



**TURUN  
YLIOPISTO**

# **Metaanivoiden lyhyen aikavälin vaihtelu ja sitä ohjaavat ympäristötekijät luonnontilaisella, boreaalisella keidassuolla**

Veera Bilaletdin

Biologia (ekologia ja evoluutiobiologia)

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

8.1.2026

Helsinki

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

**Oppiaine:** Biologia (ekologia ja evoluutiobiologia)

**Tekijä:** Veera Bilaletdin

**Otsikko:** Metaanivoiden lyhyen aikavälin vaihtelu ja sitä ohjaavat ympäristötekijät luonnontilaisella, boreaalaisella keidassuolla

**Ohjaajat:** Aino Kalske, Helena Rautakoski, Mika Korkiakoski ja Annalea Lohila

**Sivumäärä:** 46 sivua

**Päivämäärä:** 8.1.2026

---

Metaani on hiilidioksidin jälkeen tärkein ilmastomuutosta aiheuttava kasvihuonekaasu ja sen pitoisuus ilmakehässä on kasvanut nopeasti viimeisen vuosisadan aikana. Luonnontilaiset suot muodostavat merkittävän osan globaaleista metaanipäästöistä, mutta näiden päästöjen arvioimiseen liittyy yhä huomattavia epävarmuuksia. Soiden metaanipäästöille on tyypillistä runsas lyhyen aikavälin vaihtelu, jota ohjaavat prosessit ja niiden yhteisvaikutukset tunnetaan edelleen puutteellisesti. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin lämpötilan, pohjaveden korkeuden ja ekosysteemin kokonaisperustuotannon vaikutuksia ombrotrofisen, mikrotopografialtaan vaihtelevan boreaalisen suon metaanivoiden lyhyen aikavälin vaihteluun. Metaanivoiden vaihtelua analysoitiin erikseen kuivemmilla mätäspinoilla ja kosteammissa painanteissa.

Havaitut metaanivuot olivat suurempia kosteilla kuin kuivilla mittauspisteillä. Tarkasteltavista muuttujista metaanivoiden vaihteluun vaikutti voimakkaimmin lämpötila. Kosteilla mittauspisteillä ilman lämpötilan nousu kasvatti metaanivoita, kun taas kuivilla mittauspisteillä havaittiin epälineaarinen vaste maaperän lämpötilan ja metaanivuon välillä. Matalissa lämpötiloissa päästöt ensin kasvoivat lämpötilan noustessa, mutta kääntyivät laskuun lämpötilan saavuttaessa noin kymmenen astetta. Myös pohjaveden korkeus ja ekosysteemin kokonaisperustuotanto vaikuttivat metaanivoiden suuruuteen kosteilla mittauspisteillä, mutta kuivilla pisteillä niiden vaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevää.

Tutkielman tulokset tukevat käsitystä siitä, että mikrotopografian ohjaamat ympäristöolot muokkaavat merkittävästi metaanipäästöjä säätelevien prosessien suuntaa ja voimakkuutta, korostaen tarvetta huomioida paikallinen vaihtelu ja ympäristötekijöiden yhteisvaikutukset metaanipäästöjen mallinnuksessa.

---

**Avainsanat:** Kasvihuonekaasu, metaani, suo, soiden ilmastovaikutukset

# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>4</b>
1.1	Metaanin lähteet ja merkitys kasvihuonekaasuna	4
1.2	Ombrotrofiset keidassuot ekosysteemienä	5
1.3	Metaanivuon muodostuminen: tuotanto, kulutus ja kulkeutuminen	6
1.4	Suon metaanivuon suuruutta ohjaavat ympäristötekijät	7
1.5	Tutkimuksen tavoitteet	9
<b>2</b>	<b>Aineisto ja menetelmät</b>	<b>11</b>
2.1	Tutkimusalue	11
2.2	Koeasetelma	11
2.3	Aineiston keruu	13
2.3.1	Metaanivuot	13
2.3.2	Ympäristömuuttujat	16
2.4	Tilastollinen analyysi	18
<b>3</b>	<b>Tulokset</b>	<b>21</b>
3.1	Ympäristöolosuhteet	21
3.2	Metaanivoiden vaihtelu	25
<b>4</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>29</b>
4.1	Metaanivoiden ajallinen ja spatiaalinen vaihtelu	29
4.2	Ympäristötekijöiden vaikutus metaanivoiden vaihteluun	30
4.2.1	Lämpötila	30
4.2.2	Pohjaveden korkeus	31
4.2.3	Ekosysteemin perustuotanto	33
4.3	Tutkimuksen rajoitteet	35
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Kiitokset</b>	<b>38</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>39</b>

# 1 Johdanto

## 1.1 Metaanin lähteet ja merkitys kasvihuonekaasuna

Kasvihuonekaasut, kuten vesihöyry, hiilidioksidi, metaani ja typpidioksidi, absorboivat ja säteilevät takaisin maan pinnalta lähtevää lämpösäteilyä, lämmittäen siten alailmakehää ja maan pintaa. Ilman kasvihuonekaasujen lämmittävää vaikutusta maanpinnan keskilämpötila olisi yli 30 °C alhaisempi, eikä nykyisenkaltainen elämä maapallolla olisi mahdollista (Kweku ym., 2018). Kasvihuonekaasupitoisuudet ilmakehässä ovat kuitenkin nousseet merkittävästi esiteollisesta ajasta nykyyhetkeen, minkä seurauksena niiden ilmasto lämmittävä vaikutus on voimistunut. IPCC:n viimeisimmän ilmastoraportin (2023) mukaan globaali maanpinnan lämpötila oli keskimäärin 1,1 °C korkeampi ajanjaksolla 2011–2020 verrattuna vuosiin 1850–1900.

Metaani on hiilidioksidin jälkeen merkittävin ihmistoiminnan aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä voimistava kasvihuonekaasu (IPCC, 2023). Noin kolmasosa kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttamasta ilmaston lämpenemisestä arvioidaan olevan seurausta metaanin lämmittävästä vaikutuksesta. Metaani on kasvihuonekaasuna suhteellisen lyhytikäinen, vaikuttaen ilmakehässä vain noin 12 vuotta (Forster ym. 2021). Se kuitenkin pidättää energiaa tehokkaammin kuin hiilidioksidi, arviolta 80 ja 27 kertaa tehokkaammin 20 ja 100 vuoden jaksoilla mitattuna. Lyhyen elinikänsä ja korkean lämmityspotentialinsa vuoksi muutokset metaanipäästöissä ovat keskeisessä asemassa lähivuosikymmenien ilmastotavoitteiden saavuttamisessa (OECD, 2025).

Sekä globaalit metaanipäästöt että metaanin pitoisuus ilmakehässä ovat olleet kiihtyvässä kasvussa viimeisen vuosisadan aikana, lukuun ottamatta kasvun väliaikaista pysähtymistä 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen alussa (Saunio ym., 2025). Vuoden 2006 jälkeen metaanipäästöt lähtivät uudelleen voimakkaaseen kasvuun, saavuttaen ennätysellisen kasvunopeuden vuonna 2021 (Lan ym., 2025). Viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikaisen runsaan kasvun ilmakehän metaanipitoisuudessa oletetaan johtuvan pääosin biogeenisten päästöjen lisääntymisestä (Basu ym., 2022; Nisbet ym., 2023). Koska metaanin tuotanto ja kulutus ovat herkkiä ympäristötekijöiden, kuten lämpötilan muutoksille, luonnollisten metaanipäästöjen oletetaan jatkavan kasvuaan entisestään ilmastonmuutoksen seurauksena (Zhang ym., 2017). Metaanipäästöjen ja niihin vaikuttavien ympäristötekijöiden tutkiminen kattavasti eri ekosysteemeissä ja ilmasto-oloissa on keskeisessä asemassa ilmastomallien kehittämisessä sekä vaikuttavassa ilmastopolitiikassa.

Noin 65 % globaaleista metaanipäästöistä on peräisin ihmisen toiminnasta, kuten öljy- ja kaasuteollisuudesta, maataloudesta, riisin viljelystä ja kaatopaikoilta (Saunois ym., 2025). Luonnollisista metaanin lähteistä suurimpia ovat makeat sisävedet sekä kosteikot, kuten suot (Kirschke ym., 2013; Saunois ym., 2025; IPCC, 2023). Pohjoisten soiden (40–70°N leveyspiirit) on arvioitu kattavan noin 11 % kaikista maailman metaanipäästöistä (Abdalla ym., 2016), mutta kosteikkojen metaanitaseiden määrittämisessä ja päästöjen tulevan kehityksen ennustamisessa on vielä huomattavia epävarmuuksia (Bridgham ym., 2013; Poulter ym., 2017; Saunois ym., 2025). Yhtenä epävarmuustekijänä metaanitaseiden luotettavassa mallintamisessa on luonnollisten metaanipäästöjen runsas lyhyen aikavälin vaihtelu ja tätä vaihtelua ohjailevien ympäristötekijöiden monimutkaiset keskinäiset vuorovaikutukset. Soiden metaanipäästöjä ohjaavia ympäristötekijöitä on tunnistettu olevan esimerkiksi lämpötila, pohjaveden korkeus, maaperän pH, kasvillisuustyyppi ja ekosysteemin kokonaisperustuotanto (GPP, engl. gross primary production) (Abdalla ym., 2016; Rinne ym., 2018; Satriawan ym., 2023; Turetsky ym., 2014). Metaanipäästöjen vaihtelua parhaiten selittävät ympäristötekijät vaihtelevat riippuen suotyypistä sekä suonsisäisistä mikrotopografisista piirteistä (Skov, 2014; Turetsky ym., 2014).

## 1.2 Ombrotrofiset keidassuot ekosysteeminä

Suoksi kutsutaan kosteikkoekosysteemiä, jossa korkean pohjaveden ylläpitämissä hapettomissa olosuhteissa osittain hajoamaton orgaaninen aines varastoituu turpeena (Rydin ym., 2006). Suomen maapinta-alasta suota on noin 29 %, josta luonnontilaisena on säilynyt alle puolet (Turunen, 2008). Suomen suot ryhmitellään kasvitieteellisen suoluokituksen mukaan usein seitsemään pääryhmään, joita ovat korvet, rämeet, nevat, letot ja luhdat sekä niiden yhdistelmät neva- ja lettokorvet ja neva- ja lettorämeet (Kaakinen ym., 2018). Pääryhmät on edelleen jaoteltu niiden kasviyhteisöjen rakenteen ja lajikoostumuksen mukaan suotyypeiksi. Etenkin suuremmat suot edustavat harvoin vain yhtä suotyyppiä, vaan niitä esiintyy yhden suon sisällä useampia. Ilmasto ja topografia ohjaavat suotyyppien yhdistelmien muodostumista suoyhdistymätyypeiksi (Kalliola, 1973). Suoyhdistymätyypit voidaan jakaa esimerkiksi eri ilmastollisiin suoyhdistymätyyppeihin, joita ovat keidassuot, aapasuot, rinne- ja palsasuot sekä eteläiset sarasuot (Kaakinen ym., 2018). Suotyyppien ja suoyhdistymätyypien luokittelussa on eroja kielten välillä ja termien käyttö on toisinaan epä johdonmukaista myös kielen sisällä, minkä vuoksi kansainvälisestä kirjallisuudesta suoran käännökseen löytäminen voi olla vaikeaa (Rydin ym., 2006). Tässä tutkielmassa käytän englanninkieliselle termille 'bog' suomennosta ombrotrofisen suo ja termille 'fen'

minerotrofinen suo, kuten Rydin ym. (2006). Ombrotrofiset suot saavat ravinteensa ja vetensä pääasiallisesti sadeveden ja kuivalaskeuman mukana, kun taas minerotrofisille soille valuu vettä ja ravinteita myös ympäristöstä (Kaakinen ym., 2018).

Keidassuot ovat reunojaan lukuun ottamatta tyypillisesti vähäpuustoisia tai puuttomia suo-yhdistymiä, joiden keskiosat ovat muuta suota korkeammalla (Kaakinen ym., 2018, Rydin ym., 2006). Turvekerros on suon keskiosissa niin paksu, että kasvillisuus ei ole yhteydessä kivennäismaan veteen. Keidassoiden keskiosat ovat siis ombrotrofisia, mikä tekee keidassoista niukkaravinteisia ja happamia verrattuna muihin suotyyppeihin. Keidassoille on tyypillistä pohjaveden korkeuden runsas alueellinen vaihtelu suon sisällä, mikä on seurausta eri mikrotopografisten piirteiden, kuten kuivempien mättäiden eli kermien ja kosteampien painanteiden eli kuljujen vuorottelusta. Kuljuissa, jossa pohjavesi on korkealla, kasvaa tavallisesti tuuletussolukollisia sarakasveja (Cyperaceae) (Korrensalo ym., 2018).

Tuuletussolukko mahdollistaa hapen kuljetuksen kasvin juurille, kun ympäröivä maa on kyllästynyt vedellä. Sarakasvien lisäksi tyypillisiä tuuletussolukollisia kasveja ovat mm. järviruoko (*Phragmites australis*) ja riisi (*Oryza sativa*) (Steffens ym., 2011; van den Berg ym., 2020) Kuivemmille mätäspinoille tyypillisiä lajeja ovat tuuletussolukottomat varvut, kuten variksenmarja (*Empetrum nigrum*) ja kanerva (*Calluna vulgaris*). Keidassoiden reunaosat ovat usein ravinteisuudeltaan minerotrofisia (Kaakinen ym., 2018).

### 1.3 Metaanivuon muodostuminen: tuotanto, kulutus ja kulkeutuminen

Metaanivuolla tarkoitetaan metaanin virtausta ilmakehän ja ekosysteemin välillä tiettyinä ajanhetkenä. Suon metaanivuon suuruus riippuu metaanin mikrobiologisen tuotannon ja kulutuksen välisestä suhteesta (Hanson & Hanson, 1996; Le Mer & Roger, 2001).

Metaanivuo on positiivinen silloin, kun ekosysteemi toimii metaanin lähteenä, eli metaanin tuotanto on suurempaa kuin sen kulutus.

Soilla metaania (CH<sub>4</sub>) syntyy pääasiassa pohjavedenpinnan alapuolella, kun orgaaninen aines hajoaa hapettomissa olosuhteissa (Hanson & Hanson, 1996; Le Mer & Roger, 2001).

Orgaanisen aineksen hajoaminen maaperässä etenee vaiheittain ja siihen osallistuu useita mikrobiryhmiä. Anaerobisen hajoamisprosessin viimeistä vaihetta, jossa metaania tuotetaan metanogeenisten arkeonien aineenvaihdunnan lopputuotteena, kutsutaan metanogeneesiksi. Metanogeneesi on vallitseva energia-aineenvaihdunnan prosessi olosuhteissa, jossa happea (O) tai muita tyypillisiä elektronin vastaanottajia, kuten nitraatti- (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) tai sulfaatti-ioneja (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ei ole saatavilla. Soilla metanogeeniset arkeonit tuottavat metaania kahta pääasiallista

reittiä pitkin: asetoklastisella metanogeesillä ja hydrogenotrofisella metanogeesillä. Asetoklastisessa metanogeesissä asetaatti ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) hajoaa karbonyyliryhmäksi ( $\text{C}=\text{O}$ ) ja metyyliiryhmäksi ( $\text{CH}_3$ ), mitä seuraa karbonyyliryhmän hapettuminen hiilidioksidiksi ( $\text{CO}_2$ ) ja metyyliiryhmän pelkistyminen metaaniksi (Lyu ym., 2018). Hydrogenotrofisessa metanogeesissä vetymolekyyli ( $\text{H}_2$ ) hapettuu vetyioniksi ( $\text{H}^+$ ) ja hiilidioksidi pelkistyy metaaniksi. Vetymolekyylin sijasta myös esimerkiksi formiaatti ( $\text{HCOO}^-$ ) voi toimia hydrogenotrofisessa metanogeesissä elektronin vastaanottajana. Biologista metaanin tuotantoa on pitkään ajateltu tapahtuvan ainoastaan täysin hapettomissa olosuhteissa, mutta viime vuosikymmenten aikana sen on havaittu olevan mahdollista myös hapen läsnä ollessa (Angle ym., 2017; Keppler ym., 2009; Perez-Coronel & Michael Beman, 2022; Q. Wang ym., 2021) Arviot hapellisen metaanintuotannon osuudesta globaalissa metaanibudjetissa vaihtelevat, mutta sen merkityksen soiden kokonaispäästöissä voidaan olettaa olevan vähäinen (Bridgham ym., 2013; Bruhn ym., 2012).

Turpeen hapettomasta kerroksesta metaania vapautuu ilmakehään kolmea kuljetusreittiä: diffuusiolla turpeen ja ilmakehän välillä, tuuletussolukollisten putkilokasvien kautta sekä metaania sisältävien ilmakuplien vapautuessa spontaanisti maaperästä ilmakehään (Le Mer & Roger, 2001). Jos pohjavedenpinta on maanpinnan alapuolella eikä suon pinta ole saturoitunut vedellä, osa metanogeenisten arkeonien tuottamasta metaanista hapettuu hiilidioksidiksi ennen vapautumistaan ilmakehään, kun metanotrofiset mikrobit eli metanotrofit käyttävät sitä energiantuotannossaan turpeen hapellisessa kerroksessa. Valtaosa metanotrofeista on aerobisia eliöitä, eli ne tarvitsevat happea aineenvaihdunnassaan. Metaanin hapetusta pidettiin tiukasti aerobisena reaktiona lähes sadan vuoden ajan, mutta nykyään tiedetään, että osa metanotrofeista hapettaa metaania anaerobisesti käyttäen elektronin vastaanottajana esimerkiksi sulfaatti- tai nitraatti-iona (Guerrero-Cruz ym., 2021). Soilla metaanin hapetusta tapahtuu pääasiassa pohjavedenpinnan yläpuolella turpeen hapellisissa kerroksissa sekä rahkasammalkerroksessa, jossa metanotrofiset mikrobit elävät osittain endofyyttisesti rahkasammalten hyaliinisoluissa (Le Mer & Roger, 2001; Raghoebarsing ym., 2005). Arviot siitä, kuinka suuri osa tuotetusta metaanista hapettuu hiilidioksidiksi ennen kuin se vapautuu ilmakehään vaihtelevat noin 60–90 % välillä (Le Mer & Roger, 2001).

