



HELSINGIN YLIOPISTO
MAATALOUS-METSÄTIEEELLINEN TIEDEKUNTA

Poron papanoiden vaikutus pohjoisten soiden kasvillisuuteen ja CH₄-päästöihin

Elli-Noora Kamppuri

Pro gradu -tutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Metsien ekologia ja käyttö

Helmikuu 2021

Tiedekunta/Osasto Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma Metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä Elli-Noora Kampuri			
Työn nimi Poron papanoiden vaikutus pohjoisten soiden kasvillisuuteen ja CH ₄ -päästöihin			
Oppiaine Metsien ekologia ja käyttö / Metsä- ja suoekosysteemien hoito ja ennallistaminen			
Työn laji Maisterintutkielma	Aika Helmikuu 2021	Sivumäärä 57	
Tiivistelmä			
<p>Suot ovat maapallolla sekä merkittäviä hiilivarastoja että suurimpia luontaisia metaanin lähteitä. Metaani on toiseksi merkittävin kasvihuonekaasu hiilidioksidin jälkeen ja voimakkuudeltaan moninkertainen hiilidioksidiin nähden. Koska suot tuottavat paljon metaania, on tärkeä selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat soiden metaanintuotantoon ja sen suuruuteen. Subarktisen ilmastovyöhykkeen minerotrofisten sarasoiden on todettu tuottavan suhteessa enemmän metaanipäästöjä verrattuna muiden ilmastovyöhykkeiden vastaaviin soihin, vaikka yleensä korkeampien leveyspiirien suot tuottavat vähemmän metaania matalampien leveyspiirien soihin nähden. Porojen laidunnuksen on pohdittu vaikuttavan subarktisten minerotrofisten sarasoiden suuriin metaanipäästöihin. Minerotrofiset sarasuot ovat tärkeitä laidunnusalueita poroille pohjoisessa Fenno-skandiassa erityisesti kesäaikaan. Laiduntavat herbivorit muokkaavat ekosysteemiään monilla tavoilla sekä suoraan että epäsuorasti. Laidunnuksen on todettu eri arktisilla ja subarktisilla ekosysteemeillä suosivan muun muassa sarakasvien kasvua ja lisäävän maaperän mikrobistoa ja sen aktiivisuutta ulosteiden ravinnelisyksen ansiosta. Lisäksi porot märehittöinä voivat muokata metaanintuotantoa suoekosysteemissä, jos pötsin metanogeenisiä mikrobeja kulkeutuu papanoiden mukana suohon.</p> <p>Tässä pro gradu -tutkielmassa selvitetään, miten poron papanoiden lisääminen suolle vaikuttaa suon metaanipäästöihin ja kasvillisuuteen. Työssä halutaan selvittää, millaisia vaikutuksia papanalisäyksellä on suon kasvien kasvuun, kasvilajisuhteisiin ja niiden kautta metaanipäästöihin. Uskotaan, että poron papanat lisäävät suolla sarakasvien runsautta, jotka kuljettavat solukoissaan metaania ja näin lisäävät suon metaanipäästöjä. Papanoiden aiheuttaman ravinnelisyksen epäillään muuttavan kasvilajisuhteita siten, että enemmän ravinteita vaativat lajit lisääntyvät. Papanalisäyksen uskotaan lisäävän suon metaanipäästöjä myös aktivoimalla suon metanogeenisten mikrobien toimintaa. Papanalisäyksen vaikutus kasvillisuuteen ja metaanipäästöihin oli hyvin vähäinen ensimmäisen kasvukauden aikana (Salovaara 2020). Tässä pro gradu -työssä seurataan papanalisäyksen vaikutusta pidemmällä aikavälillä, sillä muutokset kasvillisuudessa voivat olla hitaita ja vaikutukset metaanipäästöihin kehittyä vasta myöhemmässä vaiheessa. Lisäksi tutkimuksessa selvitetään, miten pelkkä turve ilman kasvillisuuden vaikutusta reagoi papanalisäykseen maasto-olosuhteissa.</p> <p>Aineiston keruu tähän tutkielmaan tapahtui 1.6.-31.8.2020 Pohjois-Suomessa. Tutkimuskohteina oli kaksi minerotrofista sarasuota Lapissa. Ensimmäinen suo oli Lompolonjänkällä Pallasjärvellä Muoniossa ja toinen Halssiaapa Sodankylässä. Lompolonjängkällä oli 27 mittauspistettä ja Halssiaavalla 18. Mittauspisteiltä mitattiin 1-2 viikon välein metaanipäästöt, lehtiala, pohjavedenpinta ja turpeen lämpötila. Lompolonjängän mittauspisteistä kuusi oli sellaista, joista kaikki pintakasvillisuus poistettiin, jotta papanalisäyksen vaikutusta turpeessa voisi seurata. Lisäksi suolla tehtiin inkubointikoe, jonka tarkoituksena oli selvittää, miten poron papanat hajoavat turpeessa.</p> <p>Tulosten perusteella poron papanat lisäsivät metaanivuota Halssiaavan jänteillä ja välipinnoilla, kun ne lisäämisen jälkeen survoitiin suohon. Lompolonjängkällä metaanivuo oli pienempi mittauspisteillä, joille oli lisätty papanoita. Uusilla kasvittomilla ja kasvillisilla mittauspisteillä ei havaittu muutoksia metaanivuossa. Kasvillisuuden lehtialassa ei huomattu vaihtelua laidunnuksen tai papanalisäyksen takia Lompolonjängkällä. Halssiaavan jänteillä laidunnus ja papanalisäykset näyttivät pienentävän lehtialaa. Myös välipinnoilla laidunnus pienensi lehtialaa. Uppolisäyspisteillä lehtiala pieneni, mutta biomassaa antoi tästä päinvastaisen tuloksen. Papanoiden hajoaminen turpeessa oli nopeampaa lähempänä pintaa. Kolmen kuukauden aikana pintapapanoiden kuivamassa pieneni puoleen ja pohjapapanoiden kahteen kolmannekseen.</p> <p>Papanoiden vaikutus metaanivuohon näyttäisi ilmenevän vasta seuraavana kasvukautena. Lompolonjängkällä papanoiden ravinnelisyys paransi ruohojen kasvuolosuhteita, mikä runsastutti niiden määrää suhteessa saroihin. Tämä vaikutti metaanivuohon laskevasti. Halssiaavan välipinnalla ruohoja ei esiintynyt mittauspisteillä lainkaan, minkä takia papanalisäys näytti vaikuttavan positiivisesti saramaisten kasvien kasvuun uppolisäysaloilla ja näin ollen kohotti metaanivuota. Jänteillä pintalisäyspisteiden lehtiala oli kontrollia pienempi, mutta metaanivuo selkeästi suurempi. Jännepinnoilla lehtiala ei näyttäisi korreloivan samalla tavalla metaanivuon kanssa kuin välipinnoilla.</p>			
Avainsanat Minerotrofien sarasuot, poro, metaani, laidunnus, subarkkinen			
Säilytyspaikka Helsingin yliopiston kirjasto / Helda – E-thesis, ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja Tämä tutkimus toteutettiin osana Luonnonvarakeskuksen ACAP-tutkimushanketta (Acclimation of arctic peatlands – through reindeer grazing – to a changing climate), Ohjaajana toimi Päivi Mäkiranta.			

Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Degree programme Master's Programme in Forest Sciences	
Author Elli-Noora Kamppuri			
Title Effects of Reindeer Droppings on the Vegetation and Methane Emissions of Northern Peatlands			
Subject Forest Ecology and Management / Management and Restoration of Forest and Peatland Ecosystems			
Level Master's thesis	Month and year February 2021	Number of pages 57	
Abstract			
<p>Peatlands are significant carbon storages and the largest source of natural methane. Methane is the second most significant greenhouse gas after carbon dioxide and multiple times more effective than carbon dioxide. Due to peatlands role in producing much methane, it is important to find out what factors affect the amount of methane emissions of the peatlands. Minerotrophic sedge fens in subarctic climate zone have been discovered to produce relatively more methane emissions than similar peatlands in other climate zones, even though usually peatlands on higher latitudes produce less methane than those on lower latitudes. The grazing of reindeer is speculated to affect the large methane emissions from subarctic, minerotrophic sedge fens. Minerotrophic sedge fens work as an important grazing area for reindeer in northern Fennoscandia especially in summertime. Grazing herbivores alter the ecosystems in many ways both directly and indirectly. The grazing in different arctic and subarctic ecosystems has been noted among other things to favour the growth of sedges and increase the amount and activity of soil microbes by the nutrient addition from the faeces. In addition, reindeer as ruminants might alter the methane production in peatland ecosystems if methanogens from the rumen drift to the peatland with the droppings.</p> <p>In this master's thesis the aim is to find out how adding reindeer droppings into the peatland affects the methane emissions and vegetation of the peatland. In this study it is wished to discover what kind of effects can the droppings have on the growth of peatland plants, the diving of plant species and through them on the methane emissions. It is assumed that the droppings will increase the number of sedges, which transport methane in their cell tissue and therefore increase the methane emissions of the peatland. The nutrient addition from the droppings is believed to change the division of the plant species so that the number of plants that require more nutrients will increase. Reindeer droppings are predicted to increase the methane emissions of the peatland also by activating the methanogens living in the peat. Adding the droppings had only little effect on the vegetation and methane emissions during the first growing season (Salovaara 2020). In this master's thesis the long-term effect of the droppings is followed, since the changes in vegetation can be slow and the effects in methane emissions might develop later on. In addition, in this thesis it is studied how the peat alone without any vegetation reacts to adding the droppings in field circumstances.</p> <p>Collection of the data for this study happened between 1.6.-31.8.2020 in Northern Finland. As study areas there were two minerotrophic sedge fens in Lapland. One of the peatlands was Lompolonjänkkä in Pallasjärvi, Muonio and the other one was Halssiaapa in Sodankylä. Lompolonjänkkä had 27 measurement points and Halssiaapa 18 points. From the measurement points methane fluxes, leaf area index of the vegetation, level of the ground water and the temperature of the peat was measured at least every other week. Six of the measurement points in Lompolonjänkkä had their vegetation removed to that the effect of the droppings could be followed in peat alone. There was also conducted an incubation examination, which aimed to find out how the reindeer droppings decay inside the peat.</p> <p>Based on the results the reindeer droppings increased the methane flux in Halssiaapa on the hummock and on the lawn when the droppings were trampled into the peat after adding them. In Lompolonjänkkä the methane flux was smaller on the points with added droppings. New vegetated and non-vegetated points had no change in fluxes due to the droppings. Leaf area index was not affected by the grazing of the dropping additions in Lompolonjänkkä. In Halssiaapa the grazing and dropping addition decreased the leaf area. Also, on the lawn grazing decreased the leaf area. Trampled droppings decreased the leaf area but increased the biomass. Decaying of the droppings was faster closer to the surface than deeper in the peat. In three months, the surface droppings had lost half of their dry weight and the bottom droppings one third.</p> <p>The effect of the droppings seems to be viable only during the next growing season. In Lompolonjänkkä the droppings seemed to improve the growth and the number of grasses compared to the sedges. This seemed to decrease the methane flux. In Halssiaapa there were no grasses on the lawn and therefore the trampled droppings increased the growth of sedges and therefore also methane fluxes. On the hummock leaf area was smaller where the droppings were added, but the methane flux there was larger. On the hummock leaf area index did not seem to correlate with the methane flux in the way it did on the lawn.</p>			
Keywords Minerotrophic sedge fen, reindeer, methane, grazing, subarctic			
Where deposited Helsinki University Library / Helda – E-thesis, ethesis.helsinki.fi			
Additional information This research was part of Natural Resources Institute Finland's ACAP research project (Acclimation of arctic peatlands – through reindeer grazing – to a changing climate). As a supervisor worked Päivi Mäkiranta.			

SISÄLLYSLUETTELO

Käsitteet	4
1. JOHDANTO	5
1.1 Pohjoiset suot ja metaanivirrat	5
1.2 Porot soilla.....	6
1.3 Laidunnuksen vaikutus soiden metaanivirtoihin.....	9
1.4 Tutkimuksen tavoitteet.....	13
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	15
2.1 Aineiston keruu	15
2.1.1 Tutkimusalueet.....	15
2.1.2 Koejärjestelyt	17
2.1.3 Metaanimittaukset.....	19
2.1.4 Lehtialan mittaus	23
2.1.5 Biomassan laskenta.....	25
2.1.6 Inkubointikokeet.....	25
2.1.7 Muut mittaukset.....	28
2.2 Aineiston analysointi	31
3. TULOKSET	33
3.1 Metaanivuo.....	33
3.2 Lehtiala.....	38
3.3 Biomassa.....	42
3.4 Inkubointikokeet	44
4. TULOSTEN TARKASTELO	46
4.1 Papanalisäysten vaikutus metaanivuohon ja kasvillisuuteen	46
4.2 Papanoiden hajoaminen turpeessa	49
4.3 Metaanivuon taso verrattuna aiempiin tutkimuksiin	49
4.4 Tutkimuksen virhelähteet.....	50
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	53
6. LÄHTEET	54

KÄSITTEET

Suo on suokasvillisuudesta muodostunut ekosysteemi, jossa pohjavedenpinnan korkeus on lähellä maanpintaa. Suokasvillisuus muodostaa suolla hajotessaan hapettomissa olosuhteissa turvetta, joka toimii hiilivarastona.

Metaani (CH₄) on molekyyli, joka muodostuu yhdestä hiiliatomista ja neljästä vetyatomista. Metaani esiintyy huoneenlämmössä kaasuna ja toimii maapallon ilmakehässä kasvihuonekaasuna, joka on voimakkuudeltaan nelinkertainen hiilidioksidiin nähden.

Metanotrofi on bakteeri, joka hapettaa metaania. Metanotrofeja esiintyy soilla turpeen hapellisessa kerroksessa, jossa ne hapettavat syvemmällä hapettomissa oloissa muodostunutta metaania. Metanotrofit voivat myös hapettaa ilmakehän metaania.

Metanogeeni on metaania tuottava arkeoni. Metanogeenit tuottavat metaania pilkkomalla epäorgaanisia yhdisteitä. Niitä esiintyy muun muassa märehtijöiden vatsassa ja hapettomissa olosuhteissa.

Lehtiala kuvastaa kasvien lehtien vihreätä, yhteyttävää pinta-alaa.

Sarat ovat sarakasvien runsaslukuisin suku. Tyypillisimmän saroja esiintyy soilla ja kosteissa elinympäristöissä. Sarat kuljettavat aerenkymisolukonsa avulla metaania turpeesta ilmakehään.

Varvut ovat puuvartisia kasveja, joiden korkeus jää alle puolen metrin.

Ruohot ovat ruohovartisia kasveja.

1. JOHDANTO

1.1 Pohjoiset suot ja metaanivirrat

Suot ovat kosteita tai märkiä ekosysteemejä, joissa pohjavedenpinta on lähellä maanpinnan korkeutta, ja joilla kasvaa turvetta muodostavaa kasvillisuutta (Turetsky ym. 2014). Suot toimivat maailmanlaajuisesti merkittävinä hiilinieluinä, mutta myös suurimpina luontaisina metaanin lähteinä maailmassa (Jackowicz-Korczynski ym. 2010). Soissa hiilen kierto kuuluu olennaisena osana hiilidioksidin lisäksi metaani. Kasvit sitovat hiilidioksidia yhteyttämällä ja sitä vapautuu ilmakehään suon hapellisessa kerroksessa tapahtuvan hajoamisen kautta. Metaania vapautuu soiden hapettomasta kerroksesta joko kuplimalla, diffundoitumalla tai kasvisolukoiden kautta. (Bubier 1995) Sarat toimivat merkittävinä tuottajina soilla, mutta myös suurina metaaninlähteinä. Metaani pääsee kulkemaan sarojen aerenkyymisolukon kautta suoraan ilmakehään. Tästä syystä sarasuot tuottavat metaania. (Bubier 1995)

Vaikka pohjoisten soiden osuus maapallon maapinta-alasta on 4 %, sisältävät ne lähes kolmanneksen maailman maaperän orgaanisesta hiilestä (Turunen ym. 2002). Soiden metaanipäästöt ovat merkittävä osa koko maapallon metaanitasetta (Spahni ym. 2011; Turetsky ym. 2014) ja arvioiden mukaan jopa neljäsosa maailman kasvihuonekaasuista on peräisin soilta (Jackowicz-Korczynski ym. 2010). Drewerin ym. mukaan pohjoiset suot ovat hiilitaseellaan vaikuttaneet merkittävästi ilmastoon kuluneen holoseenin aikana (2010). Metaani on toiseksi merkittävin kasvihuonekaasu maapallolla hiilidioksidin jälkeen (Ghosh ym. 2015). Voimakkuudeltaan metaani on hiilidioksidiin nähden 25-kertainen (Jackowicz-Korczynski ym. 2010). Ilmakehän metaanipitoisuus on kaksinkertaistunut kuluneen vuosisadan aikana, kun vielä vuonna 1900 metaania oli ilmakehässä 900 ppb (parts per billion = osia miljardissa) ja vuonna 2010 vastaava luku oli 1800 ppb (Ghosh ym. 2015).

