

Ennallistamisen vaikutus metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden metaanivirtoihin



LIFEPeatLandUse -projektin ennallistettua koealaa Torronsuolla, Tammelassa. Kuvan © TH 2015

Tutkielma maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten
Metsien ekologia ja käyttö

Tiina Katariina Heikkinen

toukokuu 2016



Tiedekunta/Osasto Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos Metsätieteiden laitos	
Tekijä Tiina Katariina Heikkinen			
Työn nimi Ennallistamisen vaikutus metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden metaanivirtoihin			
Oppiaine Metsien ekologia ja käyttö/metsä- ja suoekosysteemien hoito ja ennallistaminen			
Työn laji Maisterintutkielma		Aika Toukokuu 2016	Sivumäärä 43 s. + liitteet
Tiivistelmä <p>Luonnontilaiset suot ovat hitaan hapellisen hajotuksen vuoksi hiilidioksidinieluja ja metaanin lähteitä. Metsäojituksen jälkeen metaanipäästöjen on usein havaittu pienenevän ja hiilidioksidipäästöjen vastaavasti kasvavan. Osa ojitusalueista (noin 830 000 hehtaaria) on vähäravinteisuuden, märkyyden tai liian pohjoisen sijaintinsa vuoksi metsänkasvatuskelvottomia. Niillä ei nykyisin mukaan tarvitse tehdä kunnostusojitusta tai muita toimenpiteitä vaan ne voidaan esimerkiksi ennallistaa. Eri toimenpiteiden vaikutuksista metsänkasvatuskelvottomien soiden kasvihuonekaasuvirtoihin on kuitenkin vielä vain vähän tietoa.</p> <p>Tässä työssä haluttiin selvittää metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden ennallistamisen vaikutusta niiden metaanivirtoihin. Metaanivirtoja mitattiin suljetun kammion menetelmällä 14 koealalla (7 ennallistettua, 6 ojitettua ja 1 luonnontilainen) Sipoon, Tammelan ja Parkanon ympäristössä kesällä 2014 ja 2015. Ennallistamistoimenpiteet oli tehty 4–22 vuotta aiemmin. Kaasumittausten lisäksi koealoilla seurattiin myös pohjavedenpinnan tasoa sekä turpeen lämpötilaa 5 ja 30 cm:n syvyydeltä. Sipoon ja Tammelan koealoilla mittauspisteiden kasvillisuus kartoitettiin Braun-Blanquet-menetelmällä.</p> <p>Ennallistetut koealat olivat keskimäärin märempiä kuin ojitetut koealat mutta kuivempia kuin luonnontilaiset. Turpeen lämpötiloissa ei sarkapisteillä ollut tilastollisesti merkitseviä eroja, mutta ennallistettujen koealojen ojapisteet olivat ojitettuja lämpimämpiä. Myös tupasvillan (<i>Eriophorum vaginatum</i>) peittävyys oli ennallistetuilla koealoilla ojitettuja suurempi.</p> <p>Kaikki koealat olivat kasvukauden aikana metaanin lähteitä. Ennallistettujen koealojen vuotuinen metaanivuo ($4.02 \pm 1.21 \text{ g m}^{-2} \text{ v}^{-1}$) oli suurempi kuin ojitettujen koealojen vuo ($2.86 \pm 1.57 \text{ g m}^{-2} \text{ v}^{-1}$). Suurin metaanivuo ($8.38 \text{ g m}^{-2} \text{ v}^{-1}$) mitattiin luonnontilaisella koealalla. Metaanivuon havaittiin kasvaneen etenkin täytetyissä ojissa, joissa se läheni luonnontilaisen koealan painannepintojen vuota. Ojitettujen ja ennallistettujen koealojen tai eri vuosina ennallistettujen koealojen metaanivuot eivät kuitenkaan eronneet tilastollisesti merkitsevästi toistaan, mikä johtui vain pienistä eroista pohjavedenpinnan tasossa, turpeen lämpötilassa ja tupasvillan peittävydessä sekä suuresta hajonnasta. Päästöt olivat lähellä kirjallisuudesta löytyviä luonnontilaisia arvoja, mikä kuvaa toisaalta ojituksen epäonnistumista ja toisaalta ennallistamisen onnistumista. Mitään suurta ilmastollista haittaa karujen soiden ennallistamisesta ei myöskään ole.</p>			
Avainsanat Ennallistaminen, kammiomittaus, metsäojitus, metsänkasvatuskelvottomuus, metaani, suo			
Säilytyspaikka Helda (Helsingin yliopiston sähköinen arkisto), Viikin tiedekirjasto			
Muita tietoja Osa Metsähallituksen, Luonnonvarakeskuksen, Suomen ympäristökeskuksen, Vapo Oy:n sekä Helsingin ja Oulun yliopistojen EU-rahoitteista LIFEPEATLANDUSE -hanketta.			
Ohjaajat: yliopistonlehtori Kari Minkkinen (HY) ja tutkija Paavo Ojanen (HY/Luke)			



Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Department Department of Forest Sciences	
Author Tiina Katariina Heikkinen			
Title The effect of restoration on methane fluxes from low productive nutrient poor raised bogs			
Subject Forest ecology and management/Management and restoration of forest and peatland ecosystems			
Level Master's thesis	Month and year May 2016		Number of pages 43 p. + appendices
Abstract <p>Due to anoxic conditions and slow decomposition, pristine peatlands are usually considered as sinks of carbon dioxide but sources of methane. After drainage for forestry purposes, carbon dioxide emissions usually start to increase and methane emissions decrease. Nowadays about 830 000 hectares of forestry drained peatlands in Finland are considered as low productive and non-suitable for commercial forestry as they are too nutrient-poor or too wet. Restoration has been seen one way to after-use these areas but its effects on greenhouse gas fluxes, especially on very nutrient-poor bogs, is mainly unknown.</p> <p>The aim of this thesis was to find out the effect of restoration on methane fluxes from low productive nutrient poor raised bogs. Methane fluxes were measured from 14 sites (7 restored, 6 drained, 1 pristine) near Sipoo, Tammela and Parkano during the summers of 2014 and 2015. Also water table level and peat temperature from 5 and 30 cm depth were measured. Vegetation of the gas measurement plots was surveyed using the Braun-Blanquet method in Sipoo and Tammela sites. Restoration (ditch blocking and/or tree removal) was done 4–22 years before measurements.</p> <p>Restored sites were wetter than drained sites but drier than pristine sites. Peat temperature was higher in the ditches of restored sites and the coverage of cottongrass (<i>Eriophorum vaginatum</i>) increased a little. Both drained and restored sites were methane sources during the growing season. The annual flux of restored sites ($4.02 \pm 1.21 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) was little bit higher than drained sites ($2.86 \pm 1.57 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$). The highest flux was measured from pristine sites ($8.38 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$). Methane fluxes from the ditches increased most and they were close to the fluxes from hollows of pristine site. The age of restored site did not affect the methane fluxes although the highest fluxes were measured from the youngest site. The results were not, however, statistically significant due the huge variation within and between the sites. The fluxes of restored sites were closer to the fluxes of pristine peatlands found from literature compared to drained sites, which means that restoration was successful and there was not a big problem for climatic point of view.</p>			
Keywords chamber measurement, forestry drainage, low productivity, methane, peatland, raised bog, restoration			
Where deposited Helda, Viikki Science Library			
Additional information Part of the EU-funded LIFEPeatLandUse project by Metsähallitus, Natural Resources Institute Finland, Finnish Environment Institute, Vapo oy, University of Oulu and University of Helsinki. Supervisors: University lecturer Kari Minkkinen (UH) and researcher Paavo Ojanen (UH/Natural Resources Institute Finland)			

Sisällysluettelo

KÄSITTEITÄ.....	1
1 JOHDANTO.....	2
1.1 Suot ja metaani	2
1.2 Metsänkasvatuskelvottomien soiden ennallistaminen	4
1.3 Tavoitteet.....	7
2 AINEISTO JA MENETELMÄT	8
2.1 Aineiston hankinta.....	8
2.1.1 Koealat.....	8
2.1.2 Metaanivuon mittaus	9
2.1.3 Pohjavedenpinnan taso ja turpeen lämpötila	11
2.1.4 Kasvillisuusanalyysi mittauspisteillä.....	11
2.1.5 Ojien luokittelu	12
2.2 Aineiston laskenta ja analyysi	12
2.2.1 Pohjavedenpinnan taso ja turpeen lämpötila	12
2.2.2 Mittauspisteiden kasvillisuus.....	13
2.2.3 Metaanivuo	13
2.2.4 Tilastollinen analyysi.....	14
3 TULOKSET	15
3.1 Ojaluokitus	15
3.2 Pohjavedenpinnan taso	16
3.3 Turpeen lämpötila.....	18
3.4 Mittauspisteiden kasvillisuus.....	20
3.5 Metaanivuo	22
4 TULOSTEN TARKASTELU	29
4.1 Pohjavedenpinnan taso	29
4.2 Turpeen lämpötila.....	30
4.3 Mittauspisteiden kasvillisuus.....	31
4.4 Metaanivuo	32
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	35
KIITOKSET	36
LÄHTEET	37
LIITTEET	44

KÄSITTEITÄ

Ennallistaminen: Ihmisen muuttaman ekosysteemin palauttaminen toiminnaltaan ja rakenteeltaan lähelle luonnontilaa (Ennallistaminen suojelualueilla 2003; Valtioneuvoston soiden... 2011). Soilla tavoitellaan etupäässä pohjaveden pinnan nostoa, alkuperäisten vesivirtojen palauttamista, suokasvillisuuden palauttamista ja turpeen kertymisen jatkumista. Ennallistaminen toteutetaan yleensä täyttämällä ojat ja poistamalla puustoa. Sitä on tehty Suomessa pääosin suojelualueilla

Metaani (CH₄): Yksinkertaisin hiilivety, jota muodostuu orgaanisen aineen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Hiilidioksidin ja typpioksiduulin ohella yksi tärkeimmistä kasvihuonekaasuista.

Metanogeenit: Metaania hapettomissa oloissa tuottavat arkit.

Metanotrofit: Metaania hapellisissa oloissa kuluttavat bakteerit.

Metsänkasvatuskelvoton: Ojitusalue, jonka suotyypin ei heikon tuotoksen tai pohjoisen sijainnin vuoksi sovellu metsänkasvatukseen eikä uuteen puusukupolveen kannata investoida (Valtioneuvoston soiden... 2011). Kunnostusojitusta ei näin ollen tarvitse tehdä vaan suon voidaan antaa palautua luonnontilaan. Metlan selvityksen mukaan tällaisia soita olisi Suomessa noin 830 000 hehtaaria ja suurin osa Pohjois-Suomessa (Ehdotus soiden ja... 2011).

Minerotrofinen: Suo joka saa vettä ja ravinteita sateen ja kuivalaskeuman lisäksi myös ympäröiviltä alueilta. Usein runsasravinteisempia, märempiä ja saravaltaisempia kuin pelkän sadeveden varassa kasvavat suot.

Ombrotrofinen: Suo, joka saa vettä ja ravinteita vain sateen tai kuivalaskeuman mukana. Usein vähäravinteinen rahkasuo.

Suljetun kammion menetelmä: Menetelmä kaasujen vaihdon mittaamiseksi maaperän ja ilmakehän rajapinnasta (Alm ym. 2007). Läpinäkymätön (hengityksen, metaanin ja typpioksiduulin mittausta) tai läpinäkyvä (fotosynteesin mittausta) kammio asetetaan maassa olevaan kaulukseen/uraan ilmatiiviisti, ja kaasunäytteet otetaan tietyin väliajoin kammion paikalleen asettamisesta. Kaasuvuo määritellään kaasun pitoisuuden muutoksesta kammiossa.

Dynaaminen kammio kierrättää ilmaa kammion ja kaasuanalysointorin välillä, staattisessa kammiossa näytteeksi otettu ilma korvataan uudella (Pumpanen ym. 2004). Tässä työssä käytetään staattisia kammioita.

Suo: Kostean ilmaston luoma ekosysteemi, jonka pohjaveden pinta on lähellä maanpintaa ja joka hitaan hapellisen hajotuksen vuoksi usein kerryttää turvetta ja sitoo hiiltä (ekologinen määritelmä).

Suo voidaan määritellä myös kasvitieteellisesti (märisä ja happamissa oloissa kasvavien turvetta muodostavien ja kerryttävien kasvien kasvupaikka), metsätieteellisesti (kivennäismaata peittää orgaaninen turvekerros tai kasvillisuudesta yli 75 prosenttia on suokasveja) tai geologisesti (yli 30 senttimetrin turvekerrostuma). Ojitetuilla soilla turvekerroksen olemassaolo riittää tekemään suon suoksi.

1 JOHDANTO

1.1 Suot ja metaani

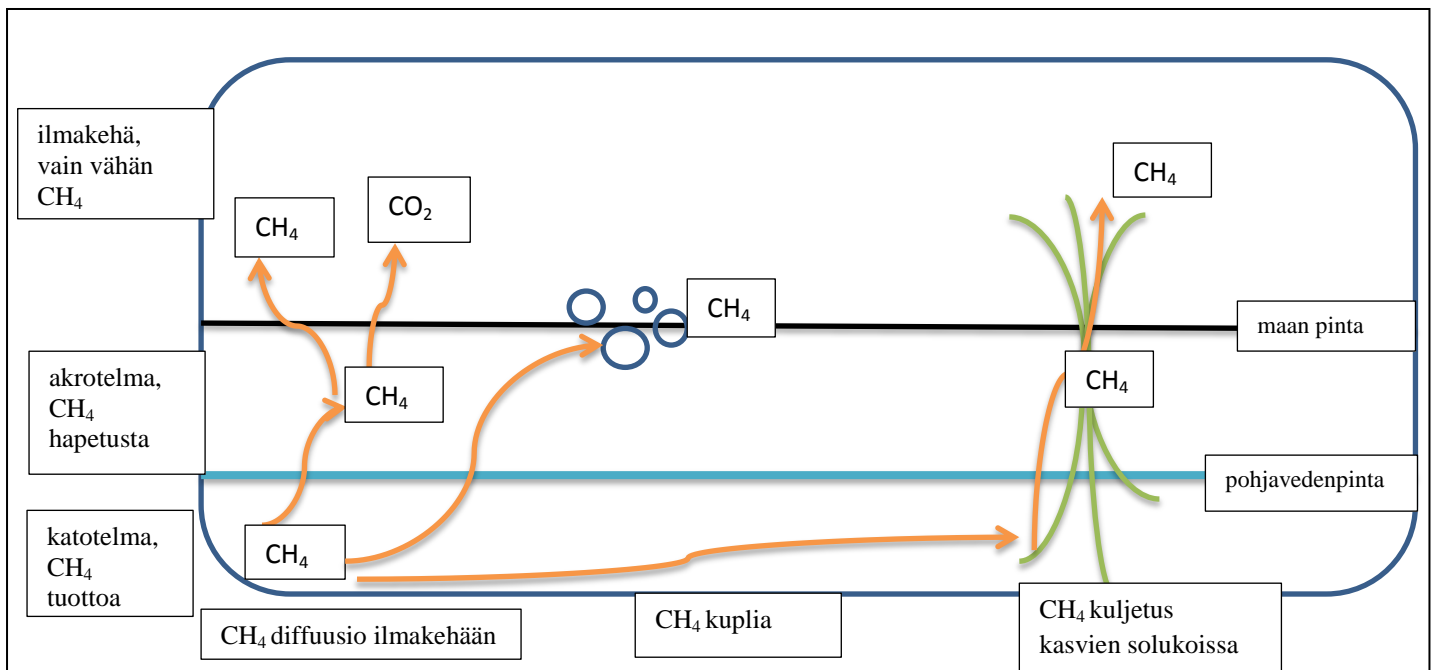
Luonnontilaiset suot ovat hitaan hapellisen hajotuksen vuoksi merkittäviä hiilivarastoja ja hiilidioksidinieluja. Borealisiin ja subarktisiin soihin, joiden pinta-ala on noin 350 miljoonaa hehtaaria, on Turusen ym. (2002) arvion mukaan varastoitunut 270–370 petagrammaa (10^{15} grammaa) hiiltä. Vuosittain hiiltä sitoutuu lisää lähes 70 teragrammaa (Tg, 10^{12} grammaa). Suomessa luonnontilaiset suot varastoivat hiiltä lähes 2260 Tg, ja vuosittaisen nielun on arvioitu olevan noin 0,80 Tg (Turunen ym. 2002).

Hiilidioksidin sidonnan lisäksi luonnontilaiset suot ovat kuitenkin merkittäviä metaanin lähteitä. Esimerkiksi vuosina 2000–2009 luonnontilaiset suot ja kosteat maat päästivät vuosittain ilmakehään noin 180–250 Tg metaania (Ciais ym. 2013). Ombrotrofisilla soilla päästöt voivat vuositasolla olla alle yhdestä liki 16 grammaan metaania neliömetriltä (Moore ja Knowles 1990; Nykänen ym. 1998; Saarnio ym. 2007). Minerotrofiset suot päästävät metaania ilmakehään ombrotrofisia enemmän, jopa yli 40 grammaa neliömetriltä vuodessa (Moore ja Knowles 1990; Saarnio ym. 2007).

Metaania muodostuu metanogeenisten arkkien hajottaessa orgaanista ainetta hapettomissa oloissa pohjavedenpinnan alapuolella (eli katotelmassa, Svensson ja Sundh 1992). Metanotrofiset bakteerit hapettavat syntynyttä metaanikaasua hiilidioksidiksi suon hapellisessa kerroksessa, akrotelmassa. Ilmakehään kulkeutuva metaanipäästö syntyy näiden kahden prosessin erotuksena (Svensson ja Sundh 1992; Couwenberg ja Fritz 2012). Metaania pääsee ilmakehään kolmella eri tavalla: diffundoitumalla hitaasti suuremmasta pitoisuudesta pienempään, nopeasti kuplimalla tai kasvillisuuden kautta (LeMer ja Roger 2001; Cooper ym. 2014; kuva 1). Kasvillisuudella onkin usein havaittu olevan suuri merkitys soiden metaanipäästöissä (esimerkiksi King ym. 1998; Marinier ym. 2004; Strack ym. 2006; Saarnio ym. 2007).

Etenkin saramaisten kasvien on todettu nostavan päästöjä, sillä syväjuurisina ne tuovat tuoretta orgaanista hiiltä suoraan hapettomaan turvekerrokseen (King ym. 1998; Marinier ym. 2004; Saarnio ym. 2007). Lisäksi metaania kulkeutuu sarojen

juurten tuuletussolukon kautta hapellisen kerroksen läpi ilmakehään (Strack ym. 2006). Myös tupasvillan on saramaisena kasvina havaittu lisäävän karujen soiden päästöjä (esimerkiksi Greenup ym. 2000; Minkkinen ja Laine 2006). Kuitenkin tuuletussolukko kuljettaa myös happea ilmakehästä turpeeseen, jolloin metaanin hapetus juurten lähellä kasvaa (King ym. 1998; Marinier ym. 2004; Turetsky ym. 2014) ja metaanipäästöt voivat pienentyä (Segers 1998).



Kuva 1. Kaaviokuva metaanin tuotosta ja kuljetuksesta suoekosysteemissä. Metaania (CH₄) muodostuu pohjavedenpinnan alaisessa hapettomassa kerroksessa (katotelmassa). Osa metaanista hapetuu hapellisessa kerroksessa hiilidioksidiksi (CO₂) ja osa kulkeutuu ilmakehään diffundoitumalla, kuplina tai kasvien solukoissa. Piirros: TH 2015.

Rahkasammalten karike jää pääosin suon hapellisiin pintakerroksiin, mikä vähentää hapettomiin kerroksiin joutuvan orgaanisen hiilen määrää sekä metaanin tuotantoa (Strack ym. 2006). Karujen rahkasoiden metaanipäästöt ovatkin tämän vuoksi usein reheviä sarasoita pienemmät (Martikainen ym. 1992; Saarnio ym. 2007). Rahkasammalissa on lisäksi todettu elävän metanotrofisia bakteereja, jotka hapettavat metaania ja palauttavat sen sisältämän hiilen fotosynteesikoneiston käyttöön (Larmola ym. 2013).

Svenssonin ja Sundhin (1992) sekä Whalenin ja Reeburghin (2000) tutkimusten mukaan metaanin hapetus on suurinta heti keskimääräisen vedenpinnan tason yläpuolella, missä sekä happea että metaania on runsaasti. Näin ollen vedenpinnan korkeus ja sitä myötä hapellisen kerroksen paksuus ovat tärkeitä tekijöitä

metaanipäästöjen synnyssä (Svensson ja Sundh 1992; Strack ym. 2006; Couwenberg ja Fritz 2012; Turetsky ym. 2014). Le Merin ja Rogerin (2001) mukaan 60–90 % kosteiden maiden tuottamasta metaanista hapettuu hiilidioksidiksi niiden hapellisessa kerroksessa.