#### **1.4 Suon metaanivuon suuruutta ohjaavat ympäristötekijät**

Pohjaveden korkeus on keskeinen soiden ekologiaa ja kasvihuonekaasupäästöjen suuruutta ja suhdetta määrittävä tekijä. Pohjavedenpinta erottelee karkeasti toisistaan turpeen hapellisen ja

hapettoman kerroksen, säädellen siten metaanin ja hiilidioksidin mikrobiologista tuotantoa ja kulutusta (J. L. Bubier & Moore, 1994; Evans ym., 2021; Turetsky ym., 2014). Pohjaveden ollessa korkealla metaanin tuotannolle suotuisa hapeton turvekerros kasvaa ja metaanin hapetuksen mahdollistavan hapellisen kerroksen tilavuus pienenee. Pohjaveden korkeus kontrolloi mikrobiologisten prosessien lisäksi esimerkiksi kasvillisuuden koostumusta ja vaikuttaa näin suon metaanipäästöihin myös välillisesti (Kotiaho ym., 2013; Riutta ym., 2020; Rydin ym., 2006). Kosteus ja hapekkuus rajoittavat oleellisesti kasvilajien esiintymistä ja siten määrittävät millainen kasvillisuus alueelle muodostuu. Esimerkiksi kosteisiin ja vähähappisiin olosuhteisiin sopeutuneiden tuuletussolukollisten putkilokasvien, kuten sarojen, on havaittu lisäävän suon metaanipäästöjä tehostamalla metaanin kulkeutumista turpeen hapettomista kerroksista ilmakehään (Riutta ym., 2020). Kuivemmillä alueilla esiintyvät varvut voivat puolestaan vähentää suon metaanipäästöjä. Tutkimukset ovat raportoineet positiivisen korrelaation pohjaveden korkeuden ja metaanivoiden välillä (esim. Bubier ym., 2005; Lai, 2009; Turetsky ym., 2014). Vaikka metaanivoiden on laajasti osoitettu olevan riippuvaisia pohjaveden korkeudesta etenkin vedenpinnan vaihtelun ollessa suurta, selvää suhdetta metaanivuon ja pohjaveden korkeuden välillä ei ole havaittu kaikissa tutkimuksissa (Korrensalo ym., 2018; Veretennikova & Duykarev, 2021; Jackowicz-Korczyński ym., 2010; Rinne ym., 2018).

Lämpötilaa pidetään pohjaveden korkeuden ohella yhtenä tärkeimpänä soiden metaanivoiden ajallista vaihtelua selittävänä tekijänä (Granberg ym., 2001; Turetsky ym., 2014) ja se toimii keskeisenä ennustavana tekijänä kosteikoiden metaanipäästöjä ennustavissa malleissa (Aalto ym., 2025; Walter & Heimann, 2000). Lämpötila vaikuttaa suoraan metaania tuottavien ja kuluttavien mikrobien aineenvaihdunnan nopeuteen, mutta myös epäsuorasti esimerkiksi säätelemällä GPP:tä (Rinne ym., 2018). Maan lämpötilan nousun on havaittu lisäävän metanogeenien ja metanotrofiin aktiivisuutta noin 20–30 °C saakka, jonka jälkeen mikrobiaktiivisuus vakiintuu tai kääntyy laskuun (Dunfield ym., 1993; Metje & Frenzel, 2005; Szafranek-Nakonieczna & Bennicelli, 2010). Lämpötilan nousun onkin useissa aiemmissa tutkimuksissa raportoitu olevan yhteydessä korkeampiin metaanivoihin (Ding & Cai, 2007; Korrensalo ym., 2018; Laine ym., 2007) vaikka tutkimusten välillä onkin huomattavaa vaihtelua (Couwenberg & Fritz, 2012). Lämpötilan ja metaanivoiden suuruuden suhde ei ole yksiselitteinen, vaan siihen vaikuttavat muut ympäristötekijät, kuten pohjaveden korkeus, ekosysteemin tuotanto ja kasvillisuuden rakenne (Pypker ym., 2013; Zhang ym., 2021). Esimerkiksi Pypker ym. (2013) havaitsivat maaperän lämpötilan selittävän

metaanivoiden vaihtelua paremmin silloin, kun ekosysteemi toimii hiilidioksidin nieluna kuin silloin, kun ekosysteemi toimii hiilidioksidin lähteenä.

Pohjaveden korkeuden ja lämpötilan lisäksi suon metaanivuon ajalliseen vaihteluun vaikuttavat merkittävästi GPP ja kasvillisuuden koostumus, sekä vähäisemmässä määrin myös muut ympäristötekijät. Metaania tuottavat mikrobit käyttävät substraattinaan pääasiassa tuoreita hiiliyhdisteitä, kuten kasvien juurieritteitä (Rinne ym., 2018; Ström ym., 2003, 2005). Substraatin saatavuus ja laatu asettavat rajat metaanintuotannolle ja kulutukselle ja säätelevät siten suon metaanivoiden suuruutta (Couwenberg & Fritz, 2012). Kasvillisuuden tyyppi ja koostumus vaikuttavat metaanivoiden suuruuteen substraatin määrän ja laadun lisäksi esimerkiksi säätelemällä metaanin ja hapen kulkeutumista tuuletussolukkojen kautta turpeen ja ilmakehän välillä (Abdalla ym., 2016). Kokonaisperustuotantoa (GPP), eli kasvillisuuden fotosynteesissä orgaaniseen ainekseen sitoman hiilen määrää tietyssä ajanjaksona, voidaan käyttää indikaattorina juuri yhteytetyn hiilen määrästä (Rinne ym., 2018). Metaanivoiden suuruuden on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu olevan positiivisesti yhteydessä GPP:hen, usein seuraten GPP:n vaihtelua viiveellä (Lai ym., 2014; Rinne ym., 2018; Wang ym., 2018). Muita keskeisiä soiden metaanivoihin vaikuttavia ympäristötekijöitä ovat esimerkiksi maaperän pH ja ravinteikkuus (Juutinen ym., 2018; Le Mer & Roger, 2001). Optimaalinen pH metanogeneesille vaihtelee tavallisimmin neutraalin (pH 7) ja lievästi emäksisen välillä, mutta ihanteelliset olosuhteet vaihtelevat ympäristön mukaan (Le Mer & Roger, 2001). Lauhkeilla ja subarktisilla happamilla soilla optimaalinen pH metanogeneelle oli 5,5–7,0 ja metanotrofeille 5,0–6,5 (Dunfield ym., 1993). Metanogeenit ovat metanotrofeja herkempiä pH:n muutoksille, minkä vuoksi muutokset pH:ssa rajoittavat voimakkaammin metaanin tuotantoa kuin sen kulutusta (Le Mer & Roger, 2001). Maaperän ravinteikkuus vaikuttaa keskeisesti kasvillisuuden koostumukseen ja perustuotannon määrään, ja siten sekä metaanin tuotantoon että sen kuljetukseen (Juutinen ym., 2018). Koska pH ja maaperän ravinteikkuus pysyvät yksittäisellä alueella pääsääntöisesti melko vakaina, niiden vaikutus metaanivoiden lyhyen aikavälin vaihteluun on suhteellisen vähäinen.

## 1.5 Tutkimuksen tavoitteet

Vaikka soiden metaanipäästöjä ja niitä ohjaavia tekijöitä on tutkittu laajasti, valtaosa tutkimuksista on keskittynyt minerotrofisiin soihin (Korrensalo ym., 2018). Kattava tutkimustieto metaanipäästöjen suuruudesta, käyttäytymisestä ja pienipiirteisestä vaihtelusta

eri suotyypeillä ja erilaisissa ilmasto-oloissa on ensiarvoisen tärkeää, kun halutaan luotettavasti mallintaa nykyisiä ja tulevia metaanipäästöjä Suomessa tai globaalisti.

Pro gradu -työssäni tarkastelen Kanta-Hämeessä sijaitsevan luonnontilaisen ombrotrofisen keidassuon metaanivoiden vaihtelua ja sitä ohjaavia ympäristötekijöitä kesinä 2020–2023. Tutkimus perustuu manuaalisesti suljetulla kammiomittausmenetelmällä kerättyyn metaanivuoaineistoon. Tutkimuksessa tarkasteltavat ympäristömuuttujat ovat maaperän lämpötila 5 cm syvyydessä, ilman lämpötila, pohjaveden korkeus, ekosysteemin vuorokauden perustuotanto (vrkGPP) ja vihreän kasvillisuuden peittävyys.

Tutkielman tutkimuskysymykset ja niihin vastaavat hypoteesit (**H**):

1. Miten metaanivuot vaihtelevat yleisesti ajallisesti ja mittauskausien sisällä?  
**H1:** Metaanivoiden suuruudessa esiintyy vuodenaikaisvaihtelua, voiden ollessa suurimmillaan keski- ja loppukesästä.
2. Miten metaanivuot eroavat kuivien ja kosteiden mittauspisteiden välillä?  
**H2:** Metaanivuot ovat suurempia kuivilla kuin kosteilla mittauspisteillä.
3. Mitkä ympäristömuuttujat selittävät parhaiten metaanivoiden ajallista vaihtelua, ja miten ne vaikuttavat vuon suuruuteen?  
**H3:** Lämpötila selittää metaanivoiden vaihtelua parhaiten tarkasteltavista ympäristömuuttujista.  
**H4:** Lämpötilan nousu ja vrkGPP:n kasvu kasvattavat metaanivuota.  
**H5:** Metaanivuot kasvavat pohjaveden pinnan ollessa korkealla. Jos pohjaveden korkeuden vaihtelu on vähäistä, se ei välttämättä merkitsevästi selitä metaanivoiden vaihtelua.

## 2 Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Tutkimusalue

Tutkielmassa tarkasteltava Ilmatieteen laitoksen mittausasema sijaitsee Liesjärven kansallispuistoon kuuluvalla Tervalamminsuolla Kanta-Hämeen maakunnassa, Tammelassa (N60°38,734', E23°58,320'). Tervalamminsuu on suotyypiltään ombrotrofinen keidassuo ja se jakaantuu kuivempaan, puustoltaan runsaampaan länsiosaan ja märempään, vähäpuustoisempaan itäosaan. Vuonna 2023 puuston poikkipinta-ala oli länsipuolella 3 m<sup>2</sup>/ha ja itäpuolella 0,55 m<sup>2</sup>/ha. Tutkimusalue sijaitsee suon itäosassa. Alue on mikrotopografialtaan vaihtelevaa pengerr-painannekuvioista mäntysuota, jossa kosteammat kuljut ja kuivemmat mätäsalueet vuorottelevat. Puusto tutkimusalueella on vähäistä ja koostuu harvoista, pääosin alle kolmemetriseistä männyistä (*Pinus sylvestris*, Pinaceae). Rahkasammal (*Sphagnum* sp., Sphagnaceae) peittää valtaosaa suon pinnasta, kuivemmillä alueilla hallitsevat varvut, kuten kanerva (*Calluna vulgaris*, Ericaceae) ja variksenmarja (*Empetrum nigrum*, Ericaceae). Muita tyypillisiä lajeja alueella ovat esimerkiksi tupasvilla (*Eriophorum vaginatum*, Cyperaceae) ja suopursu (*Ledum palustre*, Ericaceae). Kasvitieteellisessä suotyypijärjestelmässä tutkimusalueen kosteat pinnat luokitellaan lyhytkorsinevaksi ja kuivemmat pinnat rahkarämeeksi (Laine & Vasander, 1990, Kaakinen ym., 2018). Turvekerros lyhytkorsinevoilla on yleensä paksu, keskimäärin noin kaksi metriä syvä ja on muodostunut heikosti maatuneesta tupasvillarahkaturpeesta. Rahkarämeillä paksu turvekerros koostuu maatumattomasta rahkaturpeesta sekä varpujen ja tupasvillan jäännöksistä. Tutkimusalue kuuluu eteläboreaaliseen ilmastovyöhykkeeseen. Vuotuinen ilman keskilämpötila pitkän aikavälin tarkastelujaksolla 1991–2020 oli 5,2 °C ja sadesumma noin 621 mm, mitattuna Ilmalan havaintoasemalla Jokioisilla (N60°48,838', E23°29,895', noin 32 km tutkimusalueelta luoteeseen) (Jokinen ym., 2021).

### 2.2 Koeasetelma

Tutkimusalueen kaasumittauspisteet on valittu kattamaan mahdollisimman hyvin alueen mikrotopografista vaihtelua, kuten kosteusolosuhteita ja lajistoa. Tämä mahdollistaa ekosysteemin pienen mittakaavan piirteiden, esimerkiksi pohjaveden korkeuden ja kasvillisuuden peittävyuden, tarkastelun suhteessa metaanivoihin. Tutkimusalueella on kahdeksan kaasumittauspistettä, joista pisteet 1–4 ovat kuivempia varpuvaltaisia mätäspintoja ja pisteet 5, 6 ja 8 kosteampia saravoitettavia painanteita (taulukko 1). Mittauspiste 7 sijaitsee kosteiden mittauspisteiden ryhmittymässä, mutta on muita kosteita pisteitä kuivempi ja

kasvaa sarojen lisäksi runsaasti varpuja. Tässä tutkielmassa myös mittauspiste 7 ryhmitellään kosteaksi mittauspisteeksi. Mittauspisteet on asetettu lähelle toisiaan pitkospuiden ympärille siten, että kuivat pisteet (1–4) sijaitsevat noin 30 metriä luoteeseen kosteista pisteistä (5–8) katsottuna (kuva 1). Liikkuminen alueella tapahtuu pääosin pitkospuita pitkin, jotta voitaisiin välttää häiriötä maaperään ja kasvillisuuteen.

Taulukko 1. Mittauspisteillä esiintyvät putkilokasvilajit ja niiden kauluksensisäinen peittävyys vuonna 2021. Mittauspisteet 1–4 ovat kuivia mätäspintoja ja 5–8 kosteita kuljuja. Suomenkieliset nimet merkitty yläindekseihin. (Ilmatieteen laitos, julkaisematon aineisto)

Mittauspiste	Laji (peittävyys % vuonna 2021)
1	<i>Calluna vulgaris</i> <sup>1</sup> (25), <i>Empetrum nigrum</i> <sup>2</sup> (7), <i>Rubus chamaeromus</i> <sup>3</sup> (5), <i>Drosera rotundifolia</i> <sup>4</sup> (3), <i>Eriophorum vaginatum</i> <sup>5</sup> (2), <i>Vaccinum oxycoccos</i> <sup>6</sup> (1)
2	<i>Empetrum nigrum</i> (60), <i>Calluna vulgaris</i> (7), <i>Drosera rotundifolia</i> (3), <i>Andromeda polifolia</i> <sup>9</sup> (2), <i>Eriophorum vaginatum</i> (2), <i>Vaccinum uliginosum</i> <sup>8</sup> (1), <i>Pinus sylvestris</i> <sup>7</sup> (1), <i>Rubus chamaeromus</i> (1), <i>Vaccinum oxycoccos</i> (1)
3	<i>Calluna vulgaris</i> (35), <i>Empetrum nigrum</i> (3), <i>Rubus chamaeromus</i> (3), <i>Eriophorum vaginatum</i> (2), <i>Pinus sylvestris</i> (1), <i>Vaccinum oxycoccos</i> (1)
4	<i>Calluna vulgaris</i> (45), <i>Empetrum nigrum</i> , (10), <i>Rubus chamaeromus</i> (7)
5	<i>Trichophorum cespitosum</i> <sup>10</sup> (17), <i>Calluna vulgaris</i> (5), <i>Eriophorum vaginatum</i> (3), <i>Andromeda polifolia</i> (2), <i>Drosera rotundifolia</i> (1), <i>Vaccinum oxycoccos</i> (1)
6	<i>Eriophorum vaginatum</i> (15), <i>Vaccinum oxycoccos</i> (2), <i>Andromeda polifolia</i> (1), <i>Calluna vulgaris</i> (0,5), <i>Drosera rotundifolia</i> (0,5)
7	<i>Calluna vulgaris</i> (20), <i>Eriophorum vaginatum</i> (7), <i>Vaccinum oxycoccos</i> (3), <i>Andromeda polifolia</i> (2), <i>Rubus chamaeromus</i> (1), <i>Drosera rotundifolia</i> (0,5), <i>Pinus sylvestris</i> (0,5)
8	<i>Andromeda polifolia</i> (7), <i>Eriophorum vaginatum</i> (4), <i>Vaccinum oxycoccos</i> (2), <i>Drosera rotundifolia</i> (0,5)

<sup>1</sup>Kanerva, <sup>2</sup>variksenmarja, <sup>3</sup>suomuurain, <sup>4</sup>pyöreälehtikihokki, <sup>5</sup>tupasvilla, <sup>6</sup>isokarpalo, <sup>7</sup>suokukka, <sup>8</sup>juolukka, <sup>9</sup>metsämänty, <sup>10</sup>tupasluikka



Kuva 1. Tervalamminsuon tutkimusalue kaavakuvana. Kaasumittauspisteet (1–8) merkitty valkoisin nelioin ja pyörrekovarianssimasto punaisella ympyrällä. Pitkospuut merkitty oranssilla katkoviivalla.

## 2.3 Aineiston keruu

Kaikki tutkielmassa käytettävät metaanivuo- ja ympäristömuuttuja-aineistot on saatu käyttöön Ilmatieteen laitokselta. Osallistuin itse metaanivuoaineiston keräämiseen ja kammiomittausten yhteydessä tehtyihin ympäristömuuttujien oheismittauksiin kausityöntekijänä kesällä 2023. Metaanivoita ja maaperän lämpötilaa mitattiin vuosina 2020–2023 mittauskausien aikana pääsääntöisesti noin kahden-kolmen viikon välein. Mittauskauden ajoitus ja pituus vaihtelivat vuosien välillä johtuen muutoksista työvoiman määrissä sekä priorisoinnista eri projektien välillä. Mittauskausi oli vuonna 2020 25.6.–6.8., vuonna 2021 14.5.–1.10., vuonna 2022 19.5.–25.8. ja vuonna 2023 22.5.–24.8. Metaanivuomittauksia tehtiin vain sateettomalla säällä, jotta vältettiin veden joutuminen mittauslaitteen sisälle. Pohjavedenpinnan korkeutta, hiilidioksidin nettovaihtoa GPP:n mittaamista varten ja ilman lämpötilaa mitattiin tutkimusalueella jatkuvatoimisesti ympäri vuoden. Metaanivoiden laskenta ja kaulusten sisäisen kasvillisuuden kartoitus suoritettiin Ilmatieteen laitoksen toimesta.

### 2.3.1 Metaanivuot

Metaanivuoaineisto kerättiin kaasumittauspisteiltä käyttäen suljettua staattista kammiomittausmenetelmää, joka on yleisin ja laajasti hyväksytty tapa maaperän metaanivoiden mittaukseen (Livingston & Hutchinson, 1995; Pihlatie ym., 2013). Kammiomittausmenetelmä mahdollistaa metaanivoiden tarkastelun suhteessa ympäristön pienipiirteisen vaihteluun, ja sopii siksi käytettäväksi kosteusoloiltaan ja kasvillisuudeltaan vaihtelevalla tutkimusalueella (S. Christensen ym., 1996; Hendriks ym., 2010). Menetelmä perustuu kohdekaasun pitoisuusmuutokseen maan pinnalle asetetussa kammiossa lyhyen mittauksen aikana. Tarkasteltavan kaasun pitoisuus kammiossa joko kasvaa tai vähenee mittauksen aikana, riippuen siitä onko kammion rajaama alue kaasun nielu vai lähde.

