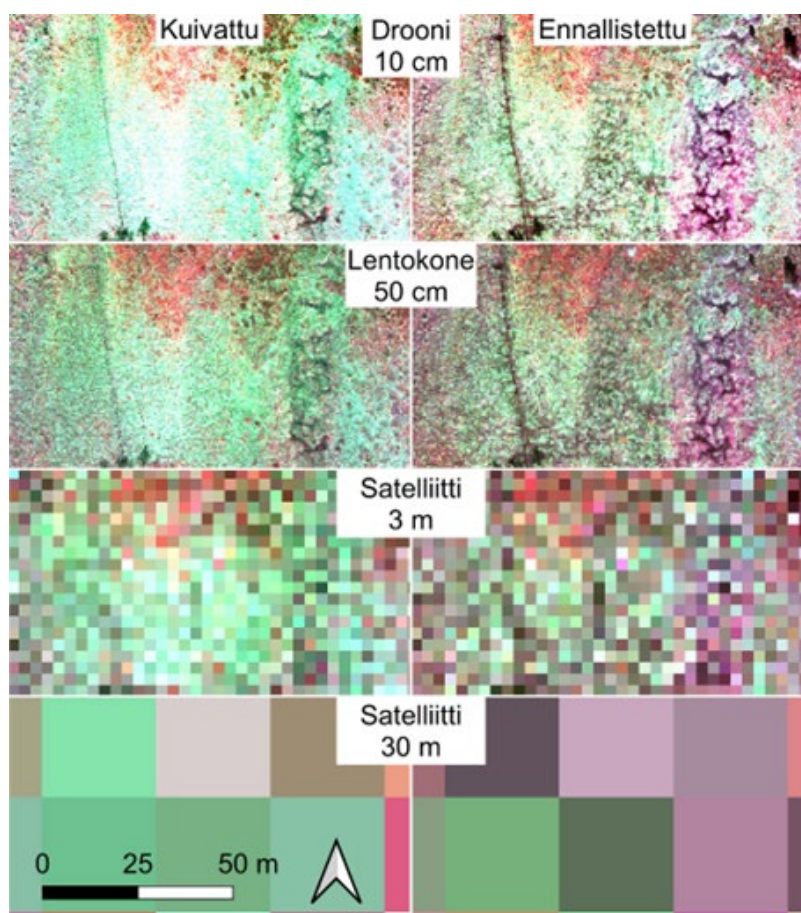
Kaukokartoitusaineistoja voidaan kuvata neljällä toisiaan täydentävällä piirteellä: spektrinen, radiometrinen, spatiaalinen ja ajallinen resoluutio (Adam ym. 2010, Kalacka ym. 2018, Klemas 2013, Reif & Theel 2016). Nämä resoluutiot riippuvat alustasta, lentokorkeudesta, lentoradasta, sensorista, optiikasta ja mittausten toistotiheydestä.

Valittava alusta, sensori ja menetelmä riippuvat tarkasteltavien piirteiden tyypistä (häiriintyneisyyden ja ennallistumisen tila), voimakkuudesta (muutosten suuruus) ja mitta-kaavasta (ennallistamisalueen koko ja kuviointi) sekä muutosten nopeudesta. Käytettävä spatiaalinen resoluutio määräytyy seurannan tavoitteiden ja tarkasteltavan muuttujan spatiaalisen vaihtelun perusteella (kuva 13).

Sensorien mahdollisuudet

Jo pelkän valokuvakameran nostaminen yläilmoihin laajentaa näkökulmaa verrattuna maan pinnalta tehtäviin tarkasteluihin. Spektraalisilla aineistoilla tarkoitetaan tietyiltä, näkyvän valon tai sen ulkopuolisten aallonpituuksien alueelta kuvattuja kuvia.

Multispektrikameroilla kuvattavat muuttamat näkyvän ja lähi-infrapuna-aallonpituuksien leveät kanavat (broadband) ovat herkkiä esimerkiksi kasvillisuuden muutoksille (Harris ym. 2015). Kun spektrillä edetään pidemmälle lyhytaaltoisen infrapunaa ja lämpöinfrapunaa alueille, tulee mahdolliseksi tarkastella



Kuva 13. Spatiaalisen resoluution vaikutus tyypillisten ennallistamisen aiheuttamien muutosten kuvantumiseen. Droonikuvattua multispektriaineistoa avoimen suon pinnasta on esitetty väärävärivärikuvana. Värisävyt kertovat muutoksista suon pinnan kosteudessa ja lämpötilassa. Aineisto on sitten harvennettu eri alustoille tyypillisiin resoluutioihin. Mitä karkeampi resoluutio on, sitä enemmän suon pinnan spatiaalista vaihtelua jää piiloon. Kuva: Lauri Ikkala. Kuva-aineisto: Pasi Korpelainen.

myös maan pintakosteutta (Burdun ym. 2020, Meingast ym. 2014).

Edistyneemmät, satoja kapeita aallonpituuskanavia (narrowband) tallentavat hyperspektrikamerat pystyvät koostamaan tarkan spektraalisen resoluution aineistoja, jotka voivat auttaa esimerkiksi paljaan turpeen koostumuksen (McMorrow ym. 2004) ja kasvillisuuden fysiologisten ja kemiallisten piirteiden tunnistamista (Harris ym. 2015).

Suon kolmiulotteinen malli ja siten myös maanpinnan korkeudet ja puuston rakenne on mahdollista määrittää laserkeilaimen tai droonikartoitusten avulla (Korpela ym. 2020, Lovitt ym. 2017, Niemi ym. 2015). Verrattuna

droonin kameraan laserkeilaukset tuottavat yleensä tarkemman maanpintamallin kohteissa, joissa tiheä kasvillisuus haittaa maanpinnan näkymistä, koska lasersäteet tunkeutuvat kasvillisuuden sisään pienistäkin raoista (White ym. 2016).

Lisäksi suonpinnan ominaisuuksia ja kosteutta voidaan tutkia mikroaaltotutkan avulla (Räsänen ym. 2022). Tutkia ja laserkeilaimia kutsutaan aktiivisiksi sensoreiksi, koska ne mittaavat lähetetyn pulssin paluuehjäistuksia. Kamerat taas ovat passiivisia, erillistä säteilynlähdettä hyödyntäviä sensoreita.

Tyypillisesti monisensorimenetelmät (esimerkiksi multispektri- ja laserkeilausaineis-

ton yhdistelmä) tuottavat korkeamman ennustustarkkuuden kuin vain yhden sensorin aineistojen käyttäminen (Räsänen & Virtanen 2019). Esimerkiksi droonikartoituksella voidaan tuottaa yhdellä lennolla useita spektriaineistoja ja kohteen kolmiulotteinen malli (Beyer ym. 2019).

Kaukokartoitusmenetelmiä ennallistamisen seurantaan

Kaukokartoitusta voidaan käyttää soiden ennallistamisessa hydrologian, kasvillisuuden, topografian, turpeen ominaisuuksien ja kasvihuonekaasupäästöjen tarkastelemiseen (taulukko 2).

Koska maa absorboi sähkömagneettista säteilyä, pohjavedenkorkeuden määrittäminen suoraan kaukokartoituksen avulla ei yleensä ole mahdollista (Schmugge ym. 2002). Kapillaarisuuden ansiosta vedenkorkeutta on kuitenkin mahdollista arvioida maan pintakosteuden perusteella (Kalacska ym. 2018) ja vakaissa olosuhteissa myös pohja- ja kenttäkerroksen kasvillisuuden avulla (Burdun ym. 2023). Verrattaessa etämittauksia in-situ-havaintoihin on syytä muistaa, että kaukokartoituksella havainnoidaan häiriintymättömän maan kosteutta, kun taas pohjavesiputkissa veden kapillaarinen nousu on katkaistu.

Yleisimpiä maan pintakosteuden määrittämiseen soveltuvia menetelmiä ovat mikroaalto- ja spektri-indeksit ja trapetsoidimallit (Räsänen ym. 2022). Lisäksi suon hydrologiaa voidaan tarkastella avovesialueiden määrän ja sijainnin perusteella. Myös pohjaveden purkautumispisteitä voidaan havainnoida tavanomaisista valokuvista, mutta erityisesti matalalta kerätyt lämpökuvaa-aineistot erottelevat tehokkaasti purkautumiskohtia, jotka lämpimänä päivänä näkyvät ympäristöään kylmempinä (Isokangas ym. 2019).

Kasvillisuudesta voidaan kaukokartoittaa ennalta määrättyjä maanpeiteluokkia, kasvillisuustyyppisiä, kasvivyhteisöjä, yksittäisiä kasvilajeja, funktionaalisia kasviryhmiä tai kas-

vien funktionaalisia piirteitä (Cole ym. 2014, Kalacska ym. 2015, Räsänen & Virtanen 2019, Räsänen ym. 2020). Kaukokartoitusmenetelmiä voidaan myös käyttää esimerkiksi kasvillisuuden vesipitoisuuden tai primäärituotannon määrittämiseen (Lees ym. 2020).

Kasvihuonekaasudynamiikan määrittäminen kaukokartoituksen avulla perustuu yleensä joko maanpintamittausten yleistämiseen maanpinnan luokittelun avulla tai kaasuvirtauksien arviontiin primäärituotantoa ja ekosysteemin hengitystä kuvaavien mallien perusteella (Lees ym. 2018).

Monia soiden ja suokasvillisuuden spektraalisia ominaisuuksia on mitattu vasta laboratorio-olosuhteissa tai vain yksittäisille pisteille sovellettavan kenttäspektroskopian avulla, eikä varsinaista lentäviltä alustoilta kuvaamista ole tutkittu vielä kovinkaan paljon. Ball ym. (2023) vertasivat ensimmäisten joukossa ilmakuva- ja satelliittiaineistojen avulla ennallistettujen ja luonnontilaisten soiden spektraalisia ominaisuuksia.

Topografisille aineistoille on kehitetty erilaisia indeksejä, joiden avulla geomorfologisia muutoksia voidaan tutkia (Hasan ym. 2012, Richardson ym. 2010). Esimerkiksi Ikkala ym. (2022) käyttivät topografista SWI-kosteusindeksiä ojaverkoston tukkimisen hydrologisten vaikutusten arvioimiseen (ks. luku 5.6).

Kaukokartoituksen ajankohdat

Ennallistamisen vaikutus on parasta osoittaa ennen-jälkeen-aikasarjan avulla. Kuvaukset tulisi kuitenkin suorittaa aina samaan aikaan vuodesta, koska vuodenaika vaikuttaa kuvien vertailukelpoisuuteen kasvillisuuden (Cole ym. 2014) ja vedenkorkeuden vaihtelun vuoksi (Halabisky ym. 2018).

Rajalliset (esim. kerran vuodessa kerätyt) aineistot kertovat vain yksittäisistä meteorologisista, hydrologisista ja fenologisista olosuhteista. Märempien ja kuivempien jaksojen ja kasvillisuuden kehittymisen vaikutusten huomioiminen vaatisi tiheämpää kuvausväliä. Vuosien välisen luonnollisen vaih-

Taulukko 2. Ennallistamisen onnistumisen indikaattorit ja niiden tavoitetilat kategorioiden sekä näiden perinteisiä systemaattisia seurantamenetelmiä ja potentiaalisia kaukokartoitukseen perustuvia muuttujia.

Kategoria	Tavoiteltu indikaattorin tila	Perinteisiä systemaattisia seurantamenetelmiä	Potentiaalisia kaukokartoitukseen perustuvia muuttujia
Hydrologia	Noussut vedenkorkeus, tyypillinen vedenkorkeus suhteessa suon pintaan ja palautunut vedenkorkeuden vaihteluväli	Pohjavesikaivot: manuaaliset havainnot ja vedenkorkeuden tiedonkeruulaitteet (dataloggerit)	Avovesipeite, maakosteus, märkyysolosuhdetta indikoiva kasvillisuus
Hydrologia	Palautuneet pinta- ja pohjaveden virtausreitit ja allikot	Pohjavesikaivot: manuaaliset havainnot ja dataloggerit, topografiset mittaukset	(Mikro)topografia, avovesipeite, maakosteus
Hydrologia	Palautunut pohjaveden purkautuminen	Veden stabiilit isotoopit ja muut merkkiaineet, veden lämpötilamittaukset, kuituoptiset mittaukset, lämpökamerat	Lämpötilaerot
Kasvillisuus	Luonnontilaista vastaavat kasvillisuusyhteisöt	Kasvillisuusruudut, kasvillisuuslinjat	Kasvillisuuspeite, lajisto ja lajiyhteisöt, kasvillisuuden funktionaaliset ryhmät, kasvillisuuden rakenne
Kasvillisuus	Palautunut puuston rakenne	Rinnankorkeusläpimitta, runkotiheys	Taimettuminen, puiden kasvu, puiden kokojakauma, puiden heikentyminen ja kuolema
Turve	Lisääntynyt turpeen muodostuminen	Kairaukset, maatulka, rahkasammalten kasvunopeusmittaukset	Turpeen syvyys ja rakenne
Turve	Maan painumisen pysähtyminen	Merkkipylväät, topografiset mittaukset	(Mikro)topografia, turvesyvyys
Turve	Turpeen hajoamisen loppuminen ja palautunut mikrotopografia	Kairaukset, merkkipylväät, topografiset mittaukset	(Mikro)topografia, turpeen laatu
Turve	Palautunut kasvihuonekaasudynamiikka	Pyörrekovarianssi- ja kammio-mittaukset	Kasvihuonekaasudynamiikkaa indikoivat epäsuorat muuttujat, drooninäytteenotto

telun ymmärtämiseksi kartoitukset kannattaisi aloittaa kalibroitajaksolla useita vuosia ennen ennallistamista.

Suokasvillisuudessa on huomattavaa spektraalista ja rakenteellista vaihtelua vuodenkierrossa. Yhden tutkimuksen mukaan suokasvillisuuden luokittelu onnistuu parhaiten keväällä tai alkukesästä (Cole ym. 2014). Myös kasvillisuuden anisotropian (valon heijastumisen eri suuntiin eri tavoin) on osoitettu olevan pienimillään kevätaikaan (Kalacska ym. 2018).

Kesän kuivin hetki heinä-elokuun vaihteessa on olosuhteiltaan vakaampi kuin kevät, jolloin ympäristö muuttuu nopeasti ja sulamisen ajankohta vaihtelee vuodesta toiseen. Toisaalta kevät on parasta aikaa veden leviä-

misen ja patojen vuotojen tarkastelemiseen. Syksyllä taas suon pinnalla voi esiintyä paljon kuollutta kasviainesta. Kuvasajankohdat olisi hyvä yhtenäistää kasvillisuusseurantojen ja hydrologisten seurantojen ajankohtien kanssa, mikä lisäisi kenttäaineistojen käytettävyyttä verrokkina.

Koska seurannan aikasarja ei yllä kuivasta edeltäneeseen tilanteeseen, ennallistamiskohteen ohella on suositeltavaa tehdä samanaikaisesti kartoitukset myös luonnontilaisilta verrokkikohteilta. Tämä mahdollistaa ennallistamisen vaikutusten erottelemisen luonnollisesta vaihtelusta ja kartoitusteknisistä virheistä sekä arvioinnin, lähestyvätkö ennallistetun alan indikaattorien arvot luonnontilaisia (Ikkala ym. 2022).

Luonnontilaisina referenssikohteina on suositeltavaa käyttää samoja kohteita kuin hydrologisissa ja kasvillisuusseurannoissa. Lisäksi kaukokartoituksen näkökulmasta ennallistamis- ja verrokkikohteella tulisi olla yhtäläinen puustoisuus kartoitusaikaan.

Kaukokartoitusaineistojen laatu

Kaukokartoitusaineistoja käytettäessä niiden laadulla on iso merkitys. Maanmittauslaitoksen tarjoamien avoimien aineistojen ja satelliittiaineistojen hyvänä puolena voidaan pitää ammattimaista aineistontuotantoa, kun taas drooniaineistojen keräämisessä vastuu laadusta on yleensä suotutkijalla itsellään.

Jotta muutoksia pystytään havaitsemaan aikasarjoista, georeferoinnin eli aineistojen oikeaan sijaintiin asettamisen tulee olla niin tarkkaa, että verrattavat pikselit on tallennettu samasta sijainnista jokaisella mittauskerralla (Räsänen & Virtanen 2019).

Georeferoinnin lisäksi optisten aineistojen tärkeimpiä laadunvarmistuksia on radiometrisen kalibrointi (Kalacska ym. 2015). Koska kuvauksissa valonlähde on aurinko, valon luonne vaihtelee auringon sijainnin ja pilvisyyden mukaan. Satelliittiaineistoille korjaukset on usein valmiiksi tehty, kun taas drooniaineistojen tuotannossa kalibrointiin täytyy kiinnittää huomiota.

Koska kaukokartoitus on epäsuora mitaustapa, menetelmät ja tulokset on tärkeää kalibroida ja validoida suon pinnalta kerättävien tukiaineistojen (ground truth) avulla. Eriytyisen tärkeää tämä on tieteellisiin tarkoituksiin mutta myös käytännön seurantatyöhön olisi syytä sisällyttää varmennusta.

Aineistoja tuotettaessa on myös tärkeää luoda aineistoa riittävän tarkasti kuvaavat metatiedot. Tulkinna ja vertailtavuuden kannalta tarkka kuvauspäivämäärä on olennainen tieto.

5.2 Avoimia aineistoja

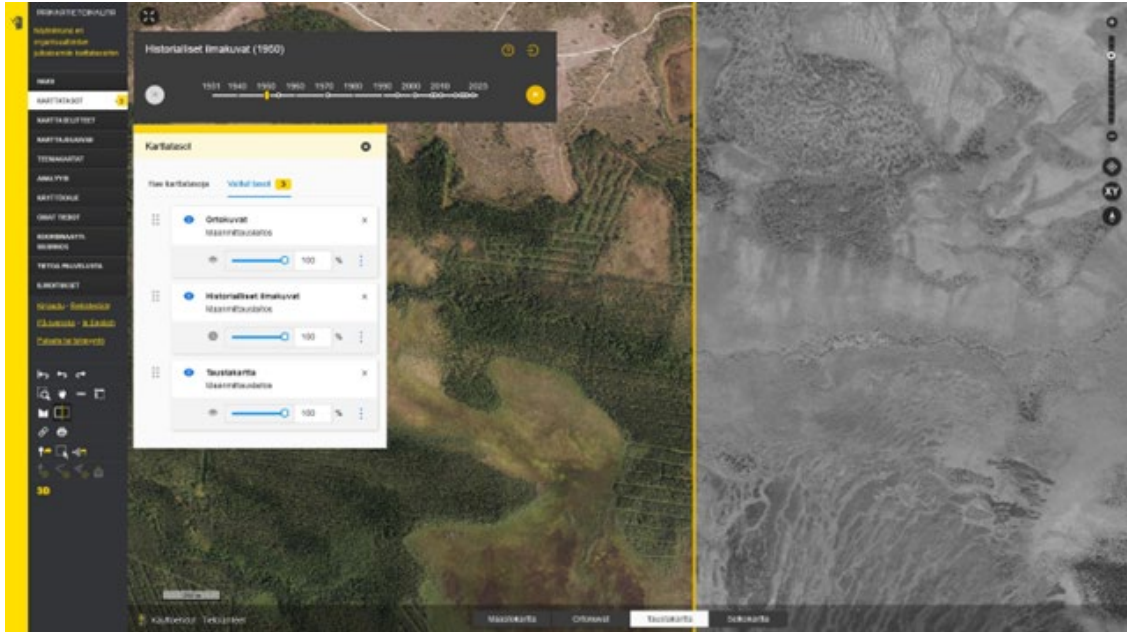
Maanmittauslaitos tuottaa lentokoneilla kerättyjä kaukokartoitusaineistoja ilmakehän ohjelmassaan kolmen vuoden välein ja laserkeilausohjelmassaan kuuden vuoden välein lähes koko Suomesta. Ilmakuvien ohella tuotetaan lähi-infrapunataajuuden avulla väärävärivuvia, jotka erottelevat maanpinnan kosteutta valokuvia paremmin. Laserkeilausaineistot julkaistaan kolmiulotteisina piste-pilvimalleina, mutta niitä helppokäyttöisempiä ovat Maanmittauslaitoksen valmiiksi laskemat johdannaisaineistot: maanpinnan korkeusmallit ja niiden vinovalovarjosteet.

Aineistoja on saatavilla Maanmittauslaitoksen latauspalvelusta (Maanmittauslaitos 2023a), mutta niitä voi tarkastella myös Paikkatietoikkunan käyttöliittymässä (kuva 14, Maanmittauslaitos 2023b). Lisäksi niitä on saatavilla avoimien rajapintojen kautta taustakuviiksi suoraan paikkatieto-ohjelmistoon (Kapsi 2023). Aineistoja löytyy suoraan myös SAKTI-järjestelmästä, jossa monet suunnittelijat ovat niitä jo hyödyntäneet ennallistamisen suunnittelun, toteutuksen ja seurannan tukena.

Hankkeen työpajassa Maankamara-palvelusta (Geologian tutkimuskeskus 2023) löytyvän Varjostetun korkeusmallin katsottiin olevan esitystavaltaan selkeämpi kuin Maanmittauslaitoksen tuottama vinovalovarjoste.

Nykyisen rasterimuotoisen maastokartan ja vektorimuotoisen maastotietokannan lisäksi Maanmittauslaitos on julkaissut vanhoja, painettu karttoja, joita voi tarkastella myös MapTilerin käyttöliittymässä georeferoituina (Kutilainen 2023). Vanhoja ilmakehän puolestaan löytyy georeferoituina Paikkatietoikkunasta ja niitä voi ladata Maanmittauslaitoksen (2023a) latauspalvelusta.

Ilmakehän ja kartta-aikasarjat ovat usein helpoin tai ainoa tapa päästä käsiksi suolla ennen ojitusta vallinneeseen tilanteeseen. Ne auttavat myös ymmärtämään kuivatuksen vaikutuksia esim. puuston kasvun kautta. Aikasarjoissa on kuitenkin myös merkittäviä katkoksia, eikä kaikkia vanhoja ilmakehän ole saatavilla palvelusta.



Kuva 14. Kuvakaappaus Paikkatietoikkunasta (Maanmittauslaitos 2023b). Verkkopohjainen käyttöliittymä mahdollistaa nopeat historiallisten ilmakeuva-aikasarjojen visuaaliset tarkastelut.

Maanpintamalleista pystyy Paikkatietoikkunassa mittaamaan korkeusprofileja. Toiveissa on, että tulevaisuudessa Suomen toisen laserkeilauskierroksen valmistuttua myös keilausaineistojen tarkastelemiseen tulee saataville helppoja aikajanatyökaluja. Ylipäättään nykyistä valmiimmat ja räätälöidymmät aineisto- ja työkalukokonaisuudet voisivat helpottaa avoimien aineistojen suuren seuranta-potentiaalin hyödyntämistä.

Satelliittikuvat mahdollistavat pitkäaikais- ja kausivaihteluiden seurannan. Pisimmillään laadukkaat aineistot yltyvät jopa 1980-luvulle asti (Landsat) ja tiheimmillään saatavilla on jopa päivittäistä aineistoa (esim. MODIS ja PlanetScope).

Avoimet satelliittiaineistot ovat spatiaalisen resoluutioltaan usein melko karkeita (esim. Landsat 30–100 m, MODIS 250–500 m tai Sentinel 10–1000 m), eivätkä ne pysty huomioimaan soiden pinnassa ilmenevää vaihtelua kovin hyvin. Monet kaupalliset satelliitit kuitenkin tuottavat kuvia jopa alle 1 m:n resoluutiolla.

Optisten satelliittiaineistojen suurimpia haasteita on pilvipeite, joka estää havainnot maan pinnasta. Suomen alueella pilvipeitteen

osuus maastokaudesta on merkittävä. Tutka-aineistot sen sijaan läpäisevät myös pilvipeitteen, mutta niitä on hankalampi käsitellä ja tulkita kuin optisia aineistoja. Laajemman, alueellisen tai valtakunnallisen kuvan hahmottamiseen (esimerkiksi EU:n biodiversiteettistrategian ja ennallistamisasetuksen seurantarpeita varten) satelliitit tarjoavat kuitenkin suuren potentiaalin.

Hankkeen aikana kokeilut satelliittikuva-aineistoilla jäivät vähäisiksi. Satelliittikuvien laajempi käyttö vaatisi pidemmälle jalostettuja menetelmiä ja valmiimpia lopputuotteita, joita suunnittelijat voisivat sitten lähinnä tulkita. Tulkinta vaatii kuitenkin tietämystä maastossa tapahtuneista muutoksista, joten aineistojen keskitetty tulkinta ei myöskään ole paras vaihtoehto.

Tarkempaa perehtymistä varten suunnittelijat kaipasivat opastamista kädestä pitäen itsenäisten kokeilujen sijaan. Satelliittikuva-aineistojen käyttöä tutkittiin laajemmin Ennallistettujen soiden tilan seurannan kehittämisen -hankkeessa (Räsänen ym. 2023).

Avoimia aineistoja ladattaessa on tärkeää muistaa tallentaa niiden mukana tulevat metatiedot, jotta tuloksissa säilyy jäljitettävyyttä.

5.3 Droonikuvaukset

Droonilla tarkoitetaan miehittämätöntä ilma-alusta, johon voidaan asentaa erilaisia mitausinstrumentteja ja sensoreita kaukokartoitusaineistojen keräämistä varten (Jeziorska 2019). Englanniksi käytetään usein käsitettä drone, mutta myös Uncrewed (aiemmin Unmanned) Aerial Vehicle (UAV) ja Uncrewed Aerial System (UAS) ovat kirjallisuudessa paljon käytettyjä termejä. UAS-muoto korostaa koko ohjaamiseen tarvittavan järjestelmän merkitystä muiden nimien viitatessa pelkään ilma-alukseen.

Hydrologia-LIFE-hankkeessa drooneja lennätettiin alkuun kansallisten ilmailusäädösten puitteissa, ja hankkeen loppuvaiheessa voimaan tuli droonitoimintaa säätelevä EU-asetus (Euroopan unioni 2019), vaiheittain siirtymäkauden 2021–2024 aikana. Asetuksen mukaisesti droonitoimijoilla on rekisteröitymisvelvollisuus (rekisterin ylläpitäjä Suomessa Traficom) ja lisäksi lentäjien tulee suorittaa teoriakoe verkossa.

Asetuksen avoimen kategorian sääntöjen puitteissa maksimilentokorkeus on 120 m maanpinnasta ja drooni tulee pitää jatkuvasti näköyhteydessä (VLOS, Visual Line of Sight). Jos avoimen kategorian säännöistä on tarvetta poiketa, kuuluu toiminta Erityinen-kategoriaan, johon tarvitaan erillinen toimintalupa.

Drooneilla voidaan kuvata valokuvia (yksittäinen kiinnostava kohde ennallistamisessa, esim. olennainen pato), videoita (yksittäiset täytettävät ojalinjat) tai laaja-alaisempia ja systemaattisempia, nk. kartoituslentoja. Kartoitusta varten lentäjä määrää kuvattavan alueen rajat ja kuvausasetukset, tärkeimpinä lentokorkeus (altitude) ja kuvalimitys (overlap), jolloin kartoitusohjelmisto laskee tarvittavan lentoreitin ja kuvanottosijainnit ja drooni suorittaa kartoituslennon automaattiohjauksella. Kuvausasetukset pystytään tyypillisesti tallentamaan siten, että vastaava kuvaus on mahdollista myöhemmin toistaa sellaisenaan, mikä lisää seurannan vertailukelpoisuutta.

Kartoitusaineistosta voidaan erillisellä ohjelmistolla suurta kuvalimitystä hyödyntäen tuottaa kolmiulotteinen malli, josta saadaan haluttuja rasterikuvamuotoisia lopputuotteita kuten ortomosaiikkikuva ja pintamalli. Ortomosaiikkikuvassa yleensä satoja yksittäisiä ilmakuvia on yhdistetty suureksi kokonaisuudeksi siten, että jokaista pikseliä katsotaan suoraan ylhäältä päin. Pintamalli tarkoittaa korkeusmallia droonille näkyvistä pinnoista. Pintamallista voidaan suodattaa maanpintamalli silloin, kun maanpintaa on saatu kuvattua riittävästi.

Droonikartoitus soveltuu erityisesti avoimien ja puoliavoimien soiden seurantaan. Metsäojitetuilla soilla puuston kasvu on yleensä ainakin osittain lisääntynyt, ja monilla alueilla avoimien soiden osuus on luonnostaankin pieni. Tiheän latvuksen alueilla voidaan seurata ilmasta käsin vain puustossa tapahtuvia muutoksia.

Kartoitusaineisto osittain puustoisten alueiden maanpinnasta on myös epätarkempaa kuin avoimelta paikalta, koska maanpinnan pisteet näkyvät pienemmässä määrässä kuvia (Lovitt ym. 2017). Jos puusto on lehtipuuvaltaista, voi operointi lehdettömään aikaan mahdollistaa maanpinnan kattavamman kartoituksen. Jos puusto raivataan ojalinjoilta ennen ojien täyttämistä, ojanvarsien maanpinnan kartoitus voi olla mahdollista raivauksen ja kaivinkonetyön välissä. Silloin kaivuutyön aiheuttamat muutokset saadaan dokumentoitua mittatarkasti. Ojalinjoille jätetyt puunrungot voivat kuitenkin estää suon pinnan näkymisen kuvissa.

Maanpinnan näytteistystiheys (Ground Sampling Distance, GSD) ja siten myös aineistojen spatiaalinen resoluutio riippuvat lentokorkeudesta ja kameran ominaisuuksista, kennon resoluutiosta ja objektiivin polttovälistä. Deliry & Avdan (2021) esittivät, että näiden lisäksi droonikartoitusaineistojen tarkkuus riippuu myös kuvalimityksestä, tukipisteiden määrästä, maan pinnanmuodoista, säästä sekä käytetystä ilma-aluksesta, sensorista ja käsittelyohjelmistosta. Heidän ver-

taillessaan viittäkymmentä droonitutkimusta tarkkuus oli tasossa ja korkeudessa tyypillisesti noin 5 cm:n luokkaa.

Aineiston sijainnillinen tarkkuus riippuu ennen kaikkea georeferoinnin tarkkuudesta. Kartoitus tavanomaisilla Global Positioning System (GPS) -laitteilla varustetuilla drooneilla on mahdollista ilman maatumipisteitä, mutta tällöin tarkkuus jää metriluokkaan, vaikka lopputuotteet olisivatkin resoluutioltaan senttitasoa. Tällaiset aineistot ovat herkkiä kupolimaisille geometrisille vääristymille (doming effect, James ym. 2017). Senttitarkkuuteen pääsemiseksi droonimallin tulee myös olla valmistettu kartoitustarkoitukseen.

Maatumipisteiden avulla (yleensä 15 tai vähemmän riittää, Deliry & Avdan 2021) aineistojen tarkkuus voidaan nostaa vastaamaan niiden resoluutiota. Tumipisteet ovat maanpinnalla sijaitsevia, selkeästi taivaalle näkyviä kohteita (esim. valkoinen risti, muovikämpärin kansi tms.), jotka on sijoitettu aukeille paikoille tasaisesti ympäri aluetta (ei linjamaisesti) ja eri korkeuksille.

Tumipisteiden on tärkeää pysyä paikallaan niiden mittaamisen ja droonikartoituksen välillä. Niiden koordinaatit mitataan korkealla tarkkuudella, yleensä RTK-satelliittipaikannuslaitteen avulla. Ikkala ym. (2022) havaitsivat pintamallin korkeustarkkuuden laskevan etäännyttäessä tumipisteistä, erityisesti puustoisilla alueilla.

Osa tumipisteistä on syytä jättää georeferoinnin ulkopuolelle geometrisiksi tarkistus-pisteiksi. Erityisesti jos korkeustietoa käytetään analyyseissä, aineistoa on suositeltavaa verrata muulla tavoin mitattuihin korkeuksiin. Tiheän aluskasvillisuuden alueilla fotogrammetrisesti tuotettu maanpinta voi myös poiketa huomattavastikin siitä, miten se maastossa tulkittaisiin.

Hydrologia-LIFE-hankkeen menetelmäkehityskohteilla perustettiin kiinteitä tumipisteitä lyömällä puupaalu turvekerroksen läpi kivennäismaahan ja ruuvaamalla valkoinen lautari paalun päähän. Kiinteät tumipisteet mahdollistivat toistettavat kartoituskampanjat il-

man työläitä tumipisteiden mittauksia erikseen jokaiselle lennolle (kuva 15).

Haasteeksi osoittautuivat paksut turvekerrokset, joiden kohdalla paalut joko jäivät kellumaan turpeen pinnalle tai ne korvattiin tuoreilla kannoilla. Ison Leväniemen tutkimuskohteella paksujen turvekerrosten kohdalla havaittiin tumipisteen nousseen keskimäärin 72 mm ennallistamisen jälkeen (Ikkala ym. 2022).

Koska turpeen tilavuus ja siten myös suonpinnan korkeus muuttuvat vesipitoisuuden mukaan (Howie & Hebda 2018), tulee suonpintaan sidottujen tumipisteiden koordinaatit mitata aina kartoituslennon yhteydessä. Myös kannot ovat tässä suhteessa epävarmoja alustoja, koska puiden juuret eivät yleensä työnnä pohjavedenpinnan alapuolelle ja pisteet on siksi ankkuroitu vain suonpintaan.

Kehittyneemmissä drooneissa RTK-paikannuslaite löytyy ilma-aluksesta itsestään, jolloin droonin paikantaminen suurella tarkkuudella vähentää maatumipisteiden tarvetta. Ortomosaiikkikuvia voidaan tällöin kartoittaa korkealla tarkkuudella jopa ilman tumipisteitä (Stott ym. 2020). Kuitenkin jos aineistoa käytetään korkeusmallin tekemiseen, tulisi RTK-kartoituksen ohella käyttää edes yhtä maatumipistettä (Forlani ym. 2018) tai viistokuvausta (Nesbit & Hugenholtz 2019).

RTK-korjaussignaalin saamiseksi vaaditaan lisenssi sitä tarjoavaan palveluun ja jatkuva mobiilidatayhteys, joka ei aina toteudu syrjäisillä suokohteilla. Mobiiliyhteyden puuttuessa on korjaussignaalin saamiseksi mahdollista käyttää omaa tukiasemaa tai suorittaa korjaus jälkilaskentana (Post-Processing Kinematic, PPK).

Aineistojen korkea tarkkuus mahdollistaa yksityiskohtaisen teknisen seurannan. Toisaalta korkea resoluutio tuo näkyviin myös häiritseviä yksityiskohtia kuten varpujen ja puiden varjoja sekä tuulen aiheuttamaa kohteiden heilumista, jotka eivät häiritse perinteistä, karkeammilla resoluutioilla tehtävää kaukokartoitusta.

Multispektrikuvauksien radiometrinen kalibrointi voidaan suorittaa kohteen yhteydessä kuvattavia reflektanssilevyjä (kuva 16) apuna käyttäen. Levyjen heijastavuudet eri aallonpituuksilla on määritetty laboratorioissa ja niiden materiaali tuottaa mahdollisimman diffuusin (Lambertin) heijastuksen. Jos valais-

tusolosuhteet muuttuvat kuvauksen aikana, levyt kannattaa kuvata ennen lentoa ja sen jälkeen sekä jokaisella akunvaihdolla. Jos valaistus on erittäin vaihteleva, voi irradianssi-sensori lisäksi auttaa aineiston normalisoinnissa (Beyer ym. 2019).



Kuva 15. Kiinteitä maatukipisteitä ennen ennallistamista ja sen jälkeen (kaikissa kuvissa eri tukipisteet). Teroitettu paalu (A) lyödään turpeen läpi tukevasti kiinni mineraalimaan ja sen päähän kiinnitetään lautaristi tai muu ilmakuvista helposti havaittava kohde. Kiinnitysruuveja on syytä olla kaksi pyörimisen estämiseksi. Puiden kantoihin kiinnitetyt tukipisteet (B) puolestaan ankkuroituvat suon pintakerrokseen ja ovat siksi liikkumisherkkiä suon pinnan eläessä. Olvassuon Ison Leväniemen kohteella suon turpoaminen ja rahkasammalten kasvu peittivät tukipisteitä osittain jo neljässä vuodessa niiden rakentamisen ja ennallistamisen jälkeen (C–D). Tästä syystä kiinteät tukipisteet kannattaa alun perin rakentaa jonkin verran suon pintaa korkeammalle. Kuvat: Lauri Ikkala.



Kuva 16. Radiometrinen kalibrointilevysarja. Hankkeessa multispektrikuvausten kalibrointiin käytettiin pääasiassa MosaicMillin neljää 50 cm × 50 cm levyä (heijastavuudet 2 %, 9 %, 23 % ja 46 %). Levyjen heijastavuus tulisi olla samaa luokkaa kuin kartoitettavalla kohteella. Kalibrointiin riittää yleensä yksi levy, mutta useammalla levyllä kalibroinnin voi todentaa. Kuvattaessa levyjen valaistuksen tulisi vastata kohteen valaistusta. Tässä kuvassa kasvillisuus ja sen aiheuttamat varjot ovat osittain levyjen päällä, mutta suurinta osaa levyjen pinta-alasta voidaan tässäkin käyttää kalibrointiin. Kuva: Maarit Similä.

5.4 Droonit soiden ennallistamisen seurannassa

Mitä voidaan kuvata?

Droonien käyttökelpoisuus riippuu erityisesti seurannan tavoitteista. Korkean vedenkorkeuden aikaan voidaan seurata pintaveden liikkeitä ja patojen pitävyyttä sekä mahdollisia vuotokohtia. Puuttomien alueiden lisäksi dokumentoitua saadaan ojien täyttö. Parhaiten kuvaukset tukevat seuranta ennallistamisen jälkeen erittäin märiksi muuttuneilla alueilla, joilla on hankalaa tai mahdotonta liikkua jalkaisin. Droonikuvat auttavat myös ennallistamisen vaikutusalueen määrittämisessä. Avovesipintojen korkeuden perusteella voi olla mahdollista välillisesti arvioida suon vedenpinnan syvyyttä (Rahman ym. 2017).

Hankkeessa saavutetut 1–2 vuoden aikasarjat olivat melko lyhyitä näyttämään suon ennallistumisen kokonaisvaltaisesti, mutta alkukehitystä niistäkin nähtiin hyvin. Hankkeen keston puitteissa saatiin dokumentoitua ennallistamisrakenteiden toteutuminen, työkoneiden jälkiä suon pinnassa ja ennallistamista seuranneita hydrologisia muutoksia.

Pidemmillä aikasarjoilla voitaisiin seurata myös muutoksia kasvillisuudessa. Lajitasolle asti drooniseurantaa ei ole mahdollista viedä kattavasti, koska esimerkiksi soille tyypillisten rahkasammalten määritykset vaativat usein mikroskooppisia tarkasteluja. Joidenkin putkilokasvilajien yksilöt voidaan tiettyyn vuodenaikaan tunnistaa ja laskea kuvilta, jos niiden piirteet ovat riittävän vahvoja, esim. tupasvillan tupsut (*Eriophorum vaginatum*) kukinta-aikaan (ks. myös Kalacska ym. 2013).

Toisaalta mattoina kasvavien rahkasammalten peittävyys on kaksikulotteisilta ortomosaikkikuvilta helpompi määrittää kuin suoraan ylöspäin kasvavien putkilokasvien. Pintamalla voidaan hyödyntää myös varvikoiden korkeuskasvun määrittämiseen.

Drooneilla voidaan seurata myös puuyksilöiden kuolemista vedenpinnan noston seurauksena. Lisäksi, jos ennallistamisen tavoit-

teena on palauttaa suon luontainen avoimuus, taimettumisen kehitys kiinnostaa, ja se tyypillisesti saadaan arvioitua kuvista.

Aluerajaukset

Jos alueella kerätään maanpinnalta verrokkiaineistoja (esim. suoseurantaverkostoon kuuluvat vedenkorkeus- tai kasvillisuushavainnot), nämä sijainnit kannattaa sisällyttää kartoitettaviin alueisiin. Toisaalta nykyisen ohjeistuksen mukaiset kymmenen kasvillisuusruutua per kohde tai yksittäiset pohjavedenpinnan mittauspisteet ovat sellaisenaan riittämättömiä kaukokartoituksen tukiaineistoja, vaan näitä tulisi olla mielellään esim. vähintään 30 koko kaukokartoitetun alueen laajuudella.

Seuranta kannattaa kohdistaa alueille, joilla tapahtuvien muutosten ennakoitaan olevan merkittäviä. Alueen valinta riippuu myös seurannan tavoitteista. Hydrologia-LIFE-hankkeessa drooneilla kartoitettiin noin 15–20 ha:n kokoisia alueita eli ne kattoivat hyvin pienen osan koko ennallistamisalueesta. Kartoitusala tulisi valikoida edustamaan vähäpuustoisen alueen keskeisintä osaa, ennallistettavaa suotyyppiä tai sen tiettyä erityispiirrettä. Toisaalta tukittavan ojaverkoston geometria ja alueen puustoisuus vaikuttavat rajaukseen.

Tutkimuskohteen ollessa pieni kartoitettava aluetta kannattaa laajentaa sen ulkopuolelle. Ennallistamiskohteen läheisyydestä voi löytyä verrokiksi sopiva luonnontilainen suokohde tai kartoitusta voidaan laajentaa kohteen yläpuolisen valuma-alueen suuntaan suolle tulevan veden alkuperän ymmärtämiseksi tai alapuoliseen suuntaan ennallistamisen aiheuttamien vesistövaikutusten dokumentoimiseksi. Koska kvaalimitys vaikuttaa aineiston tarkkuuteen, varsinaisen tutkimusrajauksen ulkopuolelle pitää jättää aina vähintään yhden kvaalilinjan levyinen varmuusmarginaali.

Kartoitettavan alueen kokoon vaikuttavat myös operatiiviset rajoitteet: lentokorkeus (ai-

neistojen tavoiteltu resoluutio), käytettävissä oleva akkukapasiteetti (lentoaika) ja VLOS-vaatimus. Virrankulutus- ja akkuteknologia sekä tietokoneiden laskentakapasiteetti kehittyvät nopeasti, joten mielekkään kokoinen kartoitusala droneilla on jatkuvasti kasvamassa. Hydrologia-LIFE-hankkeessa käytiin ainoastaan multiroottorityyppejä droneja, kun taas kiinteäsiipisillä aluksilla pystytään kattamaan laajempia alueita (Dronova ym. 2021).

Ilma-alukset

Menetelmäkehityskohteiden ulkopuolella nk. massakuvauksissa käytettiin pääasiassa pieniä DJI Mavic Pro- ja Mavic 2 Pro -droneja, jotka kulkevat mukana repussa tai olkalaukussa. Tämä on kätevää silloin, kun suo ei ole aivan teiden läheisyydessä. Tällaiset peruslaitteet koettiin hyväksi edullisina ja tarpeen vaatien helposti korvattavina.

Edistyneempiä laitteita (hankkeessa DJI Mavic Enterprise-, Phantom- ja Matrice-sarjat) tarvitaan vaativampiin kuvaustarpeisiin, kun halutaan paremmin systemaattiseen analyysiin soveltuvia aineistoja. Ne ovat tyypillisesti kookkaampia ja siten painavampia kantaa mukana maastossa. Lisäksi niiden käyttöön vaaditaan syvällisempää perehtymistä. Tarkkaan kolmiulotteiseen kartoitukseen soveltuvien droonimallien vaatimuksena voi pitää optisesti pienivirheistä kameraa, sijainnintittauksen ja valotuksen aikasynkronointia ja kerralla valottavaa suljinta (global shutter).

Hankkeessa erikoislaitteistoja käytettiin vain tietyillä kohteilla ja niitä käyttivät aina samat henkilöt. Myös peruslaitteiden opastus ja ylläpito on hyvä keskittää toimipaikoittain nimetyille vastuukäyttäjille.

Monet erikoislennoista tilattiin ulkopuolisilta toimijoilta. Tällainen pieni joukko erikoistuneita lentäjiä katsottiin toimivammaksi vaihtoehdoksi, mutta monet lentäjät olisivat loppukyselyn perusteella olleet kiinnostuneita käyttämään kierrätettäviä erikoislaitteita, jos perehtymiseen varattaisiin työaikaa.

Edistyneemmät laitteet ja menetelmät vaativat kuitenkin yleensä myös lentojen yhteydessä maanpinnalta RTK-paikantimen kanssa kerättäviä tukiaineistoja. Tällaiset tehtävät katsottiinkin jo työläämmiksi ja enemmän työaikaa vaativiksi kuin pelkkä lentäminen. Lisäksi edistyneemmät menetelmät vaativat tyypillisesti aktiivista menetelmäkehitystä ja lukuisia testauskäyntejä maastossa.

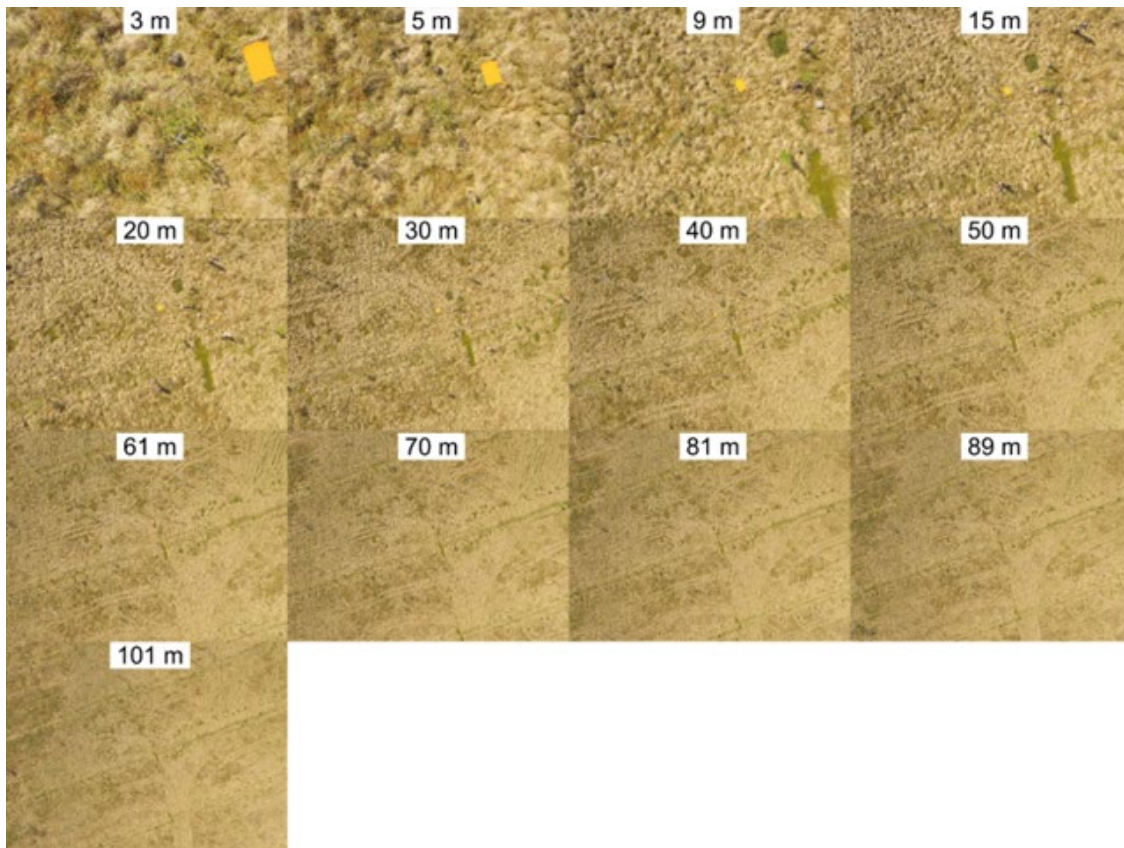
Kuvausohjeistus

Lentotyö ohjeistettiin hankkeessa luodulla kuvausohjeella. Testien perusteella lentokorkeudeksi ohjeistettiin 80 m. Matalammalta lennettäessä olisi erottanut tarkempia yksityiskohtia (kuva 17), mutta vastaavasti katettu alue olisi jäänyt pienemmäksi. Isoja kohteita olisi ollut mahdollista lentää ilman erillisluvia aina EU-asetuksen sallimaan 120 m:n korkeuteen asti. Riittävän resoluution saavuttamisen käänköpuoli onkin aina kartoitettavan alueen laajuuden rajallisuus. Käytetyillä asetuksilla päästiin näkyvän valon aineistoissa noin 3–5 cm:n resoluutioon, multispektriai- neistoissa noin 5–10 cm:n ja lämpöaineistoissa noin 10–20 cm:n resoluutioihin.

Lähellä maksimilentokorkeutta on kuitenkin syytä muistaa, että perusdronit ilmoittavat lentokorkeuden suhteessa lähtöpaikkaan, kun taas asetuksen vaatimus koskee dronin etäisyyttä alapuolella olevaan maanpintaan. Kehittyneemmissä droneissa lentokorkeuden voi sijoittaa alapuoliseen maanpintaan korkeusmallin avulla. Tällä on merkitystä lähinnä mäkisissä ympäristöissä.

Läheltä maan pintaa otetut kuvat voivat korvata perinteistä maanpinnalta tehtyä valokuvausta erityisesti haastavissa maastoissa ja laaja-alaisilla kohteilla. Automatisoidusti haettavat yksittäiset lähikuvat suon pinnan tietyistä pisteistä voisivat lisätä ymmärrystä muutoksista ilman hitaampaa ja käsittelyprosessin vaativaa kartoituslentoa.

Perusdronien muutaman metrin sijaintitarkkuus asettaa tosin rajoituksensa toisaalta turvalliselle maanpinnan lähestymiselle



Kuva 17. Lentokorkeuden vaikutus yksittäisellä kuvalla näkyviin yksityiskohtiin ja kuvan kattamaan alaan. Kuvissa näkyvä oranssinkeltainen levy on kooltaan 50 x 70 cm. Kolmen metrin korkeudelta otettu kuva kattaa noin 3 m x 4 m alan ja 101 m:n korkeudelta otettu kuva noin 130 m x 180 m alan. Hydrologia-LIFE-hankkeessa kuvauskorkeus oli pääasiassa 80 m. Kuva-aineisto: Jari Ilmonen.

puustoisessa maastossa, toisaalta myös matalalla lennettäessä kuvanottokorkeudelle, jotta suon pinta kuvataan joka kerralla riittävän yhtenevästä sijainnista. RTK-droonien tarkka paikannus ratkaisee ongelman. Yleisimmistä kaupallisista drooneista löytyy myös törmäyksenestosenorit.

Kuvien limittyminen naapurikuvien kanssa valitaan ennen lentoa. Mitä enemmän kuvat limittyvät toistensa kanssa, sitä useammassa kuvassa tietty maaston piste nähdään ja sitä tarkempi aineistosta saadaan. Limitys on jaettu lentolinjan suuntaiseen pituuslimitykseen (frontal overlap) ja lentolinjojen väliseen sivulimitykseen (side overlap).

Limitykset (pituus 90 % ja sivu 75 %) pidettiin korkeina, jotta aineistojen korkea laatu voitiin taata kasvillisuuden aiheuttamista varjostuksista huolimatta. Pituuslimitystä ra-

joittaa käytännössä vain kameran valmistautumisaika uuteen valotukseen. Sivulimitys sen sijaan vaikuttaa lentolinjojen tiheyteen eli niiden kokonaismäärään ja siten lennon pituuteen, ajankäyttöön ja akunkulutukseen.

Valokuvausasetukset pidettiin hankkeen kuvauksissa tyypillisesti automaattisina. Valokotasapainoa, valoherkkyyttä ja valotuksen korjausta säätämällä kuvista olisi saatu tasalaatuisempia, mutta tämä olisi vaatinut lentäjien syvempää perehdyttämistä. Näkyvän valon kuvaukset suoritettiin JPG-formaatissa. Raakakuvaformaatti antaisi kuviin enemmän säätövaraa, mutta olisi myös lisännyt tiedostokokoa huomattavasti. Spektraaliset kuvat tallennettiin TIF- tai R-JPEG-formaatissa.

Lentäjät täyttivät jokaisen lennon jälkeen taulukkomuotoiseen lentopäiväkirjaan seuraavat lennon tiedot: kohde, suojelualue, koh-

teen kuvaus, päivämäärä, kellonajat, lentäjä, käytetty kalusto, lentotyyppi (testailu, kartoitus, vapaa lento), vallinnut sää, kertynyt kuvamäärä, käytetyt limitykset ja lentokorkeus sekä vapaamuotoiset huomautukset. Tiedostot siirrettiin käsittelijälle verkon yli useita eri pilvipalveluita hankkeen aikana kokeillen. Varsinkaan hankkeen alkuvaiheessa käytetty Sharepoint-työtila ei toiminut isompien aineistojen kanssa, vaan tiedostoja katosi usein matkalle. Lopulta isot aineistot siirrettiin sujuvasti muistikortilla postitse.

Aineistojen käsittely

Kartoitusaineistojen prosessointiin on saatavilla useita kilpailevia ohjelmistoja ja verkkopalveluita. Käytettävä ohjelmisto ja siinä tehtävät parametrivalinnat vaikuttavat tuloksiin. Verkkopalvelut on yleensä suunnattu laajemmalle käyttäjäkunnalle, jolloin ortomosaiikkikuva ja korkeusmalli saadaan tuotettua helposti, mutta parametrien säätömahdollisuudet ovat rajalliset. Hankkeessa käsittely suoritettiin pääasiassa keskitetysti Agisoft Metashape -ohjelmistolla Oulun yliopiston kiinteällä työasemalla.

Käsittelyssä kartoitusaineistoista muodostettiin kolmiulotteinen pistepilvimalli, josta edelleen ortomosaiikkikuva, korkeusmalli ja kasvillisuusindeksi. Green Red Vegetation Index (GRVI) -indeksiä on käytetty kuvaamaan kasvien biomassaa ja fenologiaa (Zhang ym. 2019):

$$GRVI = \frac{G - R}{G + R}$$

jossa G = vihreän kanavan heijastusarvo
R = punaisen kanavan heijastusarvo.

Indeksikuvat koettiin pääasiassa hyödyllisiksi mutta kuitenkin vaikeasti tulkittaviksi ilman perehtymistä. Ortomosaiikkikuville suoritettiin automaattinen värikalibrointi ja valkotasapainon säätö, joiden vaikutus lopputuotteisiin oli kuitenkin vähäinen. Tehok-

kaampaa sävyjen kalibrointia jäätiin kaipaamaan, jotta eri ajankohtina otettujen kuvien vertailu toisiinsa olisi riippumattomampaa vallinneista valaistusolosuhteista.

Lopputuotteet tallennettiin georeferoituna TIF- ja JPG-tiedostoina. Ortomosaiikkikuvissa pakkaamattomat TIF-kuvat olivat JPG-kuvia parempilaatuisia, mutta myös huomattavasti kookkaampia. JPG-formaattisten korkeusmallien esitysmuoto (Metashapen väriskaala ja vinovalovarjoste) tuli käsittelyohjelmistosta, kun taas TIF-formaattiset jätettiin numeeriseen float-muotoon käyttäjän omien analyysien ja visualisointien mahdollistamiseksi.

Aineistojen käsittely ottaa oman aikansa. Nopein tapa hyödyntää aineistoja on heti maastossa tarkistaa yksittäisistä kuvista tai pelkällä kameran live-näkymällä tilanne mielenkiintoisissa maaston pisteissä. Suunnittelu- vaiheessa kesän kartoitusten osalta tulosten tulisi suunnittelijoiden mielestä olla saatavilla viimeistään syksyllä, kun suunnitelmia aletaan viedä paikkatietojärjestelmään. Joidenkin suunnittelijoiden mielestä tulokset olisi parempi saada mahdollisimman nopeasti, esim. kahdessa viikossa.

Teknisen seurannan osalta aineistojen olisi hyvä olla käytettävissä ennen seuraavan vuoden toiminnan suunnittelua (edeltävän vuoden elokuu) siltä varalta, että toteutuksessa on korjaustarpeita. Pitkäaikaisen vaikutusseurannan osalta tulosten valmistumista ei koettu niin kiireelliseksi.

Tulevaisuudessa lentäjät voisivat ladata kartoituskuvat verkkoon yhteyksien salliessa jo maastossa, jolloin aineistot olisivat prosessoituneet pilvipalvelussa toimistolle saavutuksessa. Tämä edellyttää, että tähän soveltuvan pilvipalvelun käyttöön on lisenssi tarvittavin käyttöoikeuksin.

Kokemuksia käyttöönnotosta

Drooniaineistoilta odotettiin ennallistamisen seurannassa kuvia ja korkeusmalleja suunnittelutyöhön, alueen hahmottamiseen ja tarkkailuun, seurannassa erityisesti kuviotason tietoja muutoksista. Kokemusten perusteella droonitoiminnalla ei ole mahdollista korvata maastossa tehtäviä havaintoja, mutta se tarjoaa uudenlaisen näkökulman soiden tarkasteluihin.

Lentäjät kokivat uuden tekniikan pääasiasa hyödylliseksi ja opetteluun helpoksi, mutta haasteitakin löytyi. Joitakin uuden tekniikan opettelu hirvitti, ja osa lentäjistä kertoi olevansa liian kiireisiä tai piti kynnystä syvälliseen perehtymiseen korkeana. Kuitenkin käytön kerrottiin alkaneen sujumaan rohkeasti kokeilemalla.

Hankkeessa kertyi kokemuksia niin vapaiden kuvien ja videoiden kuin systemaattisten kartoitusaineistojen käyttämisestä. Kartoituslentäminen koettiin helpoimmaksi, kos-

ka aluerajauksen ja asetusten säätämisen jälkeen drooni lentää vaaditun reitin itsenäisesti.

Droonikuvausta käytettiin seurannan lisäksi myös ennallistamisen suunnitteluun ja toteutukseen. Kokemusten perusteella hyödylliseksi katsottiin suhteellisen isojenkin pinta-alojen hahmottaminen nopeasti ja mahdollisuus tutkia kohdetta toimistolla kaikessa rauhassa. Suunnitteluvaiheessa saadaan yleiskuva alueen kuivatustilanteesta ja havaitaan ennallistamisen kannalta haastavat paikat. Lisäksi droonit katsottiin hyväksi apuvälineeksi viestintätarkoituksiin.

Operointihaasteiden ja teknisten haasteiden (taulukko 3) koettiin lisäävän toimintaan liittyvää epävarmuutta. Vaikka laitteet testattaisiin toimistolla etukäteen, tekniset ongelmat saattavat silti estää aineiston keräämisen maastossa.

Eniten teknisiä ongelmia oli droonin ohjaamisessa erillisellä puhelimella tai tabletilla. Droonivalmistajan oma näytöllinen etäohjain

Taulukko 3. Droonilentäjien ja ennallistamissuunnittelijoiden havaintoja operointihaasteista, teknisistä haasteista ja drooniseuranta-aineistoista.

Operointihaasteita	Teknisiä haasteita	Havaintoja drooniaineistoista
<ul style="list-style-type: none">• Muuttuvat tai muuten haasteelliset (ylivalotukselle tai liike-epäterävyydelle herkät) valaistusolosuhteet• Yhteiskäyttötunnukset laitteisiin (Apple, Google) ja sovelluksiin (DJI) hankalia tai kiellettyjä käyttää• Yhteiskäytössä olevista laitteista huolehtiminen• Akkujen oikeasta varaustasosta huolehtiminen talven aikana• Laitteiston testaamiseen tulee varata aikaa ennen maastoon siirtymistä• Aineistot ovat raskaita tallentaa, siirtää verkon yli ja käsitellä• Datat hallinta haastavaa Metsähallituksen organisaatiossa• Vaatimus hankalasta lentosuunnitelman tekemisestä itärajan ADIZ-vyöhykkeellä tai muualla, missä ilmatilaan on tehty varauksia.	<ul style="list-style-type: none">• Droonin ja kauko-ohjaimen akun lyhyt kesto, jota teknisten ongelmien selvittäminen maastossa osaltaan lyhentää• Yhteysongelmat droonin ja kauko-ohjaimen välillä• Sovellusten ja kauko-ohjainkäytössä olevien mobiililaitteiden jumitumiset• Laitteen päivitys maastossa• GPS-paikannusongelmat• Kompassin ylitiheä kalibrointitarve• Ohjattavuuden katoaminen kesken lennon• Droonin hallinnan katkeaminen, karkaaminen tai tippuminen.	<ul style="list-style-type: none">• Kohteen hahmottaa kokonaisuutena paremmin kuin maastossa• Ennen-kuvista hahmottaa hyvin käytettävissä olevan täyttömaan määrän ja ojien syvyyden• Ojalinjojen tukkiminen näkyy hyvin kaikissa jälkeen-kuvissa, rimpipintojen vettyminen joissakin kuvissa• Kuvilta löytyi aiemmin tuntemattomia kohteita, kuten ojia ja lähteitä• Drooniaineisto- ja maastohavainnoista löytyi myös eroja esim. ojalinjojen raivauksen tarpeessa• Konekuskin ojentäyttekniikka voidaan tallentaa koulutusikäyttöä varten• Eri vuodenaikoina eri asiat näkyvät selvemmin (esim. lehtipuut syyskuvassa)• Kartoituksen lisäksi myös vapaa droonikuvaaminen on informatiivista.

toimi vakaammin kuin erillinen laite. Laitteiden tekninen käytettävyyks katsottiin kuitenkin hyväksi silloin, kun ne saatiin toimimaan.

Usein droonikuvaukset jätettiin maastoreissun viimeiseksi työtehtäväksi. Parhaimmillaan kuvaukset onnistuivat muiden maastotöiden ohessa ilman suurta lisävaivaa, mutta tekniset ongelmat ja huono sää viivästyttivät työtä tai vaativat tekemään kohteelle erillisen kuvausretken, mikä taas herkästi sekoitti yleistä töiden järjestelyä.

Hallitsemattomat sää- ja valaistusolosuhteet ovat merkittävä haaste droonikuvausten operoinnille. Aikataulun ollessa tiukka maastopäivää ei pysty valikoimaan säiden mukaan. Tyypillisin este droonitoiminnalle on vesisade. Hankkeessa käytössä olleet droonit eivät olleet vesitiiviitä, ja vaikka olisivatkin olleet, sade olisi heikentänyt kuvanlaatua merkittävästi.

Valaistusolosuhteet määräytyivät yleensä satunnaisesti sen mukaan, miten lennot päätettiin muilta töiltä suorittamaan. Optimaalinen valaistus olisi kirkas mutta pilvien pehmentämä (ei varjoja kasvillisuudesta) sekä vakaa (ei muutu kuvauksen aikana).

Hämärässä valaistuksessa suljinajat pitenevät, jolloin kuviin muodostuu herkästi droonin liikkeistä (lentämisestä tai heilahduksista) johtuvaa epäterävyyttä. Tämän riskiä nostaa myös kova tuuli, joka voi heikentää droonin hallittavuutta.

Hiukan navakammilla tuulilla droonit lensivät myötätuuleen päin liiankin nopeasti. Vastatuuleen lentäminen oli puolestaan hidasta ja joskus järjestelmä jopa vaati lennon keskeyttämisen. Kovilla, yli 10–15 m/s tuulen nopeuksilla operointi estyy kokonaan, joskin alusten tuulenkestävyydessä on tapahtunut voimakasta kehitystä viime vuosina. Uudemmat ja kookkaammat droonit ovat vakaampia tuulisissa olosuhteissa.

Tulosten hyödyntäminen

Ortomosaiikkikuvia ja korkeusmalleja hyödynnettiin lähinnä silmämääräisillä vertailuilla. Ortokorjattujen lopputuotteiden sisältämä sijaintitieto mahdollistaa maaston tietyn pisteen eri ajankohtien nopean vertailun. Suunnittelijoilla oli kuitenkin osittain haasteita aineistojen itsenäisessä viemisessä paikkatieto-ohjelmistoon tai niiden visualisoinnissa siellä.

Lopputuotteille voidaan tehdä myös erilaisia systemaattisia analyysejä (esim. maanpinnan luokittelua), mutta tämä koettiin lentäjien tehtävänä turhan vaativaksi. Sen sijaan katsottiin, että yhden asiaan perehtyneen henkilön tulisi suorittaa analyysit keskitetysti.

Kuvista ja pintamalleista havaittiin paljon ennallistamisen kannalta olennaisia asioita kuten ojalinjojen tukkiminen ja veden leviäminen suolle (taulukko 3). Märkyden arviointi kuvista koettiin myös objektiivisemmäksi kuin maastohavaintojen avulla. Toisaalta märkyden (tai siitä kertovan kasvillisuuden) muutoksia ei aina koettu helpoiksi havaita, tai kuvat ainakin vaativat ”silmämääräisen kalibroinnin” ensin maastossa.

Drooniaineistojen yleistä hyödyllisyyttä kuitenkin myös kyseenalaistettiin, koska Maanmittauslaitos tuottaa laadukkaita kaukokartoitusaineistoja ilmakeuhajelmassaan ja laserkeilausohjelmassaan. Nämä avoimet aineistot tulisikin ottaa systemaattisemmin käyttöön soiden seurannassa.

Droonitoiminnan etuja avoimiin aineistoihin nähden ovat ennen kaikkea joustavuus, joka mahdollistaa seurannan aikatauluttamisen tarkasti hankkeen tarpeisiin, ja tarkempi resoluutio silloin, kun avoimien aineistojen puolisen metriä (vanhemmissa laserkeilausissa parisen metriä) ei ole riittävä. Tarkastelemissa kohteilta löydettiin myös oja, jotka eivät näkyneet Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoissa. Puustoisilla kohteilla laserkeilaus on kuitenkin tarkempi tapa tuottaa maanpintamallia kuin droonikartoitus.

Avoimien aineistojen ylivoimainen etu on niiden kattavuus. Droonien rajallinen akkukapasiteetti, aineistojen raskaus (korkea resoluutio) ja maksimilentokorkeus rajoittavat pinta-alaa, joka on mahdollista kattaa. Akkuteknologia kuitenkin kehittyy nopeasti. Kun hankkeen alkuvaiheessa yhdellä akulla oli mahdollista suorittaa noin 20 min lento, luvattiin vastaavan kokoluokan uudelle droonisukupolvelle hankkeen lopussa jo 45 min lentoaikaa.

Drooniaineistojen yhdistämistä muihin, esim. hydrologisiin aineistoihin toivottiin, jotta voitaisiin vertailla kuvista hydrologisesti samanlaisia tilanteita tai saada tukea hydrologian muuttumiselle vastaavana ajanjaksona.

5.5 Tulokset: Näkyvän valon kuvaukset

Niin kutsutuissa näkyvän valon (Visible light) kuvauksissa kohteet kartoitettiin ennen ennallistamista ja sen jälkeen droonien omilla valokuvakameroilla.

Yhteensä näkyvän valon aineistoja kuvattiin 43 tutkimuskohteessa, 27 suojelualueella (liite 4). Kuvauskohteet kartoitettiin yleensä vuotta ennen ennallistamista ja 1–2 vuotta ennallistamisen jälkeen. Tarkastelussa hyödynnettiin valokuvauksella tuotettua ortomosaiikkikuvaa ja pintamallia (Digital Surface Model, DSM).

Selkeimmin kuvilta erottuvat ojien täyttämiseen ja patoamiseen liittyvät muutokset eli mistä materiaalia ojien täyttämiseen on otettu, missä oja on jätetty täyttämättä ja mihin padot, pintavallit tai syöttöojat on sijoitettu (kuva 18). Näin aluetta ennestään tuntematonkin voi saada kuvan suolla tehdyistä ennallistamistoimista ja rakenteiden sijoittelusta.

Puusto hankaloittaa ojien havaitsemista kuvista ennen ennallistamista, jos niitä ei ole ehditty raivata. Ennallistamisen jälkeen ojalinjat ovat yleensä avoimet. Ortomosaiikkikuvalta ja pintamallista on mahdollista arvioida esimerkiksi ojien tukkeutumista. Erityisesti

pintamalli voi olla hyödyllinen ojien syvyyden hahmottamisessa (kuva 19). Ennen-jälkeen-aikasarjasta voidaan selvittää mm. syvimpien ojien sijainnit ja niiden tukkimisen onnistuminen. Koska valokuvakartoitus tallentaa vain näkyvän pinnan, vesi saattaa virrata kasvillisuuden alla, vaikka tätä ei kuvilta erota.

Ennallistamisen tavoitteiden kannalta olennaista on nähdä, onko vettä siellä, mihin sitä luonnollisesti kuuluu. Ortomosaiikkikuvalta voi olla mahdollista havainnoida, onko vesi levinnyt täytettyjen ojalinjojen ulkopuolelle eli saralle ojien tukkimisen seurauksena. Kuvilta voidaan myös tulkita, onko veden liike saatu pysäytettyä esim. liiallisen pehmeiden takia täyttämättä jätetyissä ojissa.

Parhaassa tapauksessa aineistosta hahmottuu kokonaiskuva: miten vettymisen taso vaihtelee eri puolilla suota ja onko ennallistamisella ollut vaikutusta myös ojittamattoman osan märkyyteen. Kokonaiskuvaa tarkastelemalla voidaan paikantaa suolta yksittäisiä ojaia tai kohtia, jotka voi olla tarpeen käydä tarkastamassa kohteella jalkaisin.

Vettymisen lisäksi ortomosaiikkikuvalta on mahdollista paikantaa veden luontaisia virtausreittejä ja arvioida ennallistamisen aiheuttamia muutoksia niihin (kuva 20). Jos virtausreitti on havaittavissa jo ennen ennallistamista, on mahdollista tarkastella vesien palautumista reitille ennallistamisen seurauksena. Aina luontaiset virtausreitit eivät kuitenkaan näy etenkin ennen ennallistamista, mutta tällöin ennallistamisen jälkeistä tilannetta voi olla hyödyllistä peilata historiallisiin ilmakehiin tai ennallistamissuunnitelmaan.

Vesitalouden palautumisen kannalta myös rimpipinnoilla tapahtuvat muutokset voivat olla kiinnostavia. Aikasarjojen avulla voidaan havainnoida esimerkiksi ojitusten kuivattamien rimpipintojen vettymistä tai avovesipintojen laajuutta.

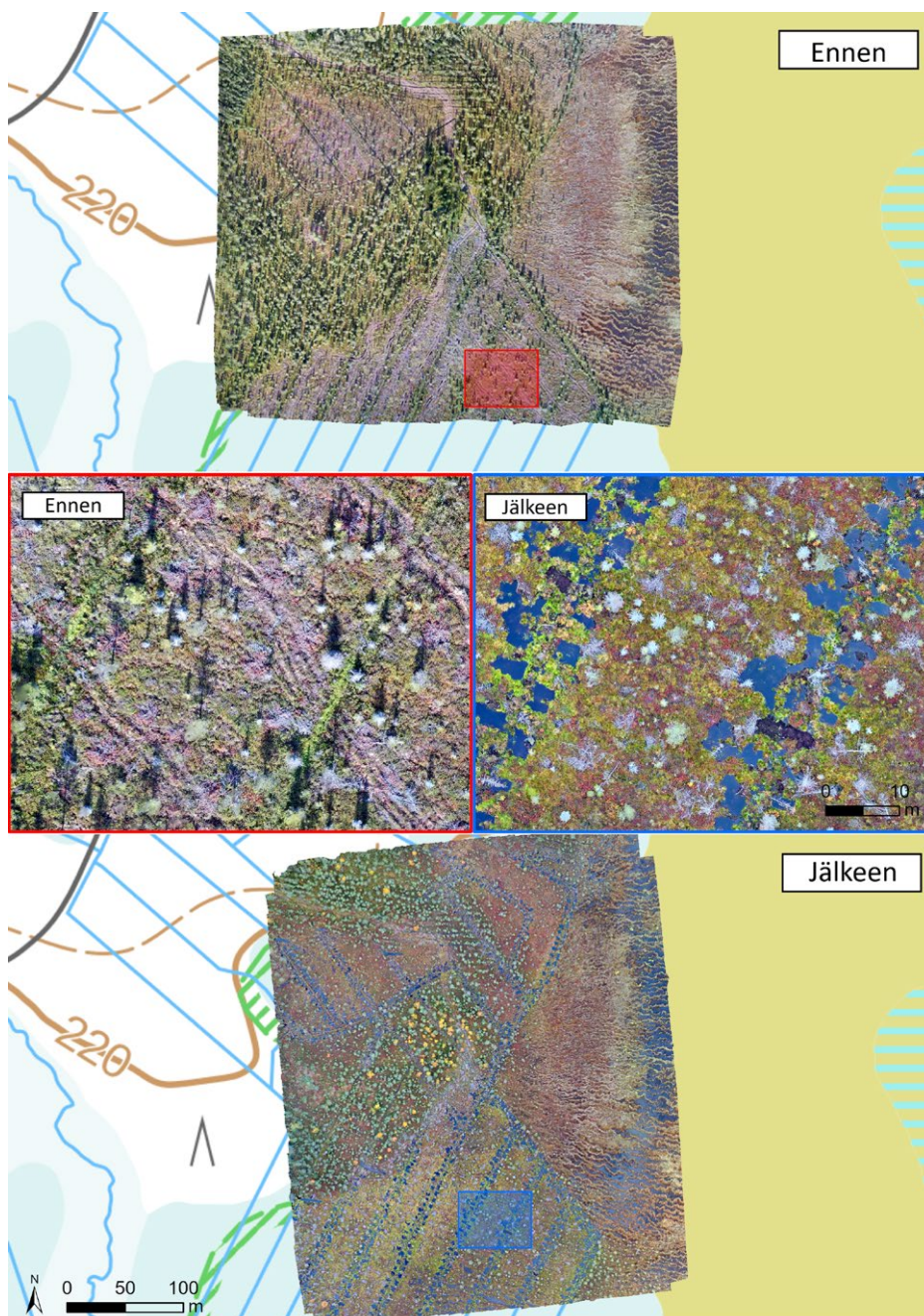
Mahdollista on myös paikantaa ongelmakohtia ja arvioida, onko niissä tarpeen tehdä jatkotoimenpiteitä. Aineistojen pohjalta voidaan tarkastella sortumia padoissa ja patojen pitävyyttä (kuva 21). Veden leviäminen selviää

parhaiten kuvista, jotka on otettu vedenpinnan ollessa korkeimmillaan. Silloin myös paitoihin kohdistuva paine on suurimmillaan.