Aapasuoalue kattaa suurimman osan Suomea (Turunen ym. 2002). Turusen ym. mukaan aapasuot ovat pääosin minerotrofisia soita, joita esiintyy keidassuoalueen rajalta männyn puurajalle asti pohjoiseen (2002). Minerotrofisiksi soiksi määritellään suot, jotka saavat

vettä ja ravinteita sekä pohjavedestä että sadevedestä (Päivänen 2007. s. 36). Suomalaisilla aapasoilla vedenpinnan korkeus vaikuttaa suon metaanipäästöihin. Mitä korkeammalla vesi on, sitä enemmän päästöjä suolla syntyy. Kuivemmat suot toimivat siis pienempinä metaanin lähteinä kuin kosteat. (Huttunen ym. 2003)

Soiden metaanivuo riippuu metanotrofian, eli metaanin hapetuksen ja metanogeenien, eli metaanin tuotannon välisestä suhteesta. Soilla metaania hapettavat metanotrofeiksi kutsutut bakteerit ja metaania tuottavat metanogeeniset arkeonit. Metanotrofit toimivat aerobisissa eli hapellisissa suon osissa ja metanogeenit anaerobisissa eli hapettomissa (Bridgham ym. 2013). Bridgham ym. mukaan kasveilla on myös suuri rooli soiden metaanivuon suuruudessa, sillä kasvit eivät pelkästään kuljeta metaania turpeesta ilmakehään, vaan myös vaikuttavat metanotrofien ja metanogeenien toimintaan (2013). Metanogeenien määrä korreloi vahvasti kasvien tuotannon kanssa, sillä kasvit vaikuttavat juurieritteillensä vahvasti maaperään (Magonigal ym. 1999). Kasvien maatuivat osat vaikuttavat metaanivuon suuruuteen. Erityisesti saravaltaisilla soilla liuennut orgaaninen materiaali on tärkein lähde metaania tuottavaan hapettomaan hengitykseen turpeessa. (Bridgham ym. 2013) Metaania vapautuu ilmakehään muun muassa diffuusion kautta (Bubier 1995), mutta tämän määrä on oleellisesti pienempi vedenpinnan ollessa turpeen pintaa alempana, sillä metanotrofit voivat silloin hapettaa metaanin hiilidioksidiksi (Bridgham ym. 2013). Kasvien aerenkymisolukoiden kautta kulkeva metaani puolestaan välttää metanotrofien hapetuksen ja vapautuu ilmakehään metaanina (Bridgham ym. 2013). Pohjavedenpinnan korkeuden lisäksi lämpötila vaikuttaa positiivisesti metaanivuon suuruuteen, sillä korkeampi lämpötila aktivoi metanogeeniä (Bridgham ym. 2013).

1.2 Porot soilla

Poro (*Rangifer tarandus tarandus*) on Pohjois-Skandinaviassa esiintyvä tunturipeurasta polveutuva puolikesy villipeuran muoto (Kemppainen ym. 2003). Porot ovat märehitjötä (Metsäkeskus Lappi 2008). Kemppaisen ym. (2003) mukaan poro muistuttaa tunturipeuraa sekä käyttäytymiseltään että ulkonäöltään (Kuva 1). Urosporot painavat 90-160 kiloa ja naarasporot 60-100 kiloa (Kemppainen ym. 2003).



Kuva 1. Poro (*Rangifer tarandus tarandus*) esiintyy yleisenä Suomen Lapissa. (Kuva: Elli-Noora Kampuri).

Fennoskandiassa poronhoitoalue kattaa jopa 423 000 neliökilometrin laajuisen alueen ja eloporoja on 700 000 (Kemppainen ym. 2003). Suomessa poronhoitoalueen pinta-ala on 122 936 neliökilometriä. Alue kattaa koko Suomen pinta-alasta yli kolmasosan (Maa- ja metsätalousministeriö, 2017) ja Pohjois-Suomen pinta-alasta noin 77 prosenttia (Kemppainen ym. 2003). Poronhoitoalueesta 80 prosenttia on entisen Lapin läänin alueella. (Kemppainen ym. 2003). Suomessa poronhoitoalue jaetaan 54 paliskuntaan eli poronhoitoyksikköön. Paliskunta huolehtii alueensa poronhoidosta. (Paliskuntain yhdistys 2019)

Kemppaisen ym. (2003) mukaan Fennoskandiassa eloporoja on noin 700 000. Suomen eloporomäärä oli vuosina 2015 ja 2016 suuruudeltaan 191 473 poroa, kun korkein sallittu määrä 2010-luvulla on 203 700 (Maa- ja metsätalousministeriö 2017). Eloporojen sallittua lukumäärää säädellään talvilaidunten kestävyuden mukaan (Kemppainen ym. 2003). Maa- ja metsätalousministeriö hallinnoi Suomessa poronhoitoa ja porotaloutta säädellään Poronhoitolaililla (848/1990) (Maa- ja metsätalousministeriö 2017). Vuosina 2015 ja 2016

Suomessa oli poronomistajia yli 4000 ja poronhoito toimi tärkeänä elinkeinona jopa tuhannelle taloudelle (Maa- ja metsätalousministeriö 2017). Poronhoito on erittäin merkittävä elinkeino Pohjois-Suomessa (Metsäkeskus Lappi 2008) ja erityisesti saamelaisille, jotka vastaavat suurimmasta osasta poronhoidosta (Kemppainen ym. 2003).

Parhaimmat porojen kesälaidunalueet löytyvät poronhoitoalueen eteläisistä osista, sillä siellä esiintyy paljon reheviä soita ja kasvukausi on pidempi (Kemppainen ym. 2003). Suot kuuluvat sekä porojen kevät- että kesälaitumiin (Metsäkeskus Lappi, 2008) (Kuva 2). Avosuot ovat erityisen tärkeitä porojen kesälaitumina (Nyström ym. 2013). Porojen kesäravintoon lukeutuvat muun muassa erilaiset ruohot, heinäkasvit ja varpujen lehdet (Metsäkeskus Lappi, 2008). Keväisin porot käyttävät ravinnokseen raatteen ja kurjenjalakojen juurakoita, saroja, silmuja, lauhoja ja villoja (Metsäkeskus Lappi, 2008). Yksi tärkeimmistä porojen kevätravintokasveista on soilla esiintyvä tupasvilla (Nyström ym. 2013).



Kuva 2. Poroja Lompolonjäнкällä (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

1.3 Laidunnuksen vaikutus soiden metaanivirtoihin

Turetsky ym. mukaan subarktisten minerotrofisten sarasoiden metaanipäästöt ovat verrattuna vastaaviin soihin boreaalisilla, temperaattisilla ja subtrooppisilla alueilla poikkeavan suuret (2014). Tyypillisesti mitä korkeammalla leveysasteella suot sijaitsevat, sitä pienemmät myös niiden metaanipäästöt ovat (Turetsky ym. 2014). Laihon ym. tutkimuksessa epäiltiin subarktisten minerotrofisten soiden korkeiden metaanipäästöjen voivan johtua porojen laidunnuksesta (2017). Tästä syystä Laiho ym. tutkivat laboratorio-olosuhteissa, miten porojen papanat vaikuttavat turpeesta vapautuvan metaanin määrään.

Laiho ym. tutkimuksessa turpeeseen sekoitetut poron papanat nostivat turpeen pH:ta, sekä silloin kun turve oli suolta, jossa porot ovat laiduntaneet että kun turve oli suolta, jonne porot eivät ole päässeet ollenkaan (2017). Molemmat turvetyypit osoittivat lisääntyvää metaanintuotantoa poron papanoiden lisäyksen jälkeen (Laiho ym. 2017). Tämän perusteella poron papanoiden voisi kuvitella lisäävän metaanintuotantoa turpeessa myös suolla itsessään. Salovaaran pro gradu -tutkimuksessa tutkittiin kenttäolosuhteissa, miten poron papanoiden lisääminen vaikuttaa soiden metaanipäästöihin (2020). Tulosten perusteella papanat eivät nosta soiden metaanipäästöjä vielä samalla kasvukaudella, kun papanoita on lisätty suohon (Salovaara 2020). Laboratorio- ja kenttäolosuhteet eroavat aina toisistaan ja tästä syystä on hyvä tutkia, onko poron papanoilla vaikutusta metaanipäästöihin pidemmällä aikavälillä siltä varalta, että papanoiden mukanaan tuoma ravinnelisäys muuttaa kasvillisuuden rakennetta suolla ja tätä kautta vaikuttaa metaanipäästöihin.

