

HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

Metsittämisen vaikutus suonpohjan maahengitykseen ja metaanivuohon

Liisa Jokelainen

Maisterintutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Metsien ekologia ja käyttö

Joulukuu 2022

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution– Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä/Författare – Author			
Liisa Jokelainen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Metsittämisen vaikutus suonpohjan maahengitykseen ja metaanivuohon			
Oppiaine /Läroämne – Subject			
Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages	
Maisterintutkielma	Joulukuu 2022	49	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Lähivuosina turvetuotannosta vapautuu suuria määriä suonpohjia jälkikäyttöön. Suomessa metsittäminen on ollut yleisin suonpohjan jälkikäyttömuoto, mutta metsittämisen ilmastovaikutuksia tutkittu vain vähän. LULUCF-sektorilla pyritään lisäämään hiilinieluja ja hiilen varastoja muun muassa metsittämällä joutoalueita, kuten suonpohjia, kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia ja tuottaa tietoa metsittämisen vaikutuksesta suonpohjan maahengitykseen, eli hiilidioksidivuohon maasta ilmaan, sekä metaanivuohon.</p> <p>Metsittämisen vaikutusta tutkittiin viidellä eri suonpohjalla Pirkanmaan ja Etelä-Pohjanmaan alueella. Yhteensä 14 koealalla mitattiin CO₂- ja CH₄-voiden lisäksi pohjavedenpinnan tasoa (WT) sekä maan lämpötilaa 5 cm:n (T5) ja 30 cm:n (T30) syvyyksiltä kesällä ja syksyllä 2021. Kasvihuonekaasumittaukset tehtiin kammiomittausmenetelmällä kasvillisilta (Rtot) ja kasvittomilta (Rhet) mittauspisteiltä. Kokonaismaahengitystä mitattiin kasvillisilta pisteiltä ja heterotrofista hengitystä mitattiin kasvittomilta pisteiltä, joista oli katkottu juuriyhteydet sekä poistettu maanpäällinen kasvillisuus. Lisäksi koealoilta selvitettiin puuston ikä sekä turvekerroksen paksuus. Puuston iän sekä turvekerroksen paksuuden vaihtelu oli melko hyvin edustettuna valituilla koealoilla (0-57 v. ja 10-100+ cm).</p> <p>Kokonaismaahengityksen hetkelliset vuot vaihtelivat -39–1662 mg m⁻² h⁻¹ välillä ja koealakohtaiset keskiarvot olivat 58–694 mg m⁻² h⁻¹. Heterotrofisen hengityksen hetkelliset vuot vaihtelivat -39–836 mg m⁻² h⁻¹ välillä ja koealakohtaiset keskiarvot olivat 58–366 mg m⁻² h⁻¹. Maahengityksen määrä oli samankaltainen kuin aiemmissa suonpohjilta tehdyissä tutkimuksissa. Metsäojoitettuihin soihin verrattuna suonpohjien maahengitys oli hieman pienempää. Maan lämpötilat vaihtelivat mittausjakson aikana 0–25 °C:n välillä. Maan lämpötila vaikutti sekä kokonaismaahengitykseen että heterotrofiseen hengitykseen. Maan lämmitessä maahengityksen määrä kasvoi, mutta tietyn rajan jälkeen maahengitys väheni huomattavasti.</p> <p>Puuston ikä selitti parhaiten sekä kokonaismaahengitystä että heterotrofista hengitystä usean selittäjän regressiomallilla. Myös turpeen paksuus vaikutti maahengitykseen. Pohjavedenpinnan tasolla (WT) ei puolestaan ollut mallin mukaan vaikutusta suonpohjan maahengitykseen. Puuston ikä korreloi positiivisesti maahengityksen kanssa eli puuston ollessa iäkkäämpää maahengitys oli suurempaa. Turpeen paksuus korreloi negatiivisesti eli paksuturpeisilla koealoilla maahengitys oli pienempää.</p> <p>Kasvillisilta (Rtot) pisteiltä mitatut metaanin hetkelliset vuot vaihtelivat -0,148–1,206 mg m⁻² h⁻¹ välillä ja koealakohtaiset keskiarvot olivat -0,056–0,111 mg m⁻² h⁻¹. Kasvittomilta (Rhet) pisteiltä mitatut metaanin hetkelliset vuot vaihtelivat -0,077–0,111 mg m⁻² h⁻¹ ja koealakohtaiset keskiarvot olivat -0,34–0,111 mg m⁻² h⁻¹. Metsittämättömällä suonpohjalla avonaiset ojat aiheuttivat metaanipäästöjä. Ojien kasvihuonekaasupäästöjä mitattiin vain tällä yhdellä suonpohjalla. Puuston ikä ja turvekerroksen paksuus selittivät parhaiten myös suonpohjan metaanivuota usean selittäjän regressiomallilla. Pohjavedenpinnan tasolla (WT) ei ollut vaikutusta metaanivuohon. Metsittämättömät koealat toimivat metaanin lähteinä ja koealat, joilla oli varttunutta puustoa toimivat pääosin metaanin nieluina.</p> <p>Tämän tutkimuksen perusteella suonpohjan metsittäminen kasvattaa suonpohjan maahengitystä ja vähentää metaanipäästöjä. Metsittämisen kannattavuutta jälkikäyttömuotona ilmaston kannalta ei kuitenkaan voi päätellä näiden tulosten pohjalta. Lisää ekosysteemitason tutkimusta tarvitaan ilmastovaikutusten tarkempaa arviointia varten.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Suonpohja, maahengitys, metaanivuo, metsittäminen			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			
Ohjaajat:			
Vanhempi yliopistonlehtori Kari Minkkinen, Helsingin yliopisto			
Yliopistotutkija Paavo Ojanen, Helsingin yliopisto			
Erityisasiantuntija Kari Laasasenaho, Seinäjoen Ammattikorkeakoulu			

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO	4
1.1 Tausta	4
1.1.1 Suonpohjan metsittäminen	6
1.1.2 Suonpohjan maahengitys ja metaanivuo	8
1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	10
1.2.1 Tutkimuskysymykset ja hypoteesit	10
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	11
2.1 Tutkimusalue	11
2.2 Aineiston kerääminen	13
2.3 Aineiston laskenta ja analyysi.....	16
3. TULOKSET	19
3.1 Maahengitys suonpohjilla.....	19
3.1.1 Ajallinen vaihtelu	19
3.1.2 Paikallinen vaihtelu	21
3.1.3 Ympäristötekijöiden vaikutus suonpohjan maahengitykseen.....	23
3.2 Metaanivuo	28
3.2.1 Ajallinen vaihtelu	28
3.2.2 Paikallinen vaihtelu	30
3.2.3 Ympäristötekijöiden vaikutus suonpohjan metaanivuohon.....	31
4. TULOSTEN TARKASTELU	35
4.1 Maahengitys.....	35
4.2 Ympäristötekijöiden vaikutus maahengitykseen	37
4.3 Metaanivuo	39
5. PÄÄTELMÄT.....	41
6. LÄHTEET.....	43
LIITE 1	49

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

Turvetuotanto on ollut voimakkaassa muutoksessa viime aikoina, mikä on muuttanut turvetuotantoalueiden elinkaarta ja vapautumista jälkikäyttöön. Suomessa energiaturvetta on nostettu jo 1800-luvun loppupuolelta saakka, mutta tuotanto kasvoi huomattavasti 1970-luvun jälkeen (Lappalainen 1998). Energiaturpeen käyttö on kuitenkin merkittävästi vähenemässä vuoteen 2030 mennessä turpeen päästöoikeuden hinnan nousun sekä kansallisen turveverotuspäätöksen vuoksi (Valtioneuvosto 2019). Esimerkiksi Suomen suurin turvetuottaja Neova Oy ilmoitti lopettavansa jyrshinturpeen korjuun energiaksi vuoden 2021 lopussa (Neova Group 2021). Tästä johtuen suonpohjia vapautuu jälkikäyttöön suuria määriä lähivuosina. Suonpohjalla tarkoitetaan tässä työssä turvekenttää, jossa turpeen nosto on loppunut ja näin ollen poistunut turvetuotannosta.

Turpeen tuotantovaihe on perinteisesti kestänyt noin 15–30 vuotta (Salo ja Savolainen 2008). Viime vuosina aktiivisessa tuotantokäytössä on ollut noin 52000 hehtaaria turve- maata (AFRY 2020). 2010-luvun jälkeen tuotannosta on poistunut suonpohjia noin 2000–3500 hehtaarin vuosivauhtia (Aro ja Hytönen 2019, Työ- ja elinkeinoministeriö 2021). Loppuun asti käytettyjen tuotantoalueiden lisäksi tuotannosta on poistunut myös paksu- turpeisempia alueita, joilla turpeen nosto on aloitettu, mutta toiminta on jouduttu jättämään kesken.

Suot ja turvemaat sekä niiden käytön ympäristö- ja ilmastovaikutukset ovatkin herättäneet viime vuosina paljon keskustelua. Suomessa soita on ojitettu paljon metsä- ja maatalous- käyttöön sekä turpeen tuotantoon (Lappalainen 1998). Ojitetuilla alueilla kasvihuonekaa- supäästöt lähtökohtaisesti kasvavat, sillä turve hajoaa nopeammin kuivatuksen seurauk- sena verrattuna luonnontilaiseen suohon (Ojanen ym. 2020). Turvetuotantoon otetuista soista noin 75 % on ollut ennestään ojitettuja muuta käyttötarkoitusta varten (Selin 1999, Leinonen 2010). Aiemmin ojitetuilla, tuotantoon otetuilla alueilla joudutaan kuitenkin te- hostamaan kuivatusta vielä uusilla ojilla (Alakangas ym. 2011).

Hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja dityppioksidi (N₂O) ovat merkittävimmät ilmastoa lämmittävät kasvihuonekaasut. Kasvihuonekaasujen lämmitysvaikutusta voidaan vertailla, kun päästöt yhteismitallistetaan GWP-kertoimilla (Global Warming Potential) CO₂-ekvivalenteiksi (IPCC 2014, Ojanen ym. 2020). Viimeisen kahdenkymmenen vuoden ajalta noin 80 % Suomen kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä on peräisin hiilidioksidista (Tilastokeskus 2020). Vaikka metaani ja dityppioksidi ovat voimakkaampia kasvihuonekaasuja kuin hiilidioksidi, ne kuitenkin hajoavat ilmakehässä huomattavasti nopeammin (Ojanen ym. 2020). Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi pyritään lisäämään hiilinieluja ja hiilen varastoja muun muassa maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous -sektorilla (LULUCF) (Valtioneuvosto 2019). On esitetty, että metsäpinta-alaa ja siten hiilinieluja voidaan lisätä muun muassa metsittämällä maatalouskäytöstä sekä turvetuotannosta poistuneita alueita (Maa- ja metsätalousministeriö 2021).

Näiden joutoalueiden metsittämiselle on luotu uusi tukijärjestelmä, Joutoalueiden metsitystuki. Sen tarkoituksena on kannustaa yksityisiä maanomistajia metsittämään joutoalueita (Maa- ja metsätalousministeriö 2021). Joutoalueiden metsityspotentiaalia on tutkittu ”Peltoheitot ja suonpohjat metsittämällä hiilinieluiksi” -hankkeessa (Isoniemi 2021). Isoniemen (2021) mukaan potentiaalisia metsitettäviä suonpohjia löytyy ympäri Suomea, yhteensä noin 10 000 hehtaaria.

Vapautuvien suonpohjien jälkikäyttömuotojen ilmastovaikutukset vaikuttavat merkittävästi tulevaisuuden maankäytön suunnitteluun. Siksi aihetta on tarpeellista ja tärkeää tutkia. Metsitettyjä suonpohjia on tutkittu lähinnä lannoituksen vaikutuksen sekä puuntuotoksen näkökulmista (esim. Mikola 1975, Hytönen ym. 2018), mutta ilmastovaikutuksia on tutkittu melko vähän. Tässä tutkielmassa käsitellään metsittämisen vaikutusta turvetuotannosta poistettujen suonpohjien maahengitykseen eli hiilidioksidivuohon maasta ilmaan, sekä metaanivuohon. Hiilidioksidi- ja metaanivuot kuvaavat muun muassa hiilen siirtymistä maaperän ja ilmakehän välillä.

Tämä tutkielma liittyy Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamaan Metsät turvemaidilla – ratkaisuja päästöjen hillintään ja hiilinielujen kasvattamiseen (TURNEE) -hankkeeseen. Hankkeessa tutkitaan laajemmin maankäyttösektorin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämismahdollisuuksia. Tässä tutkielmassa käytettävä aineisto on kerätty TURNEE-hanketta varten perustetuilta koealoilta.

1.1.1 Suonpohjan metsittäminen

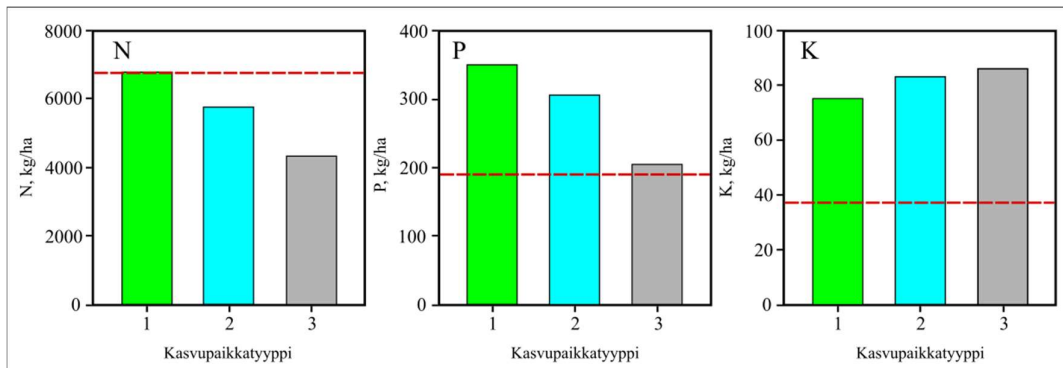
Turvetuotannon loputtua suonpohja siirtyy jälkihoitovaiheen kautta jälkikäyttöön. Jälkihoitovaiheessa turvetuottajan vastuulla on hoitaa alue maanomistajan kanssa sovittuun kuntoon. Tästä eteenpäin vastuu suonpohjasta siirtyy takaisin maanomistajalle (Selin 1999, Salo ja Savolainen 2008). Maanomistaja voi olla esimerkiksi turvetuottaja tai yksityishenkilö jolta suo on vuokrattu tuotantoon (Laasasenaho ym. 2017). Suonpohjille on olemassa useampia jälkikäyttömuotoja. Suonpohja voidaan esimerkiksi ennallistaa suoekosysteemiksi tai vettämällä muuttaa lintujärveksi tai kosteikoksi. Suonpohjaa voidaan myös käyttää peltoviljelyyn, tai se voidaan metsittää (Selin 1999). Suonpohjien metsittäminen on jälkikäyttömuodoista yleisin (Aro ja Hytönen 2019). Metsitys on valittu jälkikäyttömuodoksi jopa 75 %:lle suonpohjista (Bioenergia 2019). Maanomistajat ovat suosineet metsitystä sen taloudellisen tuottavuuden vuoksi (Laasasenaho ym. 2017).

Suonpohjalle jää tuotannon loputtua vaihtelevan paksuinen jäännösturve. Topografialtaan tasaiselta pohjalta turve on mahdollista korjata paikoitellen kokonaan. Kivisellä pohjalla jäännösturpeen paksuus voi olla jopa yli metrin (Kaunisto ja Aro 1998). Jos tuotanto on jäänyt kesken, turvetta voi olla jäljellä useita metrejä.

Metsittäminen sopii puuntuotoksen kannalta parhaiten suonpohjalle, jonka kuivatus on puiden kasvatukselle riittävä (pohjavesi vähintään 30 cm syvyydellä) ja jossa on vain ohut kerros (enintään 30 cm) jäännösturvetta (Aro ym. 1997, Kaunisto ja Aro 1998, Aro ja Hytönen 2019). Taimien juuret ylettävät helpommin kivennäismaahan ohuemman turvekerroksen läpi (Aro ym. 1997, Kaunisto ja Aro 1998). Jäännösturpeen alaisen kivennäismaan ominaisuuksien perusteella arvioituna metsittäminen sopii noin puolelle suonpohjista (Picken 2006).

Vaikka suonpohjille on mahdollista saada syntymään hyvinkin tuottava metsä (Salon ja Savolainen 2008, Aro ja Hytönen 2019), metsityksessä tulee huomioida kasvupaikan ominaisuudet, sillä suon pohjaosien jäännösturve on ominaisuuksiltaan hyvin erilaista kuin suon pintaturve (Aro ym. 1997). Jäännösturve on hyvin maatonutta ja tiivistä (Kaunisto ja Aro 1998). Lisäksi kivennäisravinteita on hyvin vähän suhteessa typen määrään (Kaunisto ja Aro 1998, Aro ja Hytönen 2019). Ojitettujen soiden pintaturpeeseen

verrattuna fosforin ja kaliumin määrä on huomattavasti vähäisempi, kun taas typpeä on runsaammin (Kuva 1) (Kaunisto ja Aro 1998, Aro ja Hytönen 2019).