Kaadetut puunrungot näkyivät kuvilla selkeästi, samoin havupuiden neulasten kellastuminen vettymisen jälkeen. Kuviin tallentui myös kaivinkonekuskin kaivuutekniikkaa, jota

voidaan myöhemmin käyttää uusien kuskien opastamisessa ennallistamisen kaivuutyöhön.

Suurin hyöty näkyvän valon aikasarjoista saadaan, kun tarkastellaan niitä yhdessä ennallistamissuunnitelman kanssa, jolloin voidaan kiinnittää erityistä huomiota jo suunnitteluvaiheessa ennakoituihin riskikohtiin.



Kuva 18. Haikara-aapa (Haikara-aavan–Vitsikkoavaan soidensuojelualue). Ennallistamisen jälkeen turvepadot erottuvat selkeästi droonikuvilta. Kuvaparrilta voidaan havaita myös valaistusolosuhteiden vaikutus. Automaattinen värisävyjen tasoitus ei ole onnistunut tekemään kuvista kirkkaudeltaan samanlaisia. Kuva: Petra Kohonen, kuva-aineisto: Mika Puustinen, taustakartta: Maanmittauslaitos.

Sää- ja valaistusolosuhteet vaikuttavat merkittävästi kartoitusaineistojen radiometriseen laatuun. Näkyvän valon kuvien radiometriseen kalibrointiin ei ole vakiintuneita menetelmiä, mutta esimerkiksi Relative Radiometric Normalization -metodia (RRN) soveltamalla on onnistuttu parantamaan näky-

vän valon aineistojen visuaalista laatua (Pastucha ym. 2022).

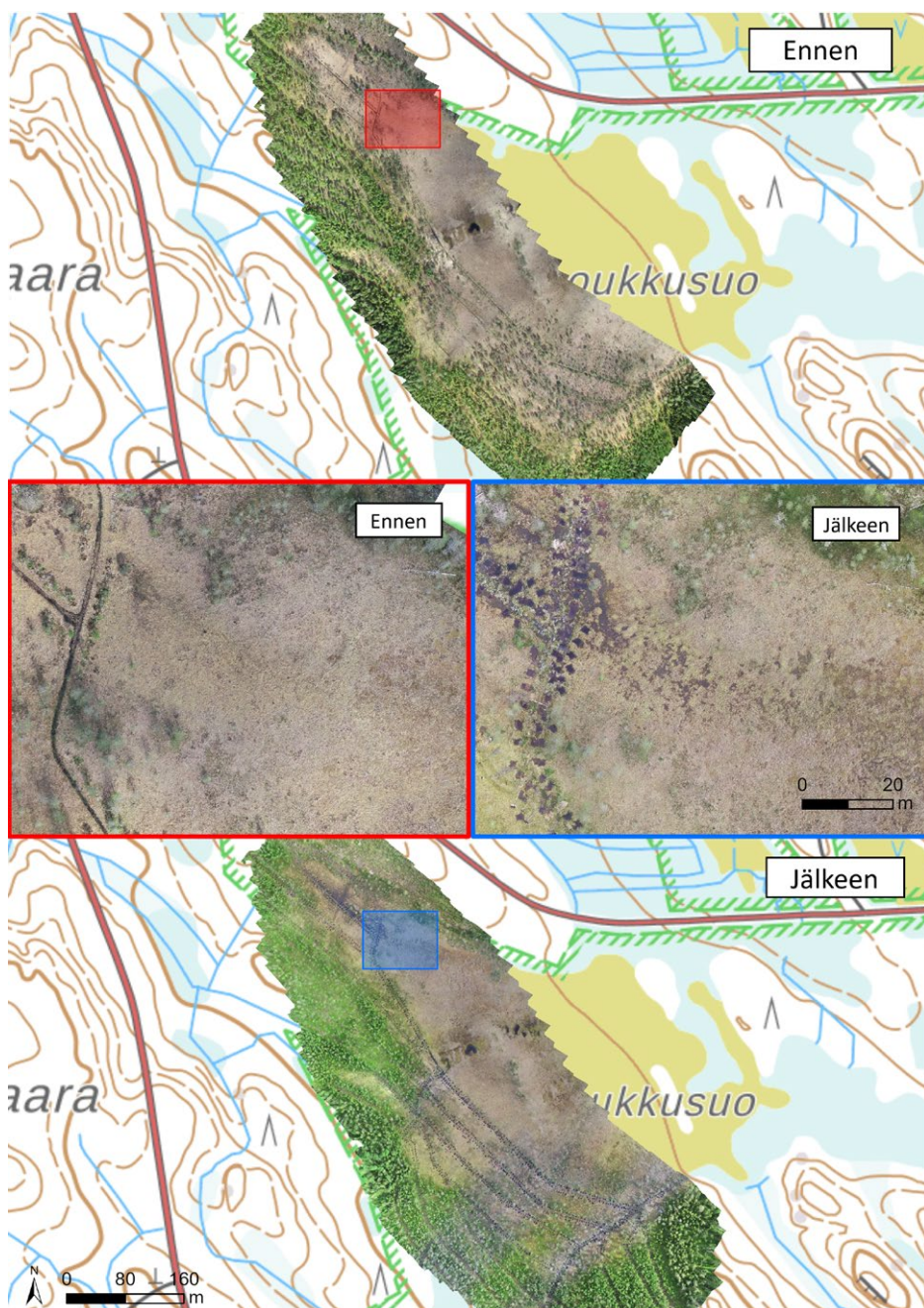
Kaikkiin aineistoista tehtyihin havaintoihin (tulviminen padon yli, vedenpinnan nousu) ei kuitenkaan saatu tietokoneen ääressä täyttä varmuutta, vaan niiden varmistaminen vaati maastokäynnin. Erityisesti vanhat ojat saatta-



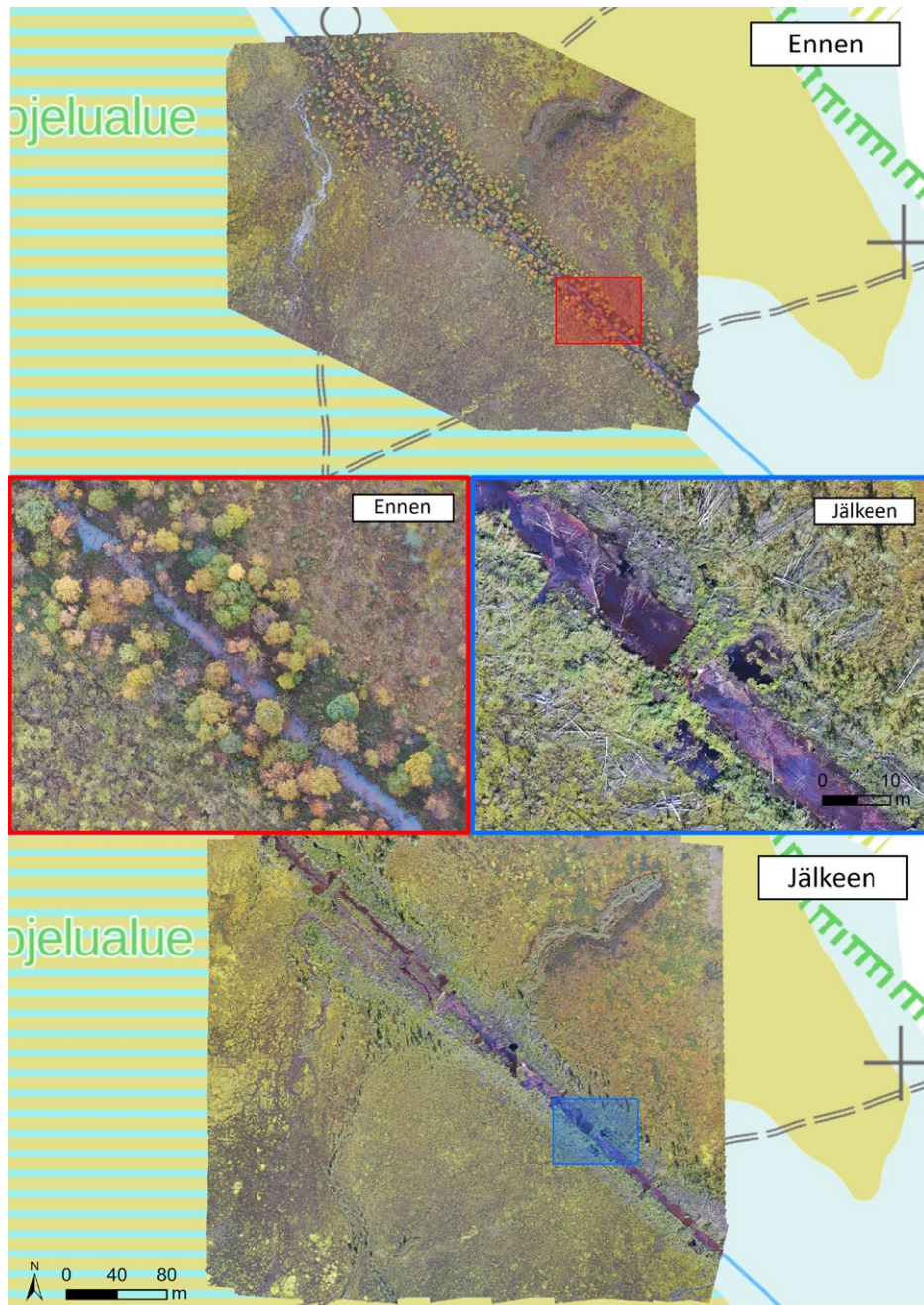
Kuva 19. Mykränsuo (Kesonsuon luonnonsuojelualue). Alueen pohjoisosassa erottunut syvä oja ennen ja jälkeen ennallistamisen. Kuva: Petra Korhonen, kuva-aineisto: Maarit Similä, taustakartta: Maanmittauslaitos.

vat kuvissa näyttää umpeen kasvaneilta, vaikka vesi yhä virtaisi merkittävästi rahkasammalien seassa tai tiheän varpukasvillisuuden alla. Toisaalta droniaineistojen tarkastelut nosti-

vat esiin ongelmakohtia, jotka eivät osuneet maastokierroksen varrelle. Vinalovarjosten ja ilmakuvan yhdistelmästä nähtiin hyvin vanhoja uomia ja romahtaneita rimpipintoja.



Kuva 20. Loukkusuo (Jonkerinsalon luonnonsuojelualue). Yksi veden päävirtausreiteistä oli nähtävissä heikkona ortomosaiikkikuvalla jo ennen ennallistamista. Ennallistamisen myötä vettä palasi runsaammin alkuperäiselle reitilleen ja virtausreitti on selkeämmin havaittavissa myös ortomosaiikkikuvalla. Kuva: Petra Korhonen, kuva-aineisto: Maarit Similä, taustakartta: Maanmittauslaitos.



Kuva 21. Kemihaaransuot (Kilpiaavan luonnonsuojelualue). Ennallistaminen on toteutettu patoamalla iso kanava. Osassa padoista vesi pääsee virtaamaan padon yli. Vesi on kuitenkin ympäröivän suonpinnan tasolla, eikä ylivirtauksista nähty olevan haittaa suon ennallistumiselle. Ylivuotopaikat ovat kohtia, joihin seuranta erityisesti kohdistetaan tulevina vuosina. Kuva: Petra Korhonen, kuva-aineisto: Mika Puustinen, taustakartta: Maanmittauslaitos.

5.6 Tulokset: Multispektri- ja lämpökuvaukset

Multispektri- ja lämpökuvauksia suoritettiin hankkeessa monilla alueilla painottuen menetelmäkehityskohteille (liite 4). Reflektanssipaneelit radiometristä kalibrointia varten hankittiin hankkeen aikana, mutta osasta hankkeen alkuvaiheen kuvauksia ne puuttuivat. Irradianssisensoria ei käytetty, joten kartoituksen aikana tapahtuneita muutoksia valaistusolosuhteissa ei voitu ottaa huomioon.

Lämpökuvauksissa käytettiin radiometristä kameraa, jolloin alkuperäisten kuvien jokaiselle pikselille löytyy lämpötilatieto. Tämä tieto ei kuitenkaan säilynyt läpi kartoitusaineiston käsittelyprosessin. Systemaattisia analyysijä aineistoilla ei hankkeen aikana tehty, mutta visuaaliset vertailut osoittivat aineistojen potentiaalin soiden seurannassa.

Ennen-jälkeen-aikasarjoja kartoitettiin Olvassuon Isolla Leväniemellä ja Mujejärven Loukkusuolla (Jonkerinsalon luonnonsuojelualue). Loukkusuolla kuvilta nähtiin vain pieniä muutoksia, mahdollisesti koska kuvaukset suoritettiin vain muutama viikko ennallistamisen jälkeen, ja toisaalta koska Loukkusuolla pohjavesivaikutus on lievempi. Sen sijaan Olvassuolla saatiin aineistoissa näkyviin ennallistamisen aiheuttamia muutoksia (kuva 22).

Iso Leväniemi on voimakkaasti pohjavesivaikutteinen kohde ja alun perin avointa lettoa Leväsuon aapasuokokonaisuuden rinteisellä reunalla. Tutkimuskohde valittiin melko avoimena säilyneen, ojittamatta jätetyn alueen läheisyyteen, joka oli kuivahtanut erityisesti niska- ja reunaojien varsilta. Kohteen pohjoispuolella sijaitsee Kälvasvaaran reu-namuodostuma, jonka varastoimia pohjavesiä purkautuu ojiin ja tihkupinnoille. Kuvaukset suoritettiin lämpiminä elokuun päivinä lähes tarkalleen vuoden aikavälillä, noin kaksi kuukautta ennen ja kymmenen kuukautta jälkeen ennallistamisen.

Väärävärικuvat esittävät pääasiassa samoja asioita kuin voidaan havaita valokuvilta, mutta värisävyt korostavat kosteuden muutoksia.

Avoimen alueen keskiosissa oli nähtävissä tihkupintoja jo ojitetussa tilanteessa (kuva 22D). Alueen pohjoisreunassa olleen niskaojan tukkiminen kuitenkin selvästi lisäsi purkautuvan pohjaveden määrää näillä tihkupinnoilla, mikä on nähtävissä valokuvassa tummempina ja väräjärikuvassa punertavampina sävyinä.

Parhaiten tihkupintojen muutos kuitenkin näkyi lämpökuvissa (kuva 22D). Tihkupinnat eivät erottuneet ennen-tilanteen lämpökuvassa lainkaan eli pohjaveden purkautuminen ja valuminen pintaa pitkin oli hyvin hidasta. Niskaojan tukkiminen selvästi lisäsi kylmää pohjavettä suon pinnassa jälkeen-tilanteen lämpökuvan perusteella. Pohjavesi vaikuttaisi purkautuvan ja liikkuvan luonnollisen näköisenä tihkupintakuviona sen sijaan että se virtaisi katkeamattomana norona. Samanlainen tihkupintakuviointi ilmestyi läpi koko tutkimuskohteen avoimen alueen (kuvan 22 lämpökuvien ulkopuolella).

Lisäksi kaikkien kuvien (kuva 22D) perusteella vaikuttaa siltä, että ojitetussakin tilanteessa näkyneen tihkupintaverkoston länsipuolelle on syntymässä uusia vastaavanlaisia tihkupintoja, joita ei vielä ennen-tilanteessa ollut näkyvissä.

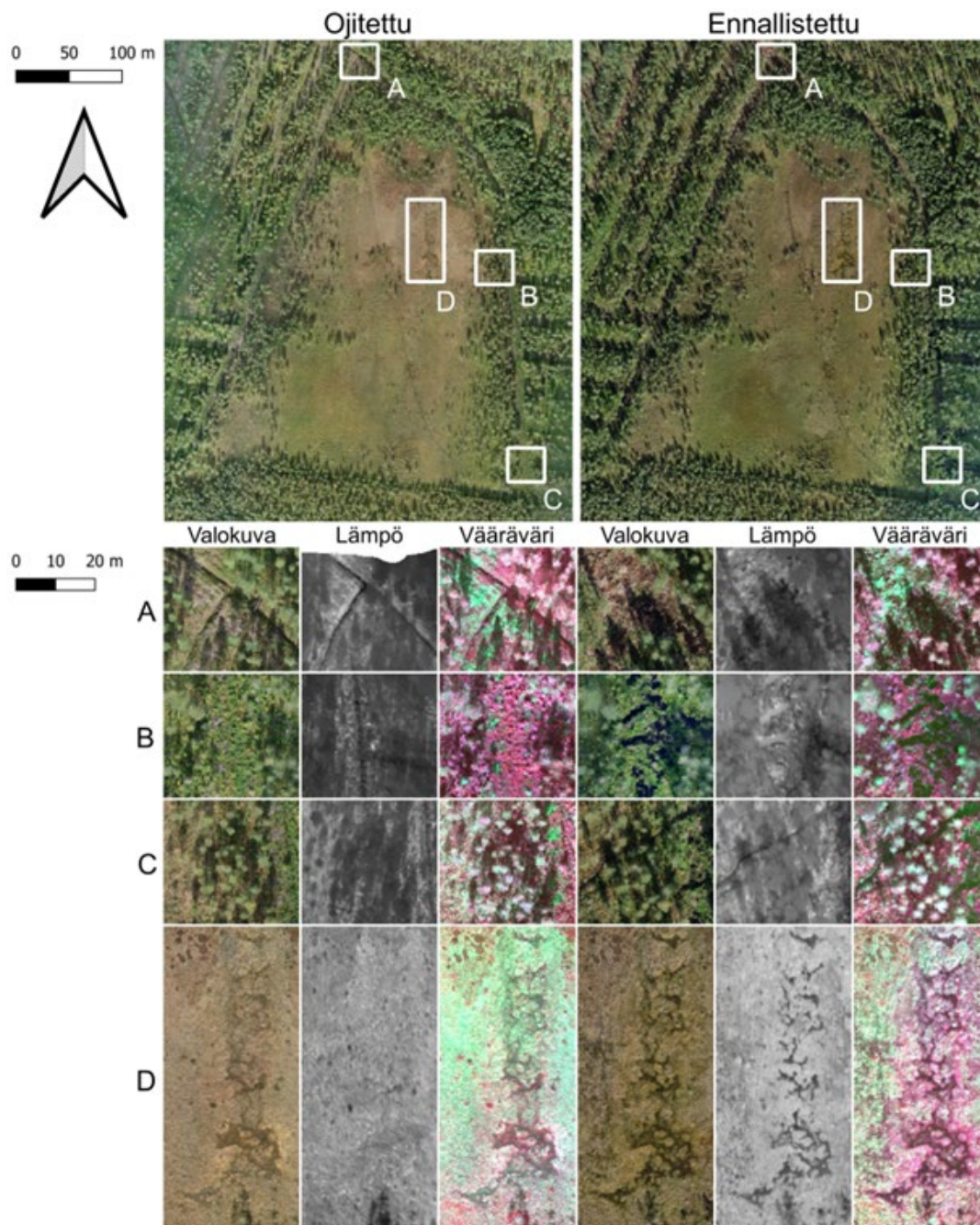
Ennen-tilanteen lämpökuvissa (kuva 22A–C) näkyy myös ympäristöään kylmempää pohjavettä tummana sävynä virtaamassa ojalintoja pitkin. Lämpökuvasta auttaa havaitsemaan umpeen kasvaneiden ojanpohjien tarkat sijainnit tarkemmin kuin valokuva (kuva 22B).

Jälkeen-tilanteen valokuvassa samasta paikasta (kuva 22B) havaitaan, että ojien täyttö on muodostanut paikalle niiden suuntaa vastaan kohtisuoria avovesipintoja. Jälkeenlämpökuvasta havaitaan, että nämä vesialtaat ovat sävyiltään vaaleita eli ympäristöään lämpimämpiä. Tästä voidaan päätellä, että padot pitävät, eikä kylmä pohjavesi virtaa merkittävästi vanhalla ojalinjalla altaiden kautta. Altaiden itäpuolella tosin näyttää pintaan tihkuvan pohjavettä.

Kuvissa 22C puolestaan havaitaan ennallistamisen jälkeen lapiolla kaivettu syöttöoja,

jonka tarkoituksena on siirtää vesiä ojalinjalta avosuolle. Oja kaivettiin korjaavana toimenpiteenä ensimmäisen kevään hoitoseuranta-

käynnillä tehtyjen oikovirtaushavaintojen jälkeen.



Kuva 22. Valokuva-, lämpökuvaa- ja vääräväriaineistoista muodostettujen ortomosaiikkikuvien vertailua Olvassuon Isolla Leväniemellä. Lämpökuvassa vaaleat sävyt vastaavat lämpimiä kohteita ja tummat kylmiä. Multispektrikameralla MicaSense Rededge M kuvattujen näkyvän valon ja lähi-infrapun kanavat on esitetty väärävärinä. Väärävärissä kosteimmat pinnat näkyvät punertavina ja kuivemmat vihertävinä. Kuva: Lauri Ikkala, kuva-aineisto: Pasi Korpelainen.

5.7 Tulokset: Topohydrologinen analyysi

Ikkala ym. (2022) tarkastelivat suon pinnan topografisia muutoksia ja niiden vaikutuksia suon vesitalouteen Hydrologia-LIFE-hankkeessa ennallistetuilla kohteilla. Ennallistamiskohteet Mujejärven Loukkusuolla (Jonkerinsalo) ja Isossa Leväniemessä (Olvassuo) sekä näiden luonnontilaiset kontrollikohteet Tammalammella ja Kirkaslammella kartoitettiin drooneilla 2–11 kk ennen ennallistamista ja 1–10 kk sen jälkeen. Aineistoista havainnointiin primäärisiä eli kaivinkoneen aiheuttamia muutoksia maanpinnan korkeudessa sekä hitaampia ja pienempiä sekundäärisiä muutoksia, tutkimusjakson puitteissa lähinnä vetymisestä johtuvaa turpeen turpoamista. Lisäksi tutkittiin muutoksia kohteiden märkydessä topohydrologisen analyysin avulla käyttäen virtauskertymäalgoritmia ja Saga Wetness Index (SWI) -märkyysindeksiä maanpintamallille (Digital Terrain Model, DTM).

Kuvassa 23 on esitetty muutoksia suon pinnan korkeuksissa. Tutkimusalueilla havaittiin maanpinnan nousseen 0,6–1,0 m siellä, missä ojia täytettiin ja patoja rakennettiin (kuvat 23A1, A3 ja B1). Kuva 23A2 kuitenkin näyttää alueen, jossa ojan täyttö oli estynyt maaperän märkyden vuoksi. Oja oli jo ennallistamisen alkaessa melko tukkeutunut ja ohjasi vedet avosuolle keskeltä ojalinjaa.

Kohteilla havaittiin myös pienempiä, sekundäärisiä muutoksia, jotka olivat kuitenkin paikoin sekoitettavissa aineiston epätarkkuuksiin. Ison Leväniemen avoimella alueella, jossa aineisto vaikutti tarkalta, havaittiin pinnan kohoamista, erityisesti suon alimmilla pinnoilla (kuvat 23B2, B3). Alimpien pintojen kasvillisuuden on osoitettu olevan herkin korkeusmuutoksille (Howie & Hebda 2018), mahdollisesti niiden löyhän rakenteen ja putkilokasvien juurten puuttumisen vuoksi.

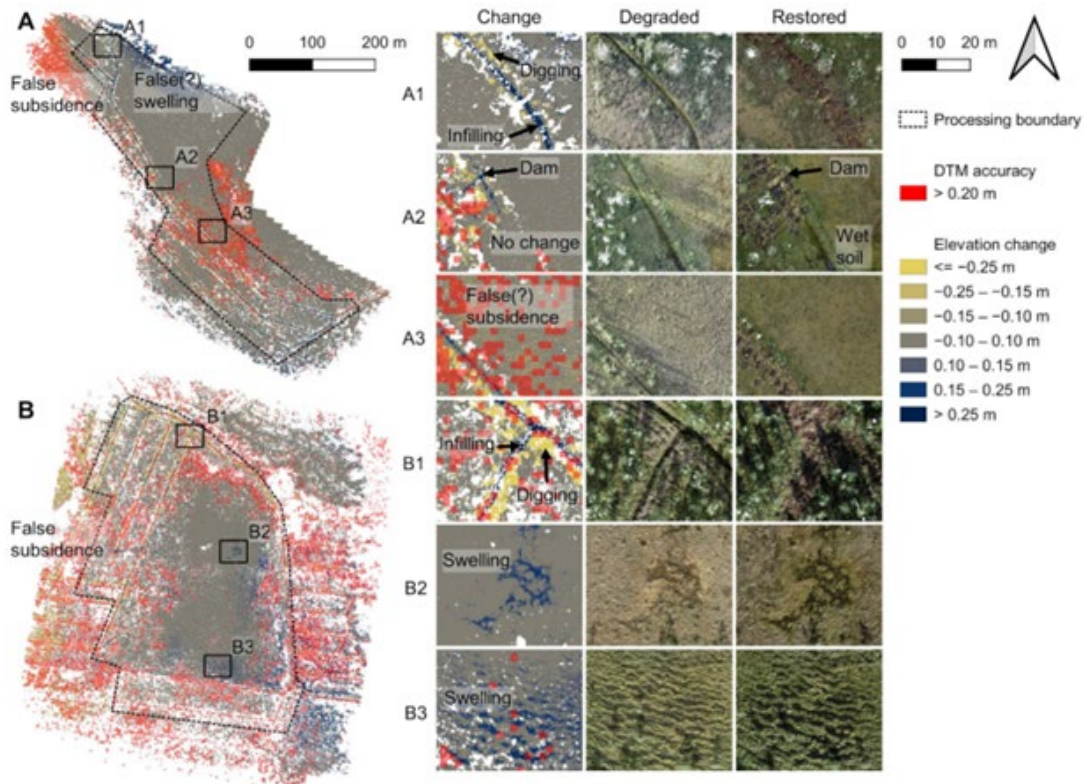
Loukkusuo kuvattiin vain muutama viikko ennallistamisen jälkeen, keskellä kesän kuivinta aikaa, mikä voisi selittää sitä, ettei siellä havaittu systemaattista turpoamista. Ku-

van 23A3 alueella havaittu maan painuminen saattoi liittyä epätarkkuuksiin, mutta havaintoa tuki myös topohydrologisessa analyysissä havaittu veden määrän väheneminen samalla alueella. Ortomosaiikkikuvilta (kuvat 23A1–3, B1) voidaan myös havainnoida konekuskien ”käsiälää” eli ojien täytöstä syntyneiden kaivuukooppien sijainteja ja ennallistamisen näkökulmasta mahdollisia haitallisia keskinäisiä yhteyksiä.

Topohydrologisen analyysin perusteella virtausreitit siirtyivät ennallistamisen jälkeen ojien pohjilta tasaisemmin suon pinnalle (kuva 24). Loukkusuolla (kuva 24A) ojat oli kaivettu likimain korkeuskäyrien suuntaisesti, mistä johtuen verkosto purkautui jo ennen-tilanteessa alapuoliselle ojittamattomalle suolle kolmea pääreittiä pitkin. Ojien tukkimisen jälkeen sama ylärinteestä tuleva vesimäärä kuitenkin jakautui yli kymmenelle virtausreitille, mikä teki suosta 2,9 % märemmän ja märkyden vaihteluväli pieneni 15 % eli suosta tuli tasaisemmin märkä.

Ojien suunnasta johtuen Loukkusuon ennallistamisessa rakennetut padot olivat likimain yhdensuuntaisia rinteeseen viettämisen kanssa ja siksi topohydrologisen analyysin näkökulmasta lähes yhdentekeviä. Analyysi ei kuitenkaan huomionnut maaperän ominaisuuksia. Todellisuudessa padot ovat tarpeellisia, jos täytetyt ojalinjat johtavat vettä voimakkaammin kuin ympäröivä turvemaa. Lisäksi patojen merkitys korostuu tulva-aikaan, kun pintavettä on liikkeellä enemmän. Ympäristöään korkeammalle rakennetut padot myös ennakoivat tulevana vuosina eloperäisissä täyttömaissa tapahtuvaa rakenteiden painumista.

Viättävämmällä Ison Leväniemen kohteella (kuva 24B), jossa ojat oli kaivettu rinteeseen suuntaisiksi, virtausreitit säilyivät täytetyillä ojalinjoilla ennallistamisen jälkeenkin. Virtaus kuitenkin muuttui mutkittlevammaksi, mikä edisti vetymistä ja todennäköisesti myös hidasti virtausnopeutta ja esti eroosiota. Kohteen keskimärkyys kasvoi 7 % ja märkyden vaihteluväli pieneni 13 %.



Kuva 23. Topografiset ja visuaaliset muutokset Loukkusuon (A) ja Ison Leväniemen (B) ennallistamisalueilla. Positiivinen korkeusmuutos viittaa pinnan nousemiseen. Lähikuivat A1–B3 näyttävät muuttuneita alueita ortomosaiikkikuvilla. Heikon korkeustarkkuuden alueet (korkeuserot droonimaanpintamallin ja Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston välillä > 0,20 m) on väritetty punaisella. Kuva: Lauri Ikkala, kuva-aineisto: Pasi Korpelainen ja Maarit Similä. Julkaistu uudelleen lisenssillä CC BY 4.0 © Ikkala ym. 2022.

Ojien väliset sarkalinjat säilyivät kuitenkin kuivempina myös ennallistamisen jälkeen. Tätä olisi voitu ehkäistä rakentamalla korkeampia ja pidempiä patoja ja pintavalleja lyhyemmällä väleillä kompensoimaan ojien suurta kaltevuutta ja levittämään vettä sarkalueille.

Ojat alueella olivat kuitenkin syviä, joten niiden täytteeksi oli vaikeaa löytää riittävästi maa-ainesta ilman että maanpinta ojan läheisyydessä jäi notkolle. Kuivatus aiheuttaa orgaanisen maan painumista ja ojien ympäristöt kuivuvat tyypillisesti tehokkaimmin, mistä johtuen niiden pinta on painunut sarkoja alemmas. Siksi ne toimivat herkästi virtausreitinä myös ennallistamisen jälkeen (Haapalehto ym. 2011).

Luonnontilaisilla kontrollikohteilla havaitut, mittausvirheistä ja pinnankorkeuksien luonnollisesta vaihtelusta johtuvat muutok-

set olivat merkittävästi pienempiä kuin ennallistamiskohteilla. Ne olivat kuitenkin merkittäviä erityisesti tasaisimmilla alueilla, joilla pienetkin korkeusmuutokset (mittausvirheet) siirtävät analyyseissä virtausreittejä herkästi.

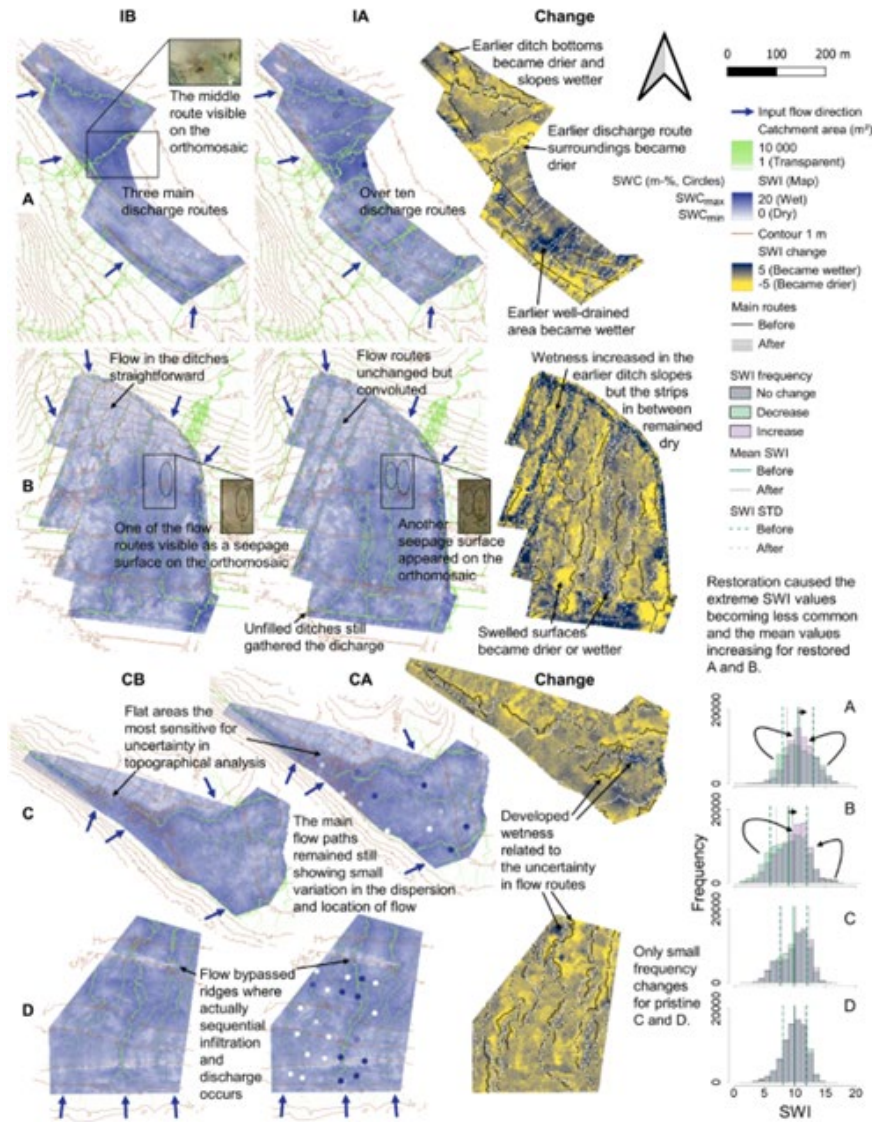
Droonikartoitukset ja hydrotopografinen analyysi todettiin toimivaksi, uudenlaiseksi tavaksi tarkastella ennallistamisen aiheuttamia muutoksia suon vesitaloudessa kvalitatiivisesti ja ensimmäistä kertaa myös kvantitatiivisesti. Ison Leväniemen ja Loukkusuon ennallistamiset katsottiin analyysin perusteella onnistuneiksi virtausreittien hajaantumisen, mutkistumisen, keskimärkyden kasvun ja märkyden vaihteluvälin pienenemisen vuoksi.

Kohteiden märkyys kasvoi, koska kaltevat ojaluisat korvattiin tasaisilla täyttöpinoilla, jotka kuljettavat vettä eteenpäin hitaammin. Haastavinta virtauksen levittäminen on,

kun ojat ovat syviä ja rinteiden suuntaisia. Toisin kuin tämän tutkimuksen ääriesimerkit antavat ymmärtää, tyypillisesti ojat on kuitenkin kaivettu vinosti rinteeseen nähden.

SWI-indeksin ennustamia suonpinnan märkyyksiä verrattiin maastosta jälkeentilanteessa kerättyihin ja laboratoriossa kuivatuihin ja punnittuihin pintasammalnäytteisiin

(kuva 24, Soil Water Content, SWC). Ennustettujen ja näytteiden vesipitoisuuksien välillä löydettiin tilastollisesti merkitsevä korrelaatio ennallistamiskohteilla mutta ei luonnontilaisilla kohteilla. Korrelaatiot jäivät kuitenkin melko heikoiksi ($R^2 = 0,26-0,42$), mikä viittaa siihen, että topografian ohella moni muukin asia vaikuttaa suon märkyyteen.



Kuva 24. Märkyys- ja virtausreittimuutokset Loukkusuon (A) ja Ison Leväniemen (B) ennallistamisissa ja vastaavat muutokset samaan aikaan Tammalammen (C) ja Kirkaslammien (D) luonnontilaisilla kontrollikohteilla. SWI-märkyysindeksi (sininen pohjakuva ennen- ja jälkeen-kuvissa) ja virtauskertymä (vihreät reitit) kertovat saman ylärinteestä tulevan vesimäärän jakautumisesta tapahtuneista muutoksista. IB/IA = Ennallistamiskohde ennen ja jälkeen (Intervention Before/After), CB/CA = Luonnontilainen kohde vastaavina ajankohtina (Control Before/After). Kuva: Lauri Ikkala, kuva-aineisto: Pasi Korpelainen ja Maarit Similä. Julkaistu uudelleen lisenssillä CC BY 4.0 © Ikkala ym. 2022.

Voi olla, että kuivatus muuttaa turpeen ominaisuuksia enemmän topohydrologiselle analyysille sopiviksi. Toisaalta SWI perustuu osaltaan yläpuolisen valuma-alueen pinta-alaan, joka sattui olemaan luonnontilaisella kohteella rajallinen. Yläpuolisen valuma-alueen pinta-alan määrittämiseen käytettiin droonikartoituksen ulkopuolella Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa.

Analyysin tulokset voidaan katsoa topografian perusteella tehdyiksi pitkän aikavälin ja vakio-olosuhteiden hydrologisiksi ennusteiksi. Suurin virhelähde lienee maaperän ominaisuuksien jääminen huomioimatta. Vaikka topografia on veden liikkeiden merkittävin määräävä tekijä, myös turpeen syvyys sekä sen ja alapuolisen kivennäismaan vedenläpäisyominaisuudet vaikuttavat veden liikkeisiin (Kempinen ym. 2017). Tutkitut kohteet olivat aapasoiden reuna-alueita. Tutkittavaksi jää, miten topohydrologinen analyysi soveltuu esimerkiksi koho- eli keidassoille.

Sekundäärisistä muutoksista tutkimuksen aikajanelle osui vain turpeen turpoaminen. Pidemmällä tarkasteluvälillä muita sekundäärisiä muutoksia olisivat eroosio, patojen painuminen, kasvillisuuden kasvu ja turpeen kertyminen. Ison Leväniemen tarkasteluväliin osui myös tulva-aika, mutta kohteella ei havaittu merkittävää eroosiota. Sen sijaan täytettyä niskaojalta ohjattiin korjaustoimenpiteenä vesiä ojittamattomalle keskiosalle. Tämä navero-oja oli kuitenkin liian kapea huomioitavaksi analyysissä, joka tehtiin resoluutiolla 1 m. Tarkempi resoluutio analyysissä huomioisi paremmin myös patojen eroosion, mutta veden virtauksiin vähemmän vaikuttava mikrotopografia saattaisi vaikuttaa analyysiin.

Kehitettyä analyysiä voitaisiin hyödyntää myös osoittamaan ennallistamisen vaikutus vesienpalautuskohteilla, joiden toimenpidealueet ovat usein pieniä ja laajaa vaikutusaluetta on vaikea määrittää. Yläpuolisen metsätalousmaan kuivatusvedet on usein ohjattu niskaojaa pitkin suon ohi. Suhteellisen lyhyen, ohjaavan ojan kaivamisella voidaan kuivahtaneelle suolle ohjata suuria vesimas-

soja yläpuoliselta valuma-alueelta. Kuitenkin tarkastelujemme mukaan vesienpalautuskohteilla topohydrologista virtausverkkomallinusta paremmin märkyyttä ja ennallistamisen vaikutusaluetta sekä niiden ajallista vaihtelua voidaan mallintaa drooneilla kuvatuilla multispektri- ja lämpökuva-aineistoilla (Isoaho ym. 2023).

5.8 Kaukokartoitusseurannan perustamisen johtopäätökset

- Kaukokartoitus voi tarjota soiden seurantaan spatiaalisesti jatkuvaa tietoa muutoksista märkyydessä, kasvillisuudessa, korkeusasemassa, turpeen ominaisuuksissa ja kasvihuonekaasupäästöissä.
- Potentiaalisia sensoreita ovat etenkin valokuva-, multispektri-, hyperspektri- ja lämpökamerat sekä laserkeilaimet ja tutkat.
- Kaukokartoitus soveltuu suon pinnan ja sen märkyyden seurantaan erityisesti avoimilla tai vähäpuustoisilla soilla.
- Ennallistamisen vaikutus osoitetaan tuottamalla ennen-jälkeen-aikasarja, mieluiten useina eri vuodenaikoina ja useita vuosia ennen ja jälkeen ennallistamisen.
- Vaikutusten todentamiseen tarvitaan yleensä luonnontilainen kontrollikohta.
- Kaukokartoitusaineistot tulee varmentaa maastotöiden avulla kerättävillä verrokkiaineistoilla.
- Avoimet Maanmittauslaitoksen ja satelliittioperaattorien tuottamat aineistot tulisi ottaa paremmin käyttöön soiden seurannassa.
- Edullisilla drooneilla ja yksinkertaisilla menetelmillä on suuri potentiaali tukea soiden hoitoseurantatyötä.
- Kehittyneemmät laitteet ja menetelmät eivät sovellu yhtä hyvin kaikkien hyödynnettäviksi, mutta niillä voidaan tuottaa soiden vaikuttavuusseurantaan arvokasta tietoa.

6 Yhteenveto ja suositukset

Systemaattinen suoseurantaverkosto mahdollistaa ennallistamisen vaikutusten arvioinnin, ja hoitoseurannan avulla on mahdollista kehittää ennallistamisen suunnittelua ja toteutusta. Hydrologiset seurannat kertovat ennallistamisen fysikaalisten tavoitteiden saavuttamisesta. Kaukokartoitusseuranta puolestaan antaa ennallistamisen vaikutusten arviointiin uudenlaista tietoa muutoksista suon eri osissa. Onnistumisen määrittely kuitenkin edellyttää selkeiden, kohdekohtaisten kriteerien määrittelyä ja sopivien indikaattorien valitsemista, jotta kriteerien täyttymistä voidaan arvioida.

6.1 Yleisiä huomioita suoseurantojen kehittämiseksi

Pitkäaikaisten vaikutusseurantojen laadukas toteutus edellyttää seurannan tekijöiden huolellista perehdyttämistä. Kasvillisuuden peittävyysarviointi tehdään silmämääräisesti. Jos seurannan tekijöitä on useampia tai tekijä vaihtuu vuosittain, maastokauden alussa tarvitaan ”arviointisilmän kalibrointi”, jolla varmistetaan, että havaitut erot seurantakerrojen tai seurantakohteiden välillä ovat todellisia eivätkä johdu seurannan tekijöiden erilaisesta peittävyysarviointitavoista.

Myös hydrologisissa seurannoissa mittaus-tarkkuus on keskeistä tulosten luotettavuuden kannalta. Vedenpinnan korkeutta mittaavien antureiden tallentama tieto sidotaan ympäröivän suon pintaan vesinäytteiden hakijoiden käsityönä tekemien vedenpinnan korkeusmittauksien avulla. Siksi on tärkeää, että mittausohjeistus on yksiselitteinen ja että vesinäytteiden hakija saa tehtävään riittävän perehdytyksen.

Hoitoseurannasta saadaan suurin hyöty, jos ennallistamisen suunnittelija, toteutuksen ohjaaja ja seurannan tekijä ovat sama henki-

lö. Jos eri työvaiheet ovat eri tekijöiden vastuulla, ennallistamisen kohdekohtaisten tavoitteiden ja menetelmien huolellinen dokumentointi on tärkeää, jotta hoitoseurannalla voidaan selvittää, onko ennallistamisessa saavutettu tavoitteet, ja jos ei ole, mitä tulee jatkossa tehdä toisin.

- **Suositus 1:** Seurantoihin liittyvien tehtävien järjestelyssä tulisi suosia jatkuvuutta. Inventoinnit, mittaukset ja näytteenotot tulee ohjeistaa yksiselitteisesti, ja henkilöstöä tulee säännöllisesti kouluttaa noudattamaan ohjeistusta. Lisäksi vuorovaikutusta maastohenkilöstön ja kerättävien aineistojen käsittelijöiden ja analyysoijien välillä tulee tiivistää.

6.2 Hoitoseuranta

Hoitoseurannoilla arvioidaan ennallistamisen teknistä onnistumista. Se osoittaa paikalliset tarpeet korjaaville tai täydentäville toimenpiteille, mutta onnistumisia ja epäonnistumisia havainnoimalla on mahdollista myös kehittää ennallistamismenetelmiä. Tarkoituksenmukainen aika-tila- ja taulutus hoitoseurannoille on 0,5–2 vuotta (ensimmäinen kerta) ja noin 10 vuotta (toinen kerta) ennallistamisen jälkeen. Jos ennallistamisessa on puutteita tai ongelmia, ylimääräinen hoitoseurantakerta ennen 10-vuotishoitoseurantaa voi olla tarpeen, samoin kuin korjaustoimenpiteiden suunnittelu ja toteutus.

Hoitoseuranta on tarpeen pitää joustavana kohteiden suuren kirjavuuden ja kullekin kohteelle soveltuvien menetelmien moninaisuuden vuoksi. Minimitietosisältö on kuitenkin määriteltävissä, ja se tulee esittää nykyistä selkeämmin. Seurantaohjeistuksen päivitys käynnistyy 2024, jolloin vähimmäistiedot tulee määritellä ja saattaa seuraajien tietoon. Ennallistamisen jälkeen tulee biotooppiku-

viotietoihin tallentaa vähintään ojitustilan-teen muutos sekä viimeistään hoitoseuran-tojen yhteydessä mahdolliset muutokset Na-tura-luontotyypin edustavuudessa.

Havaintojen keruuta palvelisi mobiilisovel-lus tai maastotietokone, jolla hoitoseuranta-käynnin tiedot kerättäisiin. Hoitoseuranta-tehostaisi mahdollisuus tarkastella avoimia kaukokartoitus- ja paikkatietoaineistoja sekä kohteelta tuotettuja drooniaineistoja maas-tossa.

Hoitoseurantaan kaivataan myös nopeaa maastomenetelmää hydrologisten muutosten kuvaamiseksi, jotta tieto voitaisiin tal-lentaa osaksi kohteen paikkatietoaineistoa. Paikkatietojärjestelmiä uudistettaessa tulisi tietojärjestelmien käyttäjät osallistaa kehi-tystyöhön.

- **Suositus 2:** Määritetään hoitoseuran-noille määritetään hoitoseuran-tojen tallennuskäytäntö. Tarkastel-laan mahdollisuutta kehittää hoitoseu-rantatyötä varten käyttöliittymä (mobi-ilisovellus), jonka avulla havainnot tallen-netaan ympäristöhallinnon paikkatieto-kantaan. Edistetään hoitoseuranta-aineistojen käytettävyyttä ennallistami-sen vaikuttavuuden arviointiin.

6.3 Soiden ennallistamisen seurantaverkosto

Soiden ennallistamisen seurantaverkosto tuottaa systemaattisesti kerätyn aineiston avulla tietoa soiden ennallistamisen vaiku-tuksista suon hydrologiaan ja kasviyhteisöi-hin. Verkosto on maailmalaajuisesti vertail-tuna huomattavan laaja ja kattava sisältäen ennallistamiskohteiden lisäksi myös luon-nontilaiset ojitetut verokko-kohteet. Hydro-logia-LIFE-hankeessa analysoitiin verkoston kymmenvuotisaikasarjoja.

Verkoston aineistoille on kysyntää tiede-maailmassa yleisemminkin kuin vain niiden tutkijoiden keskuudessa, joiden kanssa ai-neiston käsittelemisestä alun perin on so-vittu. Aineiston avaaminen yleiseen tieteelli-

seen käyttöön edistää myös seurantaverkos-ton vaikuttavuutta. Ennen aineiston avaamis-ta on tarkistettava kerätyt tiedot ja tehtävä tarpeelliset korjaukset. Aineistoon on liitettä-vä myös riittävät kuvailutiedot. Seurantaver-koston kymmenenvuotishavainnot julkaista-neen pian tämän raportin julkaisun jälkeen niitä käsittelevien tieteellisten julkaisujen yh-teydessä.

- **Suositus 3:** Seurantaverkostossa kerätyt havainnot julkaistaan säännöllisesti (esim. viiden vuoden välein) avoimina ai-neistoina kaikkien kiinnostuneiden käyt-töön.

Tieteellisten julkaisujen lisäksi on tärkeää saada tulokset myös yleistajuiseen muotoon ja yleisempään jakeluun. Aineistosta löytyvät poikkeavuudet on syytä tarkastaa maastossa, mikä edellyttää tieteentekijöiden ja maasto-henkilöstön sujuvaa kommunikaatiota.

- **Suositus 4:** Seurantaverkoston aineistot analysoidaan ja tulokset julkaistaan säännöllisesti (esim. viiden vuoden vä-lein). Kunkin julkaisun yhteydessä järjes-tetään työpaja, jossa aineiston analysoi-jat ja kohteiden seurannasta vastaavat suunnittelijat pääsevät keskustelemaan tuloksista.

Seurannan merkitys vaikuttavuuden ym-märtämiselle on korvaamaton. Seurantaver-kostossa on kohteita korvista, rämeistä ja ne-voista. On kyseenalaista, voidaanko verkoston tuloksia soveltaa erilaisille (erityyppisille tai eriasteisesti heikentyneille) soille kuin mitä verkostossa seurataan. Systemaattista tiedon-keruuta kaivattiin hankkeen kokemusten pe-rusteella myös letoille ja rimpinevoille. Myös pohjavesivaikutteiset kohteet ja muut erityis-kohteet tulisi ottaa tavanomaisia kohteita tar-kempaan seurantaan.

Toisaalta menetelmien ja kohteiden mo-nipuolistuessa olisi syytä perinteisen ennallistamisen lisäksi seurata ja tutkia myös mui-ta ennallistamiseen verrattavia toimenpiteitä, kuten vesienpalautusta, passiivisesti ennallis-

tumaan jättämistä sekä jatkuvan metsänkasvatuksen vaikutuksia soiden vesitalouteen ja monimuotoisuuteen. Valtion suojelualueiden lisäksi systemaattista seuranta kaivataan myös valtion metsätalousalueille ja yksityisille maille, missä ennallistamistoimintaa ollaan lisäämässä voimakkaasti.

Metsähallituksen suoseurantaverkosto on kuitenkin hallittavuuden kannalta kokonsa ylärajoilla, jotta ohjeistukset välittyvät sujuvasti käytännön toimijoille ja toisaalta maastohavainnot siirtyvät tutkijoille. Nykyisen verkoston laajentamisen sijaan todennäköisesti toimivampi vaihtoehto olisi perustaa uusia, erillisiä seurantaverkostoja erilaisille kohteille. Eri verkostojen ohjeistuksen harmonisointi on kuitenkin tärkeää vertailtavuuden saavuttamiseksi.

- **Suositus 5:** Soiden ennallistamisen seurantaverkoston toimintaa jatketaan nykyisillä kohteilla. Uudenlaisia seurantarpeita varten perustetaan erillisiä seurantaverkostoja. Nykyisen seurantaverkoston ohjeistusta ja menetelmiä käytetään pohjana uusille verkostoille ja verkostojen harmonisoinnista huolehditaan.

6.4 Hydrologiset seurannat

Hydrologisten seurantojen tarkoituksena on soiden ennallistamisen keskeisten hydrologisten muuttujien, veden kulkureittien, jakaantumisen ja laadun tarkastelu. Ilman palautunutta hydrologiaa eivät palaudu luonnolliset kasviyhteisöt, muu soiden lajisto tai turpeen kertyminen.

Valtion suojelualueilla ennallistamisen vaikutusta hydrologiaan on tutkittu 46 kohteen asetelmalla (27 ennallistettua ja 19 luonnontilaista suota). Seurantaan on käytetty automaattisia vedenkorkeusantureita, näitä tukevia manuaalisia vedenkorkeushavainnoja sekä laboratoriossa analysoituja vesinäytteitä. Lisäksi valikoiduilla kohteilla on järjestetty suo-kohteen alapuolella valuntaseuranta.

Vedenkorkeusanturit on yleensä sijoitettu ojien välisille sarka-alueille. Muutokset valumaveden laadussa ovat todennäköisesti voimakkaimmat ennallistamisessa eniten häirityillä alueilla, kuten täytetyillä ojilla. Siksi suon hydrologisen kokonaisuuden ymmärtämisen ja ennallistamismenetelmien kehittämisen kannalta olisi hyvä saada tietoa hydrologisista muutoksista myös ojalinjojen kohdalta. Veden liikkeistä saran ja täytetyn ojan välillä saataisiin tarkempaa tietoa sijoittamalla anturit pareittain: yksi täytetylle ojalle, yksi sarkaväliin. Toisaalta kaukokartoituksen verrokkiaineistojen keräämiseksi valituilla kohteilla anturit olisi syytä sijoittaa kartoitettavalle alalle spatiaalisesti kattavasti.

- **Suositus 6:** Vedenkorkeusanturit ja näytteenottopisteet sijoitetaan kohteille pareittain keskelle sarkaa ja viereiselle ojalinjalle tai spatiaalisesti laajalle alueelle.

Vedenkorkeushavainnot vesikaivon sisällä muunnetaan vedensyvyyshavainnoiksi mittaamalla putken pään pystysuora etäisyys suon pinnasta. Suonpinnan korkeus kuitenkin vaihtelee vesikaivon ympärillä suon vesitilanteen, vuodenajan sekä kasvillisuuden kasvun ja tiivistymisen mukaan.

- **Suositus 7:** Vesikaivon pään pystysuora etäisyys ympäröivään suonpintaan määritetään käyttämällä apuna vesikaivon ympärille kullakin mittauskerralla erikseen pujotettavaa kaulusrengasta.

Lisäksi vesikaivojen ympäristöt suositellaan valokuvattaviksi joka käynnillä ja niiden sijainnit suositellaan mitattavan suurella tarkkuudella.

Vesinäytteet pumpataan manuaalisten vedenkorkeusmittausten yhteydessä vesikaivoista lappopumpulla. Kuivina kausina kaivoista saatetaan saada vain yksi pullollinen vettä. On epäselvää, ovatko kuivina kausina saatavat ainoat näytteet 1 vertailukelpoisia märkinä kausina saatavien näytteiden 2 kanssa.

- **Suositus 8:** Selvitetään, onko vesinäytteiden tuloksissa eroa näytteiden 1 ja 2 välillä. Tarkennetaan tarvittaessa ohjeistusta vesinäytteiden 1 ja 2 ottamisesta.

Tarkkoja vedenlaadun laboratorioanalyysijä on haastavaa korvata maastomittauksilla. Joitakin muuttujista olisi mahdollista seurata laadukkaiden kenttämittarien avulla. Myös veden liikenopeuksista suon pintakerroksissa toivottiin tietoa.

- **Suositus 9:** Vedenlaadun kenttämittauksia kokeillaan seurannassa niiden parametrien osalta, joille on saatavilla laadukkaita kenttämittareita (pH, sähköjohtavuus, lämpötila ja ultravioletti-absorbanssi).
- **Suositus 10:** Vesikaivon tyhjäksi pumpaamisen yhteyteen kehitetään ajanottoon perustuva menetelmä, joka kertoo pintaturvekerroksen vedenjohtavuudesta.

Ennallistamisen vaikutukset voidaan erottaa luonnollisesta vaihtelusta seuraamalla samaan aikaan myös luonnontilaisia verrokki-kohteita. Yhteisen verrokkikohteen käyttäminen useaan, eri ajankohtina ennallistettuun kohteeseen tuo synergiaetuja, mutta saattaa myös sekoittaa mittausten aikataulutusta. Seurantaverkoston havaintojen perusteella soiden ennallistaminen nostaa vedenpinnan korkeutta ja vähentää sen vaihteluväliä heti ensimmäisten kuukausien ja vuosien aikana. Vedenkorkeus voi kuitenkin olla herkempi kuivien kausien vaikutukselle ennallistetuilla kuin luonnontilaisilla kohteilla.

- **Suositus 11:** Jokaiselle ennallistamiskohteelle järjestetään oma luonnontilainen verrokki, tai vaihtoehtoisesti huolehditaan siitä, että verrokkia havainnoidaan molempien ennallistamiskohteiden aikataulun mukaisesti.

Lisäksi turpeen liikuttelu kaivinkoneella aiheuttaa suon huokosveteen tilapäisen, joitakin vuosia kestävä ravinne- ja DOC-lisäyksen. Suurimpia huokosvesipitoisuuksia

on havaittu keskiravinteisilla ja ravinneköyllä kohteilla sekä tavanomaista kuivempina vuosina. Erityisen riskialttiita ovat myös kohteet, joilla vedenpinta on noussut turhan korkealle. Huokosveden kohonneet pitoisuudet eivät kuitenkaan vaikuta siirtyvän yhtä suurena valumaveteen.

6.5 Kaukokartoitus yleisesti

Soiden olosuhteet vaihtelevat niin luonnostaan kuin kuivatuksen ja ennallistamisen seurauksena suon eri osissa. Perinteisillä seurantamenetelmillä havainnot rajoittuvat suon yksittäisiin pisteisiin tai hoitoseuranta-reitin varrelle. Kaukokartoituksen avulla voidaan arvioida kattavammin vaihtelua suon eri osissa.

Kaukokartoituksessa käytettävä mittalaitte voi olla tavallinen valokuvakamera tai näkyvän valon ulkopuolisia aallonpituuksia tallentava multispektri-, hyperspektri- tai lämpökamera. Avoimilta soilta kohteen kolmiulotteisen mallin ja siitä tehtävän maanpintamallin voi tuottaa valokuvakartoituksen avulla, mutta laserkeilaus soveltuu paremmin puustoisille alueille. Lisäksi satelliiteissa käytetään mikroaaltotutkia.

Kaukokartoituksella voidaan tutkia suon hydrologiaa esim. pintakosteuden tai avoveden määrän ja spatiaalisen jakautumisen perusteella. Pintakosteutta voidaan arvioida mikroaaltotutkien tai spektristen aineistojen avulla. Vakaisissa olosuhteissa myös kasvillisuus kertoo suon vesiolosuhteista. Tarkan resoluution lämpökuvat voivat paljastaa kesällä ympäristöään kylmempiä pohjaveden purkautumiskohtia.

Kaukokartoitusta voidaan käyttää myös kasvillisuuden seurantaan, esimerkiksi kasviyhteisöjen ja funktionaalisten kasviryhmien havaitsemiseen tai primäärituotannon määrittämiseen. Kasvillisuuden ja märkyyden avulla voidaan arvioida myös kasvihuonekaasutaseita. Lisäksi kaukokartoituksen avulla voidaan tarkastella suon turpeen syvyyttä ja ominaisuuksia.

Ennallistamisen vaikutus osoitetaan ennen-jälkeen-aikasarjan avulla. Seurantatiheyden tulee olla riittävä ja ajankohdan vuodenvierossa harkittu, jotta vuosien välisen vaihtelun, ilmastonmuutoksen ja kasvukauden aikana muuttuvan kasvillisuuden vaikutukset saadaan otettua huomioon. Seurantatiheys tulee sovittaa myös seurattavan indikaattorin mukaan.

- **Suositus 12:** Kaukokartoitusseuranta toteutetaan sekä ennen ennallistamista että sen jälkeen, jotta ennallistamisen vaikutus voidaan osoittaa. Optimissa sekä ennen- että jälkeen-tilannetta seurataan useampi vuosi.

Ennallistamisen teknisen onnistumisen seurannassa (hoitoseurannassa) tieto vuotavista padoista tarvitaan viimeistään ennen tukkimista seuraavaa maastokautta. Vaikutavuusseurannassa hydrologiset vaikutukset alkavat näkyä jo ensimmäisten vuosien aikana, kun taas kasviyhteisöjen muutokset ja turpeen kertyminen näkyvät vasta vuosikymmenten mittaan.

- **Suositus 13:** Kaukokartoitus järjestetään ensisijaisesti kesän kuivimpana hetkenä heinä-elokuun vaihteessa ja toissijaisesti keväällä tulva-aikaan. Optimitalanteessa aineistoja kerätään läpi koko maastokauden ja useamman vuoden ajan.

Kaukokartoitus on epäsuora mittaustapa, joten aineistojen tuotannon yhteydessä tulisi kerätä verrokkiaineistoja maastotöiden avulla, jos kuvista halutaan tehdä systemaattisempia analyysejä kuin pelkkää visuaalista tulkintaa. Osa verrokkiaineistosta käytetään tuotetun mallin kalibrointiin ja osalla varmennetaan mallin toimivuus.

- **Suositus 14:** Aineistojen tuotannon yhteydessä kerätään maastosta geometrisiä (maatukipisteet) ja mitattavasta muuttujasta kertovia (esim. vedenkorkeus, maan pintakosteus tai kasvilajisto) tukiaineistoja.

Sisällyttämällä kaukokartoitustarkasteluihin myös luonnontilaisia kohteita voidaan selvittää menetelmien herkkyyks luonnolliselle vaihtelulle ja menetelmän virhelähtele. Suurimpia kaukokartoitusta häiritseviä tekijöitä suonpinnan tutkimisessa on puuston tiheä latvus. Luonnontilaisten kohteiden tulisi vastata ennallistamiskohteita ennen kaikkea avoimuudeltaan. Ojitetut verrokkit puolestaan ovat useimmiten liian puustoisia kuvausmenetelmille.

- **Suositus 15:** Kaukokartoitusseurannassa käytetään luonnontilaisia verrokkikohteita.

Maanmittauslaitos tuottaa Suomesta ilmakuvia kolmen vuoden välein ja laserkeilauksia kuuden vuoden välein. Lisäksi historiallisten ilmakuvien arkisto tarjoaa korvaamatonta tietoa soiden tilasta ennen ojituksia. Myös erilaisia satelliittiaineistoja on saatavilla avoimesti. Aineistot ovat ammattilaisten tuottamina laadukkaita.

Maanmittauslaitoksen aineistot palvelevat säännöllisinä mutta harvatoistoina erityisesti pitkän aikavälin vaikuttavuusseuranta. Satelliittien avulla voidaan saada ajallisesti tiheitäkin seuranta-aineistoja, jos pilvisuus ei estä näkyvyyttä. Nämä avoimet kaukokartoitusaineistot tulisi saada palvelemaan soiden ennallistamisen seuranta aiempaa paremmin. Näiden aineistojen järjestelmällisempää hyödyntämistä tulee edistää tulevilla tutkimushankkeissa.

- **Suositus 16:** Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen ja satelliittiaineistojen käyttöä hoitoseurannan tukena edistetään kouluttamalla suunnittelijoita niiden käyttämiseen. Lisäksi avoimien aineistojen hyödyntämistä tuetaan kehittämällä suunnittelijoiden tarpeisiin käyttöliittymä (mobiilisovellus), josta aineistoja on helppo tarkastella maastossa.

6.6 Drooniseuranta

Hankkeessa kokeiltu drooniseuranta on syytä ottaa pysyväksi osaksi soiden ennallistamisen työkalupalettia. Se ei kuitenkaan korvaa perinteistä hoito- tai vaikuttavuusseurantaan vaan täydentää sitä uudentyyppisellä, korkean resoluution spatiaalisella tiedolla suoneri osista. Hoitoseurantaan riittävät edulliset laitteet ja yksinkertaiset menetelmät, kun taas vaikuttavuusseuranta vaatii systemaattisempia menetelmiä ja tuotettujen aineistojen laadunvarmistuksesta huolehtimista.

Droonitoimintaa ohjataan EU-lainsäädännöllä. Minimivaatimuksia ovat ilmoittautuminen Traficomien ylläpitämään rekisteriin ja lentäjien suorittama verkkoteoriakoe. Näiden suorittamisen jälkeen drooneja saa lennättää jatkuvassa näköyhteydessä, kaukana ihmisistä, rakennuksista, lentokentistä ja muista rajoitusvyöhykkeistä, enintään 120 m:n korkeudessa maanpinnasta.

- **Suositus 17:** Droonitoimintaa koordinoi organisaatiossa vastuuhenkilö, joka hoitaa yhteydet Traficomiin ja ilmoittaa lentäjiä verkkoteoriakokeeseen sekä järjestää lentojen kirjauksen päiväkirjaan. Vastuuhenkilö myös ylläpitää osaamistaan lainsäädännöllisissä asioissa ja tarvittaaviin lupiin ja lisensseihin liittyen.

Drooneilla voidaan kuvata yksittäisiä valokuvia ja videoita tai systemaattisia kartoituslentoja, joiden avulla tuotetaan kohteesta noin 5–10 cm:n tarkkuusluokkaan yltäviä lopputuotteita kuten ortomosaiikkikuva ja pintamalli.

Kartoitustarkkuus riippuu ennen kaikkea georeferoinnin tarkkuudesta. Senttitarkkuuden aikaansaamiseksi RTK-tarkkuuspaikantimen pitää löytyä joko droonista itsestään tai sellaisella tulee mitata maatumkipisteiden koordinaatit. RTK-tekniikka vaatii jatkuvan mobiilidatayhteyden, kun taas syrjäisillä suokohteilla voidaan käyttää PPK-mittausta, jonka korjaukset suoritetaan jälkilaskentana.

Jos RTK-droonia ei käytetä, tukipisteitä tulee levittää 10–15 kpl tasaisesti ympäri kartoitettavaa aluetta, mikä tekee menetelmää työläämmän. Mittaustarvetta voidaan vähentää rakentamalla kiinteitä, mineraalimaan perustettuja tukipisteitä, joiden sijaintia ei tarvitse tarkistaa yhtä usein.

- **Suositus 18:** Kun aineistoilla halutaan tehdä visuaalista vertailua systemaattisempia analyysyjä, aineistot kartoitetaan RTK- tai PPK-droonilla. Aineistoja voidaan tuottaa myös muulla kartoitukseen valmistetulla droonilla, mutta tällöin tulee käyttää riittävää määrää maatumkipisteitä.

Kartoitukseen käytettävän droonimallin tulee myös olla siihen suunniteltu. Halvimmat mallit ovat käyttökelpoisia hoitoseurannan tueksi, mutta kalliimmilla on mahdollista tuottaa systemaattisempiin tarkasteluihin paremmin soveltuvia, tarkempia ja monipuolisempia aineistoja.

Suunnittelijoilla on kiinnostusta opetella käyttämään työalueelta toiselle kierrätettäviä, kehittyneempiä laitteistoja, mutta menetelmiin liittyvien verrokkiaineistojen keräys koettiin turhan työlääksi. Hoitoseuranta varten kartoitusaineistot on mahdollista käsitellä pitkälle automatisoiduilla työkaluilla esim. pilvipalvelussa, mutta systemaattisemmän seurannan osalta prosessointi vaatii myös syvällisempää perehtymistä. Metsähallituksen organisaatiossa myös suurien aineistojen tallennus ja jakaminen sekä ohjelmistolisensseihin liittyvät kysymykset ovat vielä ratkaisematta.

- **Suositus 19:** Yksittäisten kuvien ja videoiden ottamiseen sekä visuaalisiin tarkasteluihin tarkoitettujen näkyvän valon kartoitusten toteuttamiseen hankitaan perustason drooneja kaikkien halukkaiden suunnittelijoiden saataville. Näiden kartoitusaineistojen käsittelyyn hankitaan lisenssi kaupalliseen pilvipalveluun sekä kehitetään tähän liittyvä toimintaprotokolla.

- **Suositus 20:** Kehittyneemmät laitteet ja menetelmät keskitetään niihin perehtyneille erikoisosajille, joiden työaika pääasiassa koostuu tämän kaluston käyttämisestä ja tuotettavien aineistojen käsittelystä.
- **Suositus 21:** Droonikuvauksesta ja aineiston käsittelystä sekä tulkinnasta järjestetään koulutuksia ja työpajoja, joissa alennetaan kynnystä uuden tekniikan opetteluun ja vaihdetaan kokemuksia muiden kanssa.

Kun drooniaineistoja käytetään systemaattisiin analyysiin, tulee niiden tuottajan olla perehtynyt menetelmien ja aineistojen laatu-kriteereihin. Kaikkia kartoitusaineistoja koskee vaatimus geometrisestä tarkkuudesta. Spektraalisilla aineistoilla tulee lisäksi huolehtia radiometrisestä kalibroinnista.

Droonien käyttöön liittyy monenlaisia teknisiä haasteita. Lentäjäksi soveltuvat siis parhaiten henkilöt, joille teknisten laitteiden käsittely ja ongelmanratkonta tuntuvat lähtökohtaisesti mukavalta.

Laitteiston käyttämiseen tulisi varata riittävästi aikaa. Toisaalta vaihtuvat säät estävät täyden suunnitelmallisuuden, minkä vuoksi aikatauluissa täytyy olla pelivaraa. Erityisesti tämä on olennaista systemaattiseen seurantaan kerättävien aineistojen kanssa, jolloin riittävän tuulettomuuden ja sateettomuuden lisäksi kuvauspäiviä optimoidaan vallitsevien valaistusolosuhteiden perusteella.

Maastossa kuluvan ajan lisäksi työaika tulee varata laitteiden testaamiseen ennakkoon, kuvaustiedon siirtoon, aineistojen käsittelyyn ja tuloksiin perehtymiseen. Tulokuvien tarkasteluun tulee perehdyttää myös sellaisia suunnittelijoita, joiden kohteilla joku muu käy suorittamassa lennot.

Laitteiden yhteiskäyttö luo omat haasteensa niiden ylläpidolle. Toimipaikoittain kannattaa nimetä vastuuhenkilö, joka huolehtii laitteiden asianmukaisesta säilytyksestä, teknisten ongelmien selvittämisestä sekä huollon ja

varaosien järjestämisestä. Laitteita haettaessa tai palautettaessa vastuuhenkilön on syytä vaihtaa kuulumiset laitteiden toiminnasta, jotta ongelmatilanteet eivät tule yllätyksenä seuraavalle käyttäjälle.

- **Suositus 22:** Laitteistoille nimetään perehtynyt vastuuhenkilö toimipaikoittain.

Droonikuvaukset soveltuvat parhaiten avoimien ja märkien soiden seurantaan. Puustoisemmilla kohteilla ojanvierustojen maanpinta voidaan usein kuvata niiden raivauksen jälkeen. Kuvattavana voivat olla yksittäiset mielenkiinnon kohteet (padot, ojalinjat) tai kartoitustapauksissa alueet, joissa ennallistamisen odotetaan aiheuttavan isoja muutoksia.

- **Suositus 23:** Droonitoiminta keskitetään avoimien ja puoliavoimien soiden seurantaan alueille, joissa muutosten ennakoidaan olevan merkittäviä.

Droonikuvausten etuja perinteiseen hoitoseurantaan verrattuna ovat mahdollisuudet hahmottaa suhteellisen laajojakin alueita nopeasti ja mahdollisuus tutkia kohdetta toimistolla kaikessa rauhassa. Ennen-tilanteessa drooniaineistoista nähdään ojien syvyudet ja käytettävissä olevan täyttömaan määrä.

Droonikuvauksella saadaan dokumentoitua toimenpiteiden onnistuminen: ojien täyttö, veden liikkuminen ja leviäminen suon pinnalla ja patojen pitäminen. Lisäksi kuviin tallentuvat täyttömaiden kaivuukuopat ja työkoneiden jäljet. Kuvista voi löytää asioita, joita maastokäynti ei paljastaisi. Toisaalta maastossa voi joutua käymään, jotta oppii lukemaan tapahtuneita muutoksia kuvilta oikein.

Kuvattujen näkyvän valon aineistojen sekä multispektri- ja lämpöaineistojen osoitettiin kertovan muutoksista suon kosteudessa. Näille aineistoille soveltuviin menetelmiin ei hankkeen aikana kuitenkaan ehditty perehtyä syvällisesti. Menetelmätestausta on syytä jatkaa hankkeessa kerätyillä aineistoilla sekä kerätä aineistoa uusilta kohteilta.

- **Suositus 24:** Droonien ja muilta alustoilta tuotettujen kaukokartoitusmenetelmien kokeilua jatketaan tulevissa hankkeissa. Menetelmiä kehitetään siten, että niitä voidaan ottaa järjestelmällisemmin käyttöön hoitoseurantojen ja vaikuttavuusseurannan tueksi.

Topohydrologisen analyysin perusteella pystyttiin ensimmäistä kertaa osoittamaan ojien tukkimisesta johtuvan suon märkyyden muutoksen suuruusluokka suon eri osissa.

Drooniaineistojen analyysit kertovat märkyyden spatiaalisesta jakautumisesta tavalla, jota ei ole ollut aiemmillä menetelmillä mahdollista saavuttaa. Tulokset osoittivat alueet, joille rakennetut padot ja pintavallit eivät riittäneet levittämään vettä.

Kehitettyä topografista menetelmää voitaisiin käyttää jo ennallistamisen suunnitteluvaiheessa simuloimaan patojen riittävät pituudet ja korkeudet, joilla vesi saadaan suon pinnan korkeusvaihtelu huomioiden leviämään myös ojien välisille alueille.