Myös turpeen ominaisuudet, kuten happamuus, lämpötila, maatumisaste, ravinnepitoisuus ja helposti hajoavan aineen määrä vaikuttavat metaanin muodostumiseen ja sitä kautta päästöön (Svensson ja Sundh 1992; LeMer ja Roger 2001; Turetsky ym. 2014). Metaanin tuotannolle optimaalinen turpeen lämpötila on 20–40 °C (Svensson ja Sundh 1992; Le Mer ja Roger 2001) ja pH 5–7 (Segers 1998; Le Mer ja Roger 2001). Pitkälle maatuoneessa turpeessa olevien vaikeasti hajoavien orgaanisten aineiden, kuten ligniinin, hajottamiseen tarvitaan happea, joten ne eivät hajoa pohjavedenpinnan alapuolisessa hapettomassa kerroksessa (Svensson ja Sundh 1992). Jos pohjavedenpinta on korkealla, todennäköisyys helposti hajoavan aineksen kulkeutumiselle hapettomiin olosuhteisiin on suurempi sillä hapellisen kerroksen paksuus on tällöin pienempi (Svensson ja Sundh 1992) ja hajotus hitaampaa. Ravinteisuuden heiketessä kasvupaikan tuotos pienenee, mikä vähentää orgaanisen aineen määrää ja sitä kautta metaanin tuotantoa ja päästöä (Segers 1998).

Myös suon pienmuodon (mätäs/painanne/tasapinta) on havaittu vaikuttavan metaanivuohon (Saarnio ym. 1996). Mättäillä, joissa vedenpinta on yleensä syvemmillä, metaanipäästöt ovat olleet pienempiä kuin painanteilla ja tasapinnoilla. Painanteiden ja tasapintojen päästöt kasvavat sarojen peittävyuden lisääntyessä. Mättäillä puolestaan päästöt pienenevät mättään korkeuden kasvaessa (Saarnio ym. 1996).

1.2 Metsänkasvatuskelvottomien soiden ennallistaminen

Suomessa noin puolet alkuperäisestä suopinta-alasta eli yli viisi miljoonaa hehtaaria on ojitettu metsätalouskäyttöön. Ojitusta tuettiin runsaasti etenkin 1960- ja 70-luvuilla eikä virheinvestoinneiltakaan välttytty. Nykyään yli 800 000 hehtaaria, eli noin 16 prosenttia, ojitusalueista voidaan pitää metsänkasvatuskelvottomina (Valtioneuvoston soiden... 2011; Metla 2013). Tällaisten, myös ylläpitokelvottomiksi luokiteltujen soiden kunnostusojitusten vähentämisestä on ollut keskustelua jo 1980- ja 1990-lukujen vaihteessa (Eurola ja Huttunen 1990).

Metsänkasvatukseen eivät nykykäsityksen mukaan sovellu kitu- ja joutomaaksi tai jäkäläturvekankaiksi luokiteltavat ojitetut suot (Valtioneuvoston soiden... 2011). Metsämaan soista metsänkasvatuskelvottomia ovat kasvupaikasta riippumatta suot, joilla puustoa on vähemmän kuin 45 kuutiota hehtaarilla. Metsänkasvatuskelvottomiksi luokitellaan myös ravinne-epätasapainoiset kohteet, joilla typpeä on runsaasti verrattuna puiden saatavissa olevaan fosforiin, kaliumiin ja booriin (Heikkilä 2007). Tällaisia ovat pääasiassa lettojen ojitusalueet sekä märät rimpiset suot, joita on etenkin Pohjois-Suomessa.

Ennallistaminen on nähty yhtenä metsänkasvatuskelvottomien soiden jatkokäyttövaihtoehtona. Sen ilmastovaikutuksia ei kuitenkaan tiedetä kovin tarkasti, vaikka asiaa onkin tutkittu jo 1990-luvun puolivälistä alkaen (esimerkiksi Komulainen ym. 1998;1999). Tietoa tarvitaan myös kansainvälisesti, sillä monissa maissa, kuten Irlannissa, Ruotsissa, Saksassa ja Norjassa, pohditaan Suomen tavoin heikkotuottoisten ja turvetuotannosta poistuvien soiden jatkokäyttöä (Metla 2013).

Metaani on esimerkki kasvihuonekaasusta, jonka virroista tarvitaan lisää tietoa arvioitaessa soiden käytön ilmastovaikutuksia. Ojituksen on useissa tutkimuksissa havaittu vähentävän metaanipäästöjä (Martikainen ym. 1992; Nykänen ym. 1998; Roulet ym. 1999; Strack ym. 2006; Lohila ym. 2011; Ojanen ym. 2010; 2013), sillä se alentaa vedenpinnan tasoa ja paksuntaa hapellista turvekerrosta. Tällöin hapellinen hajotus usein nopeutuu ja hiilidioksidipäästöt kasvavat (esimerkiksi Lohila ym. 2011). Myös kasvillisuus muuttuu saramaisten kasvien ja rahkasammalten korvautuessa puuvartisella kasvustolla (Laiho 1996), mikä vähentää helposti hajoavan karikkeen määrää hapettomissa olosuhteissa sekä kaasujen vaihtoa maaperän ja ilmakehän välillä. Turve myös tiivistyy ja sen tiheys kasvaa ojituksen jälkeen, mikä vähentää metaanin ja hapen diffuusiota (Nykänen ym. 1998).

Ojitetuista soista voi tulla myös pieniä metaaninieluja (esimerkiksi Martikainen ym. 1992; Nykänen ym. 1998; Minkkinen ja Laine 2006; Ojanen ym. 2010; Lohila ym. 2011). Kuitenkin ojista voi tulla huomattavia metaanin lähteitä, mikä johtuu niiden korkeasta vedenpinnan tasosta, veden liikkeestä sekä ojaan mahdollisesti syntyneestä kasvillisuudesta (Minkkinen ym. 1997; Minkkinen ja Laine 2006). Myös metaanikuplia syntyy ojissa runsaasti, mikä lisää päästöä. Seisovavetisissä ojissa kasvavien levien sitoma uusi hiili päättyy usein lopulta ojan pohjalle

metanogeenien käyttöön. Virtaava vesi saattaa myös kuljettaa metaania mukanaan ympäröiviltä alueilta (Minkkinen ja Laine 2006).

Onnistuessaan ennallistaminen nostaa pohjavedenpinnan luonnontilaisen suon tasolle, jolloin metaanipäästöjen voi olettaa kasvavan. Tätä voidaan ilmastovaikutuksista huolimatta pitää myös yhtenä ennallistamisen onnistumisen mittarina, sillä se kertoo suon alkuperäisten toimintojen palautumisesta.

Ennallistamisen vaikutusta metaanin tuotantoon ja virtoihin on tutkittu jonkin verran Suomessa (Komulainen ym. 1998; Tuittila ym. 2000a; Juottonen ym. 2012; Koskinen ym. 2016), Kanadassa (Marinier ym. 2004; Waddington ja Day 2007; Strack ja Zuback 2013; Strack ym. 2014) ja Tshekin tasavallassa (Urbanová ym. 2010; 2013a; b). Yksittäisiä tuloksia löytyy myös Irlannista (Wilson ym. 2009), Saksasta (Hahn-Schöfl ym. 2011, Huth ym. 2013, Vanselow-Algan ym. 2015), Ranskasta (Francez ym. 2000) sekä Iso-Britanniasta (Cooper ym. 2014). Tutkimusten mukaan ennallistaminen odotetusti lisäsi metaanipäästöjä, mutta päästöt jäivät usein luonnontilaisia pienemmiksi. Tämä saattaa johtua esimerkiksi metanogeeniyhteisön hitaasta palautumisesta ennallistamisen jälkeen (Urbanová ym. 2010; Juottonen ym. 2012). Päästöt saattoivat kuitenkin myös nousta monikymmenkertaisiksi luonnontilaisiin verrattuna, minkä oletettiin johtuvan korkeammasta vedenpinnan tasosta sekä helposti metanogeenien saatavissa olevasta orgaanisen aineen määrästä (Hahn-Schöfl ym. 2011; Vanselow-Algan ym. 2015; Koskinen ym. 2016).

Monet löytämistäni tutkimuksista (etenkin kanadalaiset ja Tuittila ym. 2000), on kuitenkin tehty turvetuotannosta poistuneilla suonpohjilla joiden edellytykset ennallistua ovat metsäojitettuihin soihin verrattuna erilaiset. Myöskään laboratoriossa tehdyt inkubaatiokokeet, kuten Francez ym. (2000) ja Urbanová ym. (2010), eivät ole aina suoraan verrattavissa maastomittauksiin, sillä ne kertovat vain potentiaalisesta metaanintuotannosta.

Maastomittauksia sisältäneet tutkimukset (esimerkiksi Komulainen ym. 1998) on usein tehty vain muutama vuosi ennallistamisen jälkeen, joten ennallistamisen pidempiaikaisista vaikutuksista metaanivirtoihin ei tiedetä kovinkaan paljon. Vain kolmessa löytämässäni tutkimuksessa ennallistamisesta on kulunut vähintään 10

vuotta (Strack ja Zuback 2013; Huth ym. 2013; Vanselow-Algan ym. 2015). Myös Yli-Petäys ym. (2007) ovat tutkineet metaanivirtoja yli 50 vuotta sitten hylätyillä, itseksenn ennallistuneella turvekentällä. Kuitenkin erityisesti metsänkasvatuskelvottomien ja karujen ojitettujen soiden metaanivirroista ennallistamisen jälkeen on vain vähän tietoa (Metla 2013).

1.3 Tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on selvittää ennallistamisen vaikutusta metaanivirtoihin metsänkasvatuskelvottomilla karuilla keidassoilla. Päättökysymys onkin, vaikuttaako ennallistaminen kyseisten soiden metaanivuohon ja jos vaikuttaa niin miten ja miksi. Kysymys voidaan pilkkoa osiin pohtimalla 1) miten metaanivuohon vaikuttavat asiat (vedenpinnan taso, turpeen lämpötila ja kasvillisuus etenkin tupasvillan osalta) eroavat toistaan ojitetuilla ja ennallistetuilla soilla ja 2) miten kyseiset erot vaikuttavat päästöön. Samalla halutaan myös selvittää, 3) millainen vaikutus suon pienmuodoilla (mätäs/tasapinta/oja) on päästöjen kehittymiseen ja 4) miten ennallistettujen koealojen vedenpinnantasot, turpeen lämpötilat ja kasvillisuus eroavat luonnontilaisesta.

Koska monet biologiset prosessit, kuten metanogeneesi, ja niitä seuraavat kaasuvirrat riippuvat ajasta (Alm ym. 2007), pyritään tässä työssä selvittämään myös, 5) kuinka ennallistamisesta kulunut aika vaikuttaa metsänkasvatuskelvottomien soiden metaanipäästöihin sekä palautuvatko päästöt luonnontilaisen tasolle ja jos palautuvat niin milloin.

Muotoilin tutkimuskysymyksistä seuraavat postulaatit:

I) Ennallistaminen muuttaa metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden vedenpinnan tasoa, turpeen lämpötilaa ja kasvillisuutta, joten sillä on vaikutusta niiden metaanivuohon.

II) Ennallistetun suon pienmuodolla on vaikutusta metaanivuohon. Mättäillä vuo ja sen muutos on pienempi kuin tasapinnalla tai ojassa.

III) Ennallistamisesta kulunut aika vaikuttaa metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden metaanivuohon. Mitä pidempi aika ennallistamisesta on kulunut, sitä lähempänä metaanivuo on luonnontilaisen suon vuota.

IV) Metsänkasvatuskelvottoman karun keidassuon metaanivuo palaa luonnontilaisen tasolle 10–15 vuoden kuluttua ennallistamisesta.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Aineiston hankinta

2.1.1 Koealat

Aineistoa kerättiin 18 koealalta Sipoossa, Tammelassa ja Parkanon ympäristössä (taulukko 1). Koealoista kuusi oli ennallistetuilla, seitsemän ojitetuilla ja loput luonnontilaisia soilla tai suon osilla. Ennallistamistoimet oli tehty 4–22 vuotta aiemmin. Ennallistetut koealat olivat rahka-, keidas- ja lyhytkorsirämeitä ja ojitetut näistä suotyypeistä kehittyneitä jäkäläturvekankaita. Turvetta kaikilla koealoilla oli yli 1.1 metriä ja valtapuuna oli mänty. Vain kahdella ojitetuista ja viidellä ennallistetuista koealoista oli selkeä mätäs-painanne-vaihtelu (taulukko 1). Jos selkeää mätäs-painanne-vaihtelua ollut, saroilla olleet mittauspisteet luokiteltiin tasapinnoiksi.

Taulukko 1. Koealojen sijainti, tila (ojitettu/ennallistettu/luonnontilainen) suotyyppi/turvekangastyyppi, pienmuodot ja ennallistamisvuosi. Luonnontilaisilta aloilta ei mitattu metaanivuota Tervalaminsuota lukuun ottamatta. Helsingin koealoilla kartoitettiin myös mittauspisteiden kasvillisuus.

Kohde	Alue	Tila	Tyyppi	Pienmuodot	Ennallistamisvuosi	Huom!
LahnalamminsuoDR	Tammela	Ojitettu	Jätkg	Mätäs, painanne	-	Myös kasvillisuuskartoitus
StormossenDR	Sipoo	Ojitettu	Jätkg	Tasapinta	-	Myös kasvillisuuskartoitus
StormossenRE	Sipoo	Ennallistettu	KeR/RaR	Tasapinta	Ei tiedossa	Myös kasvillisuuskartoitus
StormossenPR	Sipoo	Luonnontilainen	KeR	Mätäs, painanne	-	Vain turpeen lämpötila, pohjavedenpinta ja kasvillisuus
TervalamminsuoRE	Tammela	Ennallistettu	RaR/LkR	Mätäs, painanne	2005	Myös kasvillisuuskartoitus
TervalamminsuoPR	Tammela	Luonnontilainen	RaR/LkR	Mätäs, painanne	-	Myös metaanimittaus
TorransuoRE	Tammela	Ennallistettu	KeR/RaR	Mätäs, painanne	1998	Myös kasvillisuuskartoitus
TorransuoPR	Tammela	Luonnontilainen	KeR/RaR	Mätäs, painanne	-	Vain turpeen lämpötila, pohjavedenpinta ja kasvillisuus
AlkkiannevaDR	Parkano	Ojitettu	Jätkg	Tasapinta	-	
HuhdannevaDR	Parkano	Ojitettu	Jätkg	Tasapinta	-	
KauhanevaRE	Parkano	Ennallistettu	KeR	Tasapinta	2011	
KauhanevaPR	Parkano	Luonnontilainen	KeR	Ei tiedossa	-	Vain turpeen lämpötila ja pohjavedenpinta
KonisaloRE	Parkano	Ennallistettu	KeR/RaR	Mätäs, painanne	1997	
LylynnevaDR	Parkano	Ojitettu	Jätkg	Tasapinta	-	
LylynnevaRE	Parkano	Ennallistettu	KeR	Mätäs, painanne	n. 2003	
LylynnevaPR	Parkano	Luonnontilainen	KeR	Ei tiedossa	-	Vain turpeen lämpötila ja pohjavedenpinta
Musta-SoljanenRE	Parkano	Ennallistettu	KeR/RaR	Mätäs, painanne	1993–1994	
YlimysnevaDR	Parkano	Ojitettu	Jätkg	Mätäs, painanne	-	

Koealat oli perustettu kesällä 2014, jolloin niillä tehtiin myös ensimmäiset mittaukset. Omat maastotyöt aloitin Sipoon ja Tammelan koealoilla lumen sulettua huhtikuussa 2015, ja jatkoin niitä elokuun puoliväliin saakka. Tein mittauksia aluksi kahden viikon välein (huhti-kesäkuu) ja heinä-elokuussa kolmen viikon välein. Parkanossa mittaukset aloitettiin mahdollisuuksien mukaan huhti-toukokuussa, ja ne saatiin päätökseen lokakuussa. Keväällä mittauksia tehtiin tiuhemmin, koska vuoden 2014 aineisto keskittyi kesään ja alkusyksyyn.

2.1.2 Metaanivuon mittaus

Metaanivuon mittaus tehtiin jokaisella koealalla kahdeksasta eri kohdasta (mittauspisteestä). Kuusi mittauspistettä oli saralla ja kaksi ojassa (ennallistetuilla koealoilla täytetyn ojan päällä). Jos koealalla voitiin havaita selvää mätäs-painannevaihtelua, saralle osuneista pisteistä puolet oli sijoitettu mättäille ja puolet painanteisiin. Pisteiden pintakasvillisuus oli jätetty koskemattomaksi.



Kuva 2. Mittaussysteemi: metallikammio ja 60 millilitran muoviruisku sekä lasiputkiloita näytteenottoa ja säilytystä varten. Kuvan © TH 2015.

Mittausmenetelmänä käytettiin suljetun kammion menetelmää (Alm ym. 2007). Mittaus tehtiin pyöreällä metallikammioilla, jonka pohjan halkaisija ja korkeus olivat 30 cm (kuva 2). Kammioon oli näytteenottoa varten kiinnitetty 60 millilitran muoviruisku sekä lämpömittari. Kammion sisällä ollut tuuletin kierrätti ilmaa ja tasasi kaasujen pitoisuuksia mittauksen aikana.



Kuva 3. Noin 2 cm syvä ura, johon kammio asetettiin mittausta varten. Uran keskellä oleva valkoinen piste on jatkuvatoiminen lämpötilaloggeri. Kuvan © TH 2015.

Ennen näytteenottoa näyteputkiloiden annettiin tuulettua korkit avattuina vähintään yön yli. Korkkia sulkiessa vältettiin hengittämästä suoraan putkiloon. Korkin kireys tarkistettiin ja tarvittaessa korkit kiristettiin ennen näytteenottoa. Myös kammiota tuuletettiin heiluttelemalla sitä hetki ilmassa ennen maahan asettamista. Mittauksen alkaessa kammio asetettiin maassa olevaan uraan (kuva 3), jonka syvyys oli kaksi senttimetriä. Kammiossa ollut reikä, johon näytteenotossa käytetyn muoviruiskun letku kiinnitettiin kumitulpalla, suljettiin vasta maahanasettamisen jälkeen, jottei kammioon muodostuisi ylipainetta. Jos mittauspaikka oli vettä täynnä olevassa ojassa, apuna käytettiin styroksista valmistettua kelluvaa lauttaa. Jos vettä oli vain vähän, lauttaa ei käytetty vaan kammion uppouma merkittiin lomakkeelle.

Jokaisesta mittauspisteestä otettiin muoviruiskulla neljä kaasunäytettä. Näytteet otettiin viiden minuutin välein eli 5, 10, 15 ja 20 minuutin kuluttua kammion asettamisesta paikalleen. Noin 10 sekuntia ennen näytteenottoa noin 40 millilitraa ilmaa vedettiin pitoisuuden tasaamiseksi kammioista ruiskuun ja takaisin. Näytteenottohetkellä ruiskuun vedettiin 40 millilitraa ilmaa, joka siirrettiin välittömästi neulan avulla septumin läpi suljettuun lasiputkiloon. Siirron aikana putkiloa huuhdeltiin ensin 20 millilitralla näytettä, siten että ylimääräinen ilman poistui toisen neulan kautta. Sitten toinen neula poistettiin ja loppunäyte työnnettiin putkiloon siten, että sinne muodostui ylipaine. Ylipaineen avulla varmistettiin, ettei näytteeseen sekoittunut ulkoilmaa, ja se mahdollisti myöhemmin automaattisen

näytteensyötön kaasukromatografiin. Näytteenoton jälkeen mitattiin myös kammion lämpötila.

Putkilot vietiin myöhemmin Luonnonvarakeskuksen laboratorioon analysoitavaksi. Ennen analyysiä niitä säilytettiin jääkaapissa.

2.1.3 Pohjavedenpinnan taso ja turpeen lämpötila

Kaasumittausten lisäksi koealoilla mitattiin pohjavedenpinnan taso (etäisyys maanpinnasta, cm) sekä turpeen lämpötila viiden ja 30 senttimetrin syvyydestä. Lämpötila- ja pohjavesimittaukset tehtiin myös neljältä luonnontilaiselta koealalta ennallistettujen alojen läheisyydessä (taulukko 1).