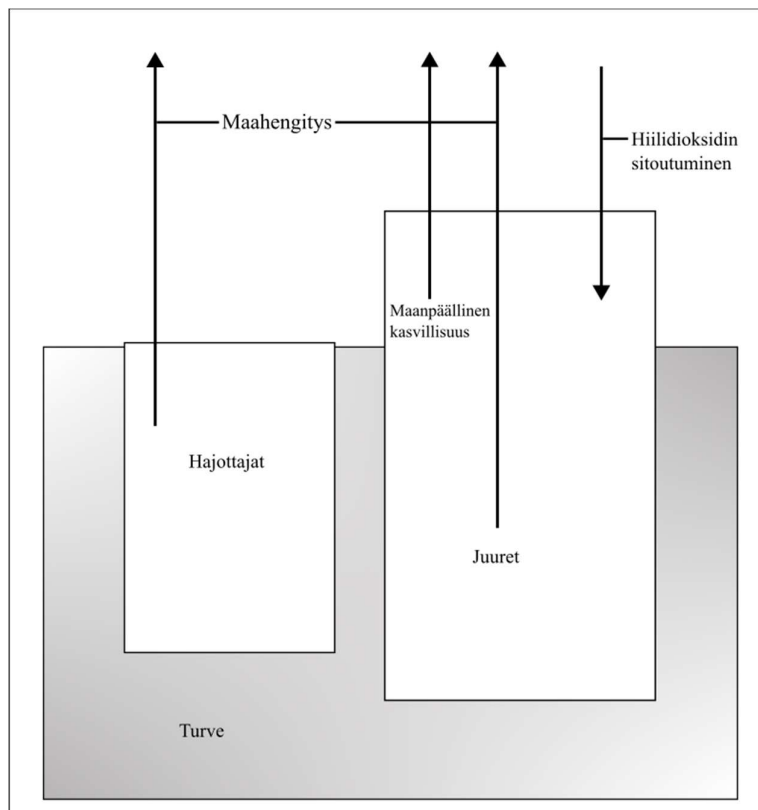
Kuva 1. Suonpohjan ravinnevarat (katkoviiva) metsäojitettujen soiden pintaturpeeseen verrattuna. Kuvassa eroteltuna typen (N), fosforin (P) sekä kaliumin (K) pitoisuudet. Suometsien ravinteisuustasot on merkitty numeroin (1 = ruohoinen/viljava, 2 = suursarainen/keskiravinteinen, 3 = piensarainen/niukkaraavinteinen). Lähde: Aro ja Hytönen 2019.

Kasvualustan kivennäisravinteiden vähäisyyden vuoksi metsitettävän suonpohjan lannoittaminen on usein tarpeellista (esim. Kaunisto ja Aro 1998, Aro ja Hytönen 2019). Lannoitus kannattaa tehdä kivennäisravinteilla metsittämisen alkuvaiheessa taimien kasvun turvaamiseksi (Aro ym. 1997). Suonpohjia on lannoitettu pääsääntöisesti puutuhkalla tai PK-lannoitteella (Aro ja Hytönen 2019). Taimien ravinteiden saantia voidaan helpottaa myös nostamalla pohjalla olevaa kivennäismaata istutuskohtiin (Aro ym. 1997, Kaunisto ja Aro 1998). Aro ja Kauniston (2003) mukaan ainakin paksuturpeisilla suonpohjilla jatkolannoitus on tarpeellinen hyvän puuntuotoksen kannalta.

Suonpohjien metsitykseen parhaiten soveltuvat puulajit ovat mänty sekä koivu. Rauduskoivu tosin vaatii erittäin hyvin kuivatetun, ohutturpeisen sekä pohjamaaltaan hienojakoisen kasvupaikan (Kaunisto ja Aro 1998, Aro ja Hytönen 2019). Suonpohjilla on mahdollista kasvattaa myös esimerkiksi pajua energiapuuksi. Sopivan puulajin valintaan vaikuttaa jäännösturpeen paksuus sekä ohutturpeisilla suonpohjilla lisäksi pohjamaalaji (Aro ja Hytönen 2019).

1.1.2 Suonpohjan maahengitys ja metaanivuo

Turvetta kerryttävät luonnontilaiset suot toimivat suurina hiilen varastoina (Ojanen ym. 2020). Hiiltä sitoutuu maaperään pintakasvillisuuden ja puuston fotosynteesissä sitoman hiilidioksidin kautta (kuva 2). Hiilidioksidia vapautuu takaisin ilmakehään maahengityksen kautta. Hiiltä poistuu myös huuhtoutumisen ja metaanivoiden kautta (Tuittila ja Komulainen 1995).



Kuva 2. Suoekosysteemin hiilidioksidivuot. Lähde: Tuittila ja Komulainen 1995, muokattu.

Maahengityksessä hiilidioksidia muodostuu sekä heterotrofisen että autotrofisen hengityksen kautta. Heterotrofinen hengitys syntyy turpeen ja muun orgaanisen aineen hajoamisesta. Autotrofinen hengitys syntyy kasvillisuuden hengityksestä (Tuittila ja Komulainen 1995). Heterotrofisen ja autotrofisen hengityksen mittaamisella voidaan selvittää maaperän kokonaismaahengityksen osuuksia, esimerkiksi kuinka suuri osuus suonpohjien maahengityksestä johtuu maaperän orgaanisen aineksen hajoamisesta. Mikäli kokonaismaahengityksestä suurin osa koostuu heterotrofisesta hengityksestä, se voi johtaa maaperän hiilivaraston vähenemiseen (Andrews ym. 1999).

Hapettomissa olosuhteissa orgaanisen aineksen hajoamisesta syntyy myös metaanipäästöjä. Ojittamattomat suot toimivatkin metaanin lähteinä (Ojanen ym. 2020). Ojituksen ja siten maaperän lisääntyneiden hapellisten olosuhteiden vuoksi metaanipäästöt vähenevät ojitusalueilta. Suonpohjat ovat turvetuotannon jäljiltä pääsääntöisesti tehokkaammin kuivattuja kuin metsäojitetut suot (Mäkiranta ym. 2007, Ojanen ym. 2020). Mäkirannan ym. (2007) tutkimuksen perusteella metsitetyt suonpohjat toimivat metaanin nieluina. Myös kasvittomalta suonpohjalta metaanipäästöt ovat hyvin vähäisiä (Tuittila ym. 2000). Metaanipäästöjä syntyy kuitenkin avonaisista ojista, joita on paljon varsinkin turvetuotantoalueilla (Ojanen ym. 2020).

Suon ojituksen myötä hapellisen turvekerroksen paksuus kasvaa. Hapellisissa oloissa turve hajoaa nopeammin ja hiilidioksidivuo ilmakehään kasvaa. Toisaalta myös hiilen sidonta ja kariketuotos maaperään kasvavat, selittäen suuren osan kasvavasta hiilidioksidivuosta (Ojanen ym. 2013). Silti metsäojitetuilla soilla hiilidioksidin nettopäästöt kasvavat vedenpinnan syvyyden kasvaessa (Ojanen ja Minkkinen 2020). Turvetuotantoalueilla tuotannon loputtua suonpohjilta on kuitenkin poistettu suuri osa suon alkuperäisestä turpeesta ja näin ollen hiilen varastosta (Ojanen ym. 2020). Lisäksi suonpohjilta puuttuu aluksi uutta hiiltä maaperään sitova kasvillisuus (Tuittila ja Komulainen 1995, Ojanen ym. 2020). Tämän vuoksi kasvittomien suonpohjien nettopäästöt ovat havaintojen mukaan olleet suuremmat kuin metsäojitetuilla soilla (Ojanen ym. 2020).

Suonpohjan kasvillisuuden kehittyessä sekä hiilen sitoutumisen että maahengityksen on todettu kasvavan. Tähän vaikuttavat kasvavan kasvillisuuden hiilensidonta sekä kasvillisuuden tuottama uusi karike maaperään (Tuittila ja Komulainen 1995, Mäkiranta ym. 2007). Näiden lisäksi hiilivoihin vaikuttavaksi tekijäksi on todettu suonpohjan lannoitus metsitysvaiheessa (Huotari ym. 2007, Mäkiranta ym. 2007). Tuhkalannoitus edistää puiden kasvua, mutta lisää myös muuta kasvillisuutta ja sen myötä kariketuotosta, maahengitystä sekä hiilensidontaa (Huotari ym. 2007). Mäkirannan ym. (2007) mukaan metsitetyn suonpohjan turpeen hajoamisesta johtuvat hiilidioksidivuotot ovat suuremmat kuin metsittämättömän ja kasvillisuudeltaan vähäisen suonpohjan (Tuittila ym. 1999, Mäkiranta ym. 2007). Metsityksen yhteydessä maahan lisätty lannoite todennäköisesti edistää hajotajamikrobien toimintaa ja siten myös orgaanisen aineksen hajoamista (Mäkiranta ym. 2007).

Maan lämpötilan sekä pohjavedenpinnan tason on todettu vaikuttavan merkittävästi sekä maahengitykseen että metaanivuohon turvemaidilla (Tuittila ja Komulainen 1995, Mäkiranta ym. 2007). Pohjavedenpinnan taso säätelee metaanin päästöjä ja heterotrofisesta hengityksestä johtuvia hiilidioksidipäästöjä. Turvemaidilla, joissa pohjavedenpinta on pysyvästi syvällä, merkittävin maahengitykseen vaikuttava tekijä on maan lämpötila (Tuittila ja Komulainen 1995, Mäkiranta ym. 2007). Maan lämmitessä orgaanisen aineksen hajoaminen nopeutuu, kun hajottajamikrobeilla on edulliset olosuhteet (Ojanen ym. 2020).

Metsitettyjen suonpohjien kasvihuonekaasupäästöihin liittyvät tutkimukset on suurimmaksi osaksi tehty Kihniön Aitonevalla. Maantieteellisesti laajemmalle tutkimukselle olisi tarve, jotta ilmastovaikutuksia voidaan arvioida tarkemmin. Näihin tarpeisiin tämä tutkielma pyrkii osaltaan vastaamaan.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

1.2.1 Tutkimuskysymykset ja hypoteesit

Työn tavoitteena on tuottaa tietoa suonpohjien metsittämisen vaikutuksesta suonpohjan maahengitykseen sekä metaanin virtoihin. Näin ollen tämä tutkielma pyrkii vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Kuinka suurta on maahengitys, eli hiilidioksidivuo maasta ilmaan, metsitetyillä suonpohjilla?
- Kuinka suuri on heterotrofisen hengityksen osuus hiilidioksidivuosta metsitetyillä suonpohjilla?
- Kasvaako maahengitys metsityksestä kuluvan ajan myötä?
- Miten tutkitut ympäristötekijät (puuston ikä, turvekerroksen paksuus, lämpötila ja pohjavedenpinnan korkeus) vaikuttavat maahengitykseen?
- Kuinka suuret ovat metaanin päästöt/nielut metsitetyillä suonpohjilla?

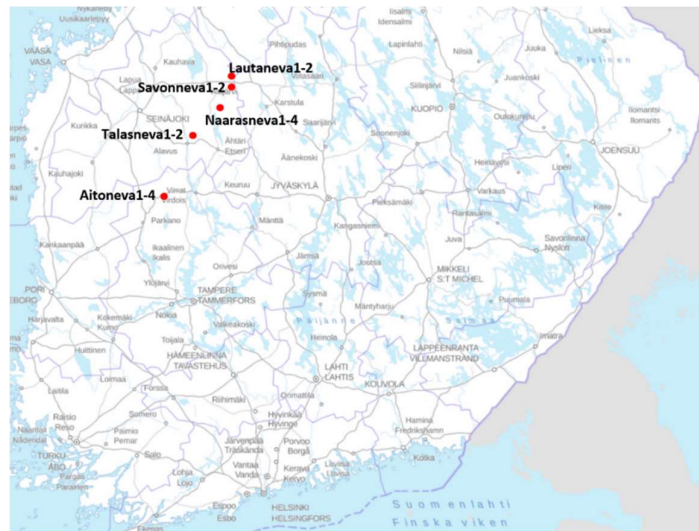
Hypoteesit:

- Suonpohjan heterotrofinen hengitys kasvaa metsityksen myötä (Mäkiranta ym. 2007).
- Metsitetyt suonpohjat toimivat metaanin nieluina (Mäkiranta ym. 2007, Ojanen ym. 2020).
- Maahengityksen suuruuteen vaikuttaa lämpötila, pohjavedenpinnan korkeus (Mäkiranta ym. 2007) sekä turpeen paksuus.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkimusalue

Tutkimusalueet sijoittuvat Etelä-Pohjanmaan ja Pirkanmaan alueelle (Kuva 3). Nämä maakunnat ovat olleet perinteisesti intensiivisiä turvetuotantoseutuja valtakunnallisesti (Laasasenaho ym. 2016). Kasvihuonekaasumittauksia tehtiin viidellä suonpohjalla, 14 koealalla kesällä ja syksyllä 2021. Tarkoituksena on tutkia ajallista ja paikallista vaihtelua suonpohjien välillä.



Kuva 3. Suonpohjien ja koealojen sijainnit. Kartta: Maanmittauslaitos, muokannut Liisa Jokelainen.

Valitut koealat vaihtelevat ominaisuuksiltaan (Taulukko 1). Suonpohjat on metsitetty eri aikoina, joten koealojen puustot ovat keskenään hyvin eri-ikäisiä. Lisäksi turvekerroksen paksuuden vaihtelu on melko hyvin edustettuna koealoilla. Turpeen paksuus vaihtelee koealoilla kymmenestä senttimetristä yli metriin. Koealat on valittu edustamaan puustoltaan eri ikäluokkia alle 10-vuotiaasta lähes 60-vuotiaaseen metsikköön. Puustoltaan eri-ikäisillä suonpohjilla saadaan tutkittua kuinka puuston ikä vaikuttaa kaasuvoihin. Soinessa sijaitsevalla Naarasnevalla suonpohjan metsitys tehtiin kesällä 2022. Näin ollen Naarasnevan koealoilta saatiin mitattua metsittämättömän suonpohjan kasvihuonekaasupäästöjä. Naarasnevalle pystytettiin myös jatkuvatoiminen kasvihuonekaasujen mittausasema kesällä 2021, josta saadaan ekosysteemitason mittausdataa useamman vuoden ajalta. Tässä tutkielmassa käytetään kuitenkin vain kammiomittauksilla kerättyä aineistoa.

Taulukko 1. Koealat ja niiden ominaisuudet.

Kunta	Koealat	Puulaji	Metsikön ikä, (v. 2021)	Lannoitukset	Turpeen paksuus, (cm)	Mittauspisteet, (Rtot + Rheta)
Kihniö	Aitoneva1	Mänty	34	PK (1987)	10	4 + 3
Kihniö	Aitoneva2	Mänty	34	PK (1987)	40	4 + 3
Kihniö	Aitoneva3	Mänty	57	NPK (1964) + PK (1975) + PK (1996)	50	4 + 3
Kihniö	Aitoneva4	Koivu	57	NPK (1964) + PK (1975) + PK (1996)	50	4 + 3
Alavus	Talasneva1	Mänty	28	Ei tiedossa	60	4 + 3
Alavus	Talasneva2	Mänty	23	Ei tiedossa	20	4 + 3
Alajärvi	Savonneva1	Mänty	4	Ei tiedossa	20	4 + 4
Alajärvi	Savonneva2	Mänty	4	Ei tiedossa	60	4 + 4
Alajärvi	Lautaneva1	Mänty	9	Ei tiedossa	60	6 + 6
Alajärvi	Lautaneva2	Mänty	9	Ei tiedossa	15	6 + 6
Soini	Naarasneva1		0	Lannoittamaton	100+	4 + 1 oja piste
Soini	Naarasneva2		0	Lannoittamaton	40	4 + 1 oja piste
Soini	Naarasneva3		0	Lannoittamaton	100+	4 + 1 oja piste
Soini	Naarasneva4		0	Lannoittamaton	80	4 + 1 oja piste

2.2 Aineiston kerääminen

Aineistoa kerättiin 14 koealalta, joilla oli yhteensä 102 mittauspistettä. Mittaukset tehtiin vuoden 2021 aikana kesäkuun ja syyskuun välillä noin kahden viikon välein ja loka-marraskuussa kerran kuukaudessa. Pirkanmaan Aitonevan koealalta mittauskertoja kertyi seitsemän ja Etelä-Pohjanmaan koealoilta yhdeksän.