- **Suositus 25:** Topohydrologista menetelmää kehitetään edelleen ennallistamisen suunnittelun ja vaikutusalueen määrittämisen tarpeisiin.

Hydrologia-LIFE-hankkeessa drooniaineistojen aikasarjat ylsivät pisimmillään vain parin vuoden päähän ennallistamisesta. Tässäkin ajassa hydrologian palautumista onnistuttiin osoittamaan, mutta kehitys tulee jatkumaan ja myöhemmin se vaikuttaa myös kasvillisuuden palautumiseen. Muutokset kasvillisuudessa saattavat jatkua vuosikymmeniä.

- **Suositus 26:** Hankkeessa perustettujen droonikuvausten aikasarjoja jatketaan systemaattisesti esim. 5 vuoden välein. Tulokset tallennetaan ja hyödynnetään ennallistamismenetelmien ja ennallistamisen seurannan kehitystyössä.

Droonit osoittivat hankkeessa käyttökelpoisuutensa soiden seurannassa. Seurannan lisäksi drooneja voi käyttää myös ennallistamisen suunnitteluun ja toteuttamiseen sekä viestinnällisiin tarkoituksiin.

- **Suositus 27:** Droonit otetaan osaksi hoitoseurantaa. Vaikuttavuusseurannan osalta droonien käyttöä edistetään suunnittelemalla niille luonteva rooli osana suoseurantaverkostoa tai erikseen hanke pohjaisena tutkimustoimintana.

Kiitokset

Haluamme kiittää Santtu Karekselaa, Jari Ilmosta ja Aleksi Räsästä raportin kommentoinnista, Maria Tiusasta ja Siiri Söyrinkiä raportin julkaisemisen edistämisestä sekä Pasi Korpelaista kuva-aineistoista. Lisäksi kiitokset

kuuluvat Koneen Säätiölle, joka mahdollisti raportin viimeistelyn osana hanketta "From data to implementation – enhancing the interphase of science and practice".

Lähteet

- Aapala, K., Similä, M. & Penttinen, J. 2013: Ojittettujen soiden ennallistamisopas. – Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 188. <julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojittettujen-soiden-ennallistamisopas>. 301 s.
- Adam, E., Mutanga, O. & Rugege, D. 2010: Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review. – *Wetlands Ecology and Management* 18 (3): 281–296. <doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>.
- Ball, J., Gimona, A., Cowie, N., Hancock, M., Klein, D., Donaldson-Selby G. & Artz, R. R. E. 2023: Assessing the potential of using Sentinel-1 and 2 or high-resolution aerial imagery data with machine learning and data science techniques to model peatland restoration progress – a Northern Scotland case study. – *International Journal of Remote Sensing* 44 (9): 2885–2911. <doi.org/10.1080/01431161.2023.2209916>.
- Beyer, F., Jurasinski, G., Couwenberg J. & Grenzdörffer, G. 2019: Multisensor data to derive peatland vegetation communities using a fixed-wing unmanned aerial vehicle. – *International Journal of Remote Sensing* 40 (24): 9103–9125. <doi.org/10.1080/01431161.2019.1580825>.
- Burdun, I., Bechtold, M., Sagris, V., Komisarenko, V., De Lannoy, G. & Mander, Ü. 2020: A comparison of three trapezoid models using optical and thermal satellite imagery for water table depth monitoring in Estonian bogs. – *Remote Sensing* 12 (12): 1980. <doi.org/10.3390/rs12121980>.
- , Bechtold, M., Aurela, M., De Lannoy, G., Desai, A. R., Humphreys, E., Kareksela, S., Komisarenko, V., Liimatainen, M., Marttila, H., Minkkinen, K., Nilsson, M. B., Ojanen, P., Salko, S.-S., Tuittila, E.-S., Uuemaa, E. & Rautiainen, M. 2023: Hidden becomes clear: Optical remote sensing of vegetation reveals water table dynamics in northern peatlands. – *Remote Sensing of Environment* 296: 113736. <doi.org/10.1016/j.rse.2023.113736>.
- Cole, B., McMorrow, J. & Evans, M. 2014: Spectral monitoring of moorland plant phenology to identify a temporal window for hyperspectral remote sensing of peatland. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 90: 49–58. <doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2014.01.010>.
- Deliry, S. I. & Avdan, U. 2021: Accuracy of Unmanned Aerial Systems photogrammetry and structure from motion in surveying and mapping: A review. – *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 49. <doi.org/10.1007/s12524-021-01366-x>.
- Dronova, I., Kislik, C., Dinh, Z. & Kelly, M. 2021: A Review of unoccupied aerial vehicle use in wetland applications: Emerging opportunities in approach, technology, and data. – *Drones* 5(2): 45. <dx.doi.org/10.3390/drones5020045>.
- Euroopan unioni 2019: Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. – European Commission, <data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj>.
- 2020: Biodiversity strategy for 2030 – Bringing nature back into our lives. – European Commission, <ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_906>. 2 s.

- FAO 2020: Peatlands mapping and monitoring – Recommendations and technical overview. – Food and Agriculture Organization of the United Nations. <doi.org/10.4060/ca8200en> 82 s.
- Forlani, G., Dall’Asta, E., Diotri, F., Cella, U. M. di, Roncella, R. & Santise, M. 2018: Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. – *Remote Sensing* 10 (2): 311. <dx.doi.org/10.3390/rs10020311>.
- Geologian tutkimuskeskus 2023: Maankamara. – Geologian tutkimuskeskus. <gtkdata.gtk.fi/maankamara>.
- González, E., Rochefort, L., Boudreau, S., Hugron, S. & Poulin, M. 2013: Can indicator species predict restoration outcomes early in the monitoring process? A case study with peatlands. – *Ecological indicators*, 32: 232–238. <doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.019>.
- Haapalehto, T. O., Vasander, H., Jauhiainen, S., Tahvanainen, T. & Kotiaho, J. S. 2011: The effects of peatland restoration on water-table depth, elemental concentrations, and vegetation: 10 years of changes. – *Restoration Ecology* 19: 587–598. <doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00704.x>.
- , Kotiaho, J. S., Matilainen, R. & Tahvanainen, T. 2014: The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands. – *Journal of Hydrology* 519: 1493–1505. <doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.013>.
- , 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.org/10.1002/ece3.3243>.
- Halabisky, M., Babcock, C. & Moskal, L. 2018: Harnessing the temporal dimension to improve object-based image analysis classification of wetlands. – *Remote Sensing* 10 (9): 1467. <dx.doi.org/10.3390/rs10091467>.
- Harris, A., Charnock, R. & Lucas, R. 2015: Hyperspectral remote sensing of peatland floristic gradients. – *Remote Sensing of Environment* 162: 99–111. <doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.029>.
- Hasan, A., Pilesjö, P. & Persson, A. 2012: On generating digital elevation models from lidar data – resolution versus accuracy and topographic wetness index indices in northern peatlands. – *Geodesy and Cartography* 38 (2): 57–69. <doi.org/10.3846/20296991.2012.702983>.
- Heikkilä H., Lindholm T. & Jaakkola S. 2002: Soiden ennallistamisopas. – Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 66. <julkaisut.metsa.fi/julkaisu/soiden-ennallistamisopas>. 123 s.
- Holden, J., Wallage, Z. E., Lane, S. N. & McDonald, A. T. 2011: Water table dynamics in undisturbed, drained and restored blanket peat. – *Journal of Hydrology* 402 (1–2): 103–114. <doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.010>.
- Howie, S. A. & Hebda, R. J. 2018: Bog surface oscillation (mire breathing): A useful measure in raised bog restoration. – *Hydrological Processes* 32 (11): 1518–1530. <doi.org/10.1002/hyp.11622>.
- Hyvärinen, E. & Aapala, K. 2009: Metsien ja soiden ennallistamisen sekä harjumetsien paahdeympäristöjen hoidon seurantaohje. – Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 118. <julkaisut.metsa.fi/julkaisu/metsien-ja-soiden-ennallistamisen-seka-harjumetsien-paahdeymparistojen-hoidon-seurantaohje>. 114 s.
- Ikkala, L., Ronkanen, A.-K., Ilmonen, J., Similä, M., Rehell, S., Kumpula, T., Päckilä, L., Klöve, B. & Marttila, H. 2022: Unmanned Aircraft System (UAS) Structure-from-Motion (SfM) for monitoring the changed Flow paths and wetness in minerotrophic peatland restoration. – *Remote Sensing* 2022, 14, 3169. S. 1–7. <doi.org/10.3390/rs14133169>.

- , Ismail, Wolff, F., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Alekseychik, P., Rana, P., Tolvanen, A., Tor-abi Haghighi, A., Kohv, M., Osborne, C., Tahvanainen, T., Ilmonen, J., Haapalehto, T., Kløve, B., Kumpula, T. & Räsänen, A. 2023: Remote sensing methods for northern peatland restoration monitoring – A literature review. – Käsikirjoitus lähetty julkaistavaksi.
- 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. <[sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938523001416](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.012)>.
- Isokangas, E., Davids, C., Kujala, K., Rauha, A., Ronkanen, A.-K. & Rossi, P. M. 2019: Combining unmanned aerial vehicle-based remote sensing and stable water isotope analysis to monitor treatment peatlands of mining areas. – Ecological Engineering 133: 137–147. <doi.org/10.1016/j.ecoeng.2019.04.024>.
- James, M. R., Robson, S. & Smith, M. W. 2017: 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. – Earth Surface Processes and Landforms 42 (12): 1769–1788. <doi.org/10.1002/esp.4125>.
- Jeziorska, J. 2019: UAS for wetland mapping and hydrological modeling. – Remote Sensing 11(17): 1997. <doi.org/10.3390/rs11171997>.
- Kalacska, M., Arroyo-Mora, J., de Gea, J., Snirer, E., Herzog, C. & Moore, T. 2013: Videographic analysis of *Eriophorum vaginatum* spatial coverage in an ombrotrophic bog. – Remote Sensing 5 (12): 6501–6512. MDPI AG. <dx.doi.org/10.3390/rs5126501>.
- , Lalonde, M. & Moore, T. 2015: Estimation of foliar chlorophyll and nitrogen content in an ombrotrophic bog from hyperspectral data: Scaling from leaf to image. – Remote Sensing of Environment 169: 270–279. <doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.012>.
- , Arroyo-Mora, J., Soffer, R., Roulet, N., Moore, T., Humphreys, E., Leblanc, G., Lucanus, O. & Inamdar, D. 2018: Estimating peatland water table depth and net ecosystem exchange: A comparison between satellite and airborne Imagery. – Remote Sensing 10 (5): 687. <doi.org/10.3390/rs10050687>.
- Kapsi 2023: Maanmittauslaitoksen avointen kartta-aineistojen lataus. – Kapsi ry. <karttat.kapsi.fi>.
- Kareksela, S., Ojanen, P., Aapala, K., Haapalehto, T., Ilmonen, J., Koskinen, M., Laiho, R., Laine, A., Liisa, M., Marttila, H., Minkkinen, K., Nieminen, M., Ronkanen, A.-K., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Tolvanen, A., Tuittila, E.-S. & Vasander, H. 2021: Soiden ennallistamisen suoluonto-, vesistö- ja ilmastovaikutukset. – Suomen Luontopaneelin julkaisu 3b. <doi.org/10.17011/jyx/SLJ/2021/3b> 108 s.
- Kemppinen, J., Niittynen, P., Riihimäki, H. & Luoto, M. 2017: Modelling soil moisture in a high-latitude landscape using LiDAR and soil data. – Earth Surface Processes and Landforms 43: 1019–1031. <doi.org/10.1002/esp.4301>.
- Klemas, V. 2013: Using remote sensing to select and monitor wetland restoration sites: An overview. – Journal of Coastal Research 289 (4): 958–970. <doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00170.1>.
- Korpela, I., Haapanen, R., Korrensalo, A., Tuittila, E.-S. & Vesala, T. 2020: Fine-resolution mapping of microforms of a boreal bog using aerial images and waveform-recording LiDAR. – Mires and Peat 26. <doi.org/10.19189/MaP.2018.OMB.388>.

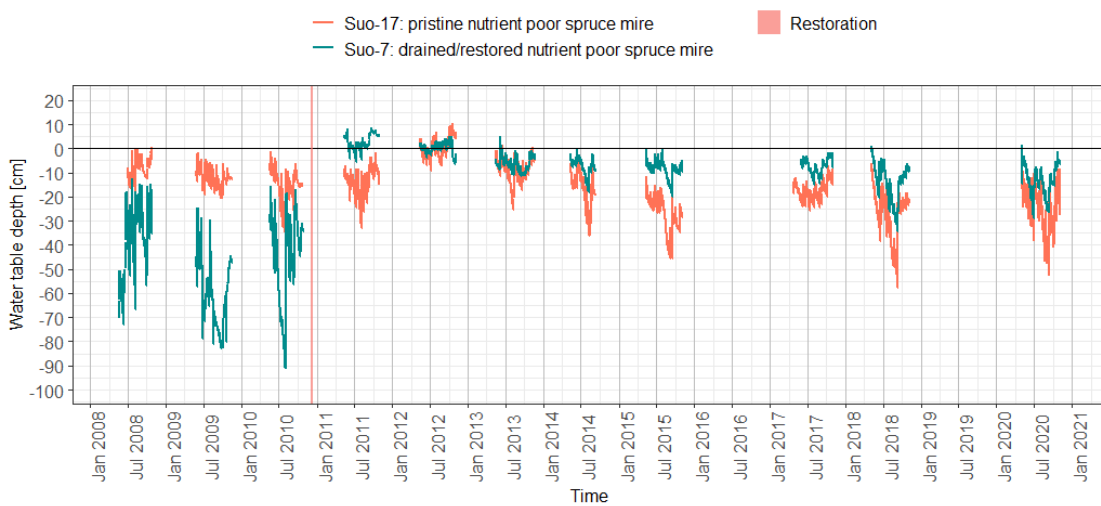
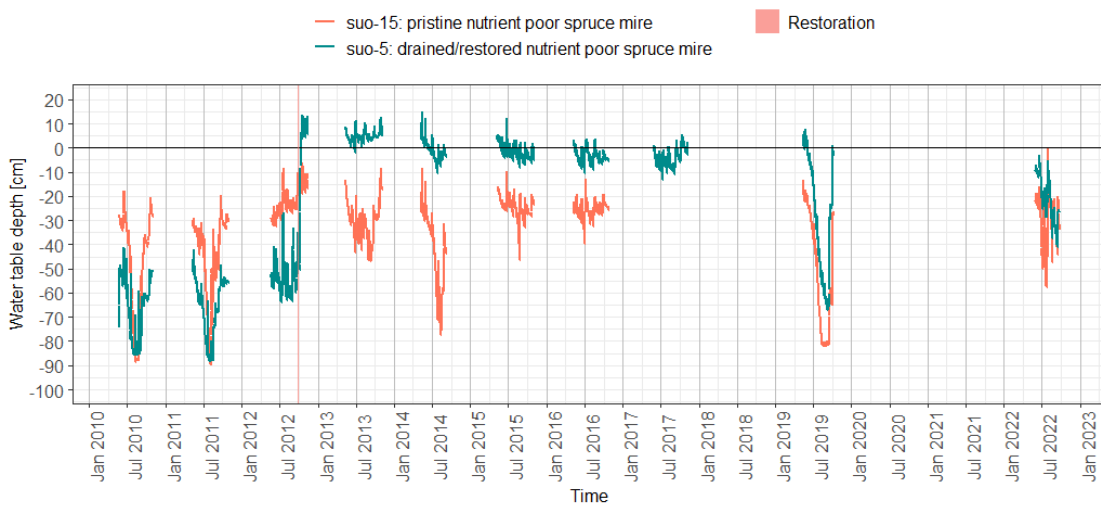
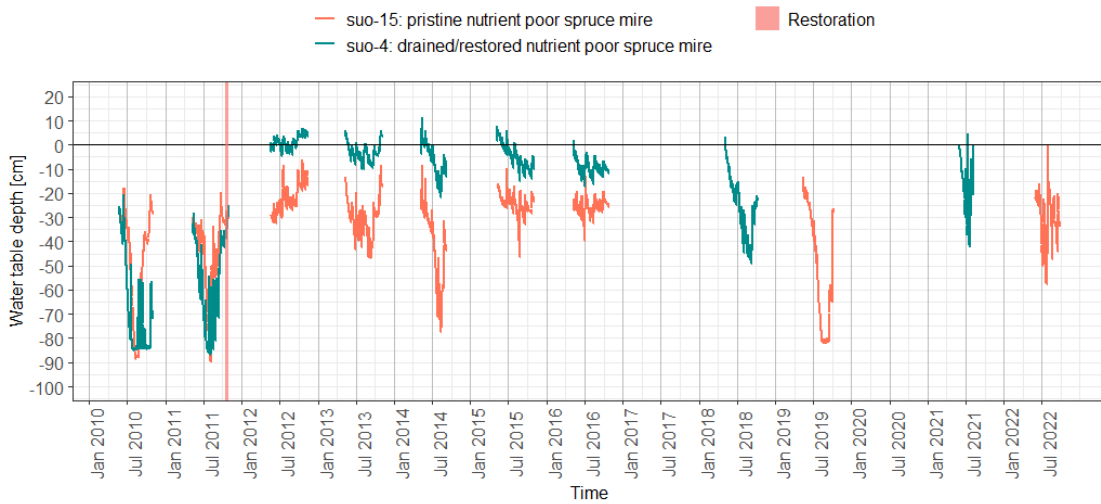
- Korrensalo, A., Mehtätalo, L., Alekseychik, P., Uljas, S., Mammarella, I., Vesala, T. & Tuittila, E.-S. 2020: Varying vegetation composition, respiration and photosynthesis decrease temporal variability of the CO₂ sink in a boreal bog. – *Ecosystems* 23(4): 842–858. <doi.org/10.1007/s10021-019-00434-1>.
- Koskinen, M., Tahvanainen, T., Sarkkola, S., Menberu, M. W., Laurén, A., Sallantausta, T., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Parviainen, M., Tolvanen, A., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2017: Restoration of nutrient-rich forestry-drained peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus. – *Science of the Total Environment* 586: 858–869. <doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.065>.
- Kutilainen, M. 2023: Vanhatkartat.fi. – Shingle. <vanhatkartat.fi>.
- Laine, A. M., Tolvanen, A., Mehtätalo, L. & Tuittila, E.-S. 2016: Vegetation structure and photosynthesis respond rapidly to restoration in young coastal fens. – *Ecology and Evolution* 6: 6880–6891. <doi.org/10.1002/ece3.2348>.
- Lees, K. J., Quaife, T., Artz, R. R. E., Khomik, M. & Clark, J. M. 2018: Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review. – *Science of the Total Environment* 615: 857–874. <doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.103>.
- , Lees, K. J., Artz, R. R. E., Khomik, M., Clark, J. M., Ritson, J., Hancock, M. H., Cowie, N. R. & Quaife, T. 2020: Using spectral indices to estimate water content and GPP in sphagnum moss and other peatland vegetation. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 58 (7): 4547–4557. <doi.org/10.1109/TGRS.2019.2961479>.
- Leifeld, J. & Menichetti, L. 2018: The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. – *Nature Communications* 9(1): 1–7. <doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>.
- Lovitt, J., Rahman, M. & McDermid, G. 2017: Assessing the value of UAV photogrammetry for characterizing terrain in complex peatlands. – *Remote Sensing* 9 (7): 715. <doi.org/10.3390/rs9070715>.
- Maanmittauslaitos 2023a: Karttapaikan tiedostopalvelu. – Maanmittauslaitos. <asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/tiedostopalvelu>.
- 2023b: Paikkatietoikkuna. – Maanmittauslaitos. <kartta.paikkatietoikkuna.fi>.
- McMorrow, J. M., Cutler, M. E. J., Evans, M. G. & Al-Roichdi, A. 2004: Hyperspectral indices for characterizing upland peat composition – *International Journal of Remote Sensing* 25 (2): 313–325. <doi.org/10.1080/0143116031000117065>.
- Meingast, K. M., Falkowski, M. J., Kane, E. S., Potvin, L. R., Benscoter, B. W., Smith, A. M. S., Bourgeau-Chavez, L. L. & Miller, M. E. 2014: Spectral detection of near-surface moisture content and water-table position in northern peatland ecosystems. – *Remote Sensing of Environment* 152: 536–546. <doi.org/10.1016/J.RSE.2014.07.014>.
- 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: 3742–3760. <doi.org/10.1002/2015WR018578>.
- Menberu, M. W., Marttila, H., Tahvanainen, T., Kotiaho, J. S., Hokkanen, R., Kløve, B. & Ronkanen, A.-K. 2017: Changes in pore water quality after peatland restoration: Assessment of a large-scale, replicated Before-After-Control-Impact study in Finland. – *Water Resources Research* 53: 8327–8343. <doi.org/10.1002/2017WR020630>.

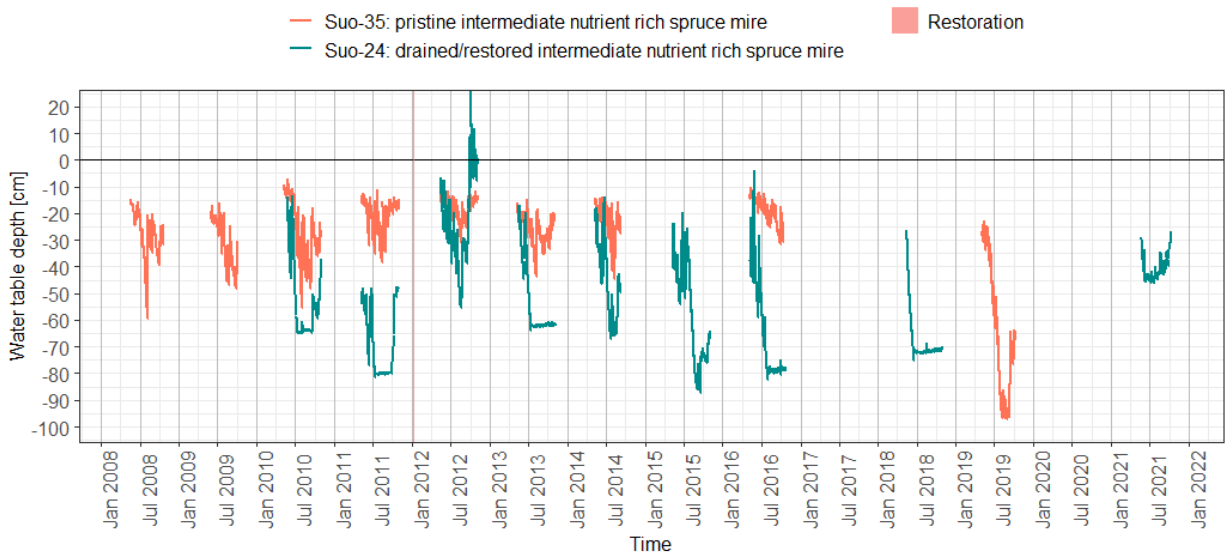
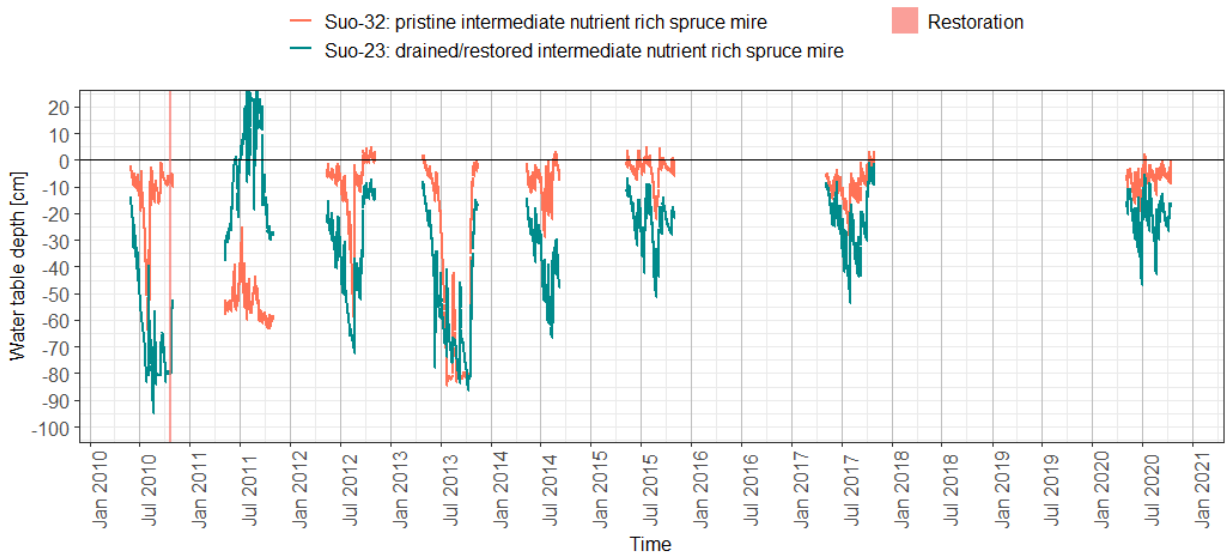
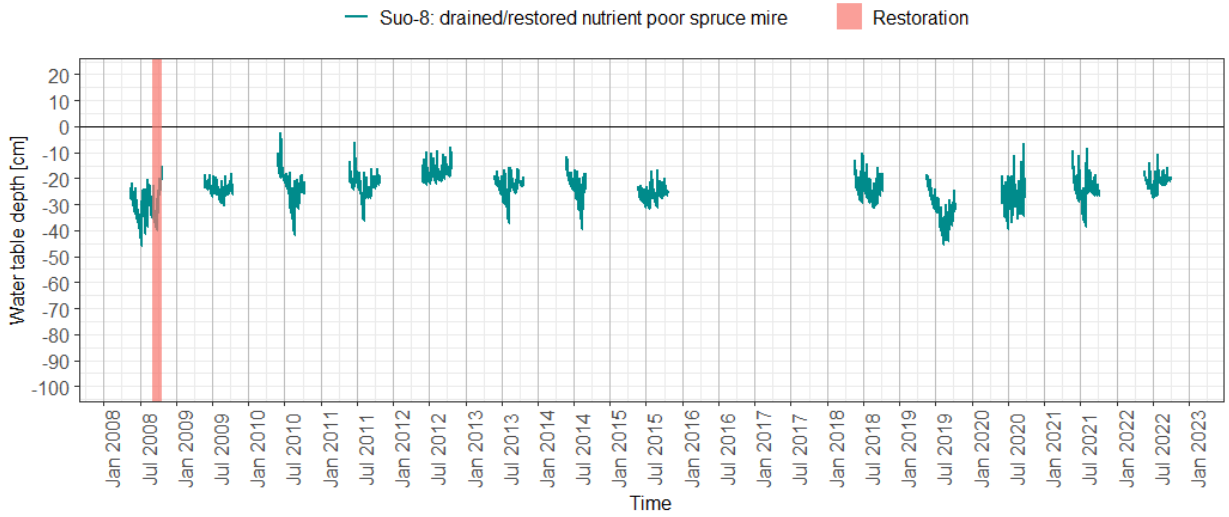
- Minasny, B., Berglund, Ö., Connolly, J., Hedley, C., de Vries, F., Gimona, A., Kempen, B., Kidd, D., Lilja, H., Malone, B., McBratney, A., Roudier, P., O'Rourke, S., Rudiyanto, Padarian, J., Poggio, L., ten Caten, A., Thompson, D., Tuve, C., & Widyatmanti, W. 2019: Digital mapping of peatlands – A critical review. – *Earth-Science Reviews* 196: 102870. Elsevier B.V. <doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.014>.
- Nesbit, P. & Hugenholtz, C. 2019: Enhancing UAV–SfM 3D model accuracy in high-relief landscapes by incorporating oblique images. – *Remote Sensing* 11 (3): 239. <dx.doi.org/10.3390/rs11030239>.
- Niemi, M., Vastaranta, M., Peuhkurinen, J. & Holopainen, M. 2015: Forest inventory attribute prediction using airborne laser scanning in low-productive forestry-drained boreal peatlands. – *Silva Fennica* 49 (2) article id 1218. <doi.org/10.14214/sf.1218>.
- Page, S. E. & Baird, A. J. 2016: Peatlands and global change: Response and resilience. – *Annual Review of Environment and Resources* 41(1): 35–57. <doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085520>.
- Pastucha, E., Puniach, E., Gruszczyński, W., Ćwiakata, P., Matwij, W. & Midtiby, H. S. 2022: Relative Radiometric Normalisation of Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry-based RGB Orthomosaics. – *The Photogrammetric Rec* 37: 228–247. <doi.org/10.1111/phor.12413>.
- Päivinen, J. & Aapala, K. 2007: Metsien ja soiden ennallistamisen seurantaohje. – *Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B* 83. <julkaisut.metsa.fi/julkaisu/metsien-ja-soiden-ennallistamisen-seurantaohje>. 100 s.
- Päkkilä, L., Marttila, H., Ikkala, L., Korhonen, P., Kareksela, S. & Ronkanen, A.-K. 2023a: Long-term effects of restoration on peatland water table and pore water quality. – *Käsikirjoitus*.
- , Marttila H., Ikkala, L., Korhonen P., Kareksela S., Tahvanainen T., Menberu M. W., Irannezhad M. & Ronkanen A.-K. 2023b: Pore and runoff water quality correlations in restored and pristine boreal peatlands. – *Käsikirjoitus*.
- , Marttila, H., Korhonen, P., Kareksela S. & Ronkanen, A.-K. 2023c: Impact of peatland characteristics and soil pathways on water quality and greenhouse gases. – *Käsikirjoitus*.
- Rahman, M. M., McDermid, G. J., Strack, M. & Lovitt, J. 2017: A new method to map groundwater table in peatlands using Unmanned Aerial Vehicles. – *Remote Sensing* 9 (10): 1057. <dx.doi.org/10.3390/rs9101057>.
- Reif, M. K. & Theel, H. J. 2016: Remote sensing for restoration ecology: Application for restoring degraded, damaged, transformed, or destroyed ecosystems. – *Integrated Environmental Assessment and Management* 13 (4): 614–630. <doi.org/10.1002/ieam.1847>.
- Richardson, M. C., Mitchell, C. P. J., Branfireun, B. A. & Kolka, R. K. 2010: Analysis of airborne Li-DAR surveys to quantify the characteristic morphologies of northern forested wetlands. – *Journal of Geophysical Research* 115 (G3): 03005, 115 (G3): 1–16. <doi.org/10.1029/2009JG000972>.
- Räsänen, A. & Virtanen, T. 2019: Data and resolution requirements in mapping vegetation in spatially heterogeneous landscapes. – *Remote Sensing of Environment* 230: 111207. <doi.org/10.1016/j.RSE.2019.05.026>.
- , 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: 457–471. <doi.org/10.1002/rse2.140>.

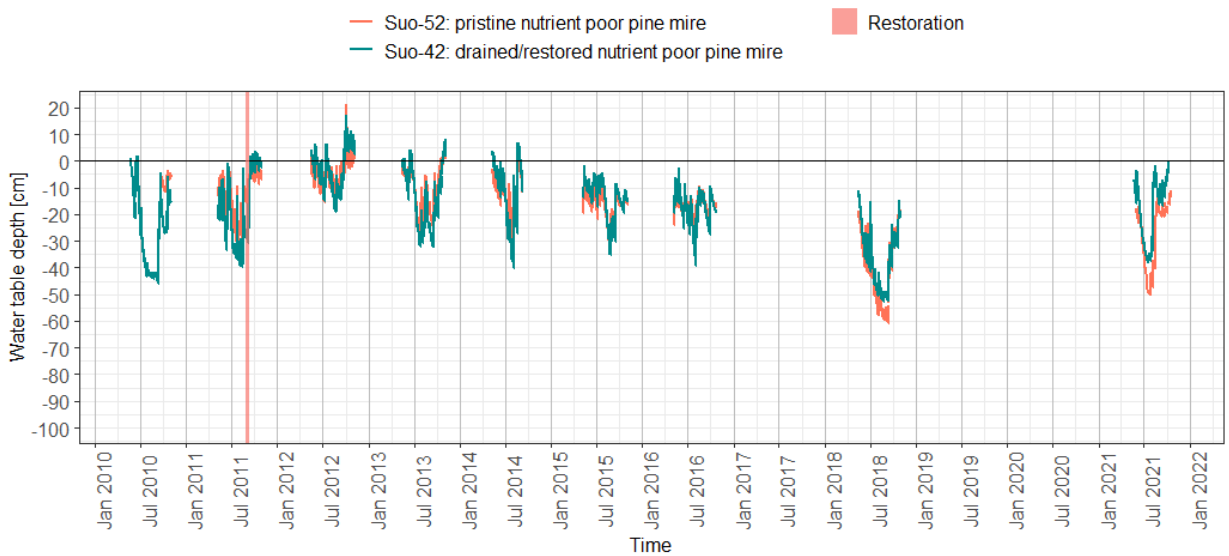
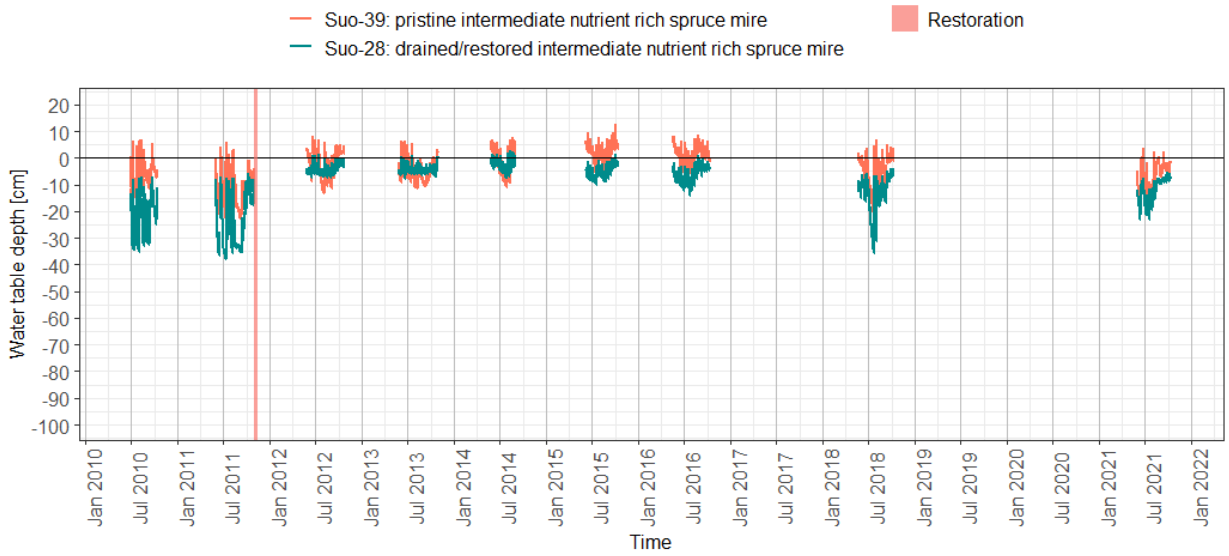
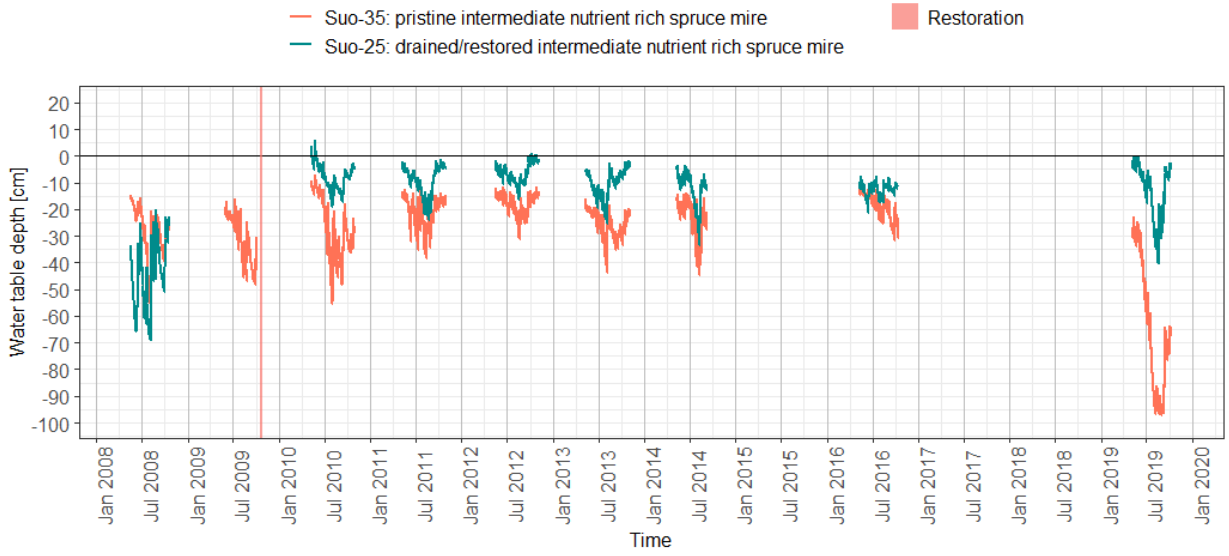
- , Tolvanen, A. & Kareksela, S. 2022: Monitoring peatland water table depth with optical and radar satellite imagery. – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112: 102866. <doi.org/10.1016/J.JAG.2022.102866>.
- , Isoaho, A., Ikkala, L., Hautala, R., Bigler, O., Keränen, K., Ahonen, S. & Kareksela, S. 2023: Ennallistettujen soiden tilan seuranta: Kokemuksia vesienpalautuksen seurannasta ja kaukokartoitusmenetelmistä. – Luonnonvarakeskus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 112/2023. <urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-833-1>. 57 s.
- Sallantaus, T. 2014: The impacts of peatland restoration on water quality. – Teoksessa: Similä, M., Aapala, K., & Penttinen, J., Ecological restoration in drained peatlands – best practices from Finland. – Metsähallitus, Natural Heritage Services, Vantaa. <julkaisut.metsa.fi/wp-content/uploads/sites/2/2021/02/ecolres-peatlands-1.pdf> 191 s.
- Schmugge, T. J., Kustas, W. P., Ritchie, J. C., Jackson, T. J. & Rango, A. 2002: Remote sensing in hydrology. – *Advances in Water Resources* 25 (8–12): 1367–1385. <[doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00065-9)>.
- Stott, E., Williams, R. D. & Hoey, T. B. 2020: Ground control point distribution for accurate kilometre-scale topographic mapping using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM photogrammetry. – *Drones* 4 (3): 55. <doi.org/10.3390/drones4030055>.
- Suomen luonnonsuojeluliitto 2023: Mitä me teemme – Rahkasammalen paluu. – Suomen luonnonsuojeluliitto. <sll.fi/mita-me-teemme/suot/nain-toimimme/soiden-ennallistaminen/rahkasammalen-paluu>.
- Suding, K. N. 2011: Toward an era of restoration in ecology: Successes, failures, and opportunities ahead. – *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 42: 465–487. <doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145115>.
- Tolvanen, A. 2011: Ennallistamisen monimuotoinen terminologia. – Teoksessa: Similä, M. & Junninen, K. (toim.), Metsien ennallistamisen ja luonnonhoidon opas. – Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 157. <julkaisut.metsa.fi/wp-content/uploads/sites/2/2014/09/b157.pdf>. S. 18.
- White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T. & Tompalski P. 2016: Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. – *Canadian Journal of Remote Sensing* 42 (5): 619–641. <doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>.
- Zhang, X., Zhang, F., Qi, Y., Deng, L., Wang, X. & Yang, S. 2019: New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV). – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 78: 215–226. <doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.001>.
- Zhang, H., Tuittila, E.-S., Korrensalo, A., Räsänen, A., Virtanen, T., Aurela, M., Penttilä, T., Laurila, T., Gerin, S., Lindholm, V. & Lohila, A. 2020: Water flow controls the spatial variability of methane emissions in a northern valley fen ecosystem. – *Biogeosciences* 17(23): 6247–6270. <doi.org/10.5194/bg-17-6247-2020>.

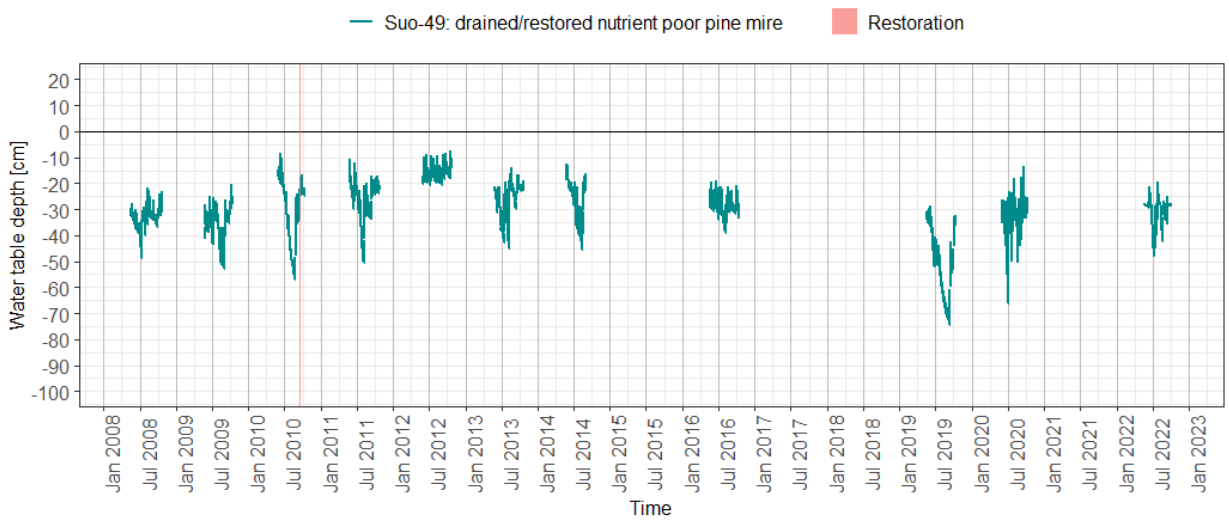
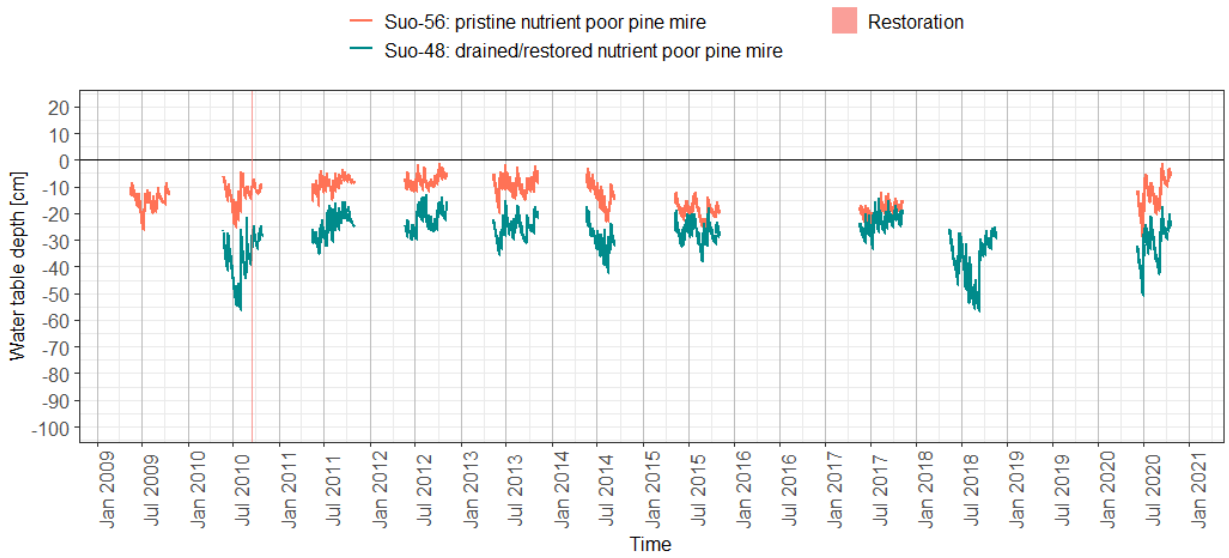
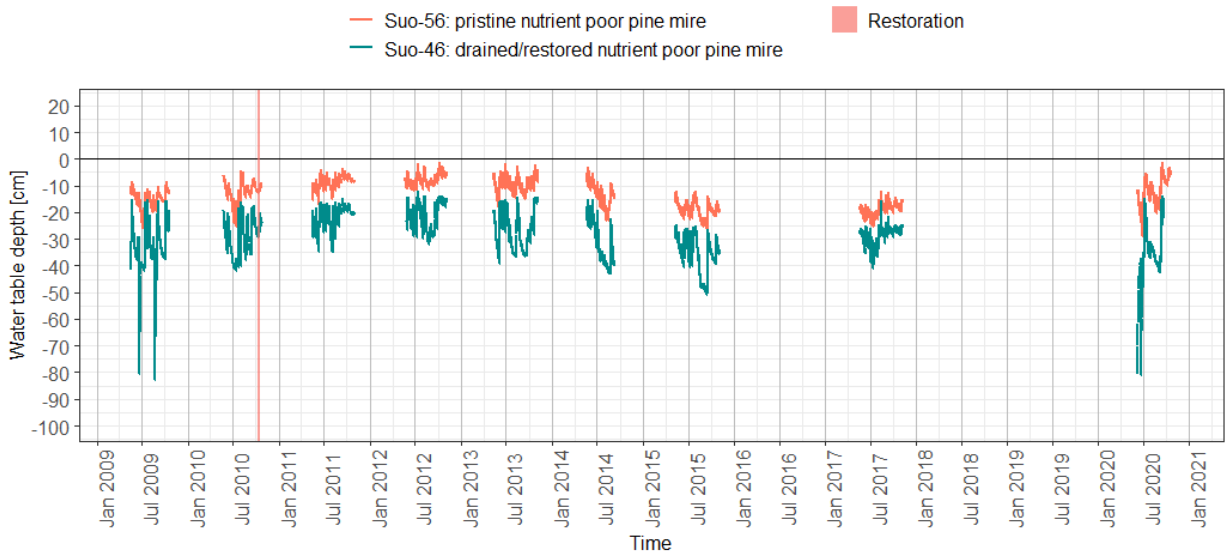
Liitteet

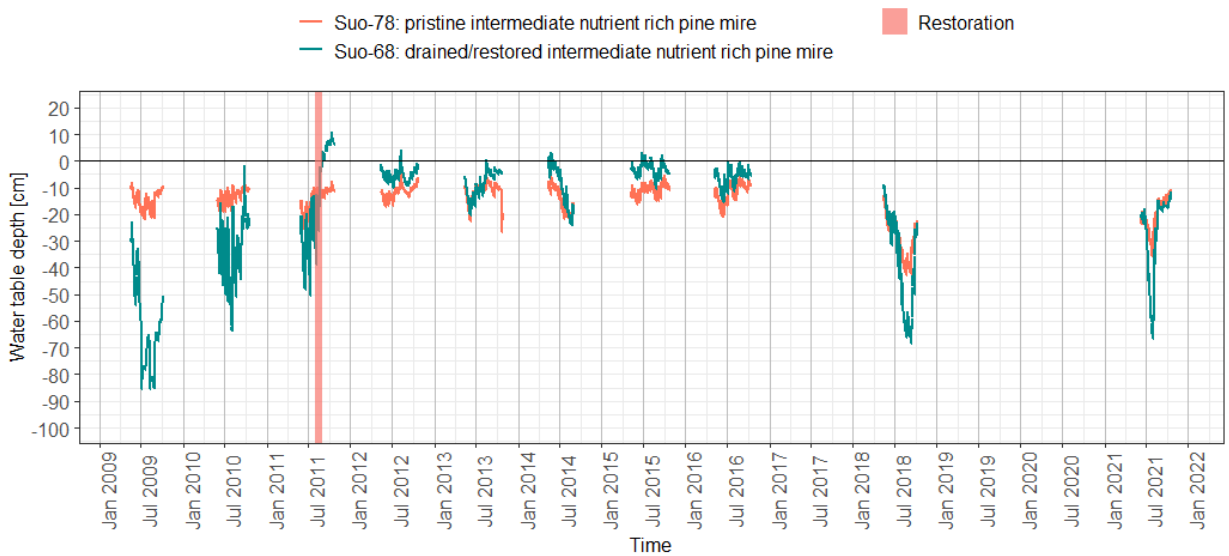
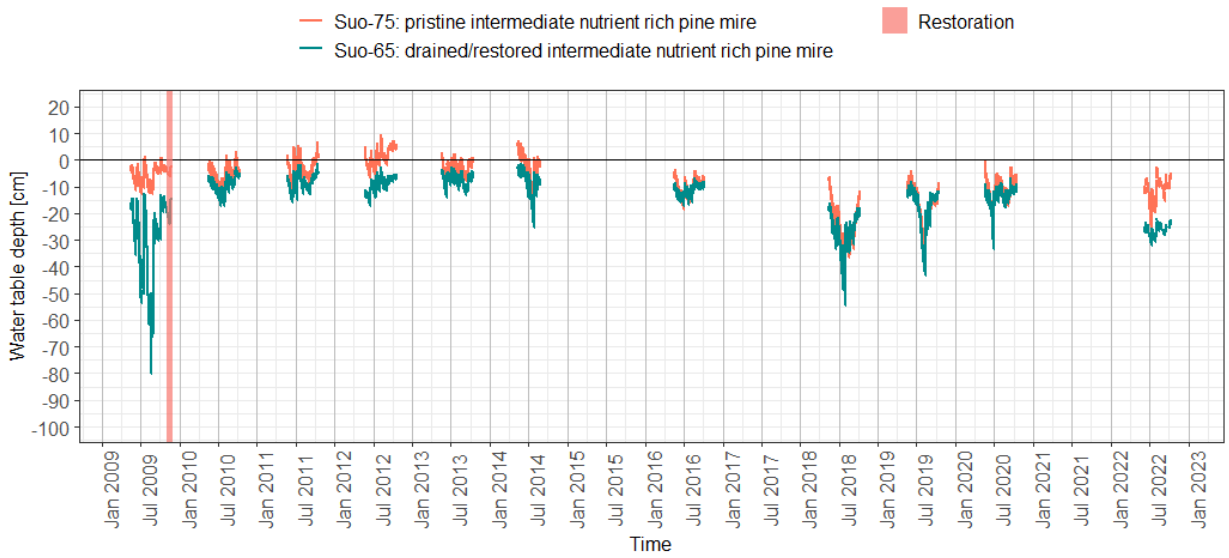
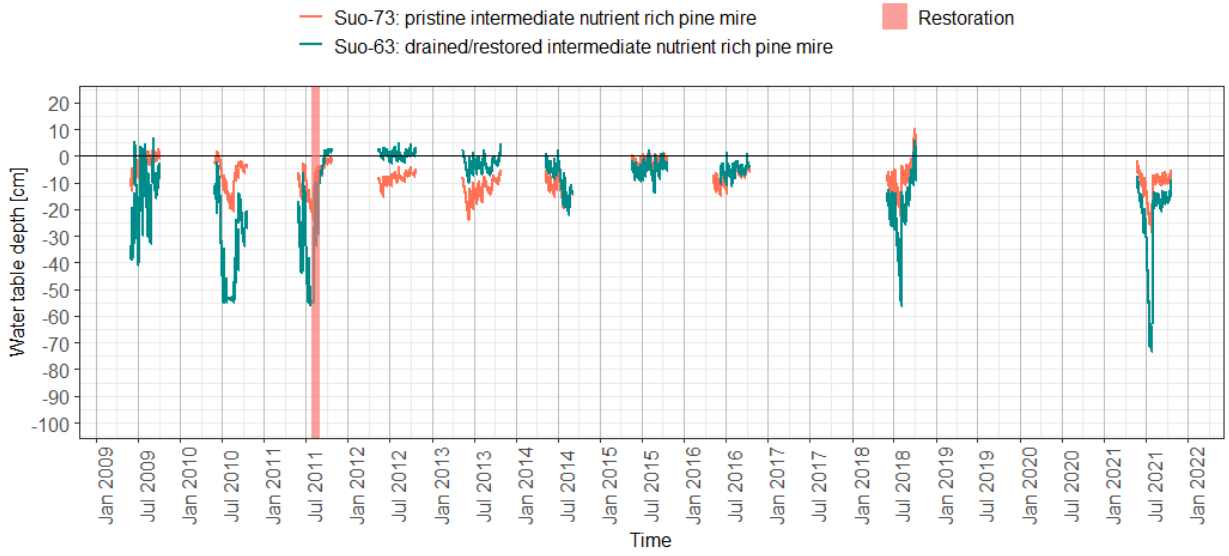
Liite 1. 10-vuotisvedenkorkausvertailut seurantaverkoston kohteilta

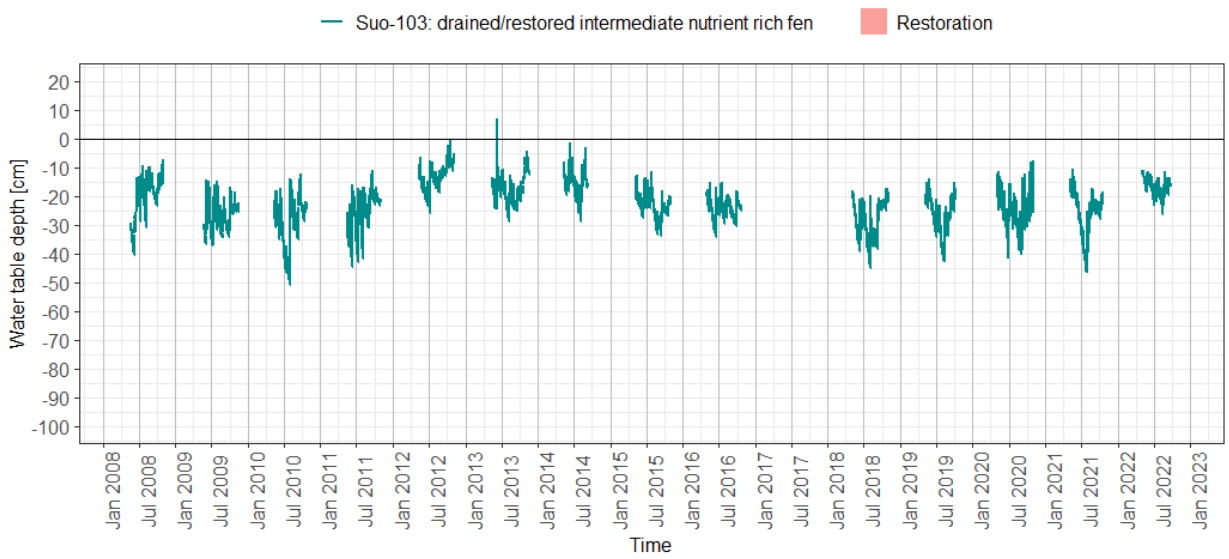
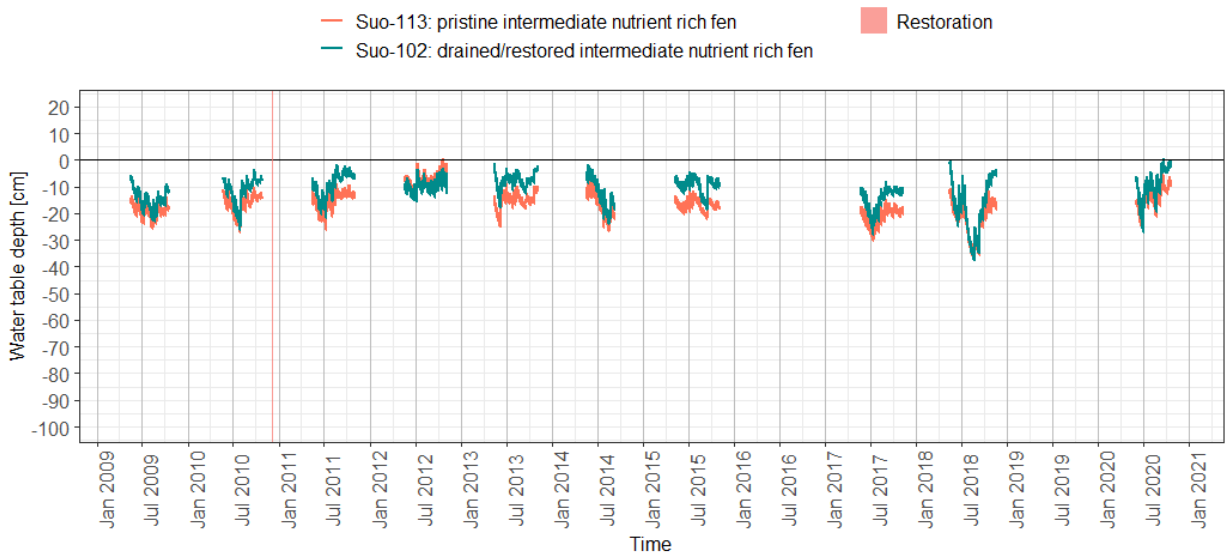
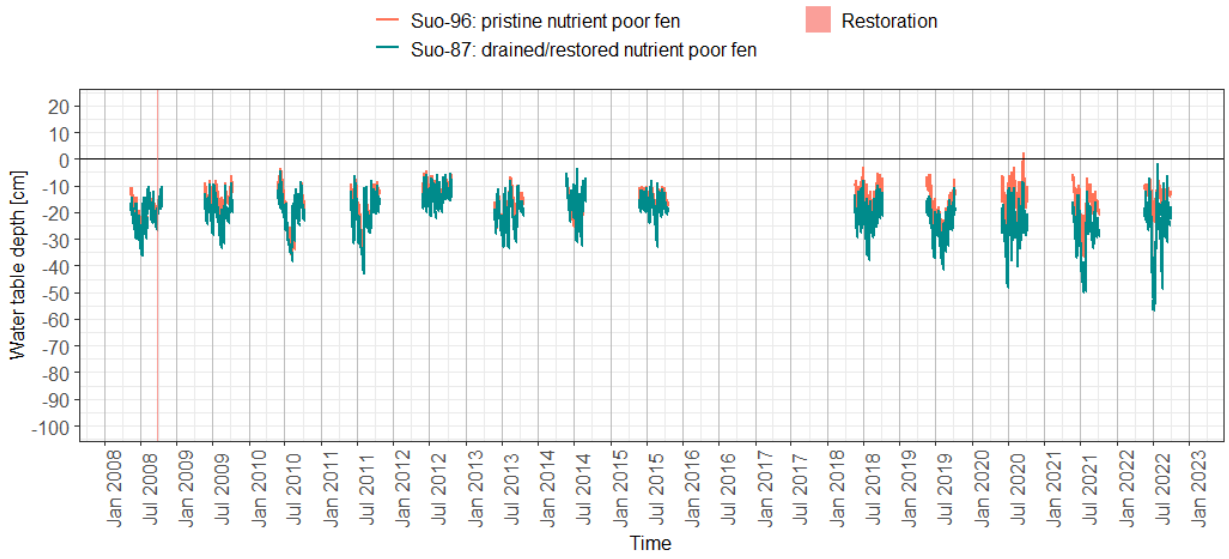


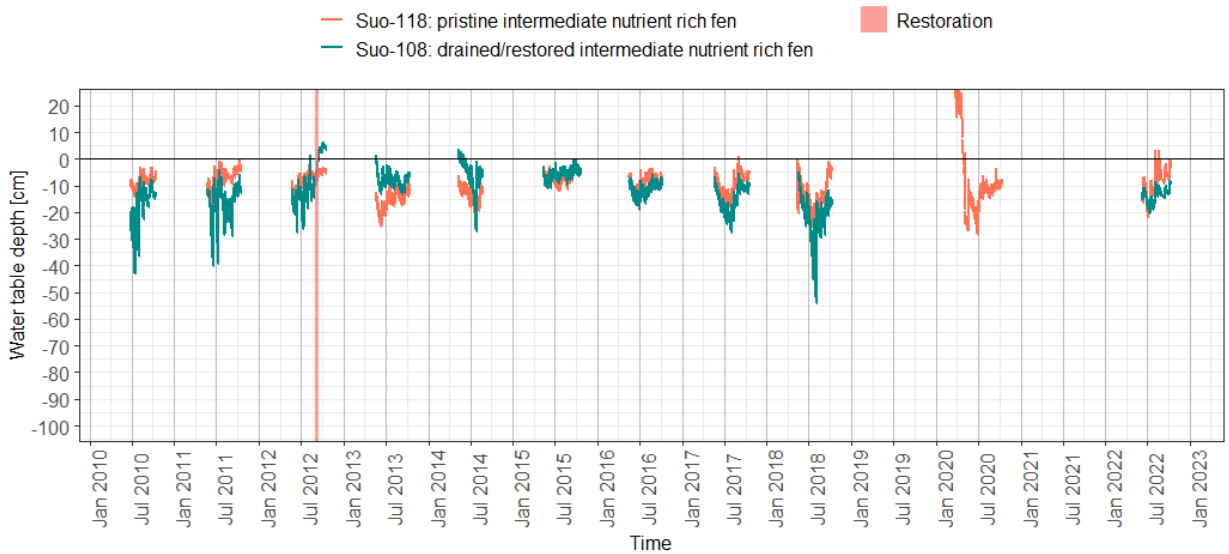
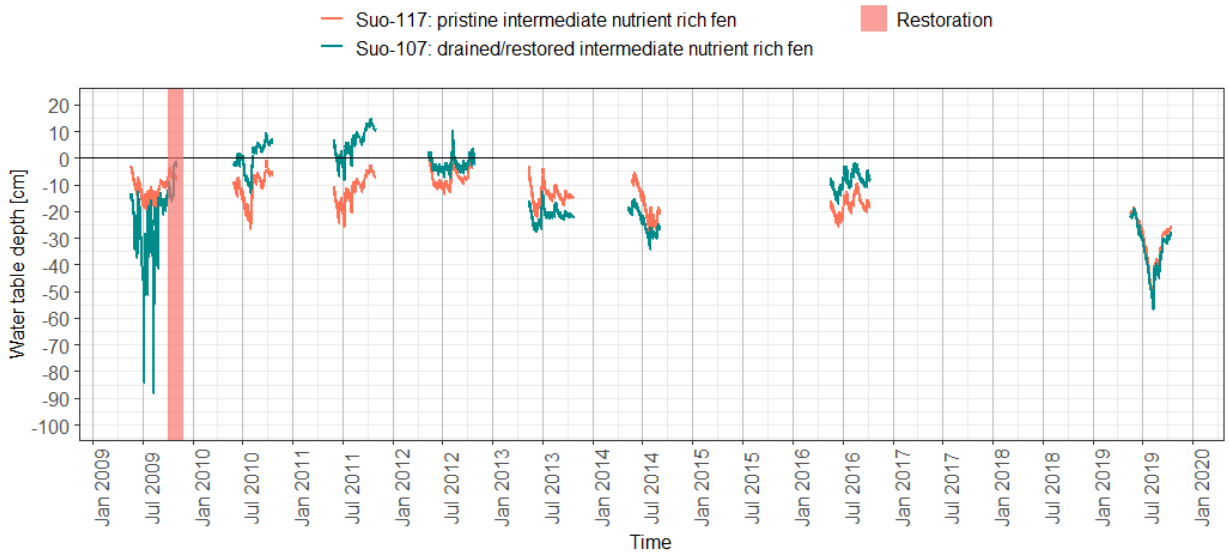
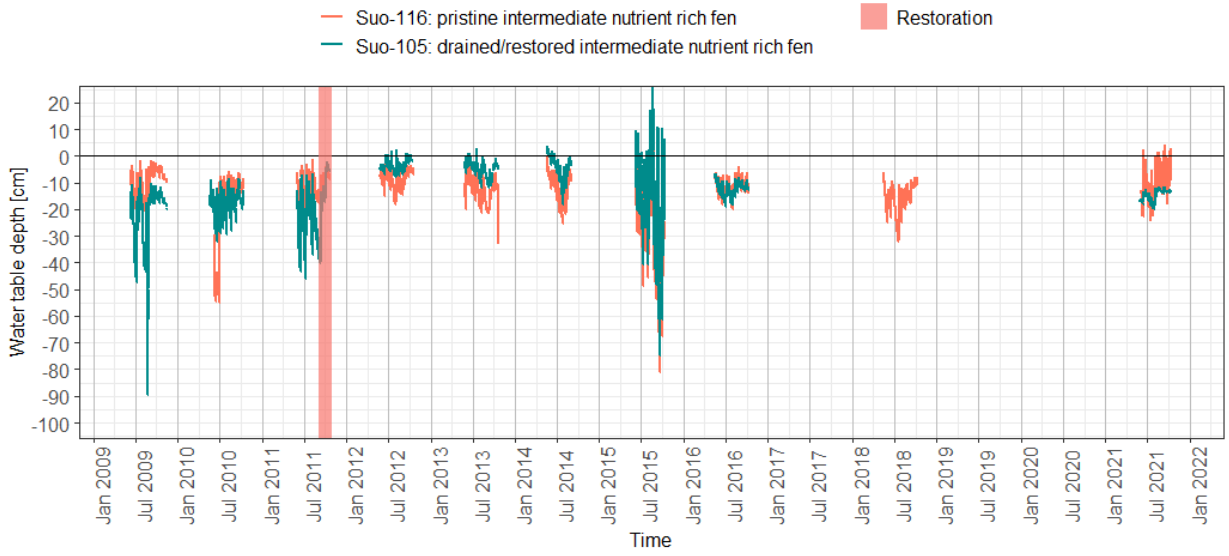


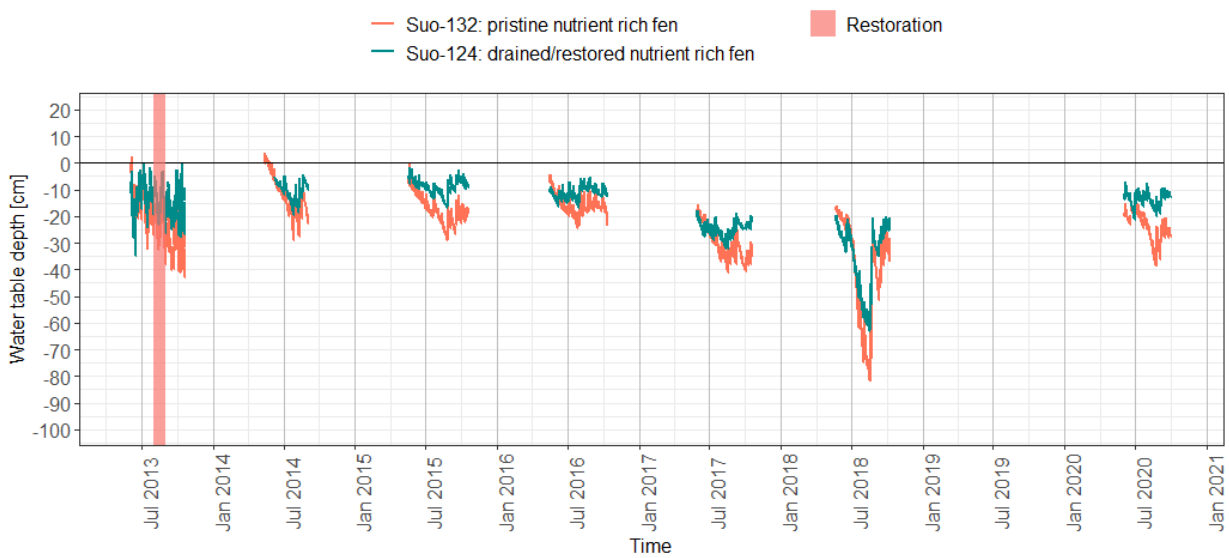
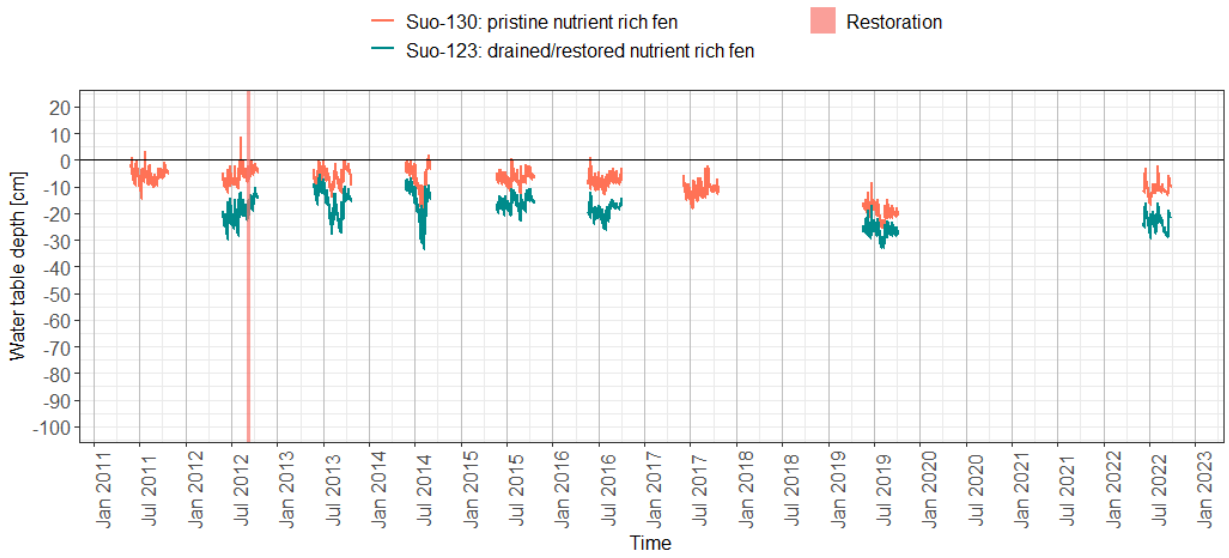
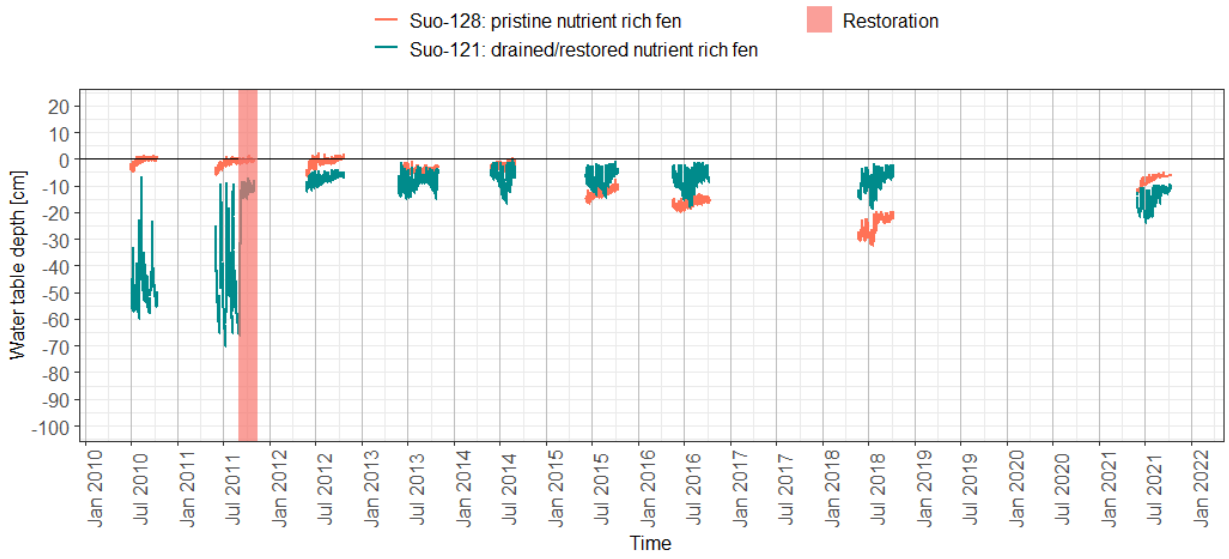