Arktisilla ja subarktisilla ekosysteemeillä on tehty muitakin tutkimuksia, jotka osoittavat, että laiduntavat herbivorit vaikuttavat ekosysteemien hiilivirtoihin. Koska herbivoria on oleellinen osa monia ekosysteemejä, on laidunnuksella Falkin ym. (2014) mukaan merkittävä vaikutus ekosysteemin hiilitaseeseen. Kasvinsyönnin ja laidunnuksen vaikutus voi olla sekä suoraa että epäsuoraa (Falk ym. 2014).

Falk ym. uskoivat kasvavan laidunnuksen vähentävän ekosysteemin hiilensidontaa ja vähentävän metaanipäästöjä arktisilla soilla (2014). Tutkimus toteutettiin Grönlannissa ja herbivorian vaikutusta tutkittiin mittaamalla eri tavalla käsiteltyjen koalojen metaanipäästöjä. Falk ym. totesi tutkimuksessaan, että arktisilla soilla herbivoria johtaa sekä

pienempään hiilidioksidin sidontaan ja sitä kautta myös vähäisempään metaanin muodostukseen ja pienempiin metaanipäästöihin (2014). Tutkimus keskittyi laidunnuksen vaikutuksiin kasvillisuudessa.

Van der Wal ja Brooker totesivat tutkimuksessaan (2004), että laiduntajat vaikuttavat sammalien syvyyteen ja maaperän lämpötilaan tundraekosysteemeillä. Nämä tekijät vaikuttavat myös putkilokasvien määrään, sillä ne hyötyvät maaperän korkeammasta lämpötilasta (Van der Wal ja Brooker 2004). Laiduntavat herbivorit pystyvät Van der Walin ja Brookerin mukaan lisäämään ruohojen määrää arktisilla sammaleiden hallitsemilla alueille kahdella eri positiivisella takaisinkytkentämetodilla (2004). Laiduntajat alentavat sammalien syvyyttä tallomalla ja näin kohottavat maaperän lämpötilaa, mikä hyödyttää ruohoja. Laiduntajien ulosteiden ravinnelisäys maaperään parantaa myös ruohojen menestymistä. (Van der Wal ja Brooker 2004) Laiduntavat herbivorit voivat siis muokata sammalkerroksen syvyyden avulla ekosysteemin toimintaa ja ruohojen määrää (Van der Wal ja Brooker 2004). Ilman herbivorien laidunnusta arktisten alueiden maaperän uskotaisiin olevan kylmempi ja märempi, sillä sammalkerroksen paksuus kasvaisi ja putkilokasvien määrä ekosysteemissä vähenisi (Van der Wal ja Brooker 2004). Van der Wal ja Brooker ovat todenneet, että ruohojen runsaus arktisilla ekosysteemeillä on sitä suurempi, mitä tiheämmin poroja esiintyy (2004). Tutkimus on kuitenkin toteutettu kivennäismailla, joten sen tuloksia ei voi yleistää suoraan suoekosysteemille. Laiduntajien ulosteiden mukanaan tuoman ravinnelisäyksen voisi silti uskoa lisäävän myös soilla ruohojen kasvua.

Toisessa tutkimuksessa Van der Wal ym. totesivat, että herbivorien ulosteiden lisääminen tundraekosysteemiin alkoi kasvattaa ruohojen määrää ja kokoa kolmannen vuoden jälkeen (2004). Ulosteiden lisääminen paransi maaperän mikrobien biomassaa hiilen ja typpien osalta. Vaikutus oli selkeimmin nähtävissä märillä paikoilla, missä ulosteen hajotusnopeus oli suurin. Ruohot hyötyivät ulostelisäyksestä eniten kuivilla paikoilla. (Van der Wal ym. 2004) Sekä maaperän mikrobien biomassassa että ruohojen määrä kasvoivat ulostelisäyksen seurauksena. Sammalkerros puolestaan ohentui neljän vuoden ulostelisäyksen jälkeen (Van der Wal ym. 2004). Sammalkerroksen ohentuminen oli suurinta paikoilla, joilla maaperän mikrobien biomassassa kasvoi eniten, mikä voi johtua mikrobien lisääntyneestä sammaleen hajotustoiminnasta (Van der Wal ym. 2004). Van der Wal ym. tutkimuksessa poron ulosteiden lisääminen tundraekosysteemiin lisäsi ruohojen ja maaperän mikrobien biomassaa ja ohensi sammalkerrosta (2004). Van der Wal ym. tutkimus

osoittaa, että arktiset ekosysteemit reagoivat nisäkäsherbivorien laidunnuksen ravinnelisykseen hitaasti verrattuna trooppiseen ja temperaattisiin ekosysteemeihin (2004). Ulostoiden lannoitusvaikutus näkyi kasvillisuudessa ja maaperässä vasta kolmen vuoden jälkeen (Van der Wal ym. 2004). Ulostoiden vaikutukset näkyvät eri tavoin olosuhteiden ollessa märät verrattuna kuiviin olosuhteisiin. Mikrobin aktiivisuus kasvaa erityisesti maaperän ollessa märkä, kun taas ruohojen kasvu lisääntyy parhaiten kuivalla maaperällä. (Van der Wal ym. 2004) Van der Wal ym. tutkimus on toteutettu kivennäismailla (2004), joten sen tulokset eivät yksiselitteisesti vastaa, mitä suoekosysteemeissä tapahtuu. Pohjoisen sijainnin perusteella voisi uskoa, että ainakin kasvillisuuden hidaste laidunnukseseen ja ulostoiden ravinnelisyksiin olisi yhtäläinen myös soilla. Jos soillakin sammalkeuros ohentuisi laidunnuksen vaikutuksesta, voisi seurauksena olla sammaleissa asuvien metanotrofien määrän vähentyminen ja metaanipäästöjen pienentyminen soilta.

Hahn ym. huomasivat puolestaan, että herbivorien jätösten lisääminen ojitetuille soille Keski-Euroopassa voi muuttaa metanogeenisten mikrobin määrää ja toimintaa johtaen lisääntyvään metaanin tuotantoon (2018). Näin ollen herbivorien laidunnuksen ojitetuilla soilla johtaisi kasvaviin metaanipäästöihin (Hahn ym. 2018).

Barthelemy ym. tutkivat seitsemän vuoden ajan poron papanoiden vaikutusta kasvillisuuden koostumukseen ja maaperän ravinteisiin kahdella eri tundrakasvillisuustyyppillä (2015). Poron papanat eivät sisältäneet paljoa ravinteita, mutta niiden lisäys vaikutti silti vahvasti sekä ravinneköyhällä nummella että ravinteikkaalla niityllä (Barthelemy ym. 2015). Suurin vaikutus seurasi, kun papanoita lisättiin enemmän. Papanalisäykset johtivat ruohovartisten kasvien korkeampaan tuotantoon. (Barthelemy ym. 2015) Normaalin papanamäärän kaksinkertaistaminen tehosti kaikkien nummilla kasvavien kasvien primääristä tuotantoa ja kasvua (Barthelemy ym. 2015). Vastaava kasvillisuuden tuotannon nousu voisi soilla johtaa kohoaviin metaanipäästöihin. Papanoiden poistaminen puolestaan heikensi vain sarakasvien ja kesävihantien pensaiden tuotantoa nummella (Barthelemy ym. 2015). Papanoiden lisääminen vaikutti molemmilla kasvupaikoilla, mutta vaikutus oli nopeammin nähtävissä ravinteikkaammalla paikalla. Kuitenkin seitsemän vuoden jälkeen vaikutus oli merkittävämpi ravinneköyhällä nummella. (Barthelemy ym. 2015) Papanoiden kerrostuminen ei Barthelemy ym. mukaan yksinään riitä muuttamaan köyhää nummea tuottavaksi ruohomaaksi, vaan myös eläinten laidunnuksella ja tallomisella on tällaisessa kasvillisuusmuutoksessa tärkeä rooli (2015).