Pohjavedenpinta mitattiin sekä manuaalisesti kahdesta pohjavesikaivosta että automaattisesti jatkuvatoimisella loggerilla koealan keskeltä. Jos koealalla havaittiin mätäs-painanne vaihtelua, toinen kaivoista sijoitettiin mättäälle ja toinen painanteeseen. Lämpötila mitattiin jatkuvatoimisilla loggereilla pohjavesikaivojen vierestä 30 cm syvyydeltä sekä ojista ja kahdesta kaasuvuon mittauspisteestä 5 cm syvyydeltä. Jos ojassa oli vettä, mittaus tehtiin veden alta ojan pohjasta.

Loggerit mittasivat lämpötilan ja vedenpinnan tason kahden tunnin välein. Lämpötilaloggerit asennettiin ensimmäisten mittausten aikaan huhti-toukokuussa ja kerättiin pois syksyllä. Pohjavesiloggerien annettiin olla paikallaan talven 2014–15 yli ja ne kerättiin pois syksyllä 2015.

2.1.4 Kasvillisuusanalyysi mittauspisteillä

Sipoon ja Tammelan koealojen mittauspisteiden kasvillisuus kartoitettiin silmämääräisesti Braun-Blanquet-menetelmällä (Braun-Blanquet 1921, referoitu Poore 1955) heinä-elokuussa 2015. Menetelmässä listattiin aluksi kaikki mittauspisteellä esiintyvät kasvilajit jonka jälkeen jokaiselle lajille annettiin peittävyden ja runsauden perusteella kerroin 1–5 (taulukko 2). Aivan pieniä peittävyksiä kuvattiin merkillä +. Pienet kertoimet (1–2) olivat enemmän yhteydessä lajin runsauteen ja suuret (3–5) peittävyteen. Lopuksi arvioitiin kenttäkerroksen (varvut, ruohot, sarat, puuntaimet) ja pohjakerroksen (sammalet, jäkälät) sekä paljaan maan kokonaispeittävydet prosentteina.

Taulukko 2. Braun-Blanquet-menetelmässä käytetyt kertoimet ja niiden yhteys lajin peittävyteen tai runsauteen mittauspisteellä. Suuret kertoimet (3–5) ovat enemmän yhteydessä lajin peittävyteen, pienemmät (1–2 sekä +) runsauteen. Muokattu lähteestä Poore 1955.

Lajille annettu kerroin	Peittävyys prosentteina	Runsaus
5	Yli 75	Ei merkitystä
4	50 - 75	Ei merkitystä
3	25 - 50	Ei merkitystä
2	5 - 25	Hyvin yleinen
1	1 - 5	Yleinen mutta pieni peittävyys
+	Alle 1	Esiintyy harvakseltaan

2.1.5 Ojien luokittelu

Kaikkien koealojen ojat ja niissä olleet mittauspisteet luokiteltiin mittauskaudella 2015. Luokittelussa otettiin huomioon ojitetuilla koealoilla ojan kunto (avoin/tukkoinen), ojassa mahdollisesti ollut vesi ja sen liikkeet (seisovaa/virtaavaa) sekä pisteiden mahdollinen kasvillisuus. Ennallistetuilla koealoilla huomioitiin myös ennallistamistapa (oja täytetty/padottu).

2.2 Aineiston laskenta ja analyysi

2.2.1 Pohjavedenpinnan taso ja turpeen lämpötila

Jos pohjavedenpinnan tasolle oli käytössä sekä automaattimittaus että manuaalimittaus, mittauspistekohtainen pohjavedenpinnan taso saatiin korjaamalla kaasumittaushetkelle lähin automaattimittaus manuaalimittauksen tasolle. Tämä tehtiin lisäämällä automaattimittaukseen manuaalimittausten ja automaattimittausten eron keskiarvo. Jos automaattimittaus tietyltä ajanhetkeltä puuttui (esimerkiksi Lahnalamminsuo vuoden 2014 mittausten alussa), käytettiin suoraan manuaalimitattuja vedenpintoja. Mittauspistekohtaiset turpeen lämpötilat puolestaan laskettiin kaasumittaushetkelle lähimpien automaattimittausten keskiarvona.

Jos koealalla oli havaittavissa mätäs-painanne-vaihtelua, käytettiin mätäspisteillä mättäällä sijainneen kaivon/lämpötilaloggerin ja painannepisteillä painanteella sijainneen kaivon/lämpötilaloggerin tietoja. Jos mätäs-painanne-vaihtelua ei ollut,

vedenpinta ja turpeen lämpötila laskettiin kaivo/loggerikohtaisten mittausten keskiarvona.

2.2.2 Mittauspisteiden kasvillisuus

Kasvillisuusaineistosta laskettiin tupasvillan (*Eriophorum vaginatum*) ja rahkasammalten (*Sphagnum* sp.) kokonaispeittävyden mediaani, minimi ja maksimi ojitetuille, ennallistetuille ja luonnontilaisille koealoille. Myös muiden kasvilajien keskipeittävyksiä (mediaani) vertailtiin eri käsittelyjen välillä. Aineistoa ei kuitenkaan käytetty metaanivuon mallinnuksessa, sillä sitä oli saatavissa vain puolelle kaikista koealoista (3 ennallistetulle, 2 ojitetuille ja 3 luonnontilaiselle).

2.2.3 Metaanivuo

Kaasunäytteet analysoitiin kesän ja syksyn aikana Luonnonvarakeskuksen laboratoriossa kaasukromatografilla. Analysoitu aineisto oli aluksi pitoisuuksina (ppm), josta laskin mittauspistekohtaisen metaanivuon ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$) lineaarisen regression avulla metaanipitoisuuden ja kammion sulkeutumisaajan funktiona. Regressiosuoran kulmakertoimesta saatiin lopulta laskettua ideaalikaasun tilayhtälöllä pitoisuuden muutosnopeutta vastaava metaanivuo.

Koealan metaanivuo saatiin mittauspisteiden vuoestimaateista pienmuotojen pinta-alaosuuksilla painotettuna keskiarvona. Ennallistetuille koealoilla ojien pinta-alaosuudeksi laskettiin ilmakuvien avulla keskimäärin 15 % (6 m täytetty oja 40 m sarkavälillä). Ojitetuilla koealoilla ojien oletettiin kattavan 2,5 % (1 m oja 40 m sarkavälillä) suon pinta-alasta. Jos koealalla oli selkeä mätäs-painanne-vaihtelu, mättäiden ja painanteiden osuudet oletettiin yhtä suuriksi (ojitetuilla 48.75 % ja ennallistetuilla 42.5 % kokonaispinta-alasta). Jos selvää mätäs-painanne-vaihtelua ei ollut, ojien välisten tasapintojen osuus oli ojitetuilla koealoilla 97.5 % ja ennallistetuilla 85 % suon pinta-alasta.

Lopuksi laskin estimaatin vuotuiselle metaanivuolle ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Sulan maan ajan (noin huhti–lokakuun) vuo saatiin kertomalla koealakohtaisten mittausten keskiarvo ajanjakson pituudella (noin 200 päivää) ja muuntamalla saatu tulos milligrammoista grammoiksi jakamalla luvulla 1000. Talviajan (joului–maaliskuun) vuon puolestaan arvioin olevan 20 % vuotuisesta kokonaisvuosta (Alm ym. 1999a). Laskennoissa käytin MS Excel -ohjelmaa sekä R-ohjelmiston aggregate-funktiota.

Laskennoissa jätin huomioitua ne hetkittäiset vuot, jotka olivat vahvasti negatiivisia, alkoivat hyvin suuresta arvosta tai olivat muuten epätasaisia. Tällaiset vuot saattoivat olla merkki kuplimisesta tai muuten epäonnistuneesta mittauksesta. Myös mittaukset, joiden typpioksiduulipitoisuus oli alle 0,3 ppm jätettiin pääsääntöisesti laskujen ulkopuolelle, sillä ne kielivät näyteputkilon paineettomuudesta ja kromatografianalyysin epäonnistumisesta.

2.2.4 Tilastollinen analyysi

Tilastollisena menetelmänä käytin lineaarista sekamallia (R-ohjelmiston funktio lmer), jonka avulla tutkin seuraavanlaisia nollahypoteeseja:

- 1) Ennallistettujen ja ojitettujen koealojen vedenpinta, turpeen lämpötila ja metaanivuo ovat keskimäärin samalla tasolla.
- 2) Eri pienmuotojen (mätäs, tasapinta, oja) vedenpinnan taso, turpeen lämpötila tai metaanipäästöt ovat keskimäärin samalla tasolla.
- 3) Eri aikaan ennallistettujen soiden keskimääräiset päästöt ovat keskimäärin samalla tasolla.

Satunnaistekijöinä malleissa olivat koealakohtaiset mittauspäivä ja mittauspiste ja kiinteinä selittävinä muuttujina pienmuoto ja käsittely (ojitettu/ennallistettu) sekä metaanivuota selittäessä myös pohjavedenpinnan taso, turpeen lämpötila sekä ennallistetuilla koealoilla myös ennallistamisvuosi. Ojien metaanivuota selitettiin myös ojan kunnolla (tukkoinen/avoin/täytetty), ojaveden liikkuvuudella (seisovaa/virtavaa) ja ojapisteillä mahdollisesti kasvavalla kasvillisuudella. Käsittelyjen ja pienmuotojen välisiä eroja etsin Tukeyn parittaisilla testeillä.

Automaattimittauksista saatuja vuotuisia pohjavedenpinnan keskitasoja ja turpeen lämpötiloja sekä ojitettujen ja ennallistettujen koealojen keskimääräisiä vuotuisia metaanivoita tarkastelin myös t-testin keinoin. Pohjavedenpinnan tason, turpeen lämpötilan ja metaanivuon yhteyksiä tarkastelin myös laskemalla Spearmanin korrelaatiokertoimia (ρ). Kaikki tilastoanalyysit tein R-ohjelmiston versiolla 3.1.1 (R foundation 2014).

3 TULOKSET

3.1 Ojaluokitus



Kuva 4. Äärimmäinen esimerkki ojitetun koealan tukkoisesta ja huonokuntoisesta ojasta. Oja oli lähes täysin kasvillisuuden (tupasvilla, rahkasammalet, varvut) täyttämä ja seisovavetinen. Kuvan © TH 2015.

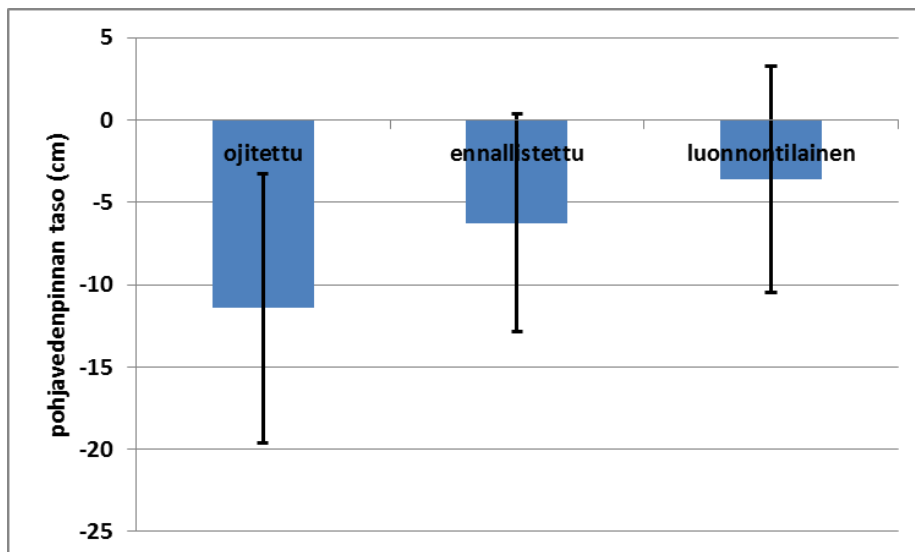
Kaikkien ojitettujen koealojen ojat olivat madaltuneita sekä useimmiten myös tukkoisia ja kasvillisuuden peittämiä (kuva 4). Ojien pinta oli kuitenkin vielä selkeästi suon pintaa alempana ja niissä ollut vesi pääsääntöisesti seisovaa. Noin puolella koealoista ojissa voitiin havaita alkukesästä jonkin verran virtavaa vettä eivätkä ne olleet aivan yhtä tukkoisia kuin kuvassa 4. Kaikkien koealojen ojissa oli jo jonkin verran kasvillisuutta, kuten rahkasammalia ja tupasvillaa, yhdellä Parkanon koealalla myös pullosaraa.

Ennallistettujen koealojen ojat oli täytetty, ja niissä kasvoi rahkasammalia, tupasvillaa ja varpuja (kuva 5). Ojan pinta oli myös suurin piirtein suon pinnan tasalla. Suurin osa ojista oli alkukesällä mämpiä ja helleaikaan lähes kuivia tasapintoja. Vain kahden Tammelan koealan ojissa (Torronsuo ja Tervalamminsuu) oli jatkuvasti seisovaa vettä ja ne olivat luonteeltaan märän kuljupinnan kaltaisia.



Kuva 5. Esimerkki ennallistetun koelan täytetystä seisovavetisestä ojasta. Ojassa kasvoi pääosin rahkasammalia ja tupasvillaa, mutta myös jonkin verran varpuja. Kuvan © TH 2015.

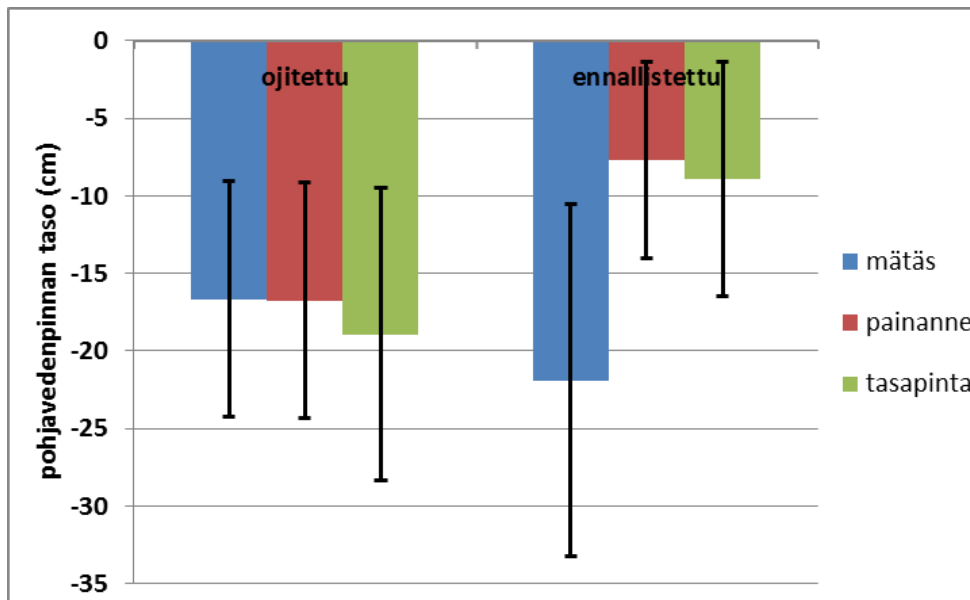
3.2 Pohjavedenpinnan taso



Kuva 6. Pohjavedenpinnan vuotuinen keskitaso ojitetuilla, ennallistetuilla ja luonnontilaisilla koeloilla. Syvimmät keskimääräiset vedenpinnan tasot mitattiin ojitetuilla ja korkeimmat luonnontilaisilla koeloilla. Virhepalkkina keskihajonta.

Yleisesti ennallistettujen soiden koelat olivat keskimäärin märempiä kuin ojitetut mutta kuivempia kuin luonnontilaiset (kuva 6). Ennallistetuilla koeloilla vedenpinnan vuotuinen keskisyvyys oli viisi senttiä ojitettuja korkeammalla mutta pari senttiä luonnontilaisia matalammalla. Pohjavedenpinta oli kaikilla koeloilla korkeimmillaan lumen sulamisen jälkeen huhti-toukokuussa ja matalimmillaan

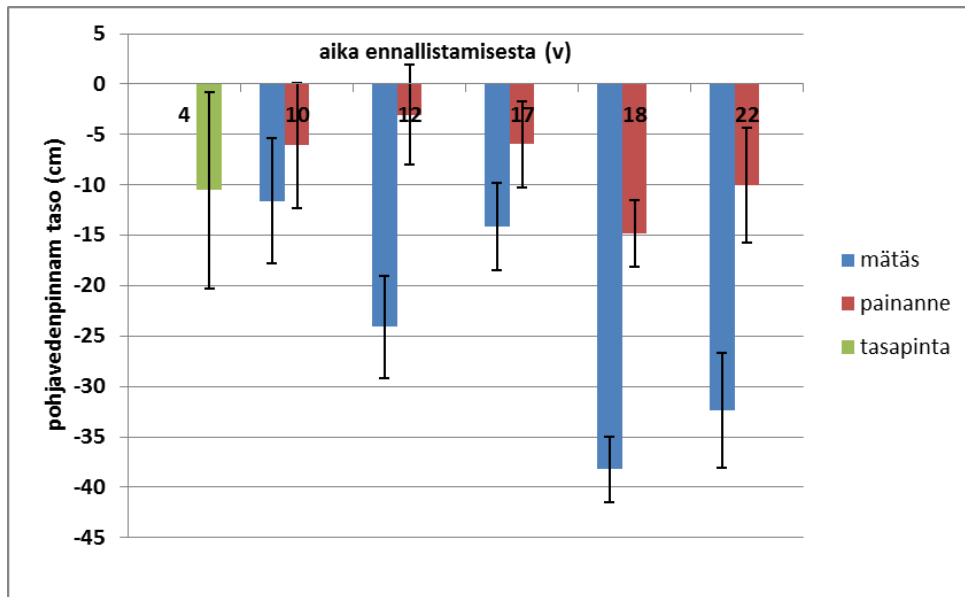
elokuisten hellejaksojen aikana. Sekä ennallistetuilla että luonnontilaisilla koealoilla vedenpinta nousi keväällä suon pinnan tasolle tai ylempäs. Ojitetuilla koealoilla pohjavesi pysyi koko ajan suon pintaa alempana.



Kuva 7. Keskimääräinen vedenpinnan taso ojitettujen ja ennallistettujen koealojen mätällä, painanteilla ja tasapinnoilla. Virhepalkkina keskihajonta. Korkein keskimääräinen vedenpinnan taso havaittiin ennallistettujen koealojen painanteilla ja matalin ennallistettujen koealojen mätällä.

Ojitettujen koealojen pienmuotojen pohjavedenpinnat olivat mittauspistekohtaisten havaintojen mukaan keskimäärin samalla tasolla (kuva 7). Ennallistettujen koealojen painanteilla sekä tasapinnoilla vedenpinnan taso oli noin 10 cm ojitettuja koealojen korkeammalla. Mätäspinnoilla ennallistettujen koealojen pohjavedenpinta oli kuitenkin noin 5 cm ojitettuja syvemmillä. Myös ennallistamisesta kuluneella ajalla oli vaikutusta, sillä vanhimmilla ennallistamisaloilla pohjavedenpinta oli nuorempia matalammalla (kuva 8).

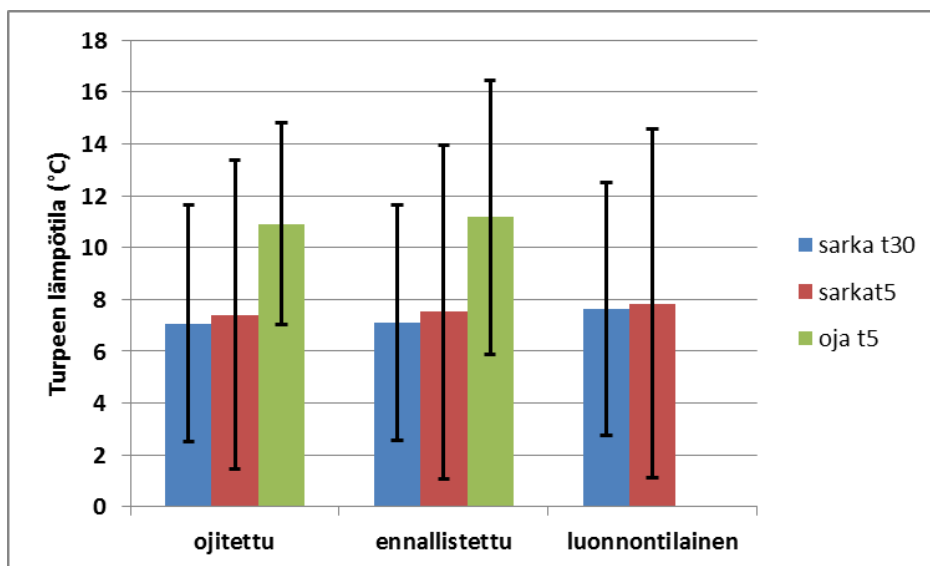
Sekä ojitettujen että ennallistettujen koealojen vuotuinen pohjavedenpinnan keskitaso erosi tilastollisesti merkitsevästi luonnontilaista koealoista ($p < 0.0001$). Ennallistettujen koealojen pohjavedenpinta oli myös tilastollisesti merkitsevästi ojitettuja korkeammalla ($p < 0.0001$). Pienmuodolla ja ennallistamisella oli tilastollisesti merkitsevä yhdysvaikutus vedenpinnan tasoon, mutta parittaisessa vertailussa eroja havaittiin vain ennallistettujen koealojen mätäs- ja painannepintojen välillä ($p < 0.0001$).