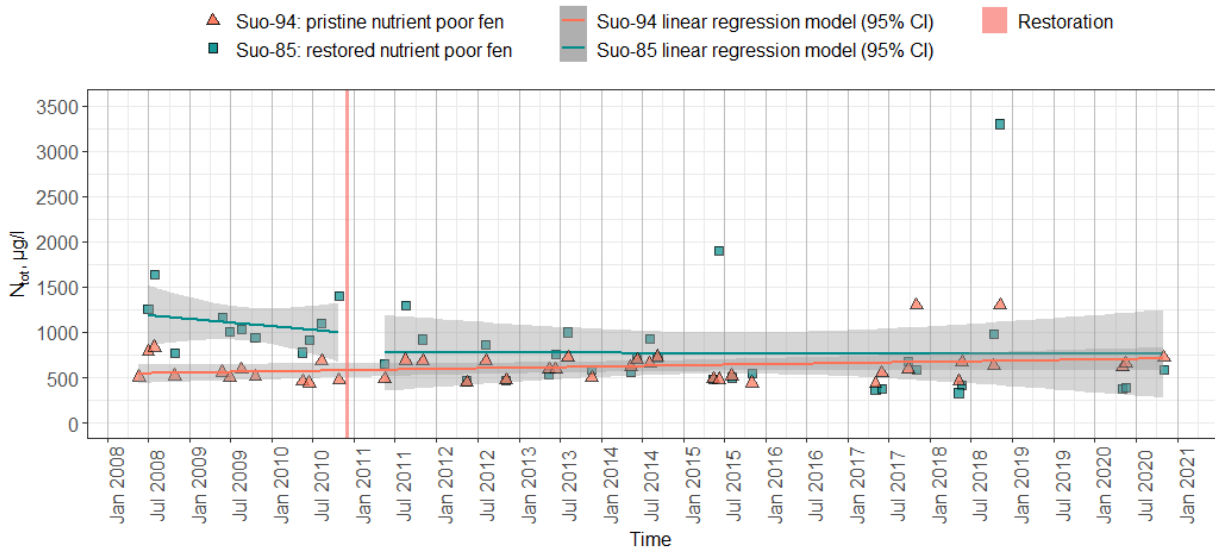
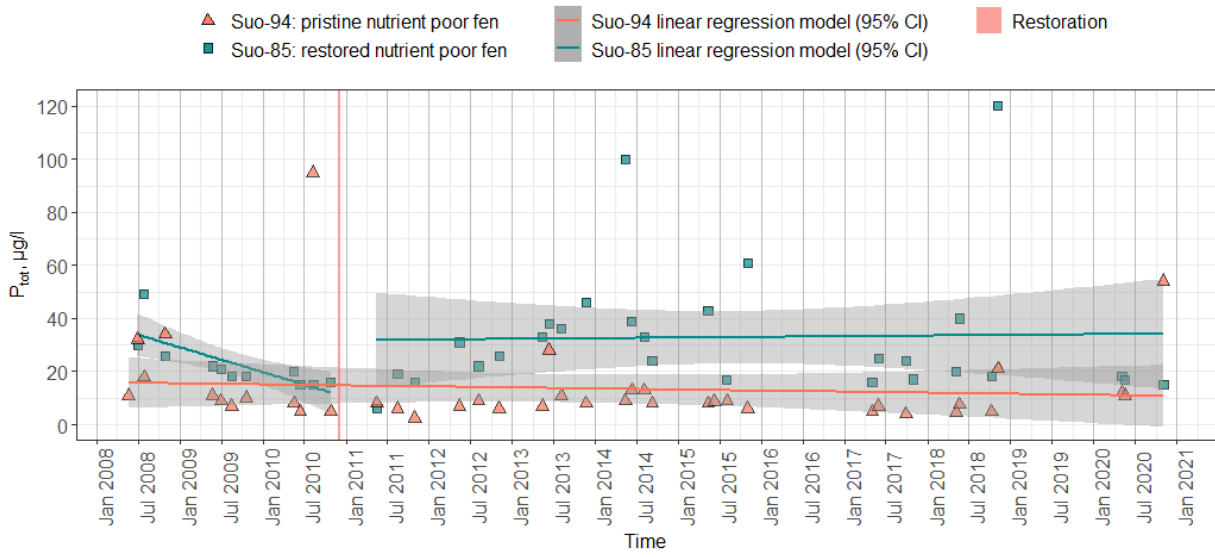


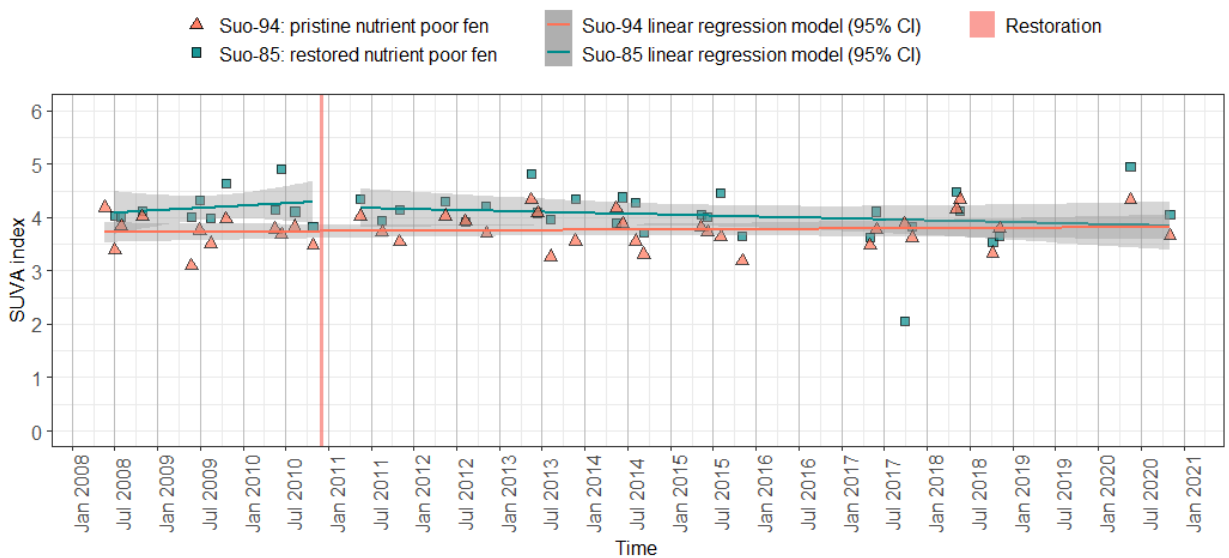


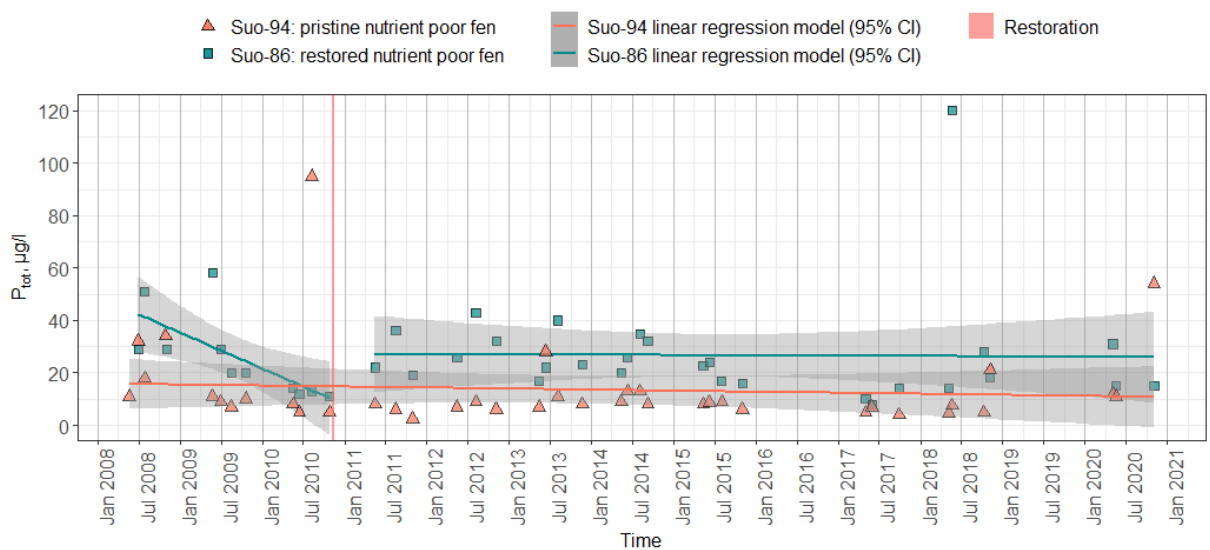
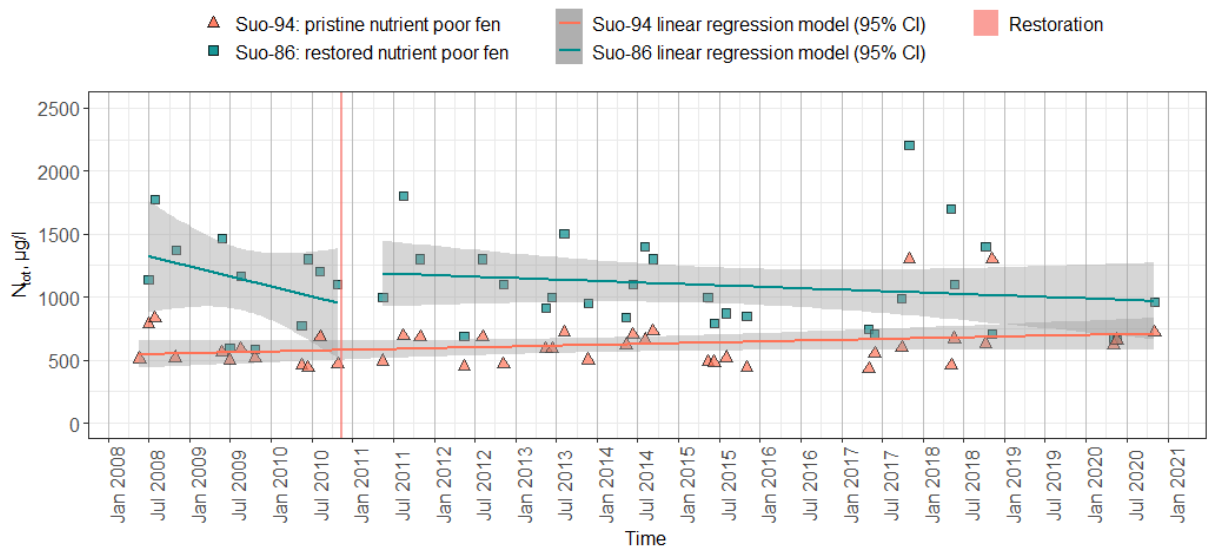
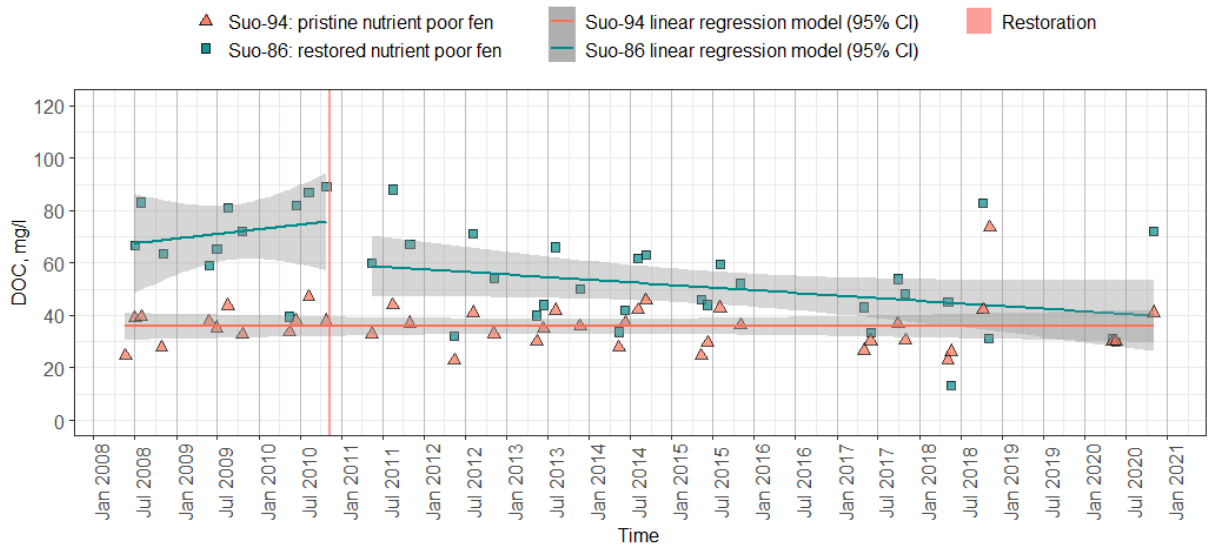


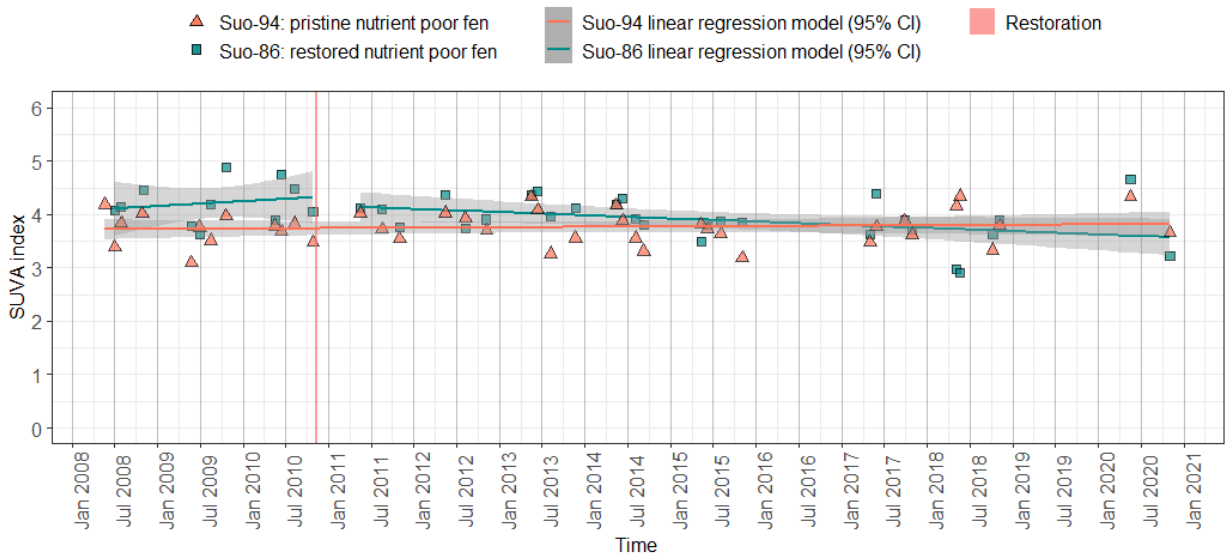
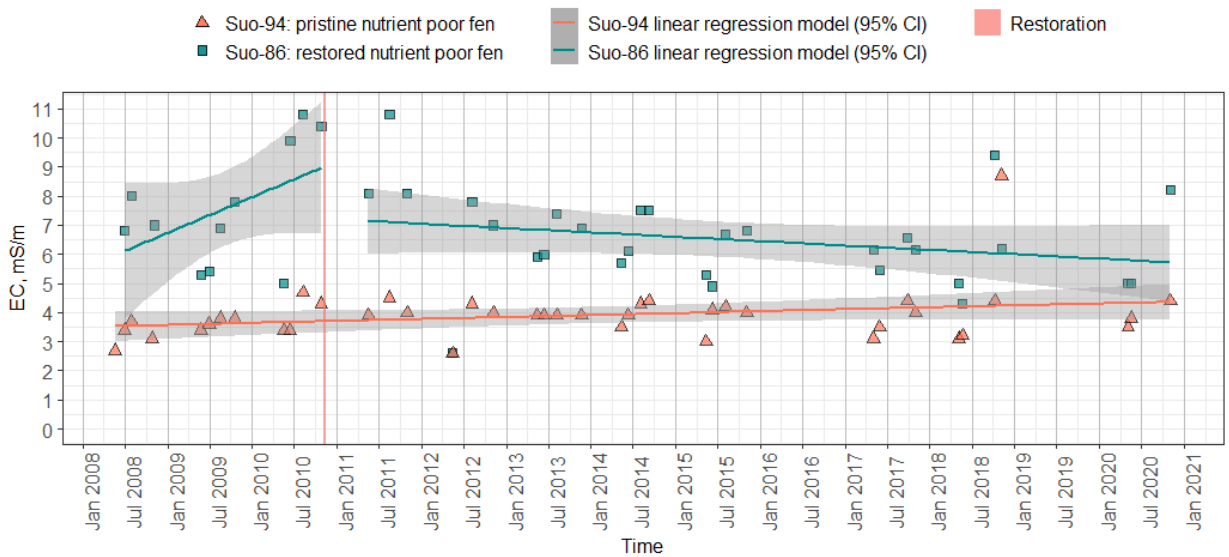


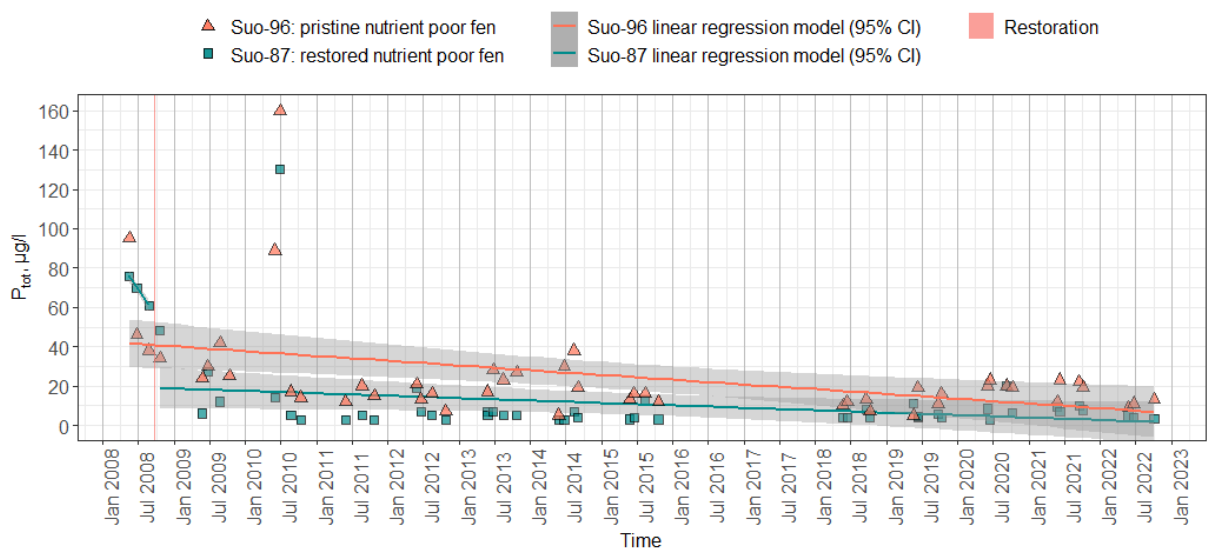
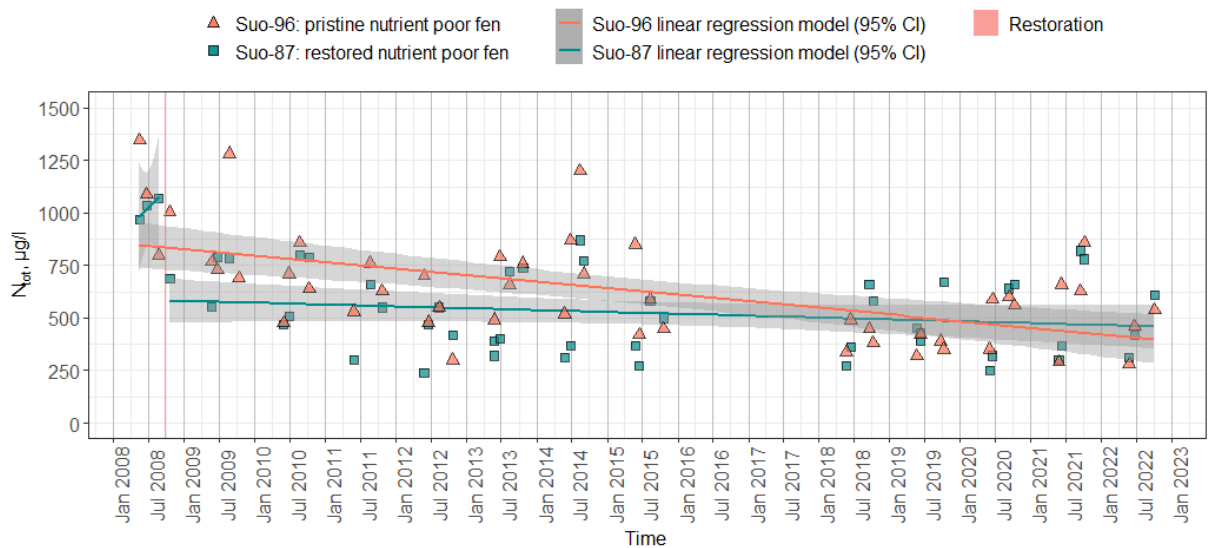
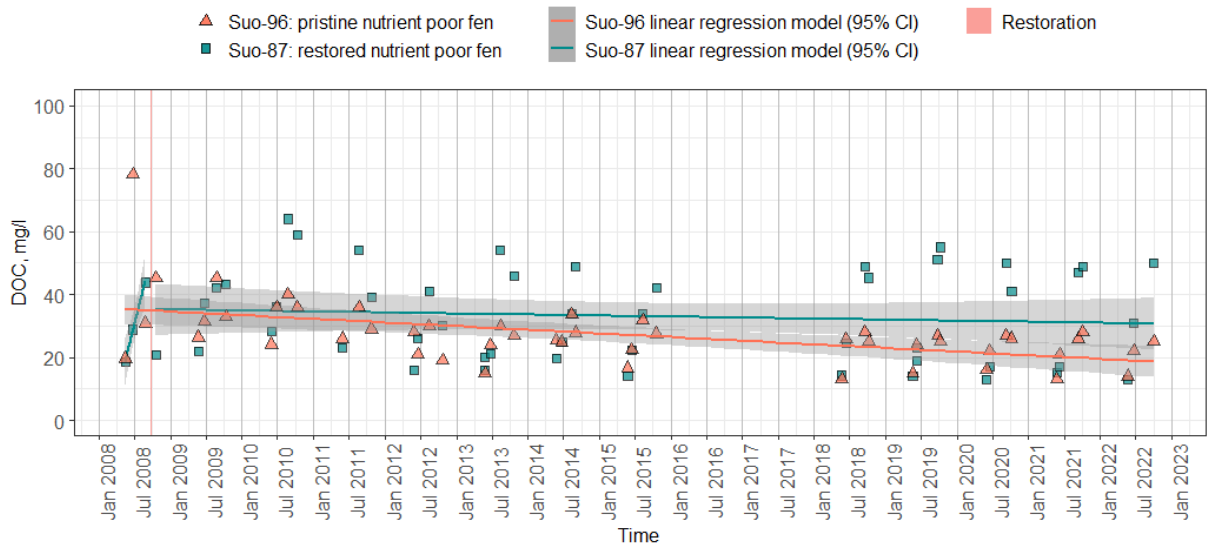
Liite 2A. 10-vuotisvedenlaatuvertailut seurantaverkoston avosuokohteilta

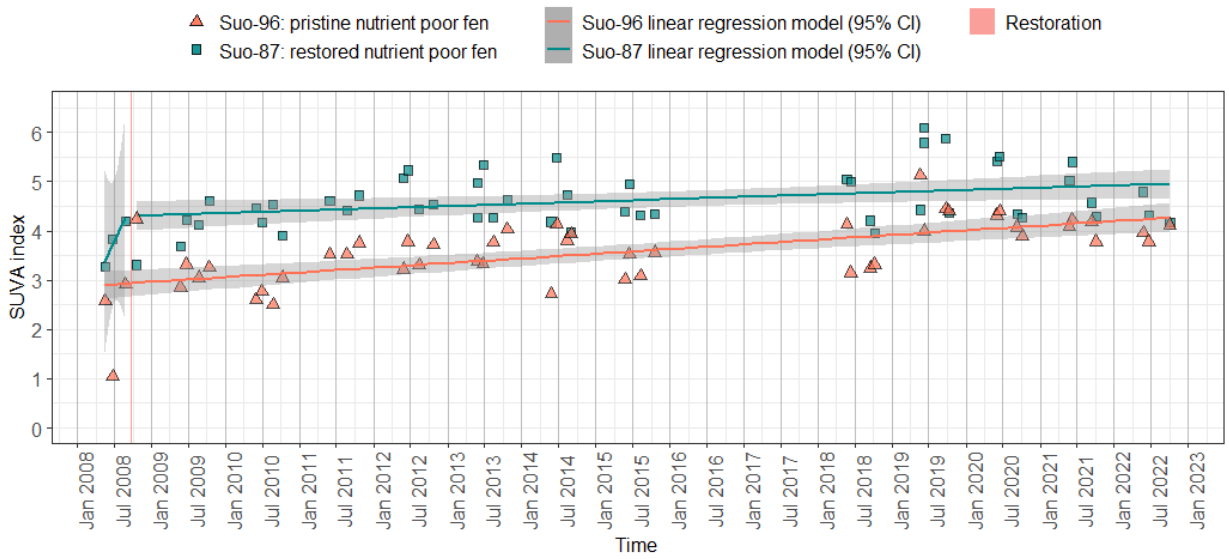
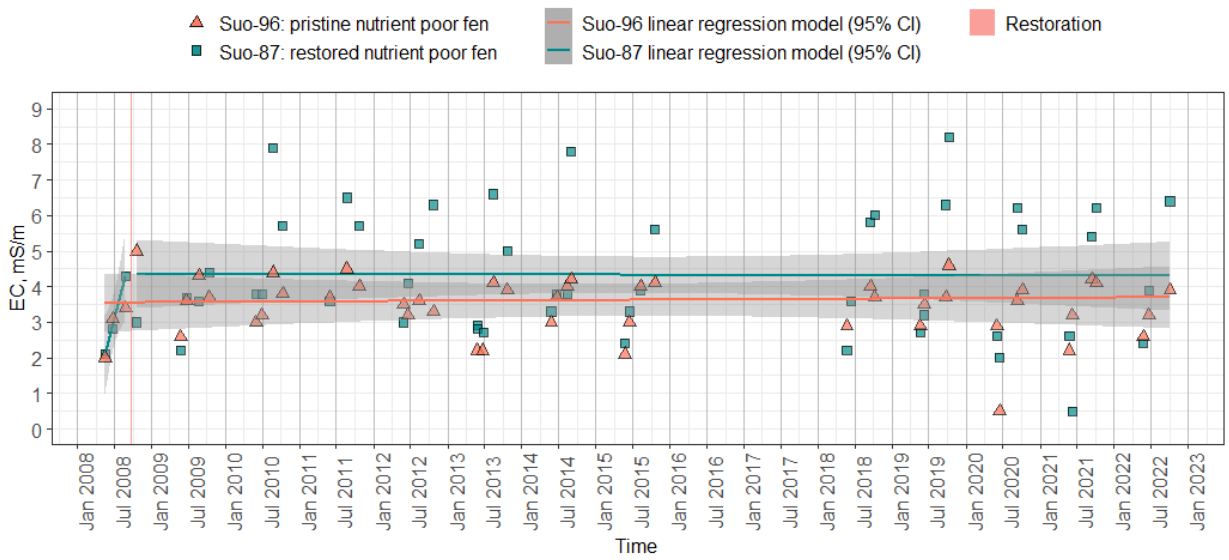
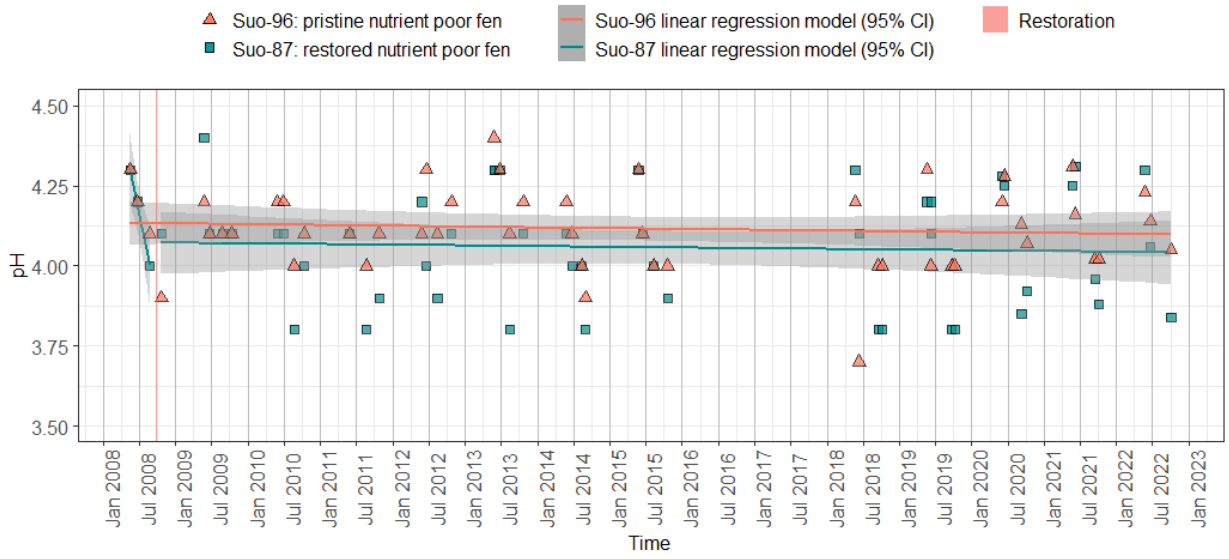


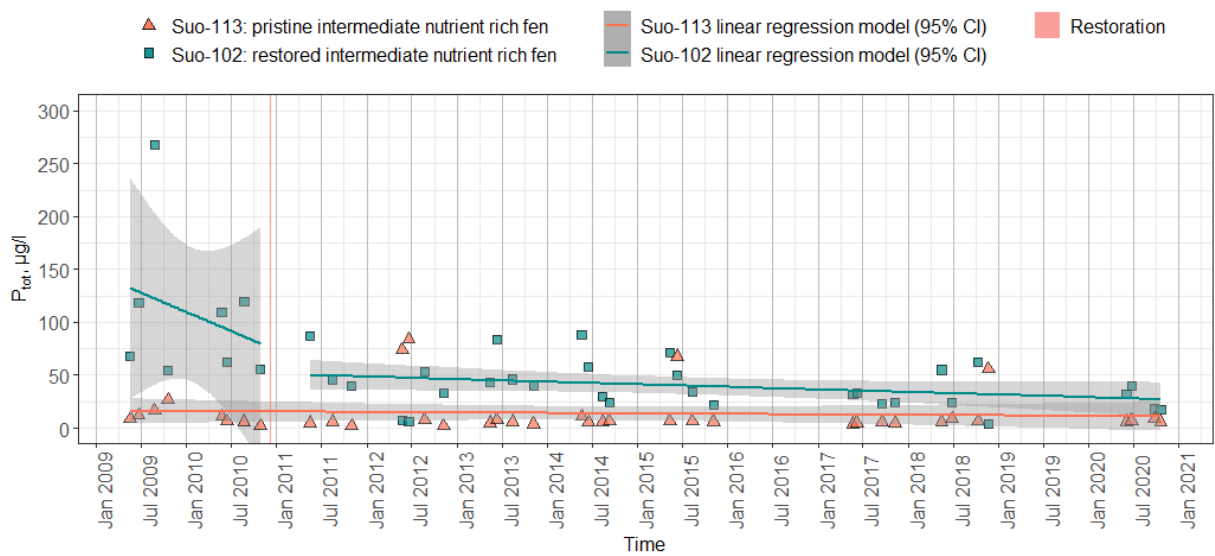
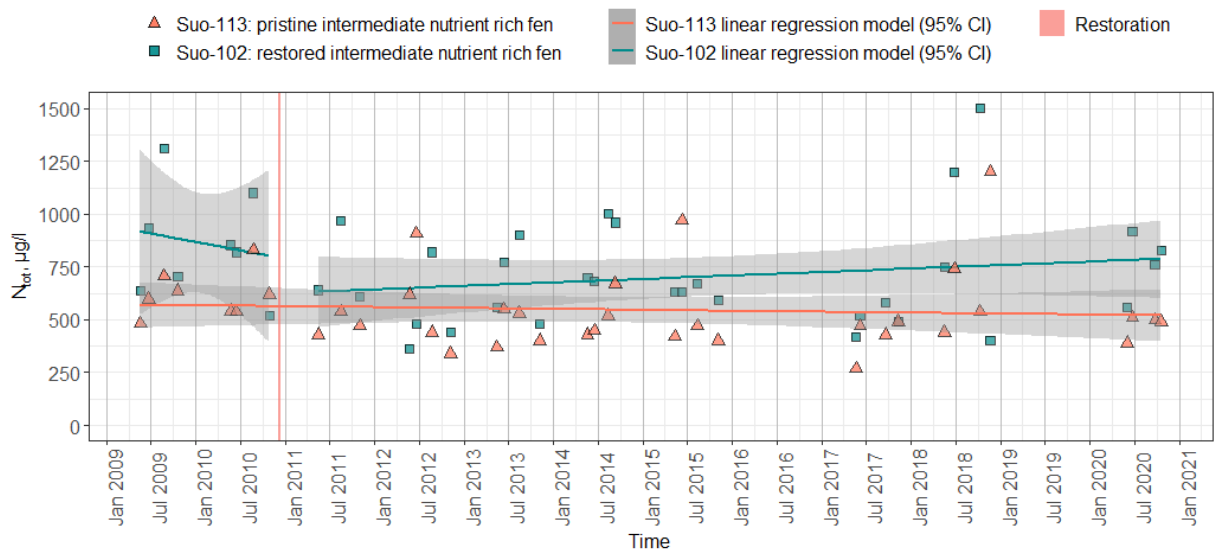
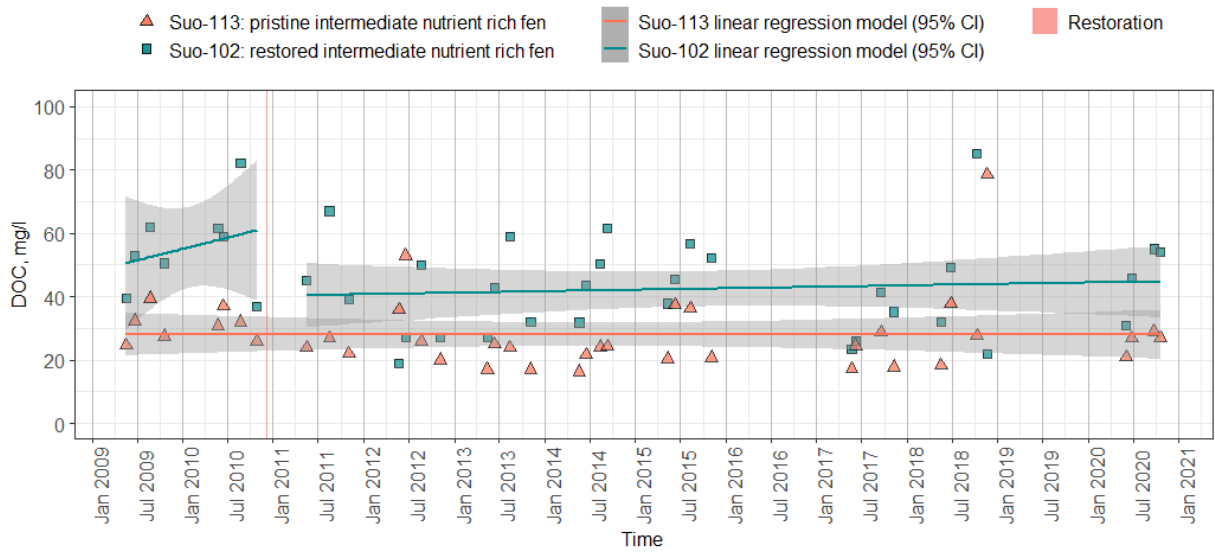


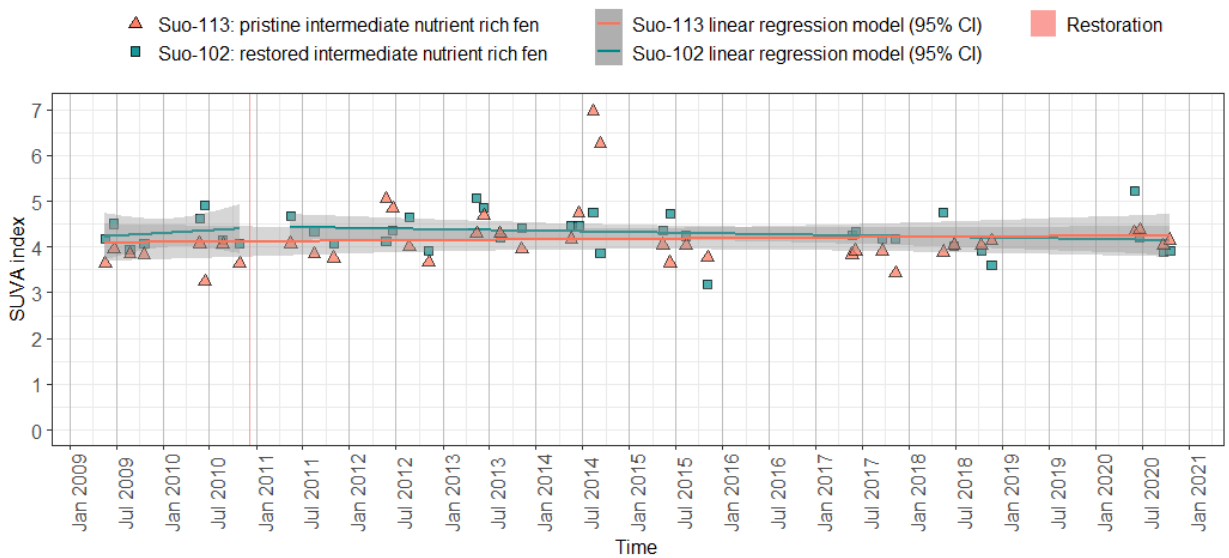
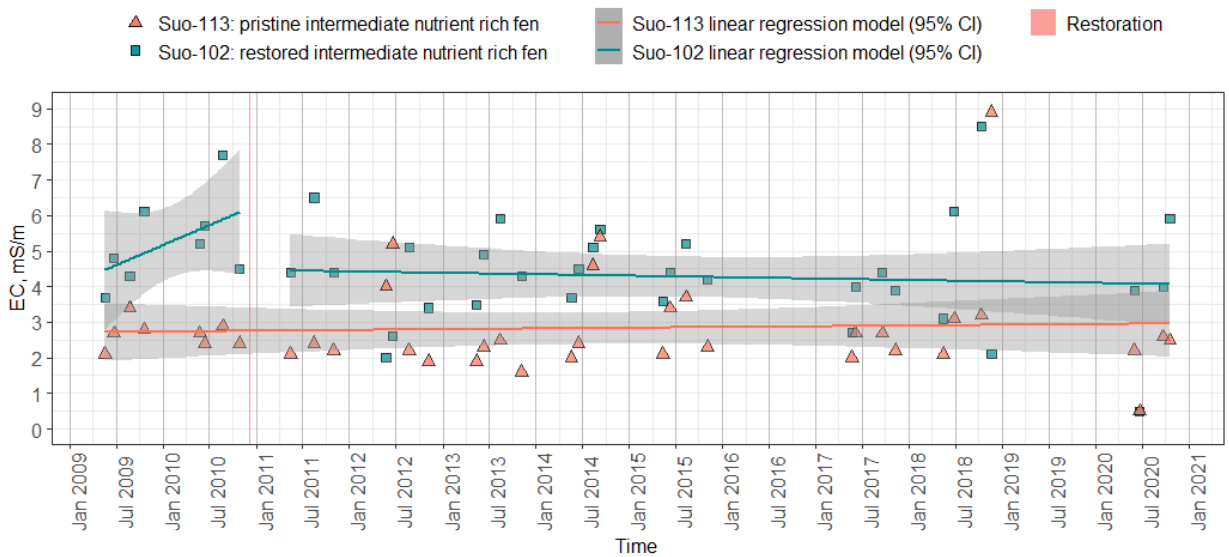
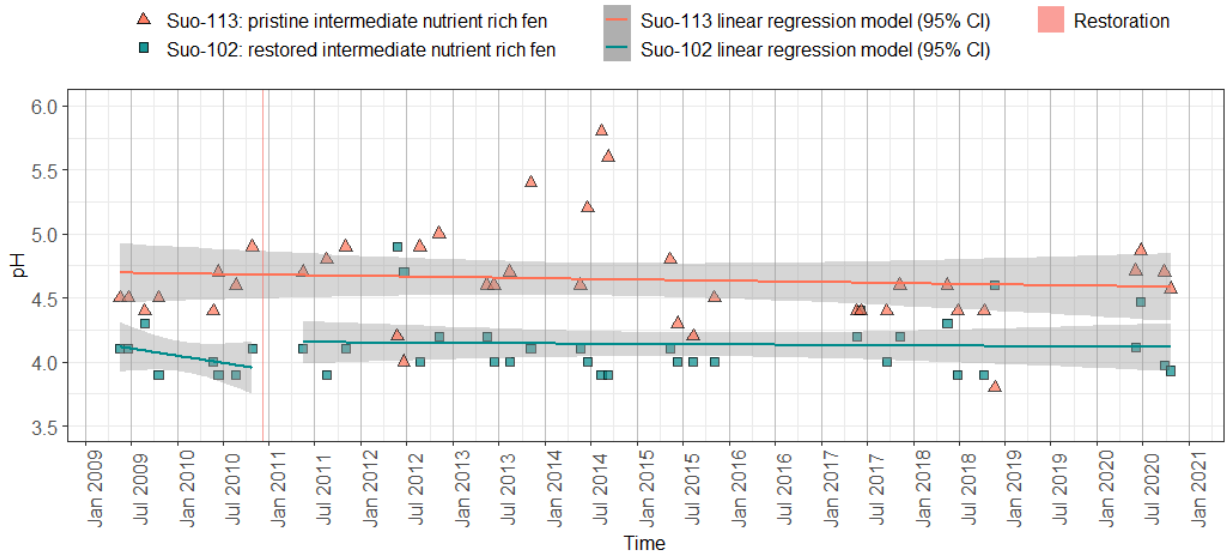


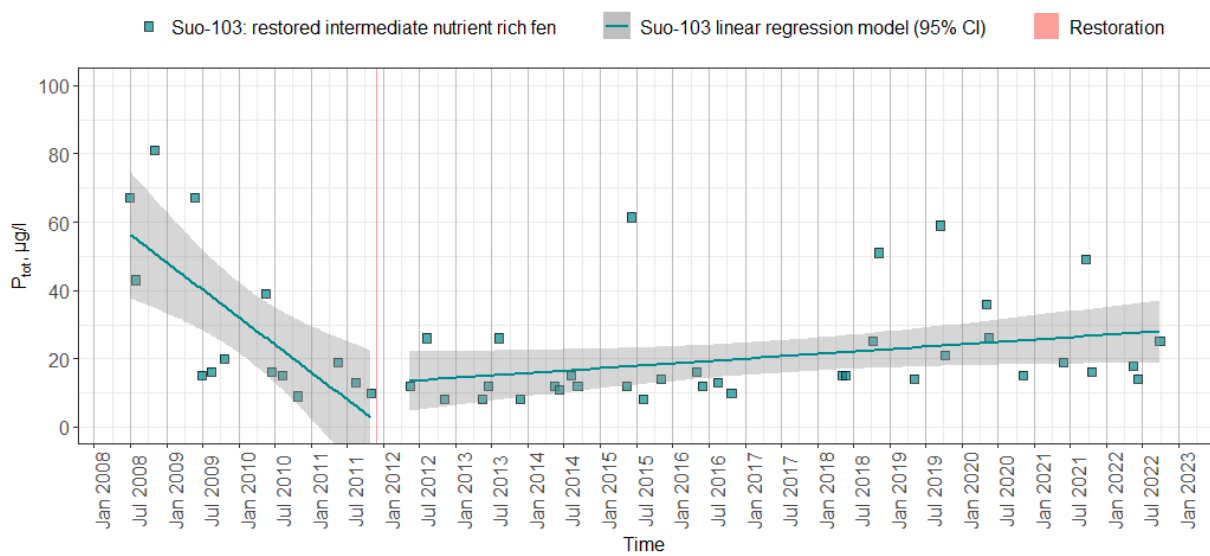
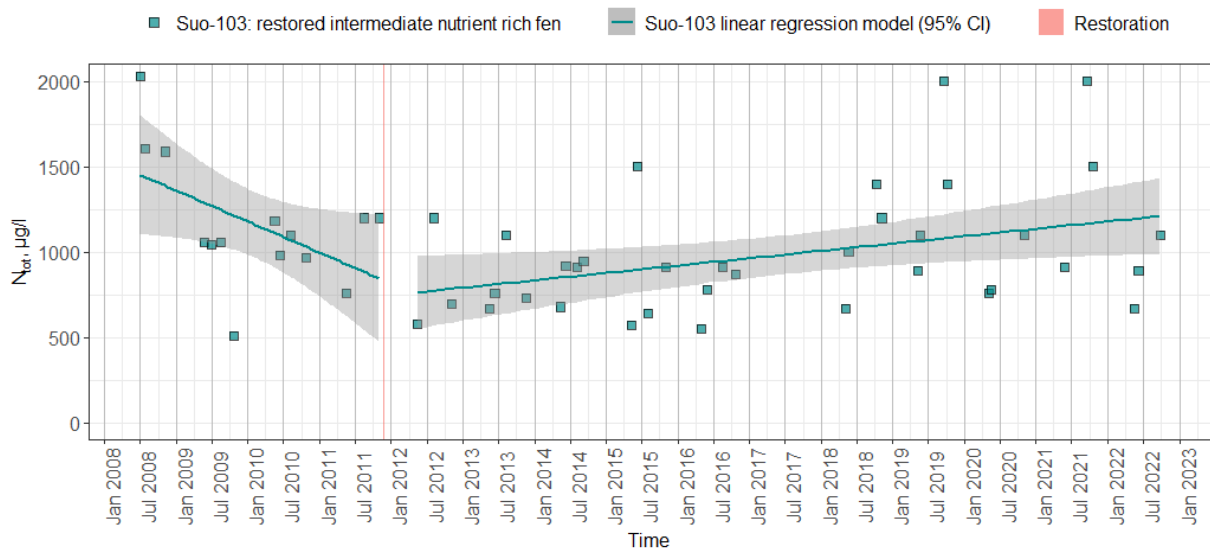
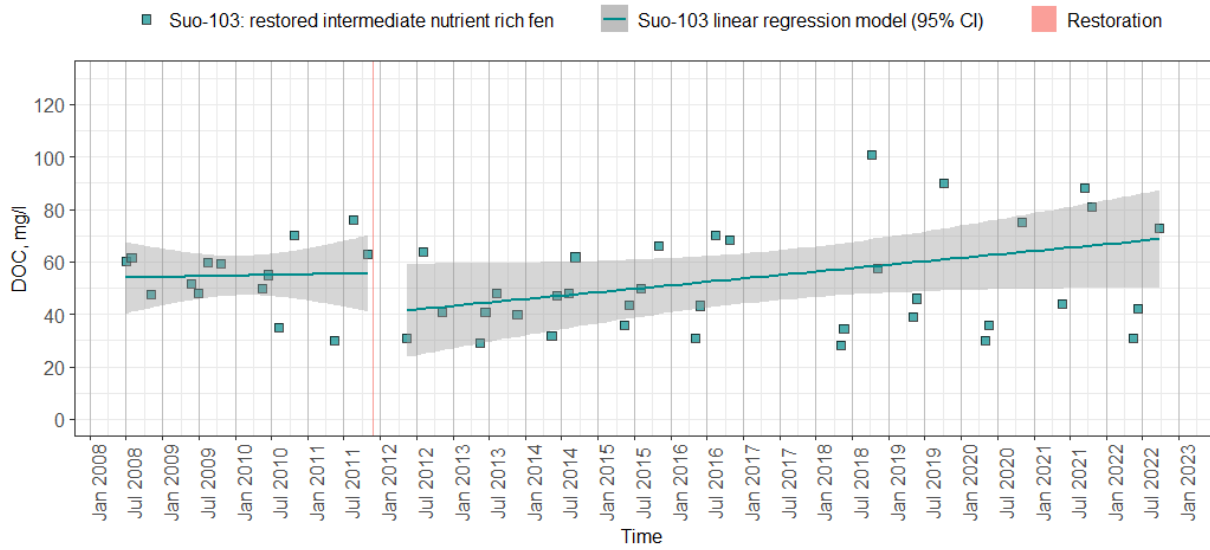


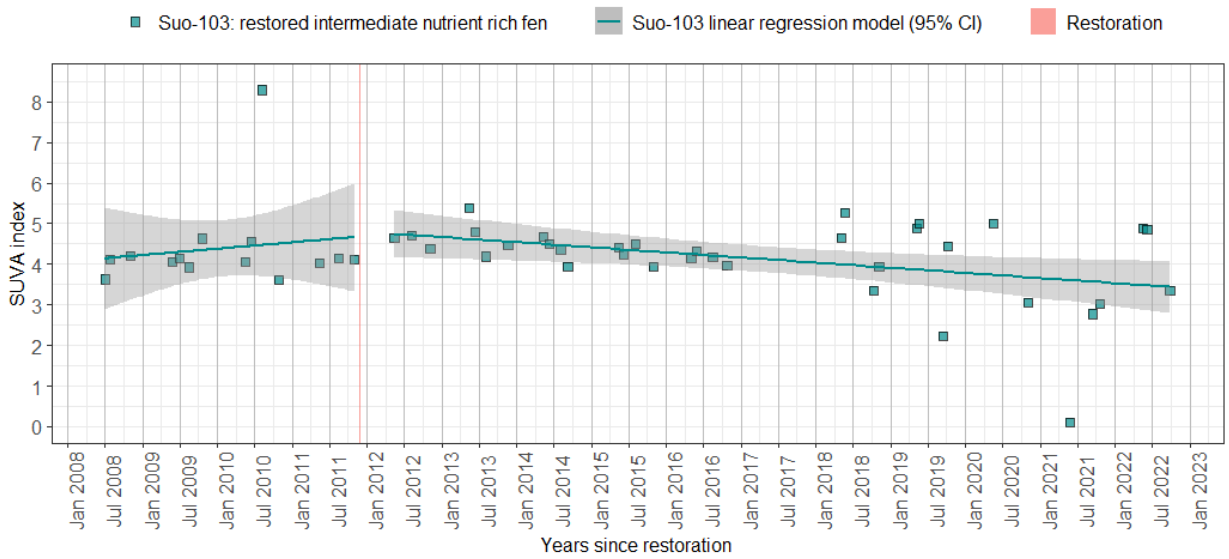
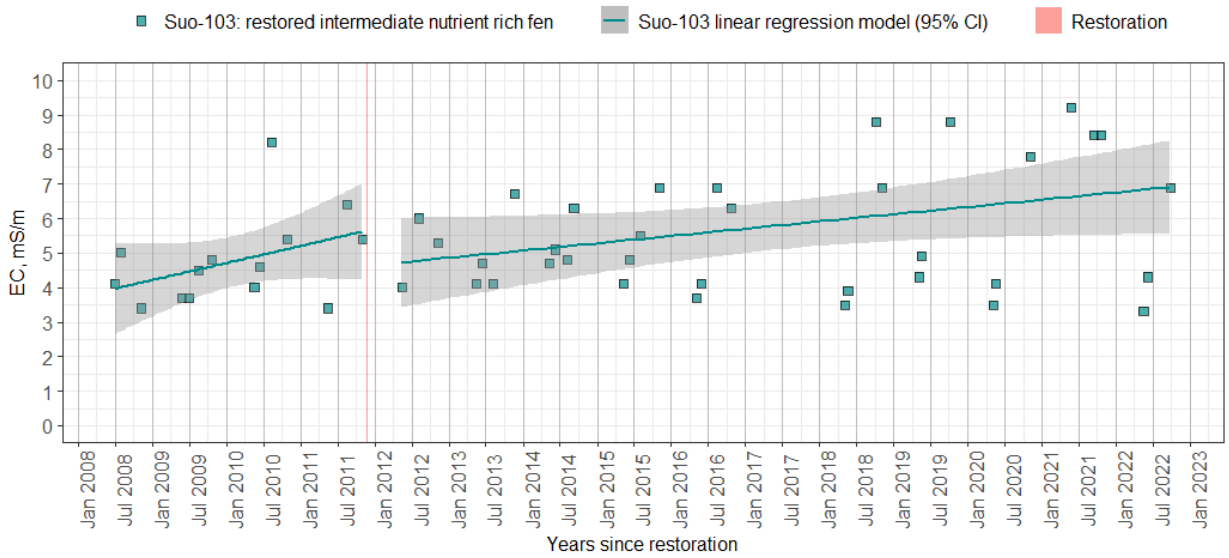
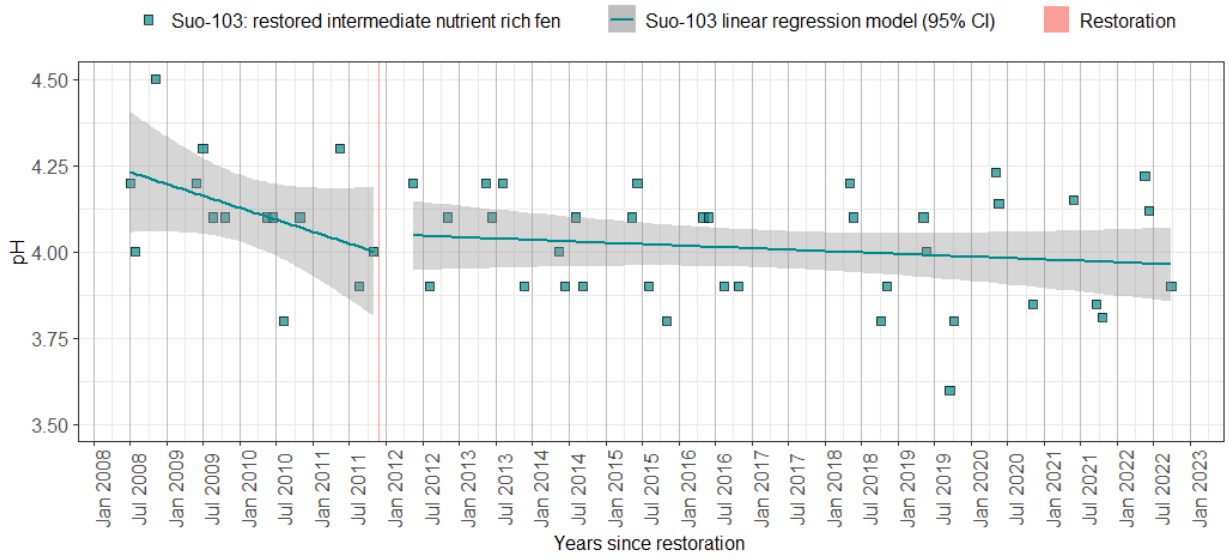


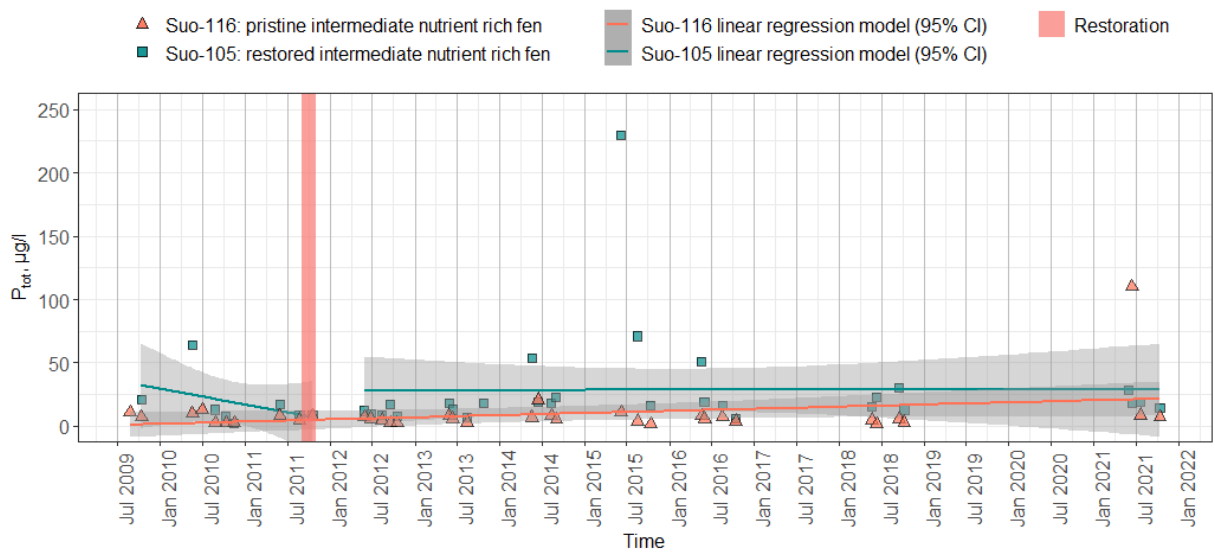
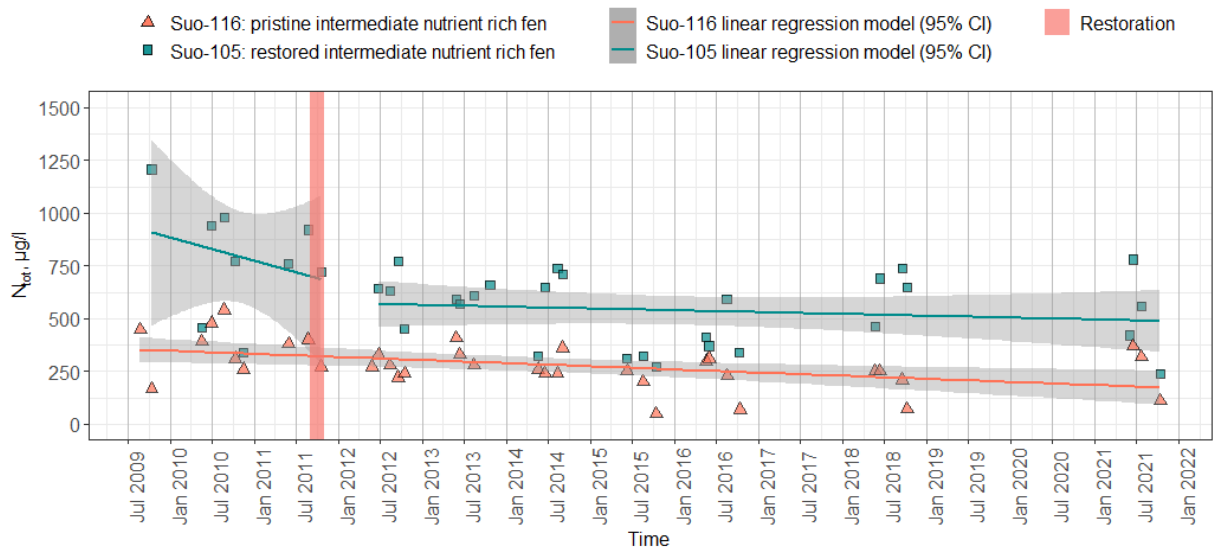
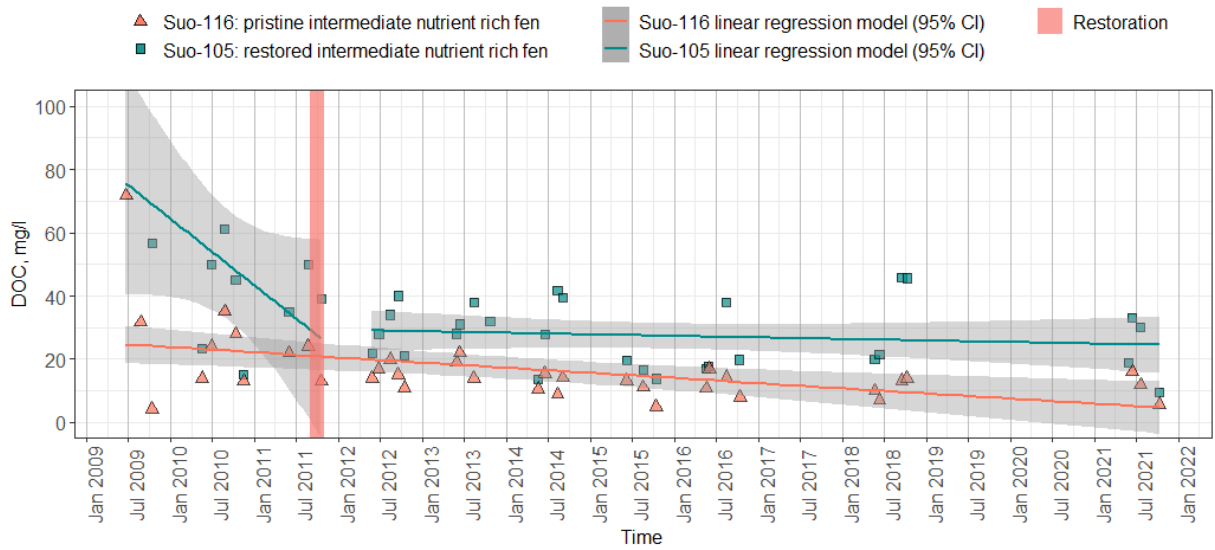


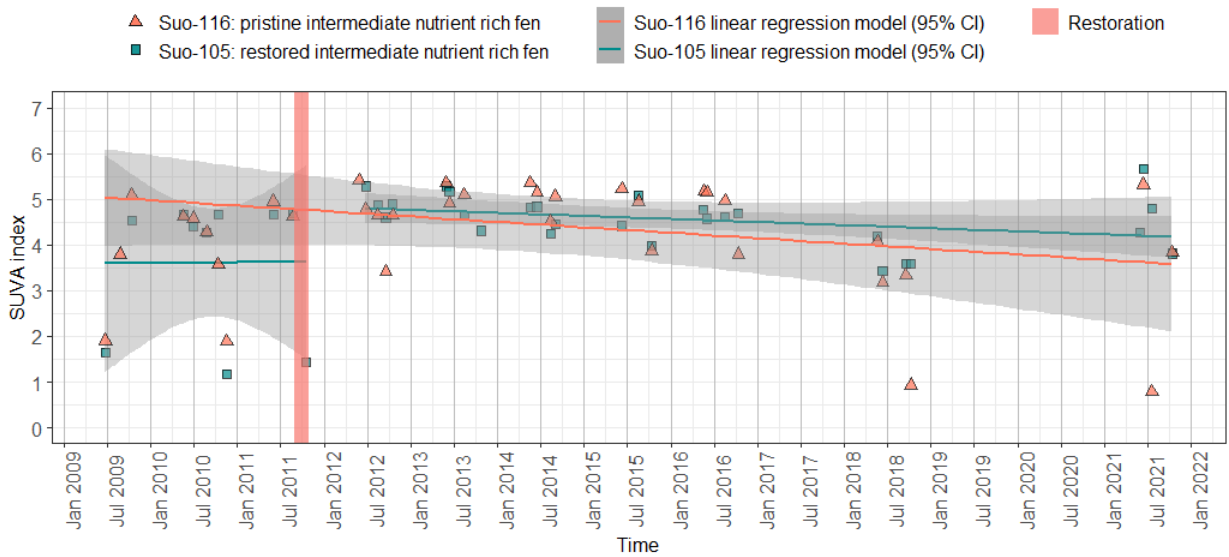
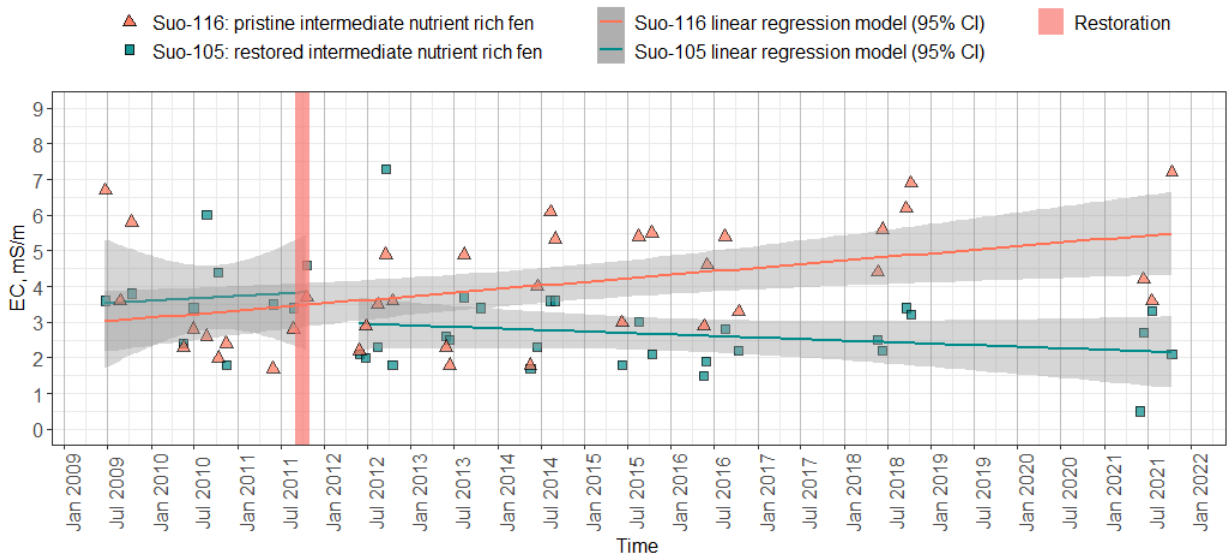
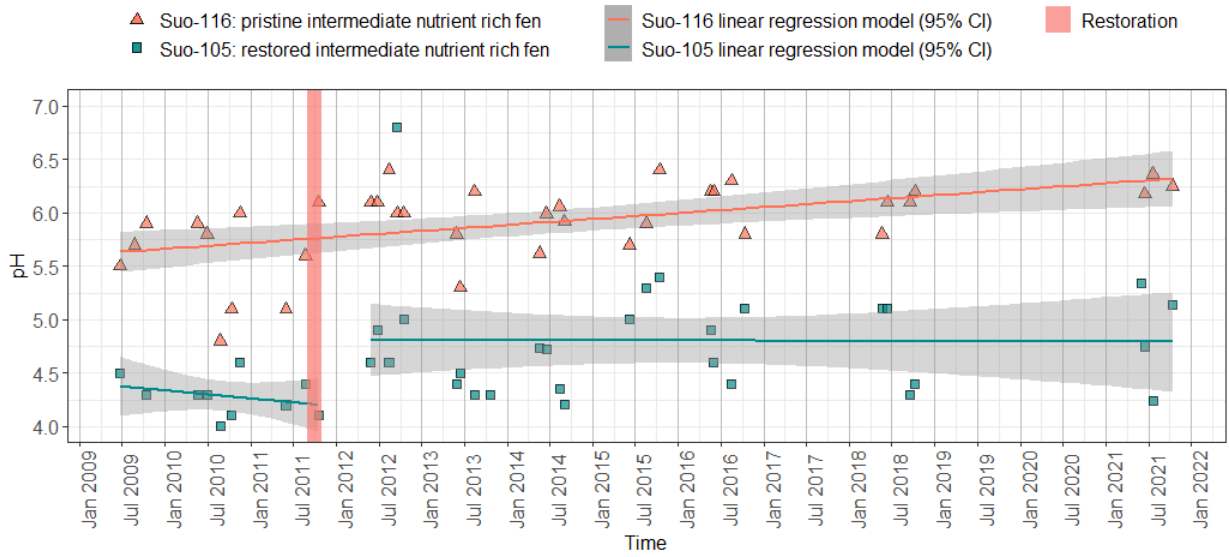


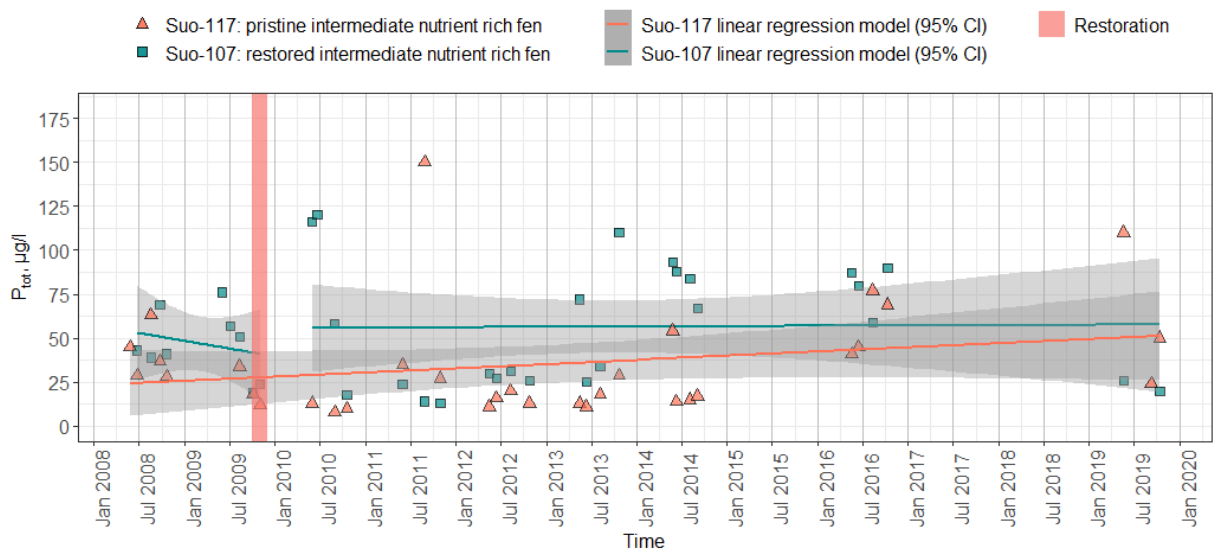
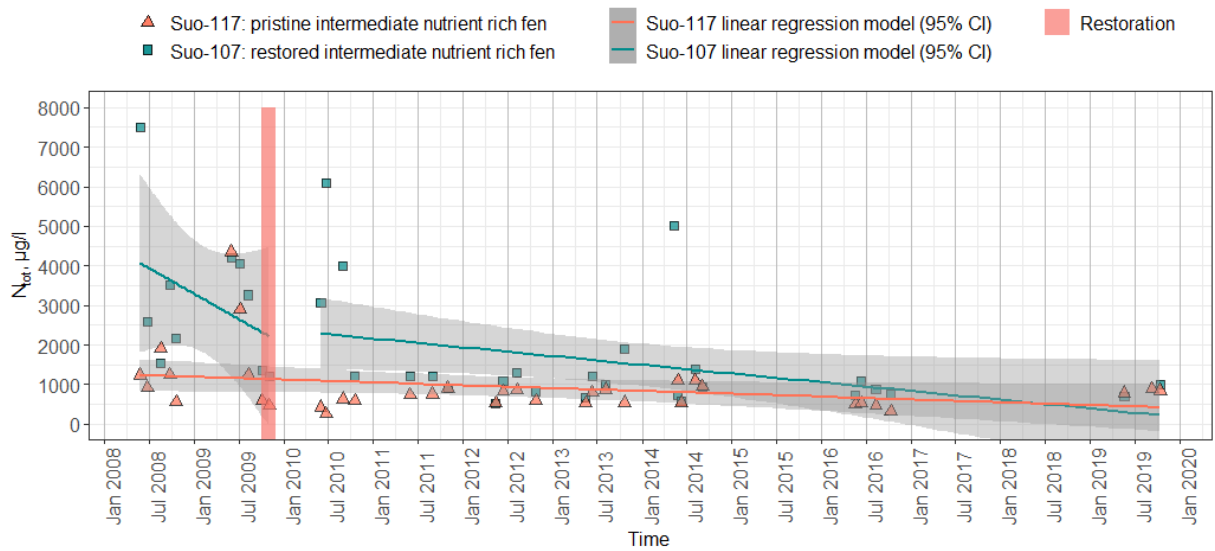
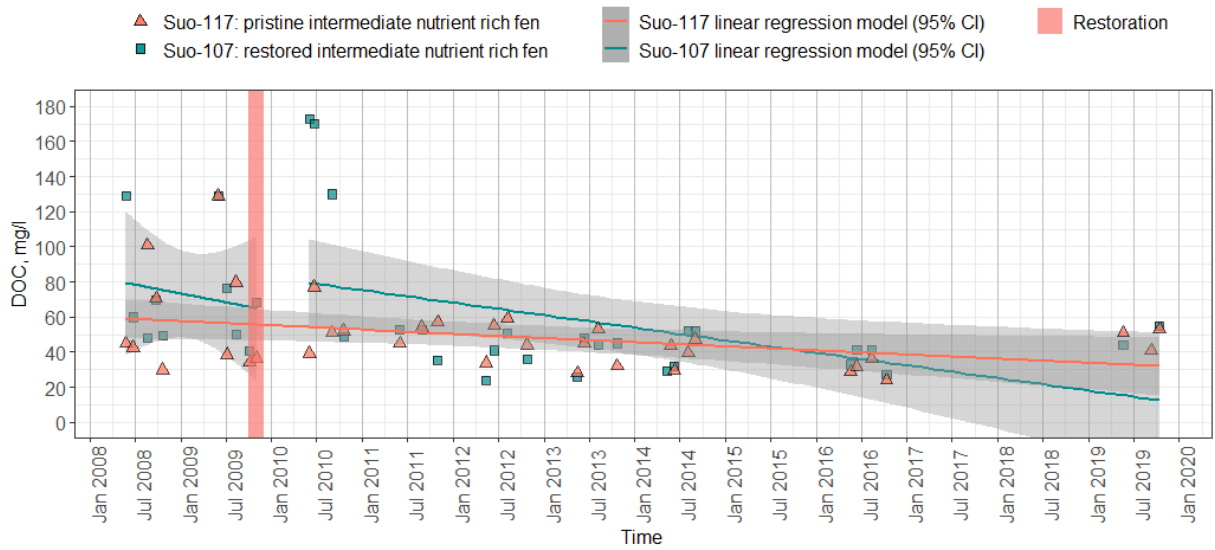