Mittauksissa käytettiin suorakulmion muotoista alumiinikammiota, joka oli leveydeltään 60 cm, syvyydeltään 60 cm ja korkeudeltaan 30 cm (kuva 2). Kammion sisäistä lämpötilaa mitattiin digitaalisella langallisella ulko-/sisälämpömittarilla, jonka näyttö oli kammion ulkopuolella ja anturijohto oli pujotettu tiiviistä aukosta kammion sisälle. Kammion sisään oli asennettuna tuuletin, joka sekoitti kammion sisäistä ilmaa tasaten mitattavien kaasujen pitoisuutta kammion ilmatilassa. Ilman perusteellisella sekoittumisella voidaan varmistaa mitattavan kaasunäytteen edustavuus sekä vähentää kammion aiheuttamaa häiriötä kaasun kulkeutumiselle (Christiansen ym., 2011). Tuulettimen pyörimisnopeus säädettiin mahdollisimman alhaiseksi niin, että se ei kuitenkaan lakannut pyörimästä mittauksen aikana

(Koskinen ym., 2014). Kammio asetettiin mittauksen ajaksi maahan pysyvästi asennetuille neliönmuotoiselle metallikauluksille (60 cm x 60 cm, leveys x syvyys), jolloin kammio saatiin suljettua tiiviisti ilman ylimääräistä häiriötä maaperään. Valtaosalla mittauspisteistä kauluksen yläreuna jäi hieman maanpinnan alapuolelle, jolloin kammion sisätilan todellinen korkeus oli alle 30 cm. Metaanin pitoisuusmuutokset kammiossa mitattiin ja tallennettiin käyttäen mittauksen ajan jatkuvasti mittaavaa Licor LI-7810-kaasuanalysointilaitetta, jonka virtausnopeus oli 0,25 l minuutissa (LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, Yhdysvallat). Analysointilaitteen ja kammion välille liitettiin letkut (ulkohalkaisija 6 mm, sisähalkaisija 4 mm) sisään- ja ulostuloilmalle. Analysointilaitteen sisääntuloletkussa oli asennettuna 1 µm filtri.



Kuva 2. Metaanivuomittauksissa käytetty alumiinikammio asetettuna kaulukselle. Vasemmalla kaasuanalysointilaitteeseen johtavat sisään- ja ulostuloletkut, keskellä kammion sisälle johtava lämpömittari ja oikealla kammion sisällä olevan tuulettimen akku ja nopeussäädin. Kuva: Veera Bilaletdin.

Kammio tuuletettiin ennen jokaista mittausta kammion sisäisen lämpötilan ja kaasupitoisuuksien tasaamiseksi ilmakehän olosuhteita vastaavaksi. Kammio laskettiin

kaulukselle rauhallisesti, jotta äkillinen ilmanpaineen vaihtelu ei aiheuttaisi häiriötä maaperän ja kammion ilmatilan välisessä kaasujenvaihdossa (Christiansen ym., 2011; Korkiakoski ym., 2017). Metaanivuomittausten kesto vuosina 2020 ja 2021 oli viisi minuuttia ja vuosina 2022 ja 2023 kolme minuuttia. Kammionsisäinen lämpötila mittauksen alussa ja lopussa kirjattiin kenttälomakkeeseen, jotta kammion sulkeuman aikainen keskilämpötila voitiin huomioida vuon laskennassa. Metaanipitoisuuden muutosta kammion sisällä seurattiin mittauksen ajan Licor-kaasuanalysaattoriin wifi-yhteydellä yhdistetyltä tabletilta tai suoraan analysaattorin näytöltä. Mikäli metaanipitoisuuden kehityksessä tapahtui mittausvirheeksi tulkittavia poikkeavuuksia, mittaus uusittiin. Tyypillisiä poikkeavuuksia olivat esimerkiksi metaanikuplan vapautumisesta tai mittauslaitteen kuumentumisesta johtuvat voimakkaat metaanipitoisuuden vaihtelut. Aurinkoisella ja lämpimällä säällä mittauslaitteen ylikuumentuminen pyrittiin estämään suojaamalla sitä suoralta auringonpaisteelta. Liikkumista kammion ympärillä mittauksen aikana pyrittiin välttämään, sillä maan painuminen voi lisätä hetkellisesti metaanin vapautumista.

Metaanivuo määritetään kammiosulkeuman aikana mitatun metaanipitoisuuden muutosnopeuden perusteella. Mittauskohtaisen metaanipitoisuuden muutoksen laskemiseksi metaanin pitoisuusajasarjaan sovitettiin eksponentiaalinen regressioyhtälö, kuten kuvattu Korkiakoski ym. (2017). Metaanin pitoisuusmuutos ( $C$ ) ajassa ( $t$ ) laskettiin:

$$C(t) = a_{\text{exp}} + b_{\text{exp}} \exp(c_{\text{exp}}t),$$

jossa  $t$  kuvaa aikaa kammion sulkemisesta ja  $a_{\text{exp}}$ ,  $b_{\text{exp}}$ , ja  $c_{\text{exp}}$  ovat yhtälön parametreja.

Pitoisuusmuutos kammion sulkeutuessa ( $b_{\text{exp}} \times c_{\text{exp}}$ ) saadaan, kun derivoidaan eksponentiaalinen yhtälö ajan suhteen ja tarkastellaan sovituksen kulmakerrointa ajan hetkellä  $t = 0$ . Verrattuna yleisesti käytettyyn lineaariseen sovitukseen, eksponentiaalinen sovitus ottaa huomioon kammion aiheuttaman metaanivirtauksen hidastumisen mittauksen loppua kohden (Pihlatie ym., 2013). Virtauksen hidastuminen on seurausta maaperän ja kammion ilmatilan välisen metaanin pitoisuusgradientin pienentymisestä kammiosulkeuman aikana, kun metaania kertyy kammioon.

Lopullinen mittauksen alku- ja loppuaika valittiin voita laskettaessa manuaalisesti. Aloitusajaksi valittiin niin, että mahdollinen kammion sulkemisesta aiheutunut häiriö mittauksessa saatiin poistettua. Lopetusajaksi valittiin yleensä mittauksen todellinen lopetusajaksi, ellei keskellä mittauksia esiintynyt esimerkiksi metaanikuplasta johtuvaa äkillistä muutosta metaanipitoisuudessa. Mittaukset, joissa vähintään 60 sekunnin pituisia häiriötöntä

jaksoa metaanipitoisuuden kehityksessä ei ollut, jätettiin pois. Metaanivuot ( $F$ ,  $\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) laskettiin vuosina 2020–2022 Korkiakoski ym. (2017) mukaan:

$$F = \left( \frac{dC(t)}{dt} \right)_{t=0} \frac{M P V}{R T A} 3600 \frac{s}{h},$$

jossa  $\left( \frac{dC(t)}{dt} \right)_{t=0}$  on eksponentiaalisella regressiolla ( $b_{\text{exp}} \times c_{\text{exp}}$ ) laskettu metaanipitoisuuden muutos ( $\text{ppm s}^{-1}$ ) kammion sulkeutumisen hetkellä (kts. edellinen kappale),  $M$  on metaanin molekulaarinen massa ( $16,042 \text{ g mol}^{-1}$ ),  $P$  on ilmanpaine (Pa, mitattu Jokioisten havaintoasemalla),  $R$  on universaali kaasuvakio ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $T$  on kammiosulkeuman keskiarvoinen lämpötila kammion sisällä,  $V$  on kammion ja kauluksen yhteistilavuus ( $\text{m}^3$ ) ja  $A$  kammion peittämä pinta-ala ( $\text{m}^2$ ). Vuonna 2023 ilmanpaineen tilalla käytettiin ideaalikaasun moolitilavuutta Pihlatie ym. (2013) mukaan. Ilmanpaineen vaikutus vuolaskussa on vähäinen, eikä erilainen laskutapa vuosien välillä siten merkittävästi vaikuta tuloksiin. Aikaisemman tutkimuksen mukaan 1000 Pa:n virhe vastaa noin 1 % muutosta lasketussa vuossa (Pavelka ym., 2018). Positiivinen vuo tarkoittaa metaanin nettopäästöä, eli virtausta ekosysteemistä ilmakehään ja negatiivinen vuo metaanin nettoinielua, eli virtausta ilmakehästä ekosysteemiin.

### 2.3.2 Ympäristömuuttajat

VrkGPP määritettiin alueella mitatusta hiilidioksidivuoaaineistosta eritellyn yhteytysnopeuden ( $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) perusteella. Hiilidioksidinvaihtoa tutkimusalueella mitattiin käyttäen pyörrekovarianssimenetelmää. Pyörrekovarianssimenetelmä mittaa nopealla mittaustaajuudella (tyypillisesti 10 Hz) hiilidioksidipitoisuutta sekä kolmiulotteisen tuulen nopeutta ilmapirtauksissa. Hiilidioksidin nettovaihto ekosysteemin ja ilmakehän välillä määritetään kaasun pitoisuuden ja tuulen nopeuden välisestä kovarianssista (Baldochi ym., 2022). Tervalammingsuolla mittaukset tehtiin 7,2 metrin korkeudessa käyttäen tyypillisiä pyörrekovarianssimenetelmiä (Aubinet ym., 2012). Laitteisto ja menetelmät olivat samat kuin noin kilometrin päässä sijaitsevalla Lettosuon mittausasemalla (kuvattu tarkemmin Korkiakoski ym., 2023), huomioiden kuitenkin mittaustaikkojen eroavaisuudet esimerkiksi lähdealueanalyysissä. Pyörrekovarianssimenetelmällä mitattu vuoaineisto jaettiin tuulen suunnan mukaan kahdeksi lähdealueeksi, josta läntinen sektori ( $250^\circ$ – $350^\circ$ ) edustaa kuivia mittauspisteitä ja eteläinen sektori ( $90^\circ$ – $250^\circ$ ) kosteita mittauspisteitä. Aineistosta laskettiin 30 minuutin keskimääräiset nettohiilidioksidivuot. Jaksot, joilta mitattu 30 minuutin keskimääräinen nettohiilidioksidivuo puuttui, paikattiin käyttäen koneoppimismallia (Vekuri ym., 2023). Pyörrekovarianssimenetelmällä mitattu hiilidioksidivuo koostuu kasvillisuuden

fotosynteesissä sitomasta ja ekosysteemin respiraatioissa vapauttamasta hiilidioksidista. Paikatusta aineistosta eriteltiin tutkielmassa tarkasteltava GPP jakamalla 30 minuutin keskimääräinen nettovuo respiraatioksi ja yhteytykseksi (Korkiakoski ym., 2023).  $\text{VrkGPP:n}$  ( $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ ) mittauspäiviltä laskin 30 minuutin keskimääräisten yhteytysnopeuksien perusteella.

Pohjavedenpinnan korkeutta mitattiin jatkuvasti kahdella automaattisella pietsometrillä (Odyssey Capacitance Water Level Logger, Dataflow Systems Limited, Christchurch, New Zealand), jotka tallensivat dataa tasatunnein. Toinen pietsometri oli asennettu kosteiden ja toinen kuivien kaasumittauspisteiden läheisyyteen. Analyysissä kuivien mittauspisteiden läheisyydestä mitattua pohjaveden korkeutta metaanivuomittauksen aikana käytettiin pisteille 1–4 ja kosteiden mittauspisteiden läheistä tasoa pisteille 5–8. Pohjaveden korkeus on ilmoitettu senttimetreinä maanpinnan tasolta.

Jokaisen kammiomittauksen yhteydessä maaperän lämpötila mitattiin kunkin kauluksen vierestä 5 cm syvyydestä käsikäyttöisellä vastuslämpömittarilla (RTD-lämpömittari, engl. Resistance Temperature Detector) (HH376, Omega Engineering Inc, Norwalk, Connecticut, Yhdysvallat). Mittauskohta pyrittiin valitsemaan niin, että se edusti mahdollisimman hyvin kauluksen sisäisiä olosuhteita. Ilman lämpötilaa mitattiin mittausalueella jatkuvatoimisesti (HMP155, Vaisala Oyj, Vantaa, Suomi). Mittauskausien aikaisia yleisiä sääolosuhteita (sateisuus, vuorokauden keskilämpötila) tarkastelin Jokioisen sääasemadatasta (Ilmatieteen laitos, 2025), jotta niiden vertailu vuosien 1991–2020 pitkän aikavälin vertailujaksoon oli mahdollista.

Vihreän kasvillisuuden peittävyden mittaamiseksi vuosina 2020 ja 2023 mittausten yhteydessä otettiin myös valokuva mittauspisteestä. Vuosina 2021 ja 2022 pisteet kuvattiin osittain eri aikaan mittausten kanssa, kuitenkin noin kahden-kolmen viikon välein mittauskauden aikana. Valokuvat otettiin kohtisuoraa kauluksen yläpuolelta niin, että kauluksen reunat näkyivät kuvassa. Määritin valokuvista kaulusten sisäinen vihreän kasvillisuuden peittävyden Canopeo-sovelluksen avulla. Sovellus laskee kasvillisuuden vihreän peittävyden (%) perustuen kuvan pikseleiden punaisten, vihreiden ja sinisten värien suhteeseen (Patrignani & Ochsner, 2015). Valokuvia puuttui usealta päivältä joko osasta, tai kaikista mittauspisteistä. Lopulta päätin jättää peittävyysarvot pois metaanivoiden vaihtelun mallintamisesta etenkin mittaussarjojen alku- ja loppupään paikkaamiseen (engl. gap filling) liittyvien suurten epävarmuuksien vuoksi. Hyödynsin saatavilla olevien valokuvien

perusteella laskettuja vihreän kasvillisuuden peittävyysarvoja kuivien ja kosteiden mittauspisteiden yleiseen vertailuun.

## 2.4 Tilastollinen analyysi

Suoritin aineiston analysoinnin ja mallinnuksen käyttäen R-ohjelmointikieltä (v. 4.4.0; R core team, 2024). Kuivien ja kosteiden mittauspisteiden välisiä eroja metaanivoiden ja ympäristömuuttujien (maaperän lämpötila 5 cm syvyydeltä, pohjaveden korkeus, vrkGPP ja vihreän kasvillisuuden peittävyys) osalta tarkasteltiin käyttäen Welchin t-testiä, R-ohjelmiston `t.test`-funktiolla (R Core Team, 2024). Eroa ympäristömuuttujissa tarkasteltiin vain niiltä päiviltä, jolloin metaanivuomittauksia oli tehty. Metaanivoiden ajallista vaihtelua mittauskausien sisällä ja mahdollista vuodenaikaisuutta tarkastelin visuaalisesti aikasarjakuvaajista.

Ympäristömuuttujien yhteyttä metaanivoiden ajalliseen vaihteluun analysoin käyttäen lineaarista sekamallia `lme4`-paketin `lmer`-funktioilla (Bates ym., 2015). Sovitin mallit erikseen kuivilta ja kosteilta mittauspisteiltä mitatuille metaanivoille sekä erikseen kuvaamaan metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua ja mittauskausien sisäistä vaihtelua metaanivoissa. Käsittelin kuivilta ja kosteilta mittauspisteiltä mitatut metaanivuot erillisinä malleina, sillä kirjallisuuden perusteella oletuksena oli, että kuivat ja kosteat mittauspisteet eroaisivat toisistaan sekä vasteiltaan että voiden suuruudessa (Goodrich ym., 2015; Laine ym., 2007). Testasin mallien sovitusta myös kaikki mittauspisteet sisältävälle aineistolle, mutta kuivien ja märkien pisteiden erottaminen erillisiin malleihin paransi mallien selityskykyä.

Ympäristömuuttujat, joiden suhdetta metaanivoiden vaihteluun tarkasteltiin, olivat maaperän lämpötila 5 cm syvyydeltä, ilman lämpötila, pohjaveden korkeus ja vrkGPP. Maaperän lämpötila aineistossa oli mittauspistekohtainen, vrkGPP ja pohjaveden korkeus määriteltiin erikseen kuiville ja kosteille mittauspisteille ja ilman lämpötila oli yhteinen kaikille mittauspisteille. Mallinnusta varten tutkin muuttujien keskinäisiä riippuvuuksia Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla, käyttäen base R:n `cor.test`-funktiota (R Core Team, 2024).

Useat tilastolliset mallit, kuten esimerkiksi lineaarinen regressiomalli, olettavat vastemuuttujan havaintojen riippumattomuutta (Zuur ym., 2010). Tutkielmassa tarkasteltava metaanivuoaineisto koostuu toistuvista mittauksista määrättyiltä, olosuhteiltaan toisistaan eroavilta mittauspisteiltä. Saman mittauspisteen havainnot voivat olla keskenään samankaltaisempia kuin eri mittauspisteiltä mitatut, eli havainnot eivät ole itsenäisiä. Lineaarinen sekamalli mahdollistaa aineistonsisäisen havaintojen riippuvuuden huomioimisen

satunnaismuuttujina. Asetin mittauspisteet satunnaismuuttujaksi kaikkiin malleihin, minkä lisäksi mittauskausien sisäistä vaihtelua selittäviin malleihin asetin toiseksi satunnaismuuttujaksi mittausvuoden. Tarkastelin mallien jäännösvirheiden jakautumista visuaalisesti residuaalikuvaajista mallin oletusten täyttymisen arvioimiseksi. Otin metaanivoista mallintamista varten logaritmin, jotta lineaarisen sekamallin vaatimukset mallinnettavan muuttajan normaalijakautuneisuudesta, jäännösvirheiden normaalista jakautumisesta sekä homoskedastisuudesta täytyivät. Homoskedastisuudella tarkoitetaan jäännösvirheiden samankaltaista varianssia selittävien muuttujien kaikilla arvoilla.

Ennen varsinaisten mallien muodostamista, tarkastelin yksittäisten ympäristömuuttujien kykyä selittää metaanivuon vaihtelua muuttujakohtaisilla sekamalleilla, jossa selittävinä tekijöinä oli satunnaistekijöiden lisäksi vain yksi kiinteä muuttuja. Vertailin mallien soveltuvuutta BIC-informaatiokriteerin (BIC-arvo) avulla. Lisäsin ensin jokaiselle ympäristömuuttujalle toisen asteen polynomitermin, joka mahdollistaa selittävän tekijän ja metaanivuon logaritmin välisen vasteen taipumisen mallinnuksessa. Jos polynomitermin lisääminen pienensi mallin BIC-arvoa, sovitin muuttujan malliin jatkossa polynomimuotoisena. Kuten lopulliset mallit, loin muuttujakohtaiset sekamallit erikseen kuvaamaan metaanivoiden vaihtelua kuivilla ja kosteilla mittauspisteillä sekä yleisesti ajallisesti ja mittauskauden sisällä.