Kuva 8. Ennallistamisesta kuluneen ajan vaikutus pohjavedenpinnan tasoon eri pienmuodoilla. Syvimmät keskimääräiset pohjavedenpinnan tasot mitattiin 18 ja 22 vuotta sitten ennallistettujen koalojen mättäillä ja korkeimmat 12 vuotta sitten ennallistetun koalan painanteilla.

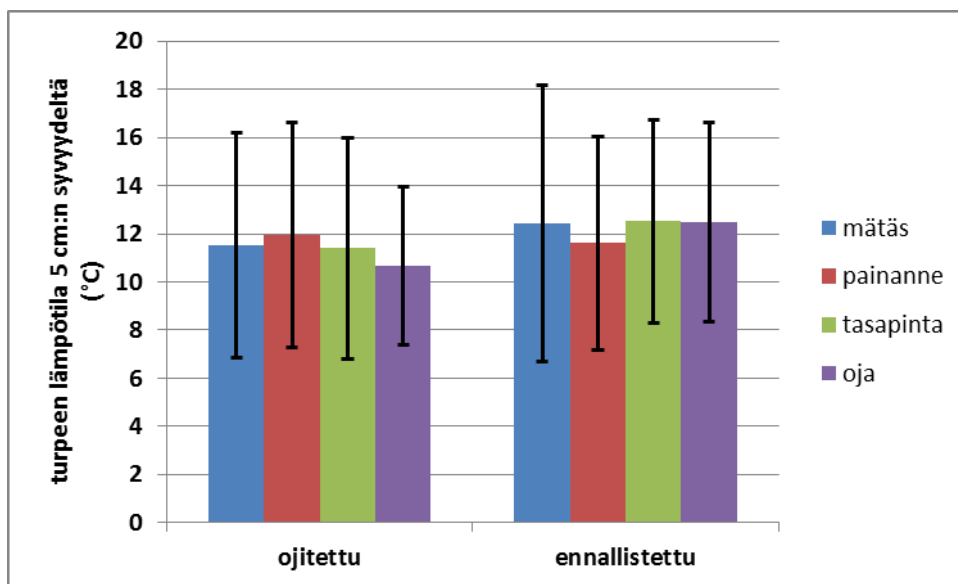
Ennallistamisesta kuluneella ajalla oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus ennallistettujen koalojen pohjavedenpinnan tasoon sekä yksin ($p = 0.018$) että yhdessä pienmuodon kanssa ($p < 0.0001$). Parittaisessa vertailussa ei kuitenkaan havaittu vuosien välisiä tilastollisesti merkitseviä eroja vaan merkitsevyys johtui eroista samana vuonna ennallistetun suon pienmuotojen välillä.

3.3 Turpeen lämpötila



Kuva 9. Vuotuiset keskimääräiset turpeen lämpötilat 5 ja 30 cm:n syvyydellä ojitetuilla, ennallistetuilla ja luonnontilaisilla koaloilla. t5 = lämpötila 5 cm:n syvyydellä, t30 = lämpötila 30 cm:n syvyydellä, sarka = mättäät, painanteet, tasapinnat

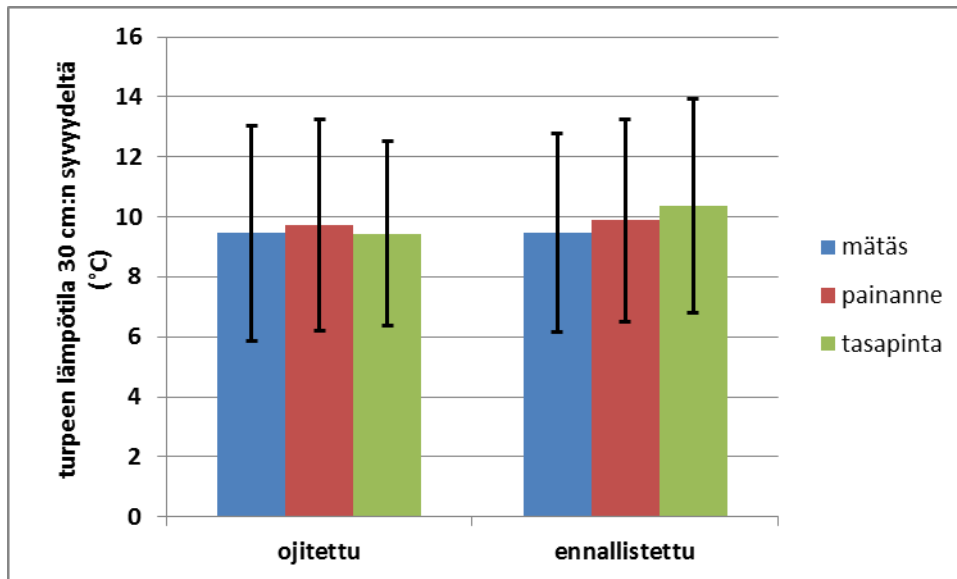
Sekä ojitettujen, ennallistettujen että luonnontilaisten koealojen turpeen vuotuinen keskilämpötila oli sarkapisteillä (mättäät, painanteet, tasapinnat) keskimäärin samalla tasolla (kuva 9). Lämpötilavaihtelut olivat suuremmat pintaturpeessa 5 cm:n syvyydellä kuin 30 cm:n syvyydessä. Ojapisteillä turve oli 3–4 astetta sarkapisteitä lämpimämpää (kuva 9). Kaikilla koealoilla alimmat turpeen lämpötilat mitattiin keväällä pohjavedenpinnan ollessa korkeimmillaan ja ylimmät heinä-elokuussa pohjavedenpinnan laskiessa ja ilman lämpötilan ollessa korkeimmillaan.



Kuva 10. Keskimääräinen pintaturpeen lämpötila 5cm:n syvyydellä ojitettujen ja ennallistettujen koealojen pienmuodoilla. Matalimmat lämpötilat mitattiin ojitettujen ja korkeimmat ennallistettujen koealojen ojista.

Ennallistaminen vaikutti etenkin ojien lämpötilaan, sillä korkeimmat lämpötilat mitattiin ennallistettujen koealojen lähes kuivista ojista (kuva 10). Myös ennallistettujen koealojen mättäät ja tasapinnat olivat 5 cm:n syvyydessä 1-2 astetta ojitettuja lämpimämpiä. Painannepinnoilla lämpötila oli kuitenkin noin asteen verran ojitettuja alempana. Ennallistettujen koealojen mättäillä puolestaan lämpötilavaihtelut olivat muita pienmuotoja suuremmat (kuva 10).

30 cm:n syvyydestä mitattuna turve oli ojitetuilla ja ennallistetuilla koealoilla lähes yhtä lämmintä (kuva 11). Ennallistaminen vaikutti lämpötilaa nostavasti vain tasapinnoilla, joilla turve oli noin asteen verran ojitettuja lämpimämpää.



Kuva 11. Keskimääräinen turpeen lämpötila 30 cm:n syvyydellä ennallistettujen ja ojitettujen koalojen pienmuodoilla. Lämpimintä turve oli ennallistettujen koalojen tasapinnoilla. Mättäillä ja painanteilla lämpötilat olivat lähes samalla tasolla.

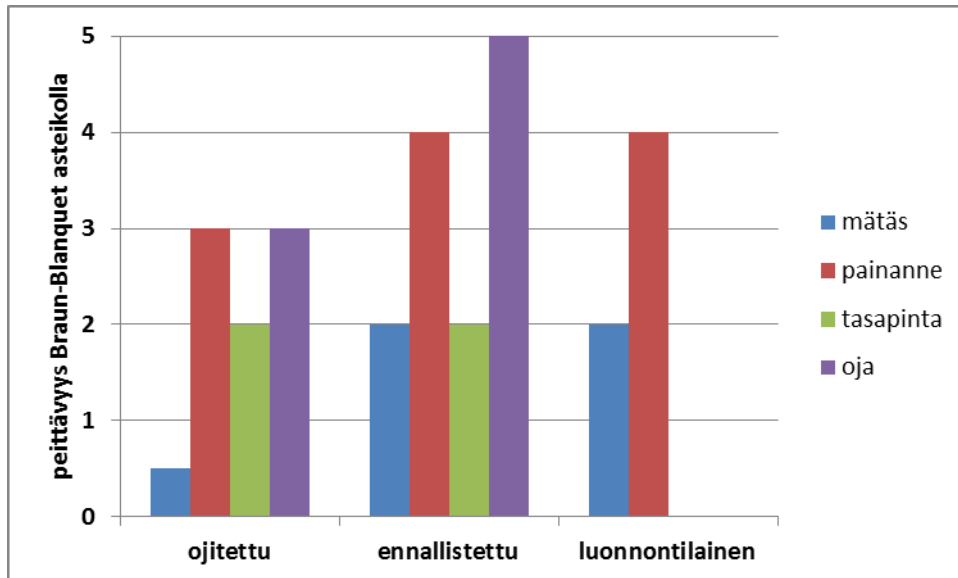
Ennallistettujen ja ojitettujen koalojen vuotuiset turpeen keskilämpötilat erosivat 5 cm:n syvyydellä tilastollisesti merkitsevästi sekä toisistaan että luonnontilaisilta koaloilta mitatuista lämpötiloista (kaikissa $p < 0.001$). Syvemmältä turvekerroksesta (30 cm) mitatut lämpötilat erosivat sekä ennallistetuilla että ojitetuilla tilastollisesti merkitsevästi luonnontilaisista koaloista ($p < 0.0001$).

Ennallistamisella oli tilastollisesti merkitsevä vaikutus turpeen lämpötilaan 5 cm:n syvyydellä ojapisteillä ($p = 0.007$). Sarkapisteillä (mättäät, painanteet ja tasapinnat) ennallistamisella tai pienmuodolla ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta mutta pohjavedenpinnan taso vaikutti lämpötilaan tilastollisesti merkitsevästi sekä 5 cm:n ($p = 0.041$) että 30 cm:n syvyydessä ($p < 0.0001$). Lämpötilat riippuivat myös selvästi toisistaan sekä ennallistetuilla (Spearmanin $\rho = 0.74$) että ojitetuilla koaloilla ($\rho = 0.76$).

3.4 Mittauspisteiden kasvillisuus

Ennallistettujen, ojitettujen ja luonnontilaisten koalojen kasvillisuus oli samankaltaista, ja yleisiä kenttäkerroksen lajeja olivat suokukka (*Andromeda polifolia*), kanerva (*Calluna vulgaris*), variksenmarja (*Empetrum nigrum*), suopursu (*Ledum palustre*), lakka (*Rubus chamaemorus*), pyöreälehtikihokki (*Drosera rotundifolia*), karpalo (*Vaccinium oxycoccos*) ja tupasvilla (*Eriophorum vaginatum*). Ennallistettujen koalojen mittauspisteillä kasvoi myös vaivaiskoivua (*Betula nana*)

ja luonnontilaisten mittauspisteillä valkopiirtoheinää (*Rynchospora alba*) ja leväkköä (*Scheuzeria palustris*). Juolukkaa (*Vaccinium uliginosum*) löytyi vain ennallistetuilta ja luonnontilaisilta koealoilta.



Kuva 12. Tupasvillan peittävyden maksimi (suurin havaittu peittävyysarvo) ojitettujen, ennallistettujen ja luonnontilaisten koealojen mittauspisteillä. Mättäillä, painanteilla ja ojissa maksimipeittävyys oli ennallistetuilla aloilla ojitettuja suurempi. Peittävyysarvot: 0 = 0 %, + = alle 1 %, 1 = 1–5 %, 2 = 5–25 %, 3 = 25–50 %, 4 = 50–75 %, 5 = yli 75 %.

Tupasvillan peittävyys oli suurin ennallistetuilla (mediaani 1-5 % kokonaispinta-alasta) ja pienin ojitetuilla koealoilla (mediaani alle 1 % kokonaispinta-alasta). Tupasvillan maksimipeittävyys (suurin havaittu peittävyysarvo) oli ennallistettujen koealojen mättäillä, painanteilla ja ojissa suurempi ja lähempänä luonnontilaisten koealojen arvoja kuin ojitetuilla koealoilla (kuva 12). Pienin havaittu peittävyysarvo (minimipeittävyys) oli kuitenkin ennallistettujen koealojen ojissa ja painanteilla ojitettuja pienempi. Tasapinnoilla puolestaan minimi- ja maksimipeittävyys eivät eronneet ojitetuista.

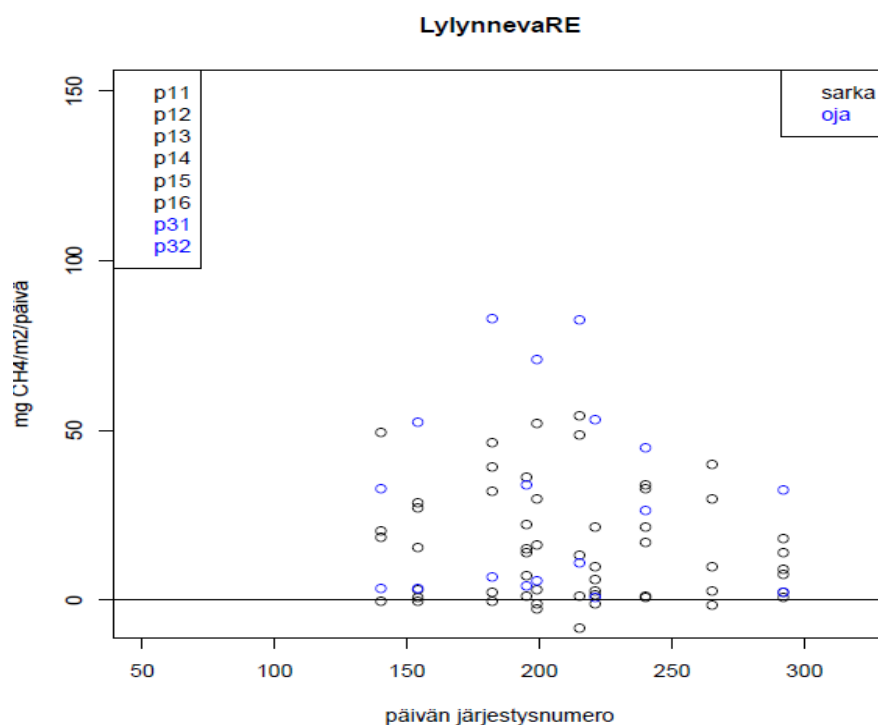
Pohjakerros oli kaikilla koealoilla rahkasammalten (*Sphagnum* sp.) vallitseva. Yleisin rahkasammallaji oli ruskorahkasammal (*Sphagnum fuscum*), jota esiintyi kaikilla koealoilla ja puolella analysoiduista mittauspisteistä. Myös silmäkerahkasammalta (*S. balticum*) esiintyi puolella analysoiduista mittauspisteistä, mutta vain luonnontilaisilla ja ennallistetuilla koealoilla. Metsäsammalista koealoilla esiintyi seinäsammalta (*Pleurozium schreberi*), jonka peittävyys oli suurimmillaan ennallistetuilla ja luonnontilaisilla koealoilla (suurin peittävyysarvo molemmilla 2),

sekä kynsisammalia (*Dicranum* sp.) ja karhunsammalia (*Polytrichum* sp.), joiden suurimmat peittävydet havaittiin ojitetuilla koealoilla (suurin peittävyysarvo 2).

Rahkasammalten peittävyys vaihteli enemmän ennallistetuilla ja luonnontilaisilla koealoilla verrattuna ojitettuihin koealoihin. Kaikissa ryhmissä peittävyden mediaani oli kuitenkin yli 75 % mittauspisteen kokonaispinta-alasta.

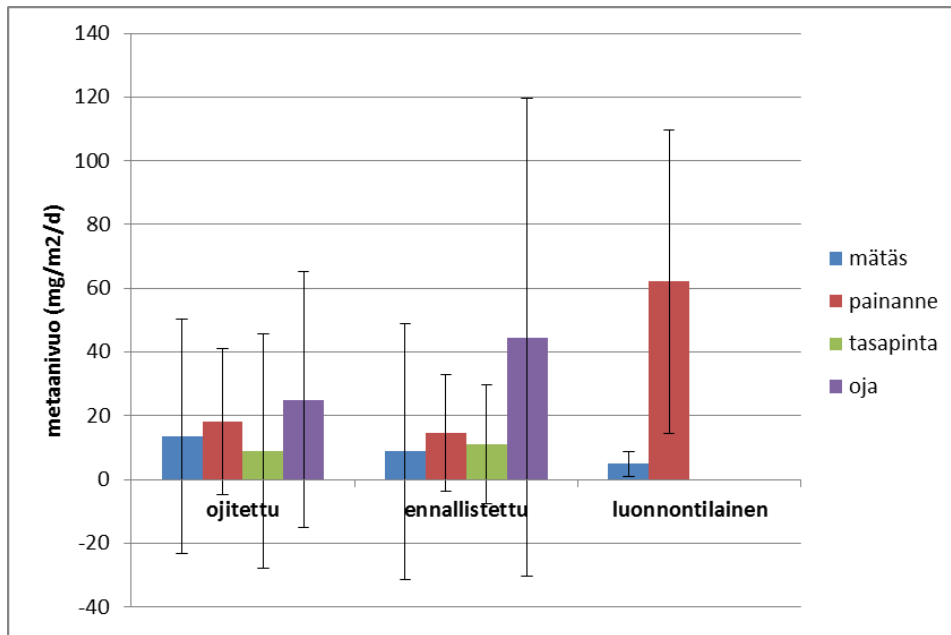
3.5 Metaanivuo

Yhteensä metaanivuomittauksia kertyi 1415 kappaletta, keskimäärin sata kappaletta koealaa kohti. Näytteenoton virheellisyyden tai esimerkiksi kuplinnan vuoksi noin 8 prosenttia (112 kappaletta) kaikista tuloksista oli hylättävä.



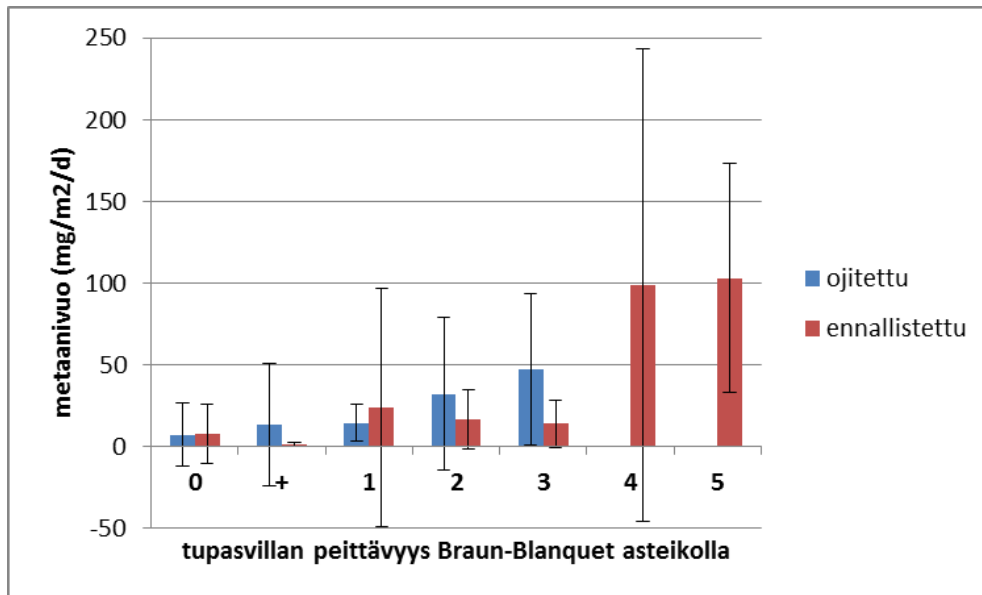
Kuva 13. Esimerkki ennallistetun koealan päiväkohtaisesta metaanivuosta mittauspisteittäin. Osa mittauspisteistä oli jonkin aikaa pieniä metaaninieluja, mutta ne kääntyivät pian takaisin lähteeksi. Selvää vuodenaikaisdynamiikkaa ei pystytty havaitsemaan kuin kahdella koealalla.