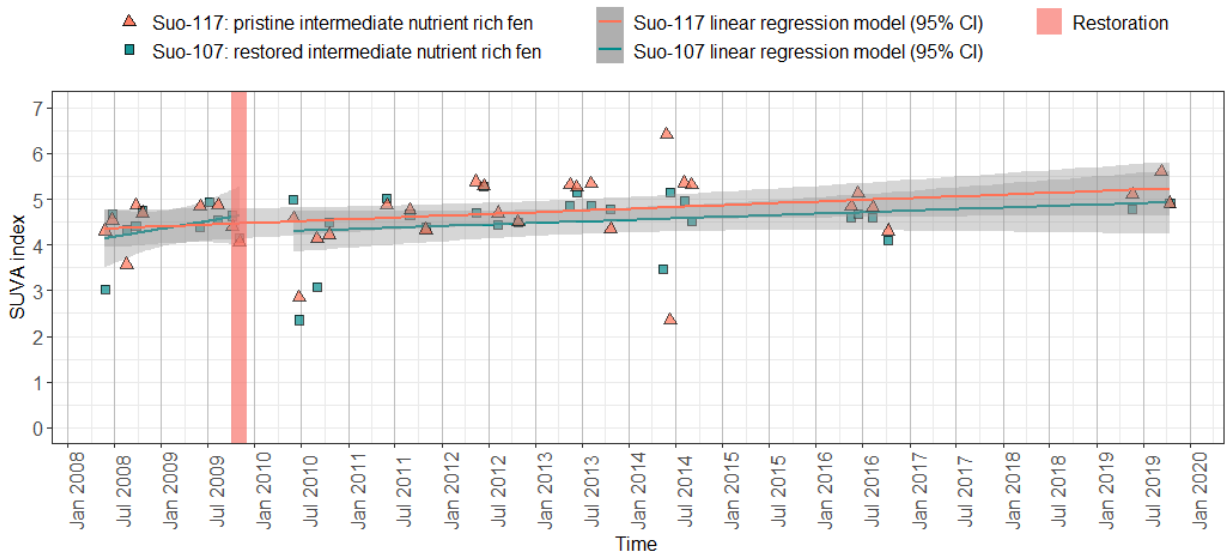
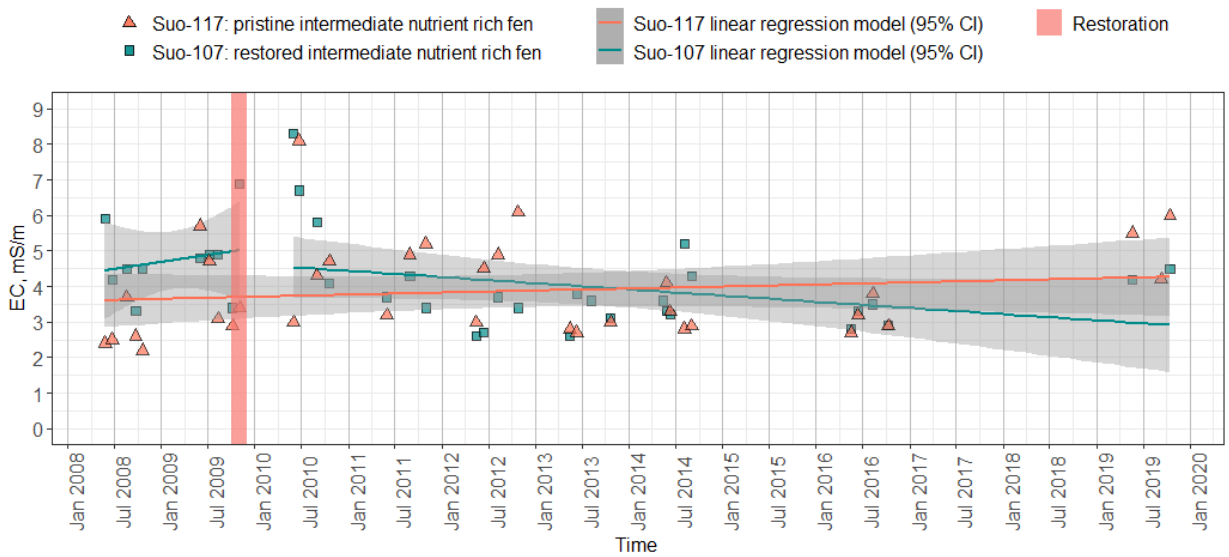
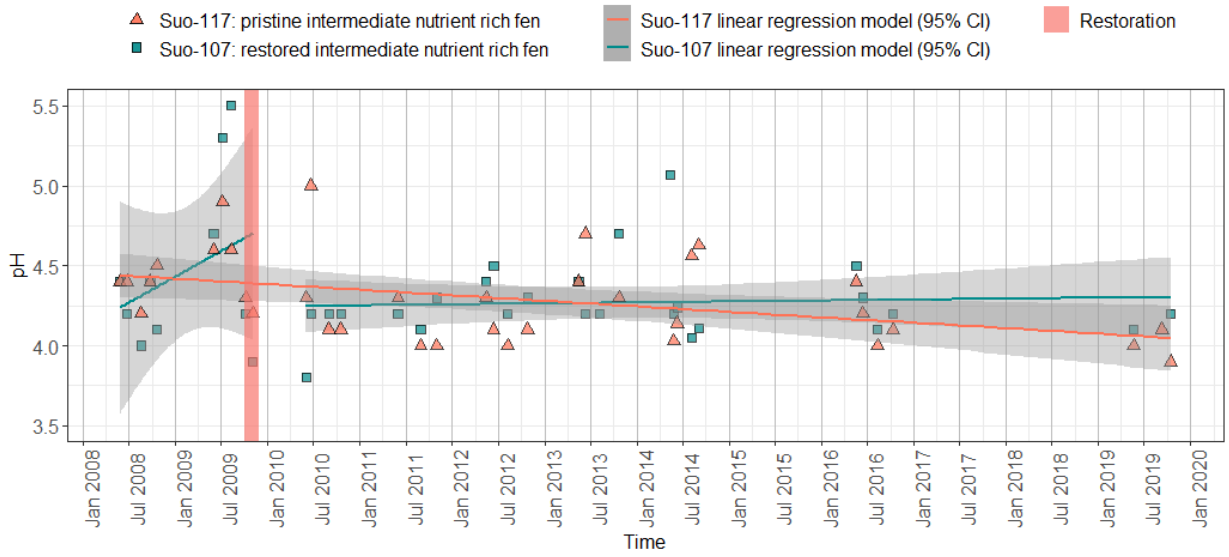


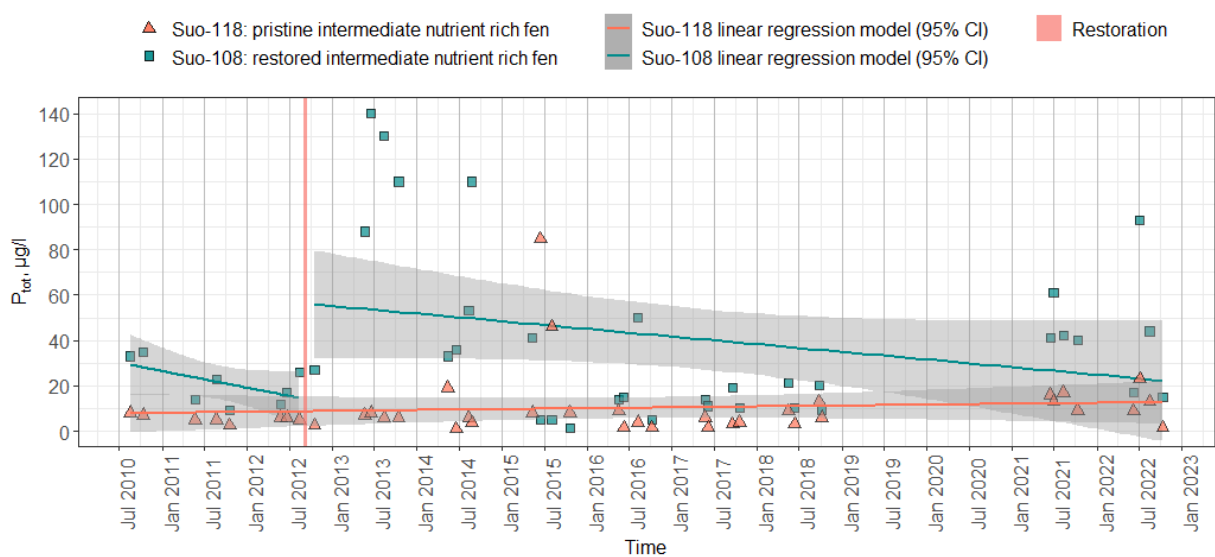
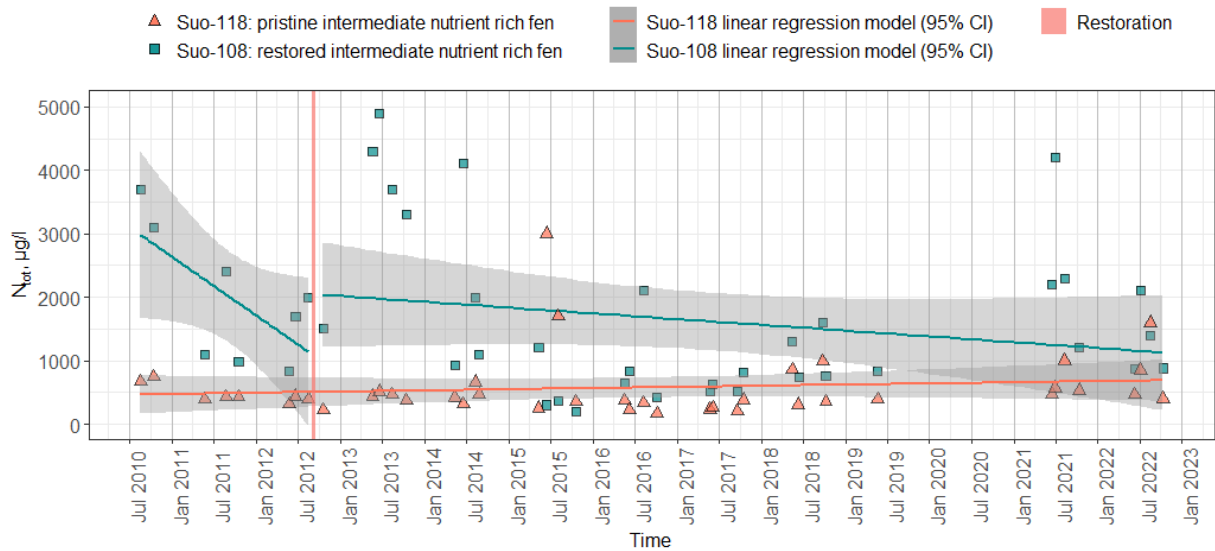
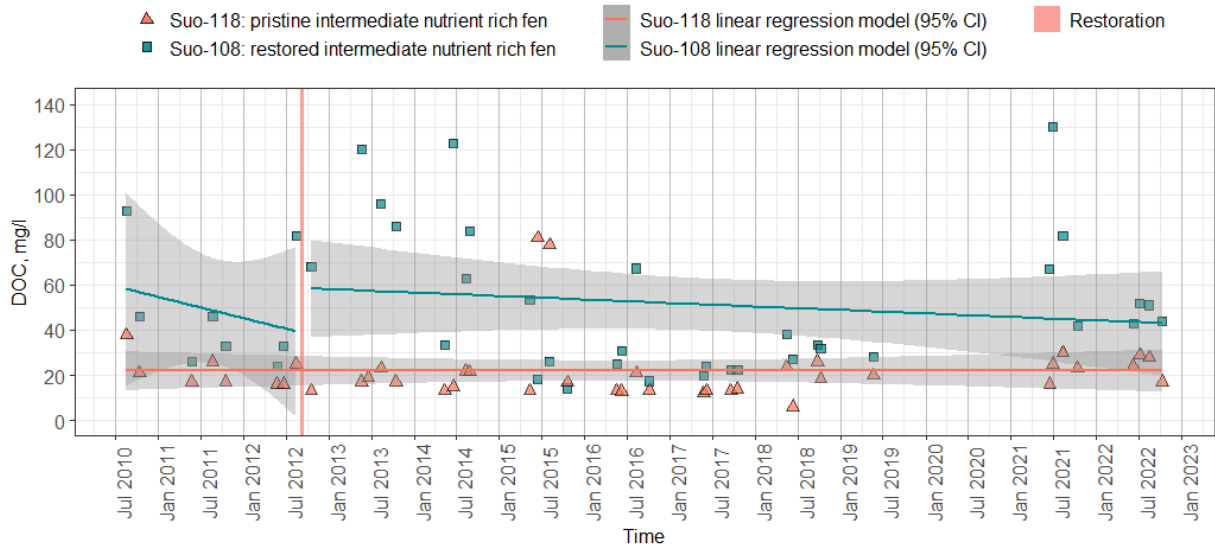


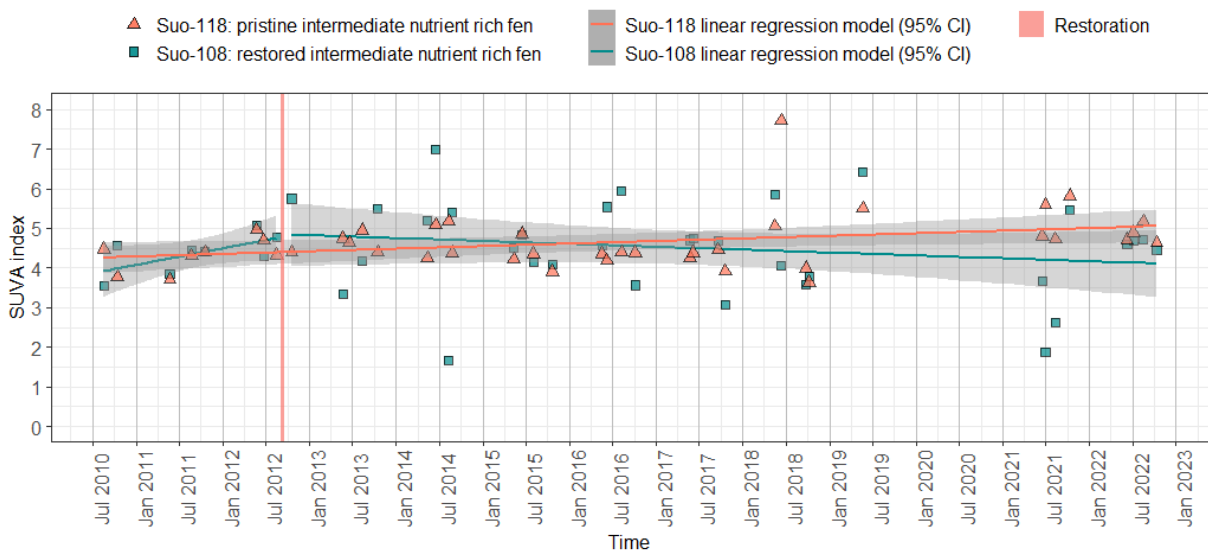
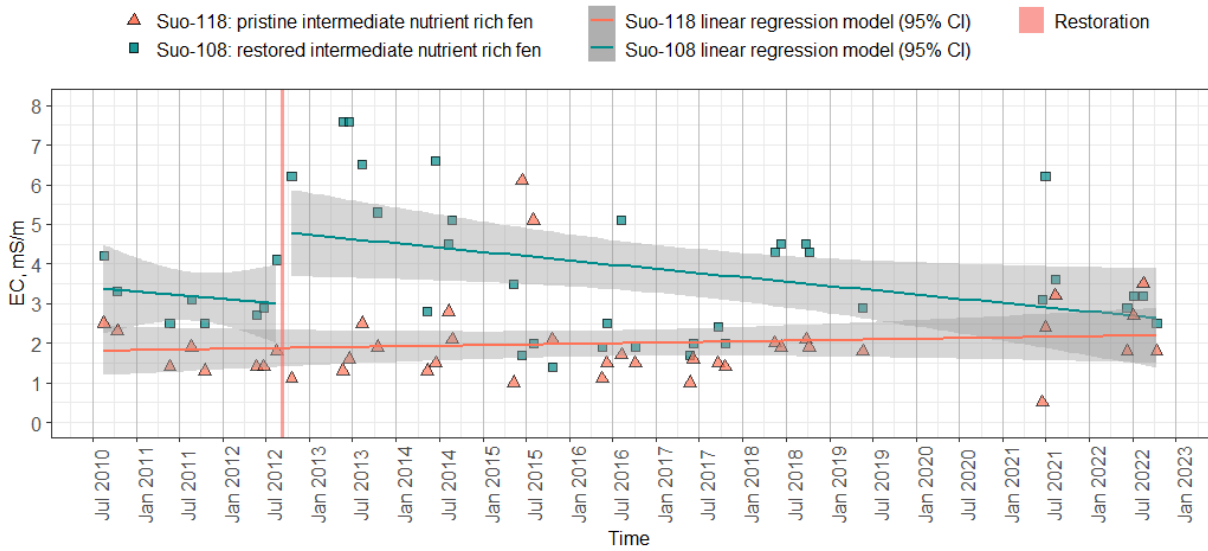
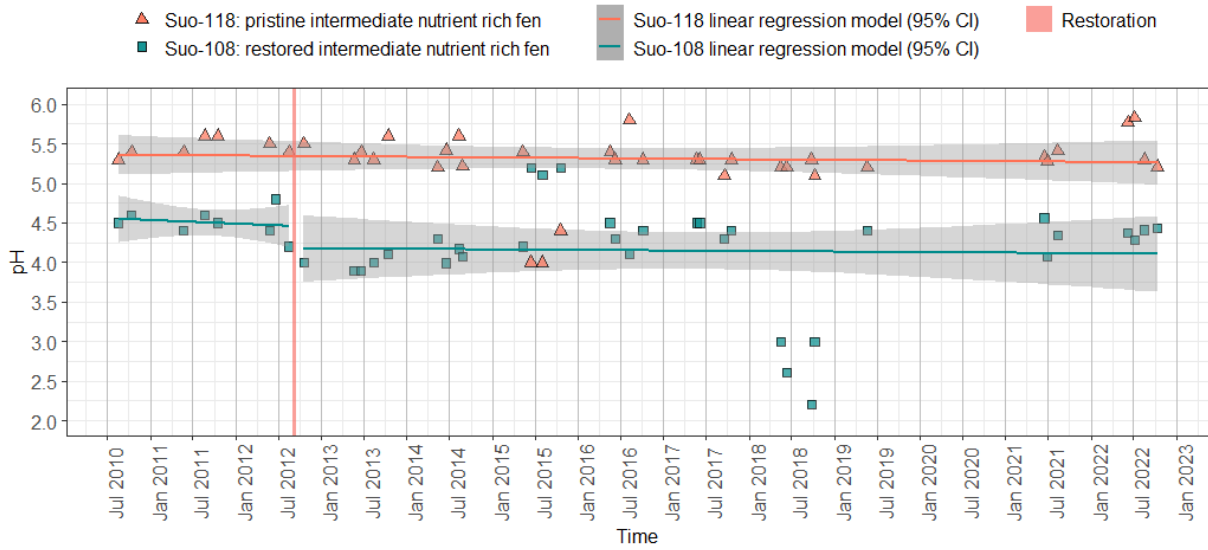


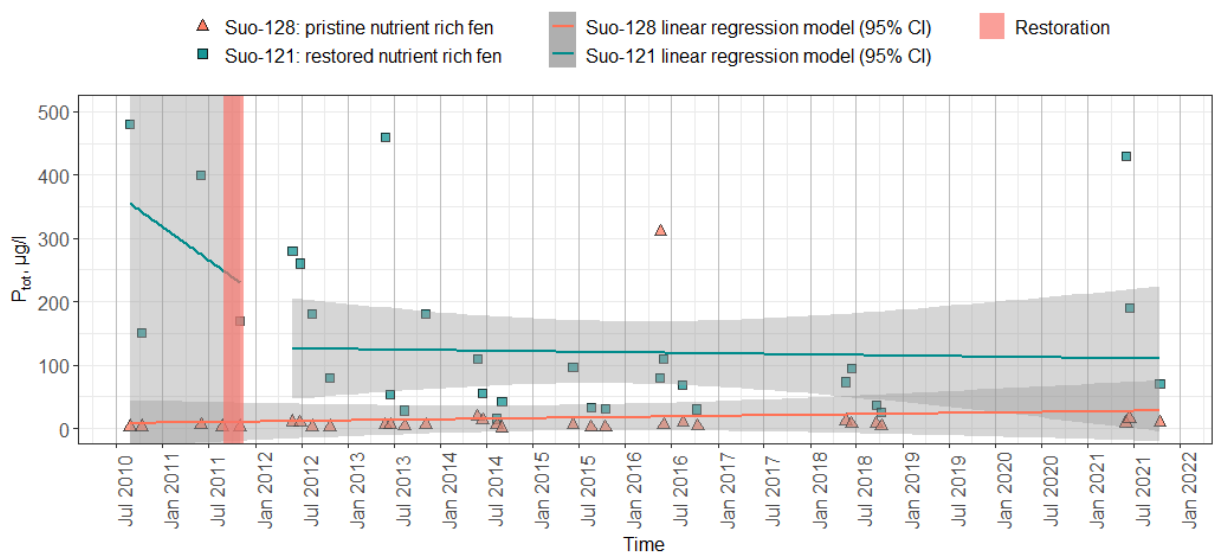
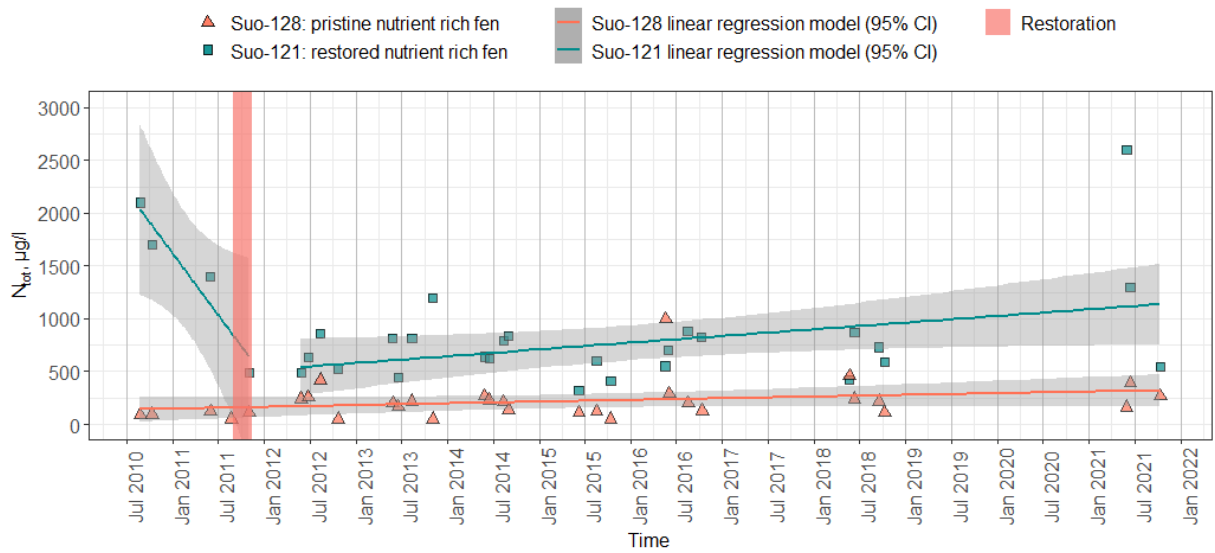
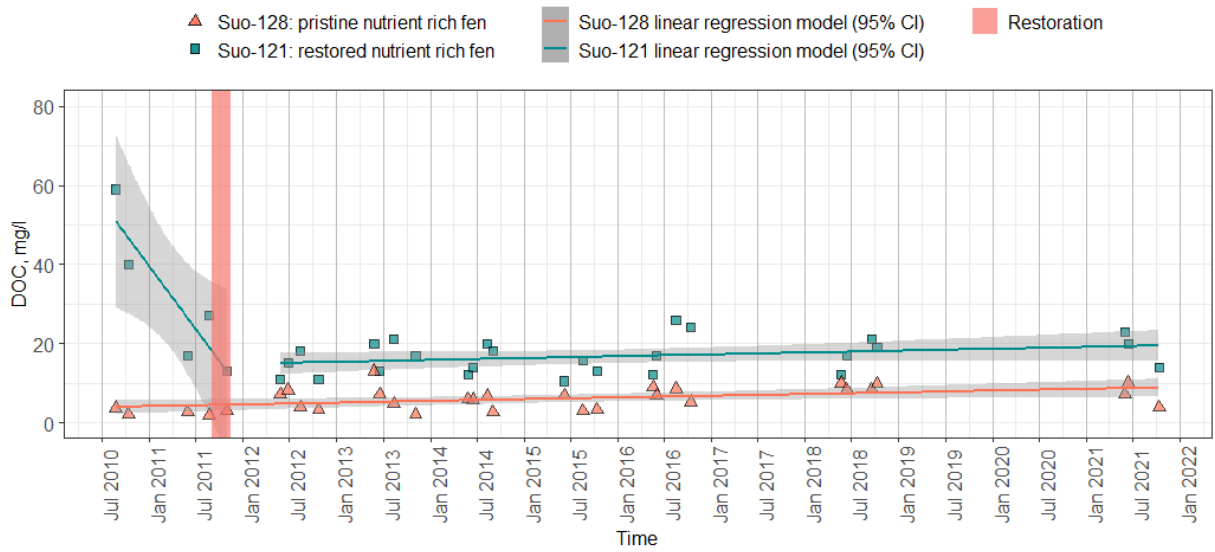


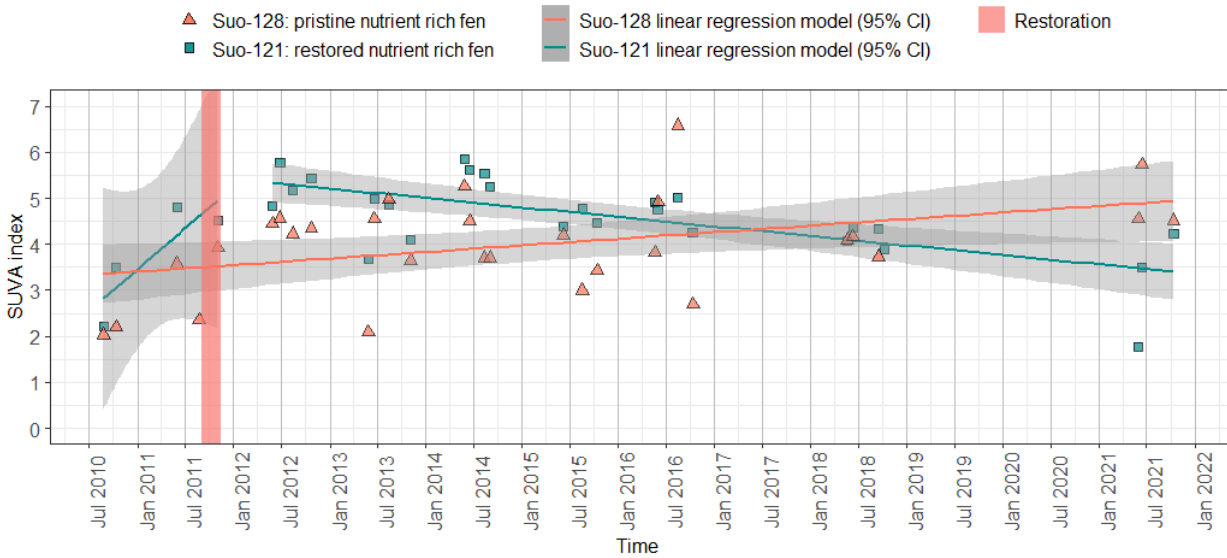
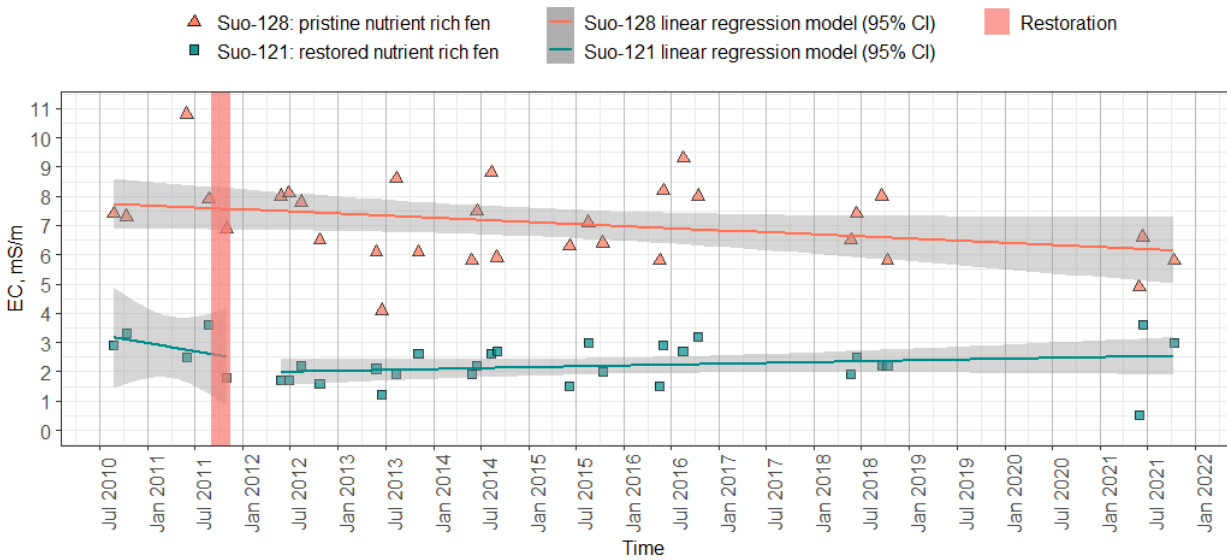
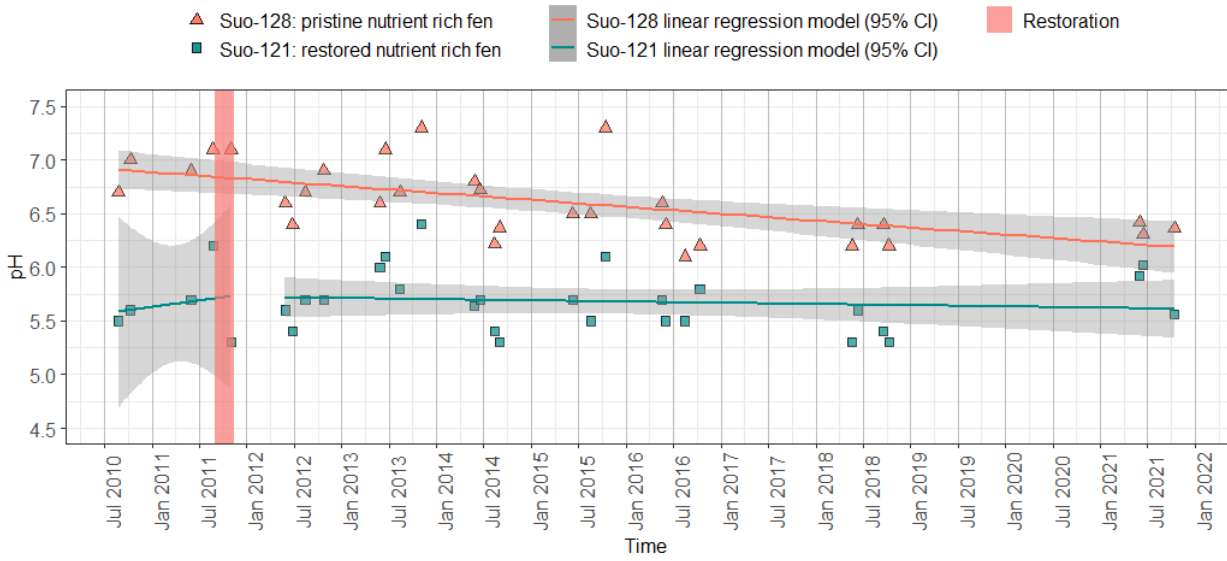


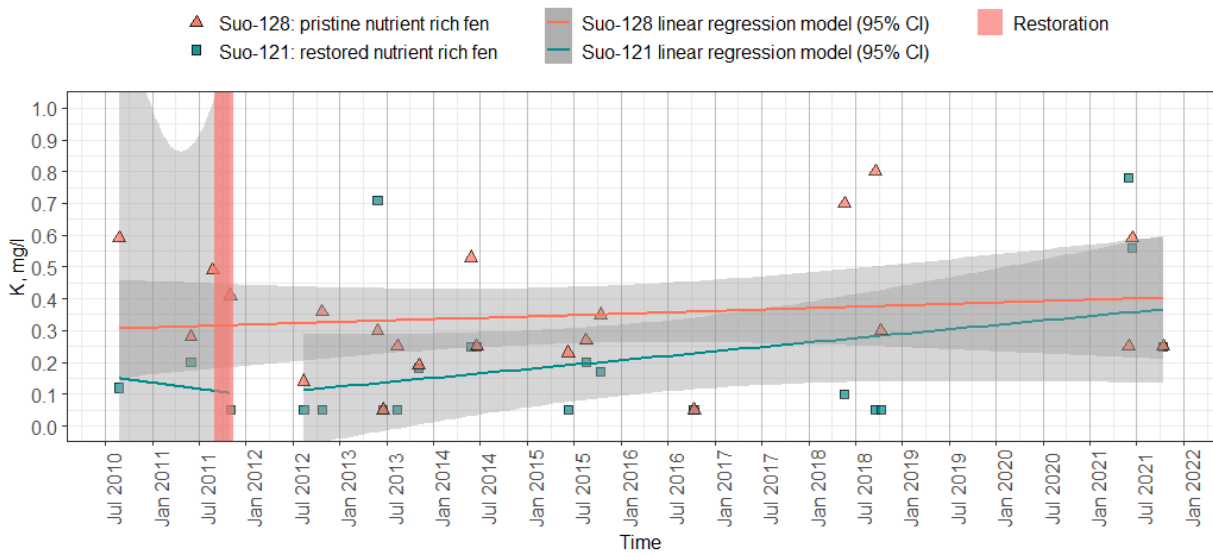
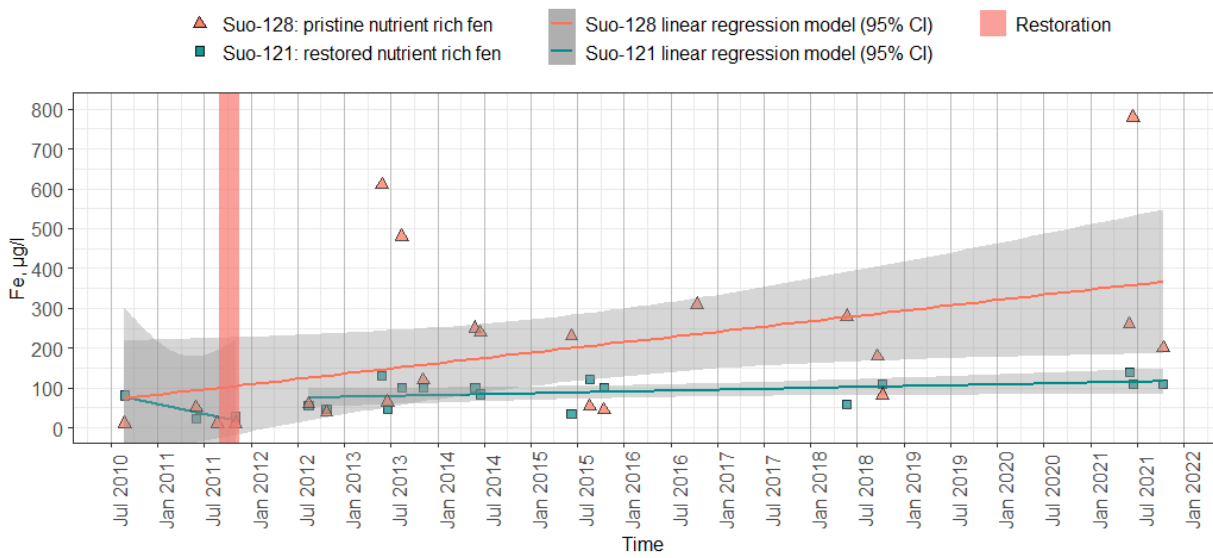
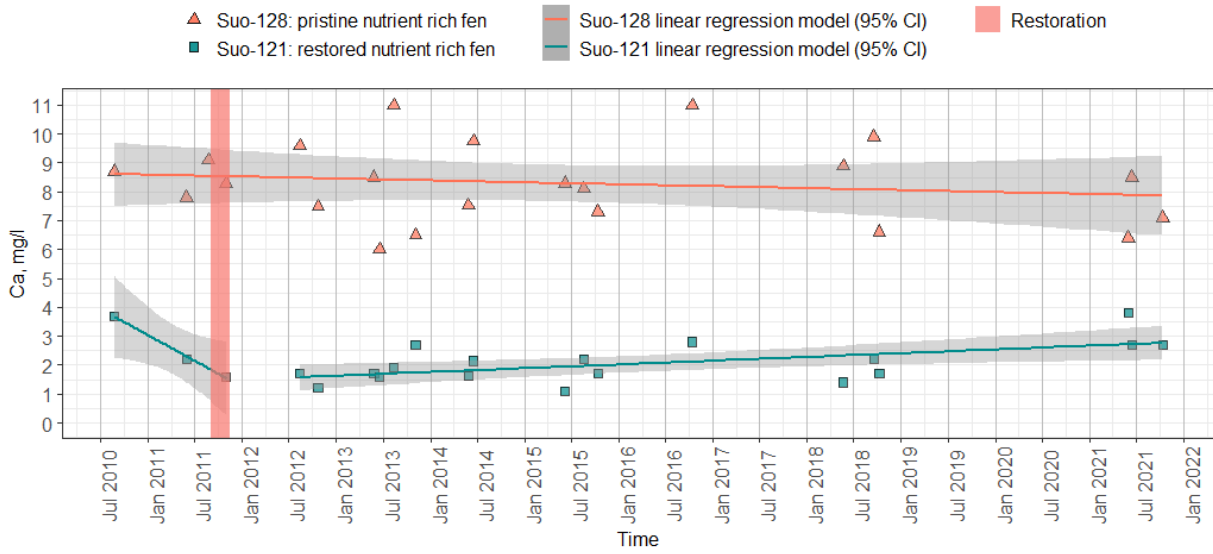


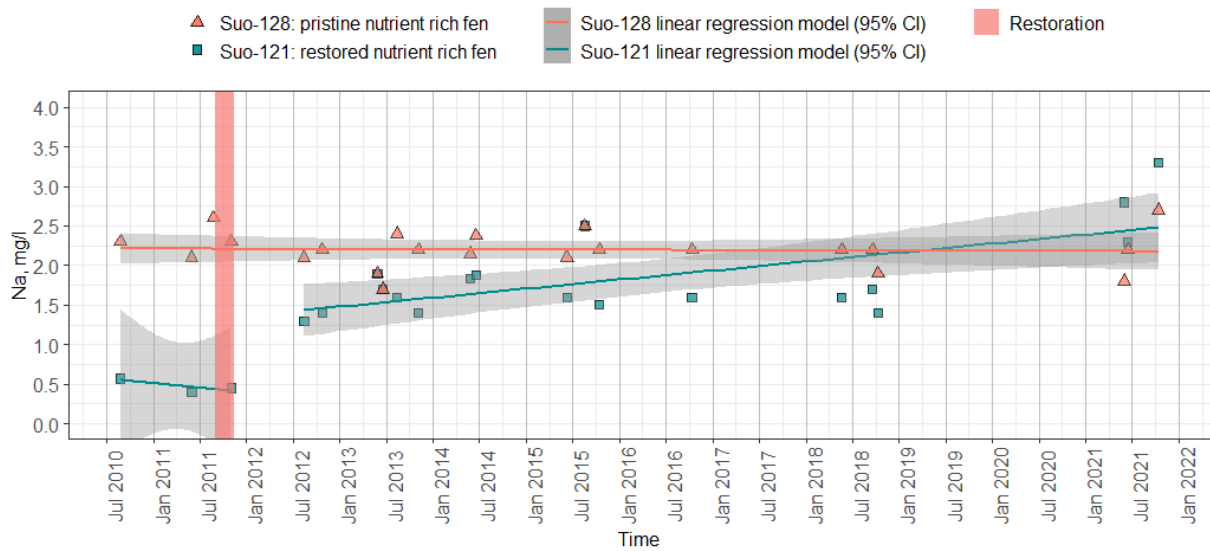


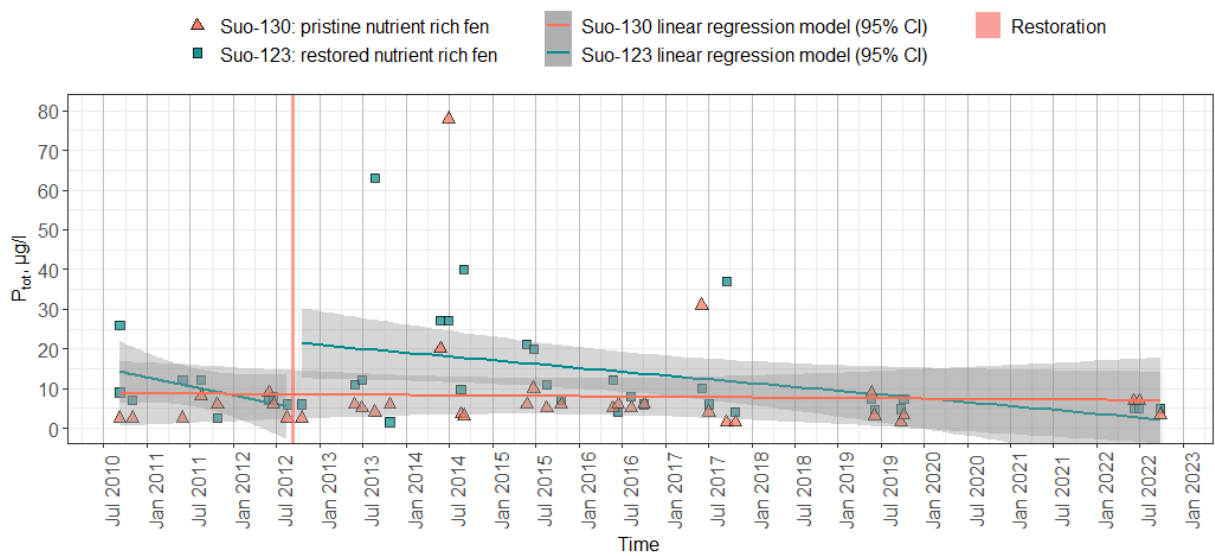
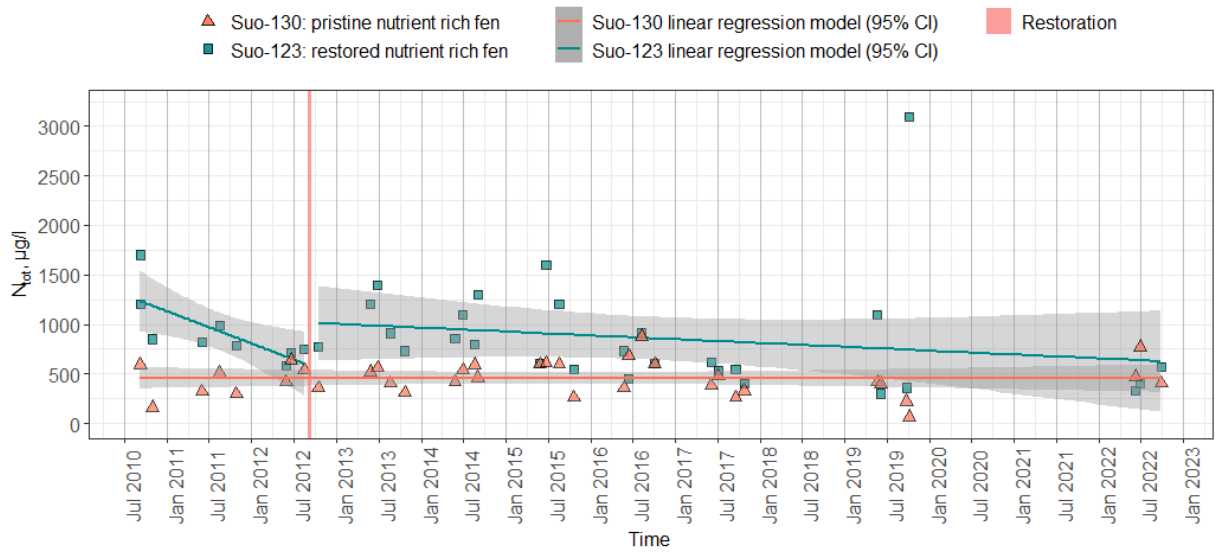
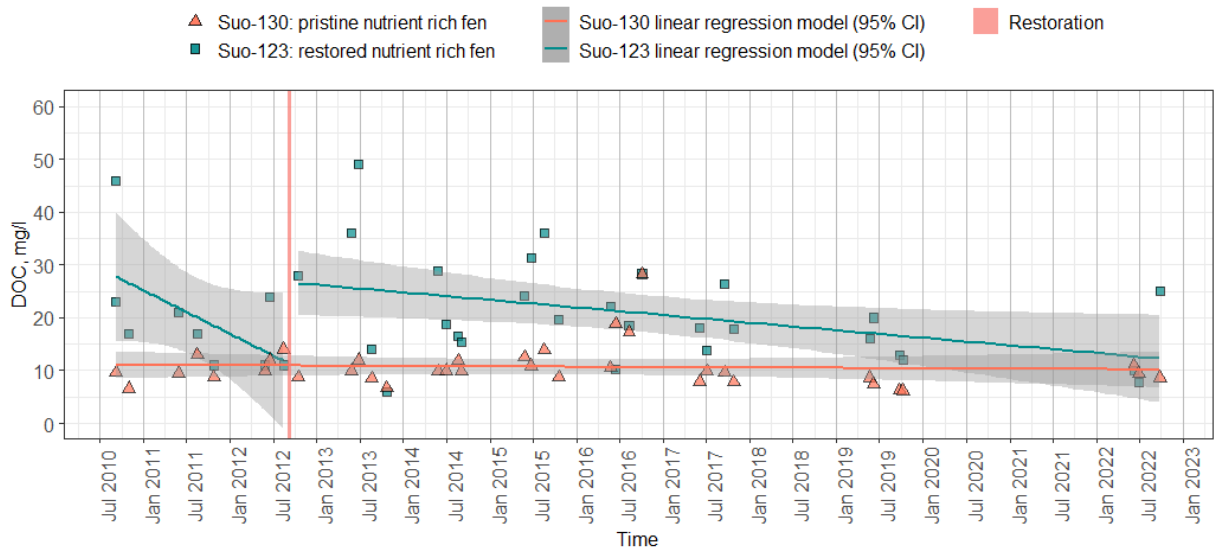


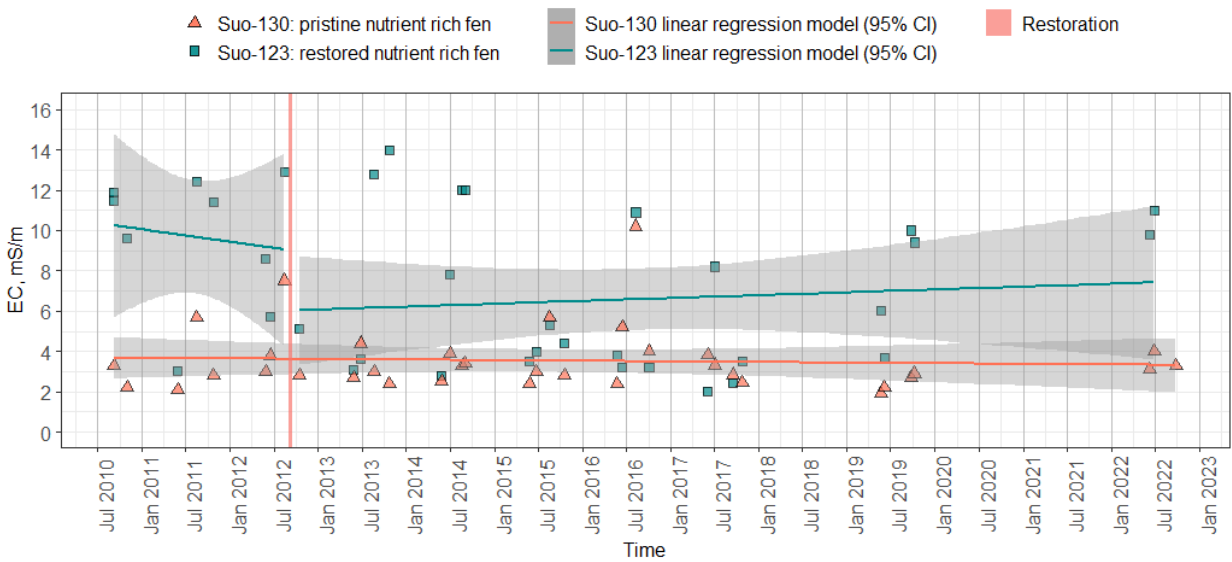
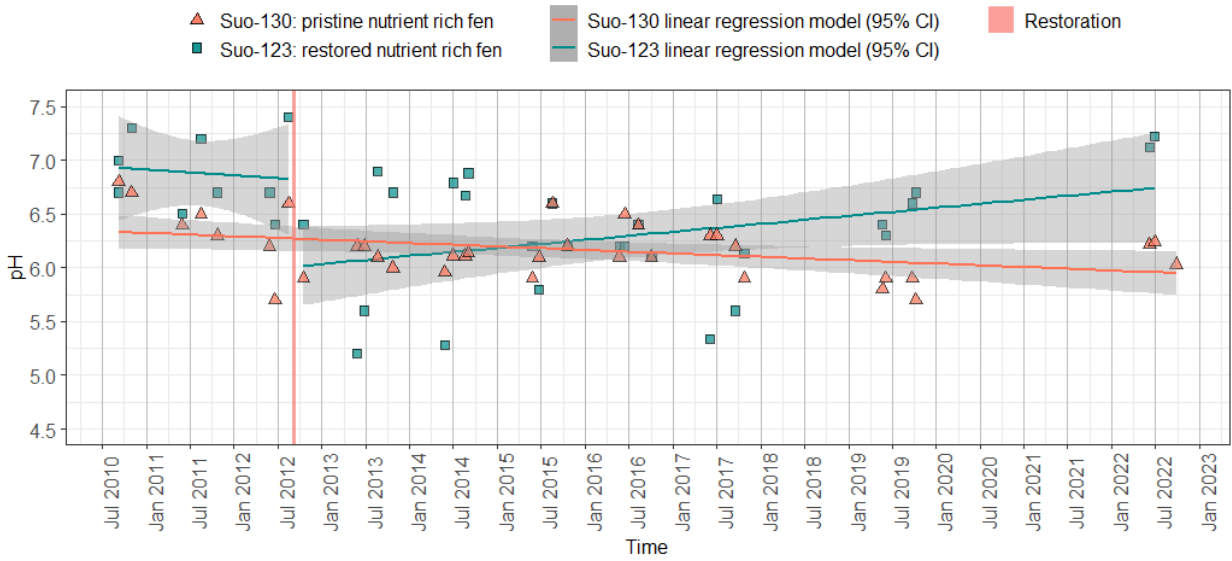


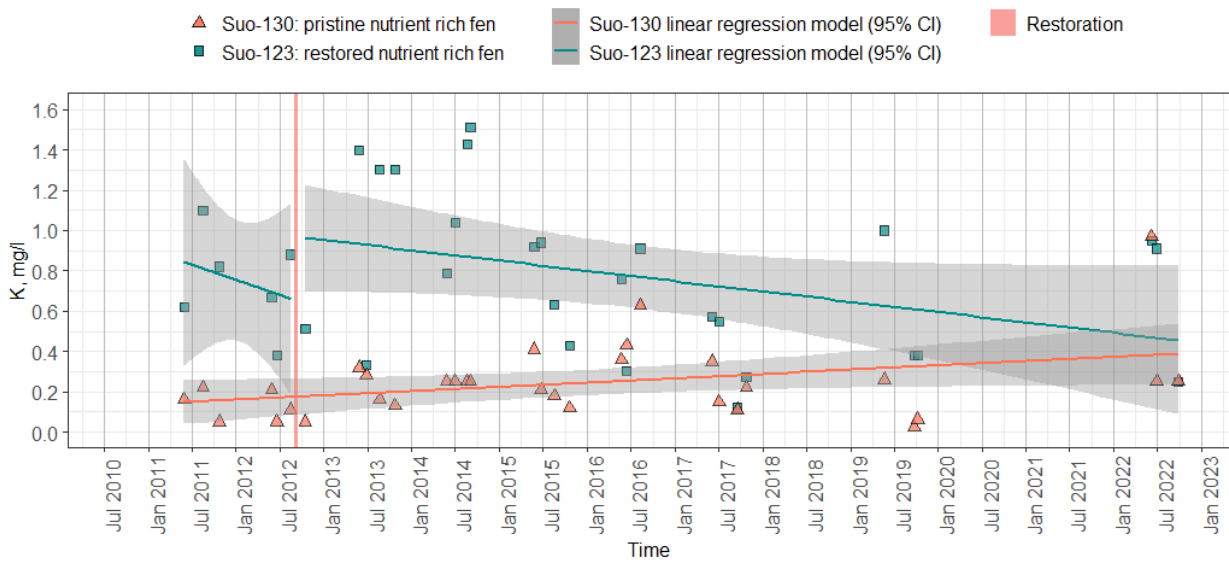
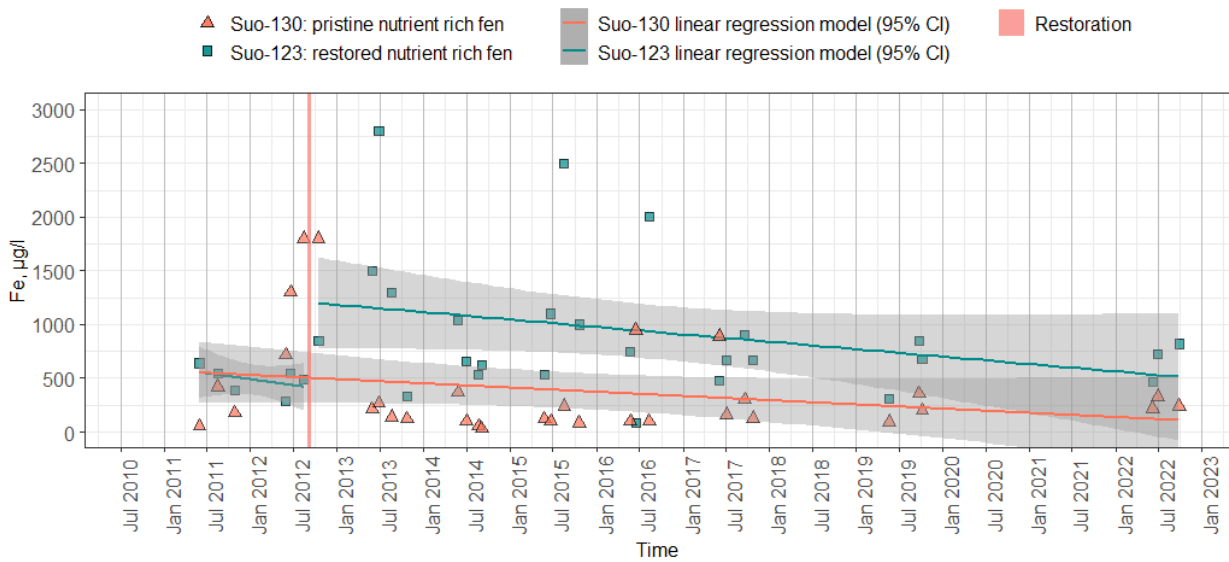
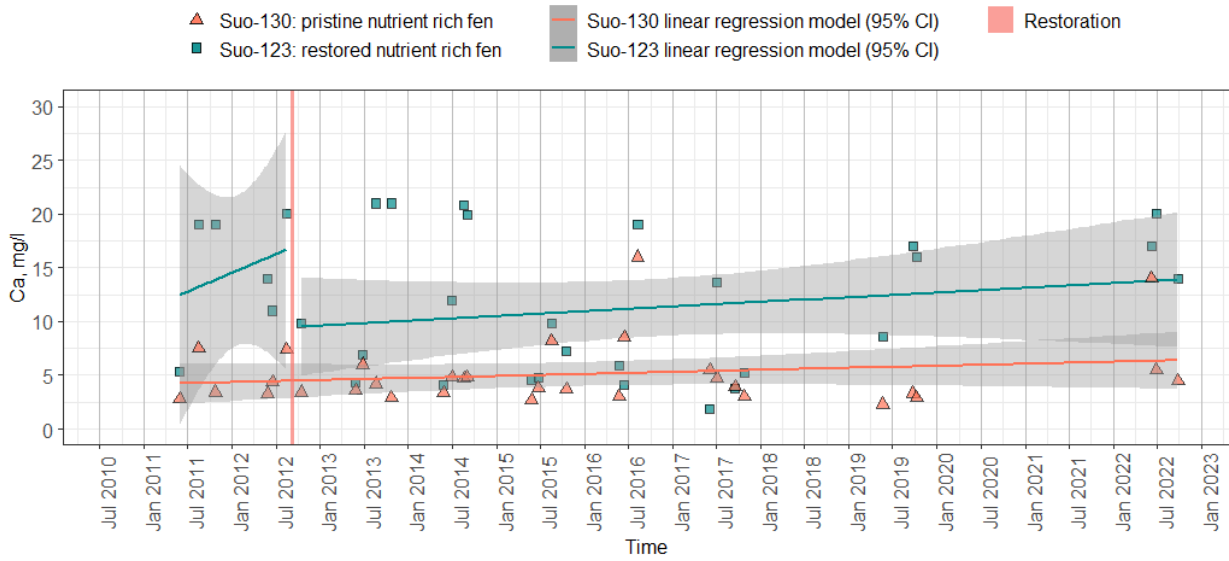


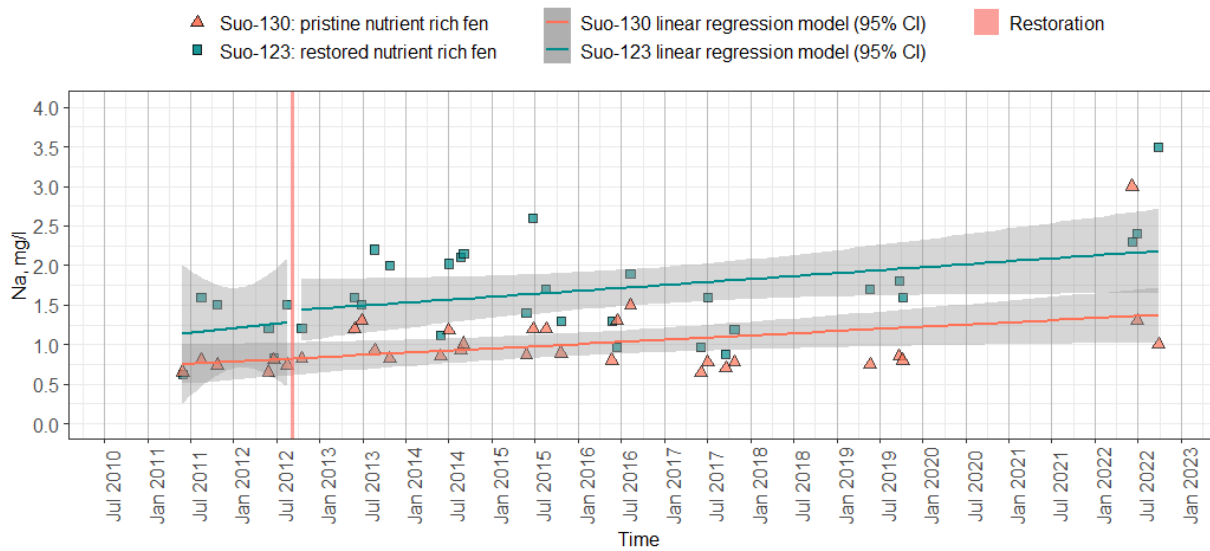


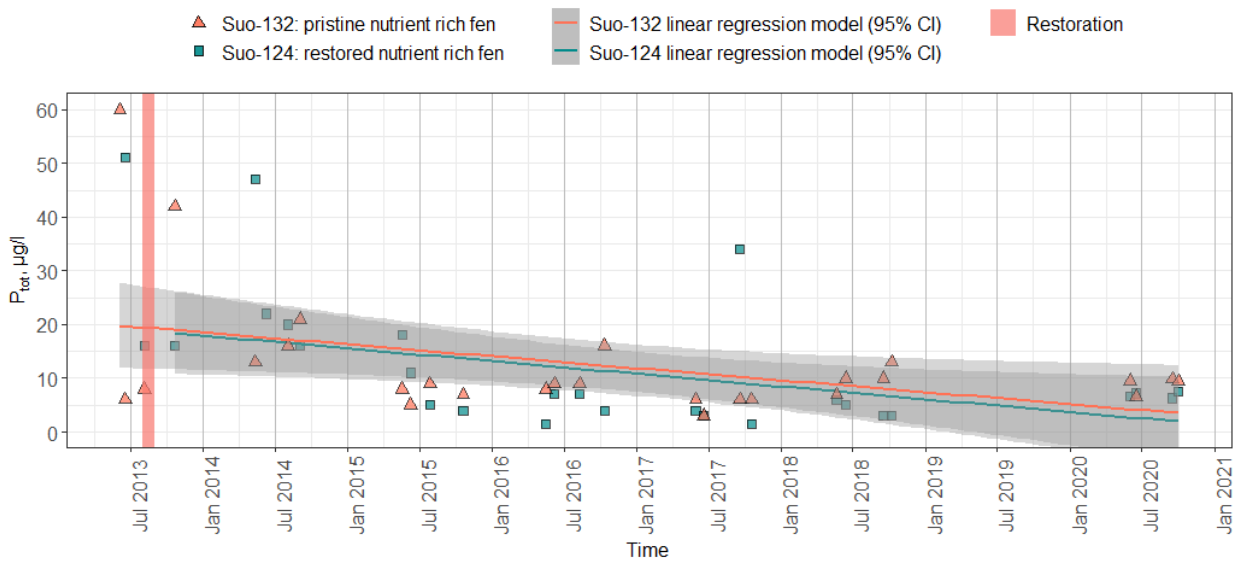
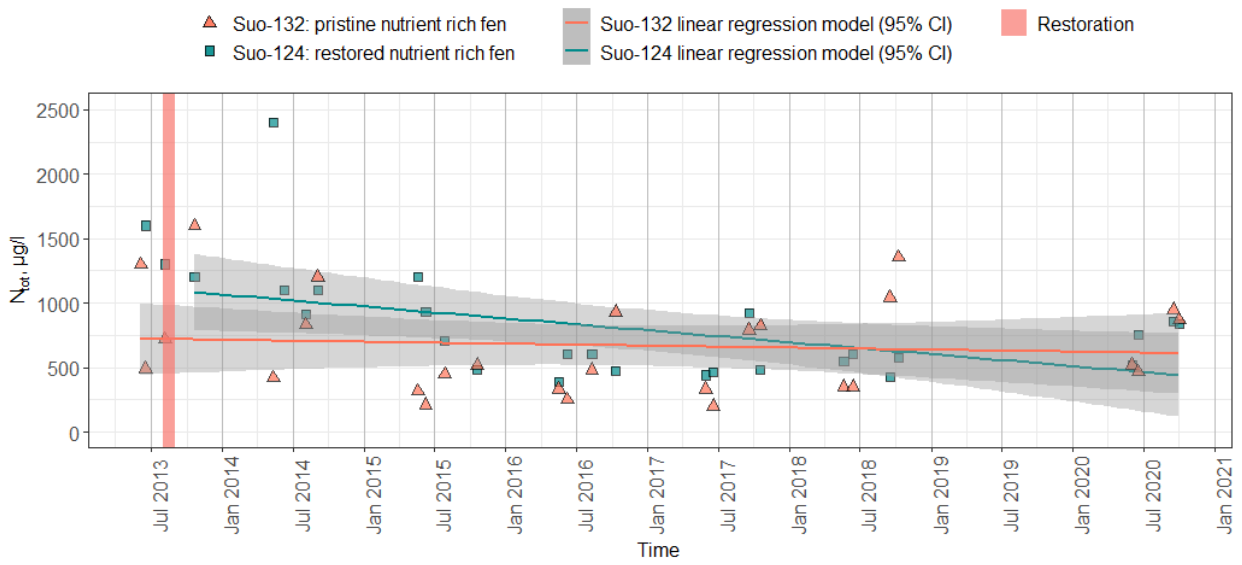
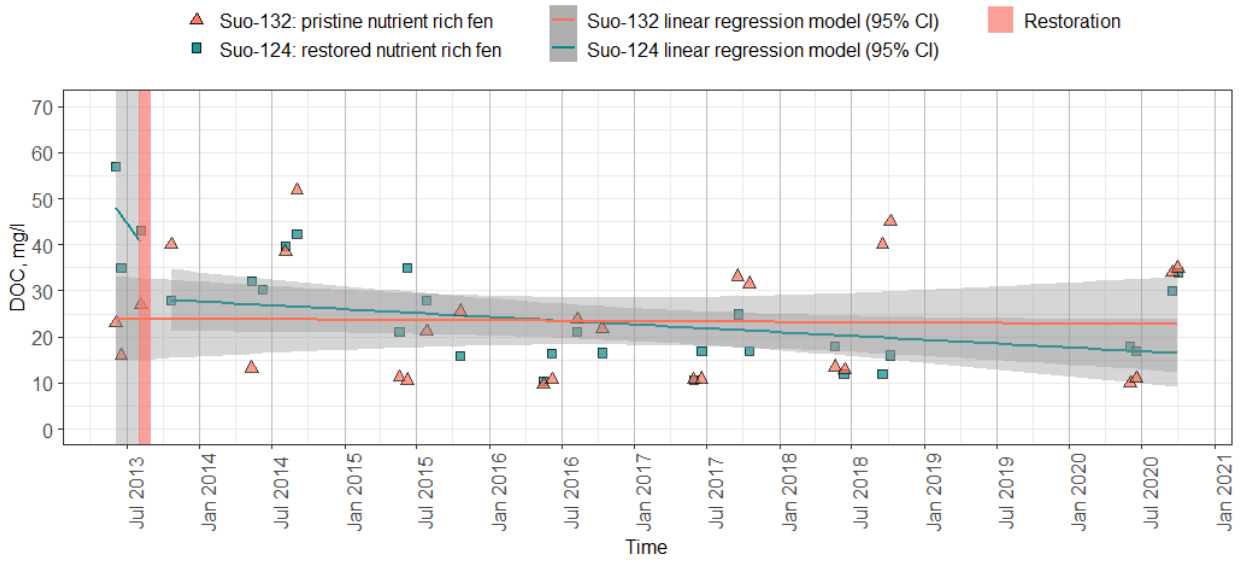


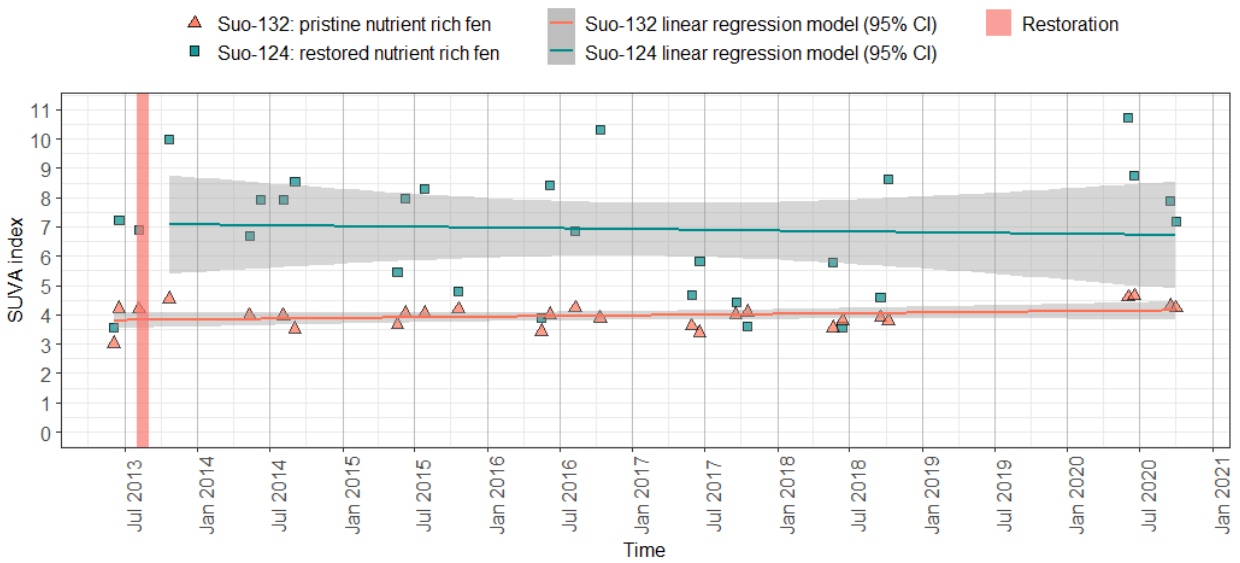
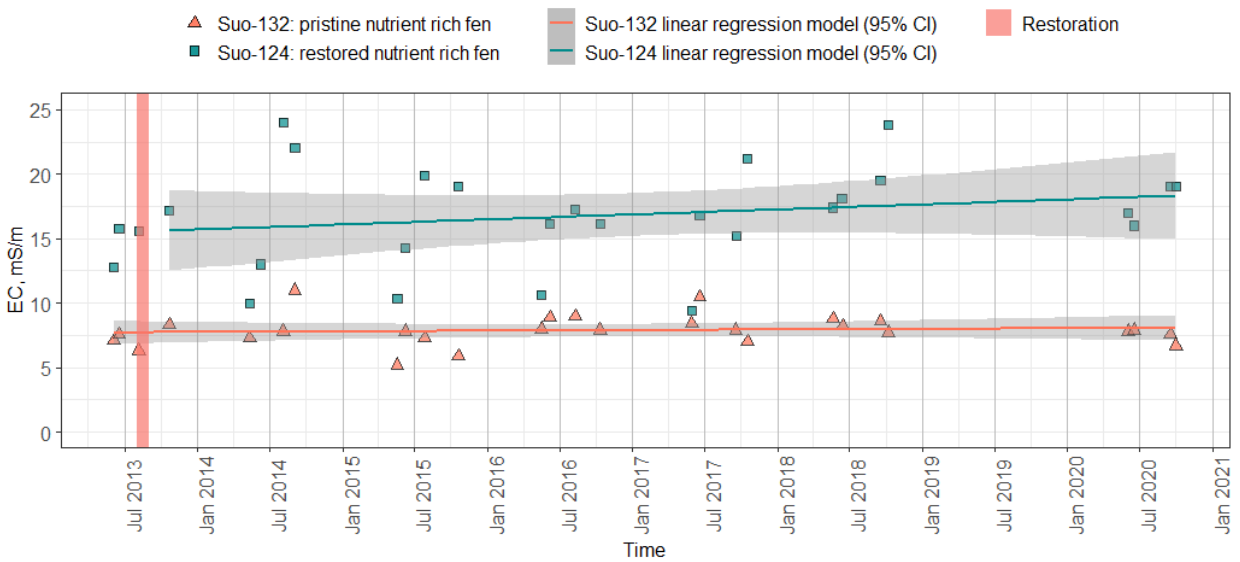