Lopullisten mallien kiinteiden selittävien tekijöiden valintaan sovelsin niin sanottua ”top-down”-menetelmää, eli etenin monimutkaisimmasta lähtömallista kohti yksinkertaisempaa, optimaalisinta mallia (Zuur ym., 2010). Mallien vertailussa käytin BIC-arvoa sekä mallin selityskykyä ( $R^2_c/R^2_m$ ). Monimutkaisimmassa lähtömallissa oli mukana kaikki metaanivoiden vaihtelua mahdollisesti selittävät ympäristömuuttujat, kuitenkin huomioiden, että niiden keskinäinen korrelaatio ei ollut liian suuri ( $|r| > 0,7$ ) (Dormann ym., 2012). Koska ilman lämpötila ja maaperän lämpötila 5 cm syvyydeltä korreloivat keskenään vahvasti, otin mukaan lähtömalliin näistä vain sen muuttujan, joka muuttujakohtaisessa sekamallissa sai pienemmän BIC-arvon. Jos polynomitermin lisääminen oli muuttujakohtaisessa sekamallissa alentanut mallin BIC-arvoa, lisäsin muuttujan lähtömalliin polynomimuotoisena. Poistin monimutkaisimmasta lähtömallista selittäviä muuttujia vuorotellen, jos niiden poistaminen pienensi mallin BIC-arvoa. Jatkoisin mallin yksinkertaistamista niin kauan, kun BIC-arvo ei enää laskenut ja selityskyky ei merkittävästi parantunut. Kiinteiden selittävien muuttujien valintaan malleja vertailtaessa käytin suurimman uskottavuuden estimointimenetelmää (*Maximum likelihood*). Suurimman uskottavuuden estimointimenetelmä mahdollistaa eri

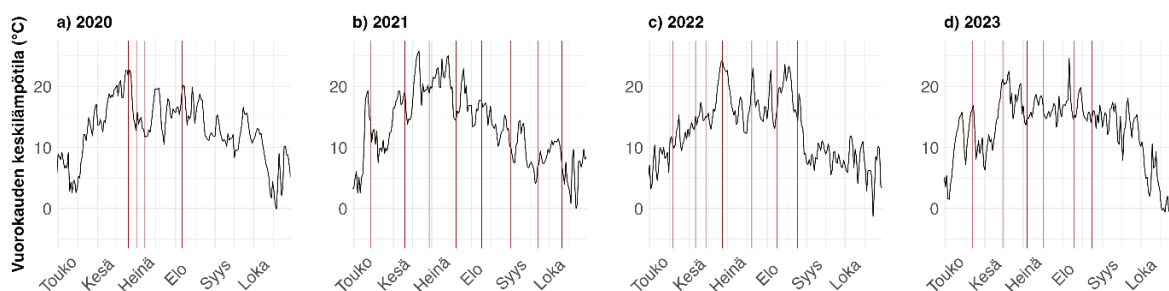
kiinteitä selittäviä muuttujia sisältävien mallien vertailtavuuden, sillä se ei ole selittävien muuttujien rakennetta lopulliseksi (Corbeil & Searle, 1976). Lopulliset mallinnustulokset on esitetty käyttäen rajoitettua suurimman uskottavuuden estimointimenetelmää (*Restricted maximum likelihood*), joka arvioi suurimman uskottavuuden estimointimenetelmää luotettavammin varianssien estimaatit. Rajoitettua suuremman uskottavuuden menetelmää ei voida käyttää mallien vertailuvaiheessa, sillä se sisältää oletuksen selittävien muuttujien rakenteen lopullisuudesta.

Lopullisissa metaanivuon ajallista vaihtelua kuivilla mittauspisteillä selittävässä malleissa kiinteä selittävä tekijä oli maaperän lämpötila 5 cm syvyydessä toisen asteen polynomina. Kosteilla mittauspisteillä metaanivuon yleistä ajallista vaihtelua kuvaavassa mallissa selittävinä tekijöinä oli ilman lämpötila, sekä pohjaveden korkeus toisen asteen polynomina. Metaanivuon mittauskausien sisäistä vaihtelua kosteilla mittauspisteillä kuvaavassa mallissa kiinteinä selittävinä tekijöinä olivat ilman lämpötila ja vrkGPP.

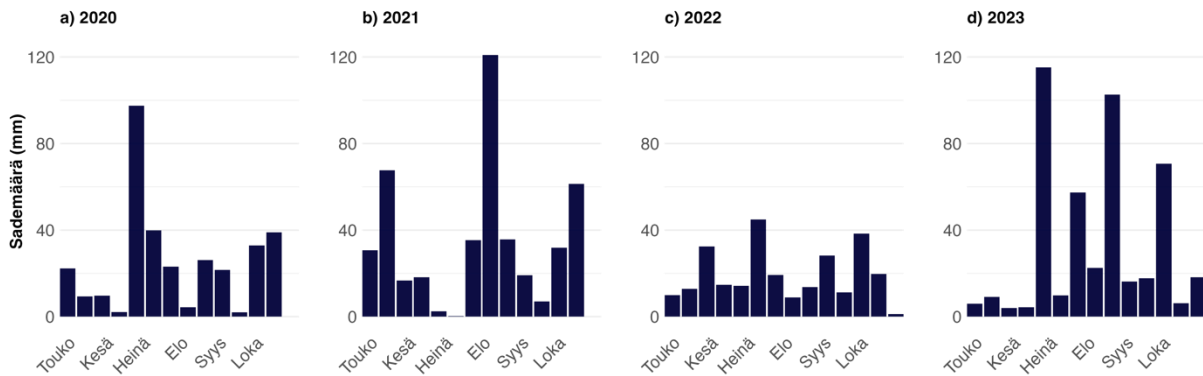
### 3 Tulokset

#### 3.1 Ympäristöolosuhteet

Kaikki tutkielmassa tarkasteltavat mittauskaudet olivat keskimääräistä lämpimämpiä, kun verrattiin ilman lämpötilaa vuosien 1991–2020 pitkän aikavälin vertailujaksoon Jokioisten Ilmalan havaintoasemalla (Jokinen ym., 2021; Ilmatieteen laitos, 2025). Sademääriltään tarkastellut mittauskaudet olivat vaihtelevia. Vuonna 2020 mittauskauden ilman keskilämpötila (kesäkuu-elokuu) oli 0,7 °C keskimääräistä (15,6 °C) lämpimämpi, kesäkuun ollessa vuoden lämpimin kuukausi (kuva 3a). Kokonaissadesummaltaan mittauskausi oli melko lähellä pitkän aikavälin keskiarvoa (2020: 197 mm, 1991–2020 ka: 214 mm). Heinäkuu oli vertailujaksoa sateisempi, kun taas kesä- ja elokuu olivat keskiarvoisia kuivemmat (kuva 4a). Vuonna 2021 mittauskausi (toukokuu-lokakuu) oli noin 1,2 °C keskimääräistä (12,1 °C) lämpimämpi. Kesäkuu oli 4,3 °C tavallista lämpimämpi, keskilämpötilaltaan 18,6 °C (kuva 3b). Mittauskausi 2021 oli myös keskiarvoista sateisempi (2021: 448 mm, 1991–2020 ka: 369 mm), mutta sateet ajoittuivat epätasaisesti kuukausien välille (kuva 4b). Elokuu oli mittauskauden sateisin kuukausi, heinä- ja syyskuu puolestaan kuivimmat. Vuosina 2022 ja 2023 mittauskaudet (toukokuu-elokuu) olivat hieman keskiarvoista lämpimämpiä (2022 15,1 °C, 2023 14,6 °C, 1991–2020 ka: 14,3 °C), elokuun ollessa kummankin kesän lämpimin kuukausi (kuvat 3c ja 3d). Vuoden 2022 kesä oli kuivin tutkielmassa tarkastelluista, sen mittauskauden sadesumma oli 81 mm keskimääräistä alhaisempi (2022: 171 mm, 1991–2020 ka: 252 mm). Heinäkuun sadesummasta yli puolet, 58 mm, satoi yhden vuorokauden aikana, joka ei kuitenkaan sijoittunut mittauksia edeltäville päiville (kuva 4c). Vuoden 2023 mittauskausi oli puolestaan tavallista sateisempi (329 mm), ja etenkin elokuun sadesumma oli keskimääräistä suurempi. Suuri osa elokuun sateista ajoittui kuitenkin loppukuulle, viimeisen mittauskerran jälkeisille päiville (kuva 4d). Mittausten yhteydessä mitattu maaperän lämpötila 5 cm syvyydeltä seurasi ilman lämpötilaa ( $r = 0,76$ ,  $df = 195$ ,  $p < 0,001$ ).



Kuva 3. Touko–lokakuun vuorokauden keskilämpötilan vaihtelu Jokioisten Ilmalan havaintoasemalla vuosina 2020–2023 (a-d) (Ilmatieteen laitoksen avoin data, ilman keskilämpötila). Metaanivoiden mittauspäivät on merkitty punaisella pystyviivalla.

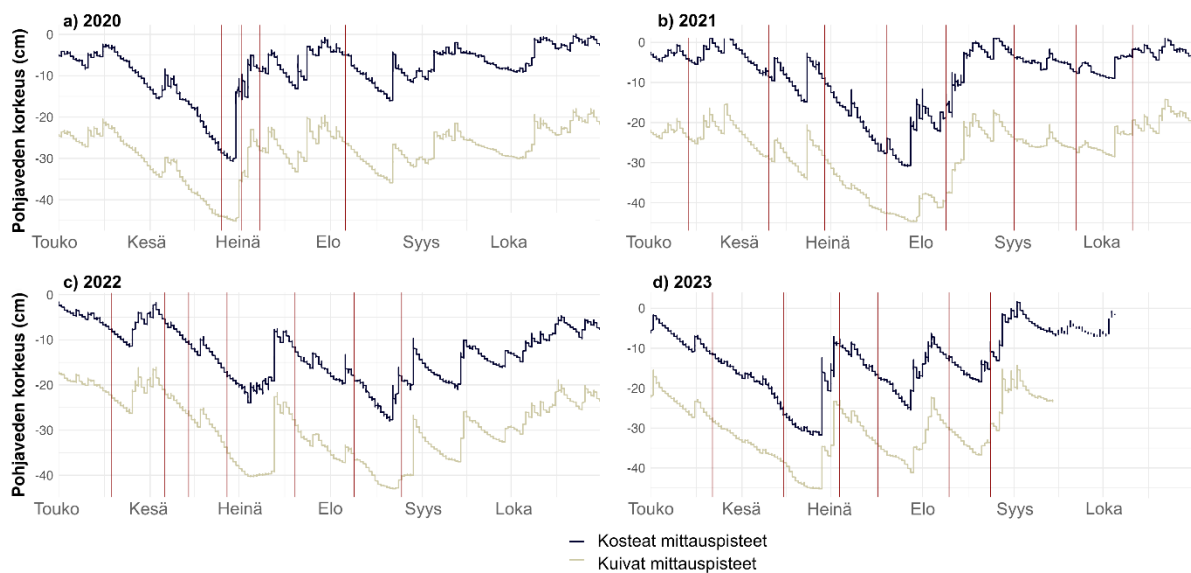


Kuva 4. Touko-lokakuun kahden viikon sadesummat Jokioisten Ilmalan havaintoasemalla vuosina 2020–2023 (a–d) (Ilmatieteen laitoksen avoin data, sademäärä).

Pohjaveden korkeus vaihteli mittauskausien aikana kuivien mittauspisteiden läheisyydessä noin 15–45 cm maanpinnan alapuolella ja kosteiden pisteiden lähellä maanpinnan tasolta noin 30 cm syvyyteen (kuva 5). Touko-elokuun keskiarvoinen pohjaveden korkeus oli matalin vuonna 2023 (kuivat mittauspisteet  $ka = -32 \pm 7$  cm, kosteat mittauspisteet  $ka = -15 \pm 7$  cm, ja korkein vuonna 2021 (kuivat mittauspisteet  $-29 \pm 8$  cm, kosteat mittauspisteet  $-10$  cm  $\pm 9$  cm). Arvot on esitetty muodossa keskiarvo ( $ka$ )  $\pm$ keskihajonta (SD). Vuosi 2020 oli touko-elokuun keskiarvoltaan samankaltainen kuin vuosi 2021 (kuivat mittauspisteet  $ka = -30,01 \pm 6$  cm, kosteat mittauspisteet  $ka = -10 \pm 7$  cm). Vuonna 2022 saman jakson pohjaveden korkeus keskiarvo oli kuivilla mittauspisteillä  $-30 \pm 8$  cm ja kosteilla mittauspisteillä  $-13 \pm 7$  cm.

Pohjavedenpinta oli kaikkina tarkasteltuina vuosina korkealla toukokuun alkupuolella, mutta lähti laskuun viimeistään kesäkuun alussa, saavuttaen alimman tasonsa kesäkuun lopun ja elokuun lopun välillä (kuva 5). Sateiden ja syksyn vähäisemmän haihdunnan myötä pohjaveden korkeus lähti uudelleen nousuun. Vaihtelun dynamiikka oli samankaltaista sekä kuivilla että kosteilla mittauspisteillä. Kosteilla mittauspisteillä vuomittausten hetkellä mitattu pohjavedenpinta oli keskimäärin 18 cm korkeammalla kuin kuivilla pisteillä (kuivat mittauspisteet  $ka = -30,3 \pm 6,4$  cm, kosteat mittauspisteet  $ka = -12,4 \pm 7,2$  cm,  $t = -18,5$ ,  $p < 0,001$ ,  $df = 190,8$ ). Vuoden 2020 mittausjaksolla pohjavedenpinta saavutti syvimmän tasonsa kesäkuun lopussa ja nousi sitten jyrkästi heinäkuun sateiden myötä (kuva 5a). Vuonna 2021 pohjaveden korkeus oli matalimmillaan heinäkuun loppupuolella (kuva 5b). Mittausjakso jatkui vuonna 2021 muita tarkasteltavia vuosia pidemmälle syksyyn, jolloin pohjavesi pysyi yhtäjaksoisesti kauemmin korkealla. Vuonna 2022 pohjavedenpinta oli matalimmillaan elokuun loppupuolella, mutta alin taso jäi hieman korkeammaksi verrattuna muihin vuosiin (kuva 5c). Loppukesä oli kuitenkin kokonaisuudessaan melko kuiva, eikä pohjaveden

korkeudessa tapahtunut ennen mittauskauden loppua enää voimakasta nousua. Vuonna 2023 pohjaveden korkeus laski jyrkästi toukokuun alusta saakka, saavuttaen syvimmän tasonsa kesäkuun lopussa (kuva 5d). Metaanivuomittausten aikainen pohjaveden korkeus korreloi negatiivisesti ilman lämpötilan kanssa (kuivat mittauspisteet  $r = -0,52$ ,  $df = 98$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet  $r = -0,58$ ,  $df = 95$ ,  $p < 0,001$ ), maaperän lämpötilan kanssa (kuivat mittauspisteet  $r = -0,58$ ,  $df = 98$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet  $r = -0,62$ ,  $df = 95$ ,  $p < 0,001$ ), vrkGPP:n kanssa (kuivat mittauspisteet  $r = -0,34$ ,  $df = 98$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet  $r = -0,38$ ,  $df = 95$ ,  $p < 0,001$ ) ja vihreän kasvillisuuden kanssa (kuivat mittauspisteet  $r = -0,42$ ,  $df = 91$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet  $r = -0,23$ ,  $df = 88$ ,  $p = 0,03$ ).

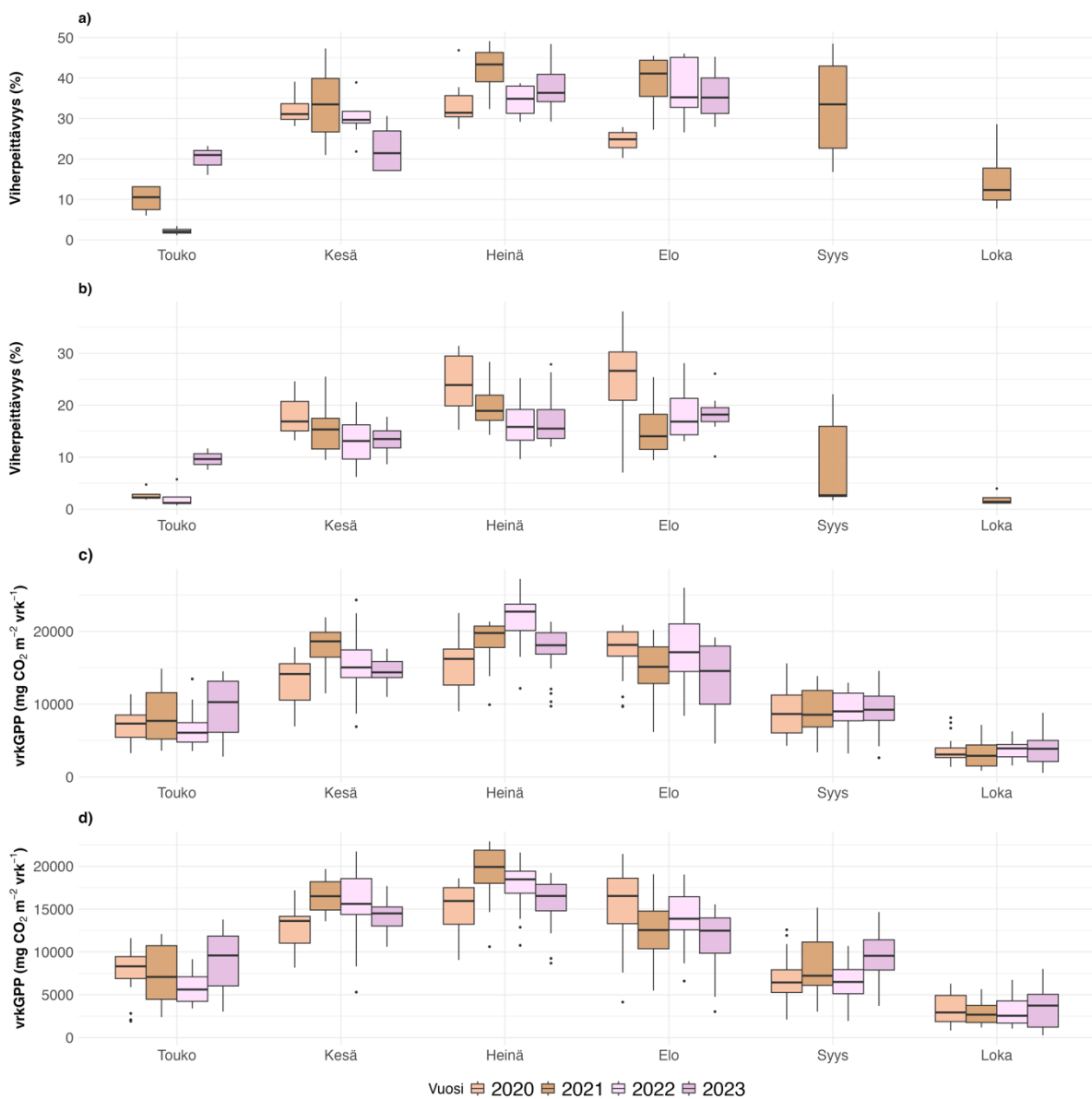


Kuva 5. Pohjaveden korkeuden vaihtelu kuivilla (kaulukset 1–4, musta) ja kosteilla (kaulukset 5–8, harmaa) mittauspisteillä vuosina 2020–2023 (a–d). Metaanivoiden mittauspäivät merkitty punaisella pystyviivalla.

Vihreän kasvillisuuden peittävyys vaihteli ajankohdasta ja mittauspisteestä riippuen välillä 1–49 % (kuva 6). Peittävyys oli yleisesti ottaen suurempi kuivilla mittauspisteillä kuin kosteilla pisteillä (kuivat mittauspisteet  $ka = 30,2 \pm 11,6$  % kosteat mittauspisteet  $ka = 15,0 \pm 8,5$  %,  $t = 10,1$ ,  $df = 168,7$ ,  $p < 0,001$ ). Vuonna 2023 kasvillisuuden vihertyminen alkoi muihin vuosiin verrattuna silmämääräisesti aikaisemmin.