Herbivoreilla on tärkeä merkitys ekosysteemien rakenteen ja toiminnan muokkaamisessa, minkä ne tekevät muokkaamalla kasvillisuussuhteita, maaperän eliöstöä ja ravinteiden kiertoa (Barthelemy ym. 2015). Herbivorit eivät vaikuta kasvillisuuteen ja maaperään vain valikoimalla tiettyjä kasveja ravinnokseen, vaan myös lannoittamalla maaperää ulosteilla, mikä voi aktivoida maaperän mikrobien toimintaa (Van der Wal ym. 2004). Vahvin vaikutus maaperän ravinteiden kiertoon ja kasvien tuotokseen on ulosteilla (Barthelemy ym. 2015). Keskeisin vaikutus johtuu maaperään päätyvän orgaanisen aineksen määrästä ja laadusta (Van der Wal ym. 2004). Maanpäällisen biomassan syöminen vaikuttaa myös maanalaiseen hiilivarastoon. Kun hajoavan biomassan määrä pienentyy, pienenee maanalainen hiilivarasto ja samalla myös koko ekosysteemin hiilivarasto. (Falk ym. 2014)

Poron papanoista liukenevien ravinteiden uskotaan hyödyttävän suolla sarojen, saramais-ten ja varpujen kasvua enemmän kuin rahkasammalien. Soilla esiintyvät kasvilajit ovat kaikki tottuneet vähäravinteisiin ja märkiin olosuhteisiin (Bubier 1995). Rahkasammaleet tulevat erityisen hyvin toimeen vähäravinteisilla paikoilla, joissa muut kasvit eivät pärjää. Rahkasammaleet eivät juuri hyödy lisääntyvistä ravinteista ja jäävät kilpailussa jälkeen lajeille, jotka kykenevät hyödyntämään ravinteiden lisääntymisen. (Bubier 1995) Ravinteiden lisääntyminen suolla johtaa siis todennäköisesti sarojen parempaan kasvuun. Sarojen ominaisuudesta kuljettaa metaania aerenkyymsolukon kautta suon hapettomasta kerroksesta ilmakehään (Verville ym. 1998) johtuen voidaan olettaa sarojen lisääntymisen johtavan myös korkeampiin metaanipäästöihin suolla.

Kuten Van der Wal ym. huomasivat tutkimuksessaan, ulosteiden ravinnelisäys ei vaikuttanut kasvillisuuteen heti samana kasvukautena, vaan vasta parin vuoden jälkeen (2004). Salovaaran tutkimuksessa papanat eivät vaikuttaneet saman kasvukauden aikana suon kasvillisuuteen tai metaanipäästöihin (2020). Ravinteiden liukenemisnopeudesta suohon ei tiedetä ja tästä syystä on hyvä tutkia papanoiden lisäämisen pitkäaikaisvaikutuksia. Oletuksena on, että papanoiden ravinnelisäys vaikuttaa soiden kasvillisuuteen ja metaanipäästöihin vasta seuraavalla kasvukaudella.

Jos suolla kasvillisuus lisääntyy, lisääntyy myös kuoleva hajotettava kasviaines ja näin ollen kasvaa myös hajottajamikrobien toiminta. Myös Hahn ym. huomasi, että laiduntajien ulosteet voivat lisätä metanogeenisten mikrobien määrää maaperässä (2014). Papanoiden ravinnelisyksen voi siis olettaa lisäävän joko suorasti tai epäsuorasti kasvillisuuden kautta metaania tuottavien hajottajamikrobien määrää suossa, mikä johtaa kohoaviin metaanipäästöihin. Lisäksi voidaan olettaa, että papanat hajoavat paremmin turpeen pintakerroksessa kuin syvemmillä suossa, sillä hajottavat mikrobit toimivat tehokkaammin turpeen hapellisessa kerroksessa.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tässä pro gradu -tutkielmassa pyritään selvittämään, lisäävätkö poron papanat erityisesti kasvillisuusmuutoksien kautta subarktisten minerotrofisten soiden metaanin tuotantoa. Subarktisten minerotrofisten soiden metaanipäästöjen on todettu olevan muutenkin suhteellisen korkeat (Turetsky ym. 2014), minkä takia on tärkeä selvittää metaanipäästöjen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Pohjoisten soiden metaanipäästöjen muutoksista herbivorian seurauksena tiedetään vain vähän (Falk ym. 2014). Tästä syystä aiheesta on tärkeä tutkia.

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Onko papanoilla vaikutusta suosta vapautuvaan metaanivuohon?
2. Onko vaikutus samanlainen eri pinnoilla?
3. Millaisia muutoksia papanalisäys aiheuttaa kasvillisuudessa?
4. Millaisia muutoksia papanalisäys aiheuttaa kasvillisuuden lehtialassa?
5. Lisäävätkö papanat metaanipäästöjä, jos kasvillisuutta ei ole?
6. Kuinka nopeasti papanat hajoavat ensimmäisen vuoden aikana? Onko hajotusnopeudessa eroa pohja- ja pintapapanoiden välillä?

Kysymyksistä voi muodostaa kirjallisuuden perusteella seuraavat hypoteesit:

1. Poron papanoista vapautuvat ravinteet edistävät sarakasvien tuotantoa ja kasvua, mikä johtaa soilla metaanipäästöjen kasvuun. Myös ravinteita enemmän tarvitsevat lajit lisääntyvät.

2. Poron papanoiden vaikutukset suokasvillisuuteen eivät ole näkyvissä välittömästi, sillä ravinteiden liukeneminen papanoista suohon on hidasta.
3. Poron papanoista vapautuvat ravinteet vilkastavat suon hajottajamikrobien toimintaa ja sitä kautta lisäävät metaanin tuotantoa.
4. Ravinteet liukenevat turpeeseen paremmin lähempänä pintaa kuin syvemmillä, sillä papanat hajoavat siellä nopeammin.

Kyseinen Pro gradu -tutkielma kuuluu Luonnonvarakeskuksen ”Acclimation of arctic peatlands – through reindeer grazing – to a changing climate” -hankkeeseen (ACAP). Ohjaajana tutkielmalle toimii Luonnonvarakeskuksesta Päivi Mäkiranta (MMT). Vastuuprofessorina työlle toimii Helsingin yliopiston metsätieteiden osastolta professori Harri Vasander.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Aineiston keruu

2.1.1 Tutkimusalueet

Tutkimuksessa mittauksia tehtiin kahdelta eri pohjoissuomalaiselta suolta. Suot ovat Palasjärven Lompolonjänkkä Muoniossa (Kuva 3) ja Sodankylän Halssiaapa (Kuva 4). Molemmat suot sijaitsevat Suomen aapasuoalueella, ovat puuttomia, minerotrofisia sarasoita ja kuuluvat Köppenin ilmastoluokituksen perusteella subarktiseen ilmastoon. Halssiaapa luokitellaan suotyypiltään ruohoiseksi rimpinevaksi ja Lompolonjänkkä ruohoiseksi saranevaksi. Lisätietoja soista löytyy taulukosta 1. Molemmilla soilla on poroaitaus, joka estää porojen laidunnuksen aidan sisäpuolella. Halssiaavalla aidattu alue on kooltaan 0,5 hehtaaria ja aita rakennettiin vuoden 2001 syksyllä. Lompolonjäнкällä aitauksen koko on 0,2 hehtaaria ja aita rakennettiin vuoden 2017 syksyllä.



Kuva 3. Lompolonjänkkä (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).



Kuva 4. Halssiaapa (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

Taulukko 1. Tutkimusalueiden tiedot (GHG Measurement sites, Ilmatieteenlaitos)

	Lompolonjänkkä	Halssiaapa
Sijainti	N67°59.835', E24°12.546'	N67°22.117' E26°39.244'
Korkeus merenpinnasta	269 m	180 m
Keskilämpötila	-1,4 °C	-0,4 °C
Vuotuinen sademäärä	484 mm	527 mm

Halssiaavalla pinnanmuodot vaihtelevat siten, että suolta löytyy sekä jännepintoja että välipintoja. Lompolonjänkällä pinnanmuotojen vaihtelua ei varsinaisesti esiinny. Molemmilla soilla mittauspisteet sijoittuvat ravinteisuudeltaan mesotrofiselle alueelle. Halssiaavalla mittauspisteiden lajisto koostuu pääosin leväköstä (*Scheuzeria palustris*), juurtosarasta (*Carex chordorrhiza*), suokukasta (*Andromeda polifolia*), karpalosta (*Vaccinium oxycoccus*) ja raatteesta (*Menyanthes trifoliata*). Lompolonjänkällä, jossa kasvillisuus on yleisesti Halssiaapaa rehevämpää, yleisimmät kasvilajit mittauspisteillä ovat puolestaan pullosara (*Carex rostrata*), juurtosara, suokukka, karpalo ja raate. Halssiaavalla mittaus-

pisteiden vallitsevat sammaleet ovat hetesirppisammal (*Warnstorfia exannulata*) välipinnoilla ja rahkasammaleet (*Sphagnum sp.*) jännteillä. Rahkasammaleet hallitsevat pääosin sammalkerrosta Lompolonjäнкällä.