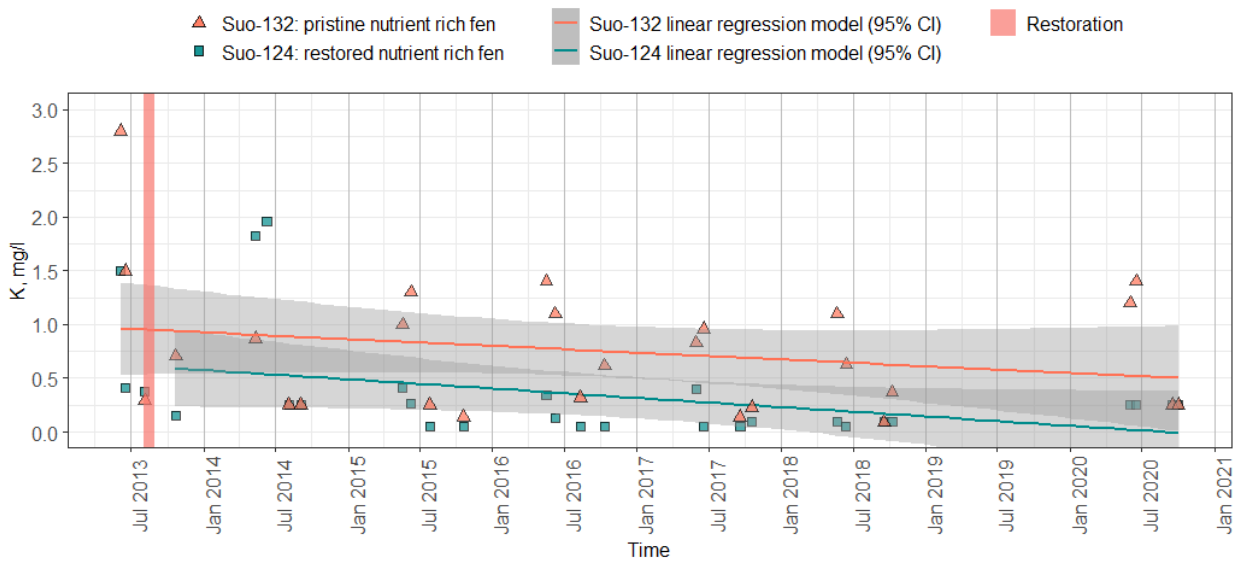
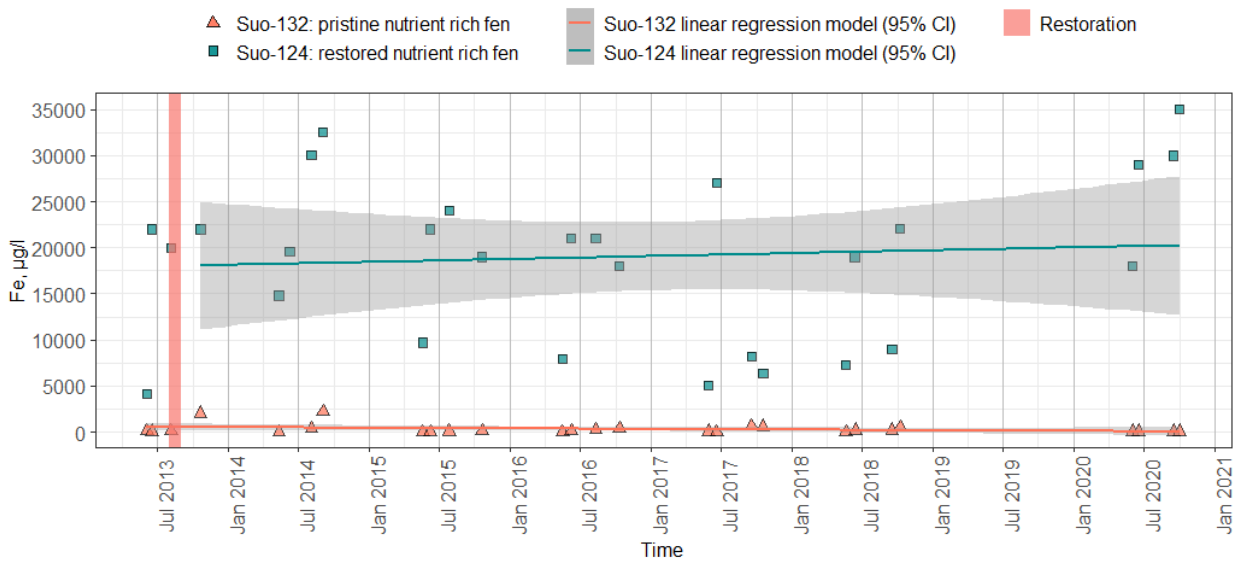
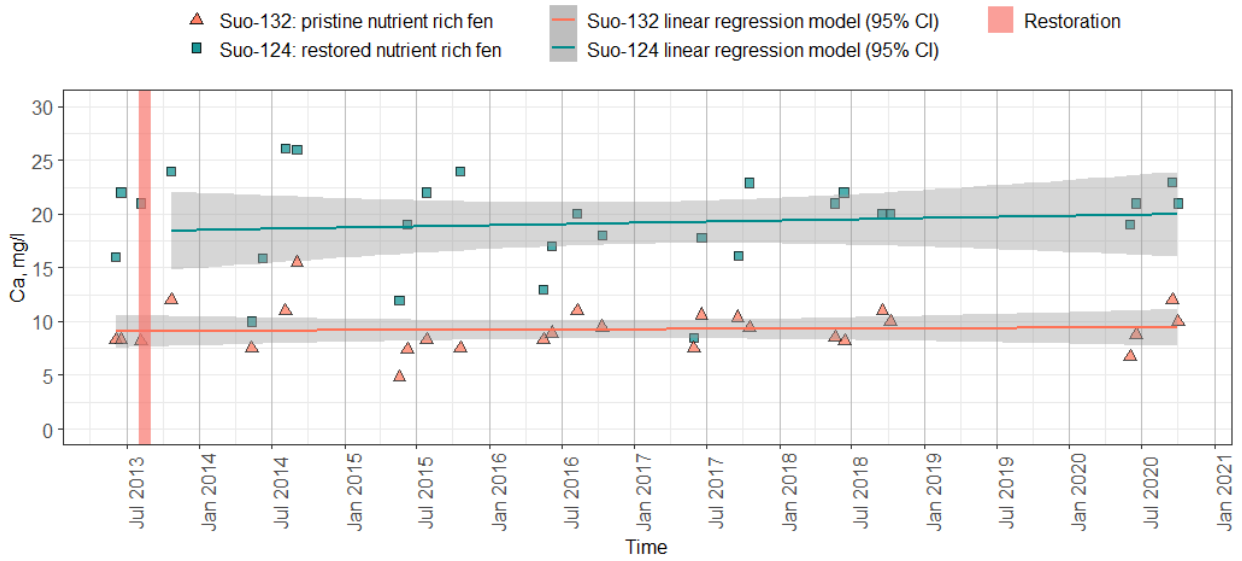


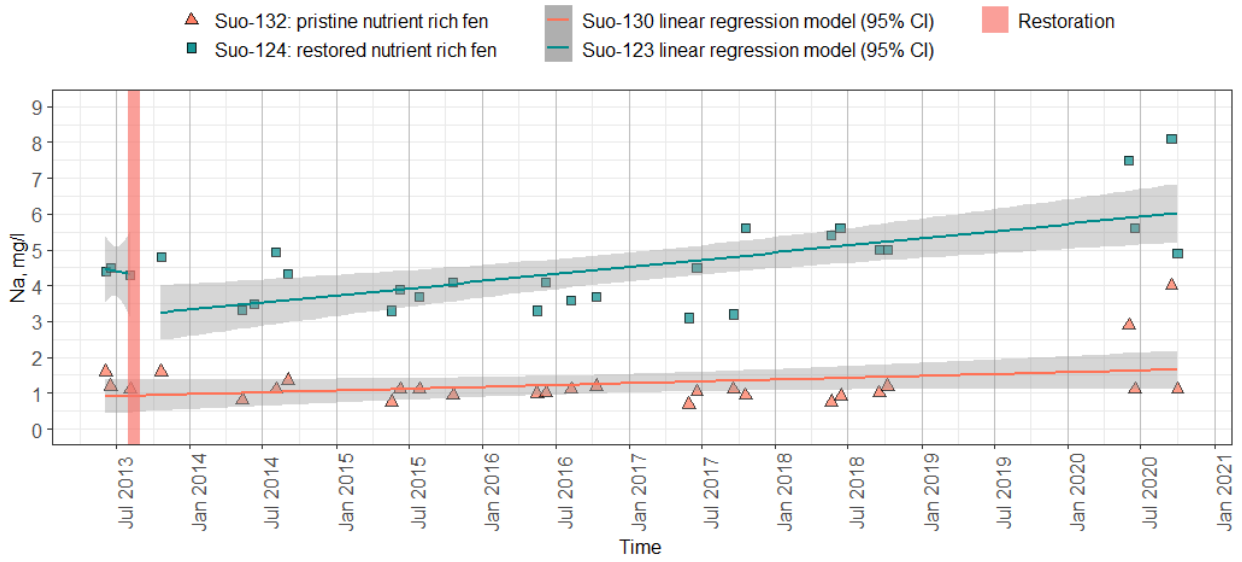
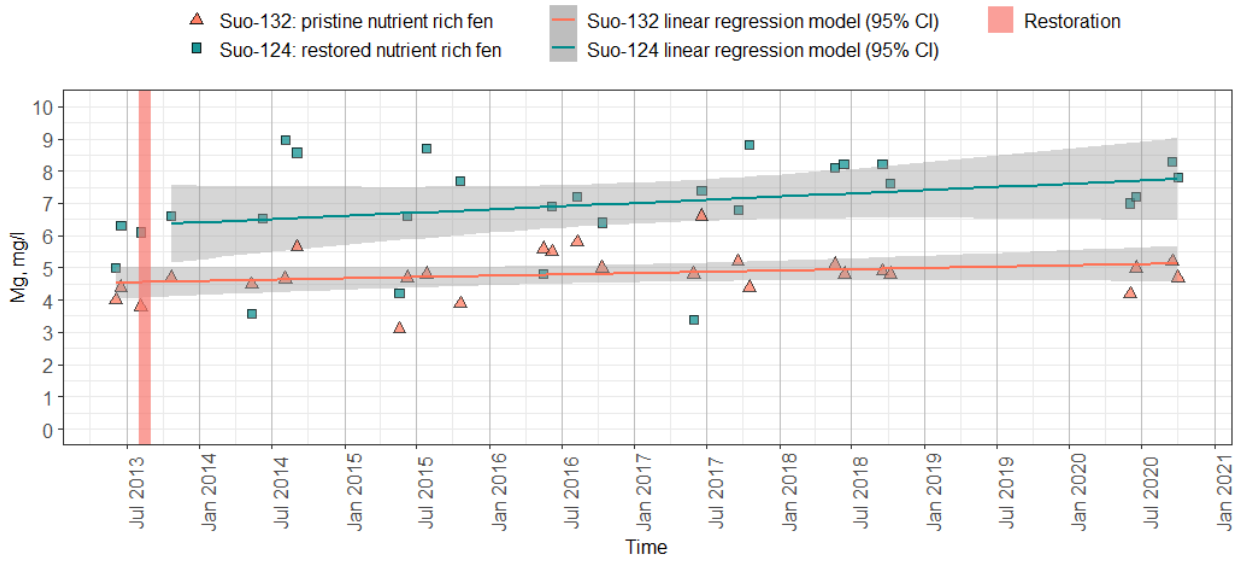




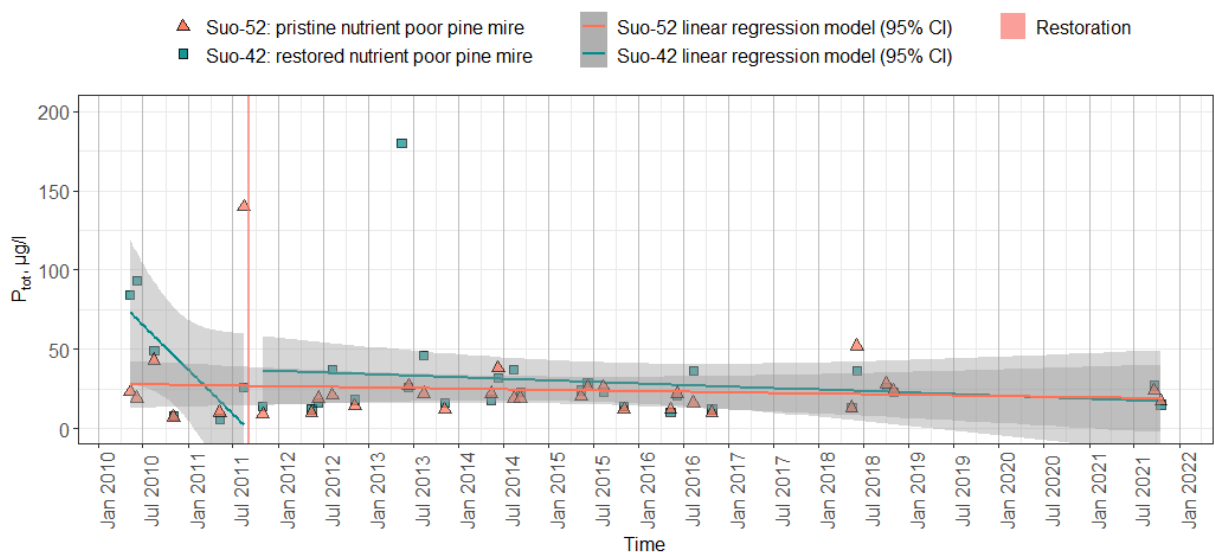
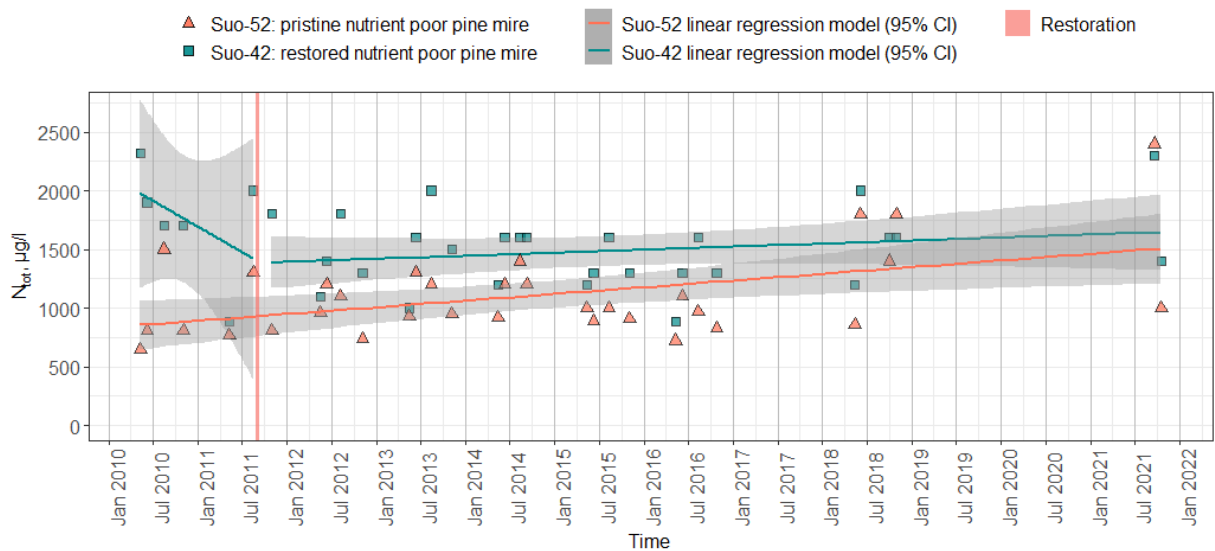
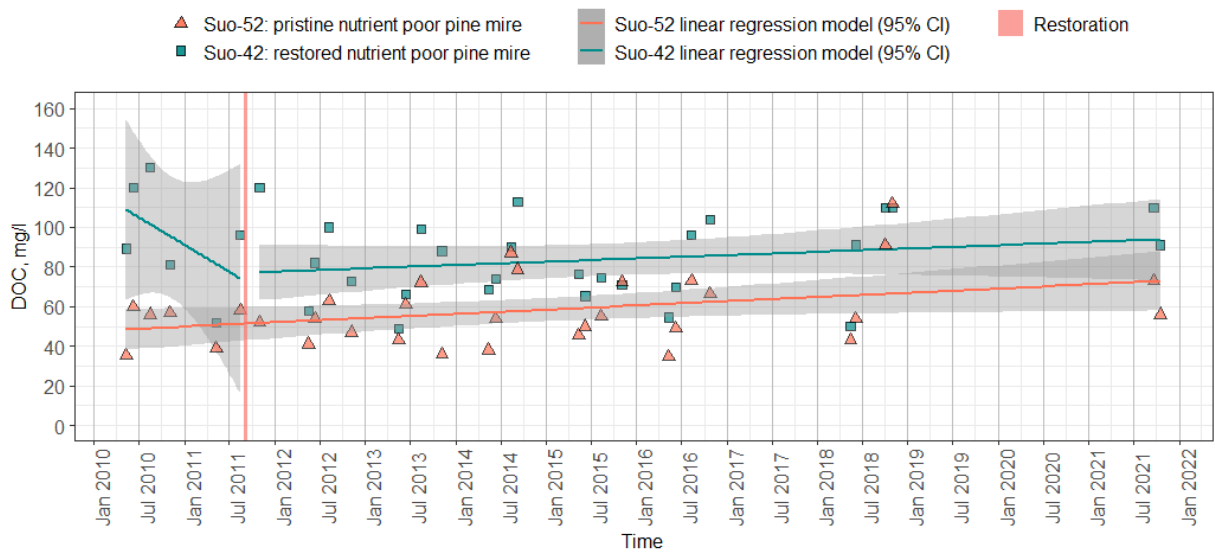


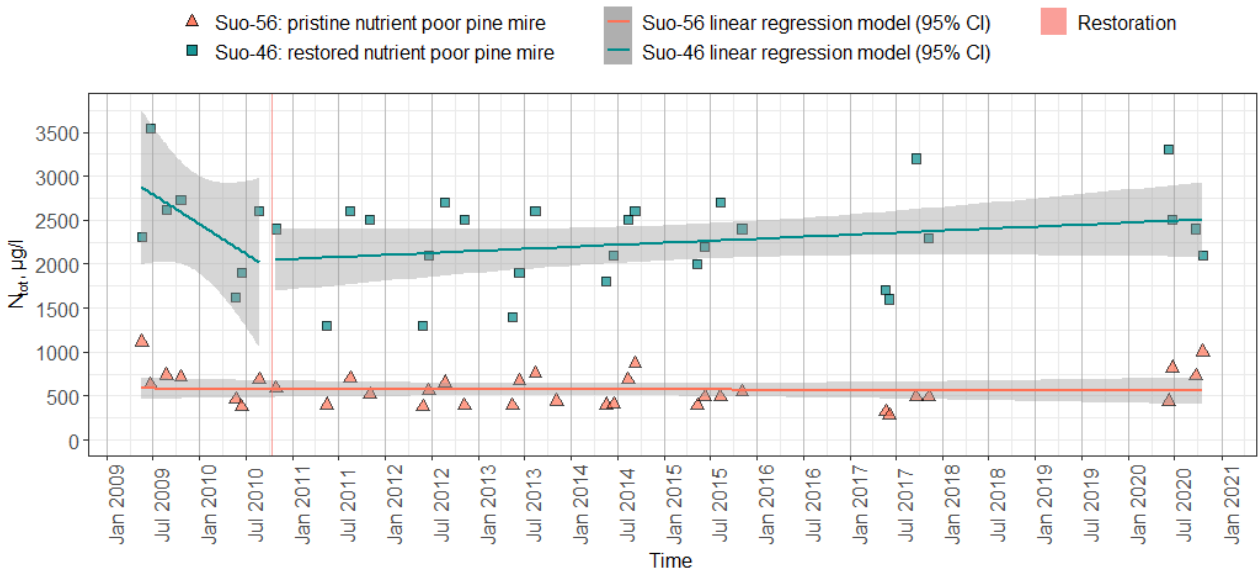
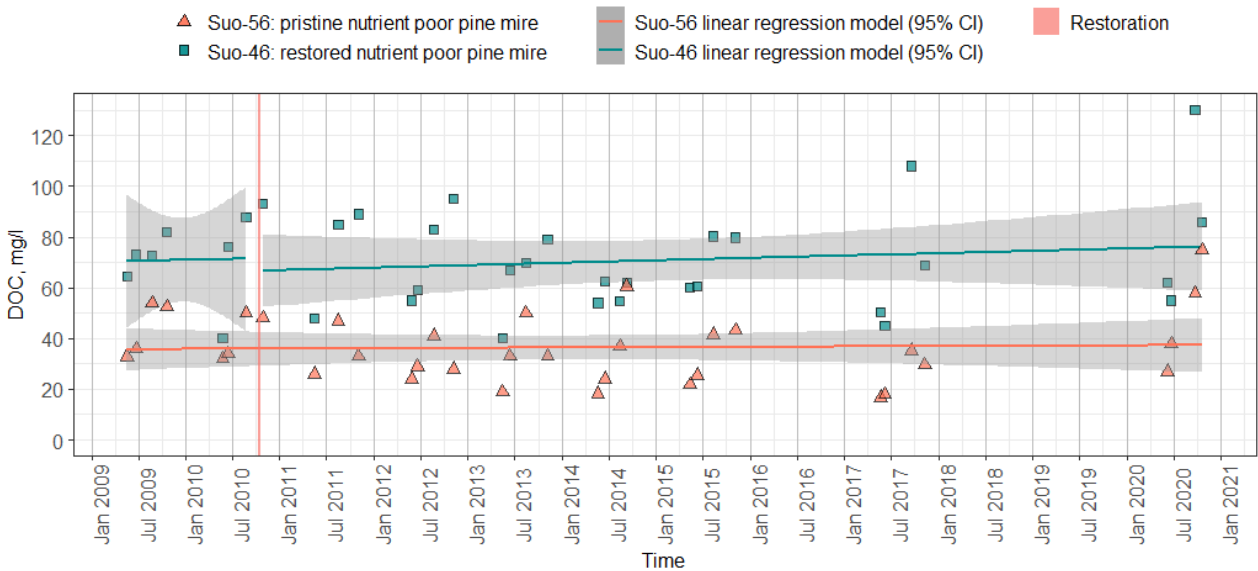
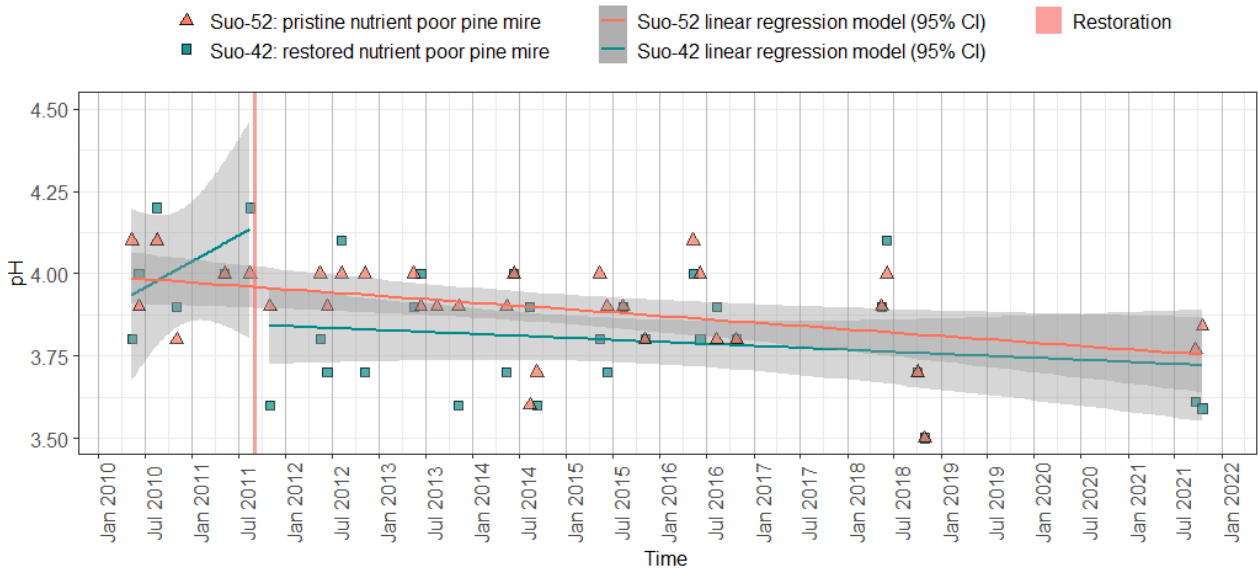


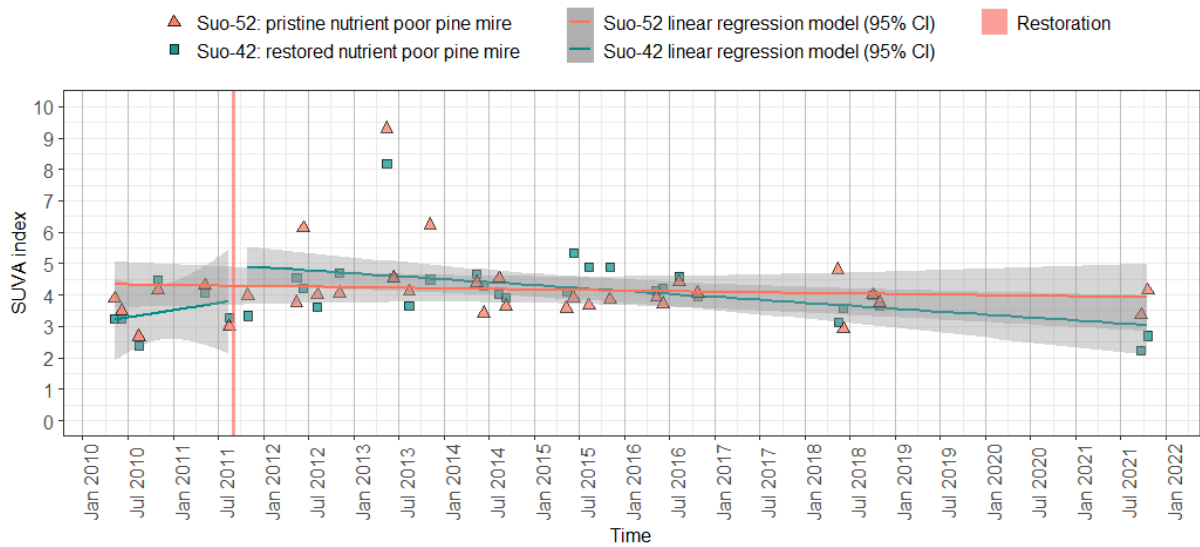
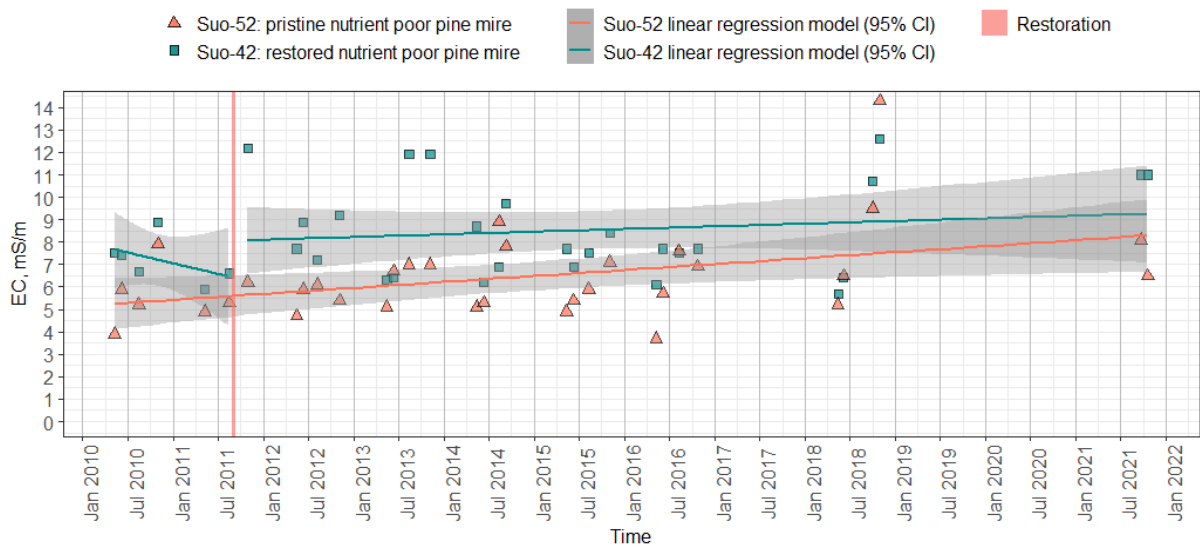
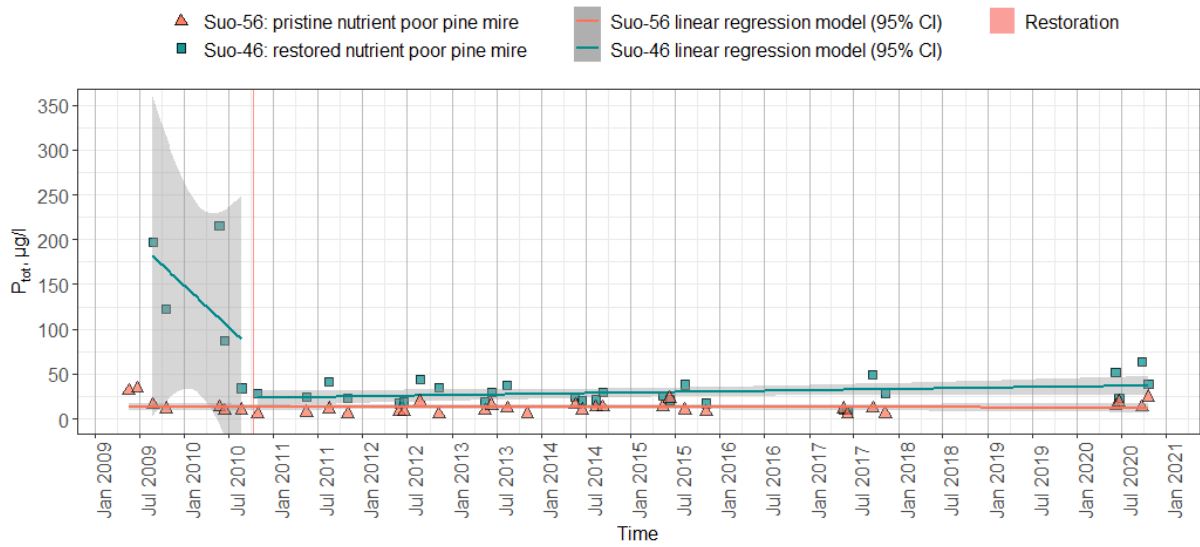


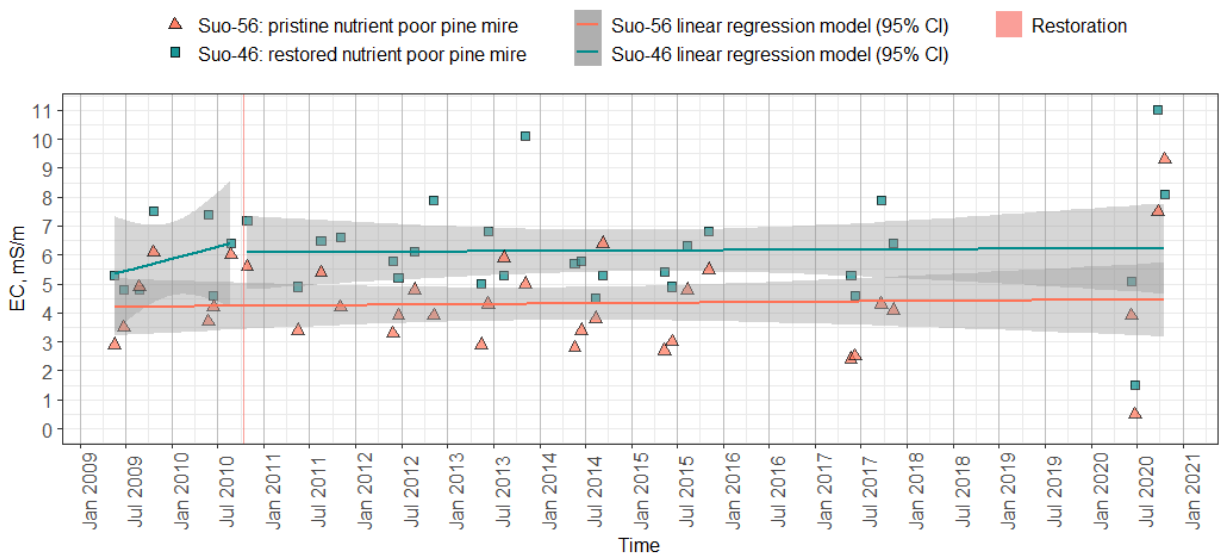
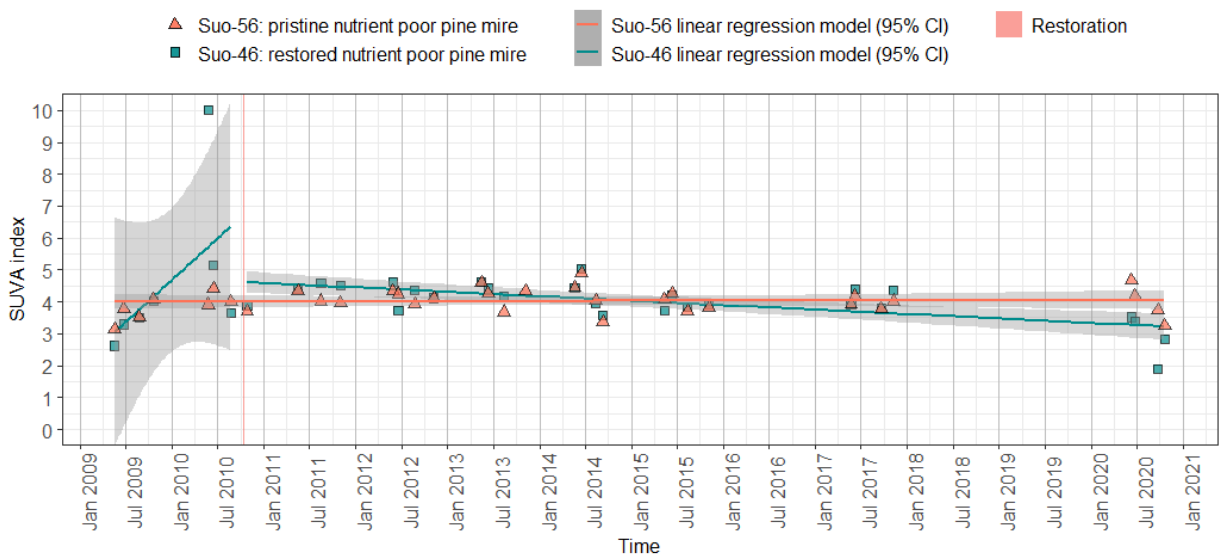
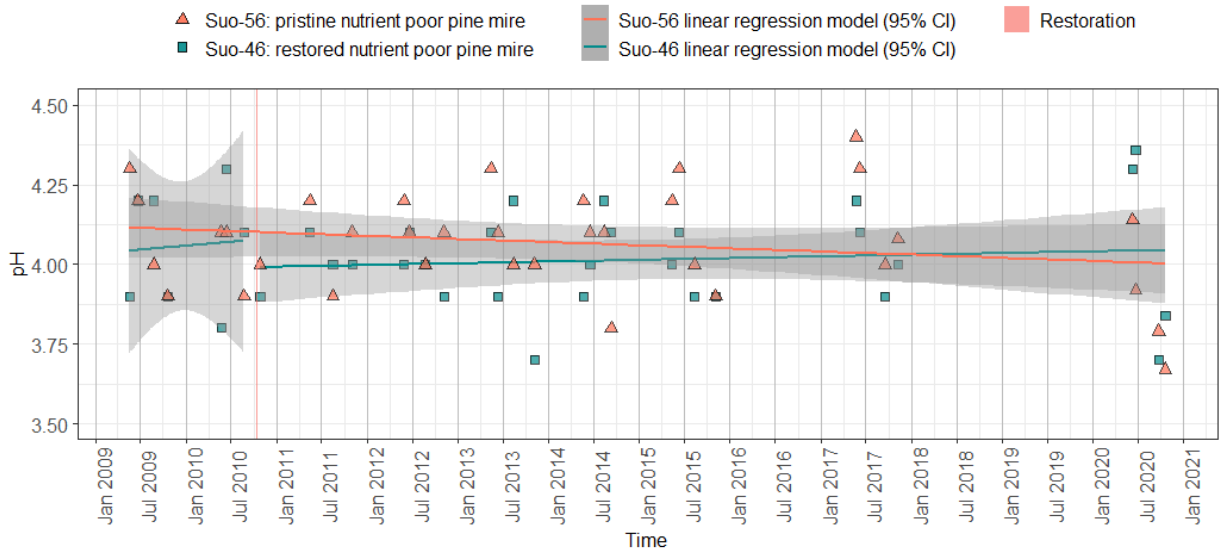


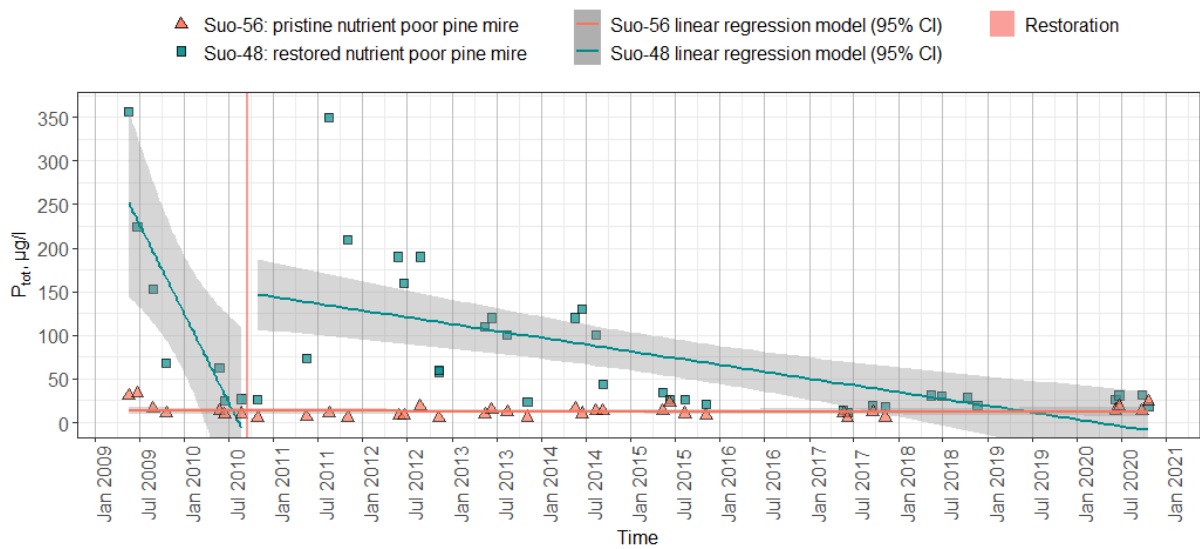
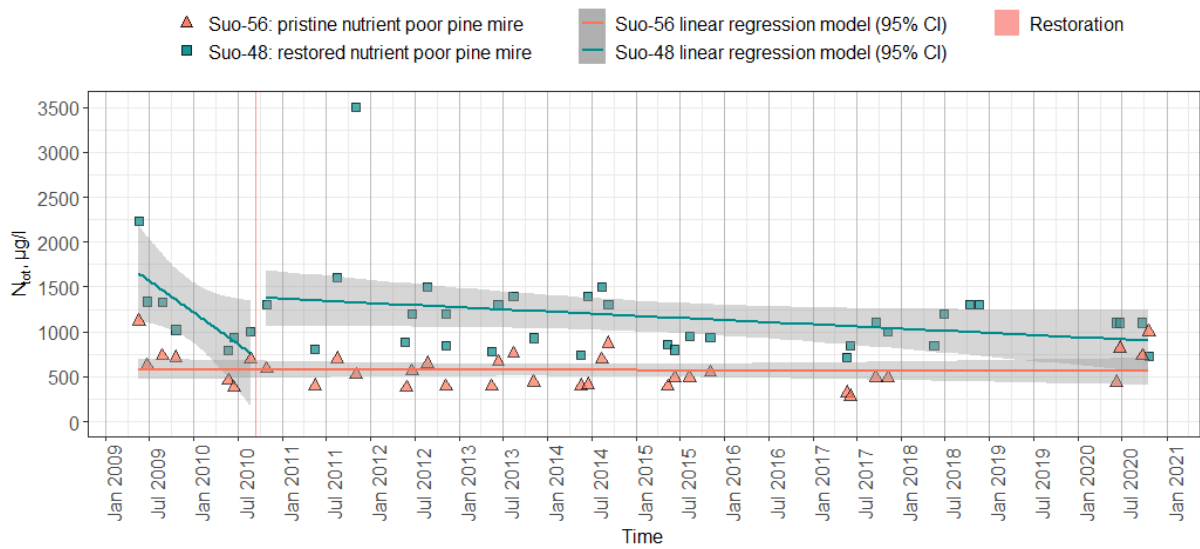
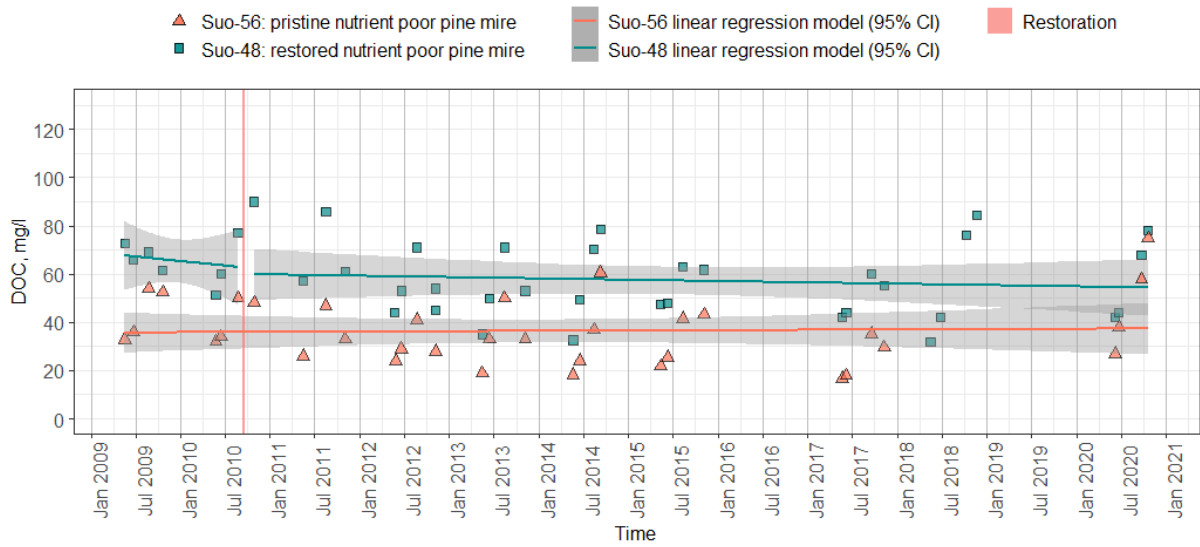
Liite 2B. 10-vuotisvedenlaatuvertailut seurantaverkoston rämekohteilta

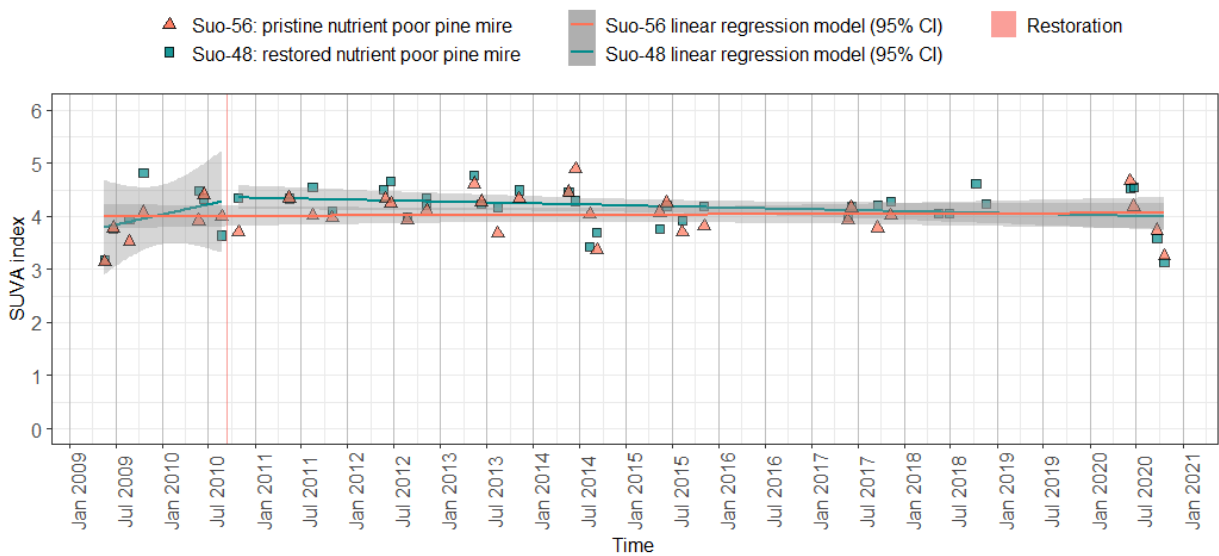
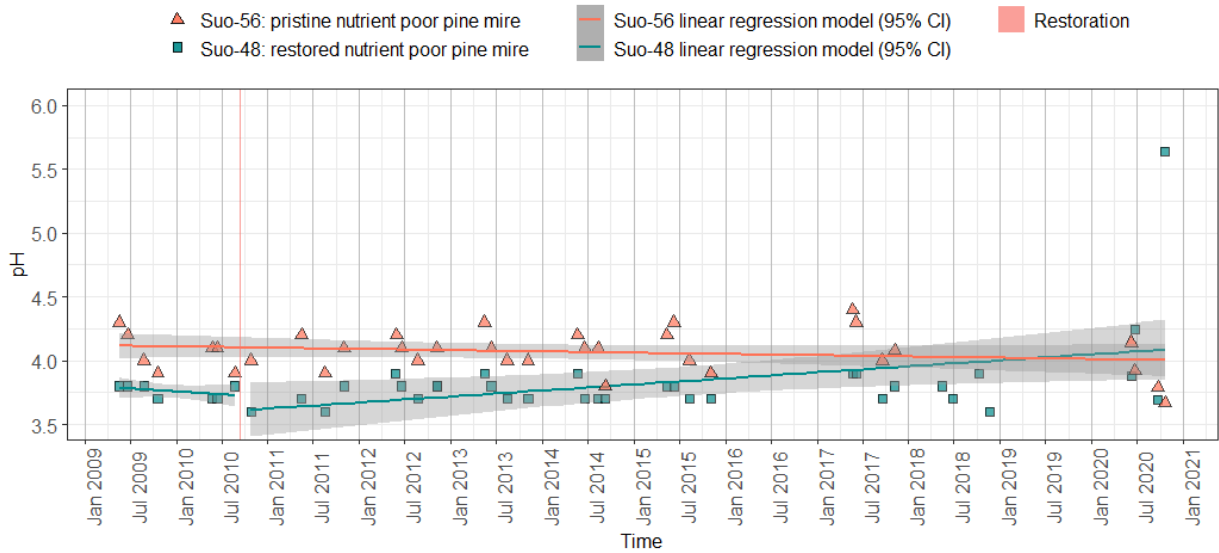
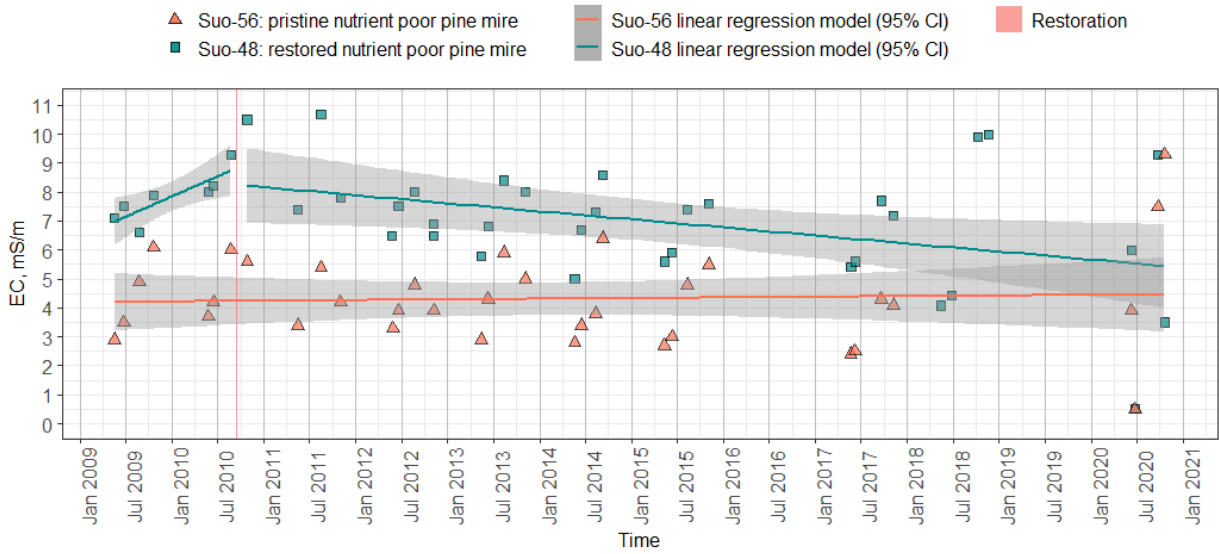


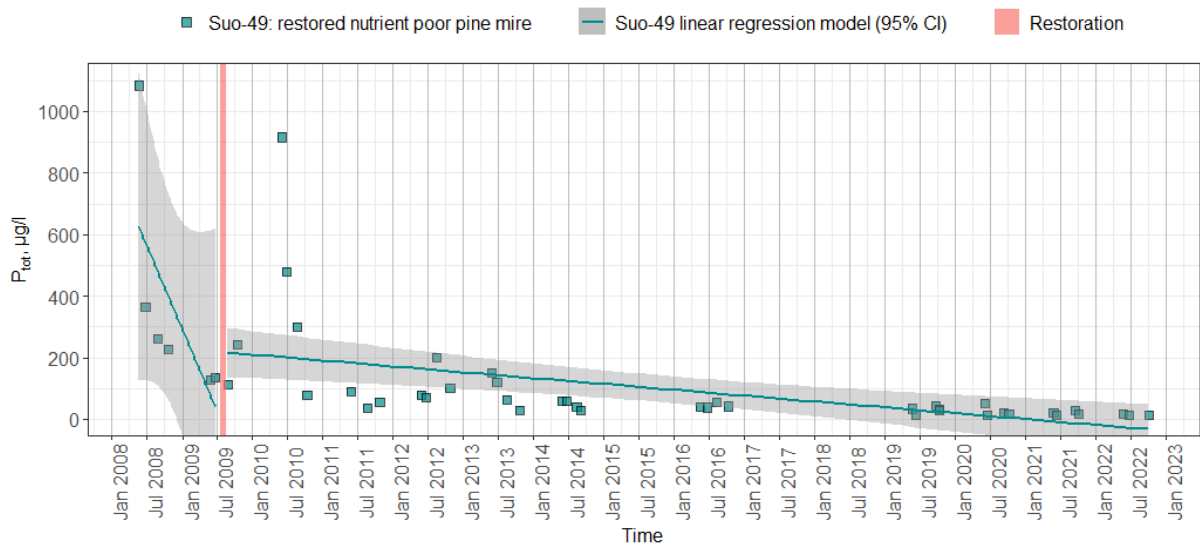
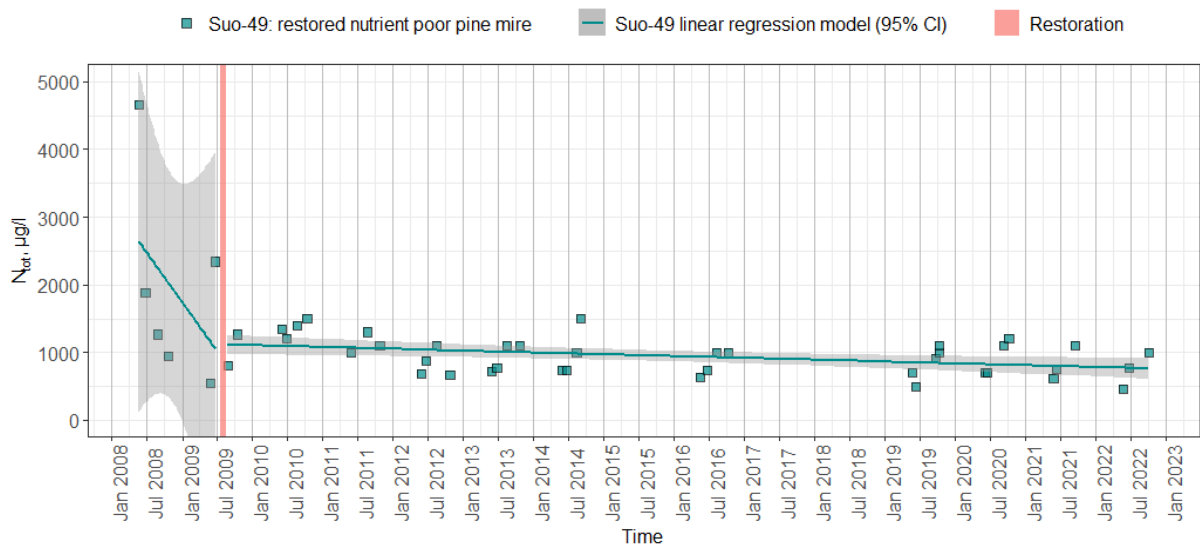


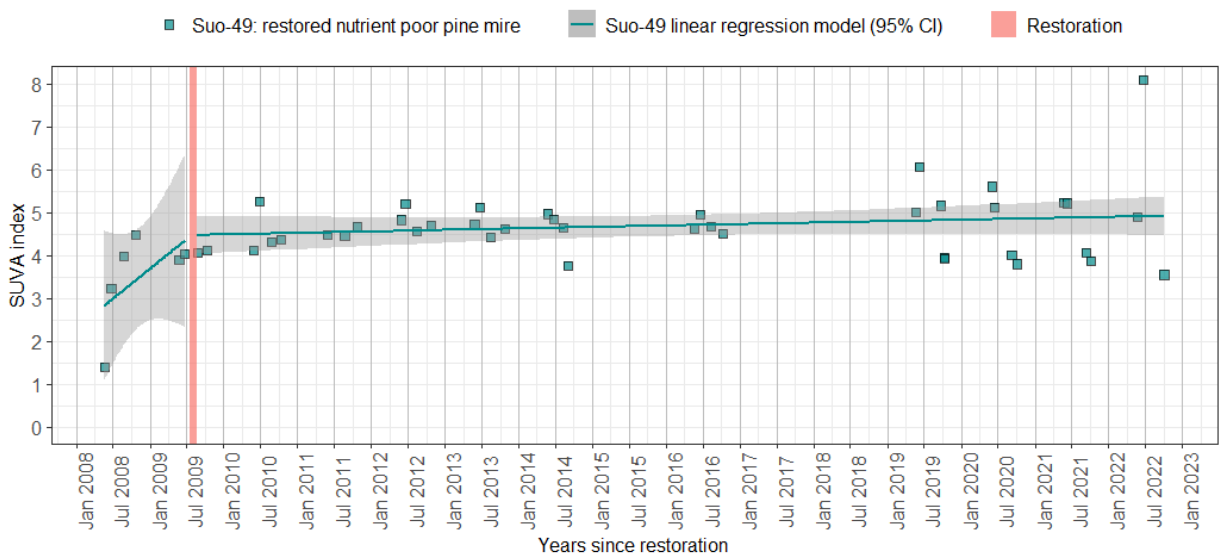
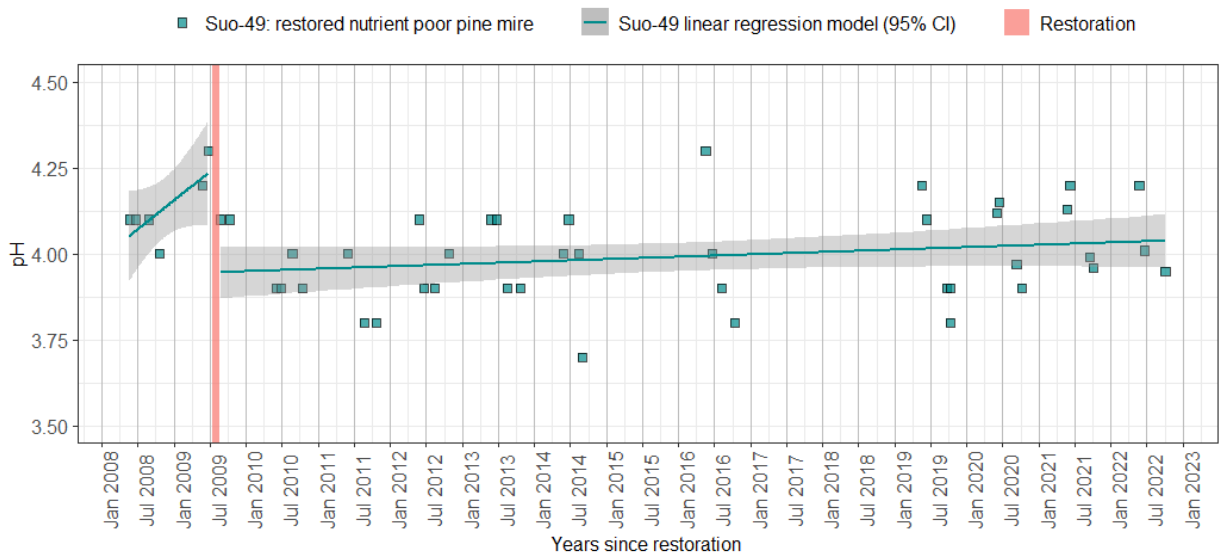
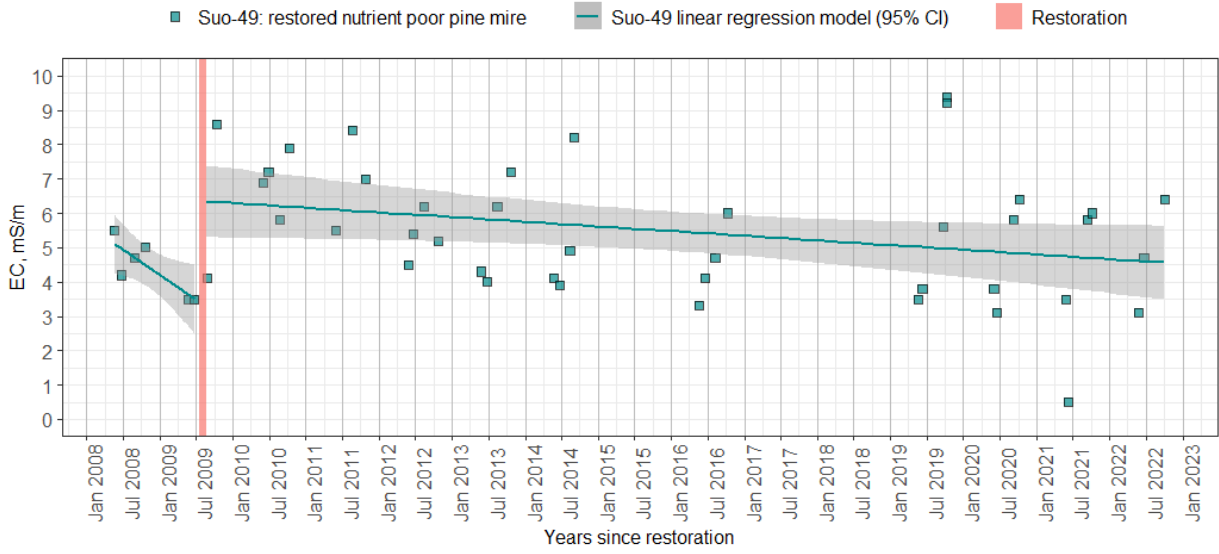


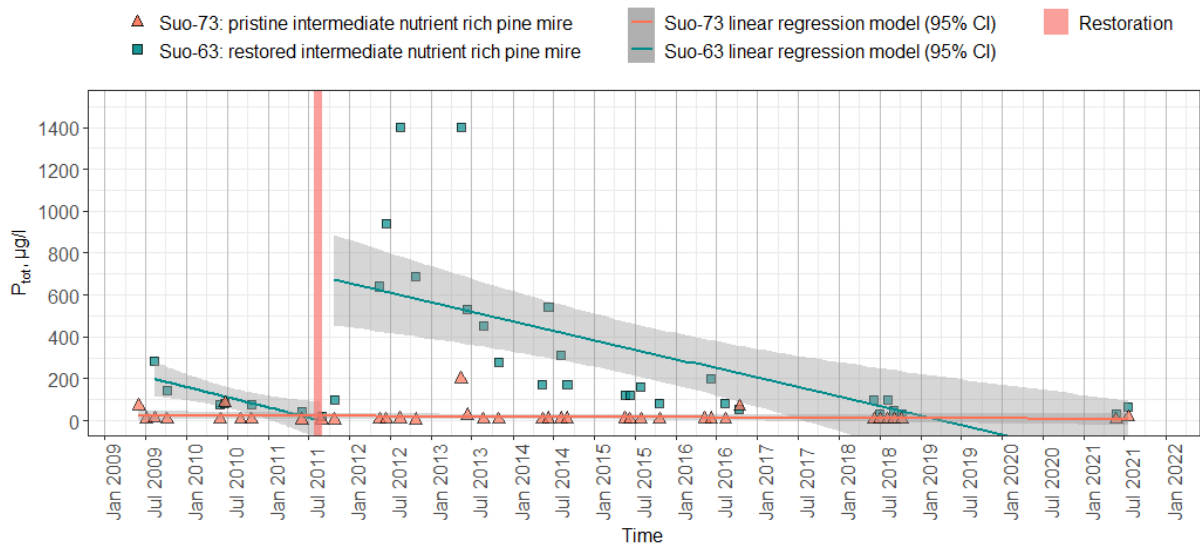
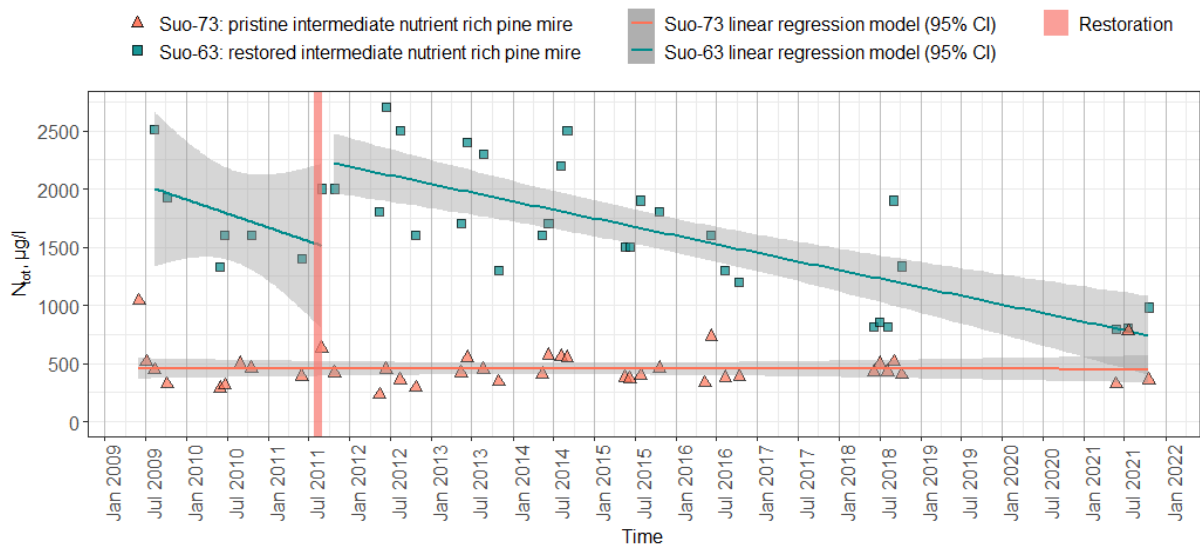
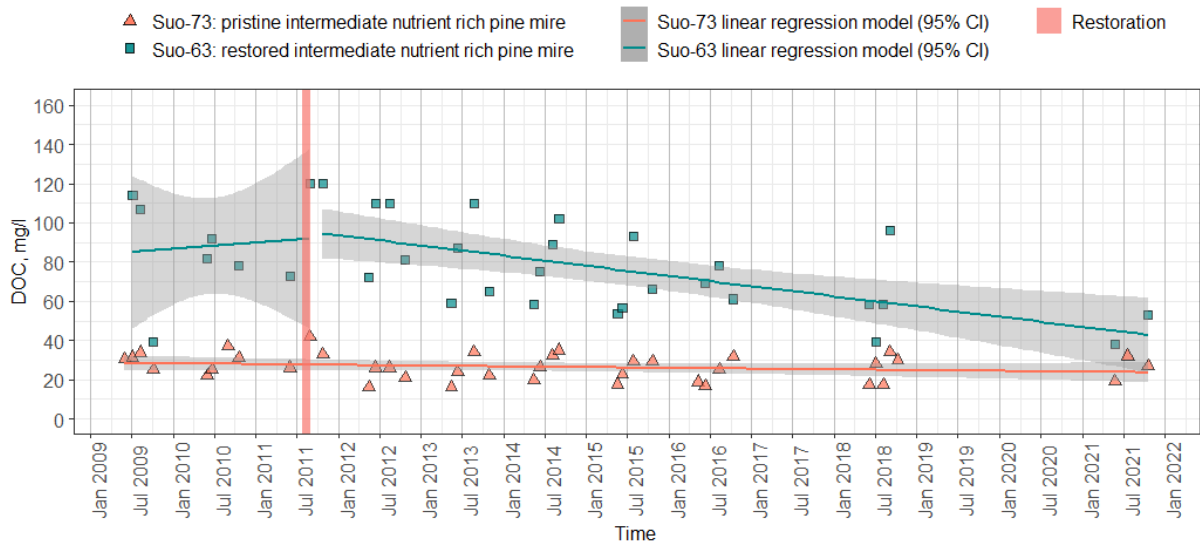


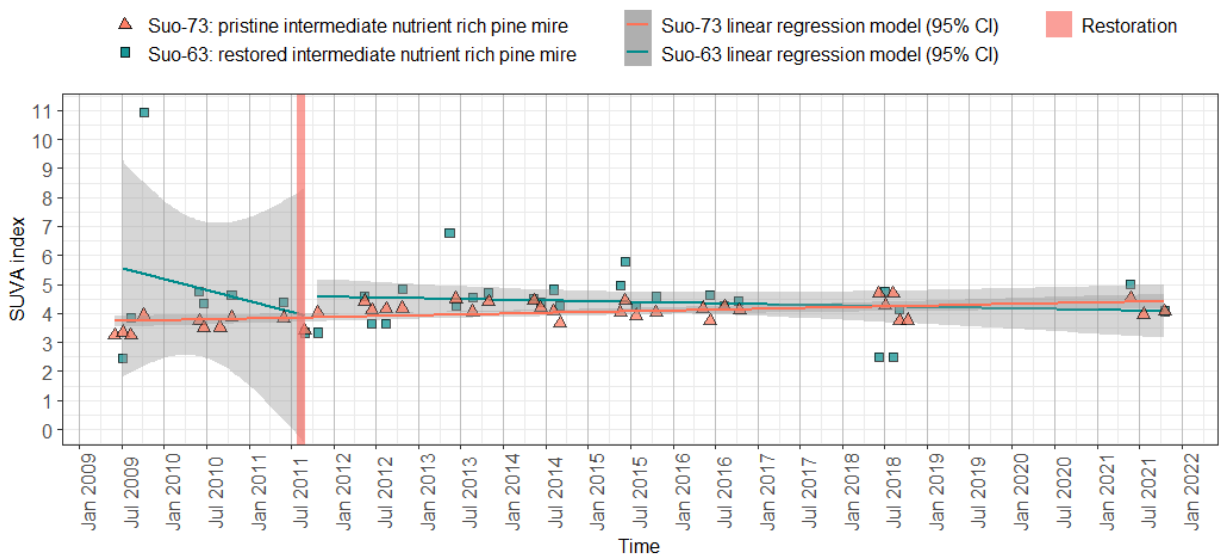
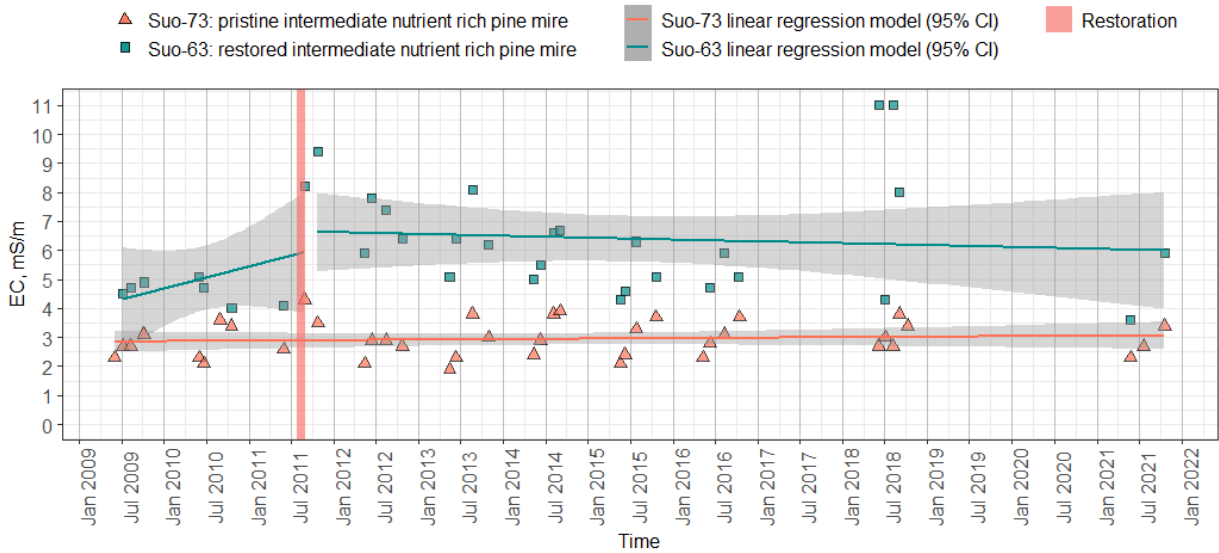
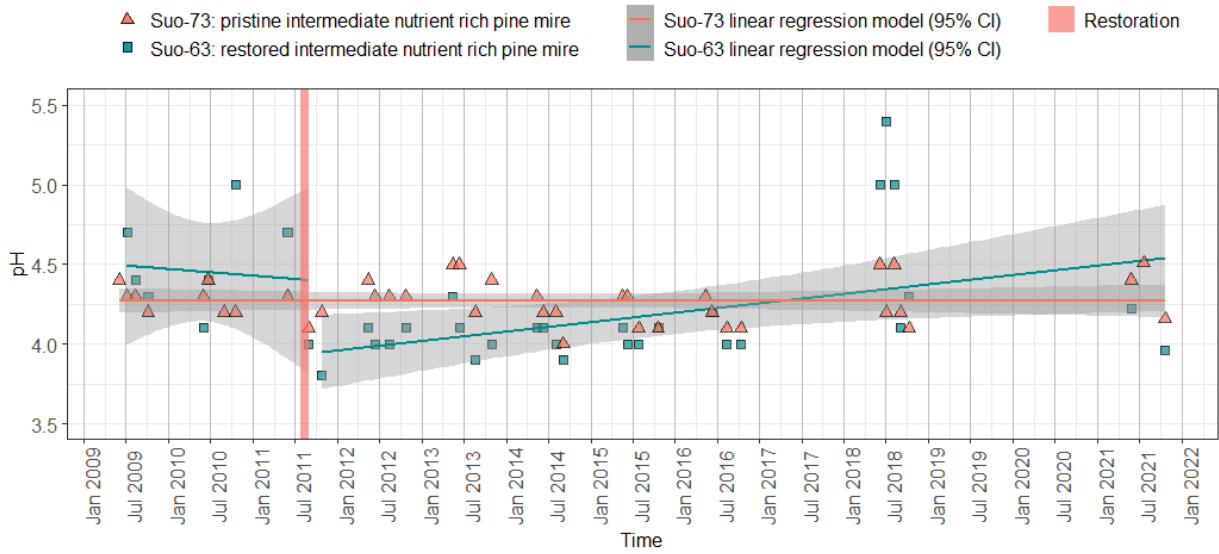