Kasvihuonekaasujen mittaukseen käytettiin kammiomittausmenetelmää (Alm ym. 2007). Mittalaitteina käytettiin kannettavaa kasvihuonekaasuanalysaattoria sekä metallista läpinäkymätöntä kammiota (kuva 4). Etelä-Pohjanmaalla mittauksessa käytettiin LI-7810 -kaasuanalysaattoria (LI-COR) ja Aitonevalla LGR-ICOS™ M-GGA-918 -kaasuanalysaattoria (ABB). Kammiomittausmenetelmällä mitatessa kammio asetetaan tiiviisti noin 1 cm syvyiseen maahan uurrettuun uraan jokaisella mittauspisteellä. Kammiomittauksessa kasvihuonekaasut kulkevat imuletkuja pitkin kasvihuonekaasuanalysaattorin ja kammion välillä. Näin saadaan mitattua kammioon kertyneen kaasun koostumusta ennalta asetetun sulkuajan aikana (Alm ym. 2007). Mittauksissa sulkuajaksi valittiin kolme minuuttia. Aitonevan koealoilla sulkuaikaa lyhennettiin syksyllä kahteen minuuttiin päivänvalon vähenemisen vuoksi. Kammion sisälle on asennettu tuuletin, jotta kaasut eivät kerrostu kammiossa ja vääristä mittaustulosta. Kasvihuonekaasuanalysaattoreiden havaitsemia kaasupitoisuuksia (ppm) seurattiin älylaitteen näytöltä mittauksen yhteydessä. Jos mittauksessa esiintyi häiriöitä, mittaus keskeytettiin ja aloitettiin alusta. Kasvihuonekaasuista mitattiin sekä hiilidioksidia (CO₂) että metaania (CH₄). Osasta mittauspisteistä mitattiin kokonaishengitystä (R_{tot}) ja osasta heterotrofista hengitystä (R_{het}), joka kuvaa maaperän orgaanisen aineksen hajoamista (Taulukko 1). Mittausten tarkat tiedot merkittiin maastolomakkeeseen (LIITE 1) ja digitoitiin jälkikäteen.



Kuva 4. Kammiomittalaitteisto (LI-COR ja kammio) Lautanevan koealalla. Kammio on asetettu kasvittomaan mittauspisteeseen mittaamaan heterotrofista hengitystä. Kasvihuonekaasut kulkevat kammion ja kasvihuonekaasuanalyysaattorin väliin kiinnitettyjen letkujen avulla. Kuva: Kari Laasasenaho.

Heterotrofisen hengityksen mittausta varten puustoisimmilla koealoilla tehtiin noin 60 cm x 60 cm -kokoiset ruudut, joiden reunoille asennettiin juurikangas noin 50 cm:n syvyyteen. Näin mittauspisteestä saatiin katkaistua mahdolliset juuriyhteydet. Lautanevan koealoilla ruuduista tehtiin noin 120 cm x 120 cm -kokoiset ja näihin sijoitettiin aina kaksi mittauspistettä per ruutu. Kaikista mittauspisteistä, joilla mitattiin heterotrofista hengitystä kasvien maanpäälliset osat poistettiin perustamisvaiheessa. Lisäksi kasvillisuutta poistettiin aina tarvittaessa ennen mittausta. Kokonaishengitystä mitattiin pisteiltä, joissa kasvillisuus jätettiin koskemattomaksi.

Maan lämpötilaa mitattiin 5 cm:n ja 30 cm:n syvyyksiltä tallentavilla lämpömittareilla (Thermochron iButton, 1-Wire) (Kuva 5). Antureiden näytteenottiheydeksi asetettiin 120 min. Jokaiselle koealalle (pl. Naarasnevan koealat) asennettiin lämpötila-antureiden hajoamisen varalta kaksi lämpömittaria koealojen perustamisvaiheessa. Mittareiden

tallennuskapasiteetti on noin puoli vuotta kahden tunnin aikaresoluutiolla, minkä vuoksi mittarit vaihdettiin uusiin talven ajaksi.



Kuva 5. Puutikkuun liimatut lämpötila-anturit (Thermochron iButton). Ennen maahan asentamista, tikku ja napit suojattiin vedeltä kolmikerroksisella polyeteenisukalla ja ilmastointiteipillä. Kuva: Liisa Jokelainen.

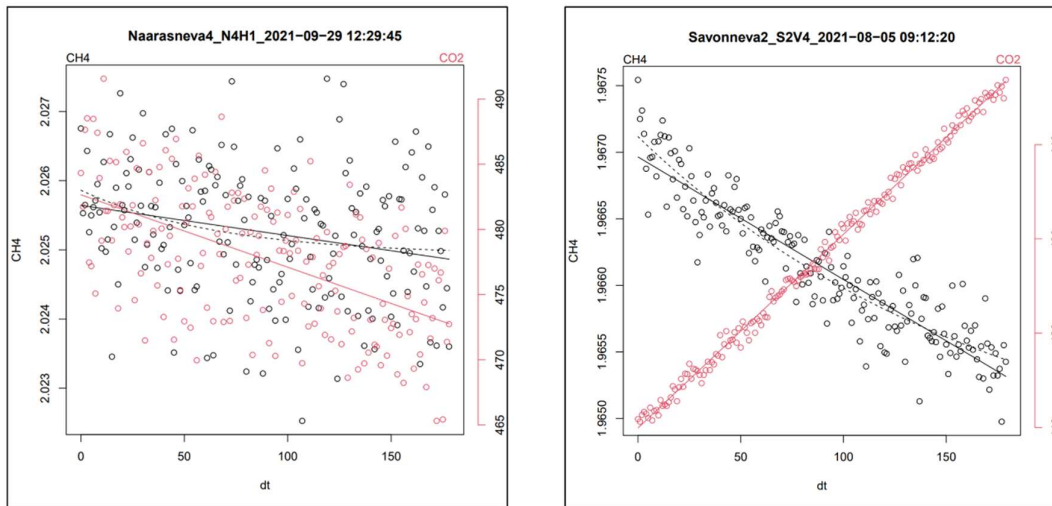
Maan lämpötilan lisäksi koeloilla mitattiin vedenpinnan korkeutta kapasitanssiin perustuvilla mittareilla (Odyssey Xtrem Capacitance Water Level Logger, Dataflow Systems Ltd). Mittarit asennettiin koaloille asetettuihin rei'itettyihin vesiputkiin, niin että niiden pohja ylettyi noin metrin syvyyteen. Pohjavesiputket sijoitettiin aina mahdollisimman keskelle koalaa. Ohutturpeisilla koaloilla vesiputki ylettyi turvekerroksen alapuolelle kivennäismaahan.

Lämpömittareiden tallentama data purettiin talvella mittausten päätyttyä tietokoneelle. Samoilla koaloilla olleiden mittareiden lämpötiloista laskettiin keskiarvot. Näistä keskiarvoista interpoloitiin lämpötilat 30 minuutin välein siihen. Pohjavedenpinnan korkeus tarkistettiin koaloilla (pl. Aitonevan koalat) kammiomittausten yhteydessä manuaalisesti elektronisella mittakepillä. Aitonevalle asennettujen etäluettavien pohjaveden pinnan korkeusmittareiden tallentama data purettiin mittausten päätyttyä tietokoneelle.

Keräsin aineiston itse työparini kanssa Pirkanmaan Aitonevan koaloilta. Etelä-Pohjanmaan koaloilta aineisto kerättiin Seinäjoen Ammattikorkeakoulun toimesta.

2.3 Aineiston laskenta ja analyysi

Digitoidut maastolomakkeet tarkistettiin ja tallennettiin CSV-muotoon. Jokaisesta yksittäisestä kammionmittauksesta piirrettiin kuvaaja R-ohjelmalla ja arvioitiin silmämääräisesti mittauksen laadun varmistamiseksi (Kuva 6). Mittauksen alusta ja lopusta poistettiin manuaalisesti mahdolliset kammion asettamisesta tai nostamisesta johtuvat häiriöt. Mikäli mittauksessa ei havaittu katkoksia tai muita esimerkiksi mittausvirheestä johtuvia häiriöitä mittaus hyväksyttiin mukaan aineistoon. Valmiilla R-koodilla kuvaajiin sovitettiin suorat. Suoran kulmakerroin määrittelee pitoisuuden muutosnopeuden mittaushetkellä (ppm/s).



Kuva 6. Esimerkkikuvat R-ohjelmalla tarkistetuista kammionmittauksista. Vasemmalla aineistosta liian korkean alkupitoisuuden vuoksi hylätty mittaus ja oikealla mukaan hyväksytty mittaus. Kuvissa havaitut CO₂- ja CH₄-pitoisuudet (ppm) ovat Naarasneva4- ja Savonneva2-koelaloilta kasvillisilta mittauspisteiltä (Rtot).

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä (Yhtälö 1) johdettiin yhtälö (Yhtälö 2) hetkellisten voiden (mg/s) laskemiseksi kaasun pitoisuuden muutosnopeudesta (ppm/s):

$$pV = n \cdot R \cdot T \quad (1),$$

$$m = M \cdot p \cdot (k \cdot V_k) / (R \cdot T) \quad (2),$$

jossa:

m = tutkittavan kaasun massan muutos (g/s)

M = tutkittavan kaasun moolimassa (CO₂: 44,0 g/mol, CH₄: 16,0 g/mol)

p = vakioitu ilmanpaine (101325 Pa)

k = konsentraation muutos (ppm/s)

V_k = kammion tilavuus (0,02217 m³)

R = kaasuvakio (8,314 J/K/mol)

T = lämpötila (K)

Hetkellinen vuo (mg/s) saadaan siis laskettua suoran kulmakertoimen, kammion tilavuuden, vakioidun ilmanpaineen sekä mittauksen aikaisen kammion sisälämpötilan avulla. R-ohjelmalla lasketut CO₂- ja CH₄-vuot jaettiin vielä mittauksessa käytetyn kammion pinta-alalla (0,0779 m²), jotta ne edustavat hetkellistä vuota neliometriä kohti. Tämän jälkeen vuot skaalattiin vastaamaan haluttua yksikköä eli tuntia (mg m⁻² h⁻¹) kohti. Kammion uppoaman mahdollista vaihtelua mittauspisteiden urissa ei huomioitu laskennassa.

Tässä vaiheessa aineistosta hylättiin neljä mittausta. Kolme mittausta hylättiin epätavallisen suuren negatiivisen CO₂-vuon takia. Pienet negatiiviset vuot hyväksyttiin mukaan aineistoon, sillä ne johtuivat todennäköisesti mittalaitteen epätarkkuudesta. Yksi mittaus hylättiin poikkeuksellisen suuren CO₂-vuon takia. Vuo oli moninkertainen muihin samalta mittauspisteeltä saatuihin voihin verrattuna. Näissä aineistosta poistetuissa mittauksissa hiilidioksidin alkupitoisuus oli merkittävästi suurempi kuin muissa saman mittauspäivän mittauksissa (Kuva 6). Tämä johtuu todennäköisesti epäonnistuneesta mittauksesta, jossa mittaja on epähuomiossa hengittänyt kammioon juuri ennen mittausta ja sen vuoksi kammion kaasupitoisuus oli valmiiksi korkea.

Tutkimusaineiston analyysissä tarkasteltiin hetkellisiä CO₂- ja CH₄-voita sekä näistä laskettuja koealakohtaisia keskiarvoja. Tutkituista ympäristötekijöistä maan lämpötilan (T5 ja T30) sekä pohjavedenpinnan tason (WT) vaikutuksen analysoinnissa tarkasteltiin koealakohtaisten keskiarvojen lisäksi hetkellisiä havaintoja. Mittausajankohtia vastaavat maan lämpötilat poimittiin puolen tunnin välein interpoloidusta aineistosta. Naarasnevan koealojen mittauspisteet luokiteltiin analyysissä R_{tot}-pisteiksi, vaikka koealojen kokonaismaahengitys koostui mittausten aikana kasvillisuuden puuttuessa käytännössä vain heterotrofisesta hengityksestä. Naarasnevan oja pisteiden CH₄-voita tarkasteltiin koealakohtaisesti oja pisteiden kuukausittaisten keskiarvojen perusteella. Saaduista tuloksista piirrettiin kuvaajat Microsoft Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

Pohjavedenpinnan tasoa tutkittiin aikavälillä 7.7.-9.9.2021. Tällä aikavälillä kaikilta koealoilta oli saatavissa vertailukelpoista aineistoa pohjavedenpinnan tasosta. Aitonevan koealoilla aineisto perustuu pohjaveden pinnankorkeusmittarin tallentamiin lukemiin. Muilla koealoilla aineisto koostuu manuaalimittauksista, jotka tehtiin elektronisella mittakepillä pinnankorkeusmittareita varten asennetuista vesiputkista. Sekä pinnankorkeusmittarin lukemista että manuaalimittauksista on vähennetty vesiputken maanpäällisen osan korkeus, jotta saatiin oikea pohjavedenpinnan taso. Laskentaa ja tilastollista analyysia varten tyhjän putken havainnot muutettiin lukuarvoiksi. Pohjavedenpinnan arvioitiin olleen 10 cm syvemmällä kuin maahan upotetun vesiputken pohja.

Tilastollinen analyysi suoritettiin SPSS-ohjelmalla (IBM SPSS Statistics). Tutkittujen ympäristötekijöiden (puuston ikä, turvekerroksen paksuus ja pohjavedenpinnan taso) vaikutusta suonpohjan maahengitykseen sekä metaanivuohon analysoitiin usean selittäjän regressiomallilla. Tutkituista ympäristötekijöistä maan lämpötila jätettiin pois tilastollisesta analyysistä. Lämpötilan vaihtelu on suurelta osin ajallista eikä paikallista, joten koealakohtaiset keskiarvot eivät toimi yksinkertaisessa regressioanalyysissä. Tilastollisessa analyysissä käytettiin lineaarista regressioanalyysia sekä varianssianalyysia (ANOVA).

Lineaarilla regressioanalyysillä analysoitiin puuston iän, turvekerroksen paksuuden sekä pohjavedenpinnan tason (WT) vaikutusta kokonismaahengitykseen, heterotrofiseen hengitykseen ja metaanivuohon. Edellä mainitut ympäristötekijät olivat regressioanalyysissä suhteasteikollisia selittäviä muuttujia.

Lineaarisen regressioanalyysin lisäksi käytettiin varianssianalyysia (ANOVA) selvittämään, onko puuston eri kehitysluokilla merkitystä suonpohjan maahengitykseen. Varianssianalyysia varten luotiin kehitysluokat puuston iän perusteella (Taulukko 1): puuton, taimikko ja varttunut. Puuton-luokkaan sisältyi Naarasnevan metsittämätön suonpohja. Taimikko-luokkaan sisältyi kaksi suonpohjaa, joilla puusto oli neljä- ja yhdeksänvuotia (v. 2021). Varttunut-luokkaan sisältyi myös kaksi suonpohjaa, joilla oli 23-, 28-, 34- ja 57-vuotia puustoa. Näiden ryhmien välisiä eroja tarkasteltiin Tukeyn testin avulla.