2.1.2 Koejärjestelyt

Molemmilla tutkimussoilla oli 21 mittauspistettä, joilta mitattiin ekosysteeminen ja ilmakehän välistä metaanin vaihtoa, kasvillisuuden lehtialankehitystä sekä kasvillisuuden peittävyyttä. Halssiaavan koealalla mittauspisteitä sijoitettiin sekä välipinnoille että jännepinnoille. Lompolonjäнкän koealalla puuttuu selkeä pinnanmuotojen vaihtelu, minkä takia kaikki mittauspisteet perustettiin tasapinnoille. Mittauspisteet perustettiin keväällä 2019. Osa mittauspisteistä oli kontrolleja, joille ei tehty käsittelyä, osa käsiteltiin lisäämällä 100 grammaa poron papanoita turpeen pinnalle ja osa käsiteltiin lisäämällä 100 grammaa poron papanoita survoen niitä turpeeseen. Papanoiden survominen simuloi porojen tallomista. Vuoden 2019 mittauspisteille ei tehty uusia käsittelyjä kesällä 2020, vaan niillä seurattiin papanalisäyksen pitkäaikaisia vaikutuksia metaanipäästöihin ja kasvillisuuteen.

Kesällä 2020 Lompolonjäнкälle tehtiin yhdeksän uutta mittauspistettä (Kuva 5). Kasvittomilta mittauspisteiltä (6 kpl) poistettiin pintaturve ja sen mukana kasvillisuus. Ympäristöiden kasvien juuret eristettiin mittauspisteestä 80 senttimetriä syvillä juurikankailla. Mittauspisteet pidettiin koko kesän kasvittomina leikkaamalla ja nyppimillä kaikki esiin nouseva kasvillisuus. Loput kolme mittauspistettä toimivat kasvillisina vertailukohtina kasvittomille. Kasvillisille ja kolmelle kasvittomalle mittauspisteelle lisättiin poron papanoita turpeen pinnalle. Kolme muuta kasvittonta mittauspistettä toimivat kontrolleina, eli niille ei tehty mitään käsittelyä. Käsittelyjen tarkoituksena oli selvittää, miten poron papanat vaikuttavat suon metaanipäästöihin riippuen kasvillisuuden paikallaolosta.



Kuva 5. Kasvittomia ja kasvillisia mittauspisteitä (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

Mittauspisteistä osa sijaitsi poroaidan sisäpuolella ja osa ulkopuolella. Poroaidan sisäpuolelle porot eivät ole päässeet laiduntamaan. Tällä tavalla nähtiin, onko porojen pitkäaikaisella laidunnuksella vaikutusta suon metaanipäästöihin ja kasvillisuuteen. Lisäksi Halssiaavalla seurattiin, miten metaanipäästöt muuttuvat sijainnin perusteella suolla. Osa mittauspisteistä sijaitsi tämän takia painanteissa ja osa jännteillä.

Taulukko 2. Mittauspisteet ja niiden käsittelytavat Halssiaavalla.

Halssiaapa				
Mittauspis- teet, kpl	Aitaus	Jänne-/välipinta	2019 käsittely	2020 käsittely
3	aidattu	välipinta	kontrolli	ei käsittelyä
3	aidattu	välipinta	pintapapanalisäys	ei käsittelyä
3	aidattu	välipinta	uppopapanalisäys	ei käsittelyä
3	aitaamaton	välipinta	kontrolli	ei käsittelyä
3	aidattu	jännepinta	kontrolli	ei käsittelyä
3	aidattu	jännepinta	pintapapanalisäys	ei käsittelyä
3	aitaamaton	jännepinta	kontrolli	ei käsittelyä

Taulukko 3. Mittauspisteet ja niiden käsittelytavat Lompolonjäнкällä.

Lompolonjäнкä				
Mittauspis- teet, kpl	Aitaus	Kasvillisuus	2019 käsittely	2020 käsittely
3	aidattu	kasvillinen	kontrolli	ei käsittelyä
3	aidattu	kasvillinen	pintapapanalisäys	ei käsittelyä
3	aidattu	kasvillinen	uppopapanalisäys	ei käsittelyä
3	aitaamaton	kasvillinen	kontrolli	ei käsittelyä
3	aitaamaton	kasviton	-	kontrolli
3	aitaamaton	kasviton	-	pintapapanalisäys
3	aitaamaton	kasvillinen	-	pintapapanalisäys

2.1.3 Metaanimittaukset

Metaanimittaukset tehtiin valoa läpäisemättömällä mittauskammiolla ja kannettavalla LI-7810 -kaasuanalysointilaitteella (Kuva 6). Kaasuanalysointilaitteesta pystyi seuraamaan metaanin, hiilidioksidin ja vesihöyryn pitoisuuksia aina kyseisellä hetkellä. Kaasuanalysointilaitteen näytöstä pystyi siten seuraamaan mittauksen onnistumista. Jos mittaus jostain syystä epäonnistui ja pitoisuudet pomppivat äkillisesti suuntaan tai toiseen, pystyi mittauksen keskeyttämään ja aloittamaan uudestaan. Tarkemman mittausdatan pystyi lataamaan kaasuanalysointilaitteesta jälkikäteen. Kaasuanalysointilaitteeseen kiinnitettiin letkuilla mittauskammi-

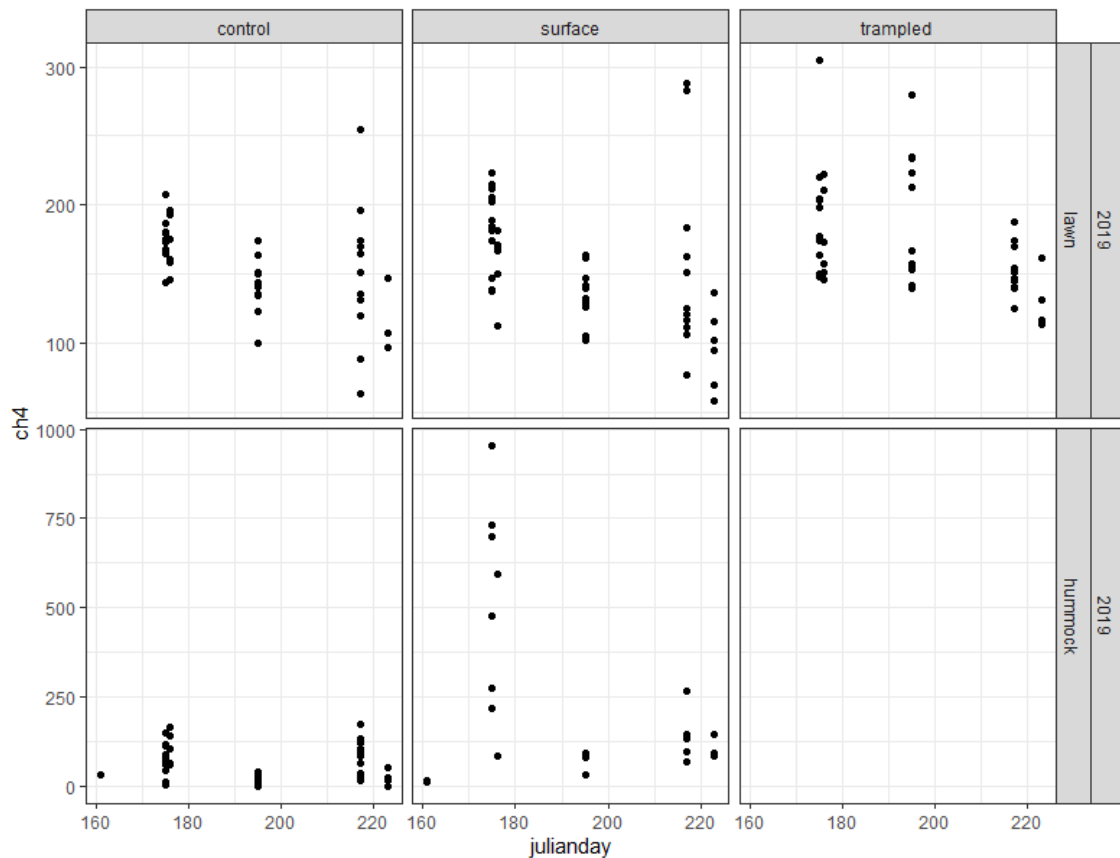
oon. Letkuista toinen otti ilmaa kammioista ja kuljetti sen kaasuanalysointiin analysoitavaksi. Tähän sisääntuloletkuun kiinnitettiin filteri, joka esti kosteuden pääsemisen kaasuanalysointiin. Ulostuloletku palautti kaasuanalysointin analysoiman ilman takaisin kammioon. Näin ilma kiersi kammiossa, eikä kammion sisäinen kaasujen kierto häiriintynyt mittauksesta suuremmin. Lisäksi kammioon kuului tuuletin, joka kierrätti kammion sisäilmaa mittauksen aikana. Kammiossa oli päällä pieni avattava luukku, joka suljettiin mittauksen ajaksi ja avattiin mittauksen päätteeksi, jolloin kammio muutenkin tuuletettiin heiluttelemalla. Kammio oli tärkeä tuulettaa hyvin mittauksen välillä, jotta aiemman mittauspisteen kaasut eivät päässeet vaikuttamaan seuraavaan mittaukseen. Mittauskammioon oli kiinnitetty myös lämpömittari, jolla voitiin seurata kammion sisälämpötilaa. Lämpötila merkittiin ylös mittauksen alkaessa ja loppuessa.