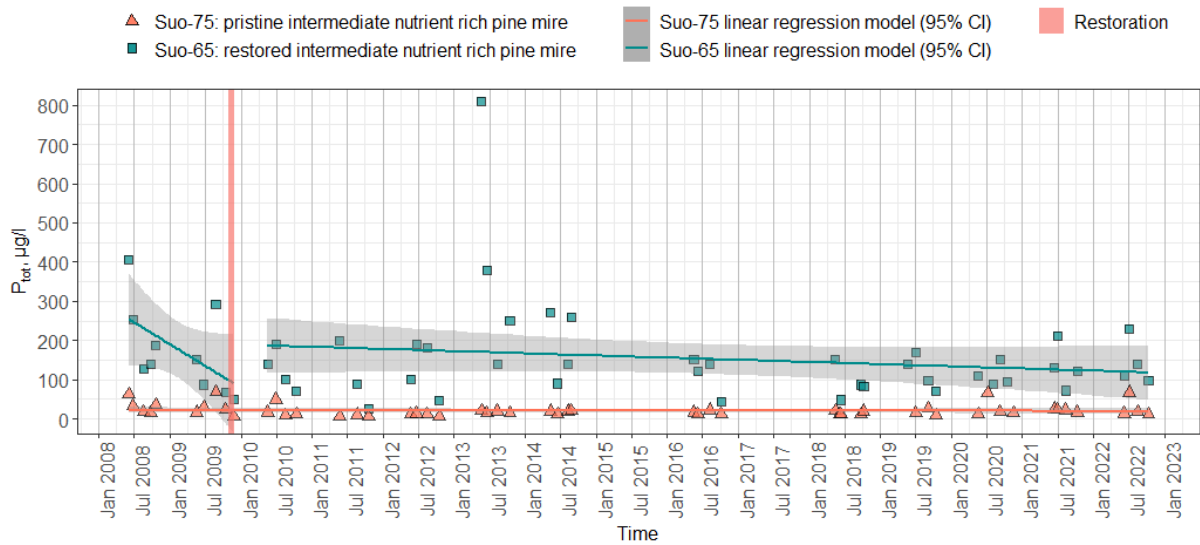
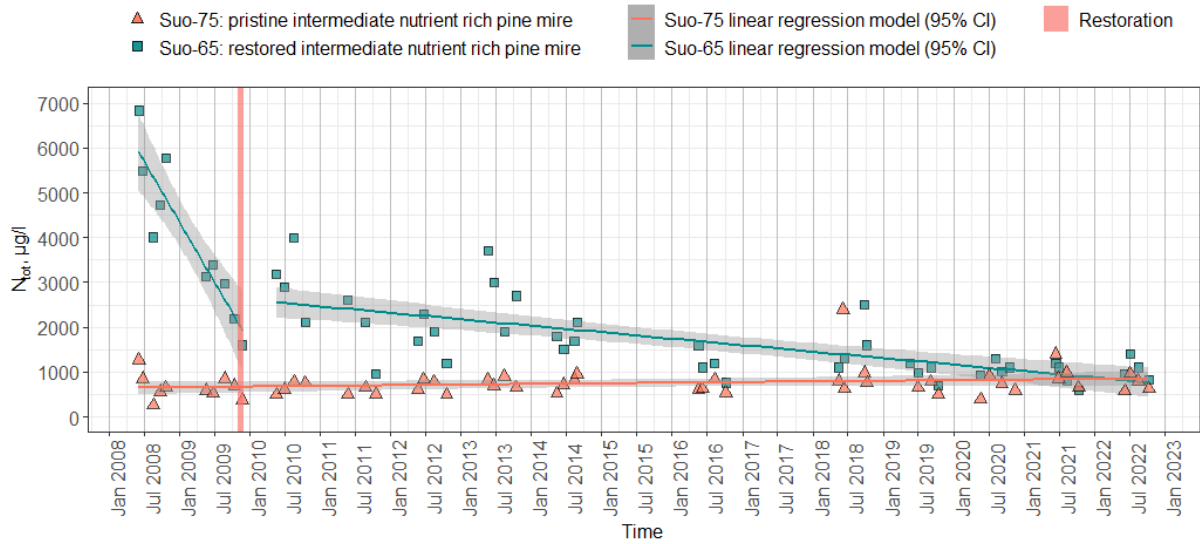
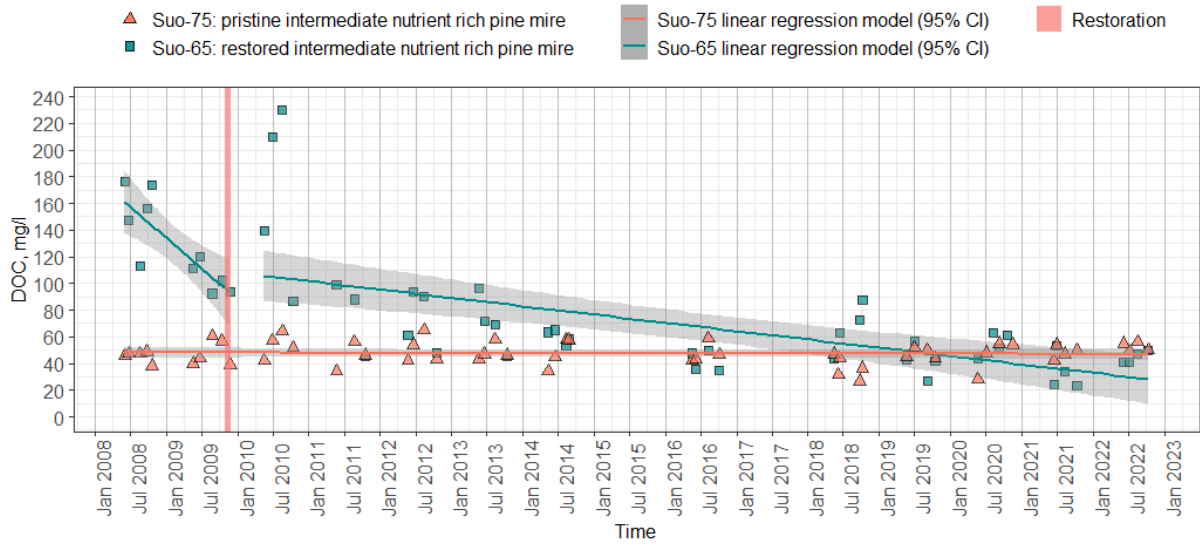


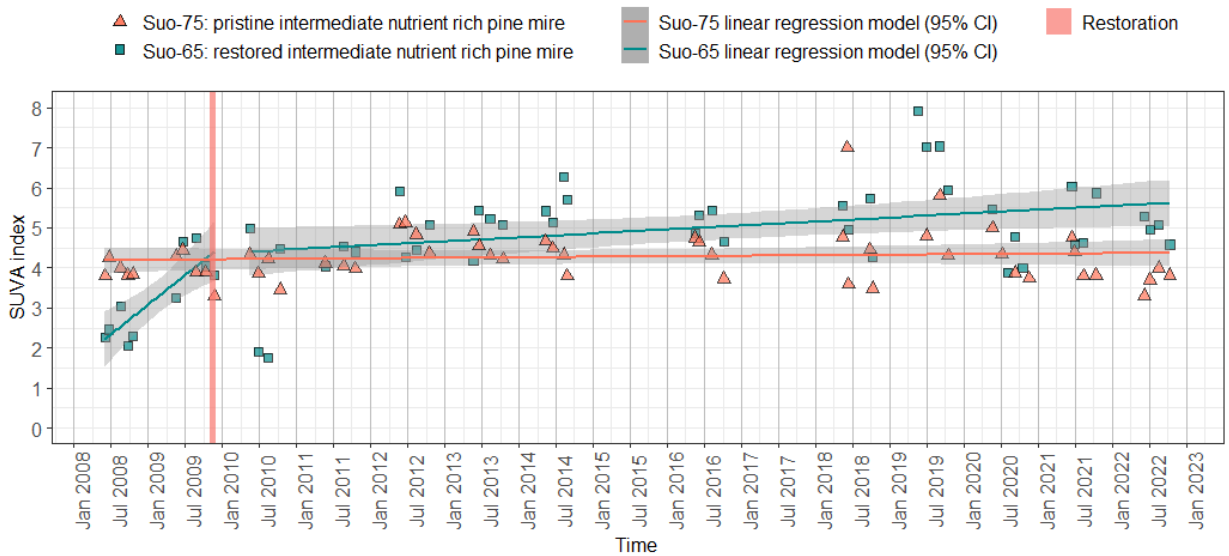
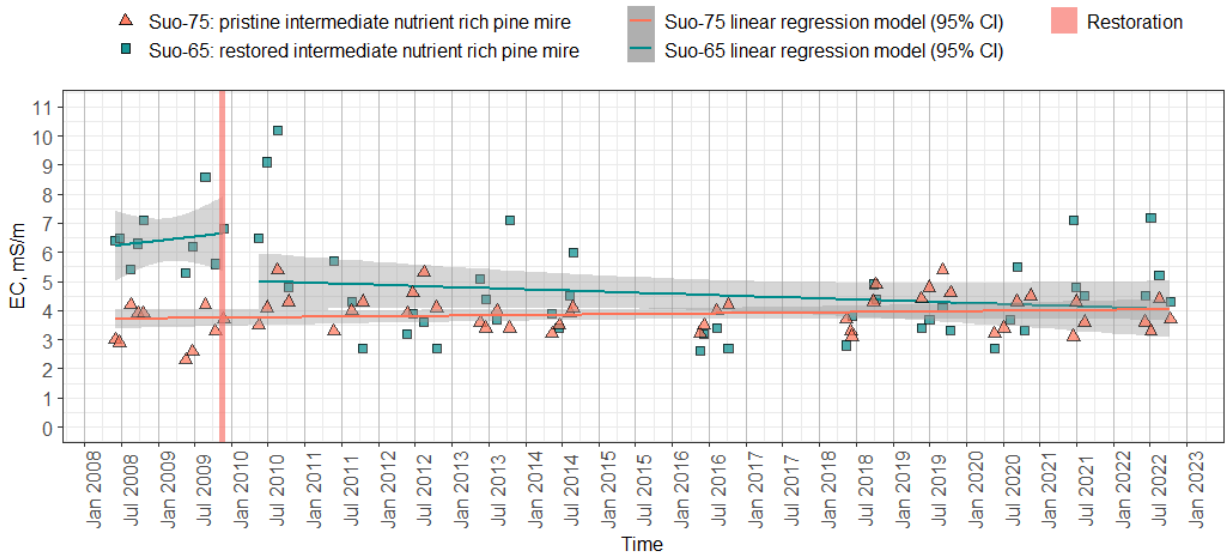
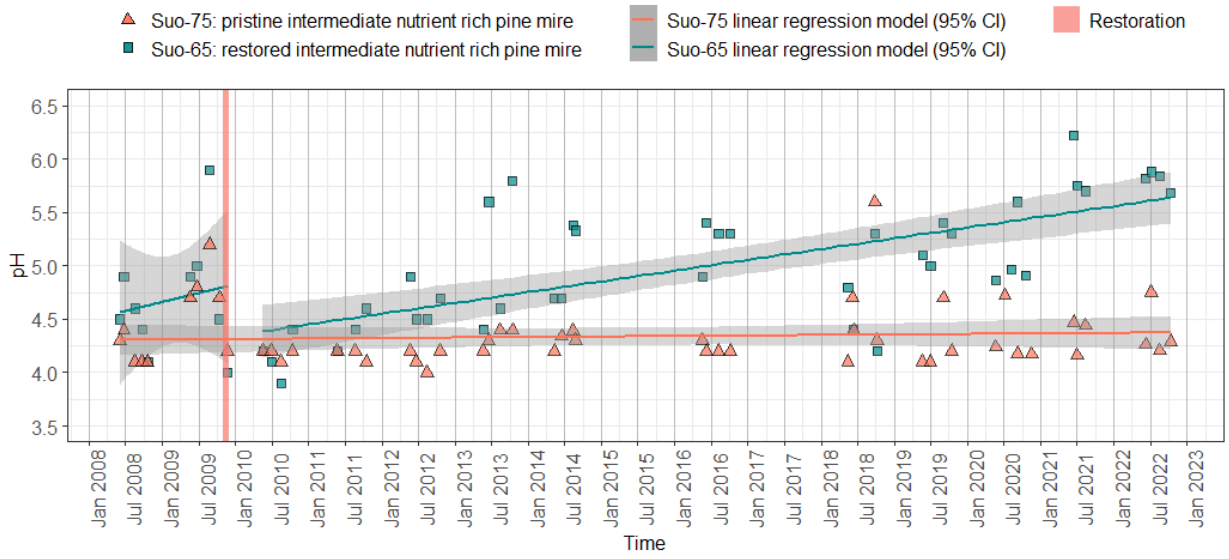


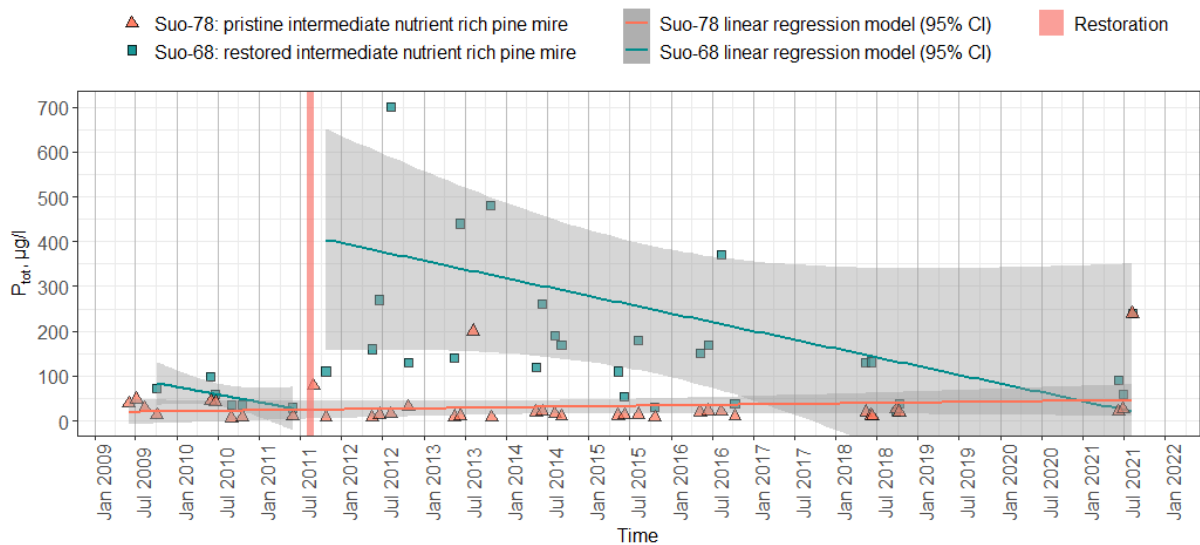
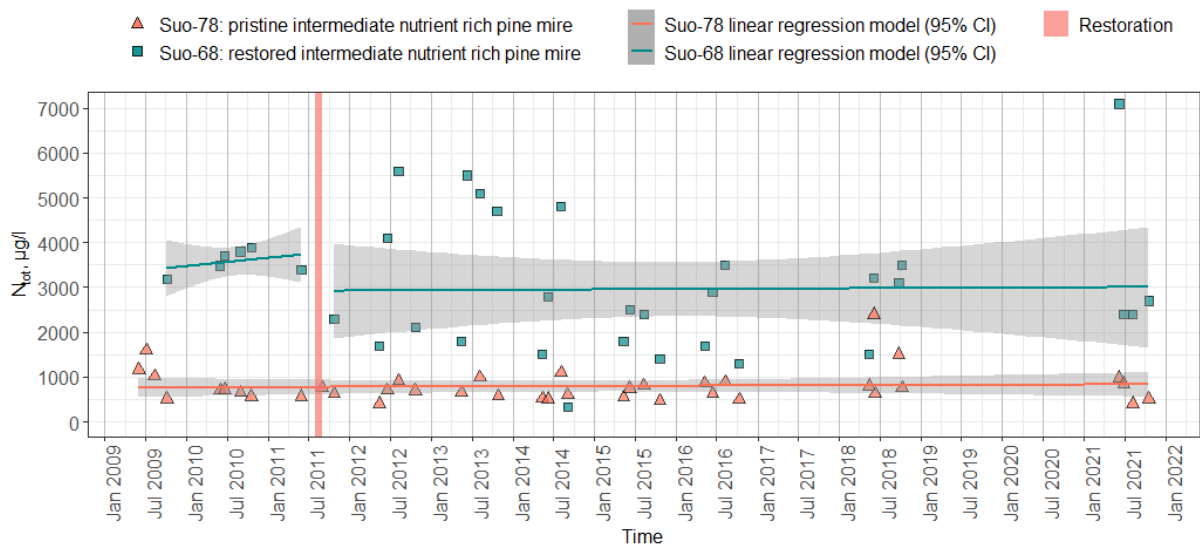
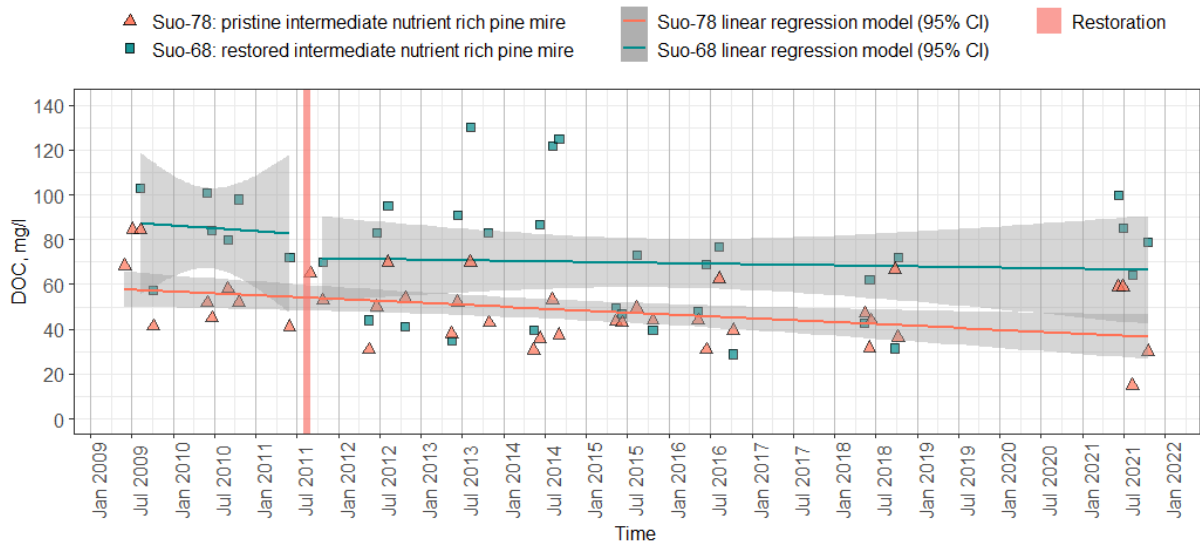


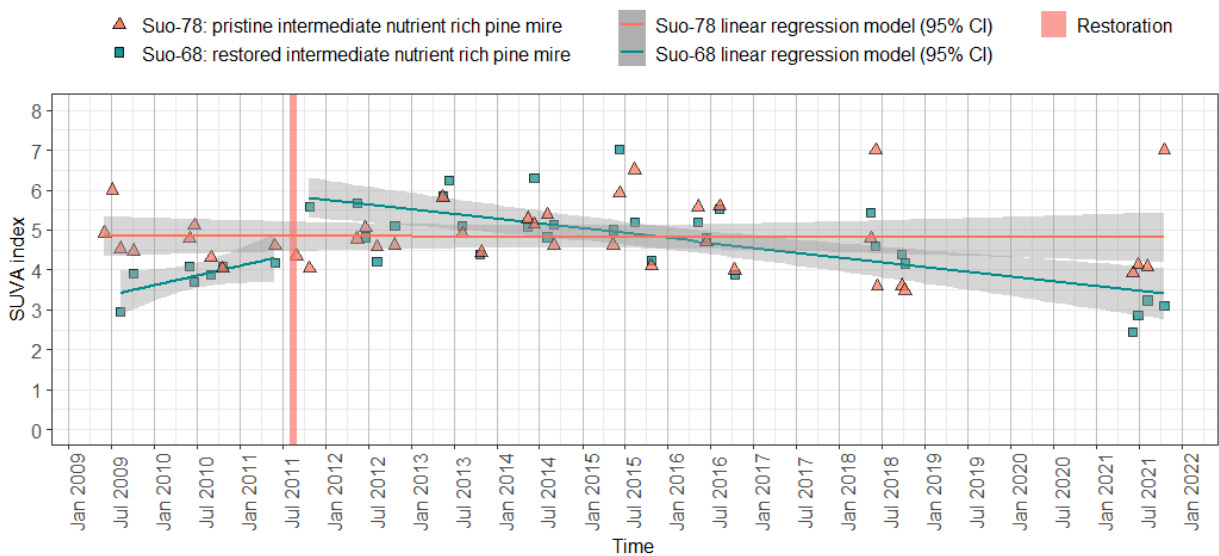
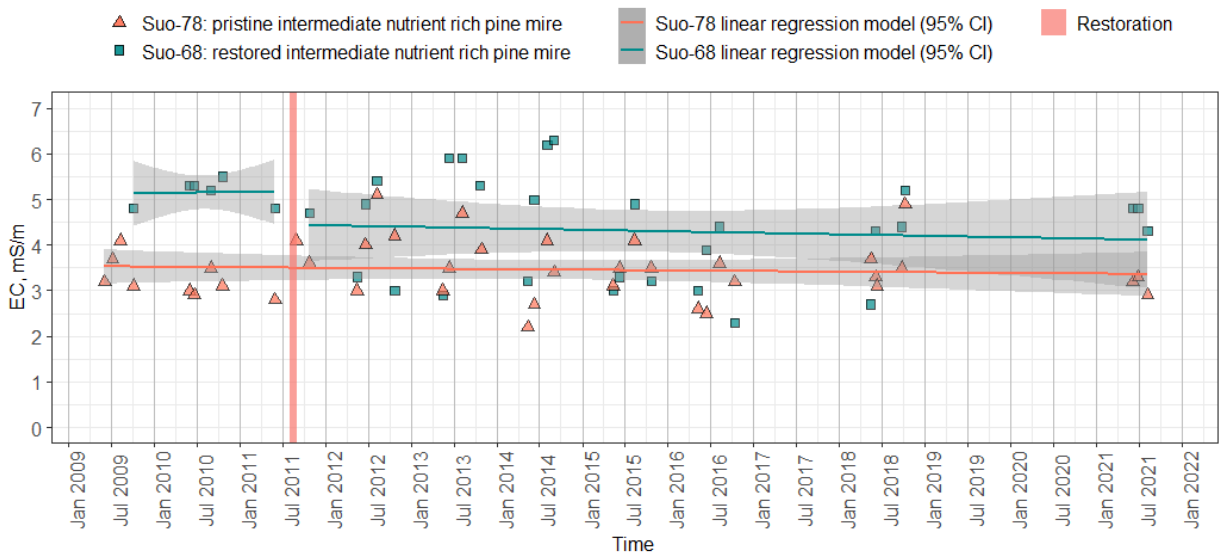
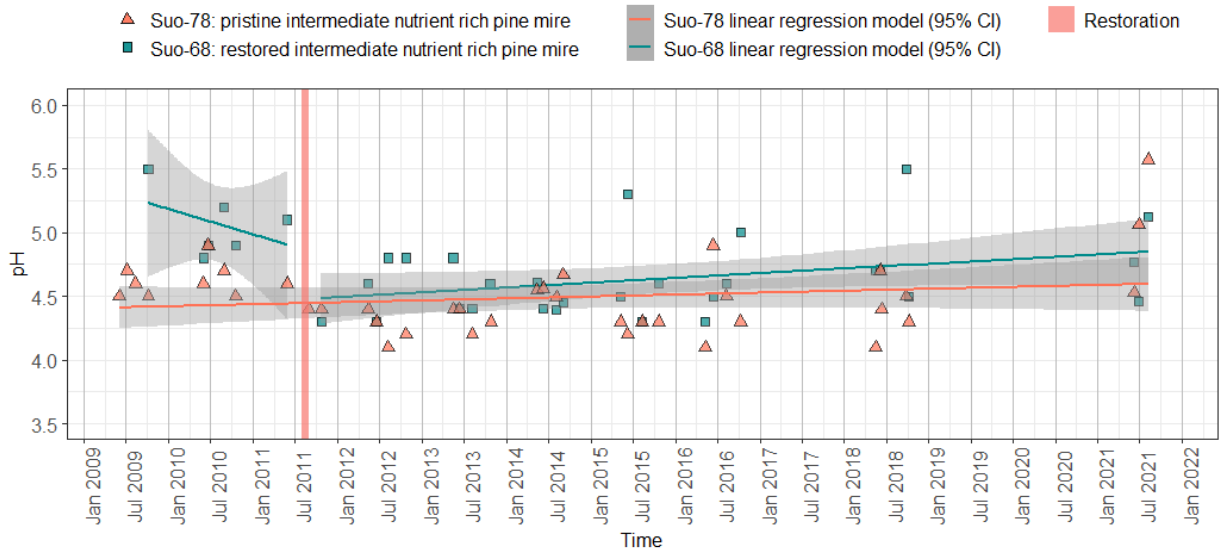


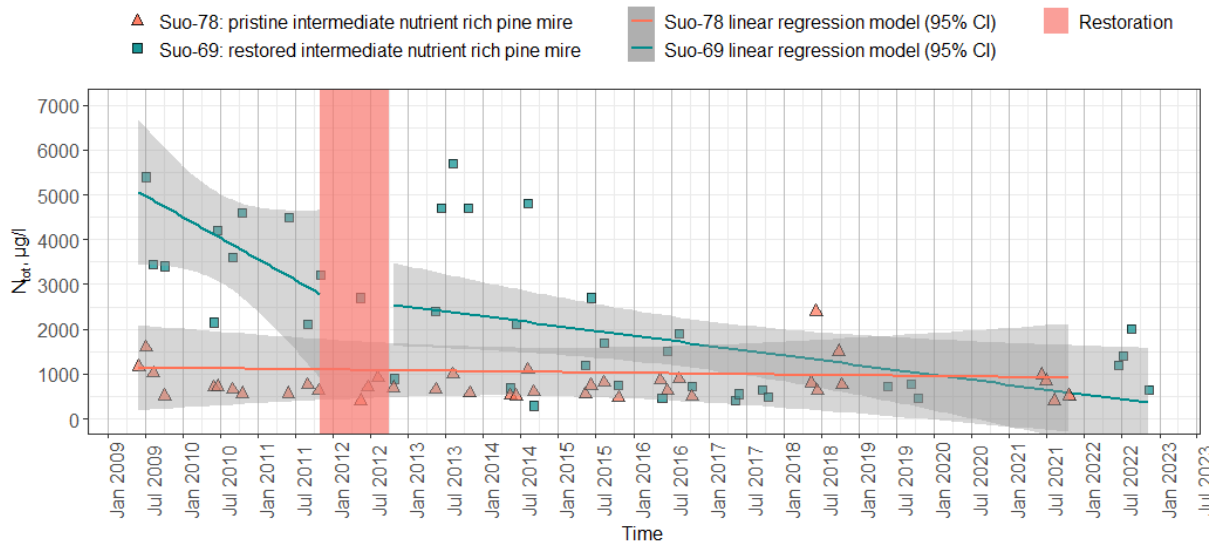
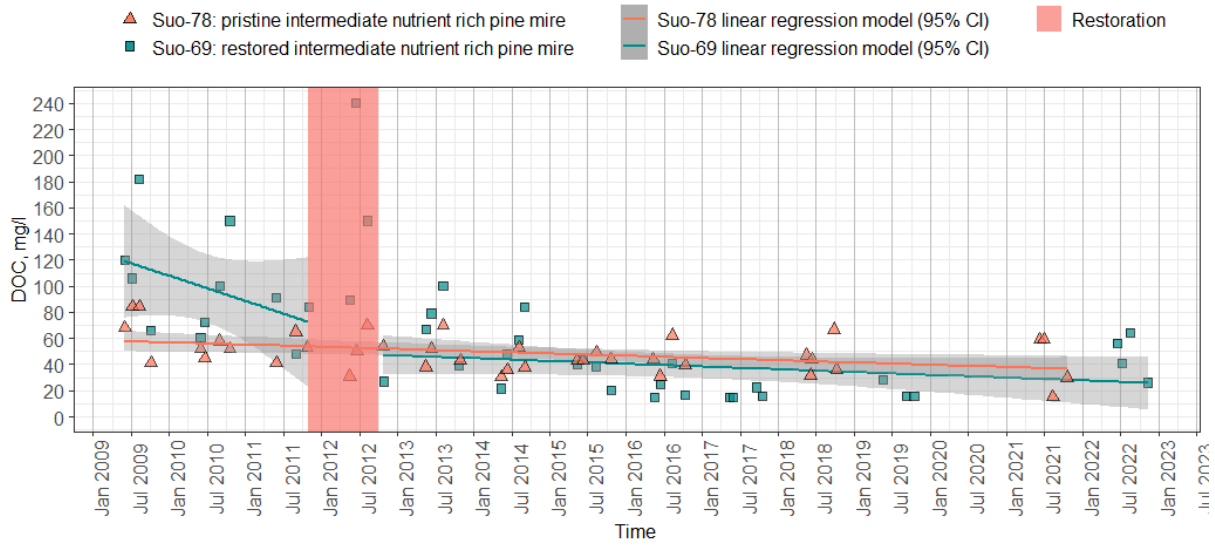


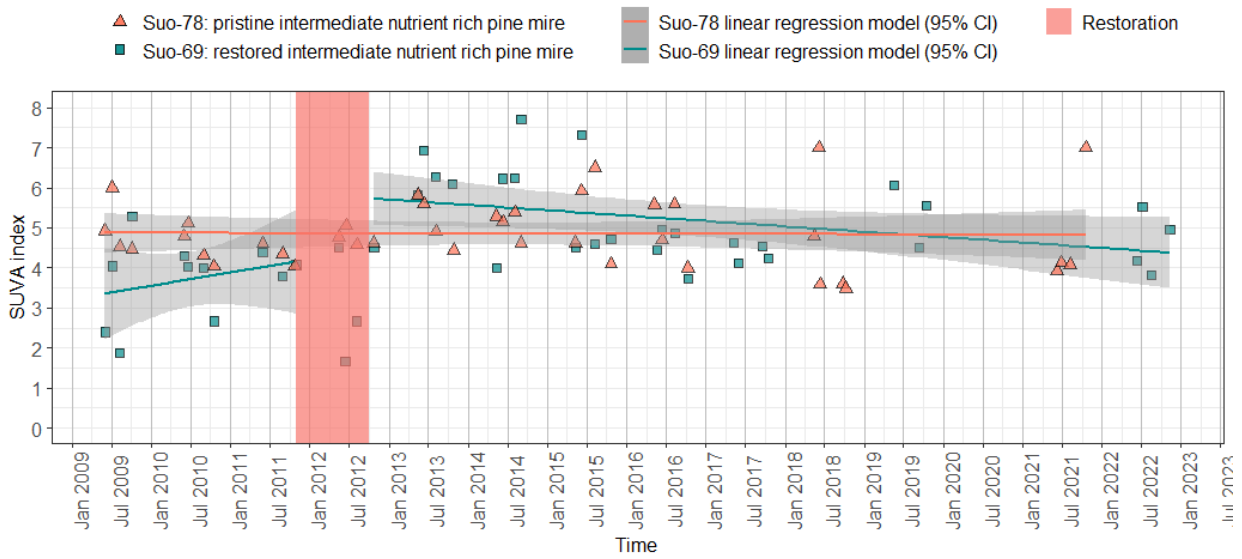
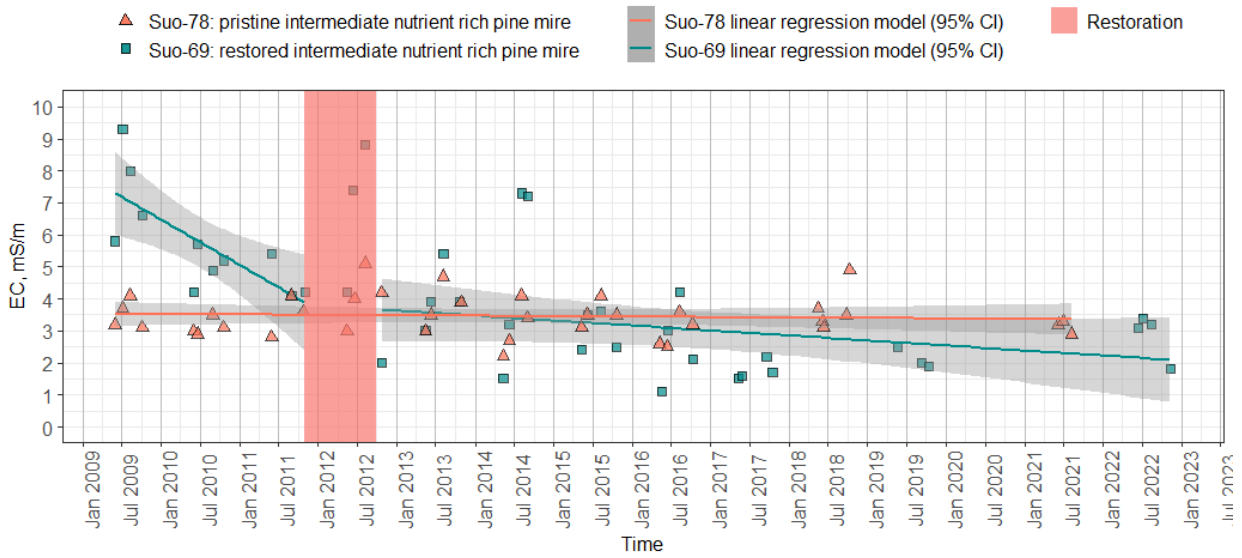




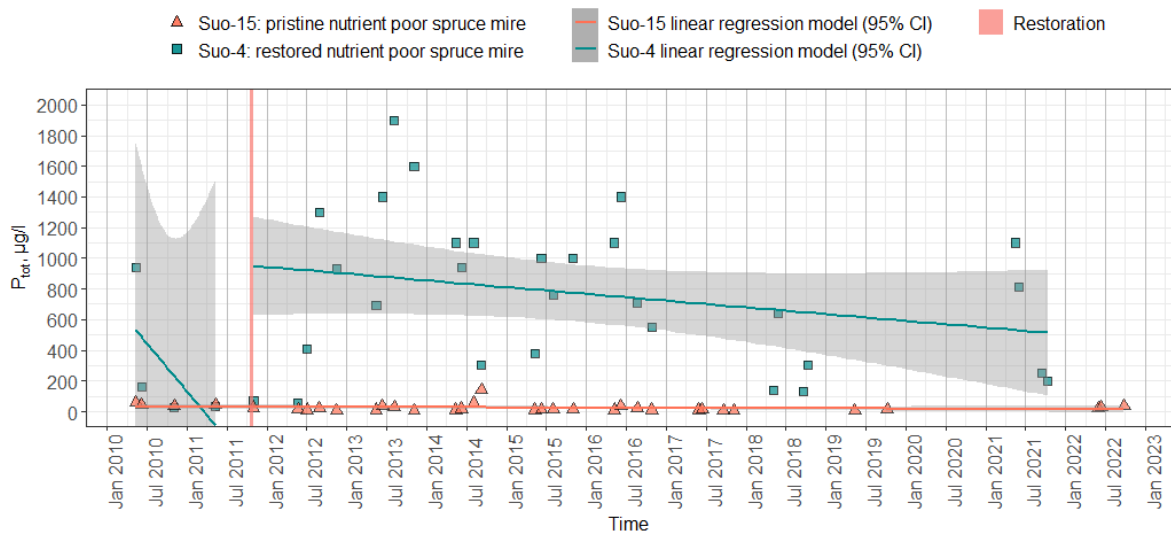
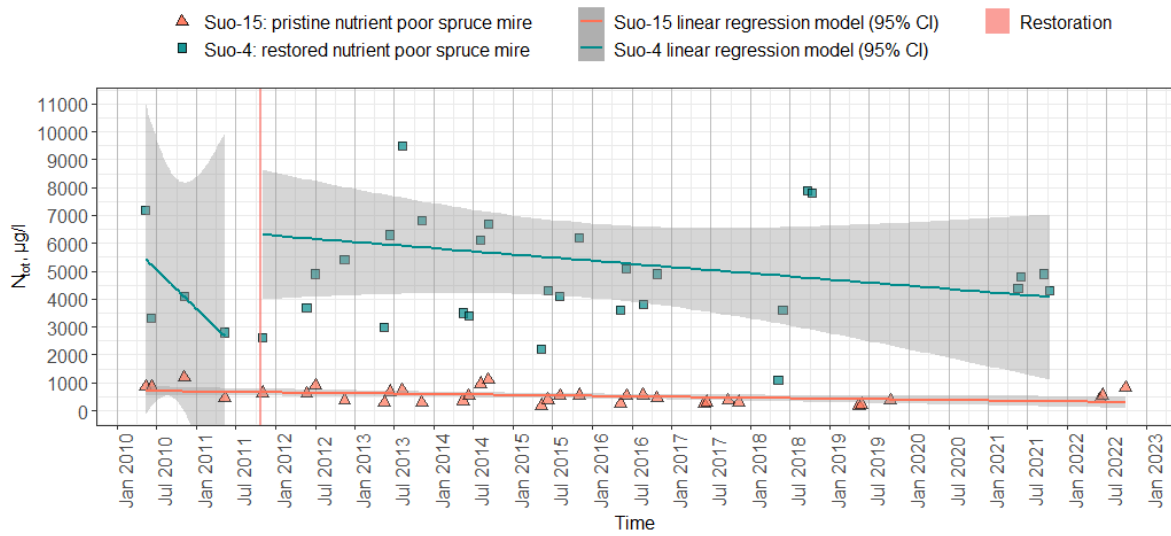
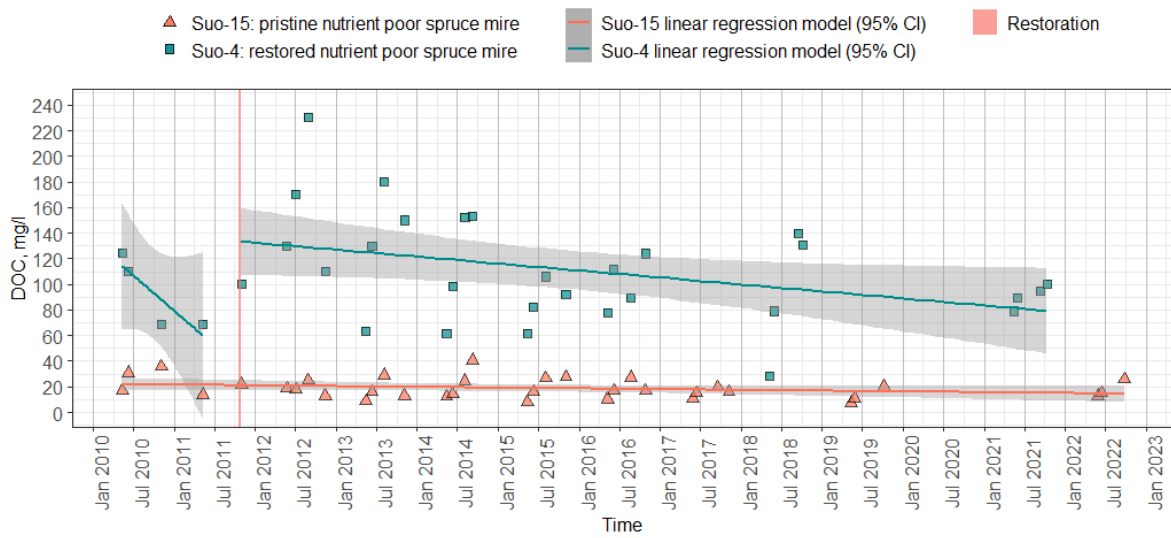


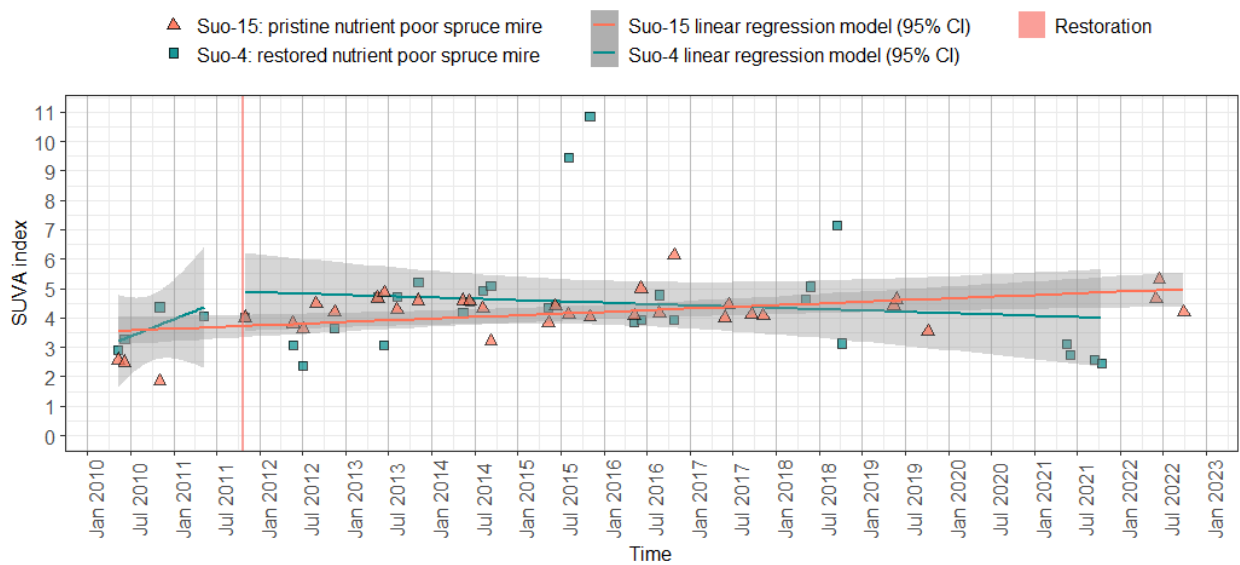
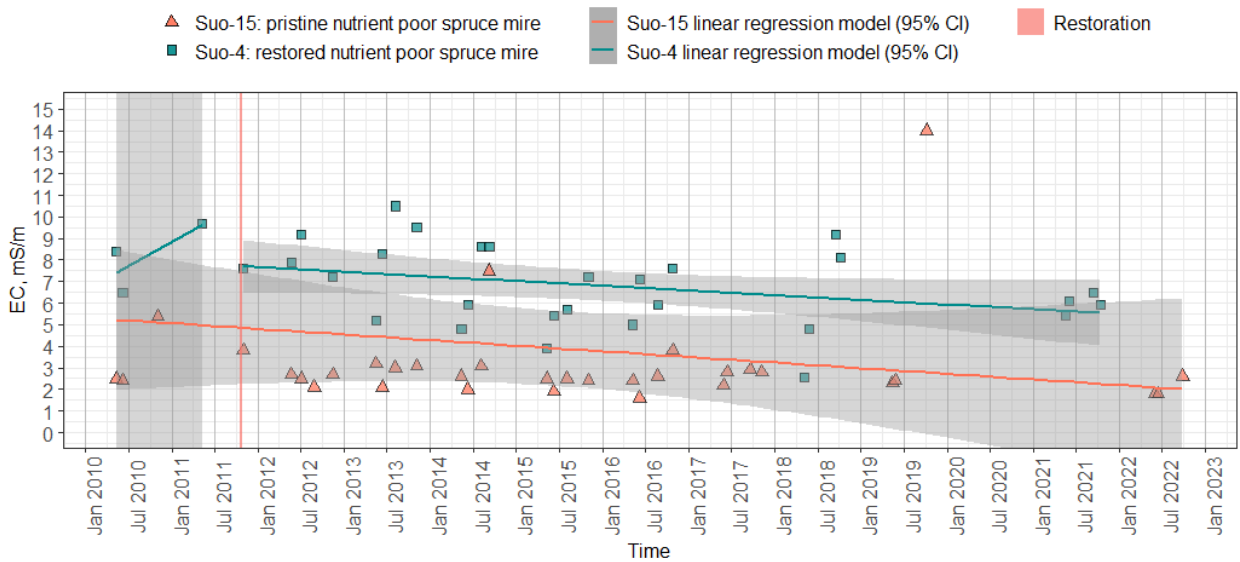
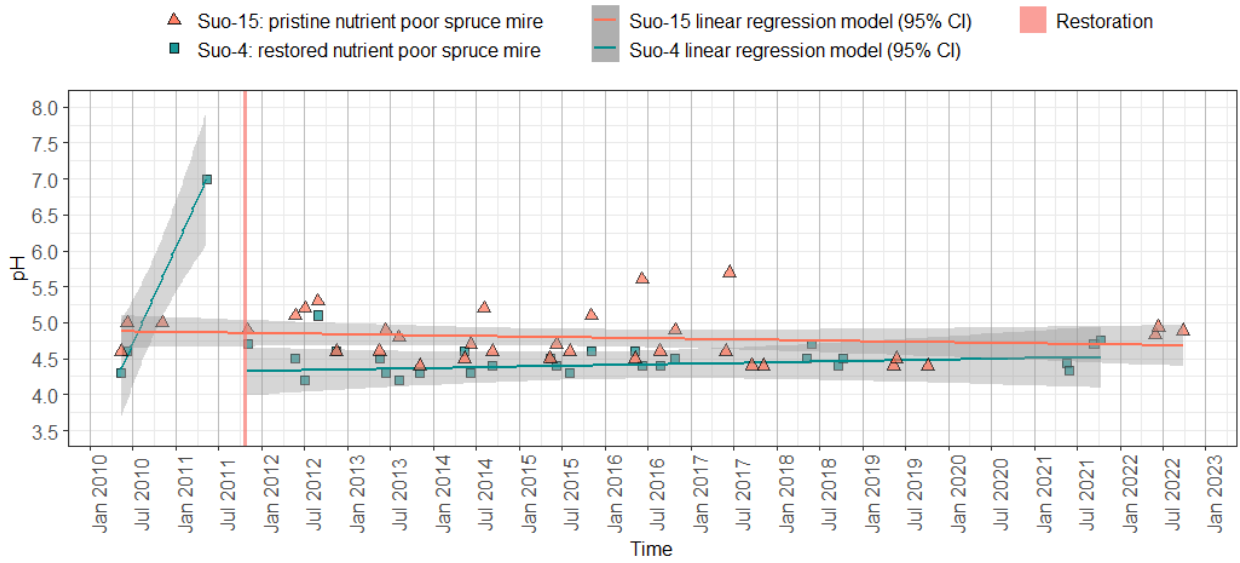


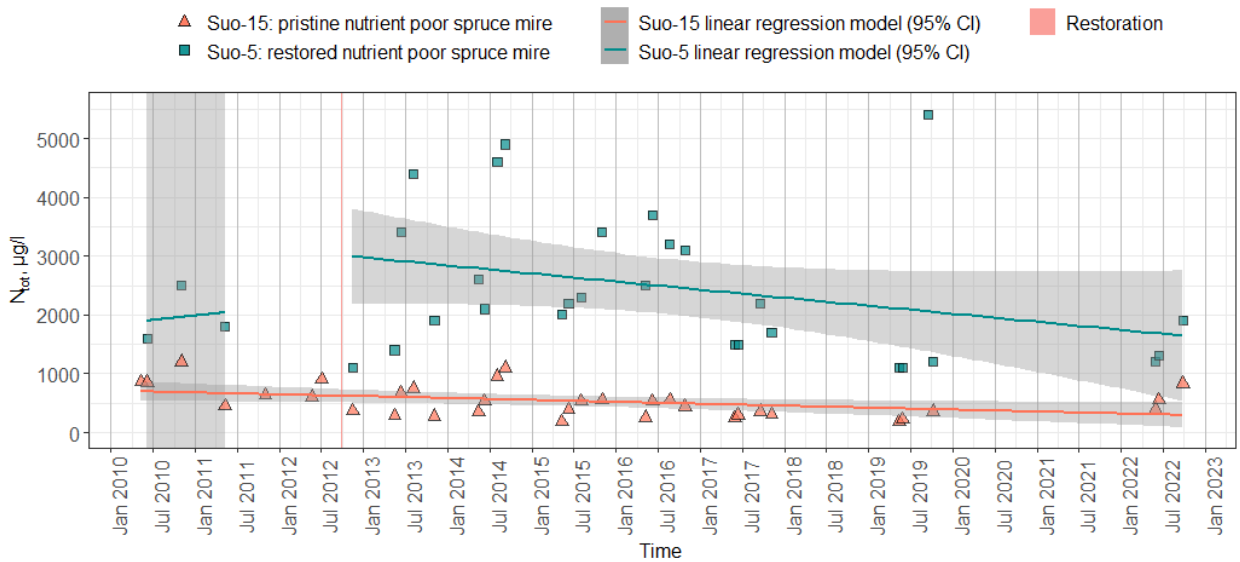
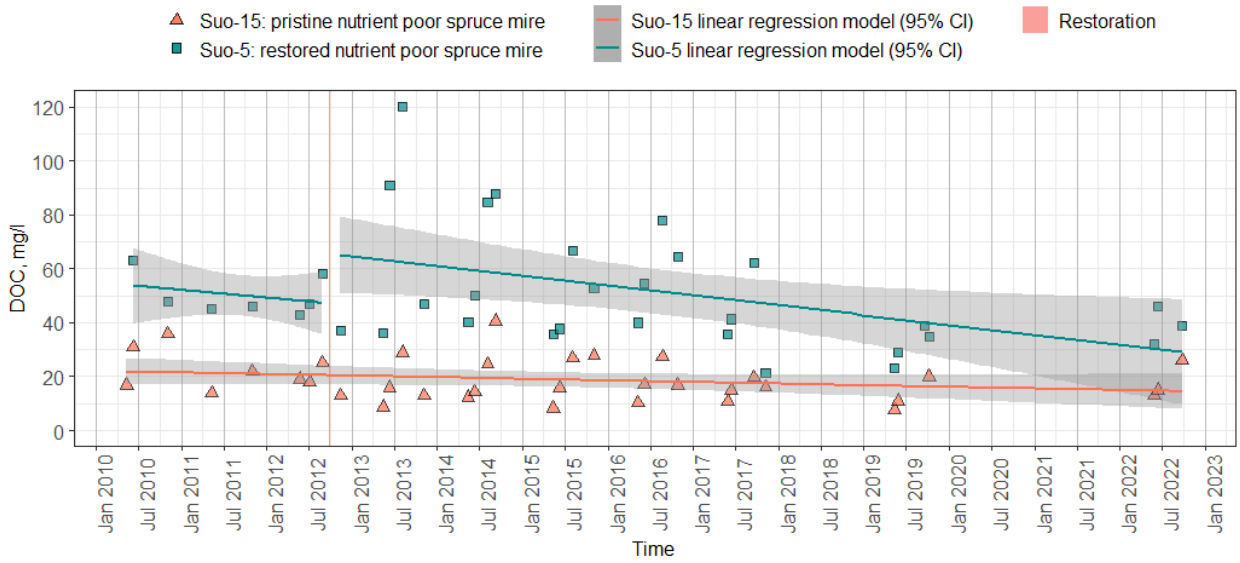


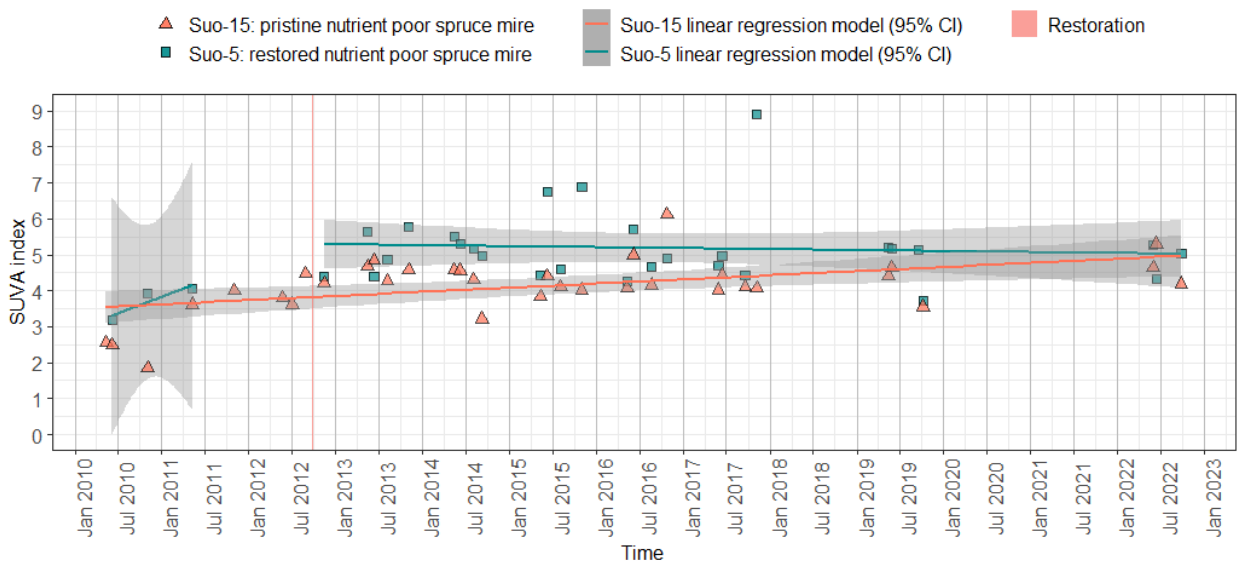
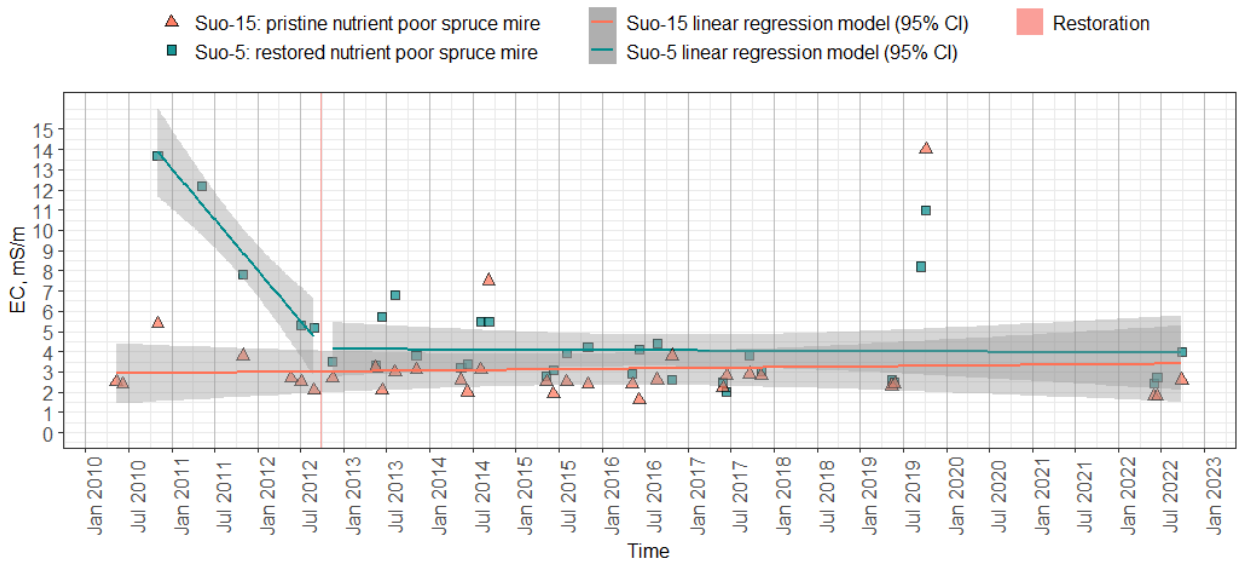
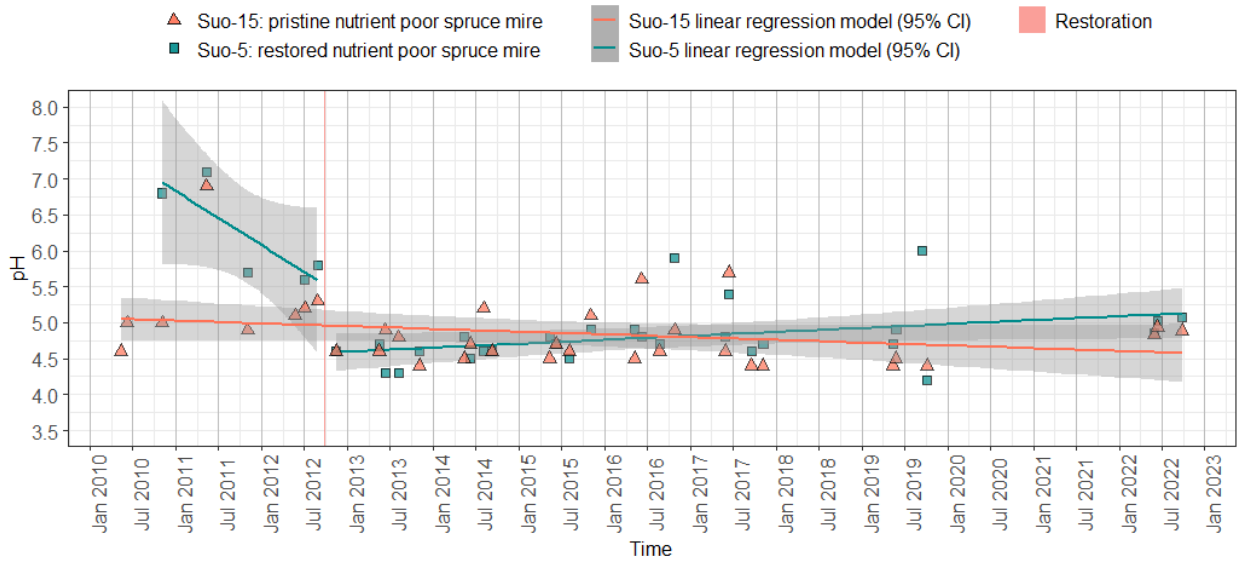


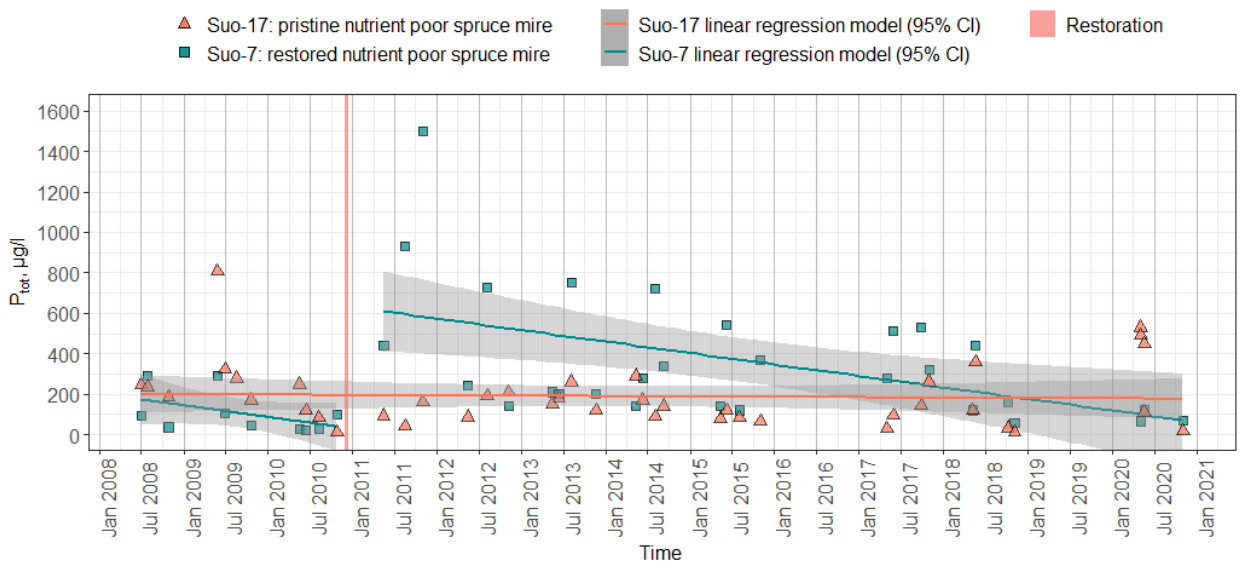
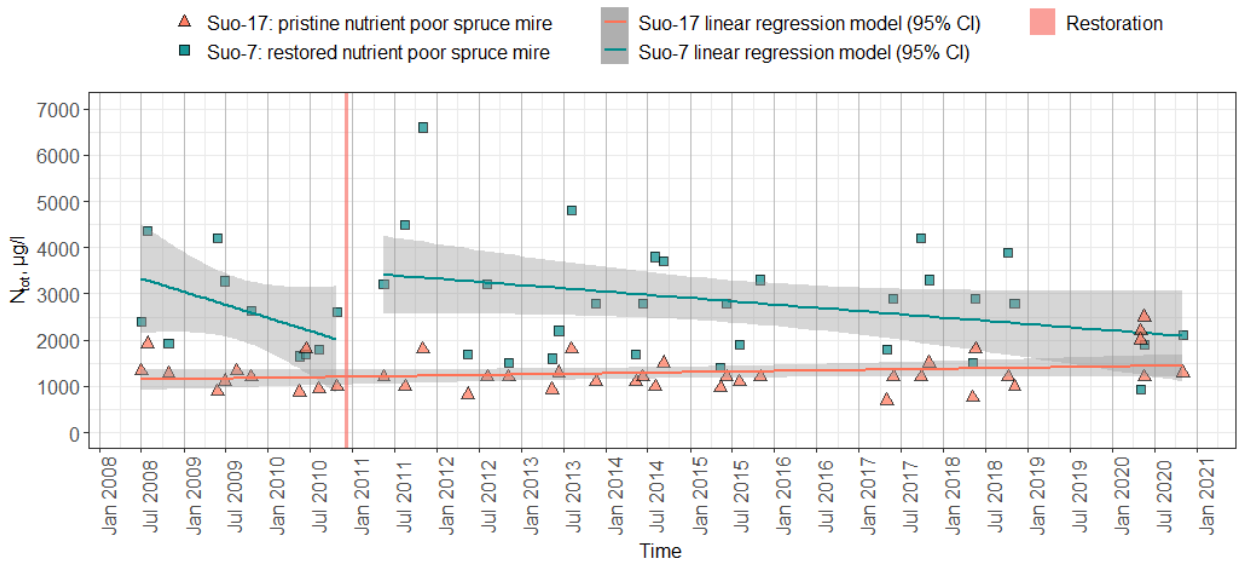
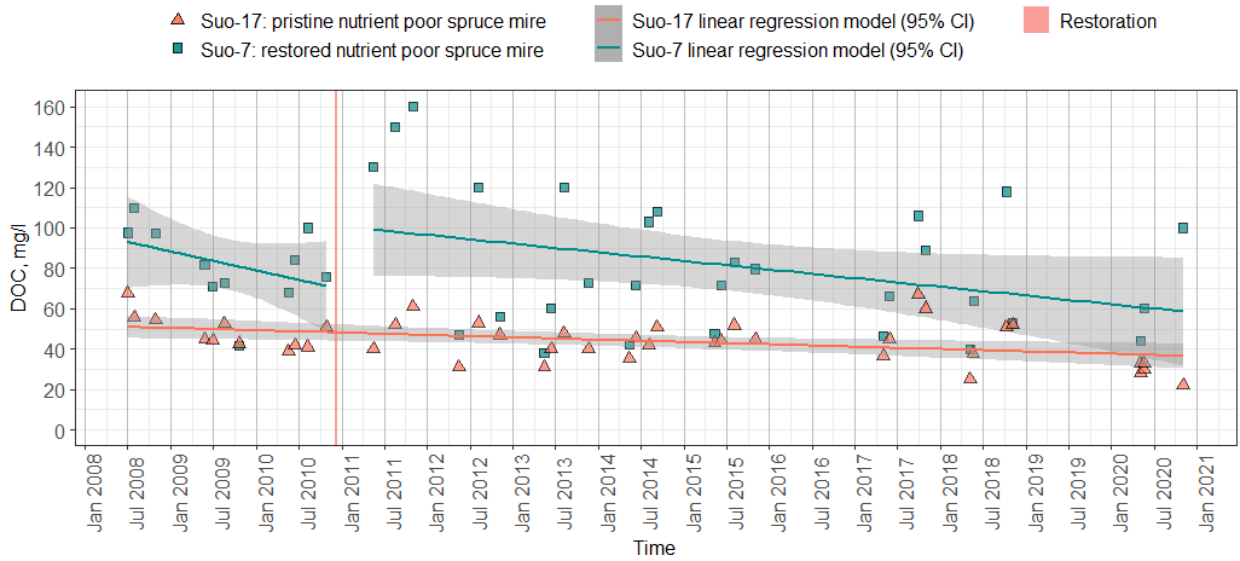
Liite 2C. 10-vuotisvedenlaatuvertailut seurantaverkoston korpikohteilta

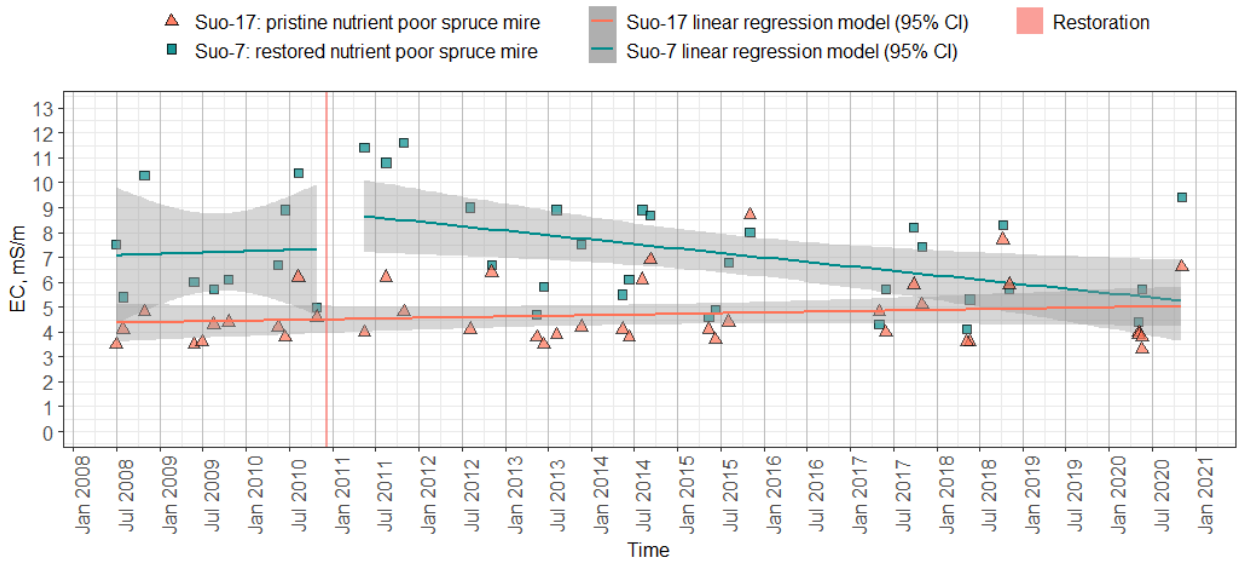
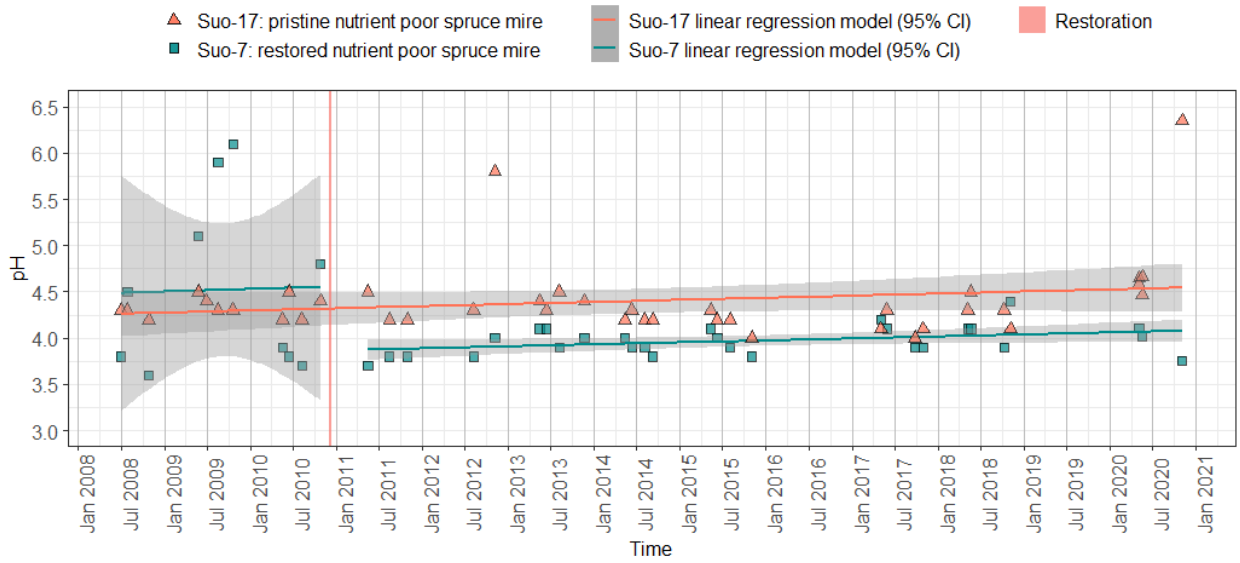


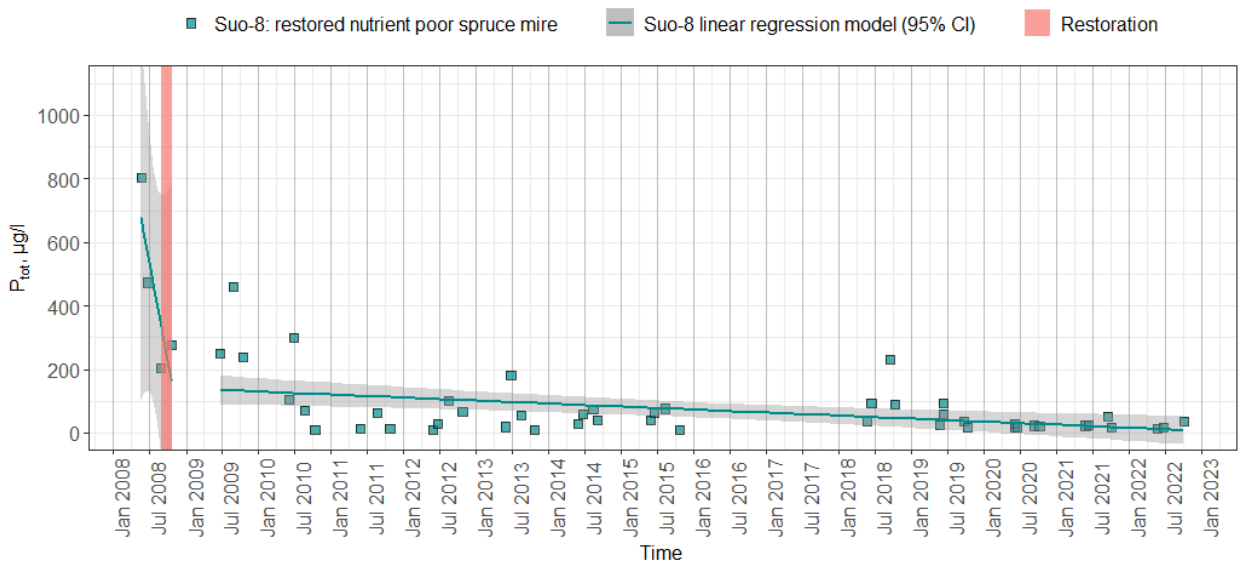
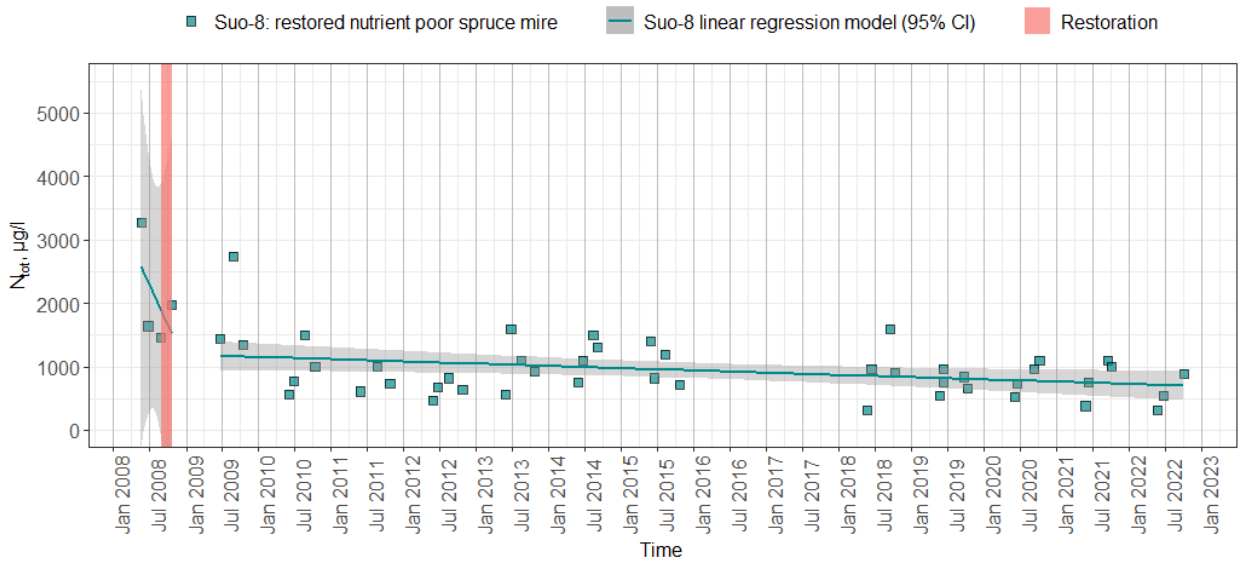
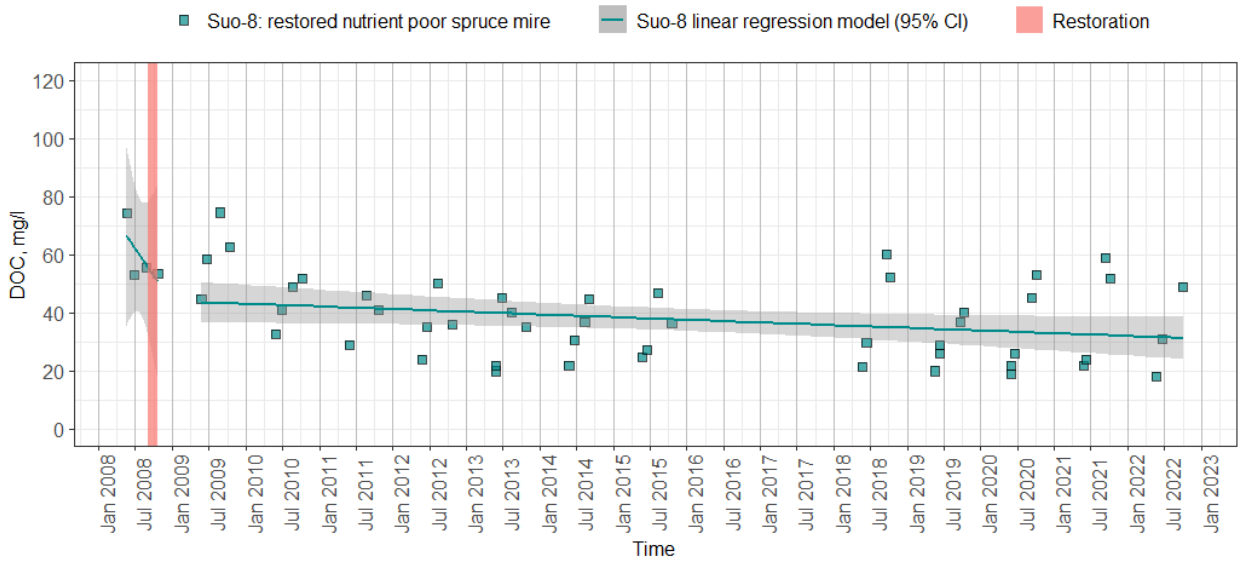