3. TULOKSET

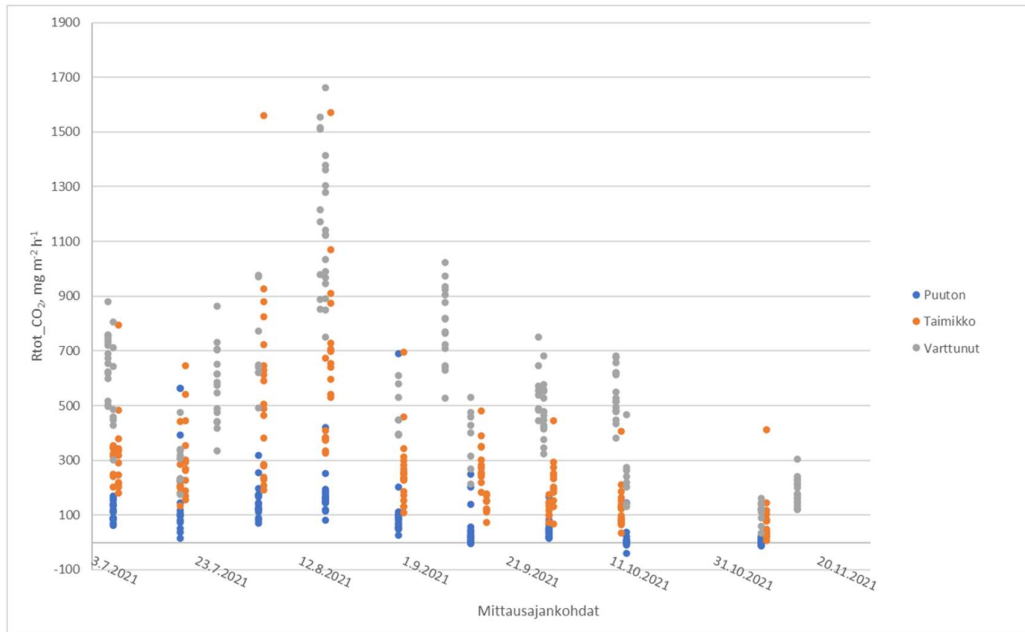
3.1 Maahengitys suonpohjilla

3.1.1 Ajallinen vaihtelu

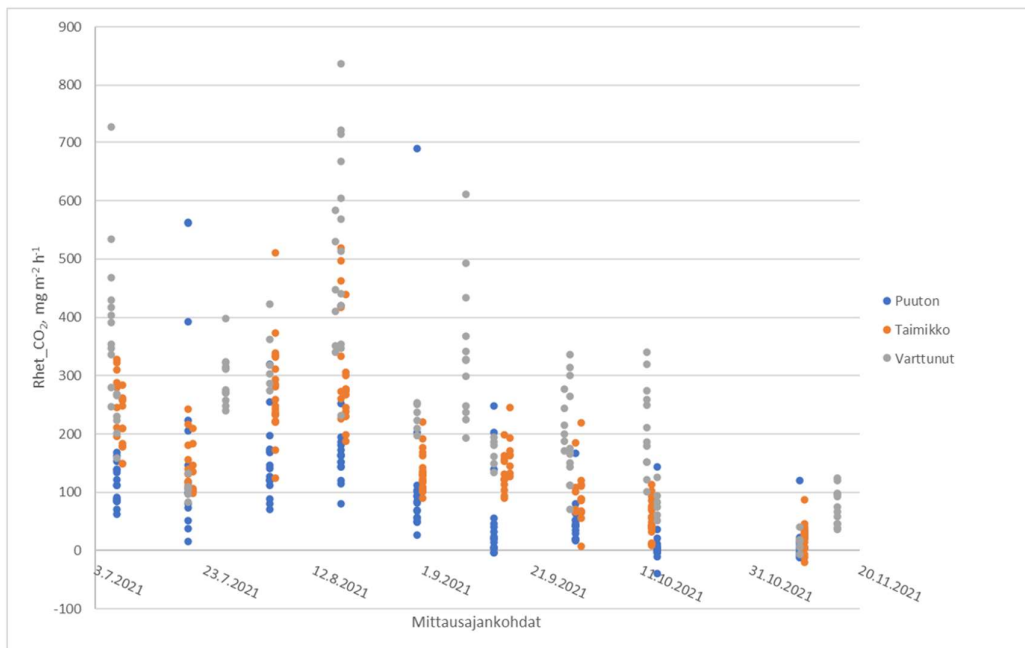
Kuvassa seitsemän on esitetty sekä kokonaismaahengityksen (R_{tot}) että heterotrofisen (R_{het}) hengityksen määrä mittauskauden (heinäkuu-marraskuu) aikana. Hetkelliset vuot olivat suurimmat elokuussa ja pienimmät marraskuussa. Maahengityksen määrä oli suurin suonpohjilla, joilla oli varttunutta metsikköä. Vähäisintä maahengitys oli puuttomalla suonpohjalla.

Kokonaismaahengityksen hetkelliset vuot vaihtelivat $-39-1662 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ välillä (Kuva 7). Puuttomalla Naarasnevalla hetkelliset vuot olivat $-39-690 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Taimikkoisilla koealoilla kokonaishengityksen määrä vaihteli $8-1572 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ välillä ja varttuneissa metsiköissä $35-1662 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ välillä. Heterotrofisen hengityksen hetkelliset vuot olivat taimikkoisilla koealoilla $-21-518 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Koealoilla, joilla metsikkö oli varttunutta, hetkelliset vuot olivat $-6-836 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

a)



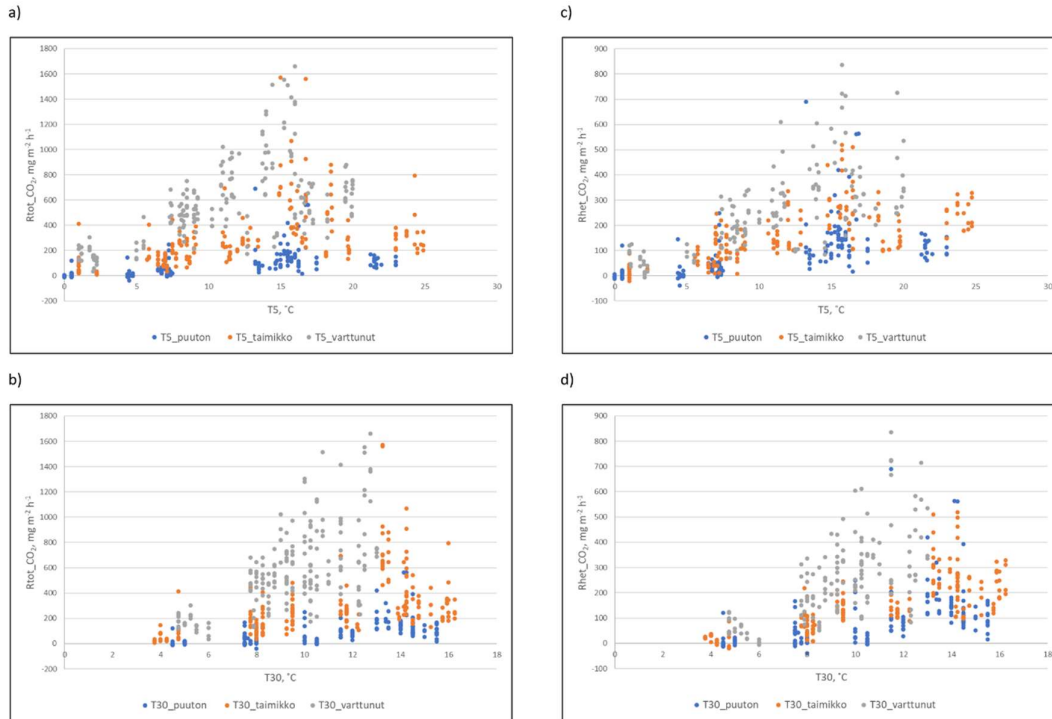
b)



Kuva 7. a) Kokonaismaahengityksen sekä b) heterotrofisen hengityksen hetkelliset vuot ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) mittauskauden ajalta.

Maan lämpötila 5 cm:n syvyydellä vaihteli mittauskauden aikana noin 0–25 °C:n välillä (Kuva 8). 30 cm:n syvyydellä lämpötilan vaihtelu oli pienempää, noin 4–16 °C. Maan lämmitessä sekä kokonaismaahengityksen (R_{tot}) että heterotrofisen hengityksen (R_{het}) hetkelliset vuot kasvavat melko lineaarisesti, mutta vain tiettyyn rajaan asti. Tämän

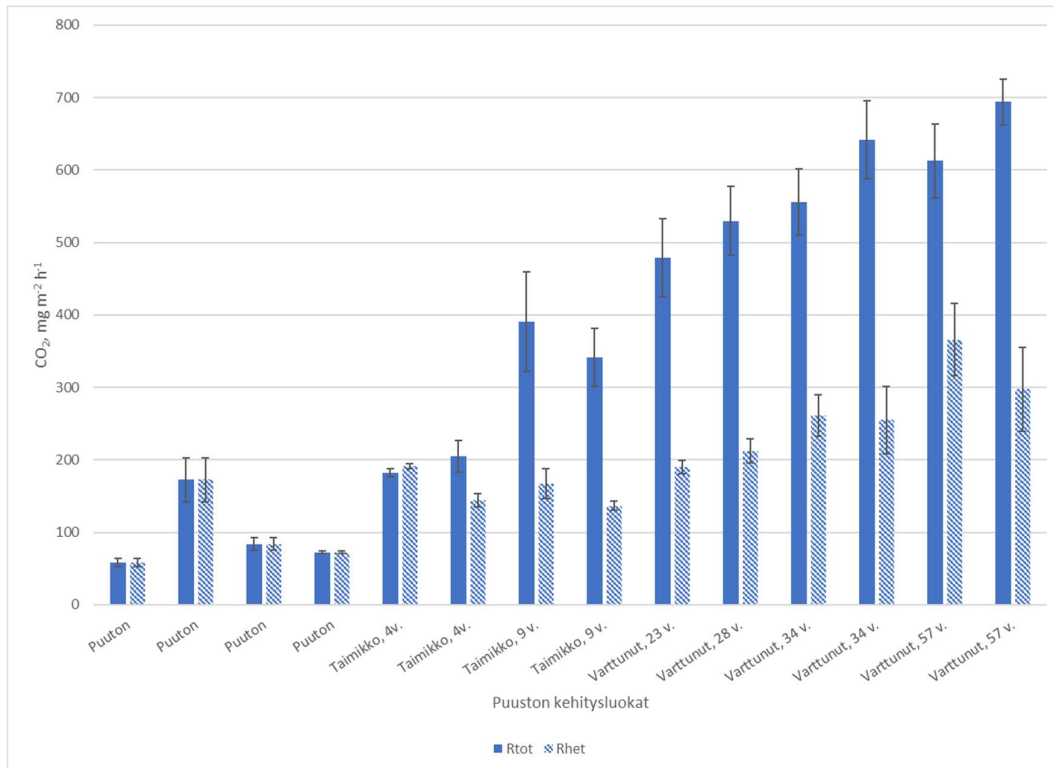
jälkeen maahengitys vähenee huomattavasti. Ilmiö toistuu sekä 5 että 30 cm:n syvyyksillä, tosin lievemmin 30 cm:n syvyydellä. Korkeimmat lämpötilat on mitattu taimikkosilta ja puuttomilta koealoilta.



Kuva 8. Maan lämpötilan vaikutus suonpohjan hetkelliseen maahengitykseen ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) 5 cm:n ja 30 cm:n (T5 ja T30) syvyyksillä. a-b) T5:n ja T30:n vaikutus kokonaismaahengitykseen (R_{tot}), c-d) T5:n ja T30:n vaikutus heterotrofiseen hengitykseen (R_{het}). Kuvaajissa on käytetty maan lämpötilan kaikkia havaintoja mittauskauden ajalta.

3.1.2 Paikallinen vaihtelu

Maahengityksen määrä vaihteli suuresti eri suonpohjilla koealakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa (Kuva 9). Koealakohtaisten keskiarvojen perusteella kokonaismaahengitys oli vähäisintä Naarasneva1-koealalla ($58 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) ja suurimmillaan Aitoneva4-koealalla ($694 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) (Taulukko 2). Puuttomalla Naarasnevalla kokonaismaahengityksen määrä oli $58\text{--}172 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Suonpohjilla, joilla puusto oli nuorta, kokonaismaahengitys oli $182\text{--}391 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Suonpohjilla, joilla metsikkö oli varttuneempaa, kokonaismaahengitys oli $479\text{--}694 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Heterotrofisen hengityksen määrä oli taimikkosilla suonpohjilla $137\text{--}191 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Varttuneemmissa metsiköissä heterotrofisen hengityksen määrä oli $191\text{--}366 \text{ mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Tästä voidaan päätellä, että maahengitys kasvaa metsityksestä kuluvan ajan myötä.



Kuva 9. Maahengityksen ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) koealakohtaiset keskiarvot tutkituilla suonpohjilla. Virhepalkit kuvaajassa osoittavat keskivirhettä.

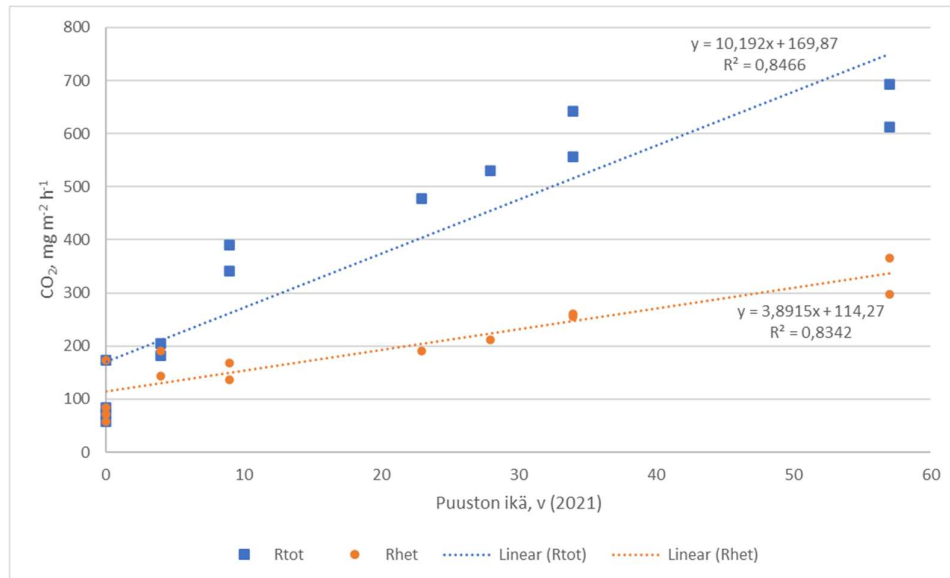
Metsitetyillä suonpohjilla heterotrofisen hengityksen osuus kokonismaahengityksestä vaihteli jonkin verran. Puuttomalla Naarasnevalle maahengitys koostui vain orgaanisen aineksen hajoamisesta, joten sen osuus kokonismaahengityksestä oli 100 % (Taulukko 2). Myös Savonneva1 -koealalla (4 v. taimikko) heterotrofisen hengityksen osuus oli noin 100 %. Savonneva2 -koealalla osuus oli noin 70 %. Myös Aitoneva3 -koealalla heterotrofisen hengityksen osuus kokonismaahengityksestä oli kohtalaisen suuri eli noin 60 %. Lopuilla koealoilla osuus oli noin 40 %. Tämän aineiston perusteella heterotrofisen hengityksen osuus kokonismaahengityksestä vähenee metsityksestä kuluvan ajan myötä eli varttuneissa metsiköissä maahengitys koostuu suurimmaksi osaksi puiden ja muun kasvillisuuden hengityksestä.

Taulukko 2. Kokonaismaahengityksen (R_{tot}) ja heterotrofisen hengityksen (R_{het}) koealakohtaiset keskiarvot (mg m⁻² h⁻¹). Viimeisessä sarakkeessa on laskettu koealojen heterotrofisen hengityksen %-osuus kokonaismaahengityksestä.

Koealat	CO ₂ , R _{tot} (mg m ⁻² h ⁻¹)	CO ₂ , R _{het} (mg m ⁻² h ⁻¹)	Osuus, R _{het} (%)
Naarasneva1	58	58	100
Naarasneva2	172	172	100
Naarasneva3	84	84	100
Naarasneva4	72	72	100
Savonneva1	182	191	105
Savonneva2	205	144	70
Lautaneva1	391	167	43
Lautaneva2	342	137	40
Talasneva1	530	212	40
Talasneva2	479	191	40
Aitoneva1	556	261	47
Aitoneva2	642	255	40
Aitoneva3	612	366	60
Aitoneva4	694	298	43

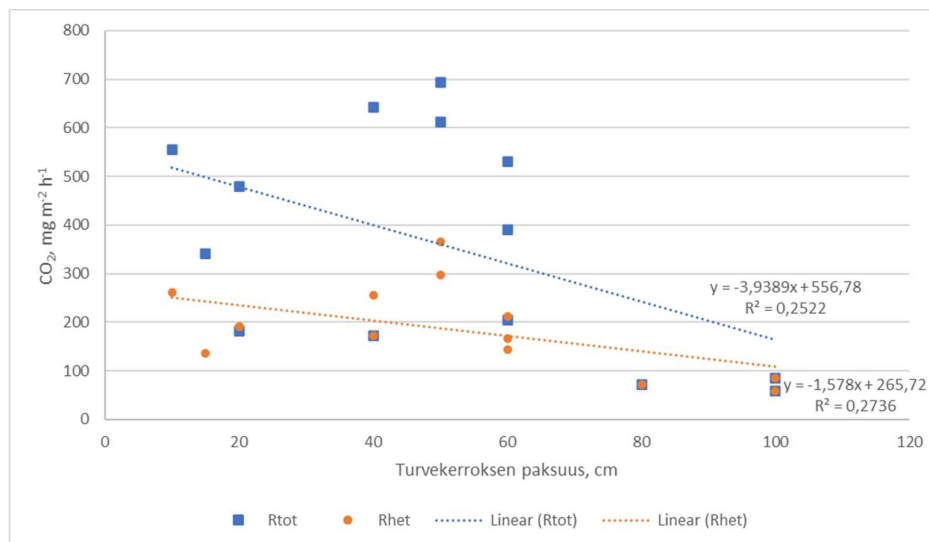
3.1.3 Ympäristötekijöiden vaikutus suonpohjan maahengitykseen

Kuvassa 10 on tarkasteltu puuston iän vaikutusta suonpohjan kokonaismaahengitykseen (R_{tot}) sekä heterotrofiseen hengitykseen (R_{het}). Puuston ikä korreloi positiivisesti maahengityksen kanssa eli puuston ollessa iäkkäämpää myös maahengitys on suurempaa.