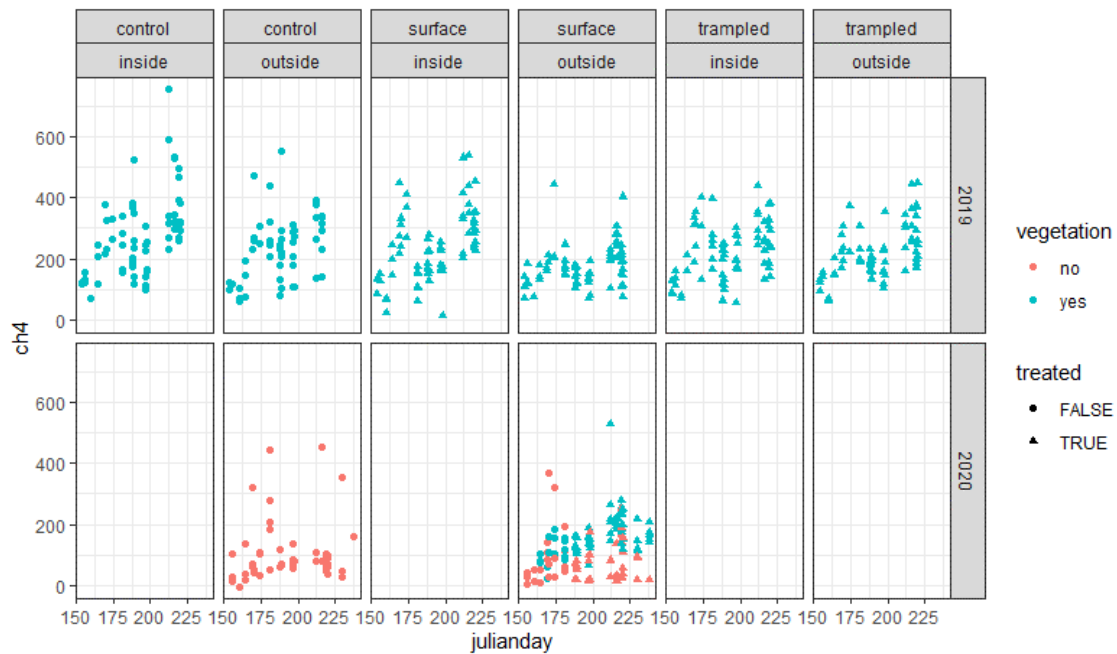
Kuva 6. Mittauskammio ja kaasuanalysointi (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

Metaanimittauksia tehtiin kesällä 2020 kolmen kuukauden ajan siten, että ensimmäiset mittaukset tehtiin 2.6. ja viimeiset 25.8. Metaanimittauksen yhteydessä mittauspisteiltä

mitattiin myös pohjaveden korkeutta ja turpeen lämpötilaa viiden ja viidentoista senttimetrin syvyydeltä. Jokaisella mittauspisteellä metaanivuota mitattiin aina kolmen minuutin ajan. Myöhemmin pitoisuusdataa analysoitaessa ensimmäinen puoli minuuttia jätettiin mittauksesta pois tarkemman tuloksen saamiseksi ja mahdollisten mittauksen alkuun liittyvien häiriöiden poistamiseksi. Näin ollen laskennallinen mittausaika kesti aina 2,5 minuuttia. Metaanivuota mitattiin pitkin kesää jokaiselta mittauspisteeltä. Halssiaavan mittauksia tehtiin noin kahden viikon välein ja mittausstiheys näkyy kuvassa 7. Lompolonjängän mittauksia tehtiin vähintään kerran viikossa, mutta useimpina viikkoina pari kertaa viikossa (Kuva 8). Samana mittauspäivänä mittauskierroksia tehtiin yhdestä kolmeen kertaan. Mittausaikatauluun vaikutti oleellisesti säätila, sillä kaasuanalysaattori ei kestänyt liiallista kosteutta, joten sateella mittauksia ei voinut suorittaa.



Kuva 7. Halssiaavan metaanimittauksia kesältä, yksikkö $\text{mg}/\text{m}^3/\text{d}$. ”Control” tarkoittaa kontrollimittauspisteitä, ”surface” pintakäsiteltyjä mittauspisteitä ja ”trampled” uppokäsiteltyjä mittauspisteitä. ”Lawn” tarkoittaa sijaintia välipinnalla ja ”hummock” jännepinnalla. 2019 viittaa mittauspisteen perustamisvuoteen.

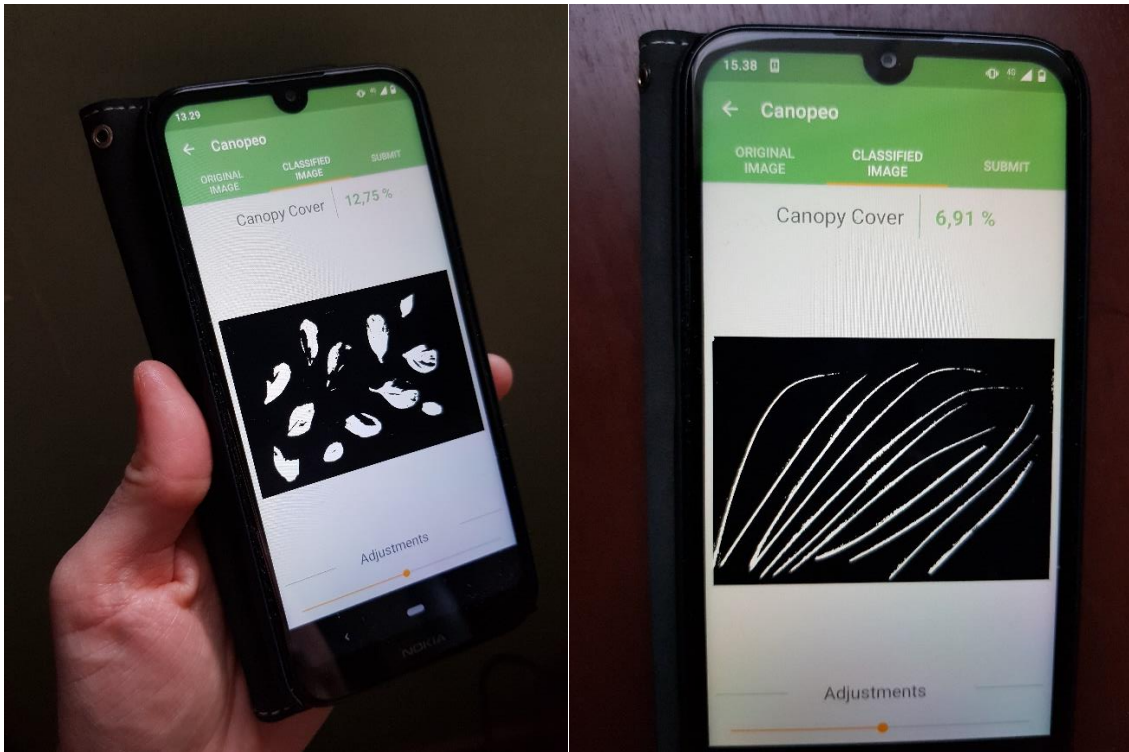


Kuva 8. Lompolonjängän metaanimittauksia kesältä, yksikkö $\text{mg}/\text{m}^3/\text{d}$. ”Control” tarkoittaa kontrollimitauspisteitä, ”surface” pintakäsiteltyjä mittauspisteitä ja ”trampled” uppokäsiteltyjä mittauspisteitä. ”Inside” viittaa sijaintiin aidan sisäpuolella ja ”outside” aidan ulkopuolella. 2019 ja 2020 viittaavat mittauspisteen perustamisvuoteen. ”Vegetation” kohdan ”no” viittaa kasvittomuuteen ja ”yes” kasvillisuuteen. Treated tarkoittaa yleisesti, onko mittauspistettä käsitelty papanalisäyksellä (TRUE) vai ei (FALSE).