Kaikki koealat olivat havaintojakson aikana metaanilähteitä. Yksittäiset pisteet saattoivat olla jonkin aikaa myös pieniä metaaninieluja, mutta kääntyivät pian taas lähteeksi (kuva 13; liite 1). Koealakohtaisessa vuossa ei havaittu selvää vuodenaikaisdynamiikkaa, vaikka eri pienmuotojen keskimääräiset vuot olivatkin suurimmillaan loppukesällä. Kahden vuoden mittaukset myös jakautuivat kasvukauden ajalle melko tasaisesti (kuva 13).



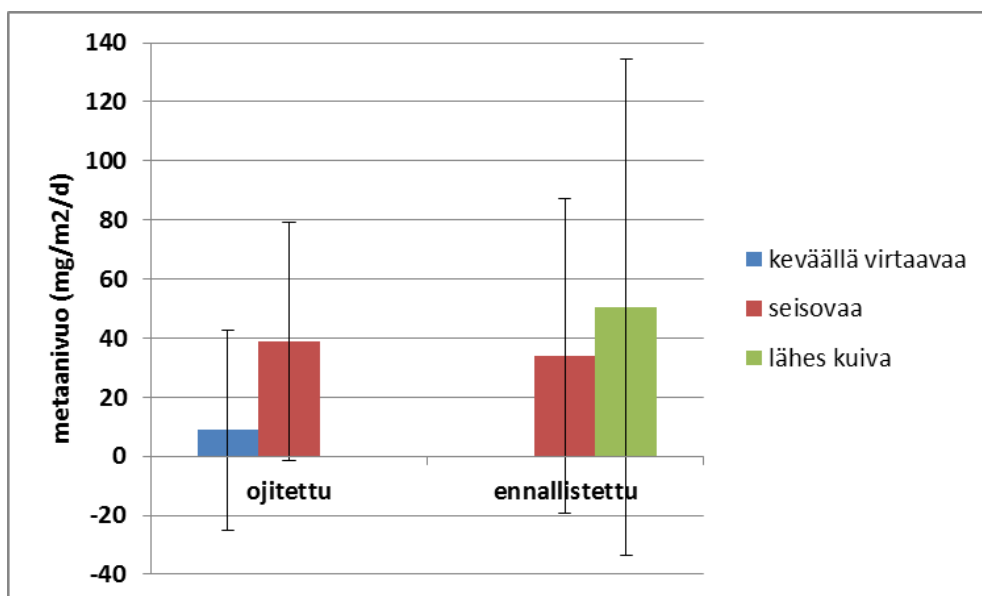
Kuva 14. Ojitettujen ja ennallistettujen koealojen sekä luonnontilaisen Tervalamminsuon pienmuotojen keskimääräiset metaanivuot ja niiden keskihajonnat (virhepalkit). Suurimmat vuot havaittiin luonnontilaisen koealan painanteilta ja ennallistettujen koealojen ojista, pienimmät luonnontilaisen koealan mättäiltä.

Ennallistettujen koealojen ojien metaanivuo oli lähes kaksinkertainen ojitettuihin koealojen ojiin verrattuna ja se läheni luonnontilaisen koealan painanteiden vuota (kuva 14). Myös tasapintojen metaanivuo oli ennallistetuilla hieman ojitettuja suurempi mutta mättäiden ja painanteiden vuo oli ojitettuja pienempi. Mättäiden vuot olivat kuitenkin sekä ojitetuilla että ennallistetuilla koealoilla painanteiden ja ojien voita pienempiä mutta lähes samalla tasolla tasapintojen vuon kanssa. Kaikkein suurimmat metaanivuot mitattiin luonnontilaisen koealan painanteilta ja pienimmät sen mättäiltä. Hajonta oli kuitenkin suurta ja kaikilla pienmuodoilla mitattiin useita yksittäisiä suuria arvoja.



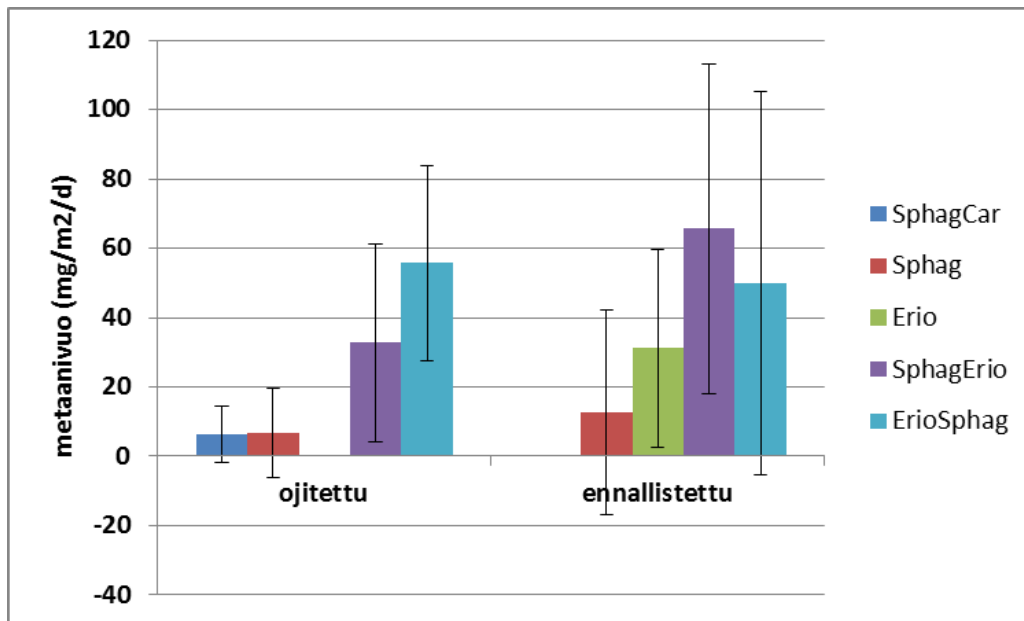
Kuva 15. Tupasvillan peittävyden vaikutus metaanivuohon ojitetuilla ja ennallistetuilla koealoilla. Suurimmat päästöt havaittiin ennallistettujen koealojen mittauspisteiltä, joilla tupasvillan peittävyys oli luokassa 4 tai 5 (vähintään 50 % mittauspisteen kokonaispinta-alasta).

Tupasvillan peittävyys vaikutti metaanivuohon sekä ennallistetuilla että ojitetuilla koealoilla (kuva 15). Suurimmat vuot (lähes $100 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) mitattiin ennallistettujen koealojen ojista joissa tupasvillan peittävyys oli suurimmillaan (peittävyysarvot 4 ja 5, vähintään 50 % mittauspisteen kokonaispinta-alasta). Pienimmät vuot (alle $1 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) puolestaan mitattiin ennallistettujen koealojen mättäiltä, joilla peittävyys oli lähes pienimmillään (alle 1 % kokonaispinta-alasta).



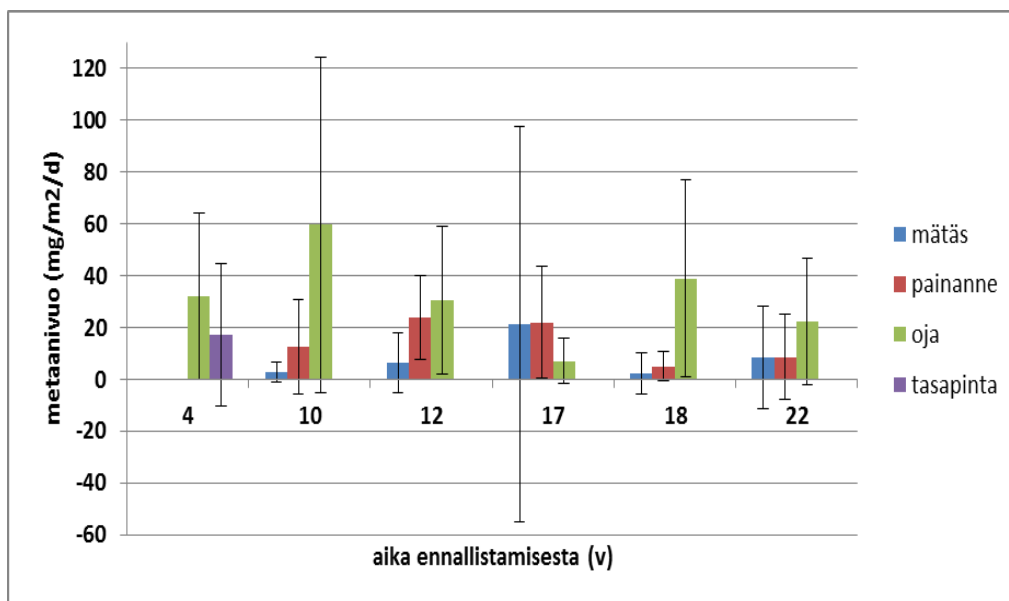
Kuva 16. Ojassa olevan veden ja sen liikkuvuuden vaikutus metaanivuohon ojitetuilla ja ennallistetuilla koealoilla. Suurimmat päästöt havaittiin ennallistettujen koealojen lähes kuivissa ojissa ja pienimmät ojitetujen koealojen ojissa, joissa vesi oli keväisin virtavaa.

Ojassa olevan veden määrällä ja liikkuvuudella oli vaikutusta metaanivuohon. Eniten metaania päästivät ennallistettujen koealojen lähes kuivat ojat (kuva 16). Ojat, joissa vesi seisoi ja jotka olivat ympärivuotisesti märkiä, päästivät sekä ennallistetuilla että ojitetuilla koealoilla lähes yhtä suuret määrät metaania. Pienin metaanivuo mitattiin ojitettujen koealojen ojista, joissa vesi virtasi keväällä. Hajonta oli kuitenkin suurta ja vuo vaihteli paljon etenkin ennallistettujen koealojen ojissa.



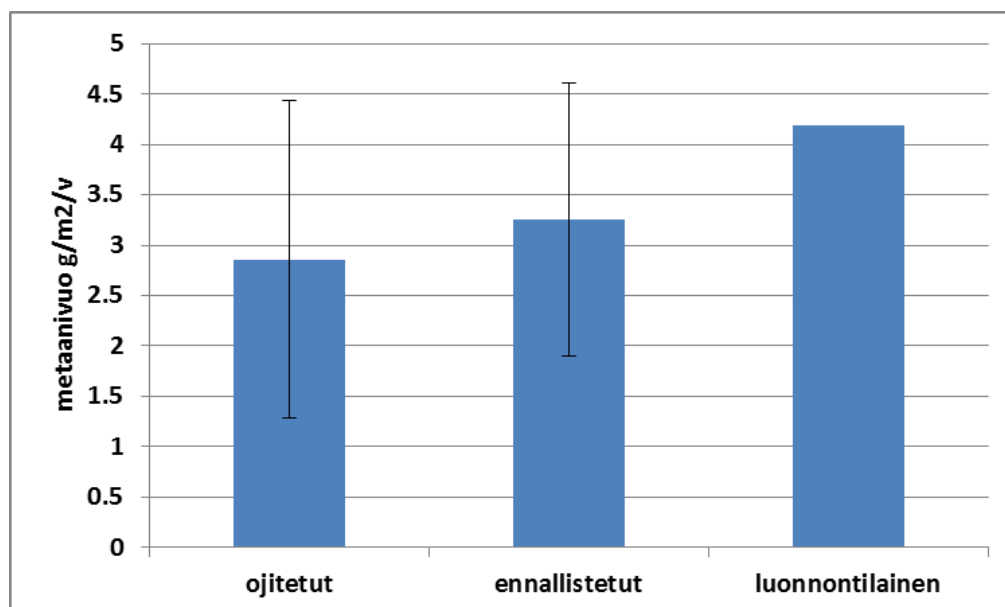
Kuva 17. Ojapisteiden kasvillisuuden vaikutus metaanivuohon ojitetuilla ja ennallistetuilla koealoilla. Pienimmät päästöt mitattiin pääosin rahkasammalpeitteisistä ojista ja suurimmat tupasvilla-rahkasammalkasvustoista. Erio = tupasvillakasvusto, ErioSphag = tupasvilla-rahkasammalkasvusto, jossa tupasvilla valtalaji, SphagCar =tupasvilla-pallosarakasvusto, Sphag = rahkasammalkasvusto, SphagErio = tupasvilla-rahkasammalkasvusto, jossa rahkasammal valtalaji

Eniten metaania päästivät ne ennallistettujen koealojen ojapisteet, joilla kasvoi sekä rahkasammalia että tupasvillaa (kuva 17). Pääosin rahkasammalten täyttämät ojapisteet päästivät sekä ennallistetuilla että ojitetuilla koealoilla vain vähän metaania, suuremmat vuot mitattiin kuitenkin ennallistetulta koealalta. Yhden ojitetun koealan ojapisteillä kasvanut pullosara (*Carex rostrata*) ei näyttänyt vaikuttavan metaanipäästön suuruuteen, sillä päästöt olivat samalla tasolla rahkasammalpeitteisten ojapisteiden kanssa (kuva 17 SphagCar).



Kuva 18. Ennallistamisesta kuluneen ajan vaikutus metaanivuohon eri pienmuodoilla. Suurimmat vuot mitattiin vuonna 10 vuotta sitten ennallistetun koalan ojista ja pienimmät 18 vuotta sitten ennallistetun koalan mättäiltä.

Suurin keskimääräinen metaanivuo mitattiin 10 vuotta sitten ennallistetun koalan ojista ja pienin 18 vuotta sitten ennallistetun koalan mättäiltä (kuva 18). Sarkapisteiden vuo oli ojien vuota pienempi kaikilla koaloilla 17 vuotta sitten ennallistettua alaa lukuun ottamatta mutta mättäiden ja painanteiden voissa oli selvä ero vain 10 ja 12 vuotta sitten ennallistetuilla koaloilla (kuva 18).

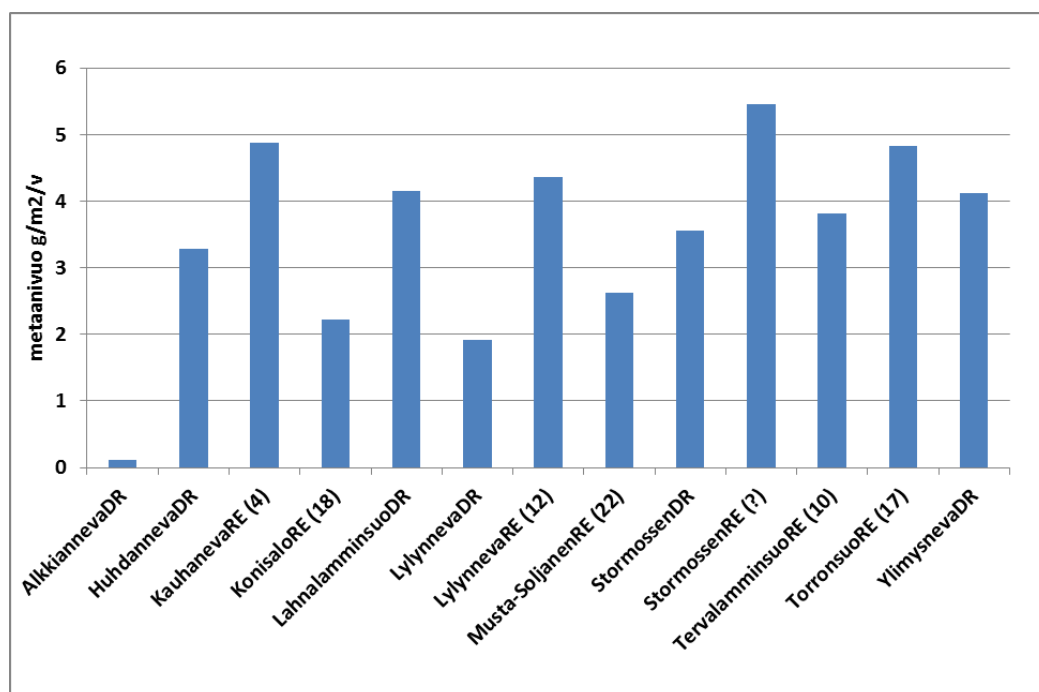


Kuva 19. Pienmuotojen pinta-alaosuuksilla painotetut vuotuiset metaanivuot ojitetuilla ja ennallistetuilla koaloilla sekä luonnontilaisella Tervalamminsuolla. Ennallistettujen koalojen vuo oli noin gramman ojitettuja suurempi. Suurin vuo mitattiin luonnontilaiselta koalalta.

Ennallistettujen koalojen pienmuotojen pinta-alaosuudella painotettu keskimääräinen vuotuinen metaanipäästö oli noin gramman suurempi kuin ojitettujen (kuva 19, taulukko 3). Kaikkein suurimmat päästöt mitattiin luonnontilaiselta Tervalamminsuolta. Sarkapisteiden vuotuinen metaanivuo oli sekä ennallistetuilla että ojitetuilla koaloilla lähes samalla tasolla mutta ojien vuo oli ennallistetuilla kaksi kertaa ojitettuja suurempi. Ojitetuilla koaloilla ojien vuo oli 2-3 kertaa sarkapisteiden vuota suurempi mutta ennallistetuilla koaloilla ero oli kasvanut 4-6 -kertaiseksi (taulukko 3).

Taulukko 3. Ennallistettujen, ojitettujen ja luonnontilaisen koalan vuotuiset metaanivuot ($\text{g m}^{-2} \text{v}^{-1}$). Huom! Ojitettujen ja ennallistettujen koalojen keskimääräinen vuo on laskettu koalakohtaisten pienmuotojen pinta-alaosuuksilla painotettujen voiden keskiarvona.

	Mättäät	Painanteet	Tasapinnat	Ojat	Koalojen keskiarvo \pm keskihajonta
Ojitetut	3.41	4.53	2.24	6.27	2.86 ± 1.57
Ennallistetut	2.21	3.67	2.75	11.16	4.02 ± 1.21
Luonnontilainen	1.24	15.52	-	-	8.38



Kuva 20. Koalakohtaiset pienmuotojen pinta-alaosuuksilla painotetut metaanivuot. Suurin vuo mitattiin ennallistetulla Stormossenilla, pienin ojitetuilla Alkkiannevalla. Ennallistettujen koalojen perässä sulkeissa ennallistamisesta kulunut aika.

Ojitettujen koealojen vuotuiset metaanivuot vaihtelivat välillä 0.11–4.15 g m⁻² v⁻¹ ja ennallistettujen 2.22–5.46 g m⁻² v⁻¹. Pienin vuotuinen metaanivuo mitattiin ojitetulta Alkkiannevalta ja suurin ennallistetulta Stormossenilta (kuva 20). Ennallistamisesta kuluneen ajan vaikutus ei näkynyt kovin selvästi vaikka lähes suurin vuo mitattiin 4 ja pienin 18 vuotta sitten ennallistetulta koealalta.

Metaanivuolla oli selvä yhteys pohjavedenpinnan tasoon ja turpeen lämpötilaan (taulukko 4). Lämpötilariippuvuus oli suurempaa ojitetuilla kuin ennallistetuilla koealoilla ja 5 cm:n syvyydessä suurempaa ojissa kuin sarkapisteillä. Myös ennallistamisvuodella oli yhteys metaanivuohon, vaikka koealojen välinen vaihtelu oli suurta.

Taulukko 4. Metaanivuon riippuvuus pohjavedenpinnan tasosta, turpeen lämpötilasta ja ennallistamisesta kuluneesta ajasta ennallistetuilla ja ojitetuilla koealoilla. enn = ennallistetut, oj = ojitetut, WT = vedenpinnan taso, T5 = lämpötila 5 cm:n syvyydessä, T30 = lämpötila 30 cm:n syvyydessä, aika = vuosia ennallistamisesta

X	Y	Spearmanin korrelaatiokerroin ρ
Vuo_enn	WT_enn	0.30
Vuo_oj	WT_oj	0.15
Vuo_enn	T5_enn	0.12
Vuo_enn	T30_enn	0.05
Vuo_oj	T5_oj	0.20
Vuo_oj	T30_oj	0.11
Vuo_enn	aika_enn	-0.71

Ennallistamisella ja pienmuodolla oli tilastollisesti merkitsevä yhdysvaikutus metaanivuohon ($p = 0.0015$). Parittaisessa vertailussa ennallistettujen koealojen ojien metaanivuo erosi tilastollisesti merkitsevästi sekä ojitettujen että ennallistettujen koealojen tasapintojen vuosta (kummassakin $p < 0.02$) mutta myös ennallistettujen koealojen painanteiden vuosta ($p = 0.0328$). Myös ennallistettujen koealojen mättäiden ja painanteiden metaanivoiden välillä oli tilastollisesti merkitsevä ero ($p = 0.0044$).