Pyörrekovarianssimenetelmällä mitattu vrkGPP osoitti vahvaa kausivaihtelua vuosina 2020–2023 (kuva 6). VrkGPP kaasuvoiden mittauspäivinä vaihteli kosteiden mittauspisteiden 2,7–21,2  $g\ CO_2\ m^{-2}\ vrk^{-1}$  ja kuivien pisteiden 3,9–27,2  $g\ CO_2\ m^{-2}\ vrk^{-1}$  välillä. Keskiarvoinen vrkGPP mittauspäiviltä oli hieman suurempi kuivilla kuin kosteilla mittauspisteillä (kuivat

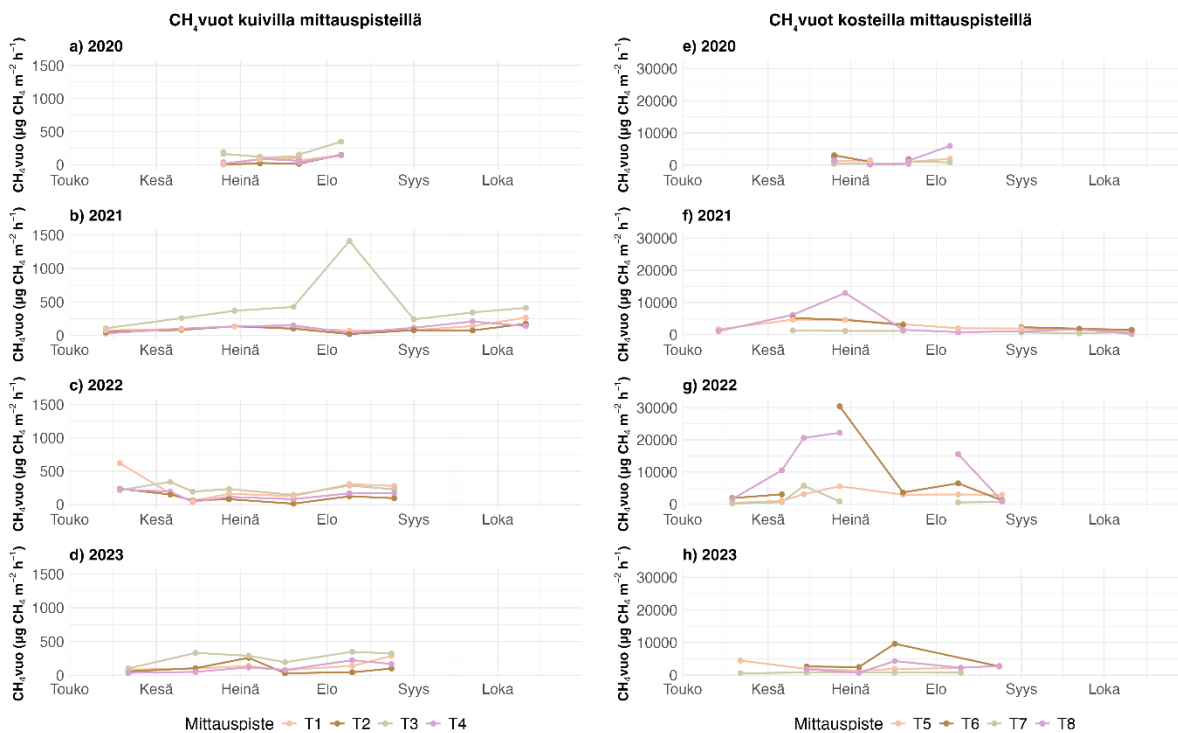
mittauspisteet  $ka = 15,6 \pm 5,1 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ , kosteat mittauspisteet  $ka = 14,1 \pm 4,4 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ ,  $t = -2,3$ ,  $df = 189,4$ ,  $p = 0,02$ ), ja se korreloi positiivisesti ilman lämpötilan (kuivat mittauspisteet  $r = 0,66$ ,  $df = 98$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet  $r = 0,63$ ,  $df = 95$ ,  $p < 0,001$ ), maan lämpötilan (kuivat mittauspisteet  $r = 0,73$ ,  $df = 98$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet  $r = 0,73$ ,  $df = 98$ ,  $p < 0,001$ ) ja vihreän kasvillisuuden peittävyuden (kuivat mittauspisteet  $r = 0,57$ ,  $df = 91$ ,  $p < 0,001$ , kosteat mittauspisteet ( $r = 0,52$ ,  $df = 88$ ,  $p > 0,001$ ) kanssa. Mittauspäivien vrkGPP korreloi negatiivisesti pohjaveden korkeuden kanssa (kts. yllä).



Kuva 6. Vihreän peittävyuden vaihtelu kuivilla (a, kaulukset 1–4) ja kosteilla (b, kaulukset 5–8) mittauspisteillä, sekä vuorokauden perustuotannon (vrkGPP) vaihtelu kuivilla (c) ja kosteilla (d) mittauspisteillä vuosina 2020–2023. Laatikon sisäinen poikkiviiva kuvaa mediaania ja ylä- ja alareunat ylä- ja alaneljänneksiä. Pystyjanojen päät kuvaavat aineiston suurimpia ja pienimpiä havaintoja, jotka eivät poikke muusta aineistosta. Poikkeavat arvot merkitty pisteillä.

### 3.2 Metaanivoiden vaihtelu

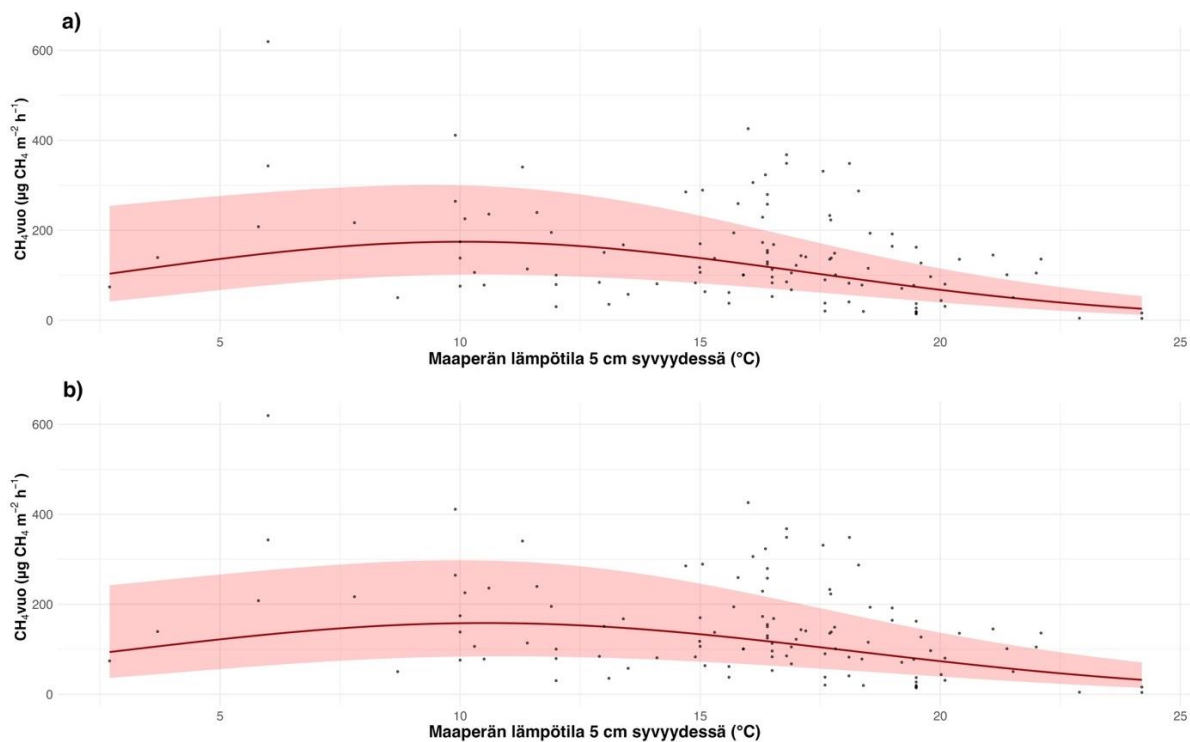
Visuaalisen tarkastelun perusteella metaanivoissa ei ole erotettavissa selkeää ajallista trendiä mittauskausien sisällä (kuva 7). Metaanivuot olivat keskimäärin noin 19 kertaa korkeampia kosteilla mittauspisteillä ( $3052 \pm 4698 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) kuin kuivilla pisteillä ( $157 \pm 161 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) vuosina 2020–2023 ( $t = -6,036$ ,  $df = 95,193$ ,  $p < 0,001$ ). Vuot olivat positiivisia kaikissa mittauksissa, mikä tarkoittaa, että mittauspisteet toimivat metaanin lähteinä. Voissa oli voimakasta vaihtelua sekä ajallisesti että mittauspisteiden välillä, vaihteluvälin ollessa kuivilla mittauspisteillä  $4\text{--}1410 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ja kosteilla pisteillä  $147\text{--}30450 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Kesä-elokuun metaanivoita vertailtaessa kosteilla mittauspisteillä vuoden 2022 vuot olivat keskiarvoltaan suurimmat ( $5817 \pm 7979 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) ja vuoden 2020 vuot pienimmät ( $1378 \pm 1200 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Kuivilla mittauspisteillä keskiarvoltaan suurimmat vuot mitattiin vuonna 2021 ( $193 \pm 247 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) ja pienimmät vuonna 2020 ( $90 \pm 76 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Vertailujaksona keskiarvoja vertailtaessa vuosien välillä on kesäkuu–elokuu, koska näinä kuukausina tehtiin mittauksia kaikkina tutkielmassa tarkasteltuina vuosina. Voiden jakauma painottui pieniin voihin jokaisena mittausvuonna.



Kuva 7. Mitattujen metaanivoiden (CH<sub>4</sub>vuot) vaihtelu kuivilla (a-d, kaulukset 1–4) ja kosteilla (e-h, kaulukset 5–8) mittauspisteillä vuosina 2020–2023.

Kuivilla mittauspisteillä metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua sekä mittauskausien sisäistä vaihtelua selitti parhaiten viiden senttimetrin syvyydestä mitattu maaperän lämpötila (taulukko 2). Maaperän lämpötila oli sekä metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua että

mittauskauden sisäistä vaihtelua selittävässä malleissa toisen asteen polynomina, eli sen suhde logaritmiin metaanivoihin oli epälineaarinen. Mallin mukaan kuivilla mittauspisteillä metaanipäästöt kasvavat maaperän lämpötilan noustessa noin 10 °C:een saakka, jonka jälkeen lämpötilan nousulla on metaanivuota pienentävä vaikutus (kuva 8, taulukko 2). Erot metaanivuon vasteessa lämpötilan muutokseen yleistä ajallista vaihtelua ja mittauskauden sisäistä vaihtelua selittävien mallien välillä olivat vähäisiä. Yleistä ajallista vaihtelua selittävässä mallissa maaperän lämpötila selitti noin 17 % metaanivoiden vaihtelusta ( $R^2_m = 0,173$ ). Satunnaistekijänä mallissa olleen mittauspisteiden välinen varianssi oli 0,249 ( $\pm 0,499$ ) ja mallin jäännösvarienssi 0,511 ( $\pm 0,715$ ). Tämä tarkoittaa, että suurin osa mallin selittämättömästä vaihtelusta esiintyi yksittäisten havaintojen, eikä mittauspisteiden välillä. Satunnaistekijät sisältävän mallin selitysaste ( $R^2_c$ ) oli metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua selittävälle mallille 0,444. Mittauskauden sisäisiä eroja selittävässä mallissa lämpötila selitti metaanivoiden vaihtelusta noin 12 % ( $R^2_m = 0,119$ ). Mallin satunnaistekijöinä olleiden mittauspisteiden välinen varianssi oli 0,266 ( $\pm 0,516$ ) ja vuosien välinen varianssi 0,094 ( $\pm 0,307$ ). Mallin jäännösvarienssi oli 0,444 ( $\pm 0,667$ ), eli vaihtelua oli enemmän yksittäisten havaintojen kuin mittauspisteiden tai mittausvuosien välillä. Koko mallin selitysaste ( $R^2_c$ ) mittauskausien sisäistä vaihtelua selittävälle mallille oli 0,513.



Kuva 8. Metaanivuon ( $\text{CH}_4\text{vuo}$ ) vaste maaperän lämpötilan muutokseen viiden senttimetrin syvyudessa kuivilla mittauspisteillä metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua selittävässä mallissa (a) ja mittauskausien sisäistä vaihtelua selittävässä mallissa (b). Pisteet kuvaavat mitattuja metaanivoita vuosilta 2020–2023 (suurin vuo 1410  $\mu\text{g CH}_4 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$  jätetty pois kuvasta y-akselin skaalan

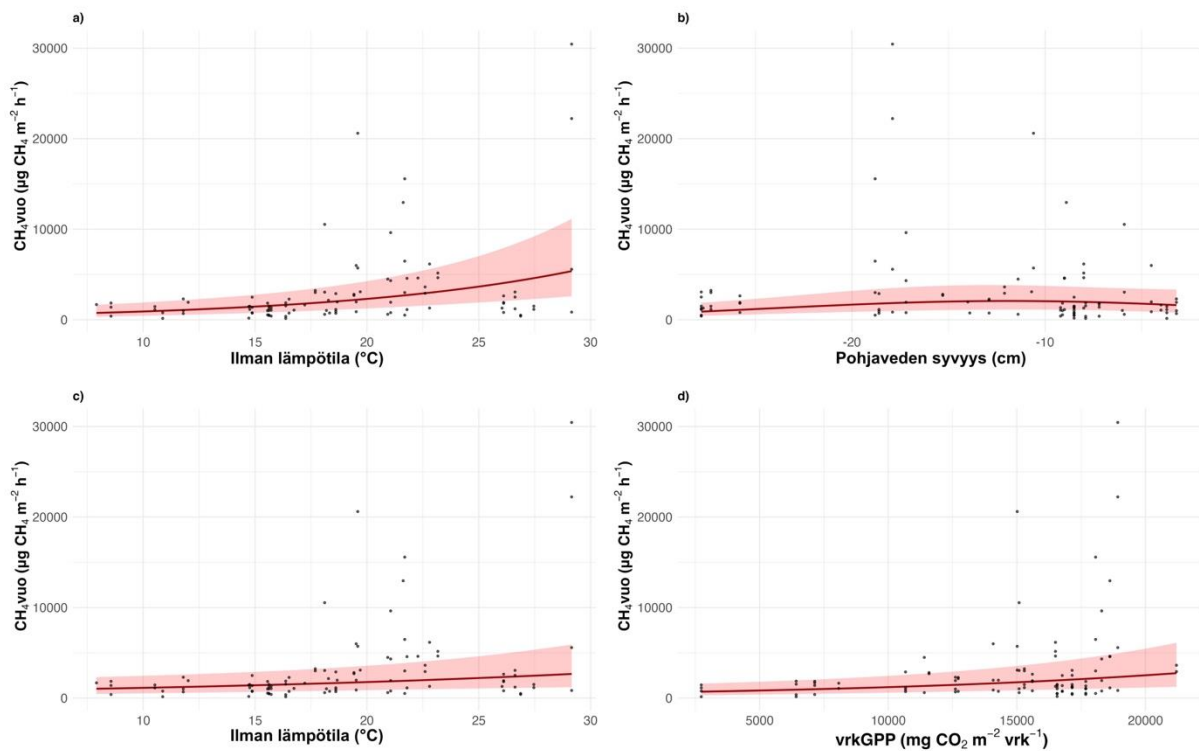
pienentämiseksi) ja punainen viiva ennustettua vastetta. Varjostettu alue esittää mallinnetun vasteen 95 %:n luottamusväliä.

Taulukko 2. Metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua sekä metaanivoiden mittauskausien sisäistä vaihtelua selittävien lineaaristen sekamallien kiinteiden muuttujien tunnusluvut kuivilla ja kosteilla mittauspisteillä. Taulukossa esitetään muuttujien kulmakertoimet ( $\beta$ ), keskivirheet ( $SE$ ), vapausasteet ( $df$ ), t-testisuureet ja p-arvot. Metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua selittävissä malleissa satunnaistekijänä oli mittauspiste, ja mittauskausien sisäistä vaihtelua selittävissä malleissa satunnaistekijöinä olivat mittauspiste ja mittausvuosi. Selitettävä muuttuja kaikissa malleissa on metaanivuon logaritmi.

Malli	Selittävä muuttuja	$\beta$ (SE)	df	t-arvo (p-arvo)
<b>Metaanivoiden yleinen ajallinen vaihtelu kuivilla mittauspisteillä</b>	Maaperän lämpötila (poly 1)	-3,50 (0,73)	105	-4,80 (<0,001)
	Maaperän lämpötila (poly 2)	-2,54 (0,76)	106	-3,35 (0,001)
<b>Metaanivoiden mittauskausien sisäinen vaihtelu kuivilla mittauspisteillä</b>	Maaperän lämpötila (poly 1)	-2,78 (0,76)	105	-3,66 (<0,001)
	Maaperän lämpötila (poly 2)	-2,26 (0,72)	104	-3,15 (0,002)
<b>Metaanivoiden yleinen ajallinen vaihtelu kosteilla mittauspisteillä</b>	Ilman lämpötila	0,09 (0,02)	89	4,36 (<0,001)
	Pohjaveden korkeus (poly 1)	1,95 (1,09)	89	1,78 (0,08)
	Pohjaveden korkeus (poly 2)	-1,82 (0,87)	89	-2,08 (0,04)
<b>Metaanivoiden mittauskausien sisäinen vaihtelu kosteilla mittauspisteillä</b>	Ilman lämpötila	0,04 (0,02)	89	2,35 (0,02)
	VrkGPP	< 0,01 (< 0,01)	89	3,22 (0,002)

Kosteilla mittauspisteillä parhaiten metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua selittävissä malleissa selittävinä tekijöinä olivat ilman lämpötila ja pohjaveden korkeus toisen asteen polynomina. Lämpötilan nousu kasvatti metaanivoita (taulukko 2, kuva 9a). Pohjaveden korkeuden ensimmäisen asteen polynomin ja metaanin logaritmin välillä oli epälineaarinen yhteys (kuva 9b). Metaanipäästöjen havaittiin kasvavan pohjaveden korkeuden noustessa, mutta lähtevän laskuun, kun pohjaveden pinta oli lähellä maanpinnan tasoa. Mallin selittävät muuttujat selittivät noin 17 % metaanivoiden yleisestä ajallisesta vaihtelusta kosteilla mittauspisteillä ( $R_{2m} = 0,174$ ). Mittauspisteiden välinen varianssi malleissa oli  $0,334 (\pm 0,578)$

ja mallin jäännösvarianssi  $0,621 (\pm 0,788)$ . Satunnaistekijät sisältävän mallin selitysaste oli  $0,463$ .