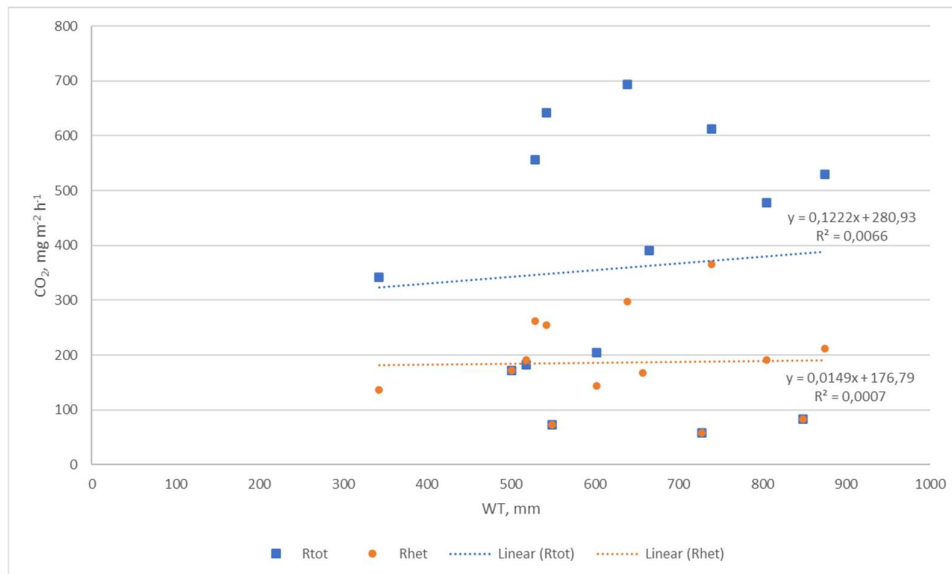
Kuva 10. Puuston iän vaikutus suonpohjan maahengitykseen ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). CO₂-vuot ovat koealakohtaisia keskiarvoja.

Kuvassa 11 näkyy suonpohjan turvekerroksen paksuuden vaikutus sekä kokonaismaahengitykseen (R_{tot}) että heterotrofiseen hengitykseen (R_{het}). Korrelaatio näiden muuttujien välillä on negatiivinen eli mitä paksumpi turvekerros on, sitä pienempää on maahengitys. Koealat, joissa on paksuin turvekerros sekä pienin maahengitys, sijaitsevat puuttomalla Naarasnevalla. Paksuturpeisille koealoille ei siis ollut tässä aineistossa puustollista verrokkia.



Kuva 11. Turvekerroksen paksuuden vaikutus suonpohjan maahengitykseen ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). CO₂-vuot ovat koealakohtaisia keskiarvoja.

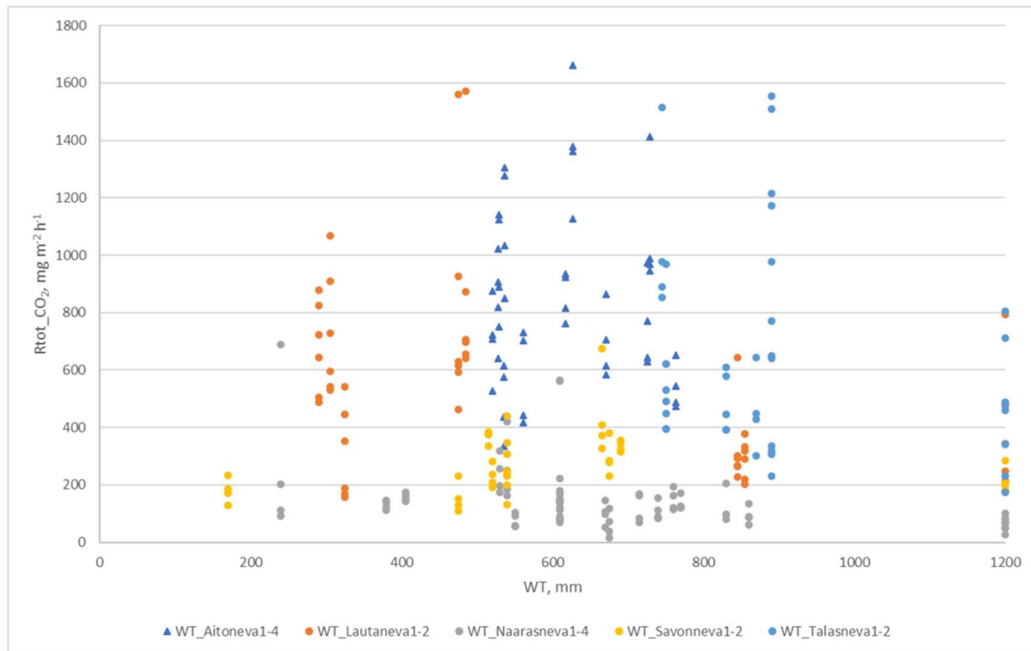
Kuvassa 12 on havainnollistettu pohjavedenpinnan tason (WT) vaikutus suonpohjan kokonaismaahengitykseen (Rtot) sekä heterotrofiseen hengitykseen (Rhet). Koealakohtaisten keskiarvojen perusteella kokonaismaahengityksen määrä vaikuttaa kasvavan hieman pohjavedenpinnan aletessa. Heterotrofisen hengityksen ja pohjavedenpinnan tason välillä ei vaikuta olevan yhteyttä.



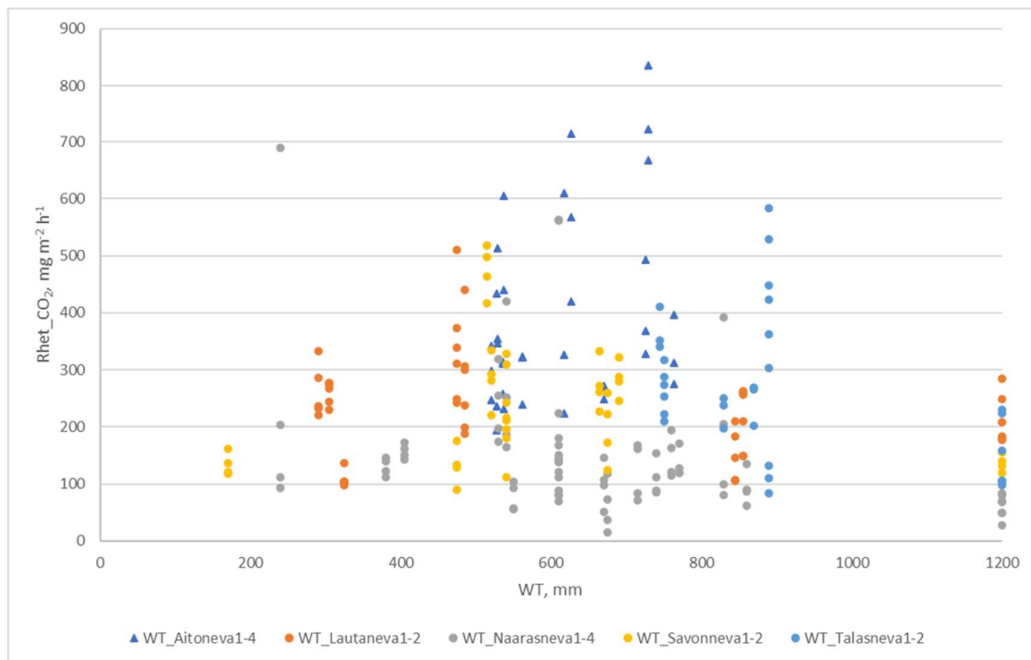
Kuva 12. Pohjavedenpinnan tason (WT) vaikutus suonpohjan maahengitykseen ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). CO_2 -vuot vedenpinnan syvyydet ovat koealakohtaisia keskiarvoja. Pohjavedenpinnan tason (WT) koealakohtaiset keskiarvot ovat aikaväliltä 7.7.-9.9.2021.

Hetkittäisten hiilidioksidivoiden ajallista vaihtelua tarkasteltaessa (Kuva 13) voi kuitenkin havaita, että pohjavedenpinnan tasolla on vaikutus suonpohjan maahengitykseen. Pohjavedenpinnan aletessa sekä kokonaismaahengitys (Rtot) että heterotrofinen hengitys (Rhet) kasvaa melko lineaarisesti. Kuitenkin pohjavedenpinnan syventyessä yli 60 cm syvyydelle maahengitys alkaa taas vähentyä. Samankaltainen trendi on nähtävissä myös yksittäisten suonpohjien havainnoissa. Pohjavedenpinta oli havaintojen mukaan korkein puuttomalla Naarasnevalla sekä taimikkaisilla suonpohjilla (Lautaneva ja Savonneva). Suonpohjilla, joilla on varttuneempaa puustoa (Talasneva ja Aitoneva), pohjavedenpinta oli matalammalla. Tyhjän putken havaintoja oli tutkitulla aikavälillä eniten Naarasnevalla ja Talasnevalla.

a)



b)



Kuva 13. Pohjavedenpinnan tason (WT) vaikutus suonpohjan hetkelliseen a) kokonaismaahengitykseen (R_{tot}) ja b) heterotrofiseen hengitykseen (R_{het}) ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Suonpohjat on kuvaajissa merkitty eri väreihin. Kolmiolla merkityt havainnot on mitattu koealalle asennetulla jatkuvatoimisella pohjaveden pinnankorkeusmittarilla. Ympyrällä merkityt havainnot on mitattu manuaalisesti elektronisella mittakepillä koealalle asennetusta vesiputkesta. Kuvaajissa on käytetty pohjavedenpinnan tason kaikkia havaintoja aikaväliltä 7.7.-9.9.2021. Poikkeuksellisesti tyhjän putken havainnot on merkitty arvolle 1200 mm, jotta ne erottuisivat muista havainnoista.

Puuston iän, turvekerroksen paksuuden ja pohjavedenpinnan tason vaikutusta suonpohjan kokonaismaahengityksen (R_{tot}) sekä heterotrofisen hengityksen (R_{het}) koealakohtaisiin keskiarvoihin mallinnettiin usean selittäjän regressiomallilla (Yhtälö 3):

$$R = a + b \cdot P + c \cdot T + d \cdot WT \quad (3),$$

jossa:

R = maahengitys (R_{tot} tai R_{het})

a = vakio

b = puuston iän kerroin

c = turpeen paksuuden kerroin

d = pohjavedenpinnan tason (WT) kerroin

P = puuston ikä, v. 2021

T = turpeen paksuus, cm

WT = pohjavedenpinnan taso (WT), mm

Sekä kokonaismaahengityksen että heterotrofisen hengityksen osalta mallin selitysaste oli hyvin korkea (0,90 ja 0,89). Mallilla pystyttiin siis selittämään noin 90 % suonpohjan maahengityksen vaihtelusta. Tämän aineiston perusteella puuston ikä selitti parhaiten maahengityksen vaihtelua (Taulukko 3). Puuston iän lisäksi myös turvekerroksen paksuus vaikutti maahengitykseen. Turvekerroksen paksuuden vaikutus sekä kokonaismaahengitykseen että heterotrofiseen hengitykseen oli hyvin lähellä tilastollista merkitsevyyttä (p-arvot 0,060 ja 0,083). Pohjavedenpinnan tason vaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä (p-arvot 0,507 ja 0,880).

Taulukko 3. Ympäristötekijöiden vaikutus suonpohjan kokonaismaahengitykseen (R_{tot}) sekä heterotrofiseen hengitykseen (R_{het}) ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) usean selittäjän regressiomallilla.

	Selittävät muuttujat	Kerroin	Keskivirhe	p-arvo	N
R_{tot}	Vakio	219,99	99,72	0,052	14
	Puuston ikä, v. 2021	8,99	1,30	<0,001	14
	Turpeen paksuus, cm	-2,27	1,07	0,060	14
	WT , mm	0,14	0,20	0,507	14
R_{het}	Vakio	154,66	39,41	0,003	14
	Puuston ikä, v. 2021	3,51	0,52	<0,001	14
	Turpeen paksuus, cm	-0,81	0,42	0,083	14
	WT , mm	0,01	0,08	0,880	14

Puuston eri kehitysluokkien (puuton, taimikko, varttunut, Taulukko 1) välisiä eroja tutkittiin varianssianalyysillä (ANOVA). Kokonaismaahengitystä tarkasteltaessa kehitysluokkien erot olivat tilastollisesti merkitsevät (p-arvot 0,020 ja <0,001) (Taulukko 4). Heterotrofisen hengityksen kohdalla kehitysluokka varttunut erosi merkitsevästi taimikosta ja puuttomasta, mutta taimikon ja puuttoman välinen ero ei ollut merkitsevä.

Taulukko 4. Varianssianalyysin (ANOVA) tulokset puuston kehitysluokkien vaikutuksesta kokonaismaahengitykseen (Rtot) ja heterotrofiseen hengitykseen (Rhet) Tukeyn testillä.

Puuston kehitysluokat		Keskivirhe	p-arvo
		Rtot / Rhet	Rtot / Rhet
Puuton	Taimikko	56,53 / 36,67	0,020 / 0,258
Taimikko	Varttunut	51,61 / 33,47	<0,001 / 0,023
Varttunut	Puuton	51,61 / 33,47	<0,001 / 0,001

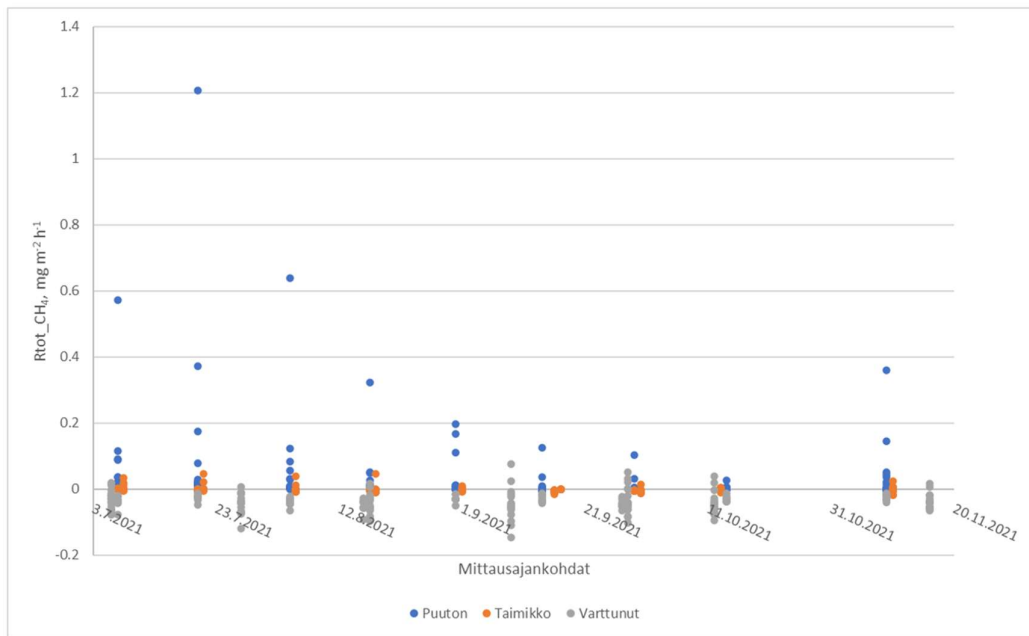
3.2 Metaanivuo

3.2.1 Ajallinen vaihtelu

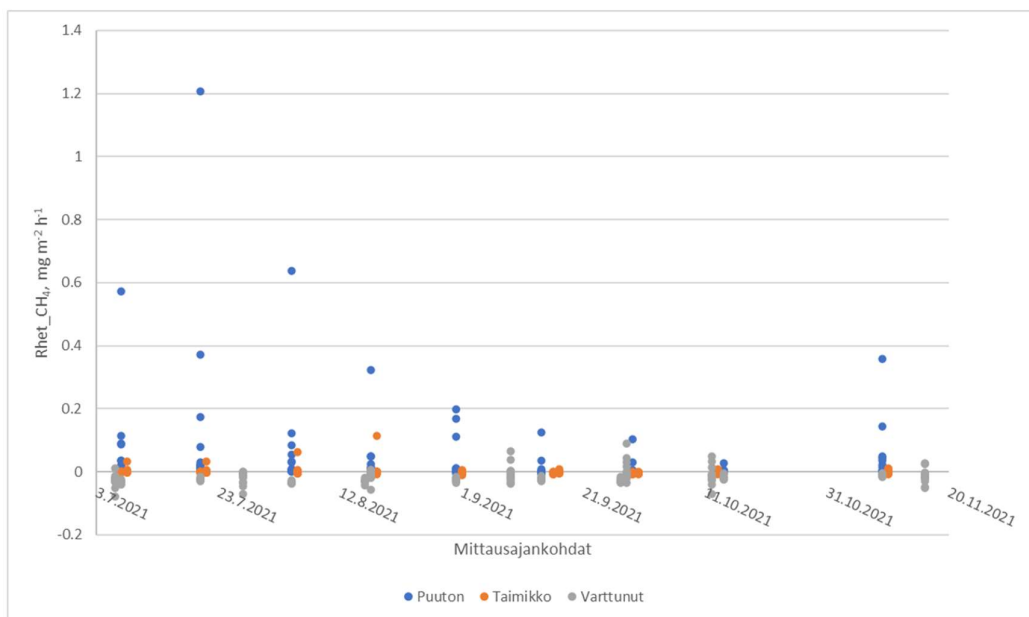
Metaanin hetkelliset vuot kasvillisilta (Rtot) pisteiltä sekä kasvittomilta (Rhet) pisteiltä mitattuina vaihtelivat suuresti mittauskauden aikana (Kuva 14). Metaanin hetkelliset vuot olivat suurimmat heinäkuussa ja pienivät mittauskauden edetessä. Suurimmat metaanivuot olivat puuttomalla Naarasnevalla ja pienimmät suonpohjilla, joilla oli varttunutta metsikköä.