Sarkapisteillä (mättäät, painanteet, tasapinnat) ennallistamisella tai pienmuodolla ei ollut omaa tilastollisesti merkitsevää vaikutusta metaanivuohon. Pohjavedenpinnan taso ja turpeen lämpötila kuitenkin vaikuttivat metaanivuohon tilastollisesti merkitsevästi (kaikissa $p < 0.01$). Myöskään ojapisteillä ennallistettujen ja ojitettujen koealojen metaanivuot eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan, eikä

ojapisteiden kasvillisuudella tai ojassa olevan veden määrällä ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta vuohon.

Ojitettujen ja ennallistettujen koealojen vuotuiset metaanivuot eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Myöskään eri vuosina ennallistettujen koealojen metaanivoissa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Pohjavedenpinnan taso

Ennallistettujen koealojen pohjavedenpinnan vuotuinen keskitaso oli viitisen senttiä ojitettuja korkeammalla mutta kuitenkin vielä pari senttiä luonnontilaisia alempana. Painanteet ja tasapinnat olivat ojitettuja koealoja märempiä mutta mättäät yllättäen jopa kuivempia. Ennallistaminen oli siis muuttanut suon tilannetta ojitettuun nähden etenkin painanteiden ja tasapintojen osalta mutta luonnontilaisen suon tasolle on kuitenkin vielä jonkin verran matkaa.

Tämän tutkimuksen ojitetut koealat olivat jo märkiä, mikä johtui pääosin niiden ojien huonosta kunnosta ja heikosta kuivatustasosta. Myöskään puusto ei ollut hyötynyt ojituksesta, minkä vuoksi sen haihduttava vaikutus oli riittämätön pitämään kuivatustilaa yllä. Monien ojitetuilla soilla tehtyjen aiempien tutkimusten mukaan pohjavedenpinta vaihteli pääosin -15 ja -50 cm välillä keskiarvon ollessa noin -30 cm (Komulainen ym. 1998; Nykänen ym. 1998; Haapalehto ym. 2010; Ojanen ym. 2010; Lohila ym. 2011; Koskinen ym. 2016; Punttila ym. 2016). Karujen soiden oli kuitenkin jo aiemmin havaittu olevan ojitettuinkin märkiä (Lien ym. 1992; Martikainen ym. 1992; Ojanen ym. 2010), ja tämän tutkimuksen ojitetuille koealoilla lasketut vuosikeskiarvot olivat lähellä Martikaisen ym. (1992) ja Lienin ym. (1992) ojitetulta ombrotrofiselta koealalta mittaamia arvoja.

Luonnontilaisilla soilla pohjavedenpinta vaihteli keskimäärin -1 ja -40 cm:n välillä (esimerkiksi Martikainen ym. 1992; Nykänen ym. 1998; Laine ym. 2011), joten tämän tutkimuksen luonnontilaiset koealat osuvat vaihtelun märempään päähän. Myös sekä ennallistetuilla että ojitetuilla koealoilla mitatut pohjavedenpinnat olivat näin ollen osin luonnontilaisten soiden tasolla, mikä toisaalta viittaa epäonnistuneisiin ojituksiin ja toisaalta onnistuneeseen ennallistamiseen.

Sekä ojitettujen että ennallistettujen koealojen pohjavedenpinnan taso oli lähellä kirjallisuudesta löytämiäni ennallistetuilta soilta mitattuja arvoja (Komulainen ym. 1998; Haapalehto ym. 2010; Laine ym. 2011; Vanselow-Algan ym. 2015; Koskinen ym. 2016). Ennallistettujen koealojen mättäillä pohjavedenpinta oli kuitenkin syvemmällä ja painanteilla ja tasapinnoilla puolestaan korkeammalla kuin Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa.

Koska ennallistamisen yhtenä tavoitteena on nostaa pohjavedenpintaa, voi tuloksen perusteella sanoa ennallistamisen onnistuneen ainakin painanteilla mutta myös tasapinnoilla. Mättäillä vedenpinta puolestaan laski jopa ojitettuja koealoja alemmas etenkin vanhemmilla ennallistamisaloilla, mikä saattaa viitata ojien toiminnan jatkumiseen osin tukittunakin sekä pitkään kuivuneena olleen turpeen huonompaan vedenjohtokykyyn (esimerkiksi Haapalehto ym. 2010). Toisaalta mättäiden vedenpinnan taso on luonnostaankin painanteita ja tasapintoja alempana, joten kyseinen ilmiö saattaa myös kertoa suon luonnontilaisen pienmuotorakenteen hitaasta palautumisesta.

4.2 Turpeen lämpötila

Ennallistettujen ja ojitettujen koealojen turpeen lämpötilat poikkeisivat vain vähän toisistaan mutta vuotuiset keskiarvot erosivat kuitenkin tilastollisesti merkitsevästi luonnontilaisista soista. Ennallistettujen koealojen ojat olivat myös pari astetta ojitettujen koealojen ojia lämpimämpiä. Suurimmat pintaturpeen lämpötilavaihtelut (noin kuusi astetta) havaittiin ennallistettujen koealojen mättäillä, missä myös vedenpinta vaihteli eniten. Vedenpinnan tasolla ja turpeen lämpötilalla onkin havaittu olevan selvä yhteys (esimerkiksi Paavilainen ja Päivänen 1995; Hökkä ym. 1997).

Ojituksen on todettu laskevan turpeen lämpötilaa, sillä se vähentää turpeen vesipitoisuutta sekä laskee sen lämpökapasiteettia ja lämmönjohtokykyä (Paavilainen ja Päivänen 1995; Hökkä ym. 1997). Tämän tutkimuksen ojitetuilta ja ennallistetuilta koealoilta mitatut turpeen lämpötilat erosivat jonkin verran luonnontilaisesta, mikä johtui niiden matalammasta pohjavedenpinnan tasosta. Erot eivät kuitenkaan olleet suuria. Korkeimmat turpeen lämpötilat mitattiin ojissa, mikä johtui niiden korkeasta vedenpinnasta ja lähes jatkuvasti märästä turpeesta.

Aiempien tutkimusten mukaan märällä turpeella on lähes yhtä suuri lämpökapasiteetti kuin vedellä (Hökkä ym. 1997), mikä luultavimmin selittää havaitut erot sarkapisteiden ja ojapisteiden lämpötiloissa. Ojapisteiden märkä turve pysyi lämpimämpänä pidempään kuin sarkapisteiden ajoittain kuivempi turve ja lämpötilaerot mittauksen välillä olivat pienempiä. Mätäspintojen suuremmat lämpötilavaihtelut ennallistetuilla koealoilla johtuivatkin niiden matalammasta pohjavedentasosta ja pienemmästä lämpökapasiteetista. Pohjavedenpinta myös vaihteli eniten juuri mätäspinoilla.

Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa havaittiin ennallistettujen ja ojitettujen koealojen turpeen lämpötiloissa vain pieniä eroja. Tässä tutkimuksessa mitatut turpeen lämpötilat olivat etenkin 30 cm:n syvyydessä sekä ojitetuilla että ennallistetuilla pari astetta alhaisempia kuin Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa. Osalla koealoista (esimerkiksi ojitettu Stormossen) oli puustoa runsaasti, mikä saattoi varjostuksellaan pitää lämpötilan alhaisena. Myös pitkään korkealla ollut vedenpinta saattoi tasata lämpötiloja.

4.3 Mittauspisteiden kasvillisuus

Ennallistettujen koealojen kasvilajisto ei eronnut suuresti ojitettujen tai luonnontilaisten koealojen lajistosta. Rahkasammalia esiintyi lähes kaikilla mittauspisteillä ja tupasvillaakin yli puolella mittauspisteistä. Tupasvillan kasvupaikkoja olivat etupäässä ennallistettujen koealojen painanteet ja ojat mutta keski suurin maksimipeittävyksiin (vähintään 25 % mittauspisteen kokonaisalasta) päästiin myös ojitettujen koealojen ojissa sekä ojitettujen ja luonnontilaisten koealojen painanteilla. Rahkasammalia puolestaan kasvoi etenkin painanteilla, ojitettujen koealojen mättäillä ja ojissa sekä ennallistettujen koealojen tasapinoilla.

Myös Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa havaittiin ombrotrofisen koealan pintojen olevan rahkasammalten valtaamia sekä ennen että jälkeen ennallistamisen. Etenkin ruskorahkasammalen (*Sphagnum fuscum*) ja silmäkerahkasammalen (*S. balticum*) havaittiin olevan yleisempiä ennallistetuilla kuin ojitetuilla koealoilla (Komulainen ym. 1998; Jauhiainen ym. 2002; Haapalehto 2010), mikä havaittiin myös tässä tutkimuksessa. Silmäkerahkasammalta havaittiin Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa myös ojitetulla koealalla, kun taas tässä tutkimuksessa sitä kasvoi vain ennallistettujen ja luonnontilaisten koealojen mittauspisteillä.

Tupasvillan peittävyys on usein havaittu kasvavan ennallistamisen jälkeen niin minerotrofisilla kuin ombrotrofisillakin koealoilla (Komulainen ym. 1998; Jauhiainen ym. 2002; Haapalehto ym. 2010). Sama on havaittu myös turpeen noston jälkeen ennallistetuilla turvekentillä (esimerkiksi Tuittila ym. 2000b, Marinier ym. 2004; Yli-Petäys ym. 2007). Tässäkin tutkimuksessa tupasvillan peittävyysmaksimiarvo oli ennallistettujen koealojen mittauspisteillä ojitettuja suurempi ja mediaanitaso samalla tasolla luonnontilaisten koealojen mittauspisteiden kanssa. Kuitenkin kasvillisuusmuutokset ovat olleet etenkin ombrotrofisilla koealoilla pieniä sekä ojituksen että ennallistamisen jälkeen (Komulainen ym. 1998; Jauhiainen ym. 2002), mikä näkyi myös tässä tutkimuksessa lajiston ja peittävyksien samankaltaisuutena ojitettujen, ennallistettujen ja luonnontilaisten koealojen välillä.

4.4 Metaanivuo

Kaikki tutkimuksessa mukana olleet koealat olivat pieniä metaanilähteitä. Yksittäiset mittauspisteet saattoivat syvällä olevan pohjaveden ja/tai korkeiden lämpötilojen aikaan toimia pieninä metaaninieluinä, mutta muuttuivat pian takaisin lähteiksi. Pienin vuotuinen metaanivuo mitattiin ojitetuilta koealoilta ja suurin luonnontilaiselta koealalta. Ennallistettujen koealojen vuotuinen metaanivuo oli noin gramman ojitettuja suurempi mutta vielä noin puolet luonnontilaista koealaa pienempi. Ojitettujen ja ennallistettujen koealojen metaanivuot eivät kuitenkaan eronneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan, oletettavasti aineistossa olleen suuren hajonnan vuoksi.

Suurimmat yksittäiset vuot ($\text{yli } 150 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) mitattiin pääosin painanteilta, tasapinnoilta ja ojista, joissa vedenpinta oli korkealla ja kasvillisuus tupasvillan vallitsemaa. Myös joidenkin koealojen mätäspintojen hetkelliset päästöt saattoivat olla hyvin suuria. Pieniä yksittäisiä metaanivoita ($\text{alle } 2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) mitattiin puolestaan pääosin mätäiltä, joiden vedenpinta oli syvemmällä ja metaanin hapetus mahdollista, mutta myös tasapinnoilta ja ojista. Tulokset ovat samankaltaisia Saarnion ym. (1996) tutkimuksen kanssa, jossa pienimmät metaanipäästöt havaittiin mätäiltä ja suurimmat painanteilta tai tasapinnoilta. Ojien hetkellisesti suuriin päästöihin olivat aiemmin kiinnittäneet huomiota muun muassa Minkkinen ym. (1997), Minkkinen ja Laine (2006) sekä Cooper ym. (2014). Etenkin tupasvillan peittämissä ojissa metaanivuot olivat usein hyvinkin suuria (Minkkinen ja Laine

2006), mikä havaittiin myös tässä tutkimuksessa. Ojien osuus suon pinta-alasta oli kuitenkin pieni suhteessa mättäisiin, painanteisiin ja tasapintoihin, joten niiden vaikutus kokonaispäästöön ei ollut pinta-alalla painotettuna kovinkaan merkittävä.

Ojitettujen soiden metaanivuot ovat aiempien tutkimusten mukaan vaihdelleet pienestä nielusta yli 10 grammaan neliömetriltä (Martikainen ym. 1992; Nykänen ym. 1998; Roulet ym. 1999; Strack ym. 2006; Lohila ym. 2011; Urbanová ym. 2013a). Alkujaan ombrotrofisten soiden on myös havaittu olevan ojitettuinkin useimmiten metaanin lähteitä (Martikainen ym. 1992; Komulainen ym. 1999; Ojanen ym. 2010), varsinkin, jos ne olivat vielä pääosin suokasvillisuuden vallitsemia (Ojanen ym. 2010). Suurin osa tässä tutkimuksessa olleista ojitetuista koealoista oli hyvin märkiä eikä niiden kasvillisuus ollut merkittävästi muuttunut, joten niiden metaanivuotkin olivat huomattavan suuria (jopa $4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Ojitettujen koealojen keskimääräinen vuo jäi kuitenkin ennallistettuja soita jonkin verran alemmaksi.

Ennallistettujen koealojen metaanivuo olivat vain hiukan ojitettuja koealojen vuota suurempi, mikä selittyy pienillä eroilla pohjavedenpinnan tasoissa, turpeen lämpötiloissa ja tupasvillan peittävydessä. Samanlaiseen tulokseen päätyi myös Urbanová ym. (2013a) tutkiessaan metaanivuon kehitystä ennallistetulla karulla suolla Tshekin tasavallassa. Tässä tutkimuksessa havaittu ennallistettujen koealojen metaanivuo oli suurempi kuin Komulaisen ym. (1998) ennallistetulta ombrotrofiselta koealalta mittaama vuo mutta samaa luokkaa saman tutkimuksen minerotrofisen koealan vuon kanssa. Tämä saattaa selittyä sillä, että ojitetut koealat olivat keskimäärin märempiä kuin Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa eikä ero ennallistettujen ja ojitettujen koealojen vedenpinnan tasojen ja sitä myötä metaanivuon välillä ollut niin suuri. Myös kasvillisuus saattaisi selittää eroa, sillä tupasvilla oli tämän tutkimuksen mukaan yleinen kasvi sekä ennallistetuilla että ojitetuilla koealoilla, kun taas Komulainen ym. (1998) havaitsi sen vallannen alaa vain minerotrofisen suon ennallistetulla koealalla. Ennallistaminen myös lisäsi minerotrofisella koealalla metaanin hapetusta (Komulainen ym. 1998), jolloin vuo jäi luonnontilaisia reheviä soita pienemmiksi.

Myös ennallistetuilta suopohjilta mitatut metaanivuot (esimerkiksi Waddington ja Day 2007; Yli-Petäys ym. 2007; Wilson ym. 2009; Strack ym. 2014) olivat

pienimmillään tässä tutkimuksessa havaittujen voiden kaltaisia, mutta usein huomattavasti paljon suurempia. Samoin ennallistettujen korprien metaanivuot olivat paljon tässä tutkimuksessa mitattuja voita suurempia mutta ojitettujen ja luonnontilaisten korprien vuot olivat lähes samalla tasolla (Koskinen ym. 2016). Juottosen ym. (2012) tutkimien ennallistettujen minerotrofisten soiden metaanivuot olivat puolestaan tässä tutkittuja soita jonkin verran pienempiä, vaikka pohjavedenpinta oli osittain tämän tutkimuksen koealoja korkeammalla.

Ennallistetuista koealoista suurin vuotuinen metaanivuo mitattiin vuonna 2011 ennallistetuilta koealoilta ja pienin vuonna 1997 ennallistetulta koealalta. Ennallistamisesta kuluneen ajan ja metaanipäästön välillä havaittiin yhteys, mutta koska tässä tutkimuksessa ennallistettuja aloja on vain yksi kutakin ennallistamisvuotta kohden, ei tuloksista kuitenkaan voi tehdä mitään sen suurempia johtopäätöksiä ennallistamisesta kuluneen ajan vaikutuksesta.

Karujen luonnontilaisten soiden on aiemmin havaittu päästävän metaania vuosittain noin 5 g m^{-2} (vaihteluväli $1\text{-}16 \text{ g m}^{-2} \text{ v}^{-1}$, Moore ja Knowles 1990; Nykänen ym. 1998; Alm ym. 1999b; Saarnio ym. 2007). Sekä ojitettujen että ennallistettujen koealojen keskimääräinen vuotuinen metaanivuo oli lähellä luonnontilaisia arvoja jääden kuitenkin jonkin verran pienemmäksi. Ennallistaminen näyttäisi nostavan metaanivuota etenkin ojissa, joiden vuo läheni luonnontilaisen koealan painanteiden vuota ja oli viisinkertainen sarkapisteiden (mättäät, painanteet, tasapinnat) vuohon nähden. Sarkapisteillä puolestaan ennallistamisella ei näyttäisi olevan kovinkaan suurta vaikutusta vedenpinnan tason ja turpeen lämpötilan muutoksista huolimatta. Ennallistettujen metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden ilmastovaikutuksen voikin siis tämän tutkimuksen perusteella sanoa olevan metaanin osalta enintään yhtä suuri kuin vastaavien luonnontilaisten soiden. Myös ennallistamisen onnistumisen kannalta tilanne näyttää hyvältä, sillä ojitettuinaakaan karut suot eivät ole kovinkaan kaukana luonnontilaisesta ja metaanin tuotannolle sopivat olosuhteet ovat jo olemassa.

Metaanivuon havaittiin olevan yhteydessä pohjavedenpinnan tasoon ja turpeen lämpötilaan. Samoin kasvillisuudella ja erityisesti tupasvillan peittävyydellä havaittiin olevan vaikutusta metaanivuohon. Myös Komulainen ym. (1998) ja Urbanová ym. (2013a) totesivat metaanivuon riippuvan vedenpinnan tasosta ja

turpeen lämpötiloista. Samoin Ojanen ym. (2010) havaitsivat metaanivuon selittyvän ennen kaikkea vedenpinnan tasolla mutta myös kasvillisuuden peittävyydellä ja puuston määrällä. Tässä tutkimuksessa saadut korrelaatiokertoimien arvot olivat ennallistettujen koealojen osalta lähes yhtä suuria Komulaisen ym. (1998) laskemien kertoimien kanssa, mutta ojitettujen koealojen kertoimet olivat huomattavasti pienempiä. Myöskään metaanivuon ja turpeen lämpötilan 30 cm:n syvyydessä ei havaittu korreloivan keskenään niin selvästi kuin Komulaisen ym. (1998) tutkimuksessa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ennallistaminen näyttäisi nostavan metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden metaanivuota vain vähän. Ojitetut koealat olivat märkiä ja suokasvillisuuden vallitsevia, ja sitä myöten metaanilähteitä. Ennallistettujen koealojen keskimääräinen vuotuinen metaanivuo oli kuitenkin lähempänä luonnontilaisia soita, vaikka jäikin vielä hiukan alle luonnontilaisen tason. Tästä voikin päätellä, ettei metsänkasvatuskelvottomien karujen keidassoiden ennallistaminen aiheuta metaanin osalta sen suurempaa ilmastovaikutusta kuin luonnontilaiseltaan karut suot. Myös pienmuodolla oli vaikutusta metaanivuohon, sillä mättäiden metaanivuo oli sekä ojitetuilla että ennallistetuilla koealoilla oletetusti painanteiden ja tasapintojen vuota pienempi ja ojien vuo vastaavasti suurempi. Tilastollisesti merkitsevät erot jäivät kuitenkin puuttumaan aineistossa olleen suuren hajonnan vuoksi.

Ennallistettujen koealojen pohjavedenpinta ja turpeen lämpötilat olivat jonkin verran ojitettuja korkeammalla ja tupasvillan peittävyys mittauspisteillä suurempi. Metaanivuon havaittiin kuitenkin olevan ojitettuja koealoja suurempi vain ennallistettujen koealojen täytetyissä ojissa ja tasapinnoilla. Ojien vuo myös läheni luonnontilaisen koealan painannepintojen vuota kun taas ennallistettujen koealojen painanteiden vuo oli vielä kaukana luonnontilaisesta. Ennallistamisen voisikin sanoa luovan ojasta uuden märän (tasa)pinnan, jossa on korkean vedenpinnan, lämpimämmän turpeen ja lisääntyneen tupasvillan peittävyuden ansiosta hyvät edellytykset metaanin tuotannolle ja sitä myötä suuremmalle metaanivuolle.

Ennallistamisesta kuluvalle ajalla oli yhteys metaanivuohon, mutta metaanivuo ei kuitenkaan selkeästi muuttunut ajan kuluessa. Toisaalta neljäkin vuotta saattaa riittää tuomaan ennallistetun suon metaanivuon lähelle luonnontilaa, toisaalta vuo voi olla pieni vielä yli 20 vuoden kuluttua ennallistamisesta. Tässä käytetyn aineiston suppeuden vuoksi aihetta tulisi kuitenkin tutkia lisää. Samoin metsänkasvatuskelvottomien märkien soiden mahdollisesti suurempiin metaanivoihin tulisi jatkossa kiinnittää enemmän huomiota.