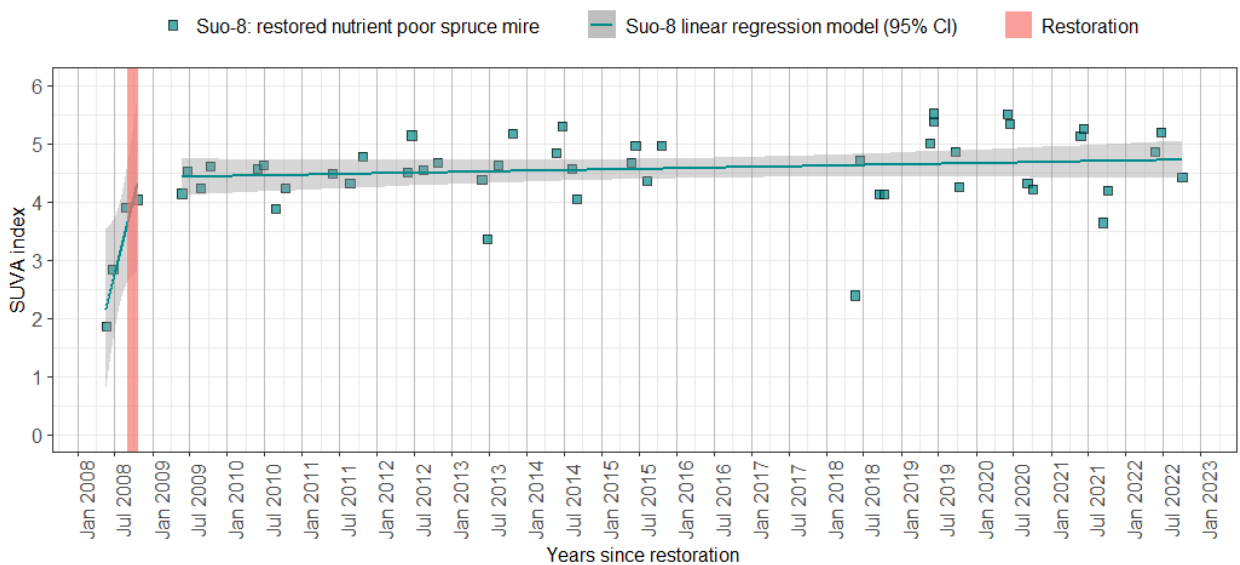
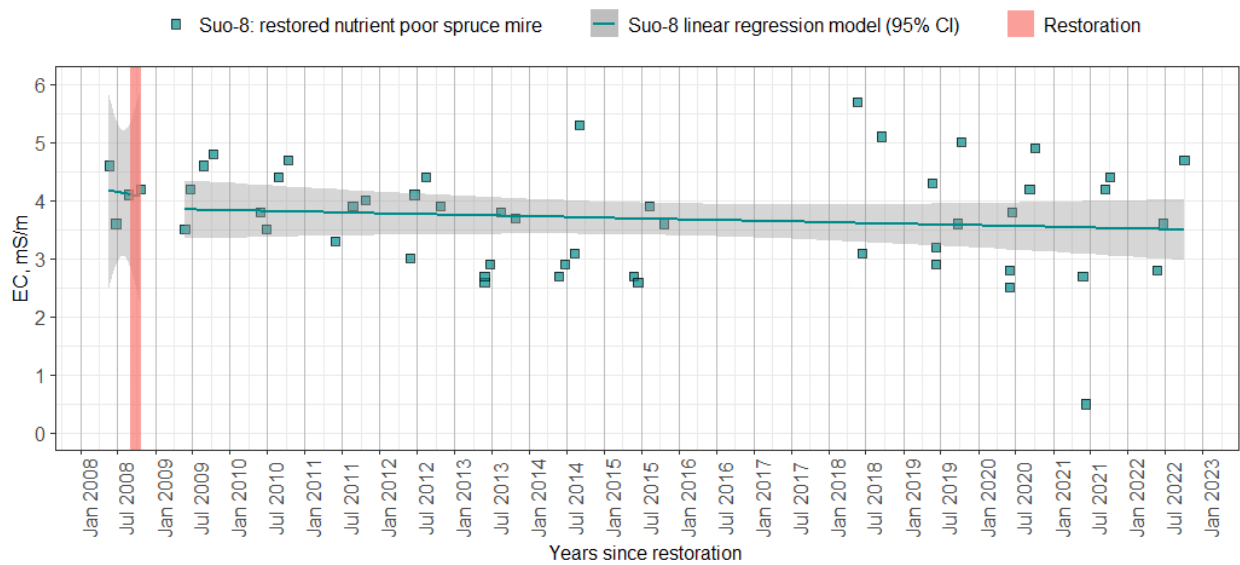
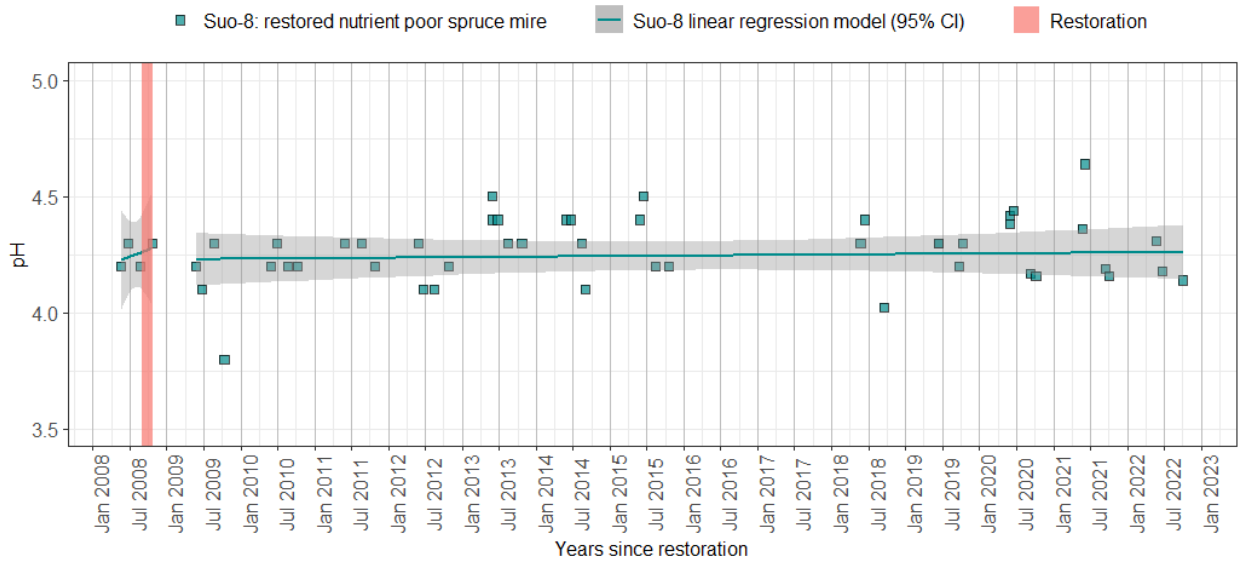


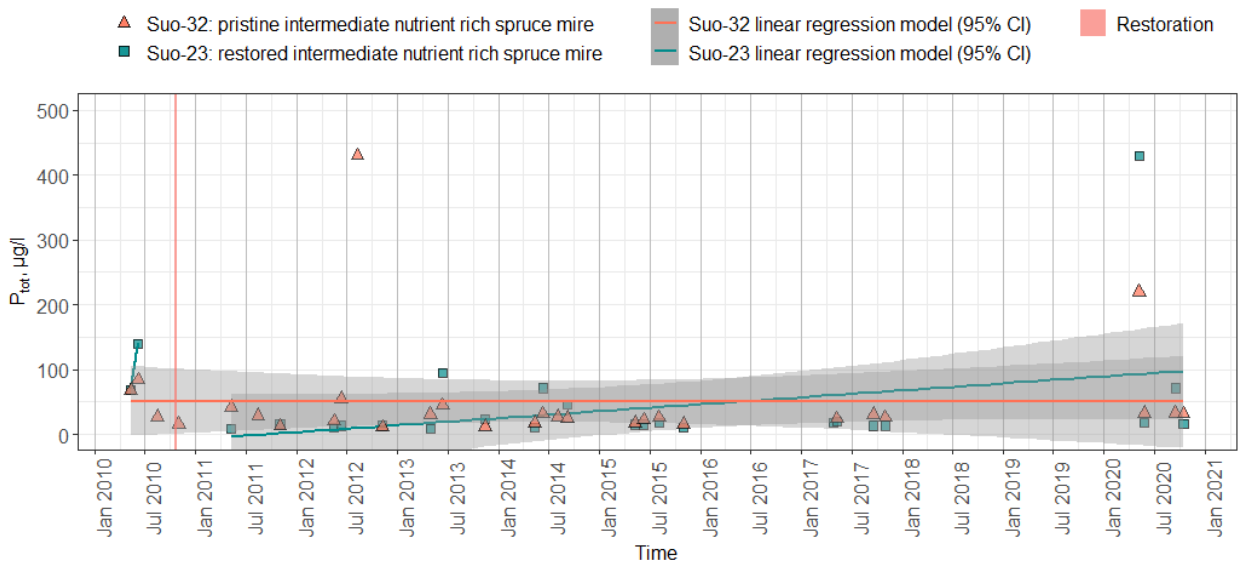
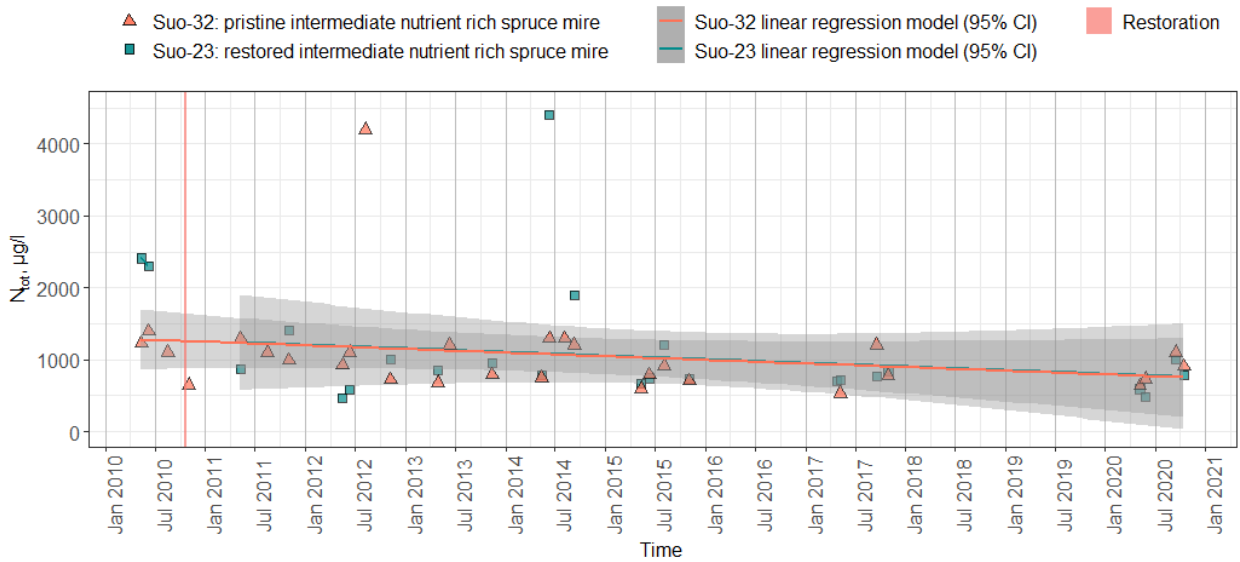
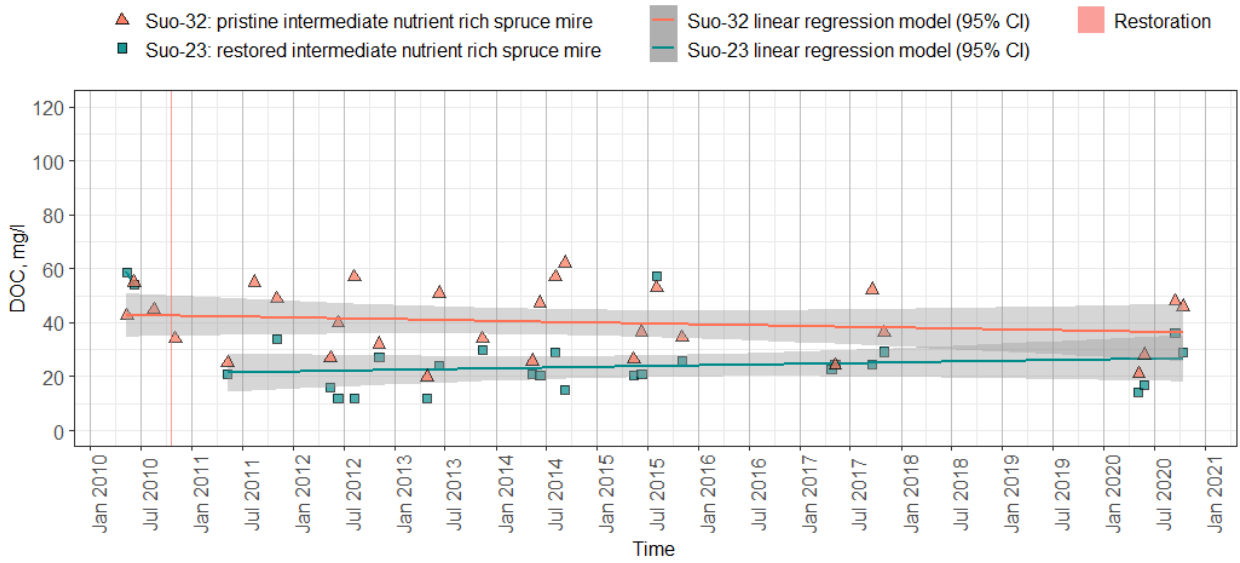


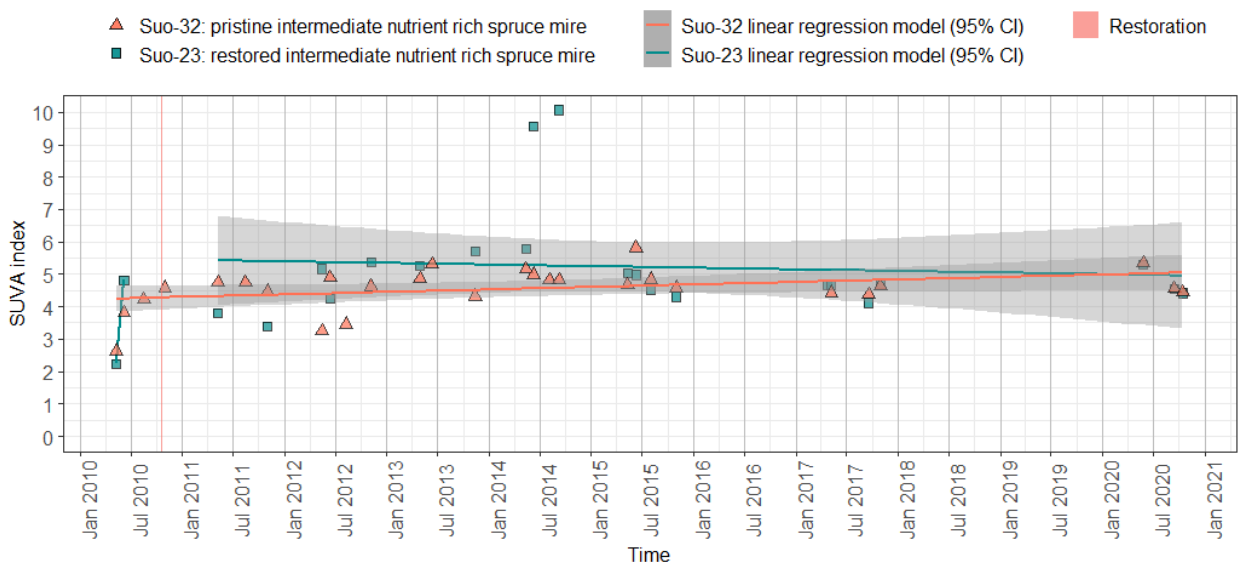
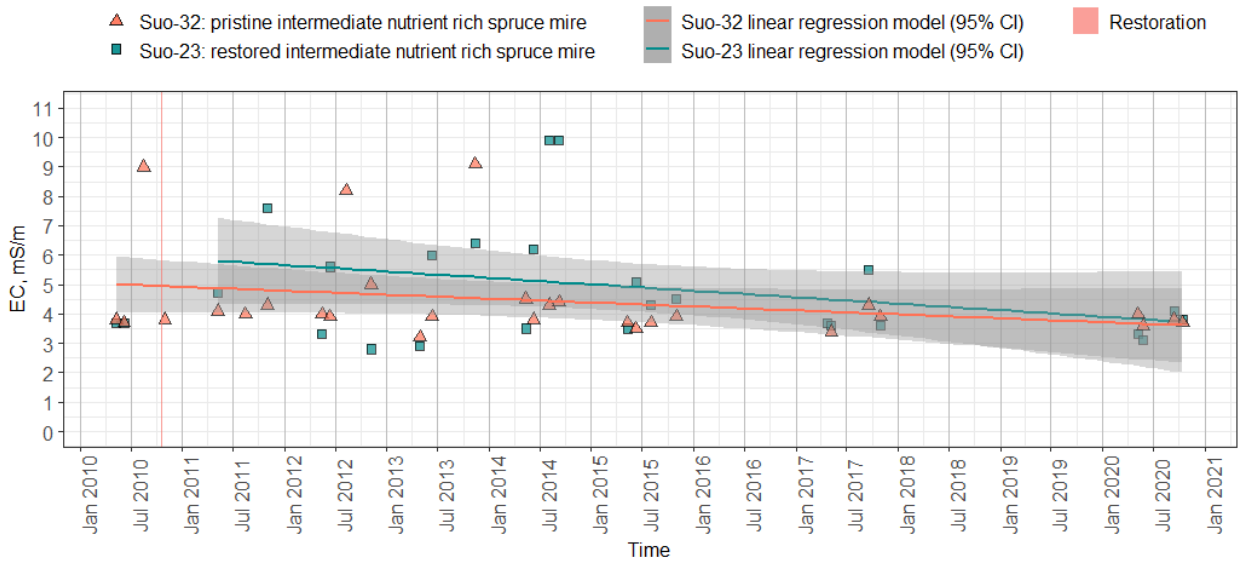
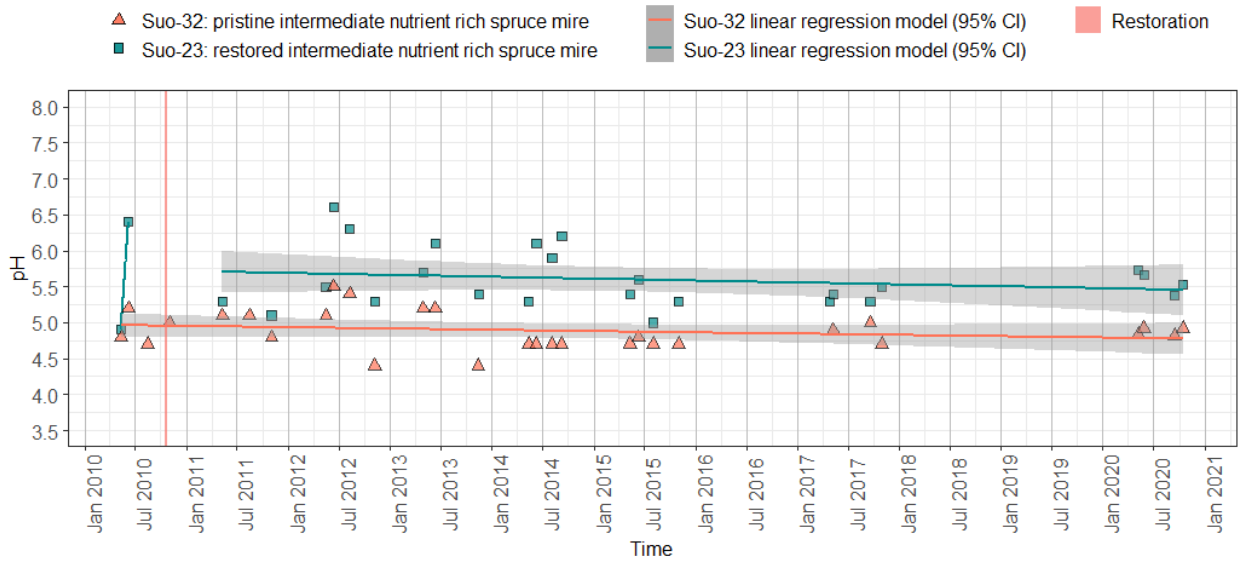


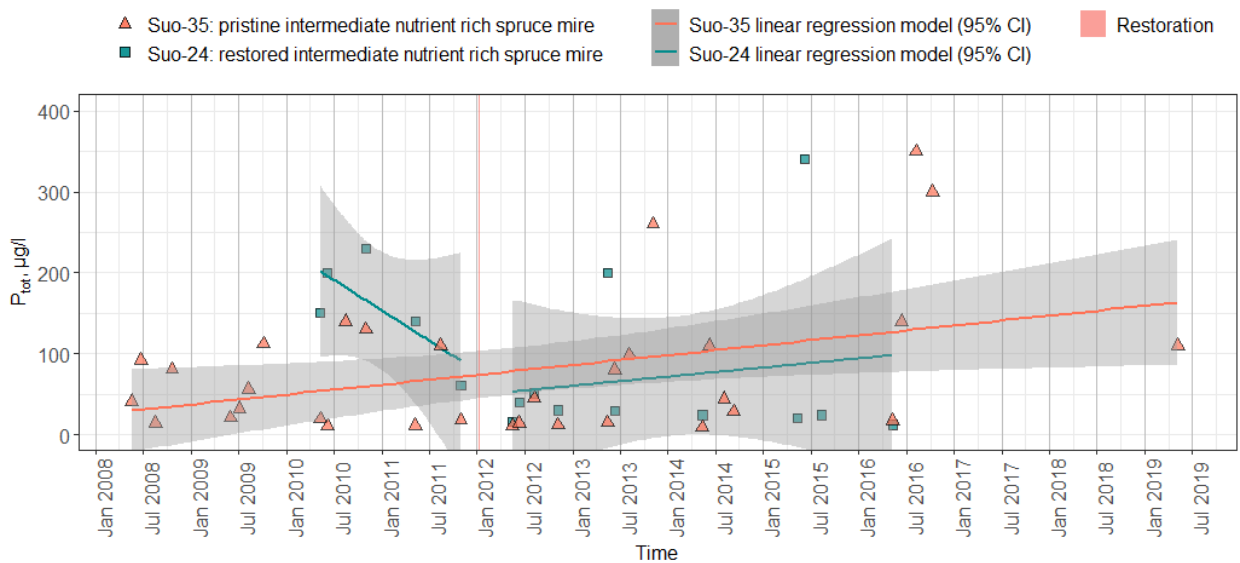
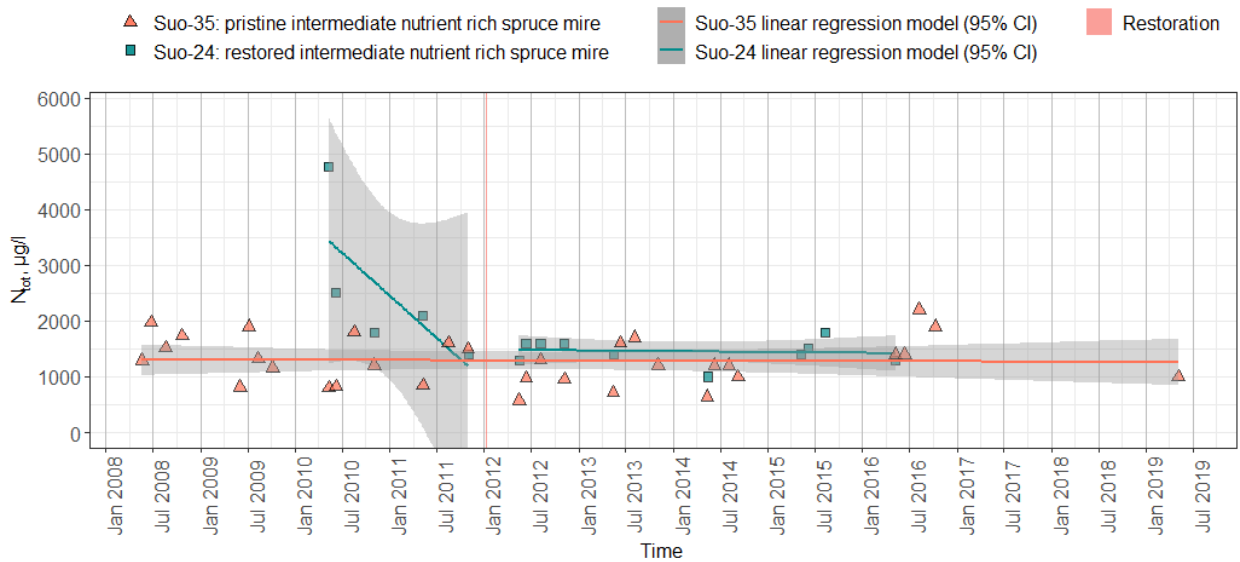
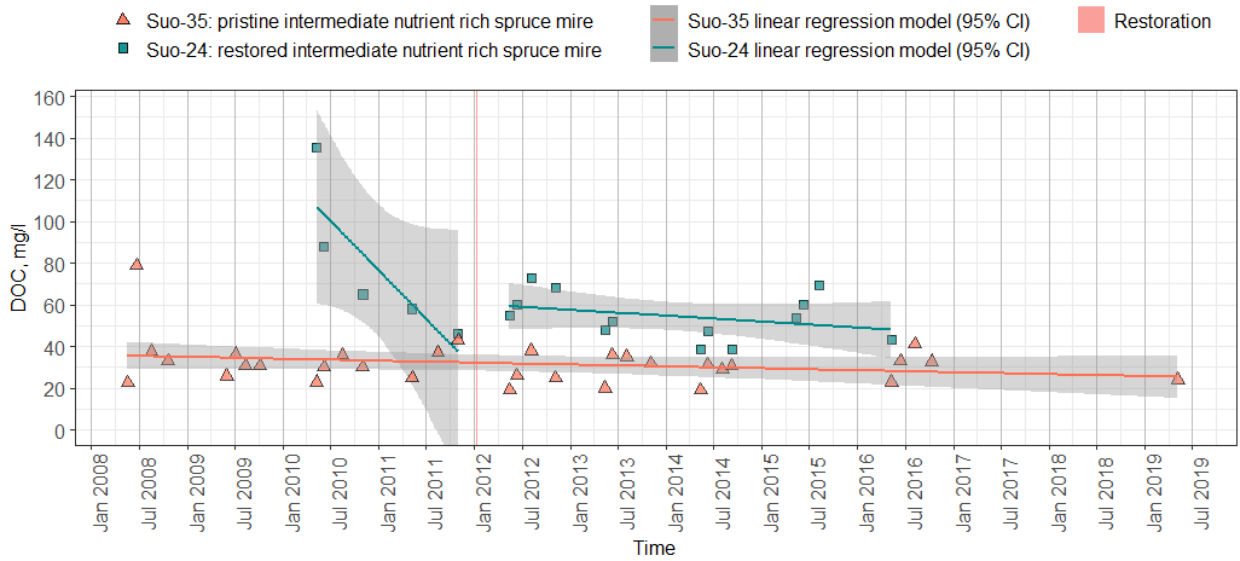


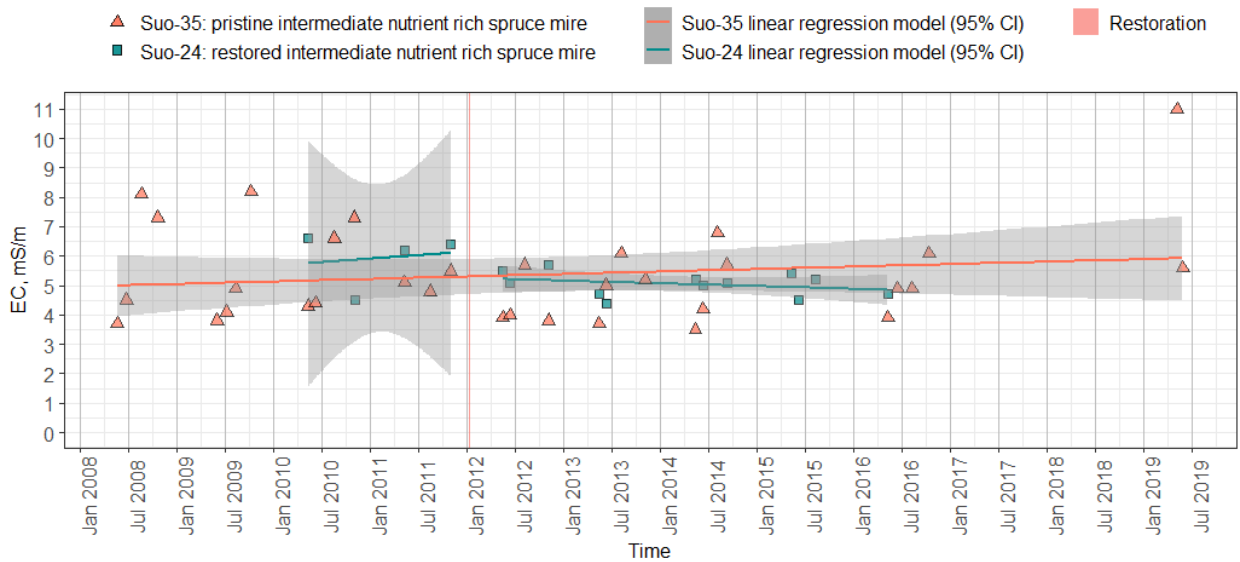
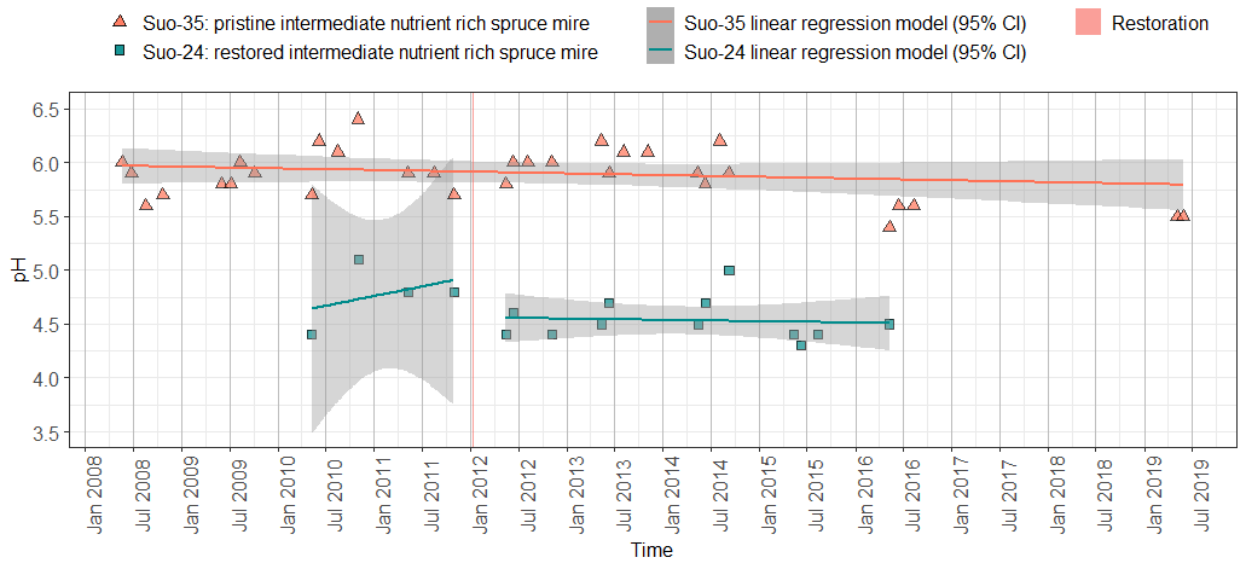


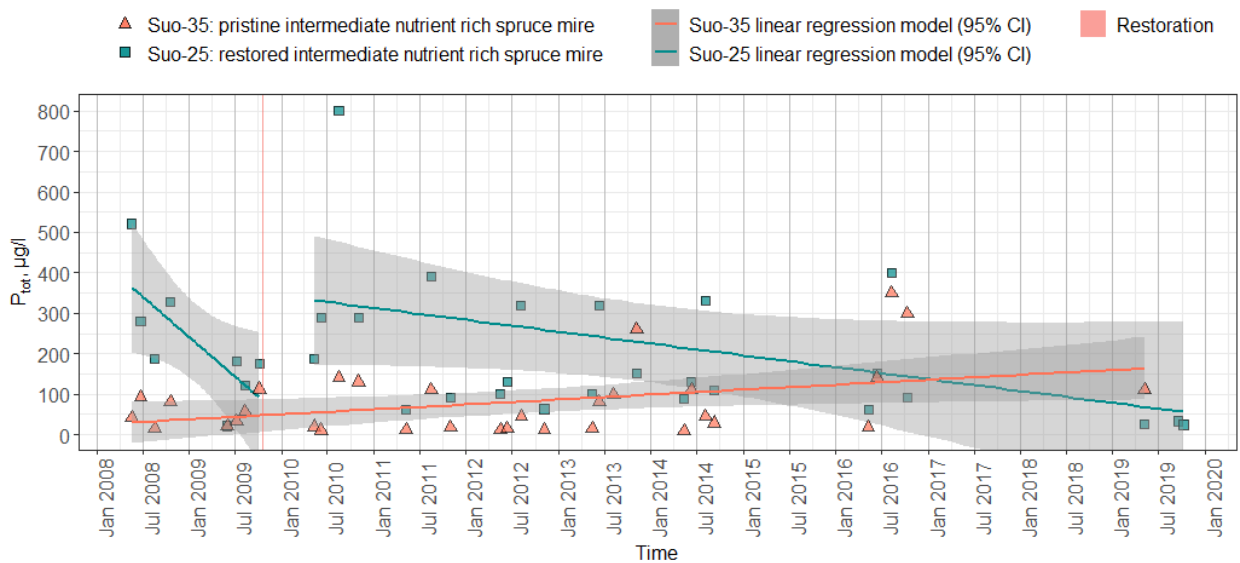
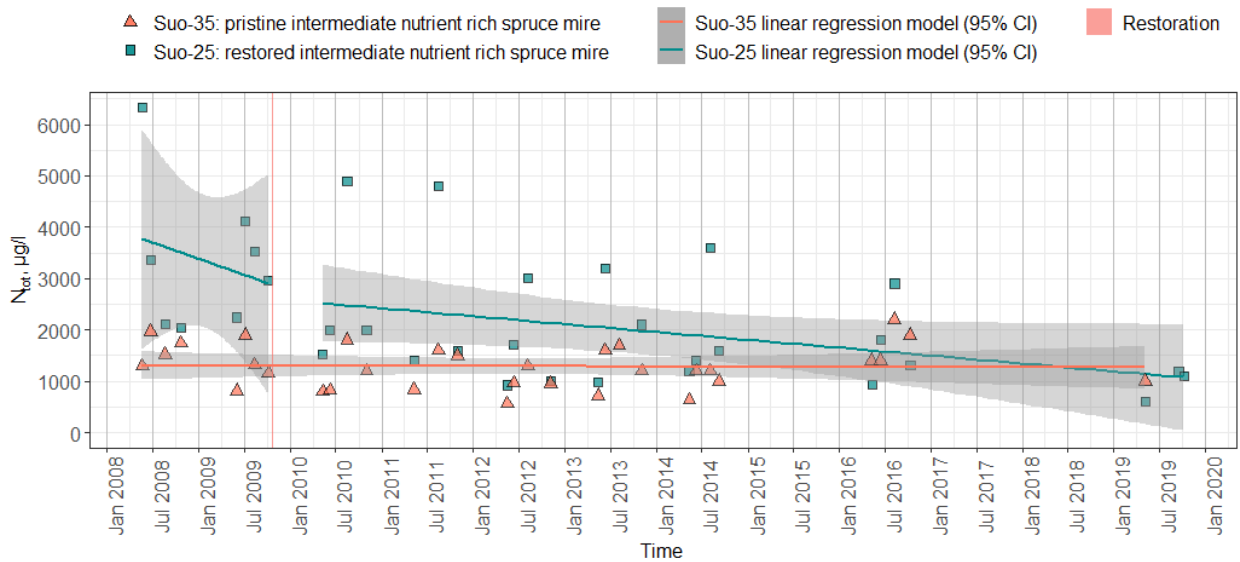
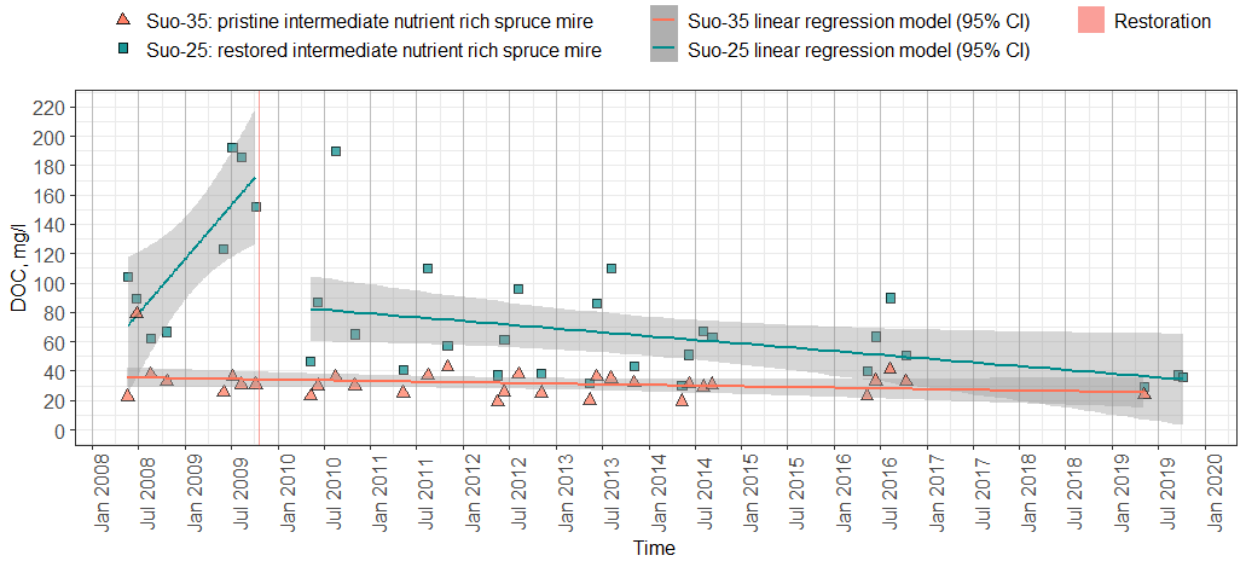


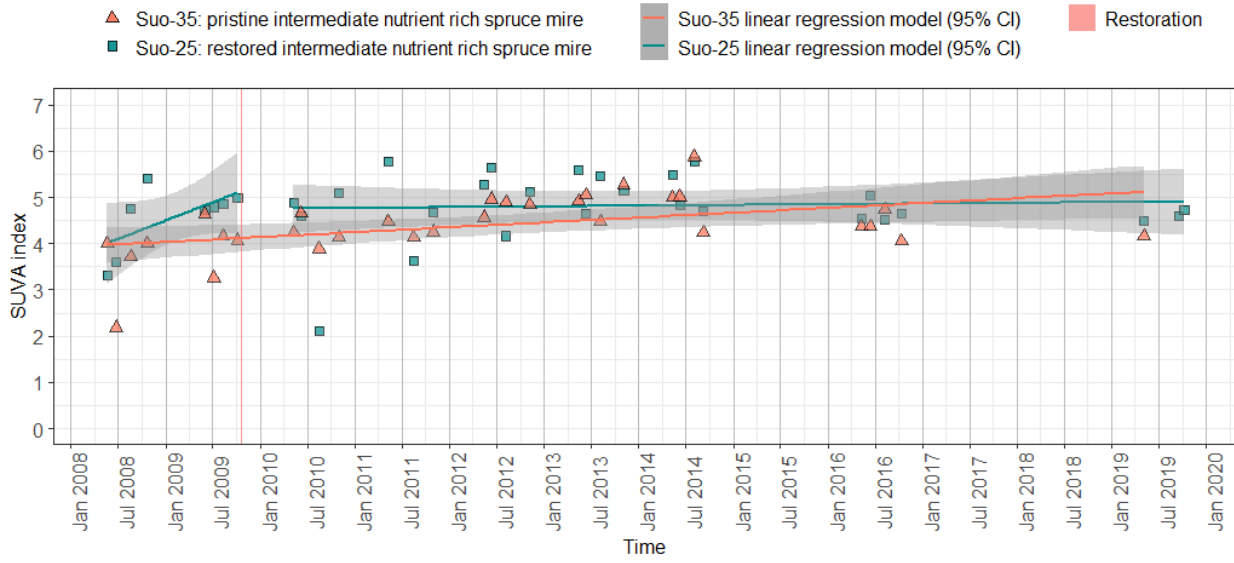
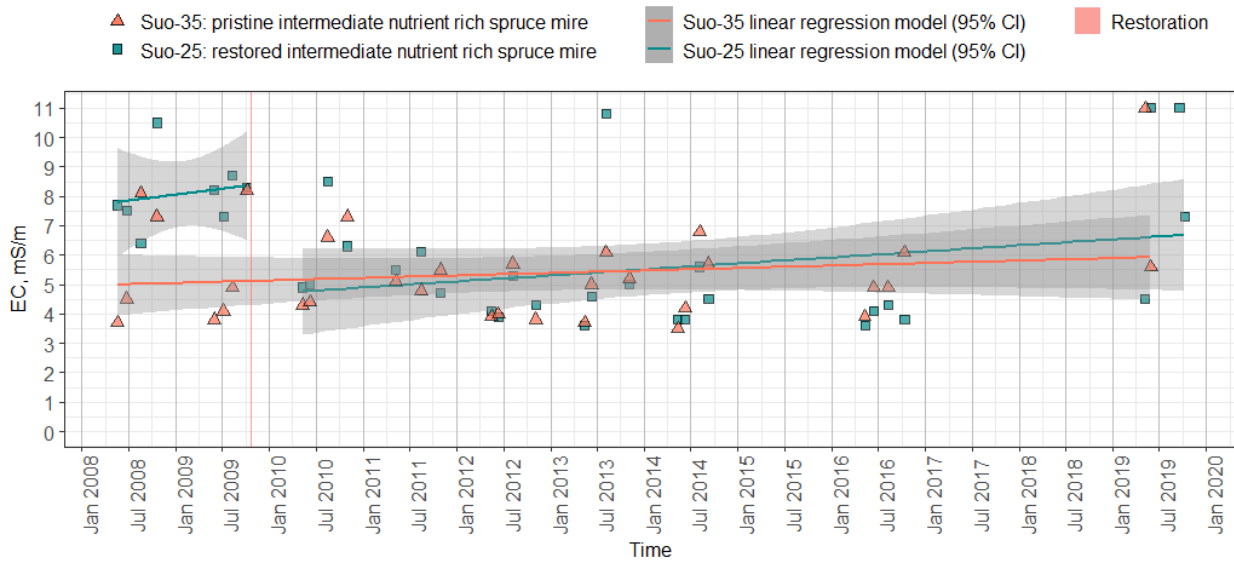
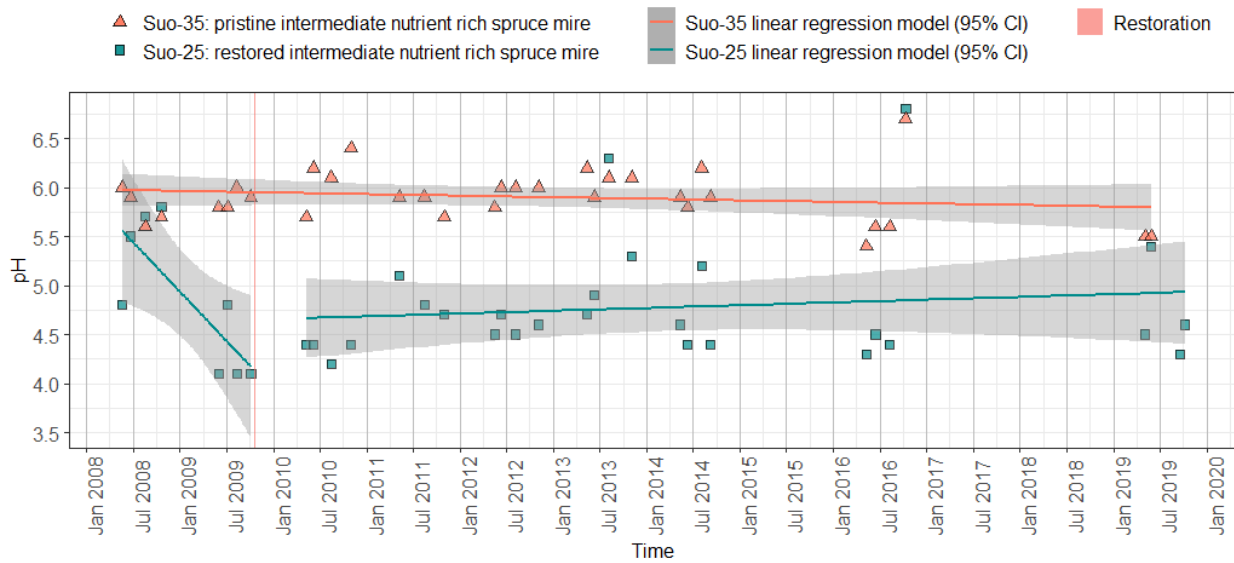


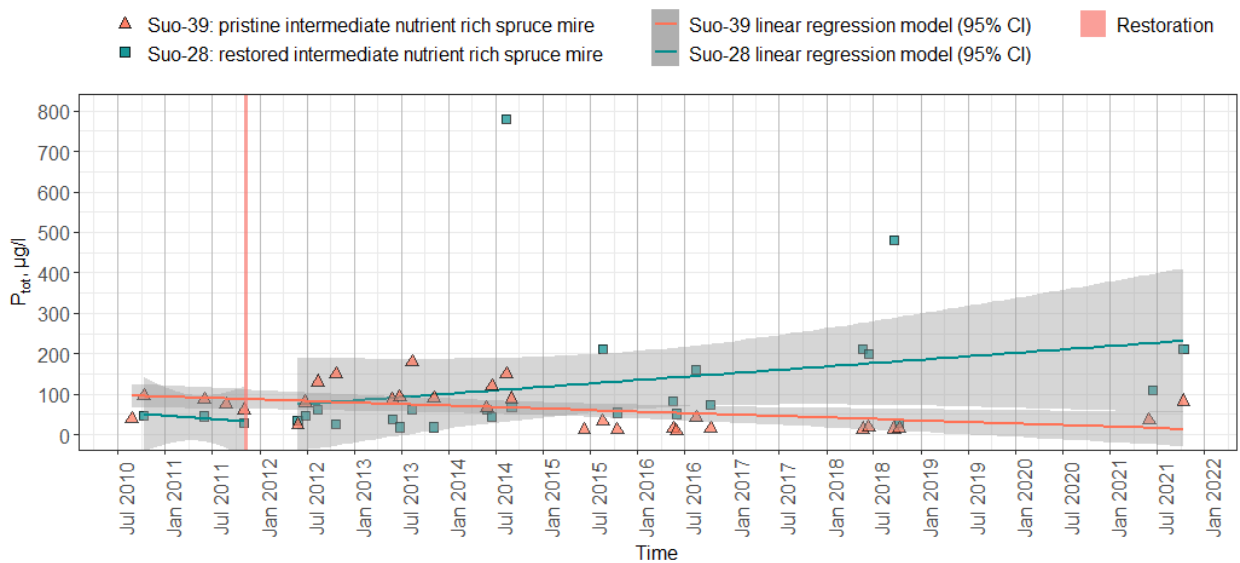
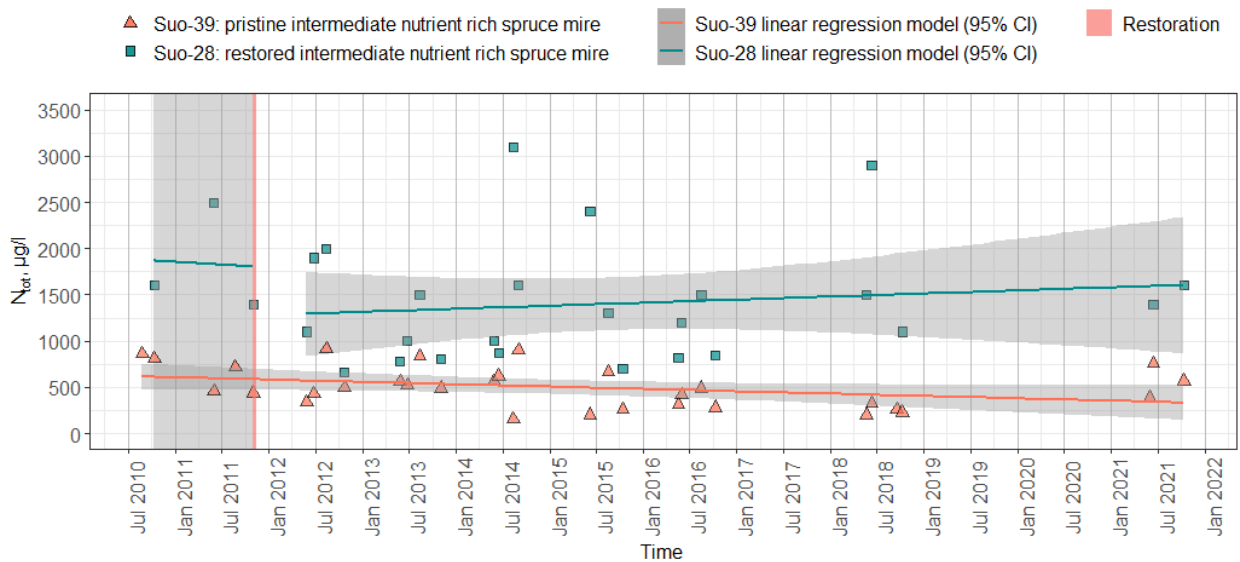
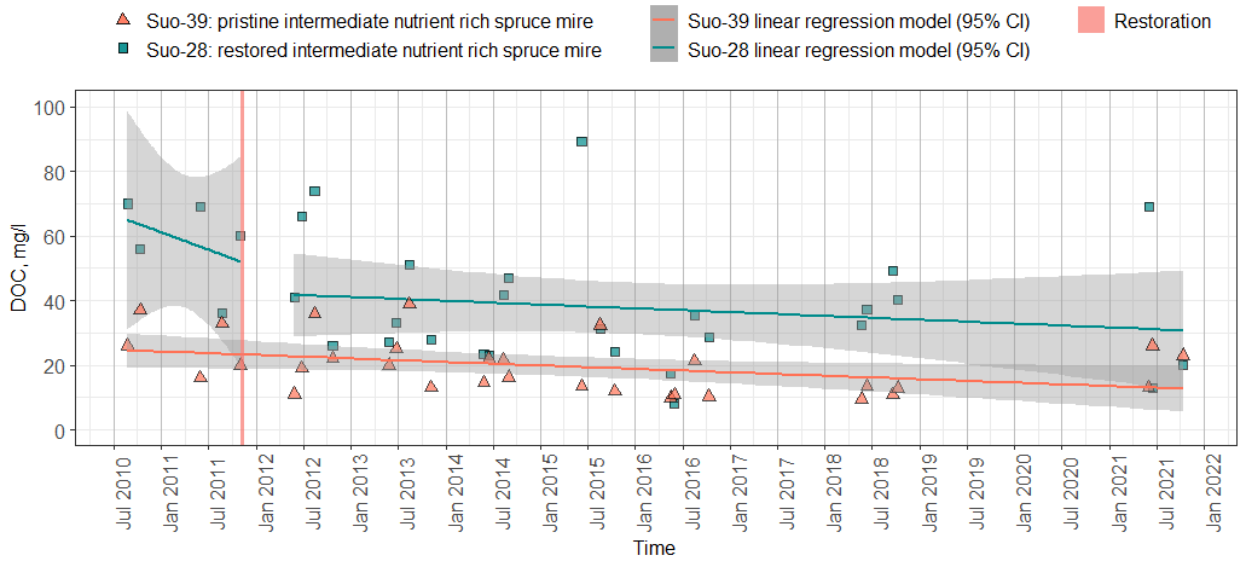


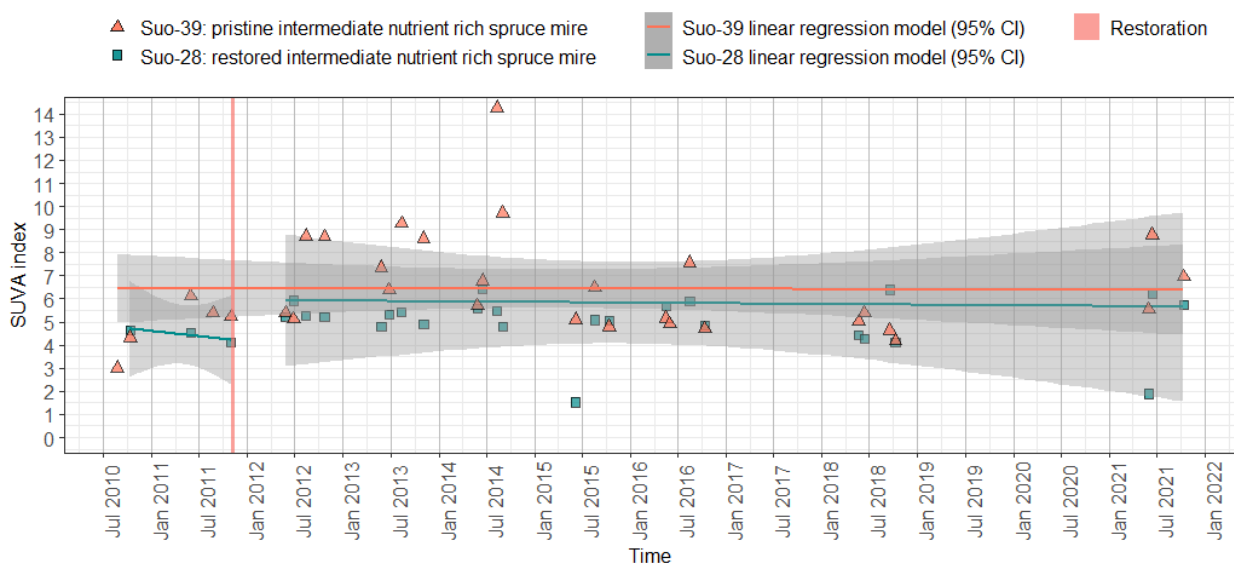
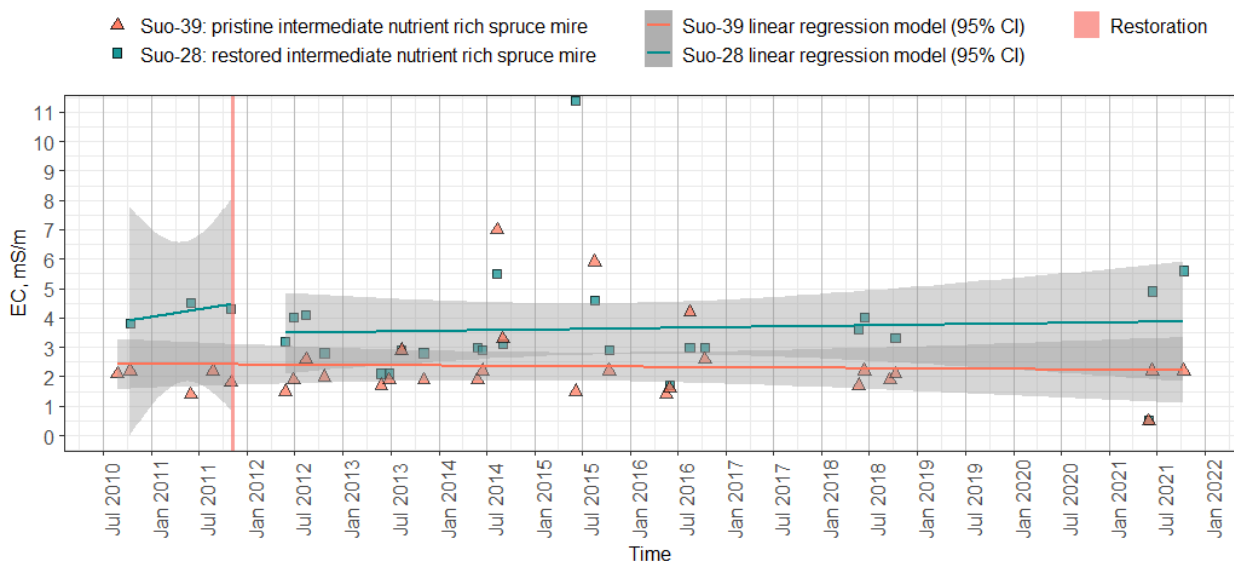
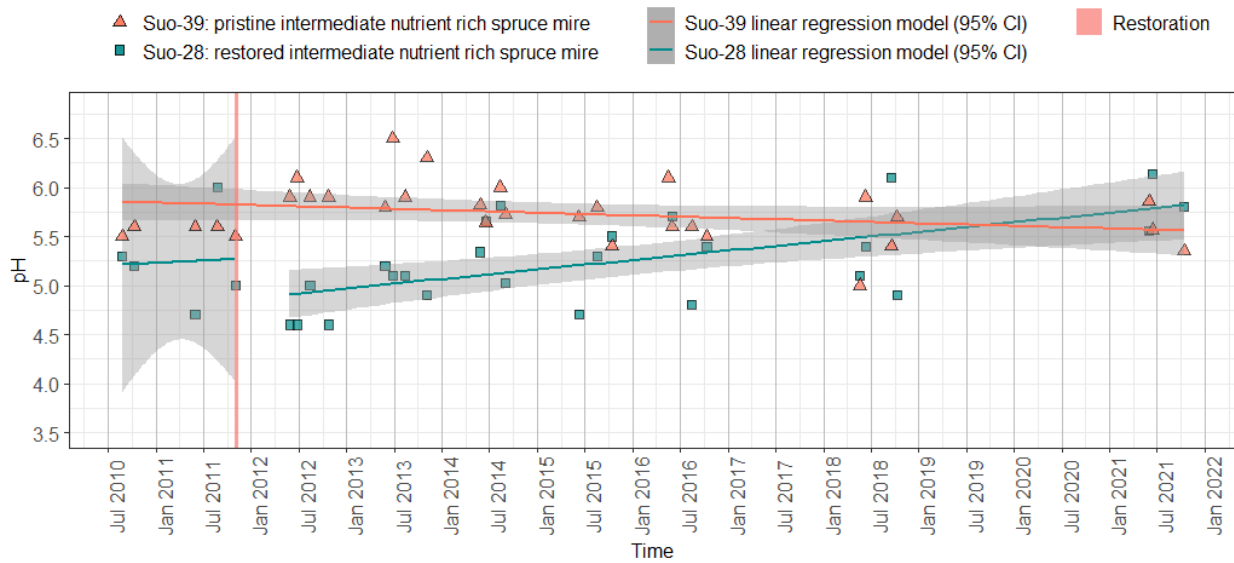












Liite 3. Turpeen, huokosveden ja valumaveden laadun korrelaatiot

All sites surface peat and average pore and runoff water quality correlations with statistical significance (p<0.05)	Pearson correlation coefficient			Spearman correlation coefficient		
	r	N	p	ρ	N	p
Pore water avg P _{tot} (µg/l) and peat P (mg/kg dm)	0.294	16	0.270	0.698	16	0.003
Pore water avg N _{tot} (µg/l) and peat N (kg/t)	0.750	16	8.3E-4	0.492	16	0.053
Peat P (mg/kg dm) and peat Fe (mg/kg dm)	0.827	16	7.8E-5	0.823	16	9.2E-5
Peat P (mg/kg dm) and peat Al (mg/kg dm)	0.803	16	1.8E-4	0.811	16	1.4E-4
Pore water avg P _{tot} (µg/l) and peat Al (mg/kg dm)	0.527	16	0.036	0.583	16	0.018
Pore water pH and peat P (mg/kg dm)	0.578	16	0.019	0.653	16	0.006
Pore water pH and peat N (g/kg dm)	0.397	16	0.128	0.495	16	0.051
Pore water pH and peat Ca (mg/kg dm)	0.238	16	0.374	0.534	16	0.033
Pore water pH and peat Fe (mg/kg dm)	0.541	16	0.031	0.695	16	0.003
Pore water pH and peat Al (mg/kg dm)	0.621	16	0.010	0.758	16	6.7E-4
Runoff water NH ₄ -N (µg/l) and peat N (kg/t)	0.941	6	0.005	0.348	6	0.499

Table 1. Pearson r and Spearman's ρ correlation coefficient, number of observations (N), and p-value for all sites surface peat and average pore and runoff water qualities.

Restored sites surface peat and average pore and runoff water quality correlations with statistical significance (p<0.05)	Pearson correlation coefficient			Spearman correlation coefficient		
	r	N	p	ρ	N	p
Pore water avg N _{tot} (µg/l) and peat N ((kg/t)	0.799	10	0.006	0.818	10	0.004
Pore water avg N _{tot} (µg/l) and peat N (g/kg dm)	0.555	10	0.096	0.669	10	0.035
Peat P (mg/kg dm) and peat Fe (mg/kg dm)	0.872	10	9.9E-4	0.915	10	2E-4
Peat P (mg/kg dm) and peat Al (mg/kg dm)	0.836	10	0.003	0.891	10	5.4E-4
Pore water pH and peat P (mg/kg dm)	0.944	10	4E-5	0.879	10	8.1E-4
Pore water pH and peat Fe (mg/kg dm)	0.793	10	0.006	0.891	10	5.4E-4
Pore water pH and peat Al (mg/kg dm)	0.728	10	0.017	0.721	10	0.019
Runoff water NH ₄ -N (µg/l) and peat N (kg/t)	0.986	4	0.014	0.8	4	0.2

Table 2. Pearson r and Spearman's ρ correlation coefficient, number of observations (N), and p-value for restored sites surface peat and average pore and runoff water qualities.

Surface peat and average pore and runoff water quality correlations with statistical significance (p<0.05) for pristine sites and restored sites data over 5 years after restoration	Pearson correlation coefficient			Spearman correlation coefficient		
	r	N	p	ρ	N	p
Pore water avg P _{tot} (µg/l) and peat P (mg/kg dm)	0.294	16	0.270	0.698	16	0.003
Pore water avg N _{tot} (µg/l) and peat N (kg/t)	0.745	16	8.3E-4	0.492	16	0.053
Peat P (mg/kg dm) and peat Fe (mg/kg dm)	0.827	16	7.8E-5	0.823	16	9.2E-5
Peat P (mg/kg dm) and peat Al (mg/kg dm)	0.803	16	1.8E-4	0.811	16	1.4E-4
Pore water avg P _{tot} (µg/l) and peat Al (mg/kg dm)	0.527	16	0.036	0.582	16	0.0018
Pore water pH and peat P (mg/kg dm)	0.578	16	0.019	0.653	16	0.0061
Pore water pH and peat Ca (mg/kg dm)	0.234	16	0.374	0.534	16	0.033
Pore water pH and peat Fe (mg/kg dm)	0.541	16	0.031	0.695	16	0.003
Pore water pH and peat Al (mg/kg dm)	0.621	16	0.010	0.758	16	6.7E-4
Runoff water NH ₄ -N (µg/l) and peat N (kg/t)	0.911	6	0.011	0.493	6	0.320

Table 3. Pearson r and Spearman's ρ correlation coefficient, number of observations (N), and p-value for surface peat and average pore and runoff water qualities for pristine sites and restored sites data over 5 years after restoration.

Liite 4. Droonilennot

K = RGB-kartoitus / RGB mapping, M = Multispektrikartoitus / Multispectral mapping, L = Lämpökartoitus / Thermal mapping
 V = Vapaita kuvia / Free images, I = Video, X = Laserkeilaus / Laser scanning

Kohde / Site	2018	2019	2020	2021	2022
Haikara-aapa Haikara-aapa		K V		K V	
Helvetinjärvi Löyttyjärvi				K K K	
Herankaira Herankaira		K V		K V	
Jäkäläkangas Kitsin paloalueen suo 1 Kitsin paloalueen suo 2	K K				
Kemihaaran suot Kemihaaran suot		K V			K V
Kesonsuo Mykränsuo		K		K	K V
Kinkerinsaarenneva Kinkerinsaarenneva		K			K I
Koitajoki Juurikkasuo I Niemijärven pohjoispuolen suo Koitajoen alue			K M K M		K V I K V

K = RGB-kartoitus / RGB mapping, M = Multispektrikartoitus / Multispectral mapping, L = Lämpökartoitus / Thermal mapping
 V = Vapaita kuvia / Free images, I = Video, X = Laserkeilaus / Laser scanning

Kohde / Site	2018	2019	2020	2021	2022
Leivonmäki					
Haapasuo		K K			
Loukisen latvasoiden					
Kilpivuoma		K V			K V
Loukkuneva-Isoneva					
Loukkuneva		K V			K V I
Mujejärvi					
Jänissuo					V
Loukkusuo		K K M M M	K K K K K M M M L	K K M	K V I
Mustikkasuo lampi				K V	
Porrassuo	K M				
Tammalammen suo		K K M	K K K K K M M M L	K K V I	K V
Olvassuo					
Iso Leväniemi		K K K M L V I	K M L		
Kirkaslampi vanha		K M L			
Kirkaslampi kontrolli		K K M L V I	K M L		
Pikku Olvasjärvi vanha		K K M			
Pikku Olvasjärvi kontrolli		K			
Pisa-Kypäräinen					
Hoikanlampi		K K	K M		
Peuralamminneva					
Peuralamminneva		V K			

K = RGB-kartoitus / RGB mapping, M = Multispektrikartoitus / Multispectral mapping, L = Lämpökartoitus / Thermal mapping
 V = Vapaita kuvia / Free images, I = Video, X = Laserkeilaus / Laser scanning

Kohde / Site	2018	2019	2020	2021	2022
Päätyeenlahti					
Päätyeenlahti		K K			V
Rimpijärvi-Uusijärvi					
Kauniinlamminaapa		K			K I
Ruunaa					
Ruunaan Palosärkät		K V		K V K V	
Salamajärvi					
Ahvenlampi			K		
Tielampi	K K	V			
Kivipää			K K K X		
Saloneva	K K V				
Soikealamminneva	K K K K K K V	K V	K K K K K K	K	
Sarvisuo-Jerusaleminsuo					
Sarvisuo-Jerusaleminsuo					V I
Suolamminvaara-Tervasuo					
Salmilammen suo	K		K M	K V	
Tiilikjärven kansallispuisto					
Sarvisuo-Jerusaleminsuo				K V I	I
Ukonsärkkä					
Haapahaasianvaaran suopelto	K				
Heinävaaran etelä-suo	K				

K = RGB-kartoitus / RGB mapping, M = Multispektrikartoitus / Multispectral mapping, L = Lämpökartoitus / Thermal mapping
 V = Vapaita kuvia / Free images, I = Video, X = Laserkeilaus / Laser scanning

Kohde / Site	2018	2019	2020	2021	2022
Vahtisuo					
Vahtisuo	K V				K V
Veneneva-Pelso					
Temmesjoki Latvanneva			K		K I
Viiankiaapa					
Viiankiaapa			K V	K V K V	
Viitasuon P-puolella					
Koivuluhdansuo	K M V				

Uusimmat Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisut

Sarja A

- No 243 Erkinaro, H. (toim.) 2023: SALMUS – Saving Our Northern Freshwater Pearl Mussel Populations. 336 s.
- No 244 Virnes, J. & Lehtonen, L. 2023: Esteettömien luontokohteiden (reitien) nykytilan arviointi. 48 s.
- No 245 Laulumaa, V. 2023: Päijänteen kansallispuiston arkeologisen inventoinnin päivitys 2022. 38 s.
- No 246 Saatsi, E., Saatsi, P., Sirén, R., Hjelt, H. & Salo, A. 2023: Evon retkeilyalueen rakennetun kulttuuriympäristön inventointi 2022. 80 s.
- No 247 Saatsi, E., Saatsi, P., Sirén, R. & Salo, A. 2023: Päijänteen kansallispuiston retkeilyalueen rakennetun kulttuuriympäristön inventointi 2022. 68 s.
- No 248 Tammilehto, A., Härmä, P., Kallio, M., Törmä, M., Saikkonen, A., Tuominen, S., Impiö, M., Heikkinen, M., Kervinen, M., Jussila, T., Böttcher, K., Pääkkö, E., Kokko, A., Mäkelä, K. & Anttila, S. 2024: Ylä-Lapin luonnon kaukokartoitus – Projektin loppuraportti osa 1 – Aineistot ja menetelmät. 103 s.
- No 249 Tammilehto, A., Saikkonen, A., Pääkkö, E., Tuominen, S., Mäkelä, K., Kokko, A., Härmä, P., Kallio, M., Heikkinen, M., Impiö, M., Törmä, M. & Anttila, S. 2024: Ylä-Lapin luonnon kaukokartoitus – Projektin loppuraportti osa 2 – Luontotyypit. 59 s.
- No 250 Stolton, S., Ahlroth, P., Auvinen, A.-P., Dehmel, N., Dudley, N., Hošek, M., Lahti, K., Ross, B. & Leung, Y.-F. 2024: Management Effectiveness Evaluation of Finland's Protected Areas 2023. 195 s.

Sarja B

- No 268 Puranen, T. 2022: Liesjärven kansallispuiston kävijätutkimus 2021. 62 s.
- No 269 Tiikkainen, U. 2023: Sallan kansallispuiston ja Sallatunturin alueen kävijätutkimus 2022. 63 s.
- No 270 Haverinen, S. 2023: Patvinsuon kansallispuiston kävijätutkimus 2022. 66 s.
- No 271 Haverinen, S. 2023: Tiilikjärven kansallispuiston kävijätutkimus 2022. 64 s.
- No 272 Metsähallitus 2023: Suojelualueiden hoidon ja käytön periaatteet. 245 s.

Sarja C

- No 181 Metsähallitus 2022: Selkämeren kansallispuiston ja Natura 2000 -alueiden hoito- ja käyttösuunnitelma. 199 s.
- No 182 Metsähallitus 2022: Helvetinjärven kansallispuiston hoito- ja käyttösuunnitelma. 109 s.
- No 183 Metsähallitus 2022: Pinkjärven ja Lastensuon hoito- ja käyttösuunnitelma. 99 s.
- No 184 Metsähallitus 2023: Koloveden kansallispuiston hoito- ja käyttösuunnitelma. 131 s.
- No 185 Metsähallitus 2023: Linnansaaren kansallispuiston hoito- ja käyttösuunnitelma. 157 s.
- No 186 Metsähallitus 2024: Seitsemisen kansallispuiston hoito- ja käyttösuunnitelma. 107 s.



ISSN-L 1235-6549
ISSN (VERKKOJULKAISU) 1799-537X
ISBN 978-952-377-120-8 (PDF)
JULKAISUT.METSA.FI