Hetkelliset metaanivuot kasvillisilta pisteiltä mitattuina vaihtelivat suonpohjilla -0,148–1,206 mg m⁻² h⁻¹ välillä (Kuva 14). Taimikkoisilla koealoilla metaanin hetkelliset vuot olivat -0,020–0,046 mg m⁻² h⁻¹ kasvillisilta pisteiltä ja -0,010–0,115 mg m⁻² h⁻¹ kasvittomilta pisteiltä mitattuina. Varttuneissa metsiköissä hetkelliset metaanivuot olivat -0,148–0,075 mg m⁻² h⁻¹ kasvillisilta pisteiltä ja -0,077–0,091 mg m⁻² h⁻¹ kasvittomilta pisteiltä mitattuina. Puuttomalla Naarasnevalla metaanin hetkelliset vuot vaihtelivat -0,007–1,206 mg m⁻² h⁻¹ välillä.

a)



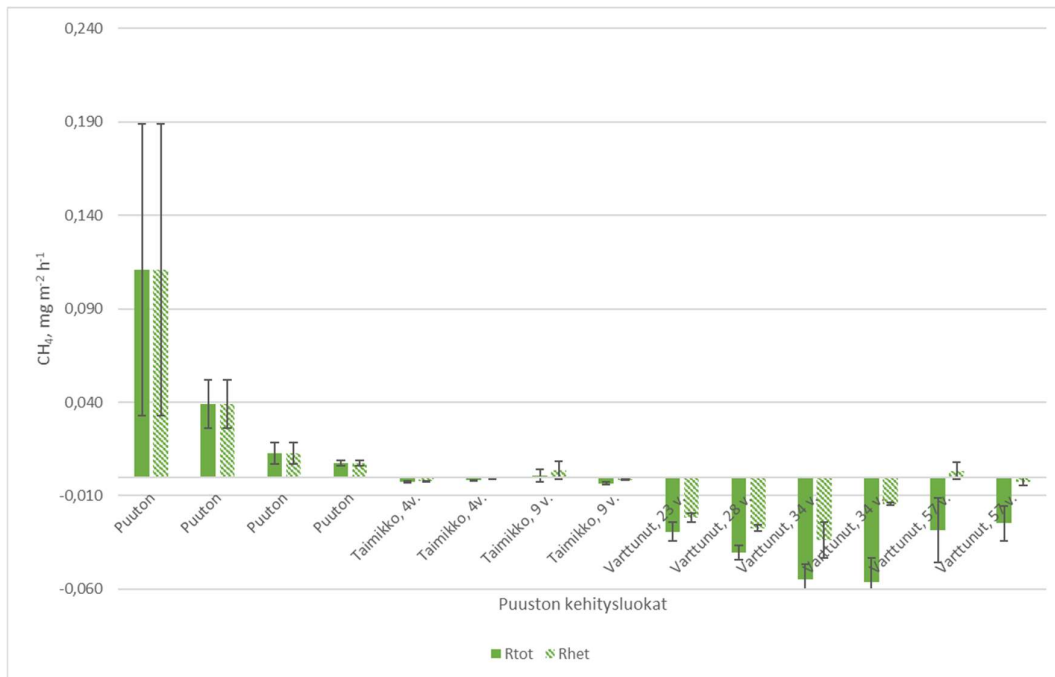
b)



Kuva 14. Metaanin hetkelliset vuot ($mg\ m^{-2}\ h^{-1}$) a) kasvillisilta (R_{tot}) sekä b) kasvittomilta (R_{het}) mittauspisteiltä mittauskauden ajalta.

3.2.2 Paikallinen vaihtelu

Maahengityksen lisäksi myös metaanivuon suuruus vaihteli suuresti eri suonpohjien välillä koelakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa. Metsitetyt suonpohjat toimivat tämän aineiston perusteella suurimmaksi osaksi metaanin nieluina (Kuva 15). Nielu oli huomattavasti suurempi koelaloilla, joilla oli varttunutta metsikköä, kuin taimikkoisilla koelaloilla. Kuvasta 15 ja taulukosta viisi voi havaita, että metaanivuo oli varttuneissa metsiköissä merkittävästi suurempi kasvillisilta (R_{tot}) mittauspisteiltä kuin kasvittomilta (R_{het}). Vaikka varttuneet metsiköt olivat metaanin nieluja, Aitoneva3-koelala kuitenkin toimi metaanin lähteenä kasvittomien pisteiden osalta.



Kuva 15. Metaanivoiden ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) koelakohtaiset keskiarvot tutkituilta suonpohjilta. Virhepalkit kuvaajassa osoittavat keskivirhettä.

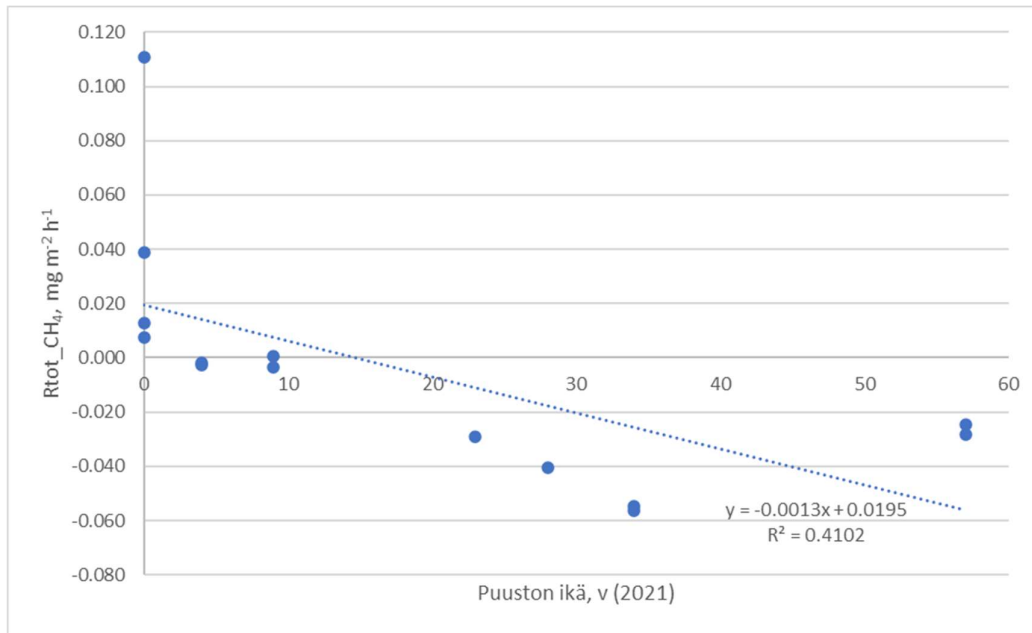
Taimikkoisilla koelaloilla metaanivuon koelakohtaiset keskiarvot sekä kasvillisilta että kasvittomilta pisteiltä olivat hyvin pieniä ($-0,003$ – $0,004 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) (Taulukko 5). Varttuneissa metsiköissä metaanivuo oli $-0,056$ – $-0,025 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kasvillisilta ja $-0,034$ – $0,003 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ kasvittomilta mittauspisteiltä. Metsittämätön Naarasneva toimi metaanin lähteenä. Metaanipäästöt Naarasnevan koelaloilta olivat $0,008$ – $0,111 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

Taulukko 5. Metaanivoiden koealakohtaiset keskiarvot kasvillisilta (Rtot), kasvittomilta (Rhet) sekä ojien mittauspisteiltä (mg m⁻² h⁻¹).

Koealat	CH ₄ , Rtot (mg m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ , Rhet (mg m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ , oja (mg m ⁻² h ⁻¹)
Naarasneva1	0,111	0,111	0,006
Naarasneva2	0,039	0,039	0,038
Naarasneva3	0,013	0,013	0,004
Naarasneva4	0,008	0,008	0,002
Savonneva1	-0,002	-0,002	
Savonneva2	-0,002	-0,001	
Lautaneva1	0,001	0,004	
Lautaneva2	-0,003	-0,001	
Talasneva1	-0,040	-0,027	
Talasneva2	-0,029	-0,022	
Aitoneva1	-0,055	-0,034	
Aitoneva2	-0,056	-0,014	
Aitoneva3	-0,028	0,003	
Aitoneva4	-0,025	-0,002	

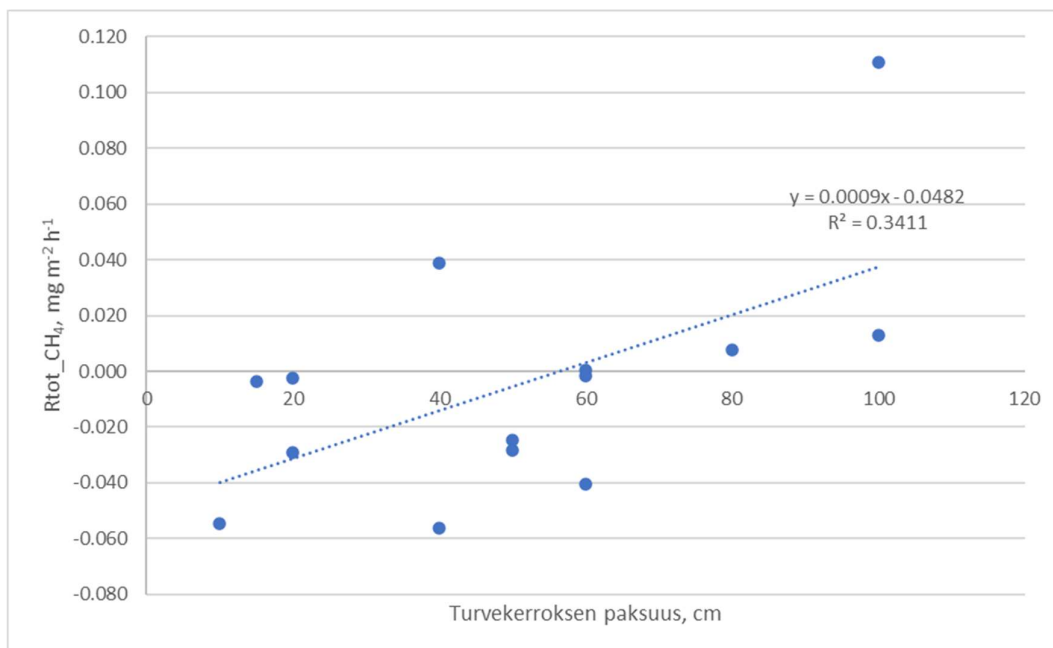
3.2.3 Ympäristötekijöiden vaikutus suonpohjan metaanivuohon

Kuvassa 16 näkyy puuston iän vaikutus suonpohjan metaanivuohon kasvillisilta (Rtot) pisteiltä mitattuna. Puuston ikä korreloi negatiivisesti metaanivuon kanssa, eli metaanivuo vähenee puuston iän kasvaessa. Metsittämättömällä Naarasnevalla metaanivuo oli positiivinen, kun taas varttuneissa metsiköissä metaanivuo oli selvästi negatiivinen.



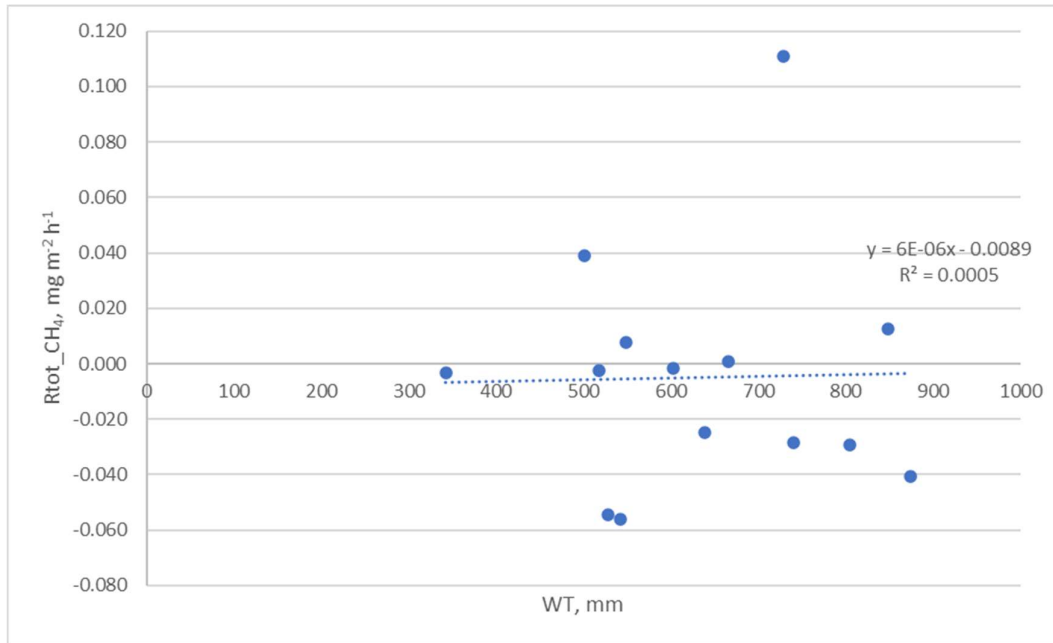
Kuva 16. Puuston iän vaikutus suonpohjan metaanivuohon ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). CH_4 -vuot ovat koealakohtaisia keskiarvoja kasvillisilta (Rtot) pisteiltä.

Turvekerroksen paksuus korreloi positiivisesti kasvillisilta (Rtot) pisteiltä mitatun metaanivuon kanssa (Kuva 17). Ohutturpeisilla koealoilla (turvekerroksen paksuus ≤ 20 cm) metaanivuo oli negatiivinen. Paksuturpeisilla koealoilla (turvekerroksen paksuus ≥ 80 cm) metaanivuo oli puolestaan positiivinen.



Kuva 17. Turvekerroksen paksuuden vaikutus suonpohjan metaanivuohon ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). CH_4 -vuot ovat koealakohtaisia keskiarvoja kasvillisilta (Rtot) pisteiltä.

Pohjavedenpinnan tason ja kasvillisilta pisteiltä mitatun metaanivuon välillä ei ollut korrelaatiota (Kuva 18). Koealakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa pohjavedenpinnan tasolla ei näytä olevan vaikutusta suonpohjan metaanivuohon. Korkeimmillaan pohjavedenpinnan taso oli hieman yli 300 mm ja matalimmillaan hieman alle 900 mm.



Kuva 18. Pohjavedenpinnan tason (WT) vaikutus suonpohjan metaanivuohon ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$). CH₄-vuot sekä pohjavedenpinnan korkeudet ovat koealakohtaisia keskiarvoja kasvillisilta (Rtot) pisteiltä.