KIITOKSET

Tämä gradu tehtiin osana Luonnonvarakeskuksen, Suomen ympäristökeskuksen, Vapo Oy:n, Metsähallituksen sekä Helsingin ja Oulun yliopistojen EU-rahoitteista LIFEPEATLANDUSE- projektia.

Suuret kiitokset yliopistonlehtori Kari Minkkiselle (HY) ja tutkija Paavo Ojaselle (HY/Luke) mahdollisuudesta olla mukana mielenkiintoisessa projektissa sekä erinomaisesta ohjauksesta. Paavolle myös erityiskiitos avusta R-ohjelmiston ja sekamallien kanssa.

Pauli Karppinen Luonnonvarakeskuksen laboratoriosta ansaitsee kiitokset näytteiden kaasukromatografianalyseistä. Kiitos myös Parkanossa aineistoa keränneelle Kaisa Silvanille sekä Helsingissä vuonna 2014 mitanneelle Angela Lafuentelle.

Erytiskiitos kuuluu omissa kenttätöissäni avustaneelle Erwan Stricot`lle, jonka ansiosta mittausten teko sujui nopeammin ja hauskemmin ja jolta opin yksinkertaisen tavan analysoida mittauspisteen kasvillisuutta.

Myös perheeni ja paras ystäväni ansaitsevat kiitokset siitä, että sain välillä gradunteon sijaan jotain muutakin ajateltavaa ja puuhattavaa.

LÄHTEET

Alm, J., Saarnio, S., Nykänen, H., Silvola, J. & Martikainen, P. 1999a. Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry* 44: 163–186.

Alm, J., Schulman, L., Walden, J., Nykänen, H., Martikainen, P. J. & Silvola, J. 1999b. Carbon Balance of a Boreal Bog during a Year with an Exceptionally Dry Summer. *Ecology* 80: 161-174.

Alm, J., Shurpali, N. J., Tuittila E-S., Laurila, T., Maljanen, M., Saarnio, S. & Minkkinen, K. 2007. Methods for determining emission factors for the use of peat and peatlands – flux measurements and modelling. *Boreal Environment Research* 12: 85–100.

Braun-Blanquet, J. 1921. Principien einer Systematik der Pflanzengesellschaften auf floristischer Grundlage. *Jb. St. Gall. Naturw. Ges.* 57.

Cooper, M.D. A., Evans, C. D., Zielinski, P., Levy, P. E., Gray, A., Peacock, A., Norris, D., Fenner, N. & Freeman, C. 2014. Infilled Ditches are Hotspots of Landscape Methane Flux Following Peatland Re-wetting. *Ecosystems* 17: 1227–1241.

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S. & Thornton, P. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *Teoksessa: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (toim.) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*

Couwenberg, J. & Fritz, C. 2012. Towards developing IPCC methane ‘emission factors’ for peatlands (organic soils). *Mires and Peat* 10: Article 03, 1–17.

Ennallistaminen suojelualueilla. 2003. Ennallistamistyöryhmän mietintö. *Suomen ympäristö* 618. Ympäristöministeriö. Helsinki 2003. 189 s. + liitteet.

Eurola, S. & Huttunen, A. 1990. Suoekosysteemien toiminnallinen ryhmitys, (Summary: The functional grouping of mire ecosystems and their response to drainage). *Suo* 41:15–23.

Francez, A.-J., Gogo, S. & Josselin, N. 2000. Distribution of potential CO₂ and CH₄ productions, denitrification and microbial biomass C and N in the profile of a restored peatland in Brittany (France). *European Journal of Soil Biology* 36: 161–168.

Greenup, A.L., Bradford, M.A., McNamara, N. P., Ineson, p. & Lee, J.A. 2000. The role of *Eriophorum vaginatum* in CH₄ flux from an ombrotrophic peatland. *Plant and Soil* 227: 265–272.

Haapalehto, T.O., Vasander, H., Jauhiainen, S., Tahvanainen, T. & Kotiaho, J.S.: 2010. The Effects of Peatland Restoration on Water-Table Depth, Elemental Concentrations, and Vegetation: 10 Years of Changes. *Restoration Ecology*: 1-12. doi: 10.1111/j.1526-100X.2010.00704.x

Hahn-Schöfl, M., Zak, D., Minke, M., Gelbrecht, J., Augustin, J. & Freibauer, A. 2011. Organic sediment formed during inundation of a degraded fen grassland emits large fluxes of CH₄ and CO₂. 2011. *Biogeosciences* 8:1539–1550. doi:10.5194/bg-8-1539-2011

Heikkilä, J. 2007. Turvemaiden puun kasvatusta ja korjua - nykytila ja kehittämistarpeet. *Metlan työraportteja* 43. 29 s.

Huth, V., Günther, A., Jurasinski, G. & Glatzel, S. 2013. The effect of an exceptionally wet summer on methane effluxes from a 15-year re-wetted fen in north-east Germany. *Mires and Peat* 13: Article 02: 1–7. ISSN 1819-754X.

Huttunen, J. T., Nykänen, H., Turunen, J. & Martikainen, P. J. 2003. Methane emissions from natural peatlands in the northern boreal zone in Finland, Fennoscandia. *Atmospheric Environment* 37: 147–151.

Hökkä, H., Penttilä, T. & Siipola, M. 1997. Relationship between groundwater level and temperature in peat. Teoksessa: Trettin, C.C., Jurgensen, M.F., Grigal, D.F. Gale, M.R. & Jeglum, J.K. (toim.) *Northern forested wetlands: ecology and*

management. CRC-press, Lewish publishers. Boca Raton, New York, London, Tokyo.

Jauhiainen, S., Laiho, R. & Vasander, H. 2002. Ecohydrological and vegetational changes in a restored bog and fen. *Annales Botanici Fennici* 39: 185–199.

Juottonen, H., Hynninen, A., Nieminen, M., Tuomivirta, T.T., Tuittila, E-S., Nousiainen, H., Kell, D.K., Yrjälä, K., Tervahauta, A. & Fritze, H. 2012. Methane-Cycling Microbial Communities and Methane Emission in Natural and Restored Peatlands. *Applied and Environmental Microbiology* 78: 6386–6389.

King J. Y., Reeburgh W. S. & Regli S. K. 1998. Methane emission and transport by arctic sedges in Alaska: results of a vegetation removal experiment. *Journal of Geophysical Research* 103: 29029–29083.

Komulainen, V-M., Nykänen, H. Martikainen, P. J. & Laine, J. 1998. Short-term effect of restoration on vegetation change and methane emissions from peatlands drained for forestry in southern Finland. *Canadian journal of forestry research* 28: 402–411.

Koskinen, M., Maanavilja, L., Nieminen, M., Minkkinen, K. & Tuittila, E-S. 2016. High methane emissions from restored Norway spruce swamps in southern Finland over one growing season. *Mires and Peat* 17: 1–13.

Laiho, R. 1996. Changes in understorey biomass and species composition after water level drawdown on pine mires in southern Finland. *Suo* 47: 59–69.

Larmola, T, Leppänen, S. M., Tuittila E-S., Aarva, M, Merilä, P., Fritze, H & Tirola, M. 2014. Methanotrophy induces nitrogen fixation during peatland development. *PNAS* Early Edition: 1-6. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1314284111.

LeMer, J & Roger, P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology* 37: 25–50.

Lien, T., Martikainen, P., Nykänen, H. & Bakken, L. 1992. Methane oxidation and methane fluxes in two drained peatlands. *Suo* 43: 231–236.

Lohila, A., Minkkinen, K., Aurela, M., Tuovinen, J-P., Penttilä, T., Ojanen, P. & Laurila, T. 2011. Greenhouse gas flux measurements in a forestry-drained peatland indicate a large carbon sink. *Biogeosciences* 8: 3203–3218.

Marinier, M., Glatzel, S. & Moore, T. R. 2004. The role of cottongrass (*Eriophorum vaginatum*) in the exchange of CO₂ and CH₄ at two restored peatlands, eastern Canada. *Ecoscience* 11: 141–149.

Martikainen, P.J., Nykänen, H., Crill, P. & Silvola, J. 1992. The effect of changing water table on methane fluxes at two Finnish mire sites. *Suo* 43: 237–240.

Metla. 2013. Life Peatland Use -hankeen kotisivu. [Internetdokumentti.] Saatavissa: <http://www.metla.fi/hanke/8547/index.htm>. [Viitattu 2.2.2015]

Minkkinen, K. & Laine, J. 2006. Vegetation heterogeneity and ditches create spatial variability in methane fluxes from peatlands drained for forestry. *Plant Soil* 285: 289–304.

Minkkinen, K., Laine, J., Nykänen, H. & Martikainen, P. J. 1997. Importance of drainage ditches in emissions of methane from mires drained for forestry. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 949–952.

Moore, T. R. & Knowles, R. 1990. Methane emissions from fen, bog and swamp peatlands in Quebec. *Biogeochemistry* 11: 45–61.

Nykänen, H., Alm, J., Silvola, J., Tolonen, K. & Martikainen, P. J. 1998. Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates. *Global biogeochemical cycles* 12: 53–69.

Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. & Penttilä, T. 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260: 411–421.

Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208.

Paavilainen, E. & Päivänen, J. 1995. Peatland forestry, ecology and principles. Ecological studies 111. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 249 s.

Poore, M. E. D. 1955. The Use of Phytosociological Methods in Ecological Investigations: I. the Braun-Blanquet System. *Journal of Ecology* 43: 226–244.

Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J. C., Grünzweig, J. M., Reth, S., Subke, J-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., Anthoni, P., Lindroth, A., & Hari, P. 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology* 123: 159–176.

Punttila, P., Autio, O., Kotiaho, J.S., Kotze, D.J., Loukola, O.J., Noreika, N., Vuori, A. & Vepsäläinen, K. (2016). The effects of drainage and restoration of pine mires on habitat structure, vegetation and ants. *Silva Fennica* 50: 1-31.

R foundation. 2014. R version 3.1.1 (2014-07-10) -- "Sock it to Me". Copyright (C) 2014 The R Foundation for Statistical Computing Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)

Roulet, N., Ash, R., Quinton, W. & Moore, T. 1993. Methane flux from drained northern peatlands: effect of a persistent water table lowering on flux. *Global biogeochemical cycles* 4: 749–769.

Saarnio, S., Alm, J., Silvola, J., Lohila, A., Nykänen, H. & Martikainen, P.J. 1996. Seasonal variation in CH₄ emissions and production and oxidation potentials at microsites on an oligotrophic pine fen. *Oecologia* 110:414–422.

Saarnio, S., Monreo, M., Shurpali, N. J., Tuittila, E-S., Mäkilä, M. & Alm, J. 2007. Annual CO₂ and CH₄ fluxes on pristine boreal mires as a background for the lifecycle analysis of peat energy. *Boreal environment research* 12: 101–113.

Segers, R. 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry* 41: 23–51.

Strack, M. & Zuback, Y. C. A. 2013. Annual carbon balance of a peatland 10 yr following restoration. *Biogeosciences* 10: 2885–2896. Doi: 10.5194/bg-10-2885-2013.

Strack, M. Waller, M. F. & Waddington, J. M. 2006. Sedge Succession and Peatland Methane Dynamics: A Potential Feedback to Climate Change. *Ecosystems* 9: 278–287. DOI: 10.1007/S10021-005-0070-1.

Strack, M., Keith, A. M. & Xu, B. 2014. Growing season carbon dioxide and methane exchange at a restored peatland on the Western Boreal Plain. *Ecological Engineering* 64: 231–239.

Svensson, B.H. & Sundh, I. 1992. Factors affecting methane production in peat soils. *Suo* 43:183–190

Tuittila, E-S., Komulainen, V-M., Vasander, H., Nykänen, H., Martikainen, P. J. & Laine, J. 2000a. Methane dynamics of a restored cut-away peatland. *Global Change Biology* 6: 569–581.

Tuittila, E-S., Vasander, H. & Laine, J. 2000b. Impact of Rewetting on the Vegetation of a Cut-Away Peatland. *Applied Vegetation Science* 3: 205-212.

Turetsky, M. R., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N. B., Crill, P., Hornibrook, E. R. C., Minkinen, K., Moore, T. R., Myers-Smith, I. H., Nykänen, H., Olefeldt, D., Rinne, J., Saarnio, S., Shurpali, N., Tuittila, E-S., Waddington, J. M., White, J. R., Wickland, K. P. & Wilmking, M. 2014. A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology* 20: 2183–2197. Doi: 10.1111/gcb.12580

Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K. & Reinikainen, A. 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland – application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* 12: 79–90.

Urbanová, Z., Pícek, T. & Bárta, J. 2010. Effect of peat re-wetting on carbon and nutrient fluxes, greenhouse gas production and diversity of methanogenic archaeal community. *Ecological Engineering* 37: 1017 – 1026.

Urbanová, Z., Bárta, J. & Pícek, T. 2013a. Methane emissions and methanogenic archaea on pristine, drained and restored mountain peatlands, Central Europe. *Ecosystems* 16: 664-677.

Urbanová, Z., Pícek, T. & Tuittila E-S. 2013b. Sensitivity of carbon gas fluxes to weather variability on pristine, drained and rewetted temperate bogs. *Mires and Peat* 11: Article 04: 1–14. ISSN 1819-754X.

Valtioneuvoston soiden ja turvemaiden kestävä ja vastuullista käyttöä ja suojelua koskevan periaatepäätöksen (30.8.2012) taustaraportti: Ehdotus soiden ja turvemaiden kestävä ja vastuullisen käytön ja suojelun kansalliseksi strategiaksi. 2011. Työryhmämuistio, liitteet 1-18. MMM. 95 s.

Vanselow-Algan, M., Schmidt, S.R, Greven, M., Fiencke, C., Kutzbach, L., & Pfeiffer, E.-M. 2015. High methane emissions dominated annual greenhouse gas balances 30 years after bog rewetting. *Biogeosciences* 12: 4361–4371. doi:10.5194/bg-12-4361-2015

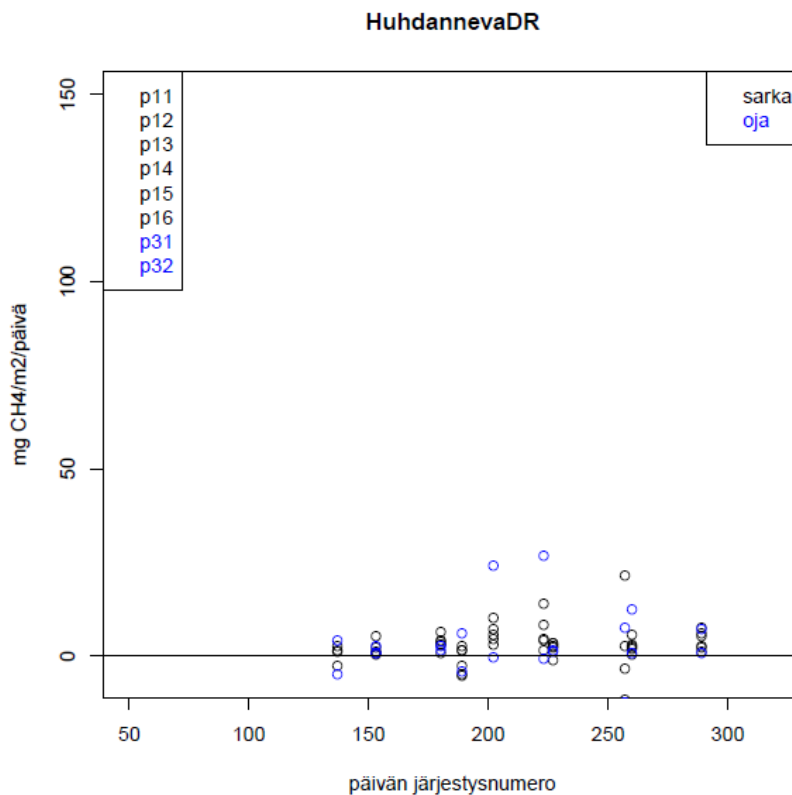
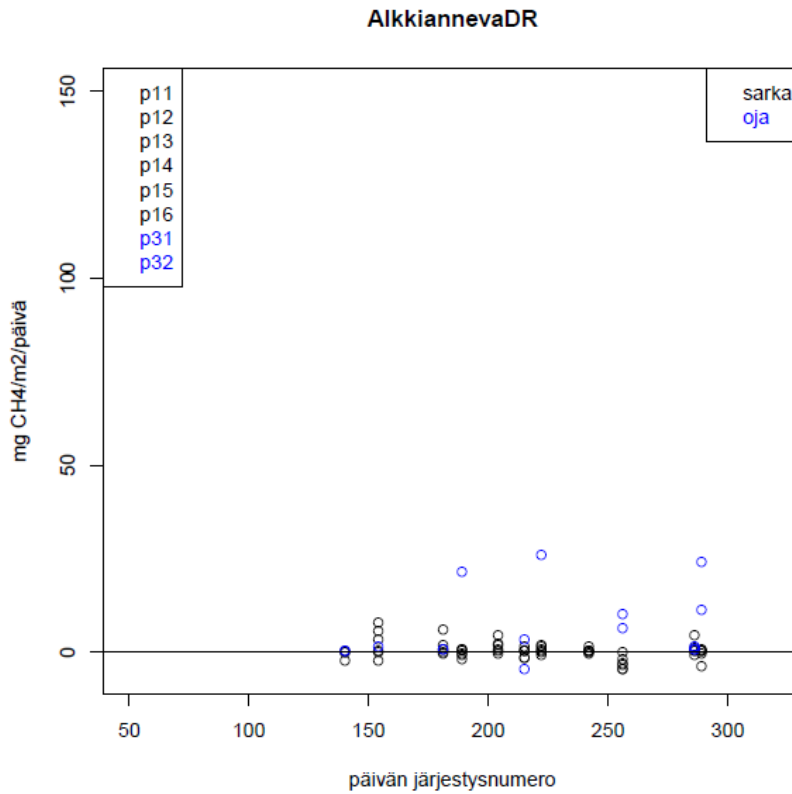
Waddington, J. M. & Day S. M. 2007. Methane emissions from a peatland following restoration. *Journal of Geophysical Research* 112.

Whalen, S.C. & Reeburgh, W.S. 2000. Methane Oxidation, Production, and Emission at Contrasting Sites in a Boreal Bog. *Geomicrobiology Journal* 17: 237 – 251.

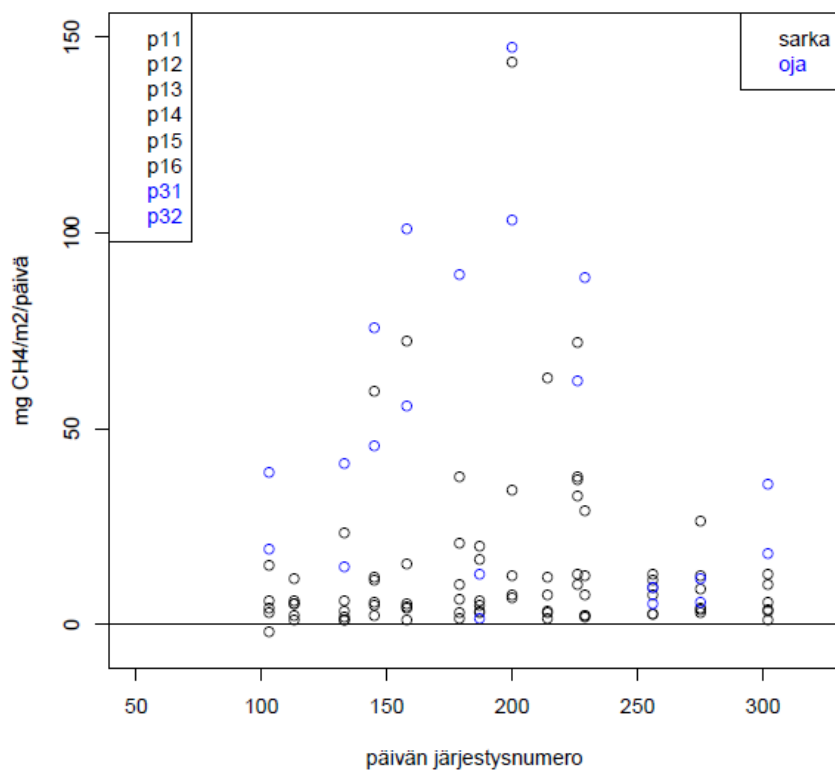
Yli-Petäys, M., Laine, J., Vasander, H. & Tuittila E-S. 2007. Carbon gas exchange of a re-vegetated cut-away peatland five decades after abandonment. *Boreal Environmental Research* 12: 177–190.