Kuva 9 Metaanivuon ( $\text{CH}_4$ vuo) vaste ilman lämpötilaan (a) ja pohjaveden korkeuteen (b) kosteilla mittauspisteillä metaanivuon yleistä ajallista vaihtelua selittävässä mallissa. Pisteet kuvaavat mitattuja metaanivoita ja punainen viiva ennustettua vastetta. Varjostettu alue esittää mallinnetun vasteen 95 %:n luottamusväliä. Metaanivuon vaste ilman lämpötilan (c) ja vuorokauden perustuotannon (vrkGPP) (d) muutokseen kosteilla mittauspisteillä mittauskausien sisäistä vaihtelua selittävässä mallissa.

Metaanivoiden mittauskausien sisäistä vaihtelua kosteilla mittauspisteillä selittivät parhaiten ilman lämpötila ja vrkGPP (taulukko 2). Ilman lämpötilalla ja vrkGPP:llä oli metaanin logaritmiin positiivinen lineaarinen yhteys, eli sekä lämpötilan nousu että vrkGPP:n kasvu kasvattivat metaanivoita (kuva 9 c, d). Selittävät muuttujat selittivät metaanivoiden mittauskauden sisäisestä vaihtelusta noin 21 % ( $R^2_m = 0,207$ ). Koko mallin selitysaste oli 55 % ( $R^2_c = 0,554$ ). Satunnaistekijöistä mittauspisteiden välinen varianssi oli  $0,310 (\pm 0,556)$  ja vuosien välinen varianssi  $0,177 (\pm 0,421)$ . Mallin jäännösvarianssi oli  $0,531$ .

## 4 Pohdinta

Tutkin tässä työssä metaanivoiden temporaalista vaihtelua boreaalisella ombrotrofisella suolla suhteessa ilman ja maaperän lämpötilaan, pohjaveden korkeuteen ja ekosysteemin kokonaisperustuotantoon vuosina 2020–2023. Mikrotopografialtaan mosaiikkimaisella tutkimusalueella vaihtelivat kosteat kuljut ja kuivemmat mätäspinnat. Tutkimuksessa tarkasteltava suo toimi metaanin lähteenä koko tutkimusjakson ajan sekä kuivilla että kosteilla mittauspisteillä. Kosteilla mittauspisteillä mitatut metaanivuot olivat keskimäärin noin 19 kertaa suurempia verrattuna kuiviin pisteisiin, heijastaen eroja pohjaveden korkeudessa ja kasvillisuudessa.

Metaanivoiden ajallista vaihtelua selitti tarkastelluista ympäristötekijöistä parhaiten lämpötila. Kosteilla mittauspisteillä metaanivuon ja ilman lämpötilan välillä havaittiin positiivinen suhde, mikä viittaa metaanintuotannon lisääntymiseen lämpötilan noustessa. Kuivilla mittauspisteillä metaanivuot puolestaan kasvoivat maaperän lämpötilan noustessa vain tiettyyn pisteeseen asti, minkä jälkeen lämpötilan edelleen noustessa vuot kääntyivät laskuun.

Kosteilla mittauspisteillä metaanivuon ajallista vaihtelua selittivät mallien mukaan maaperän lämpötilan lisäksi pohjaveden korkeus ja vrkGPP. Kun tarkasteltiin metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua, pohjaveden korkeuden nousun havaittiin ensin kasvattavan metaanivuota, mutta vedenpinnan noustessa lähelle turpeen pintaa metaanivuot alkoivat jälleen laskea. VrkGPP:n ja metaanivoiden välillä havaittiin positiivinen suhde, kun tarkasteltiin mittauskautien sisäistä vaihtelua metaanivoissa.

### 4.1 Metaanivoiden ajallinen ja spatiaalinen vaihtelu

Tervalamminsuolla vuosina 2020–2023 mitattujen metaanivoiden suuruudessa oli runsasta vaihtelua sekä ajallisesti että mittauspisteiden välillä, voiden ollessa keskimäärin noin 19 kertaa suurempia kosteilla kuin kuivilla mittauspisteillä. Havaitut vuot ovat verrattavissa aikaisempien tutkimusten kasvukauden aikaisiin metaanivoihin ombrotrofisilla soilla (J. Bubier ym., 1993; Korrensalo ym., 2018; Turetsky ym., 2014). Esimerkiksi Korrensalo ym. (2018) raportoivat keskimäärin  $3680 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  suuruisen metaanivuon topografialtaan ja kasvillisuudeltaan vaihtelevalla ombrotrofisella suolla eteläisessä Suomessa. Toisin kuin tässä tutkimuksessa, Korrensalo ym. (2018) eivät havainneet eroa kuivempien mätäspintojen ja kosteampien painanteiden välillä kaikkina mittausvuosina. Metaanivoiden suuri spatiaalinen vaihtelu on kuitenkin tyypillistä soilla, joilla kuljut ja kermi vuorottelevat (Bubier ym., 1993). Mosaiikkimaisesta mikrotopografiasta johtuva kasvillisuuden ja pohjaveden korkeuden

rungas pienimittakaavainen vaihtelu luo paikallisesti vaihtelevat olosuhteet metaania tuottaville ja kuluttaville mikrobiyhteisöille. Bubier ym. (1993) raportoivat artikkelissaan metaanivoiden olleen keskimäärin 21 kertaa suurempia kosteammassa kuljuissa ( $1833 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) kuin kuivemmilla mätäspinoilla ( $96 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Ero kuivien ja kosteiden pintojen metaanipäästöissä oli hyvin samankaltainen kuin tässä tutkimuksessa, vahvistaen mikrotopografian vaikutusta metaanivoiden suuruuteen. Poiketen aikaisemmista tutkimuksista (Korrensalo ym., 2018; Rinne ym., 2018; Bubier ym., 1993) Tervalamminsuolla mitatuissa metaanivoissa ei ollut havaittavissa selkeää vuodenaikaisuutta. Esimerkiksi Korrensalo ym. (2018) havaitsivat suurimmat metaanipäästöt heinäkuun loppupuolella ja Rinne ym. (2018) heinä- ja elokuussa. Metaanivuomittauksia tehtiin Tervalamminsuolla kuitenkin pääasiassa vain kesäisin, mittausten alkaessa aikaisintaan toukokuun puolivälissä ja jatkuen syys-lokakuulle ainoastaan vuonna 2021. Lyhyehkö mittauskausi saattaa osaltaan selittää puuttuvaa vuodenaikaisvaihtelua metaanivoissa.

## 4.2 Ympäristötekijöiden vaikutus metaanivoiden vaihteluun

### 4.2.1 Lämpötila

Lämpötila selitti parhaiten vuosina 2020–2023 mitattujen metaanivoiden vaihtelua Tervalamminsuolla, vahvistaen käsitystä lämpötilan merkityksestä kosteikkojen metaanipäästöjen säätelijänä. Tutkielman hypoteesina oli, että lämpötilan nousu vaikuttaa suoraan metaanivoihin niitä kasvattavasti. Lämpötilalla ja metaanivoilla on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu positiivinen, usein eksponentiaalinen suhde (Kim ym., 1998; Rinne ym., 2018; Turetsky ym., 2014). Tässä tutkimuksessa lämpötila selitti sekä metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua että mittauskauden sisäistä vaihtelua niin kuivilla kuin kosteilla mittauspisteillä, mutta ainoastaan kosteilla mittauspisteillä metaanivuot selvästi kasvoivat lämpötilan noustessa. Biologisille prosesseille tyypillisesti metaania tuottavien mikrobien aineenvaihdunta kiihtyy lämpötilan noustessa, minkä lisäksi haihdunnan voimistuessa lämpötilan nousu voi lisätä metaanin kulkeutumista ilma-aukollisten kasvien kautta (Große, 1996; van Winden ym., 2012).

Kuivilla mittauspisteillä 5 cm syvyydestä mitatulla maaperän lämpötilalla ja metaanivoilla oli mallin mukaan positiivinen yhteys vain noin  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  asti, jonka jälkeen lämpötilan nousu vaikutti metaanivoita laskevasti. Metaanin tuotannon kääntymistä laskuun lämpötilan noustessa tietyn raja-arvon yli on raportoitu aikaisemmissakin tutkimuksissa, kuitenkin usein huomattavasti korkeammassa lämpötiloissa (Dunfield ym., 1993). Esimerkiksi Dunfield ym.

(1993) arvioivat metaanin tuotannon optimilämpötilaksi noin 20–30 °C. Rinne ym., (2007) raportoivat kesän 2005 aikana kerätyn aineiston perusteella metaanivuon kasvavan eksponentiaalisesti turpeen lämpötilan noustessa 12 °C asti, jonka jälkeen metaanivuon ja lämpötilan välillä ei havaittu merkittävää yhteyttä. Samalta tutkimusalueelta 11 vuoden aineiston perusteella havaittiin kuitenkin metaanivuon ja lämpötilan välillä positiivinen eksponentiaalinen suhde ilman ylärajaa (Rinne ym., 2018). Puuttuvaa suhdetta lämpötilan ja metaanivuon välillä vuonna 2005 selitettiin pohjavedenpinnan nopealla laskulla lämpötilan ollessa yli 12 °C. Tervalamminsuolla kuivilla mittauspisteillä pohjaveden korkeus ei suoraan selittänyt metaanivoiden ajallista vaihtelua. Mahdollisia syitä metaanivoiden pienenemiselle lämpötilan noustessa 10 °C yläpuolelle voi olla esimerkiksi suurempi haihdunta ja kuivempi turpeen pinta niinä mittauspäivinä, jolloin lämpötila oli korkealla. Vaikka lämpötilan muutokset turpeen eri kerroksissa ovat pääpiirteittäin samansuuntaisia, eri syvyydeltä mitatut lämpötilat vaikuttavat eri metaanintuotannon ja kulutuksen prosesseihin (Rinne ym., 2018). Tässä tutkimuksessa turpeen lämpötila mitattiin vain 5 cm syvyydestä, joka kuivilla pisteillä oli jatkuvasti pohjaveden yläpuolella ja kosteilla pisteillä vaihteli pohjavedenpinnan molemmin puolin. Tästä syystä mitattu lämpötila kertoo suuressa osassa mittauksia suoraan vain metaania kuluttavien mikrobien olosuhteista. Esimerkiksi Korkiakoski ym. (2017) havaitsivat ojitetun suometsän metaanivoiden korreloivan parhaiten 20 ja 30 cm syvyydeltä mitatun lämpötilan kanssa, kuin taas läheltä maan pintaa mitatun lämpötilan korreloivan metaanivuon kanssa vain osittain.

Metaania tuottavan mikrobitoiminnan tavoin myös metaanin kulutus kiihtyy lämpötilan noustessa, mutta havainnot sen riittävydestä tasapainottamaan lisääntyntä tuotantoa ja kulkeutumista vaihtelevat. Esimerkiksi Van Winden ym. (2012) tutkimuksessa metaanin hapettumisen lisääntyminen ei riittänyt kumoamaan tuotannon voimistumista, kun taas Zhang ym. (2021) raportoivat, että korkeissa lämpötiloissa kulutuksen kasvu voisi kyetä kompensoimaan lisääntyneen tuotannon. On mahdollista, että kuivilla mittauspisteillä metaanin kulutukselle suotuisan hapellisen turvekerroksen tilavuus on niin suuri, että lämpötilan noustessa tehostunut metaanin hapettuminen on riittänyt kompensoimaan tuotannon kasvua.

#### 4.2.2 Pohjaveden korkeus

Pohjaveden korkeutta on pidetty yhtenä keskeisimmistä soiden metaanipäästöjä ohjailevista tekijöistä, useiden tutkimusten raportoidessa suurempia metaanivoita pohjaveden ollessa

korkealla (Bubier ym., 2005; Lai, 2009; Turetsky ym., 2014). Tässä tutkimuksessa pohjavedenpinnan korkeus vaikutti metaanivoiden suuruuteen kosteilla mittauspisteillä, kun tarkasteltiin metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua. Mallin mukaan pohjaveden nousu ensin kasvattaa metaanipäästöjä, mutta pohjaveden noustessa noin –10 cm syvyydelle metaanivuot kääntyvät laskuun. Metaanivoiden lasku pohjaveden noustessa lähelle turpeen pintaa vastaa Turetsky ym. (2014) raportoimia tuloksia tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin metaanivoita sääteleviä ympäristötekijöitä 71 kosteikolta eri ilmasto-olosuhteissa. Tutkimuksen mukaan metaanintuotannolle optimaalisin pohjaveden korkeus ombrotrofisilla soilla oli johdonmukaisesti turpeen pinnan alapuolella, kun taas esimerkiksi rehevillä minerotrofisilla soilla metaanivuot olivat suurimpia pohjavedenpinnan noustessa turpeen pinnan yläpuolelle. Pohjaveden nousu lähelle turpeen pintaa tai sen yläpuolelle voi laskea metaanivuota johtuen esimerkiksi biomassan, ja siten metanogeenisten mikrobien substraatin, vähäisemmästä tuotannosta, tai metaanin heikommasta diffuusiosta paikallaan olevan vesipatsaan läpi (Turetsky ym., 2014). Lisäksi pohjaveden ollessa korkealla metaania kuljettavat kasvit voivat jäädä osittain tai kokonaan veden alle, jolloin metaanin kuljetus maaperästä ilmakehään kasvien tuuletussolukkojen kautta estyy (Rinne ym., 2018). Matalampia metaanipäästöjä pohjaveden ollessa korkeimmillaan on selitetty myös pohjaveden korkeuden ja metaanivoiden vuodenaikaisvaihtelulla: pohjavedenpinta on usein korkeammalla kylmien jaksojen aikana ja matalimmallaan kesällä, kun taas metaanipäästöt ovat usein korkeimmillaan kesäisin (Korrensalo ym., 2018; Laine ym., 2007; Turetsky ym., 2014). Myös tässä tutkimuksessa pohjaveden korkeus korreloi negatiivisesti ilman lämpötilan kanssa, eli lämpötilan noustessa pohjaveden taso yleensä laskee.

Kuivilla mittauspisteillä pohjaveden korkeuden ja metaanivoiden välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää suhdetta, kuten ei myöskään kosteilla mittauspisteillä, kun tarkasteltiin mittauskautien sisäistä vaihtelua. Vaikka pohjaveden korkeuden on toistuvasti osoitettu olevan merkittävä metaanivoiden suuruutta säätelevä tekijä, yhteyttä metaanivuon ja pohjaveden korkeuden välillä ei aina olla havaittu etenkin metaanivoiden temporaalista vaihtelua tarkasteltaessa (Jackowicz-Korczyński ym., 2010; Rinne ym., 2007, 2018). Rinne ym., (2018) esittivät tutkimuksessaan mahdolliseksi selitykseksi suhteen puuttumiselle sitä, että saravoittoisilla pinnoilla suuri osa metaanin kuljetuksesta turpeesta ilmakehään tapahtuu sarojen tuuletussolukon kautta, eikä se siten altistu mikrobiologiselle kulutukselle turpeen hapellisessa kerroksessa. Grünfeld ja Brix (1999) sekä Mastepanov ym. (2013) havaitsivat pohjavedenpinnan vaihtelun vaikuttavan metaanivoihin ainoastaan pohjavedenpinnan

laskiessa tietyn raja-arvon alapuolelle. Christensen ym. (2003) esittivät pohjaveden kontrolloivan metaanipäästöjä lineaarisen suhteen sijaan ns. 'on-off'-kytkimen tavoin, säädellen vuon suuruutta voimakkaammin vedenpinnan ollessa matalammalla ja muiden prosessien hallitsevan pohjaveden noustessa noin –10 cm syvyydelle. Tästä voi seurata metaanivoiden ja pohjavedenpinnan vaihtelun heikko tai puuttuva suhde märillä soilla. Tämä ei kuitenkaan selitä puuttuvaa suhdetta kuivilla mittauspisteillä. On myös mahdollista, että tutkimuksessa havaittu vaihtelu pohjaveden tasossa ei ollut riittävän suurta aiheuttamaan merkitsevää suhdetta metaanivuon ja pohjaveden korkeuden välillä.

Suuri osa tutkimuksista, joissa on raportoitu voimakas negatiivinen yhteys pohjavedenpinnan ja metaanipäästöjen välillä, perustuu metaanivoiden spatiaalisen vaihtelun tarkasteluun (Turetsky et al., 2014). Sekä tässä että aiemmissa metaanivoiden temporaalista vaihtelua tarkastelleissa tutkimuksissa havaittu puuttuva tai epäsuora vaste metaanivuon ja pohjaveden korkeuden välillä korostaa tarvetta varovaisuuteen, kun pyritään yleistämään spatiaalista vaihtelua temporaalisiksi malleiksi.

#### 4.2.3 Ekosysteemin perustuotanto

Koska metaania tuottavat arkeonit käyttävät pääasiallisena hiilenlähteenään tuoreita juuriyhdisteitä (Rinne ym., 2018; Ström ym., 2003, 2005), metaanivuon oletettiin korreloivan positiivisesti GPP:n kanssa. Tutkielman hypoteesia tukien GPP:n ja metaanivuon välillä havaittiin positiivinen suhde kosteilla mittauspisteillä, kun tarkasteltiin metaanivoiden mittauskausien sisäistä vaihtelua. Tulos on yhtenäinen useiden aikaisempien tutkimusten kanssa, joissa ekosysteemin tuotannon kasvun on havaittu kasvattavan metaanivoita (Joabsson & Christensen, 2001; King & Reeburgh, 2002; Rinne ym., 2018). Positiivisen yhteyden on esitetty olevan seurausta tuoreen, fotosynteesiperäisen substraatin saatavuuden suorasta vaikutuksesta metaanin tuotantoon. Esimerkiksi King & Reeburgh (2002) havaitsivat isotooppimerkityn hiilen kulkeutumiseen perustuvassa tutkimuksessaan, että fotosynteesissä äskettäin sitoutunut hiili siirtyi vapautuvaan metaaniin vuorokauden kuluessa.

Kasvillisuuden määrän tiedetään olevan voimakkaasti yhteydessä GPP:n vaihteluun (esim. Carmichael ym., 2014), ja myös tässä tutkielmassa vihreän kasvillisuuden peittävyys ja vrkGPP:n korreloivat positiivisesti keskenään. Vihreän kasvillisuuden peittävyys suoraa vaikutusta metaanivoiden suuruuteen ei kuitenkaan voitu arvioida, sillä peittävyysarvot jouduttiin jättämään pois metaanivoiden ajallista vaihtelua selittävistä malleista aineiston vajaavaisuuden vuoksi. Kosteilla mittauspisteillä tuuletussolukollisten kasvien, tärkeimpänä

tupasvillan (*E. vaginatum*) ja tupasluikan (*Trichophorum cespitosum*), peittävyys oli suurempi kuin kuivilla mittauspisteillä. Tuuletussolukollisten kasvien tiedetään edistävän metaanin kulkeutumista turpeesta ilmakehään, siten vaikuttaen metaanivoihin tuuletussolukottomia kasveja positiivisemmin (Le Mer & Roger, 2001; Riutta ym., 2020). Tämä voi osaltaan selittää sitä, että vrkGPP:n kasvu kasvatti metaanivoita merkittävästi kosteilla, mutta ei kuivilla mittauspisteillä.