Puuston iän, turvekerroksen paksuuden ja pohjavedenpinnan tason vaikutusta suonpohjan metaanivuohon kasvillisilta (Rtot) mittauspisteiltä mallinnettiin usean selittäjän regressiomallilla (Yhtälö 4):

$$\text{CH}_4 (\text{Rtot}) = a + b \cdot P + c \cdot T + d \cdot \text{WT} \quad (4),$$

jossa:

CH₄ = metaanivuo kasvillisilta (Rtot) pisteiltä

a = vakio

b = puuston iän kerroin

c = turpeen paksuuden kerroin

d = pohjavedenpinnan tason (WT) kerroin

P = puuston ikä, v. 2021

T = turpeen paksuus, cm

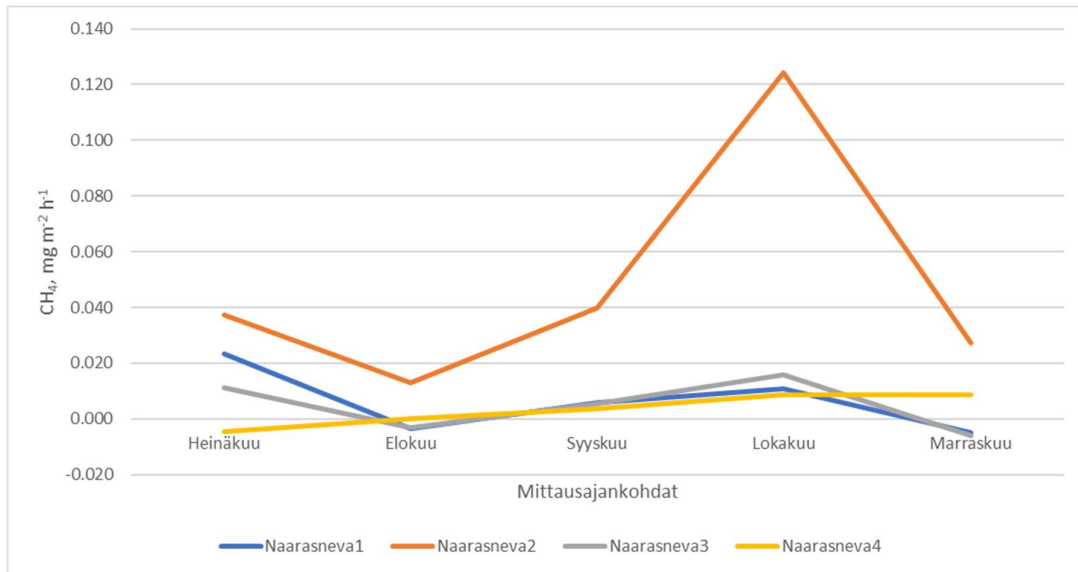
WT = pohjavedenpinnan taso (WT), mm

Taulukossa neljä on esitetty tälle mallille estimoidut kertoimet sekä p-arvot testatuille ympäristötekijöille. Regressiomallin selitysaste oli 0,59, joten mallilla pystyttiin selittämään noin 60 % suonpohjan metaanivuon vaihtelusta kasvillisilta (Rtot) pisteiltä. Tämän aineiston perusteella metaanivuota kasvillisilta (Rtot) pisteiltä selittää parhaiten puuston ikä sekä turvekerroksen paksuus (p-arvot 0,098 ja 0,075) (Taulukko 1 ja Taulukko 6).

Taulukko 6. Ympäristötekijöiden vaikutus suonpohjan CH₄-vuohon (mg m⁻² h⁻¹) kasvillisilta (Rtot) pisteiltä usean selittäjän regressiomallilla.

Selittävät muuttujat	Kerroin	Keskivirhe	p-arvo	N
Vakio	0,005	0,038	0,892	14
Puuston ikä, v. 2021	-0,001	<0,001	0,098	14
Turpeen paksuus, cm	0,001	<0,001	0,075	14
WT, mm	-5,374*10 ⁻⁵	<0,001	0,488	14

Metsittämättömällä Naarasnevalla avonaiset ojat aiheuttavat metaanipäästöjä (Kuva 19). Ojapisteiden hetkelliset metaanivuot vaihtelivat -0,009–0,124 mg m⁻² h⁻¹ välillä ja koealakohtaiset keskiarvot vaihtelivat 0,002–0,038 mg m⁻² h⁻¹ välillä. Ojapisteiden aiheuttamat metaanipäästöt olivat keskimäärin pienemmät kuin maaperän metaanipäästöt Naarasnevalla (Taulukko 5). Suurimmat metaanipäästöt olivat peräisin Naarasneva2 -koealan ojasta. Naarasneva1- ja Naarasneva3-koealat sijaitsivat samalla saralla, joten koealoihin sisältyvät ojat olivat vierekkäiset. Tämä voi selittää näiden ojapisteiden samankaltaista metaanivuota.



Kuva 19. CH₄-vuot (mg m⁻² h⁻¹) Naarasnevan ojapisteistä. CH₄-vuot ovat ojapisteiden koealakohtaiset ja kuukausikohtaiset keskiarvot.

4. TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Maahengitys

Tämän aineiston perusteella metsittämisellä on vaikutusta suonpohjan maahengitykseen sekä metaanivuohon. Sekä kokonaismaahengitys että heterotrofinen hengitys kasvaa metsityksestä kuluneen ajan myötä (Kuva 9). Tämän taustalla voi olla useampia tekijöitä, jotka vaikuttavat maahengityksen määrään. Huotarinen ym. (2007) ja Mäkirannan ym. (2007) mukaan lannoittaminen on yksi suonpohjan maahengitystä lisäävistä tekijöistä. Lisäksi kasvillisuuden määrä suonpohjalla vaikuttaa maahengityksen määrään. Puuston kasvaessa kariketuohto maaperään kasvaa ja näin myös maahengitys kasvaa (Tuittila ja Komulainen 1995, Mäkiranta ym. 2007). Tässä työssä aineistoa kerättiin vain yhden kesän ja syksyn ajalta, joten tulokset kertovat lähinnä kasvukauden aikaisesta vaihtelusta.

Metsitettyjen suonpohjien ilmastovaikutuksia on tutkittu melko vähän. Tämän työn tulokset maahengityksen suuruudesta ovat kuitenkin saman suuntaisia muutaman aiemman tutkimuksen tulosten kanssa. Tuittila ja Komulainen (1995) ovat tutkineet tuotannosta noin 20 vuotta aiemmin poistuneen metsittämättömän suonpohjan hiilitasetta. Heidän

tutkimuksessaan kokonaismaahengityksen määrä kasvukauden aikana oli 34–1168 mg m⁻² h⁻¹. Kokonaismaahengityksen määrä on hyvin samankaltainen kuin tässä tutkimuksessa hetkellisiä CO₂-voita tarkasteltaessa (-39–1662 mg m⁻² h⁻¹, Kuva 7). Tutkimusten välillä on muutamia eroavaisuuksia, jotka varmasti jonkin verran vaikuttavat mittaustuloksiin. Tuittilan ja Komulaisen (1995) tutkimuksessa mittaukset tehtiin suonpohjalla, jolle ei ollut tehty mitään jälkikäyttötoimenpiteitä turvetuotannon loputtua. Suonpohja oli mittausten aikaan vain osittain kasvittunut (Tuittila ja Komulainen 1995). Tässä tutkimuksessa puolestaan suurin osa koealoista oli metsitetty ja osa lisäksi lannoitettu metsittämisen yhteydessä. Mäkirannan ym. (2007) tutkimuksessa metsitetyn suonpohjan heterotrofisen hengityksen vaihtelu kasvukauden aikana oli noin 0–800 mg m⁻² h⁻¹. Vaihtelu on hyvin samankaltaista kuin tässä tutkimuksessa hetkellisiä CO₂-voita tarkasteltaessa (-21–836 mg m⁻² h⁻¹, Kuva 7).

Metsäojitettujen soiden ilmastovaikutuksia on tutkittu tuotannosta poistettuja suonpohjia enemmän. Muuan muassa Ojanen ym. (2010) ja Minkkinen ym. (2007a ja 2018) ovat tutkineet metsäojitettujen soiden maahengitystä. Ojasen ym. (2010) tutkimuksessa kokonaismaahengityksen hetkelliset vuot metsäojitetuilta soilta olivat -10–2140 mg m⁻² h⁻¹. Heterotrofisen hengityksen määrä vaihteli -30–1380 mg m⁻² h⁻¹. Sekä kokonaismaahengityksen että heterotrofisen hengityksen vaihteluvälit ovat suuremmat kuin tässä tutkimuksessa. Ojasen ym. (2010) tutkimuksessa koealojen ja siten myös mittaushavaintojen määrä on huomattavasti suurempi, mikä voi selittää maahengityksen suurempaa vaihteluväliä.

Suonpohjilla, joilla oli varttunutta puustoa, kokonaismaahengityksen koealakohtaiset keskiarvot olivat 478,51–693,83 mg m⁻² h⁻¹ (Taulukko 2). Minkkisen ym. (2018) tutkimuksessa metsäojitetun suon kokonaismaahengitys oli keskimäärin 420 mg m⁻² h⁻¹. Kokonaismaahengitys oli siis hieman suurempaa suonpohjien varttuneissa metsiköissä kuin metsäojitetulla suolla vaikka kummassakin puusto oli varttunutta. Metsäojitetuilla soilla karumpien kasvupaikkojen hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin lähtökohtaisesti pienempiä kuin rehevämpien kasvupaikkojen päästöt (Ojanen ym. 2020). Minkkisen ym. (2018) tutkimuskohteena olleen metsäojitetun suon karu kasvupaikka (Vatkg) voisi siis olla yhtenä tekijänä pienempään kokonaismaahengitykseen.

Metsäojitetuilla soilla karummalla kasvupaikalla mitattu heterotrofinen hengitys oli keskimäärin $310 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Minkkinen ym. 2018) kasvukauden aikana ja hieman rehevämällä kasvupaikoilla $270\text{--}350 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Minkkinen ym. 2007a). Suonpohjien heterotrofisen hengityksen määrä on tämän tutkimuksen mukaan hieman pienempi kuin metsäojitetujen soiden. Metsitetyillä suonpohjilla heterotrofisen hengityksen koelakohtaiset keskiarvot olivat $58\text{--}366 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Taulukko 2). Vain Aitoneva3-koelalla heterotrofisen hengityksen keskiarvo ylitti $300 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja Aitoneva4-koelalla keskiarvo ylitti $270 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Nämä koelat olivat puustoltaan iäkkäimpiä ja aluskasvillisuudeltaan runsaimpia. Aitonevan koeloilla on tehty jatkolannoitusta (Taulukko 1), mikä voisi selittää suurempaa maahengityksen määrää.

Heterotrofisen hengityksen osuus suonpohjan kokonaismaahengityksestä väheni hieman metsityksestä kuluneen ajan myötä (Taulukko 2). Heterotrofisen hengityksen osuus oli monella puustoisella koelalla noin 40 %. Metsittämättömän Naarasnevan koeloilla osuus oli 100 %, sillä maahengitys koostui kasvillisuuden puuttuessa vain turpeen hajoisesta. Taimikkoisella Savonnevalla heterotrofisen hengityksen osuus oli myös melko suuri. Savonnevalla taimikko oli vain neljävuotiasta, joten suonpohjan kasvillisuus oli melko vähäistä. Tämä voisi selittää suurta heterotrofisen hengityksen osuutta. Kummallakaan koella ei tehty perustamisvaiheessa juurieristystä kasvittomille pisteille kasvillisuuden vähyyden vuoksi. Savonneva1 -koella aluskasvillisuus kuitenkin lisääntyi huomattavasti mittausten aikana ja kasvillisuus pääsi juurieristuksen puutteen vuoksi kasvaamaan aivan kiinni mittauspisteen uraan. Tämän vuoksi tulos heterotrofisen hengityksen määrästä on luultavasti yliarvio. Naarasnevan ja Savonnevan suonpohjilla suuri heterotrofisen hengityksen osuus voi johtaa ainakin metsityksen alkuvaiheessa maaperän hiiliväestön pienenemiseen.

4.2 Ympäristötekijöiden vaikutus maahengitykseen

Tutkituista ympäristötekijöistä puuston ikä selitti parhaiten suonpohjan maahengitystä (Taulukko 3). Tässä tutkimuksessa puuston vaikutusta tutkittiin ainoastaan iän ja kehitysluokkien perusteella eikä muita puustomittauksia tehty. Pelkkä puuston ikä ei varmasti-kaan ole yksinään maahengitystä selittävä tekijä, vaan puustoon liittyy myös muita vaikuttavia tekijöitä. Mikäli huomioitaisiin vielä esimerkiksi puuston ja muun kasvillisuuden kariketuotto maaperään sekä erilaiset lannoituskäsittelyt, voitaisiin saada tarkempi kuva

puustoon liittyvistä ja maahengitykseen vaikuttavista tekijöistä. Varianssianalyysin tuloksista voidaan havaita puuston kehitysluokkien väliset erot (Taulukko 4). Suonpohjalla kasvavan puuston kehitysluokalla on suuri merkitys sekä kokonaismaahengitykseen että heterotrofiseen hengitykseen.

Tämän tutkimuksen perusteella myös turvekerroksen paksuus selitti suonpohjan maahengityksen vaihtelua (Taulukko 3). Sekä kokonaismaahengitys että heterotrofinen hengitys vaikuttaa pienenevän, kun turvekerroksen paksuus kasvaa (Kuva 11). Turvekerroksen paksuuden vaikutuksesta suonpohjan maahengitykseen ei juuri löydy aiempia tutkimuksia. Minkkisen ym. (2007a) tutkimuksessa metsäojitetuilta soilta voi kuitenkin havaita hieman samankaltaista trendiä. Tutkimusalueiden CO₂-vuot olivat pienimmät paksuturpeisimmalla alueella ja vastaavasti suurimmat ohutturpeisellä alueella (Minkkinen ym. 2007a). Myös Ojasen ym. (2010) tutkimuksessa metsäojitetujen soiden turvekerroksen paksuus korreloi negatiivisesti maahengityksen kanssa, mutta vaikutus oli vain vähäinen. Tässä tutkimuksessa tosin kolme paksuturpeisinta koealaa sijaittivat metsittämättömällä Naarasnevalla, mikä voi hieman vääristää tulosta. Kyseisellä suonpohjalla kokonaismaahengitys koostui vain turpeen hajoamisesta kasvillisuuden puuttuessa. Näille paksuturpeisille koealoille (turvekerros vähintään 80 cm) pitäisi olla jokin metsitetty verrokki, jolloin turvekerroksen paksuuden vaikutusta voisi tutkia tarkemmin.

Maan lämpötilan on todettu aiemmissa tutkimuksissa olevan ojitetuilla turvemaidella yksi maahengitystä parhaiten selittävistä tekijöistä (Tuittila ja Komulainen 1995, Minkkinen 2007a, Mäkiranta ym. 2008, Ojanen ym. 2010, Minkkinen ym. 2018). Tässä tutkimuksessa lämpötilan vaikutusta hetkelliseen maahengitykseen analysoitiin mittausjakson kaikkia lämpötilahavaintoja tarkastelemalla (Kuva 8). Lämpötilan noustessa maahengitys kasvaa, mutta kaikista korkeimmissa lämpötiloissa maahengitys alkaa laskea. Varttu-neissa metsiköissä tämä raja on noin 16 °C (T5) ja noin 12 °C (T30). Taimikkoisilla ja puuttomilla koealoilla raja on hieman korkeampi, noin 14 °C, kun tarkastellaan lämpötiloja 30 cm:n syvyydellä. Mittauskesä oli todella lämmin ja maan lämpötilat olivat korkeimmillaan noin 25 °C (T5) ja noin 16 °C (T30). Korkeat lämpötilat voivat aiheuttaa turpeen pintakerrosten kuivuutta, mikä heikentää maaperän mikrobien toimintaa ja vähentää siten maahengityksen määrää (Mäkiranta ym. 2009). Tässä tutkimuksessa korkeimmat lämpötilat mitattiin puuttomilta ja taimikkoisilta koealoilta. Näillä koealoilla

puuston tai muun kasvillisuuden varjostava vaikutus on siis vähäisempi, joka voi johtaa maaperän suurempaan lämpenemiseen ja kuivumiseen.

Tilastollisen analyysin perusteella pohjavedenpinnan korkeus (WT) ei juurikaan selitä suonpohjan maahengityksen vaihtelua (Taulukko 3) tässä tutkimuksessa. Maahengitys kuitenkin hieman suurenee pohjavedenpinnan tason madaltuessa (Kuva 12) koealakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa. Tätä tulosta tukee ainakin kaksi aiempaa tutkimusta, jotka on tehty suonpohjilta Suomessa ja Virossa (Tuittila ja Komulainen 1995, Mander ym. 2012). Tuittilan ja Komulaisen (1995) tutkimuksessa pohjavedenpinnan taso ei selittänyt kokonismaahengityksen vaihtelua metsittämättömällä, mutta kasvillisuuden peittämällä suonpohjalla. Mander ym. (2012) havaitsi, että pohjavedenpinnan korkeus ei vaikuttanut kokonismaahengitykseen suonpohjalla, jossa on lannoitettu ruokohelpiviljelmä. Lannoittamattomalla ruokohelpiviljelmällä pohjavedenpinnan tason vaikutus puolestaan oli nähtävissä (Mander ym. 2012). Metsäojitetuilla soilla pohjavedenpinnan korkeuden vaikutus maahengitykseen on hieman selvempi (Silvola ym. 1996, Minkkinen ym. 2007a, Ojanen ym. 2013) kuin suonpohjilla.