LIITTEET

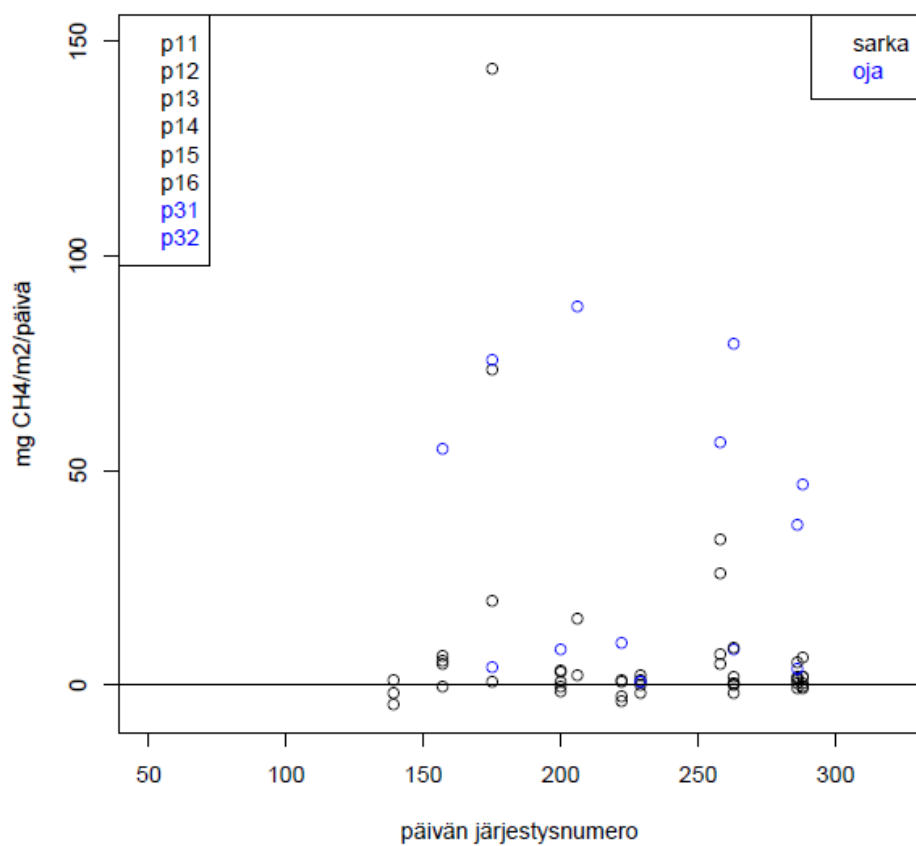
Liite 1. Mittauspistekohtaisten metaanivoiden muutos sulan maan aikana (huhti-
lokakuu) koaloittain.



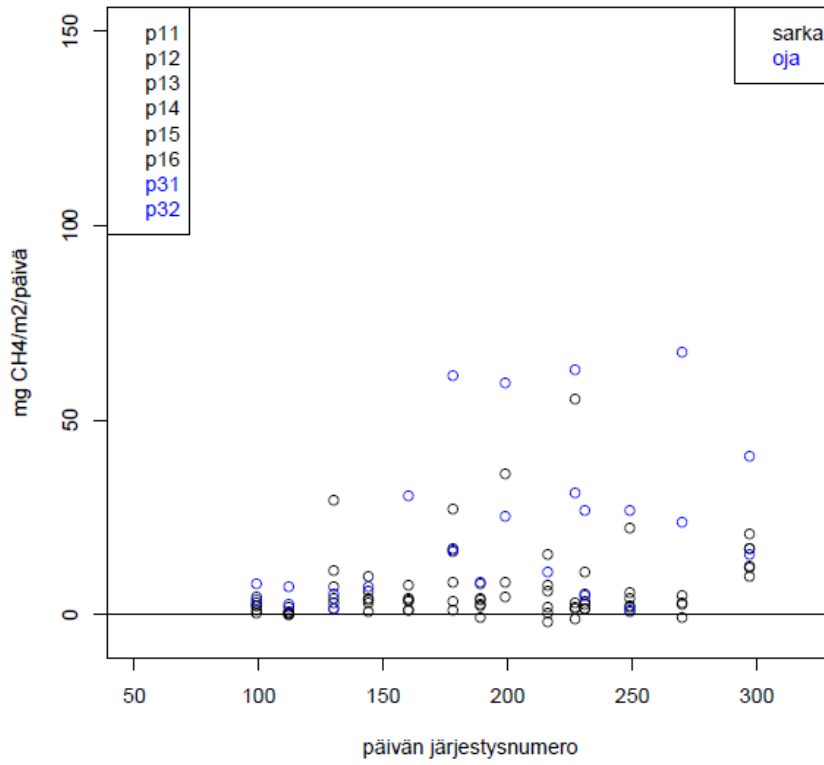
LahnalamminsuoDR



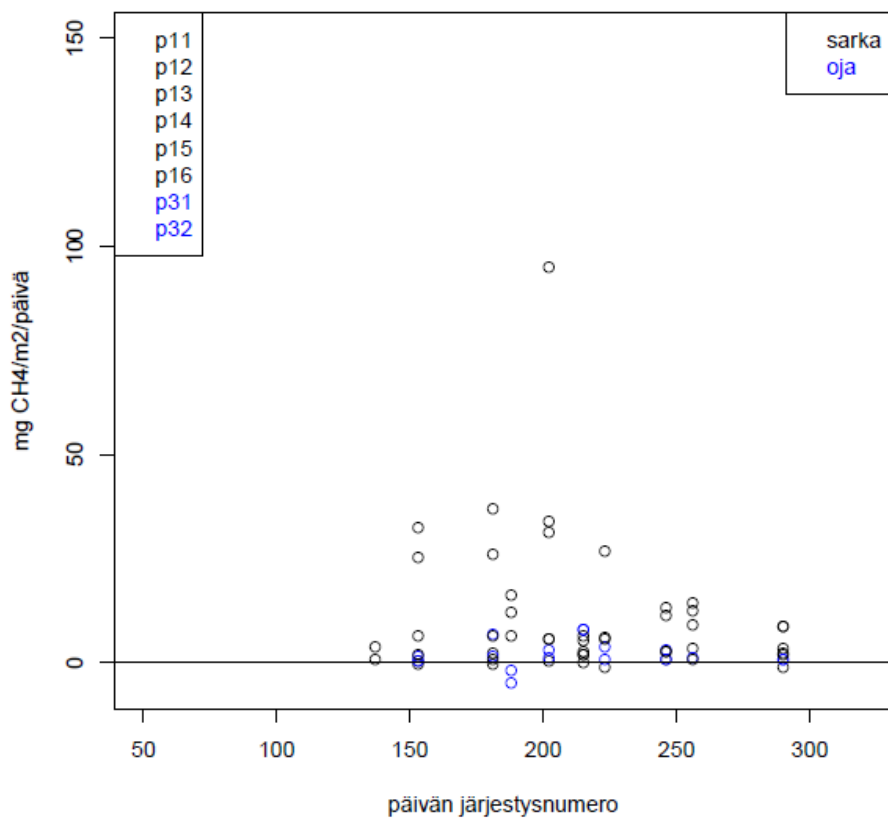
LylynnevaDR



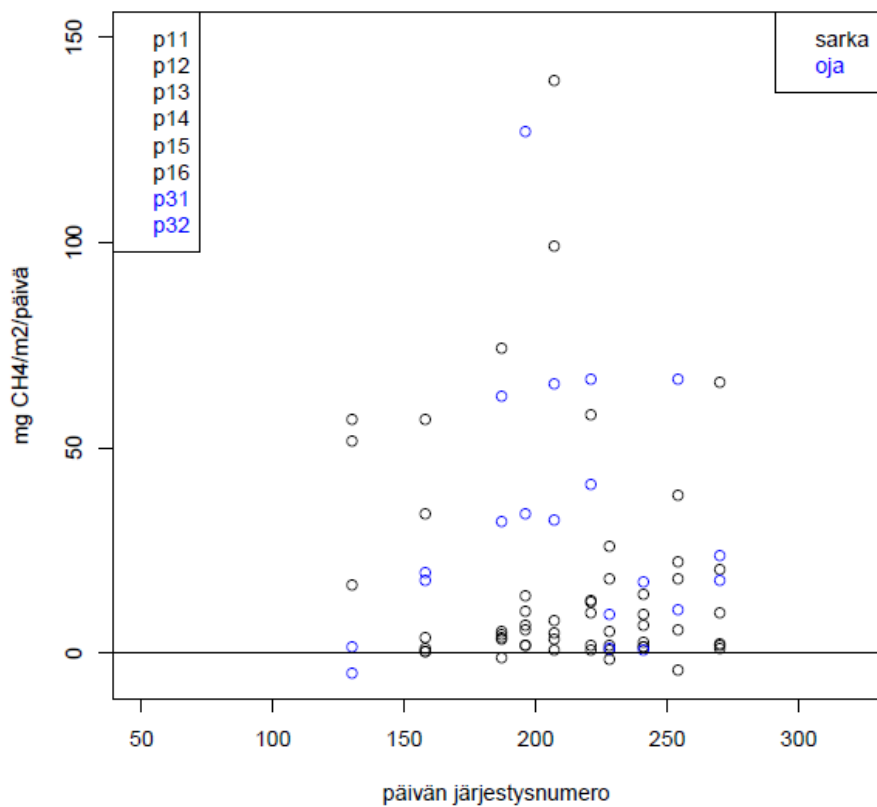
StormossenDR



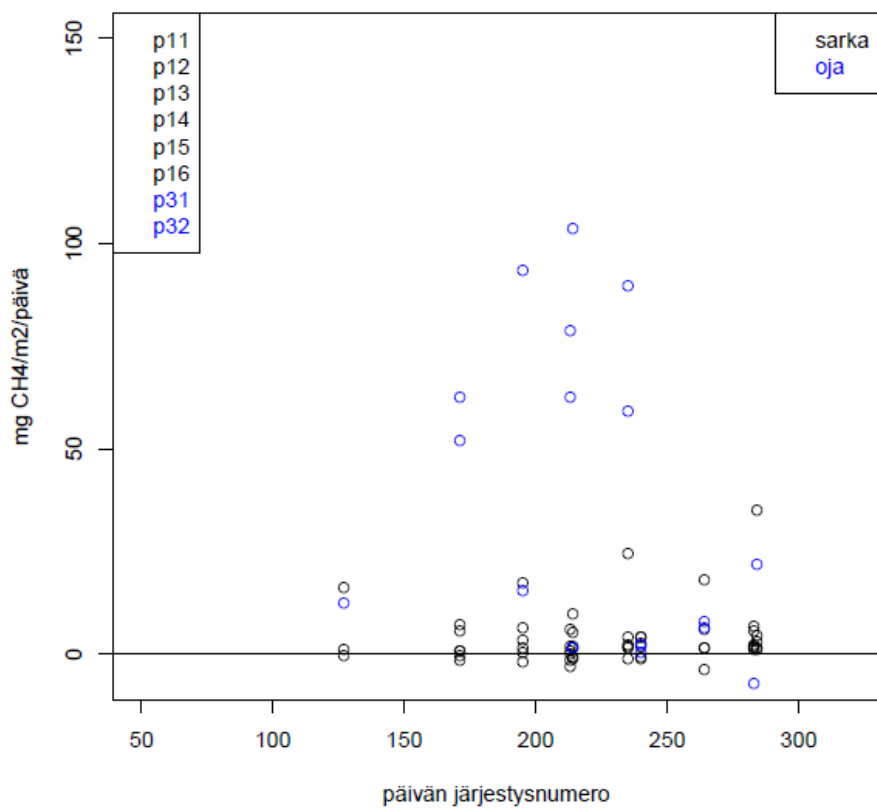
YlimysnevaDR



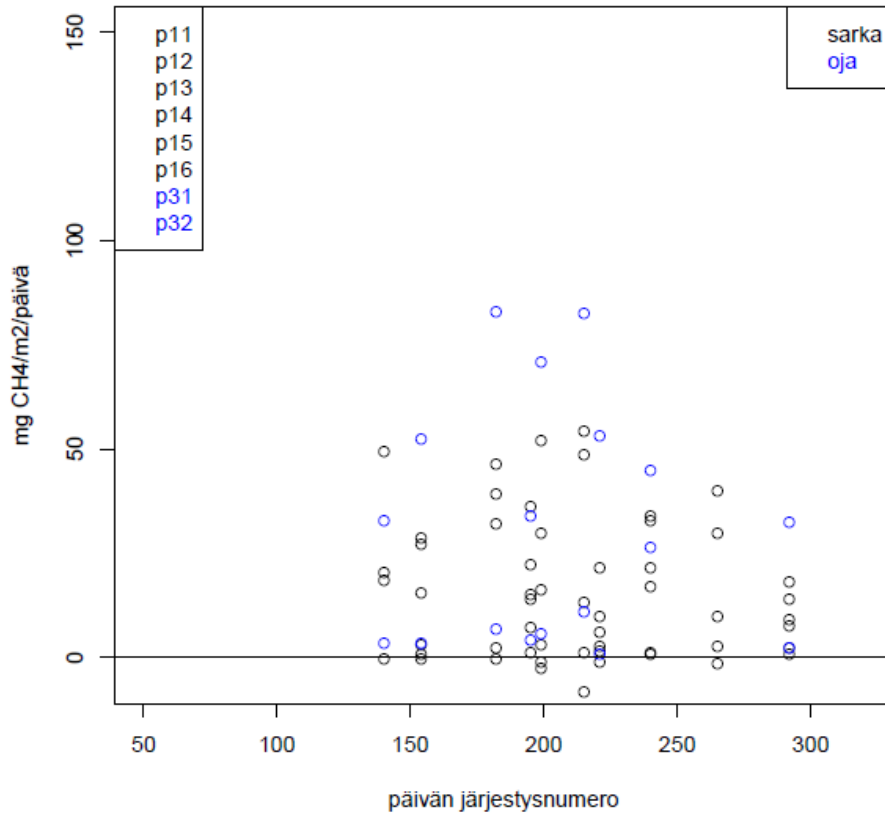
KauhanevaRE



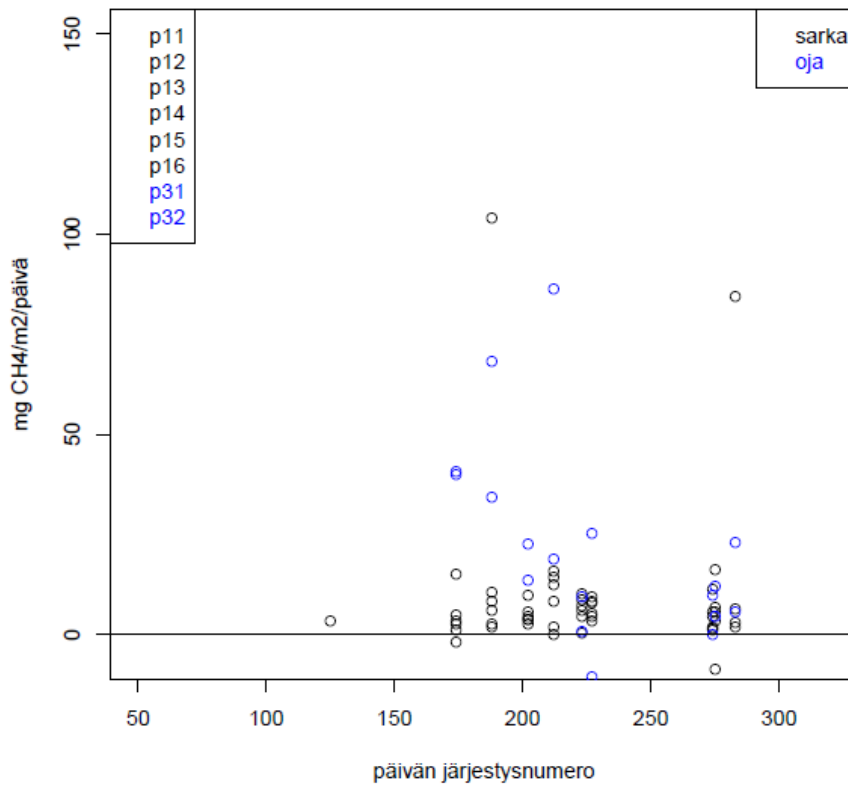
KonisaloRE



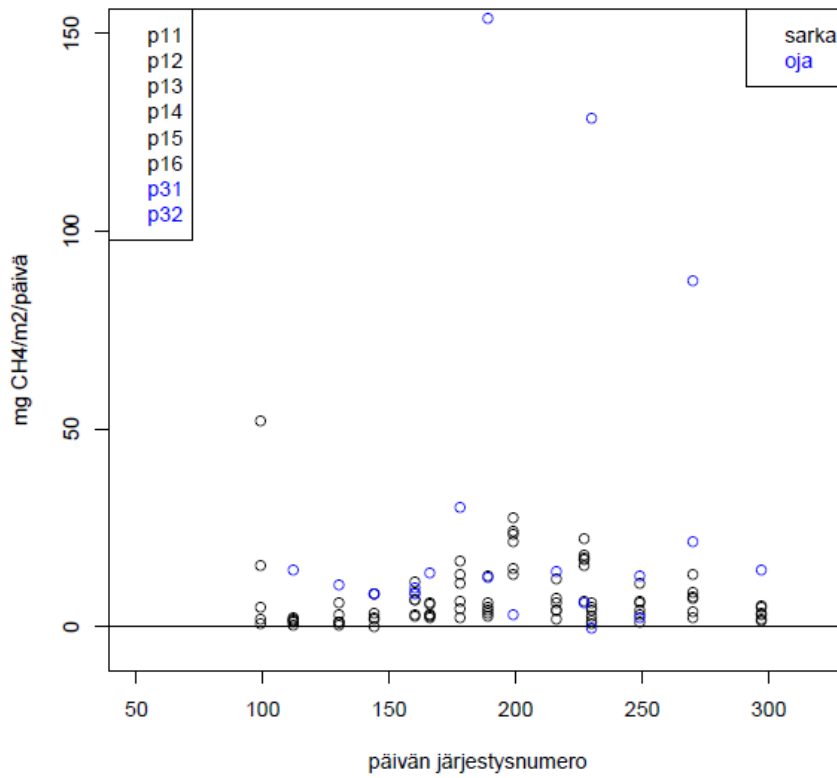
LylynnevaRE



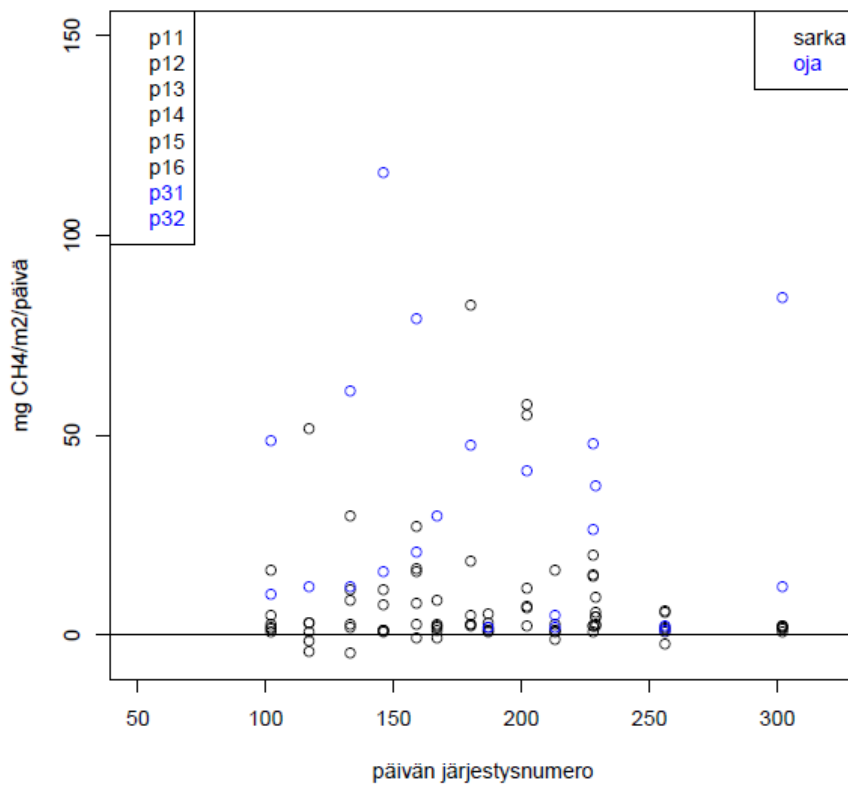
Musta-SoljanenRE



StormossenRE



Tervalamminsuore



TorransuoRE