Vaikka useat aikaisemmat tutkimukset ovat havainneet yhteyden metaanivoiden ja GPP:n välillä, kummankin muuttujan voimakas vuodenaikaisvaihtelu ja niitä ohjaavien ympäristötekijöiden yhteisvaihtelu vaikeuttavat GPP:n ja metaanipäästöjen suhteen tulkintaa (Lakomiec ym., 2021; Villa ym., 2019). On esitetty, että joissain ekosysteemeissä, joissa metaanivuot ovat suuria, lämpötila rajoittaa metanogeenien toimintaa voimakkaammin kuin substraatin saatavuus (Kankaala ym., 2005) ja metaani- ja hiilidioksidivoiden havaittu yhteys olisi seurausta pääasiassa niitä säätelevien ympäristötekijöiden vaihtelusta (Villa ym., 2019). Esimerkiksi Lakomiec ym. (2021) havaitsivat tilastollisesti merkitsevän positiivisen korrelaation metaanivuon ja GPP:n välillä, mutta yhteys katosi, kun metaanivuot normalisoitiin lämpötilan suhteen. Kuitenkin esimerkiksi Rinne ym., (2018) havaitsivat positiivisen yhteyden myös tarkasteltaessa lämpötilanormalisoidun metaanivuon ja GPP:n suhdetta. Tämä tukee tulkintaa, että tuoreen substraatin saatavuus vaikuttaa metaanivoiden suuruuteen myös itsenäisesti, riippumatta kummankin muuttujan yhteisestä vuodenaikaisvaihtelusta.

Tässä tutkimuksessa kuivilla mittauspisteillä ja kosteilla mittauspisteillä metaanivoiden yleistä ajallista vaihtelua tarkastellessa yhteyttä vrkGPP:n ja metaanipäästöjen välillä ei havaittu. Rinne ym. (2018) osoittivat tutkimuksessaan metaanivoiden olevan riippuvaisia GPP:stä, mutta metaanipäästöjen reagoivan GPP:n muutoksiin keskimäärin 15 päivän viiveellä. Kun samassa tutkimuksessa tarkasteltiin lämpötilanormalisoidun metaanivuon suhdetta GPP:hen, viivettä näiden välillä ei havaittu. Tässä tutkimuksessa vasteen mahdollista viivettä ei selvitetty, mikä voi olla osasyynä metaanivuon ja vrkGPP:n puuttuvaan suhteeseen. Lisäksi tutkimuksessa käytetyt eri mittausmenetelmät metaanille ja hiilidioksidille voivat toimia mahdollisena epävarmuustekijänä GPP:n ja metaanivoiden suhteen tulkinnassa. Metaanivuoaineisto kerättiin käyttäen manuaalista kammiomenetelmää, kun taas vrkGPP määritettiin pyörrekovarianssimenetelmällä kerätystä hiilidioksidivuoaineistosta. Menetelmät eroavat toisistaan spatiaalisessa sekä temporaalisessa mittakaavassa, mikä voi rajoittaa tulosten vertailtavuutta.

### 4.3 Tutkimuksen rajoitteet

Tutkimuksessa tarkasteltu metaanivuoaineisto on kerätty käyttäen kammiomittausmenetelmää, joka on pyörrekovarianssitekniikan yleistymisestä huolimatta edelleen eniten käytetty menetelmä metaanivoiden mittaamiseen (Pavelka ym., 2018). Vaikka menetelmä on laajasti hyödynnetty ekosysteemien kaasunvaihdon määrittämisessä sen helppouden, kustannustehokkuuden ja monipuolisuuden vuoksi, sen käyttöön liittyy myös epävarmuuksia. Esimerkiksi kammion ja kauluksen välisen tiivistyksen onnistuminen vaikuttaa oleellisesti mittauksen luotettavuuteen ja mahdolliset vuodot aiheuttavat vuon aliarvioimista. Itse kammio muuttaa sen rajaaman alueen mikroilmastoa, kuten lämpötilaa ja kaasujen pitoisuuksia kammion ilmatilassa, ja voi siten vaikuttaa kaasujen luonnolliseen virtaukseen maan ja ilmakehän välillä. Vaikka sekä kammion että mittaajan aiheuttamia häiriöitä pyrittiin aktiivisesti minimoimaan esimerkiksi optimoimalla mittauksen kesto riittävän lyhyeksi, käyttämällä tuuletinta, seuraamalla lämpötilan ja kaasujen pitoisuuden muutoksia kammiossa mittauksen aikana ja tarvittaessa uusimalla mittaus, on virheiden mahdollisuus olemassa.

Mittausfrekvenssi, eli mittausten ajallinen tiheys sekä mittausten määrä on keskeinen tulosten yleistettävyyteen ja tilastolliseen merkitsevyyteen vaikuttava tekijä (Franco-Luesma ym., 2025). Tiedetään, että liian harva mittausfrekvenssi aiheuttaa huomattavia epävarmuuksia esimerkiksi vuosittaisten kasvihuonekaasutaseiden arvioinnissa (Savage ym., 2014).

Manuaaliset kammiomittaukset ovat luonteeltaan ajallisesti pistemäisiä ja mittaus edustaa vain mittaushetken olosuhteita, eivätkä siten välttämättä kykene huomioimaan esimerkiksi vuorokaudenaikaisvaihtelun tai edeltävien sääolosuhteiden vaikutusta mitatun metaanivuon suuruuteen. Tässä tutkimuksessa sääolosuhteiden vaikutusta metaanivoiden suuruuteen arvioitiin mittauksen aikaisten ympäristömuuttujien (pohjaveden korkeus, lämpötila) avulla, mutta muuten mittaushetkeä edeltävien sääolojen vaikutusta ei tutkittu.

Vuorokaudenaikaisvaihtelun vaikutus pyrittiin minimoimaan suorittamalla mittaukset päiväaikaan, pääosin kello 9–15 välillä. Vuonna 2022 osa mittauksista suoritettiin muita vuosia myöhemmin, kuitenkin aina ennen kello 19. Tutkimuksessa hyödynnetty metaanivuoaineisto kerättiin mittauskauten aikana pääasiassa noin kahden viikon välein ja mittauskauten pituus vaihteli vuosien välillä huomattavasti. Esimerkiksi vuonna 2020 mittauksia tehtiin vain neljänä päivänä. Tarkasteltavia kaasumittauspisteitä oli yhteensä kahdeksan, joista neljä edusti kuivempia mätäsalueita ja neljä kosteampia kuljuja. Vaikka mittauspisteiden sijoittelussa pyrittiin kattamaan alueen spatiaalista vaihtelua

mahdollisimman hyvin, kahdeksan pistettä ei täysin kykene edustamaan suon sisäistä huomattavaa mikrotopografista vaihtelua. Melko pieni ja vuosien välillä epätasainen aineisto voi heikentää tulosten yleistettävyyttä.

Vuoaineistoon liittyvien epävarmuuksien ohella tulosten tulkintaa voivat rajoittaa selittävien ympäristömuuttujien mittaamiseen ja käsittelyyn liittyvät tekijät. Tutkielmassa tarkasteltiin maaperän lämpötilaa ainoastaan viiden senttimetrin syvyydestä, joka kuivilla mittauspisteillä vastasi suoraan vain metaania kuluttavien, ei tuottavien mikrobien elinympäristöä. Maaperän lämpötilan mittaaminen usealta syvyydeltä, myös pohjaveden pinnan alapuolelta, voisi parantaa metaanipäästöjen ja lämpötilan suhteen arvioinnin luotettavuutta. Lisäksi mahdollista viivettä metaanivuon vasteessa ekosysteemin kokonaisperustuotannon muutokseen ei huomioitu tässä tutkimuksessa. Jatkossa vasteen ajallisen viiveen huomioonottaminen voisi parantaa ymmärrystä metaanivoiden ja ekosysteemin perustuotannon välisestä vuorovaikutuksesta, tukien esimerkiksi metaanipäästöjä ennustavien prosessipohjaisten mallien kehityksessä.

## 5 Johtopäätökset

Tutkielmassa selvitettiin ilman ja maaperän lämpötilan, pohjaveden korkeuden sekä ekosysteemin kokonaisperustuotannon vaikutusta ombrotrofisen keidassuon metaanivoiden lyhyen aikavälin vaihteluun. Lämpötila ohjasi metaanivoiden suuruutta voimakkaimmin tarkastelluista ympäristötekijöistä, mutta sen vaikutus riippui paikallisista olosuhteista. Kosteissa painanteissa metaanivuot kasvoivat lämpötilan noustessa. Kuivemmilla mätäspinoilla lämpötilan nousu vaikutti metaanivoihin ensin niitä lisäävästi, mutta lämpötilan noustessa noin kymmeneen asteeseen metaanivuot kääntyivät laskuun. Metaanivuon pienentyminen voi viitata esimerkiksi metaanin tuotantoa voimakkaammin kiihtyneeseen metaanin kulutukseen, johtuen alhaisesta pohjaveden korkeudesta tai kuivemmasta turpeen pinnasta lämpiminä mittauspäivinä. Myös pohjaveden korkeuden ja metaanivoiden välillä havaittiin epälineaarinen suhde kosteilla mittauspisteillä.

Verrattuna lämpötilaan ja pohjaveden korkeuteen, ekosysteemin tuotannon rooli metaanivoiden säätelijänä on jäänyt kirjallisuudessa vähäisemmälle huomiolle. Tässä tutkielmassa ekosysteemin kokonaisperustuotannon kasvun havaittiin lisäävän metaanivuota kosteilla mittauspisteillä, tukien käsitystä tuoreiden hiiliyhdisteiden saatavuuden merkittävydestä metaanintuotannon säätelyssä.

Tutkielman tulokset korostavat boreaalisen ombrotrofisen suon metaanivuon herkkyyttä lämpötilan muutoksille sekä alleviivaavat tarvetta huomioida suon sisäinen paikallinen vaihtelu metaanipäästöjen mallinnuksessa. Ilmaston muuttuessa on entistä tärkeämpää ymmärtää, miten luonnolliset kasvihuonekaasupäästöt reagoivat esimerkiksi lämpötilan tai kosteuden muutoksiin. Ilmakehän metaanipitoisuus on kasvanut voimakkaasti viimeisen sadan vuoden aikana ja erityisesti viimeaikaisen, kiihtyvän kasvun oletetaan johtuvan suurelta osin biogeenisten metaanipäästöjen kasvusta. Kosteikot, kuten suot ja makeat sisävedet, muodostavat suurimman osan luonnollisista metaanipäästöistä. Näiden päästöjen kehityksen ymmärtäminen on keskeistä esimerkiksi kansallisen hiilibudjetin luotettavassa arvioinnissa ja vaikuttavien ilmastotoimien suunnittelussa. Kattavat kenttähavainnot metaanivoiden käyttäytymisestä ja niiden vaihtelua ohjailevista tekijöistä erilaisissa ekosysteemeissä luovat välttämättömän perustan luotettavien ilmastomallien kehitykselle.

## 6 Kiitokset

Suuri kiitos ohjaajilleni erinomaisista neuvoista, tsempeistä ja erityisesti kärsivällisyydestä pitkähköksi venyneen graduprosessin aikana. Kiitos kenttäparilleni Veronika Meriläiselle mainiosta mittausseurasta ja ahkerasta kuskina toimimisesta lukuisilla kenttämatoilla. Kiitän Suomen Biologian Seura Vanamoaa myöntämästään apurahasta, joka mahdollisti täyspäiväisen työskentelyn gradun parissa. Viimeisenä haluan antaa erityiskiitoksen ystäväilleni kirjastossa vietetyistä lukemattomista päivistä. Ilman teitä gradu olisi varmasti valmistunut huomattavasti aikaisemmin, mutta en vaihtaisi noita hetkiä mihinkään!

## Lähteet

- Aalto, T., Tsuruta, A., Mäkelä, J., Müller, J., Tenkanen, M., Burke, E., Chadburn, S., Gao, Y., Mannisenaho, V., Kleinen, T., Lee, H., Leppänen, A., Markkanen, T., Materia, S., Miller, P. A., Peano, D., Peltola, O., Poulter, B., Raivonen, M., ... Zaehle, S. (2025). Air temperature and precipitation constraining the modelled wetland methane emissions in a boreal region in northern Europe. *Biogeosciences*, *22*, 323–340. <https://doi.org/10.5194/BG-22-323-2025>
- Abdalla, M., Hastings, A., Truu, J., Espenberg, M., Mander, Ü., & Smith, P. (2016). Emissions of methane from northern peatlands: a review of management impacts and implications for future management options. Teoksessa *Ecology and Evolution*, *6*, 7080–7102. <https://doi.org/10.1002/ece3.2469>
- Angle, J. C., Morin, T. H., Solden, L. M., Narrowe, A. B., Smith, G. J., Borton, M. A., Rey-Sanchez, C., Daly, R. A., Mirfenderesgi, G., Hoyt, D. W., Riley, W. J., Miller, C. S., Bohrer, G., & Wrighton, K. C. (2017). Methanogenesis in oxygenated soils is a substantial fraction of wetland methane emissions. *Nature Communications*, *8*. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01753-4>
- Anthony, W. H., Hutchinson, G. L., & Livingston, G. P. (1995). Chamber measurement of soil-atmosphere gas exchange: Linear vs. diffusion-based flux models. *Soil Science Society of America Journal*, *59*, 1308–1310. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1995.03615995005900050015X>
- Aubinet, M., Vesala, T. & Papale, D. Eddy Covariance – A Practical guide to measurement and data analysis. *Springer Atmospheric Sciences*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>
- Baldocchi, D. D., Keeney, N., Rey-Sanchez, C., & Fisher, J. B. (2022). Atmospheric humidity deficits tell us how soil moisture deficits down-regulate ecosystem evaporation. *Advances in Water Resources*, *159*. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2021.104100>
- Basu, S., Lan, X., Dlugokencky, E., Michel, S., Schwietzke, S., Miller, J. B., Bruhwiler, L., Oh, Y., Tans, P. P., Apadula, F., Gatti, L. V., Jordan, A., Necki, J., Sasakawa, M., Morimoto, S., Di Iorio, T., Lee, H., Arduini, J., & Manca, G. (2022). Estimating emissions of methane consistent with atmospheric measurements of methane and  $\delta^{13}\text{C}$  of methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*, 15351–15377. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15351-2022>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*, 1–48. <https://doi.org/10.18637/JSS.V067.I01>
- Bridgham, S. D., Cadillo-Quiroz, H., Keller, J. K., & Zhuang, Q. (2013). Methane emissions from wetlands: Biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, *19*, 1325–1346. <https://doi.org/10.1111/gcb.12131>
- Bruhn, D., Møller, I. M., Mikkelsen, T. N., & Ambus, P. (2012). Terrestrial plant methane production and emission. *Physiologia Plantarum*, *144*, 201–209. <https://doi.org/10.1111/J.1399-3054.2011.01551.X>
- Bubier, J., Costello, A., Moore, T. R., Roulet, N. T., & Savage, K. (1993). Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Botany*, *71*, 1056–1063. <https://doi.org/10.1139/B93-122>
- Bubier, J. L., & Moore, T. R. (1994). An ecological perspective on methane emissions from northern wetlands. *Trends in Ecology & Evolution*, *9*, 460–464. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(94\)90309-3](https://doi.org/10.1016/0169-5347(94)90309-3)

- Bubier, J., Moore, T., Savage, K., & Crill, P. (2005). A comparison of methane flux in a boreal landscape between a dry and a wet year. *Global Biogeochemical Cycles*, *19*, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2004GB002351>
- Carmichael, M. J., Bernhardt, E. S., Bräuer, S. L., & Smith, W. K. (2014). The role of vegetation in methane flux to the atmosphere: Should vegetation be included as a distinct category in the global methane budget? *Biogeochemistry*, *119*, 1–24. <https://doi.org/10.1007/S10533-014-9974-1>
- Christensen, S., Ambus, P., Arah, J. R. M., Clayton, H., Galle, B., Griffith, D. W. T., Hargreaves, K. J., Klemmedtsson, L., Lind, A. M., Maag, M., Scott, A., Skiba, U., Smith, K. A., Welling, M., & Wienhold, F. G. (1996). Nitrous oxide emission from an agricultural field: Comparison between measurements by flux chamber and micrometeorological techniques. *Atmospheric Environment*, *30*, 4183–4190. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00145-8](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00145-8)
- Christensen, T. R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Öquist, M., Svensson, B. H., Nykänen, H., Martikainen, P. J., & Oskarsson, H. (2003). Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. *Geophysical Research Letters*, *30*, 1414. <https://doi.org/10.1029/2002GL016848>
- Christiansen, J. R., Korhonen, J. F. J., Juszczak, R., Giebels, M., & Pihlatie, M. (2011). Assessing the effects of chamber placement, manual sampling and headspace mixing on CH<sub>4</sub> fluxes in a laboratory experiment. *Plant and Soil*, *343*, 171–185. <https://doi.org/10.1007/S11104-010-0701-Y>
- Corbeil, R. R., & Searle, S. R. (1976). Restricted maximum likelihood (reml) estimation of variance components in the mixed model. *Technometrics*, *18*, 31–38. <https://doi.org/10.2307/1267913>
- Couwenberg, J., & Fritz, C. (2012). Towards Developing IPCC Methane ‘Emission Factors’ for Peatlands (Organic Soils). *Mires and Peat*, *10*. <https://doi.org/10.19189/001C.128455>
- DING, W. X., & CAI, Z. C. (2007). Methane Emission from Natural Wetlands in China: Summary of Years 1995–2004 Studies. *Pedosphere*, *17*, 475–486. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60057-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60057-5)
- Dormann, C. F., Schymanski, S. J., Cabral, J., Chuine, I., Graham, C., Hartig, F., Kearney, M., Morin, X., Römermann, C., Schröder, B., & Singer, A. (2012). Correlation and process in species distribution models: bridging a dichotomy. *Journal of Biogeography*, *39*, 2119–2131. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2699.2011.02659.X>
- Dunfield, P., Knowles, R., Dumont, R., & Moore, T. R. (1993). Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: Response to temperature and pH. *Soil Biology and Biochemistry*, *25*, 321–326. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90130-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90130-4)
- Evans, C. D., Peacock, M., Baird, A. J., Artz, R. R. E., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P. J., Cooper, H. M., Coyle, M., Craig, E., Cumming, A., Dixon, S., Gauci, V., Grayson, R. P., Helfter, C., Heppell, C. M., Holden, J., Jones, D. L., Kaduk, J., ... Morrison, R. (2021). Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature* *593*, 548–552. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang (2021) The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. 923–1054, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- Franco-Luesma, S., Alonso-Ayuso, M., Wolf, B., Latorre, B., & Álvaro-Fuentes, J. (2025). Measurement of greenhouse gas fluxes in agricultural soils with a flexible, open-design automated system. *SOIL*, *11*, 523–533. <https://doi.org/10.5194/SOIL-11-523-2025>