Pohjavedenpinnan tason vaikutuksen sekä kokonismaahengitykseen että heterotrofiseen hengitykseen voi kuitenkin havaita koko mittausdataa tarkasteltaessa (Kuva 13). Pohjavedenpinnan tason aletessa maahengitys kasvaa, kun hapellisen turvekerroksen osuus suurenee. Tason ollessa yli 60 cm maahengityksen määrä vähenee. Mäkiranta ym. (2009) sekä Ojanen ym. (2010) ovat todenneet kyseisen ilmiön ojitetuilla ja metsitetyillä turveilla. Tätä ilmiötä on selitetty orgaanisen aineen hajoamista rajoittavalla pintaturpeen kuivumisella (Mäkiranta ym. 2009).

4.3 Metaanivuo

Tässä tutkimuksessa metaanin hetkelliset vuot kasvillisilta (R_{tot}) pisteiltä mitattuina vaihtelivat $-0,148$ – $1,206 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ välillä (Kuva 14). Ojasen ym. (2010) metsäojitetuilta soilta tehdyssä tutkimuksessa kasvillisilta pisteiltä mitatut metaanin hetkelliset vuot vaihtelivat $-0,53$ – $24,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ välillä. Vaihteluväli on Ojasen ym. (2010) tutkimuksessa huomattavasti suurempi. Osa koealoista oli kuitenkin huonosti kuivattu, mikä selittäisi suurta vaihteluväliä (Ojanen ym. 2010).

Metaanivuo suonpohjilla oli kasvillisista pisteistä $-0,056-0,111 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ja kasvittomista pisteistä $-0,034-0,111 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ koealakohtaisia keskiarvoja tarkasteltaessa (Taulukko 5). Metsäojitetulla suolla kasvillisista pisteistä mitattu metaanivuo oli keskimäärin $-0,015 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Lohila ym. 2011), joka asettuu tähän aineistoon verrattuna taimikkoisten ja varttunutta puustoa sisältävien koealojen välimaastoon.

Varttuneissa metsiköissä kasvillisilta (R_{tot}) ja kasvittomilta (R_{het}) pisteiltä mitattujen CH_4 -voiden erot olivat merkittävästi suuremmat kuin muilla koealoilla (Kuva 15). Muita koealoja runsaampi kasvillisuus varttuneissa metsiköissä voisi olla yksi mahdollinen selittäjä tälle ilmiölle. Muun muassa Bhullar ym. (2013) havaitsi tutkimuksessaan kasvillisuuden biomassan vähentävän metaanin tuottoa ilmakehään. Vaikka tässä tutkimuksessa ei analysoitu kasvillisuutta tarkemmin, varttuneissa metsiköissä kasvillisuutta oli enemmän kuin taimikkoisilla tai puuttomilla koealoilla. Näin ollen kasvillisuuden biomassan ero kasvillisten (R_{tot}) ja kasvittomien (R_{het}) mittauspisteiden välillä oli myös suurempi. Tämä voisi mahdollisesti selittää kasvillisten pisteiden suurempaa metaaninielua. Varttuneiden metsiköiden maaperää ja olosuhteita tulisi tutkia huomattavasti laajemmin, jotta kyseiselle ilmiölle voisi löytää tarkemman selityksen.

Tämän tutkimuksen mukaan suonpohjien metsittäminen vaikuttaa myös suonpohjan metaanivuohon. Tilastollisen analyysin perusteella tutkituista ympäristötekijöistä metaanivuon vaihtelua selittävät parhaiten suonpohjalla kasvavan puuston ikä sekä turvekerroksen paksuus (Taulukko 6). Puuston kehitysluokkia tarkasteltaessa voitiin huomata, että metaanin nielu oli selvästi suurempi mitä varttuneempaa puustoa suonpohjalla kasvoi (Kuva 15). Vastaavasti metaanipäästö oli suurin metsittämättömällä Naarasnevalle (Kuva 15). Myös metsäojitetuilla soilla puuston koon on todettu vaikuttavan metaanivuohon vastaavalla tavalla (Minkkinen ym. 2007b).

Naarasnevan oja pisteistä mitattujen metaanivoiden koealakohtaiset keskiarvot olivat $0,002-0,038 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Avonaiset ojat siis aiheuttivat jonkin verran metaanipäästöjä. Korkeimmat metaanipäästöt ajoittuvat lokakuulle (Kuva 19), jolloin ojissa oli eniten vettä. Tämä voisi selittää suurempaa metaanipäästöä. Marraskuussa ojat olivat jo jäässä, joten metaanipäästökin laski useammassa ojassa.

5. PÄÄTELMÄT

Tämän tutkimuksen perusteella suonpohjien metsittäminen selkeästi kasvattaa suonpohjan maahengitystä ja vähentää metaanipäästöjä. Saatua tulosta vahvistaa hypoteesit heterotrofisen hengityksen kasvusta metsityksen myötä sekä metsitettyjen suonpohjien toimimisesta metaanin nieluina.

Tässä tutkimuksessa puuston ikä vaikutti tutkituista tekijöistä eniten koealojen keskimääräiseen maahengitykseen tutkimusjakson aikana. Muilla tilastollisesti tutkituilla ympäristötekijöillä eli turvekerroksen paksuudella ja pohjavedenpinnan tasolla oli vähäisempi vaikutus maahengitykseen. Tämä vahvistaa hypoteesin ympäristötekijöiden vaikutuksesta maahengityksen suuruuteen. Pohjavedenpinnan tason vaikutusta maahengitykseen ja metaanivuohon voisi tosin arvioida hieman suuremmalla mittausaineistolla, jolloin tuloksista saataisiin vielä tarkemmat. Lämpötilan vaikutus maahengitykseen vastasi aiempien tutkimusten tuloksia. Lämpötilan vaikutuksen tilastolliseen analysointiin olisi tarvittu sekamallia, mutta aikataulusyistä analysoinnissa käytettiin vain lineaarista regressiomallia, jolloin lämpötiladata jäi tilastollisen analyysin ulkopuolelle. Sekamallilla tulokset tutkittujen ympäristötekijöiden selityksasteista saattaisivat olla tarkemmat.

Näiden tutkimustulosten pohjalta ei kuitenkaan voi suoraan päätellä, onko suonpohjien metsittäminen esimerkiksi ilmaston kannalta kannattavin jälkikäyttömuoto. Metsittämisen jälkeen sekä kokonaismaahengitys että heterotrofinen hengitys kasvaa lisääntyvän kasvillisuuden ja maaperän lannoittamisen myötä (Tuittila ja Komulainen 1995, Mäkiranta ym. 2007) eli hiilidioksidivuot ilmakehään suurenevät. Puuston ja muun kasvillisuuden sitoma hiili sekä kariketuotos pitäisi ottaa myös huomioon, jotta voitaisiin todeta metsitetyn suonpohjan tarkat ilmastovaikutukset. Muutamissa tutkimuksissa on esitetty arvioita erilaisten suonpohjan jälkikäyttömuotojen hiilitaseista. Mäkirannan ym. (2007) mukaan metsitetyt suonpohjat voivat mahdollisesti toimia jopa hiilen lähteinä puuston sitomasta hiilestä huolimatta. Tuittila ym. (1999) ovat puolestaan arvioineet, että onnistuneesti ennallistetut suonpohjat voisivat toimia hiilinieluina. Virossa suonpohjille perustettujen ruokohelpiviljelmien on todettu myös toimivan hiilinieluina (Mander ym. 2012). Suomessa suonpohjan metsittäminen turvetuotannon loputtua on hyvin yleistä (Aro ja Hytönen 2019) ja lähitulevaisuudessa suonpohjia vapautuu jälkikäyttöön merkittäviä

määriä. Tarvitaankin siis lisää ekosysteemitason tutkimusta, jotta suonpohjien jälkikäyttömuotojen, esimerkiksi metsittämisen, ilmastovaikutuksia voidaan tarkemmin arvioida. Tämän aiheen tutkimusta on tarkoitus jatkaa ja etsiä edellä mainittuihin asioihin vastauksia tulevina vuosina.

6. LÄHTEET

- AFRY 2020. Selvitys turpeen energiakäytön kehityksestä Suomessa. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle 8/2020. Pöyry Management Consulting Oy / AFRY Management Consulting.
- Alakangas, E., Hölttä, P., Juntunen, M. & Vesisenaho, T. 2011. Energiaturpeen tuotantotekniikka. Koulutusaineisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 120. ISBN 978-951-830-195-3 (PDF).
- 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.
- Andrews, J. A., Harrison, K. G., Matamala, R. & Schlesinger, W. H. 1999. Separation of Root Respiration from Total Soil Respiration Using Carbon-13 Labeling during Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE). *Soil Science Society of America Journal* 63(5): 1429-1435. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351429x>
- Aro, L. & Hytönen, J. 2019. Suonpohjasta metsäksi. ISBN 978-952-283-069-2 (PDF). Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/julkaisut>.
- Aro, L. & Kaunisto, S. 2003. Jatkolannoituksen ja kasvatustiheyden vaikutus nuorten mäntymetsiköiden ravinnetilaan sekä puuston ja juuriston kehitykseen paksuturpeisella suonpohjalla. *Suo* 54(2): 49–68. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9826.pdf>.
- Aro, L., Kaunisto, S. & Saarinen, M. 1997. Suonpohjien metsitys. Hankeraportti 1986–1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 634. 51 s. ISBN 951-40-1558-4.
- Bhullar, G. S., Iravani, M., Edwards, P. J. & Venterink, H. O. 2013. Methane transport and emissions from soil as affected by water table and vascular plants. *BMC Ecology* 13: 32. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-13-32>

- Bioenergia 2019. Turvetuotannosta poistuneet suonpohjat ovat jo hiilinieluja – metsitys tärkein jälkikäyttömuoto. Tiedote 8.3.2019. Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/2019/03/08/turvetuotannosta-poistuneet-suonpohjat-ovat-jo-hiilinieluja-metsitys-tarkein-jalkikayttomuoto/>. [Viitattu 3.12.2021].
- Huotari, N., Tillman-Sutela, E., Kauppi, A. & Kubin, E. 2007. Fertilization ensures rapid formation of ground vegetation on cut-away peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 874-883. <http://doi.org/10.1139/X06-292>
- Hytönen, J., Aro, L. & Jylhä, P. 2018. Biomass production and carbon sequestration of dense downy birch stands on cutaway peatlands. *Scandinavian Journal of Forest Research*. Vol.33, No.8, s. 764-771. <http://doi.org/10.1080/02827581.2018.1500636>
- IPCC 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. The Core Writing Team, Pachauri, R.K. & Meyer, L. (toim.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 s. Saatavissa: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- Isoniemi, M. 2021. Lounais-Suomen metsityspotentiaali. Metsäkeskus.
- Kaunisto, S. & Aro, L. 1998. Suopohjat metsätaloudessa. Julkaisussa: Vasander, H. (toim.). *Suomen suot*. Suoseura ry, Helsinki. s. 130–134. ISBN 951-97826-0-5.
- Laasasenaho, K., Lensu, A. & Rintala, J. 2016. Planning land use for biogas energy crop production: The potential of cutaway peat production lands. *Biomass and Bioenergy* 85: 355-362. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.030>
- Laasasenaho, K., Lensu, A., Rintala, J. & Lauhanen, R. 2017. Landowners' willingness to promote bioenergy production on wasteland – future impact on land use of cutaway peatlands. *Land Use Policy* 69: 167-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.09.010>

- Lappalainen, E. 1998. Soiden käytön historiaa. Julkaisussa: Vasander, H. (toim.). Suomen suot. Suoseura ry, Helsinki. s. 60–63. ISBN 951-97826-0-5.
- Leinonen, A. 2010. (toim.) Turpeen tuotanto ja käyttö. Yhteenveto selvityksistä. VTT tiedotteita 2550. 104 s. ISBN 978-951-38-7648-7.
- 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. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3203-2011>
- Maa- ja metsätalousministeriö 2021. Joutoalueita metsittämällä voidaan lisätä metsäpinta-alaa. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/metsatalous/metsat-ja-ilmastonmuutos/joutoalueiden-metsitys>. [Viitattu 1.12.2021].
- Mander, Ü., Järveoja, J., Maddison, M., Soosaar, K., Aavola, R., Ostonen, I & Salm, J-O. 2012. Reed canary grass cultivation mitigates greenhouse gas emissions from abandoned peat extraction areas. *GCB Bioenergy* 4: 462–474. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01138.x>
- Mikola, P. 1975. Turvetuotannosta vapautuvan maan metsittäminen. *Silva Fennica* 9(2): 101–115.
- Minkkinen, K., Laine, J., Shurpali, N. J., Mäkiranta, P., Alm, J & Penttilä, T. 2007a. Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatlands. *Boreal Env. Res.* 12: 115–126.
- Minkkinen, K., Penttilä, T. & Laine, J. 2007b. Tree stand volume as a scalar for methane fluxes in forestry-drained peatlands in Finland. *Boreal Env. Res.* 12: 127–132
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J-P. & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences* 15: 3603–3624. <https://doi.org/10.5194/bg-15-3603-2018>

- Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N.J., Laine, J., Lohila, A., Martikainen, P.J. & Minkkinen, K. 2007. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Environment Research* 12: 159–175.
- Mäkiranta, P., Minkkinen, K., Hytönen, J. & Laine, J. 2008. Factors causing temporal and spatial variation in heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration in afforested organic soil croplands in Finland. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 1592-1600. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.009>
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Fritze, H., Hytönen, J., Laine, J. & Minkkinen, K. 2009. Indirect regulation of heterotrophic peat soil respiration by water level via microbial community structure and temperature sensitivity. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 695-703. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.004>
- Neova Group 2021. Neova tekee 16,2 milj. euron alaskirjauksen Suomen energiaturvetuotannon lopettamisen takia. Uutinen 26.11.2021. Saatavissa: <https://www.neova-group.com/fi/neova-tekee-162-milj-euron-alaskirjauksen-suomen-energiaturvetuotannon-lopettamisen-takia/>. [Viitattu 12.2.2022].
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2020. Metsäojitetun suon ilmastovaikutukset. *Suo* 71(2): 189–198 – Ojitettujen soiden kestävä käyttö. Saatavissa: <https://www.suoseura.fi/ojitettujen-soiden-kestava-kaytto/metsaojitetun-suon-ilmastovaikutukset/>.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.036>
- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.008>

- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Regina, K. 2020. Ojituksen vaikutus maaperän kasvihuonekaasupäästöihin. *Suo* 71(2): 173–188 – Ojitettujen soiden kestävä käyttö. Saatavissa: <https://www.suoseura.fi/ojitettujen-soiden-kestava-kaytto/ojituksen-vaikutus-maaperan-kasvihuonekaasupaastoihin/>.
- Picken, P. 2006. Land-use scenarios for Finnish cut-over peatlands – based on the mineral subsoil characteristics. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Vol. 78, s. 106-119.
- Salo, H. & Savolainen, V. 2008. Turvetuotantoalueiden jälkikäyttö. Opas alan toimijoille. Turveteollisuusliitto ry. ISBN 978-951-95397-8-2 (PDF).
- Selin, P. 1999. Turvevarojen teollinen käyttö ja suopohjien hyödyntäminen Suomessa. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 79. ISBN 978-951-39-8766-4 (PDF).
- Silvola, J., Alm, J., Ahlholm, U., Nykänen, H. & Martikainen, P. J. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology* 84: 219–228.
- Tilastokeskus 2020. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2019. Ympäristö ja Luonnonvarat 2020. 83 s. ISBN 978-952-244-660-2 (PDF).
- Tuittila, E-S. & Komulainen, V-M. 1995. Vegetation and CO₂ balance in an abandoned harvested peatland in Aitoneva, southern Finland. *Suo* 46 (3): 69–80. Saatavissa: <http://www.suo.fi/pdf/article9749.pdf>.
- Tuittila, E-S., Komulainen, V-M., Vasander, H. & Laine, J. 1999. Restored cut-away peatland as a sink for atmospheric CO₂. *Oecologia* 120: 563-574.
- Tuittila, E-S., Komulainen V-M., Vasander, H., Nykänen, H., Martikainen, P.J. & Laine, J. 2000. Methane dynamics of a restored cut-away peatland. *Global Change Biology* 6: 569-581.

Työ- ja elinkeinoministeriö 2021. Turvetyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2021:24. 123 s. ISBN 978-952-327-856-1 (PDF).

Valtioneuvosto 2019. Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019 Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:31. 213 s. ISBN 978-952-287-808-3 (PDF).

LIITE 1

Koeala	Mittauspiste	HH:MM:SS	HH:MM:SS	°C	°C	maaila/vedessä	cm	cm	cm	cm	text	Mittaajan nimi
Monitoring site	Monitoring point	Start time	End time	Chamber start T. C	Chamber end T. C	Chamber setting	Change in chamber height. cm	WT; pipe to water measured. cm	WT; pipe to ground. cm	Notes	Measurer name:	