- Goodrich, J. P., Campbell, D. I., Roulet, N. T., Clearwater, M. J., & Schipper, L. A. (2015). Overriding control of methane flux temporal variability by water table dynamics in a Southern Hemisphere, raised bog. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *120*, 819–831. <https://doi.org/10.1002/2014JG002844>
- Granberg, G., Ottosson-Löfvenius, M., Grip, H., Sundh, I., & Nilsson, M. (2001). Effect of climatic variability from 1980 to 1997 on simulated methane emission from a boreal mixed mire in northern Sweden. *Global Biogeochemical Cycles*, *15*, 977–991. <https://doi.org/10.1029/2000GB001356>
- Große, W. (1996). The mechanism of thermal transpiration (= thermal osmosis). *Aquatic Botany*, *54*, 101–110. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(96\)01038-8](https://doi.org/10.1016/0304-3770(96)01038-8)
- Grünfeld, S., & Brix, H. (1999). Methanogenesis and methane emissions: effects of water table, substrate type and presence of *Phragmites australis*. *Aquatic Botany*, *64*, 63–75. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00010-8)
- Guerrero-Cruz, S., Vaksmaa, A., Horn, M. A., Niemann, H., Pijuan, M., & Ho, A. (2021). Methanotrophs: Discoveries, Environmental Relevance, and a Perspective on Current and Future Applications. *Frontiers in Microbiology*, *12*. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2021.678057/XML>
- Hanson, R. S. & Hanson T. E. (1996) Methanotrophic bacteria. *Microbiological reviews*, *60*, 439–71. <https://doi.org/10.1128/mr.60.2.439-471.1996>
- Hendriks, D. M. D., van Huissteden, J., & Dolman, A. J. (2010). Multi-technique assessment of spatial and temporal variability of methane fluxes in a peat meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*, 757–774. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2009.06.017>
- Ilmatieteenlaitos (2025) Havaintojen lataus (ilman keskilämpötila, sademäärä) <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>> [Ladattu 22.11.2024]
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jackowicz-Korczyński, M., Christensen, T. R., Bäckstrand, K., Crill, P., Friborg, T., Maste-panov, M., & Ström, L. (2010). Annual cycle of methane emission from a subarctic peat-land. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *115*. <https://doi.org/10.1029/2008JG000913>
- Joabsson, A., & Christensen, T. R. (2001). Methane emissions from wetlands and their relationship with vascular plants: an Arctic example. *Global Change Biology*, *7*, 919–932. <https://doi.org/10.1046/J.1354-1013.2001.00044.X>
- Jokinen, P., Pirinen, P., Kaukoranta J., Kangas, A., Alenius, P., Eriksson, P., Johansson, M. & Wilkman, S. (2021) Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1991–2020. Raportteja, Finnish Meteorological Institute, Helsinki.
- Juutinen, S., Moore, T. R., Bubier, J. L., Arnkil, S., Humphreys, E., Marincak, B., Roy, C., & Larmola, T. (2018). Long-term nutrient addition increased CH<sub>4</sub> emission from a bog through direct and indirect effects. *Scientific Reports 2018 8:1*, *8*, 3838-. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22210-2>
- Kalliola, R. (1973) Suomen kasvimaantiede. WSOY, Porvoo.
- Kaakinen, E., Kokko, A., Aapala, K., Autio, O., Eurola, S., Hotanen, J.P., Kondelin, H., Lindholm, T., Nousiainen, H., Rehell, S., Ruuhijärvi, R., Sallantausta, T., Salminen, P., Tahvanainen, T., Tuominen, S., Turunen, J., Vasander, H. 6 Virtanen K. (2018) Suot. Julk.: Kontula, T. & Raunio, A. Teoksessa: *Suomen luontotyyppeiden uhanalaisuus 2018. Luontotyyppeiden punainen kirja – Osa 2: luontotyyppeiden kuvaukset*. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki, 321–474.

- Kankaala, P., Käki, T., Mäkelä, S., Ojala, A., Pajunen, H., & Arvola, L. (2005). Methane efflux in relation to plant biomass and sediment characteristics in stands of three common emergent macrophytes in boreal mesoeutrophic lakes. *Global Change Biology*, *11*, 145–153. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2004.00888.X>
- Kepler, F., Boros, M., Frankenberg, C., Lelieveld, J., McLeod, A., Pirttilä, A. M., Röckmann, T., & Schnitzler, J. P. (2009). Methane formation in aerobic environments. *Environmental Chemistry*, *6*, 459–465. <https://doi.org/10.1071/EN09137>
- Kim, J., Verma, S. B., Billesbach, D. P., & Clement, R. J. (1998). Diel variation in methane emission from a midlatitude prairie wetland: Significance of convective throughflow in *Phragmites australis*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *103*, 28029–28039. <https://doi.org/10.1029/98JD02441>
- King, J. Y., & Reeburgh, W. S. (2002). A pulse-labeling experiment to determine the contribution of recent plant photosynthates to net methane emission in arctic wet sedge tundra. *Soil Biology and Biochemistry*, *34*, 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00164-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00164-X)
- Kirschke, S., Bousquet, P., Ciais, P., Saunio, M., Canadell, J. G., Dlugokencky, E. J., Bergamaschi, P., Bergmann, D., Blake, D. R., Bruhwiler, L., Cameron-Smith, P., Castaldi, S., Chevallier, F., Feng, L., Fraser, A., Heimann, M., Hodson, E. L., Houweling, S., Josse, B., ... Zeng, G. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Teoksessa Nature Geoscience*, *6*, 813–823. <https://doi.org/10.1038/ngeo1955>
- Korkiakoski, M., Ojanen, P., Tuovinen, J. P., Minkkinen, K., Nevalainen, O., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., & Lohila, A. (2023). Partial cutting of a boreal nutrient-rich peatland forest causes radically less short-term on-site CO<sub>2</sub> emissions than clear-cutting. *Agricultural and Forest Meteorology*, *332*. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2023.109361>
- Korkiakoski, M., Tuovinen, J. P., Aurela, M., Koskinen, M., Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Rainne, J., Laurila, T., & Lohila, A. (2017). Methane exchange at the peatland forest floor - Automatic chamber system exposes the dynamics of small fluxes. *Biogeosciences*, *14*, 1947–1967. <https://doi.org/10.5194/BG-14-1947-2017>
- Korrensalo, A., Männistö, E., Alekseychik, P., Mammarella, I., Rinne, J., Vesala, T., & Tuittila, E.-S. (2018). Small spatial variability in methane emission measured from a wet patterned boreal bog. *Biogeosciences*, *15*, 1749–1761. <https://doi.org/10.5194/bg-15-1749-2018>
- Koskinen, M., Minkkinen, K., Ojanen, P., Kämäräinen, M., Laurila, T., & Lohila, A. (2014). Measurements of CO<sub>2</sub> exchange with an automated chamber system throughout the year: Challenges in measuring night-time respiration on porous peat soil. *Biogeosciences*, *11*, 347–363. <https://doi.org/10.5194/BG-11-347-2014>
- Kotiaho, M., Fritze, H., Merilä, P., Tuomivirta, T., Välijärvi, M., Korhola, A., Karofeld, E., & Tuittila, E. S. (2013). Actinobacteria community structure in the peat profile of boreal bogs follows a variation in the microtopographical gradient similar to vegetation. *Plant and Soil*, *369*, 103–114. <https://doi.org/10.1007/S11104-012-1546-3/METRICS>
- Kweku, D., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K., Danso, K., Oti-Mensah, E., Quachie, A., & Adormaa, B. (2018). Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research and Reports*, *17*, 1–9. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2017/39630>
- Lai, D. Y. F. (2009). Methane Dynamics in Northern Peatlands: A Review. *Pedosphere*, *19*, 409–421. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)00003-4)
- Lai, D. Y. F., Moore, T. R., & Roulet, N. T. (2014). Spatial and temporal variations of methane flux measured by autochambers in a temperate ombrotrophic peatland. *Journal of*

- Geophysical Research: Biogeosciences*, 119, 864–880.  
<https://doi.org/10.1002/2013JG002410>
- Laine, J. & Vasander, H. (1990) Suotyypit. Kirjayhtymä.
- Laine, A., Wilson, D., Kiely, G., & Byrne, K. A. (2007). Methane flux dynamics in an Irish lowland blanket bog. *Plant and Soil*, 299, 181–193. <https://doi.org/10.1007/S11104-007-9374-6>
- Lakomiec, P., Holst, J., Friborg, T., Crill, P., Rakos, N., Kljun, N., Olsson, P. O., Eklundh, L., Persson, A., & Rinne, J. (2021). Field-scale CH<sub>4</sub> emission at a subarctic mire with heterogeneous permafrost thaw status. *Biogeosciences*, 18, 5811–5830.  
<https://doi.org/10.5194/BG-18-5811-2021>
- Lan, X., K.W. Thoning, and E.J. Dlugokencky: Trends in globally-averaged CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and SF<sub>6</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2025-12, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>
- Le Mer, J., & Roger, P. (2001). Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 37, 25–50.  
[https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6)
- Lyu, Z., Shao, N., Akinyemi, T., & Whitman, W. B. (2018). Methanogenesis. *Current Biology*, 28, R727–R732. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.05.021>
- Mastepanov, M., Sigsgaard, C., Tagesson, T., Ström, L., Tamstorf, M. P., Lund, M., & Christensen, T. R. (2013). Revisiting factors controlling methane emissions from high-Arctic tundra. *Biogeosciences*, 10, 5139–5158. <https://doi.org/10.5194/BG-10-5139-2013>
- Metje, M., & Frenzel, P. (2005). Effect of temperature on anaerobic ethanol oxidation and methanogenesis in acidic peat from a northern wetland. *Applied and environmental microbiology*, 71, 8191–8200. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.12.8191-8200.2005>
- Nisbet, E. G., Manning, M. R., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E., Lan, X., Röckmann, T., Denier van der Gon, H. A. C., Schmitt, J., Palmer, P. I., Dyonisius, M. N., Oh, Y., Fisher, R. E., Lowry, D., France, J. L., White, J. W. C., Brailsford, G., & Bromley, T. (2023). Atmospheric Methane: Comparison Between Methane’s Record in 2006–2022 and During Glacial Terminations. *Global Biogeochemical Cycles*, 37.  
<https://doi.org/10.1029/2023GB007875>
- OECD (2025). Targeting methane emissions to mitigate the risk of climate overshoot. *Net Zero+ Policy Papers*, 14, <https://doi.org/10.1787/5fa37719-en>
- Patrignani, A., & Ochsner, T. E. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107, 2312–2320.  
<https://doi.org/10.2134/AGRONJ15.0150>
- Pavelka, M., Acosta, M., Kiese, R., Altimir, N., Brümmer, C., Crill, P., Darenova, E., Fuß, R., Gielen, B., Graf, A., Klemedtsson, L., Lohila, A., Longdoz, B., Lindroth, A., Nilsson, M., Jiménez, S. M., Merbold, L., Montagnani, L., Peichl, M., ... Kutsch, W. (2018). Standardisation of chamber technique for CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes measurements from terrestrial ecosystems. *International Agrophysics*, 32, 569–587.  
<https://doi.org/10.1515/INTAG-2017-0045>
- Perez-Coronel, E., & Michael Beman, J. (2022). Multiple sources of aerobic methane production in aquatic ecosystems include bacterial photosynthesis. *Nature Communications*, 13, 6454-. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34105-y>
- Pihlatie, M. K., Christiansen, J. R., Aaltonen, H., Korhonen, J. F. J., Nordbo, A., Rasilo, T., Benanti, G., Giebels, M., Helmy, M., Sheehy, J., Jones, S., Juszczak, R., Klefoth, R., Lobo-do-Vale, R., Rosa, A. P., Schreiber, P., Serça, D., Vicca, S., Wolf, B., & Pumpanen, J. (2013). Comparison of static chambers to measure CH<sub>4</sub> emissions from

- soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172, 124–136.  
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2012.11.008>
- Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Ciais, P., Peregon, A., Saunio, M., Arora, V. K., Beerling, D. J., Brovkin, V., Jones, C. D., Joos, F., Gedney, N., Ito, A., Kleinen, T., Koven, C. D., McDonald, K., Melton, J. R., Peng, C., Peng, S., ... Zhu, Q. (2017). Global wetland contribution to 2000–2012 atmospheric methane growth rate dynamics. *Environmental Research Letters*, 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8391>
- Pypker, T. G., Moore, P. A., Waddington, J. M., Hribljan, J. A., & Chimner, R. C. (2013). Shifting environmental controls on CH<sub>4</sub> fluxes in a sub-boreal peatland. *Biogeosciences*, 10, 7971–7981. <https://doi.org/10.5194/BG-10-7971-2013>
- Raghoebarsing, A. A., Smolders, A. J. P., Schmid, M. C., Rijpstra, W. I. C., Wolters-Arts, M., Derksen, J., Jetten, M. S. M., Schouten, S., Damsté, J. S. S., Lamers, L. P. M., Roelofs, J. G. M., Op Den Camp, H. J. M., & Strous, M. (2005). Methanotrophic symbionts provide carbon for photosynthesis in peat bogs. *Nature*, 436, 1153–1156.  
<https://doi.org/10.1038/nature03802>
- Rinne, J., Riutta, T., Pihlatie, M., Aurela, M., Haapanala, S., Tuovinen, J. P., Tuittila, E. S., & Vesala, T. (2007). Annual cycle of methane emission from a boreal fen measured by the eddy covariance technique. *Tellus B*, 59, 449–457. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0889.2007.00261.X>
- Rinne, J., Tuittila, E. S., Peltola, O., Li, X., Raivonen, M., Alekseychik, P., Haapanala, S., Pihlatie, M., Aurela, M., Mammarella, I., & Vesala, T. (2018). Temporal Variation of Ecosystem Scale Methane Emission From a Boreal Fen in Relation to Temperature, Water Table Position, and Carbon Dioxide Fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 32, 1087–1106. <https://doi.org/10.1029/2017GB005747>
- Riutta, T., Korrensalo, A., Laine, A. M., Laine, J., & Tuittila, E. S. (2020). Interacting effects of vegetation components and water level on methane dynamics in a boreal fen. *Biogeosciences*, 17, 727–740. <https://doi.org/10.5194/BG-17-727-2020>
- Rydin, H., Jeglum, J.K. and Hooijer, A. (2006) The Biology of Peatlands. Oxford University Press, Oxford, 1–19. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198528722.001.0001>
- Satriawan, T. W., Nyberg, M., Lee, S. C., Christen, A., Black, T. A., Johnson, M. S., Nestic, Z., Merckens, M., & Knox, S. H. (2023). Interannual variability of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) fluxes in a rewetted temperate bog. *Agricultural and Forest Meteorology*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109696>
- Saunio, M., Martinez, A., Poulter, B., Zhang, Z., Raymond, P. A., Regnier, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Patra, P. K., Bousquet, P., Ciais, P., Dlugokencky, E. J., Lan, X., Allen, G. H., Bastviken, D., Beerling, D. J., Belikov, D. A., Blake, D. R., Castaldi, S., ... Zhuang, Q. (2025). Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data*, 17, 1873–1958. <https://doi.org/10.5194/essd-17-1873-2025>
- Savage, K., Phillips, R., & Davidson, E. (2014). High temporal frequency measurements of greenhouse gas emissions from soils. *Biogeosciences*, 11, 2709–2720.  
<https://doi.org/10.5194/BG-11-2709-2014>
- Skov, K. (2014). Spatiotemporal variability in methane emission from an Arctic fen over a growing season: dynamics and driving factors. *Student thesis INES; (2014)*.  
<http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4280464>
- Steffens, B., Geske, T. & Sauter, M. (2011), Aerenchyma formation in the rice stem and its promotion by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 190, 369–378. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03496.x>
- Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M., & Christensen, T. R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology*, 9, 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2486.2003.00655.X>

- Ström, L., Mastepanov, M., & Christensen, T. R. (2005). Species-specific effects of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from wetlands. *Biogeochemistry*, *75*, 65–82. <https://doi.org/10.1007/S10533-004-6124-1/METRICS>
- Szafranek-Nakonieczna, A. & Bennicelli, R. P. (2010) Ability of peat soil to oxidize methane and affect temperature and layer deposition. *Polish Journal of Environmental Studies*, *4*, 805–810.
- 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., & Wilking, M. (2014). A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology*, *20*, 2183–2197. <https://doi.org/10.1111/gcb.12580>
- Turunen, J. (2008). Development of Finnish peatland area and carbon storage 1950-2000. *Geophysical Research Abstracts*, *10*, 2008–11991.
- van den Berg, M., van den Elzen, E., Ingwersen, J., Kosten, S., Lamers, L. P. M. & Streck, T. (2020) Contribution of plant-induced pressurized flow to CH<sub>4</sub> emission from a *Phragmites* fen. *Scientific Reports*, *10*. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69034-7>
- van Winden, J. F., Reichart, G. J., McNamara, N. P., Benthien, A., & Damsté, J. S. S. (2012). Temperature-Induced Increase in Methane Release from Peat Bogs: A Mesocosm Experiment. *PLoS ONE*, *7*, e39614. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0039614>
- Vekuri, H., Tuovinen, J. P., Kulmala, L., Papale, D., Kolari, P., Aurela, M., Laurila, T., Liski, J., & Lohila, A. (2023). A widely-used eddy covariance gap-filling method creates systematic bias in carbon balance estimates. *Scientific Reports*, *13*, 1720-. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28827-2>
- Veretennikova, E. & Dyukarev E. A. (2021) Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia. *Boreal Environmental Research*, *26*, 43–59
- Villa, J. A., Ju, Y., Vines, C., Rey-Sanchez, C., Morin, T. H., Wrighton, K. C., & Bohrer, G. (2019). Relationships Between Methane and Carbon Dioxide Fluxes in a Temperate Cattail-Dominated Freshwater Wetland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *124*, 2076–2089. <https://doi.org/10.1029/2019JG005167>
- Walter, B. P., & Heimann, M. (2000). A process-based, climate-sensitive model to derive methane emissions from natural wetlands: Application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate. *Global Biogeochemical Cycles*, *14*, 745–765. <https://doi.org/10.1029/1999GB001204>
- Wang, J., Akiyama, H., Yagi, K., & Yan, X. (2018). Controlling variables and emission factors of methane from global rice fields. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*, 10419–10431. <https://doi.org/10.5194/ACP-18-10419-2018>
- Wang, Q., Alowaifeer, A., Kerner, P., Balasubramanian, N., Patterson, A., Christian, W., Tarver, A., Dore, J. E., Hatzenpichler, R., Bothner, B., & McDermott, T. R. (2021). Aerobic bacterial methane synthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *118*, e2019229118. [https://doi.org/10.1073/PNAS.2019229118/SUPPL\\_FILE/PNAS.2019229118.SAPP.PDF](https://doi.org/10.1073/PNAS.2019229118/SUPPL_FILE/PNAS.2019229118.SAPP.PDF)
- Zhang, H., Tuittila, E. S., Korrensalo, A., Laine, A. M., Uljas, S., Welti, N., Kerttula, J., Maljanen, M., Elliott, D., Vesala, T., & Lohila, A. (2021). Methane production and oxidation potentials along a fen-bog gradient from southern boreal to subarctic peatlands in Finland. *Global Change Biology*, *27*, 4449–4464. <https://doi.org/10.1111/GCB.15740>
- Zhang, Z., Zimmermann, N. E., Stenke, A., Li, X., Hodson, E. L., Zhu, G., Huang, C., & Poulter, B. (2017). Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century

climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(36), 9647–9652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618765114>

Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Elphick, C. S. (2010). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*, 1(1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/J.2041-210X.2009.00001.X>