Metaanivuon suuruuden laski Mika Korhikoski (Ilmatieteenlaitos) Python-ohjelmistolla kaasuanalysaattorin mittausdatasta. Data laskettiin käyttäen regressiomallina lineaarista funktiota, joka oli muotoa $C(t) = a_{\text{in}} + b_{\text{in}}t$. Funktiossa C tarkoittaa kaasun konsentraatiota, a_{in} ja b_{in} ovat parametrejä, ja t kuvastaa, kuinka paljon aikaa on kulunut kammion sulkemisesta. Lineaarisen funktion tuottama kaasun konsentraatiota käytettiin laskemaan metaanivuo F ideaaliseen kaasulakiin nojaavalla yhtälöllä: $F = \left(\frac{dC(t)}{dt}\right)_{t=0} \frac{MPV}{RTA} 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}$. Kaavan ensimmäinen osa $\left(\frac{dC(t)}{dt}\right)_{t=0}$ tarkoittaa lineaarisen mallin ajan derivaattaa, M metaanimolekyylin massaa, P ilman painetta, R yleistä kaasuvakiota, T kammion lämpötilaa kammion sulkemishetkellä, V kammion tilavuutta ja A kammion pohjan pinta-alaa. Laskennan tuloksena saadut metaanivuot kertoivat, montako mikrogrammaa metaania nousee suosta neliometriä kohden tunnissa, eli ne ovat yksikössä $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$. (Korhikoski ym. 2017). Tässä tutkimuksessa metaanivuon yksikkö muutettiin muotoon $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$, eli metaanivuon määrä jaettiin tuhannella ja kerrottiin luvulla 24.

2.1.4 Lehtialan mittaus

Mittauspisteiden lehtialaindeksi määritettiin kesällä 2020 tasaisin väliajoin: Lompolonjänkältä viisi kertaa ja Halssiaavalta neljä kertaa. Lehtialaindeksiä varten määritettiin mittauspisteessä kasvavien lehtien lukumäärä sekä erillisillä näytteenotoilla keskimääräinen lehtien koko kyseisenä ajanhetkenä. Näiden avulla laskettiin mittauspisteiden lehtialaindeksi. Lehtiala määritettiin jokaiselle 30 senttimetriä halkaisijaltaan olevalle mittauspisteelle erikseen. Jokaiselle mittauspisteelle oli perustettu 10 senttimetriä halkaisijaltaan oleva osakoeala. Osakoealan sisältä laskettiin jokainen lehti erikseen ja merkittiin ylös, kuinka monta lehteä mitäkään kasvilajia kasvoi osakoealan sisällä. Laskemisen jälkeen kolmea samoin käsiteltyä mittauspistettä kohden otettiin samasta kohtaa mittauspisteiden ulkopuolelta kasvinäytteet. Kasvinäytteiden lehdet kuvattiin valkoista A4-paperiarkkia vasten. Kuvat rajattiin paperin muotoiseksi ja lehtien väriä korostettiin analysointia varten. Kuvat analysoitiin Canopeo-mobiilisovelluksella, joka laskee, montako prosenttia kuvassa on vihreää alaa (Kuva 9). A4-paperin pinta-alan ja vihreän alan osuuden perusteella voitiin laskea, kuinka suuri on kuvan lehtien pinta-ala ja sitä kautta, kuinka suuri on yhden lehden pinta-ala. Mittauspisteen lehtien määrä voitiin kertoa yhden lehden pinta-alalla ja näin saatiin yhdelle lajille koko verkon rajaaman alueen lehtiala. Osakoealan lehtiala yleistettiin koko koealan lehtialaksi.



Kuva 9. Lehtien pinta-alojen osuuden määrittystä Canopeo-sovelluksella (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

Mittaus tehtiin lähes kaikille lajeille samalla periaatteella. Vain karpalon *Vaccinium oxycoccos* kohdalla mitattiin lehtien suuren lukumäärän vuoksi varsien pituus mittauspisteiltä. Myös kasvinäytteistä laskettiin varsien pituus ja lehtiala laskettiin lehtien lukumäärän sijaan varren pituutta kohden. Korteen *Equisetum fluviatile* ja raatteen *Menyanthes trifoliata* kohdalla lehtien määrä laskettiin paremman tarkkuuden saavuttamiseksi koko mittauspisteeltä, jolloin lehtiala saatiin suoraan koko mittauspisteeltä, eikä vain osakoealan sisältä.

Lehtialat laskettiin erikseen jokaiselle kasvilajille, joita mittauspisteeltä löytyi. Lajien lehtialoja summaamalla saatiin eri kasvilajiryhmien lehtialat ja mittauspisteen kokonaislehtiala. Kasvilajit jaettiin mittauspisteillä kolmeen eri toiminnalliseen ryhmään: saramaiset, ruohot ja varvut (Taulukko 4).

Taulukko 4. Esiintyneet kasvilajit lajiryhmittäin kummallakin mittaussuolla.

	Halssiaapa	Lompolonjänkkä
Saramaiset	<i>Carex rostrata</i>	<i>Carex rostrata</i>
	<i>Carex chordorrhiza</i>	<i>Carex chordorrhiza</i>
	<i>Carex limosa</i>	<i>Carex limosa</i>
	<i>Scheuchzeria palustris</i>	
Ruohot	<i>Equisetum fluviatile</i>	<i>Equisetum fluviatile</i>
	<i>Menyanthes trifoliata</i>	<i>Menyanthes trifoliata</i>
Varvut	<i>Andromeda polifolia</i>	<i>Andromeda polifolia</i>
	<i>Vaccinium oxycoccos</i>	<i>Vaccinium oxycoccos</i>

2.1.5 Biomassan laskenta

Biomassan kuluneen vuoden kasvu määritettiin korjaamalla koealoilta kuluneen vuoden aikana kasvaneet kasvit talteen. Lompolonjängän koealoista kaikilta (pois lukien uusilta kasvittomilta ja kasvillisilta sekä aidan ulkopuolisilta pinta- ja uppokäsitellyiltä koealoilta) kerättiin biomassanäytteet. Halssiaavalla kerättiin biomassanäytteet kaikilta aidan mittauspisteeltä, ulkopuolisia käsiteltyjä ja jännekoealoja lukuun ottamatta.

Biomassanäytteiden kerääminen suoritettiin Halssiaavalla 11.8. ja Lompolonjängällä 12.8. saksilla leikkaamalla jokaiselta koealalta kaikki kuluneen vuoden aikana kasvaneet putkilokasvit talteen. Kasvit kerättiin omiin pusseihinsa ja otellen ne koealan ja kasvityypin mukaan siten, että saramaiset, varvut ja ruohot kerättiin erikseen. Keräämisen jälkeen kasveja kuivattiin kuivatuskaapissa 65 asteen lämpötilassa kolmen vuorokauden ajan. Kuivatut kasvinäytteet punnittiin.

2.1.6 Inkubointikokeet

Inkubointikokeita varten poron papanoita laitettiin harsopusseihin ja pussit upotettiin suolle. Jokaisen pussin pohjalle täytettiin ensin noin kymmenen gramman verran papanoita. Tämän jälkeen pussit suljettiin nippusiteellä, pusseihin jätettiin kymmenen senttimetriä tyhjää ja laitettiin uusi nippuside. Päälle lisättiin vielä noin kymmenen grammaa

papanoita ja pussit suljettiin nippusiteillä (Kuva 10). Pusseja upotettiin molemmille soille yhteensä 15 kappaletta (Kuva 11). Upotus tehtiin niin, että päällimmäinen papanakerros oli juuri turpeen pinnan alapuolella ja alempi papanakerros 15 senttimetrin syvyydellä. Pusseja kerättiin kummaltakin suolta kuukauden välein siten, että viisi pussia nostettiin suolta heinäkuun alussa, viisi elokuun alussa ja loput viisi elokuun lopussa.



Kuva 10. Inkubointipussi (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).



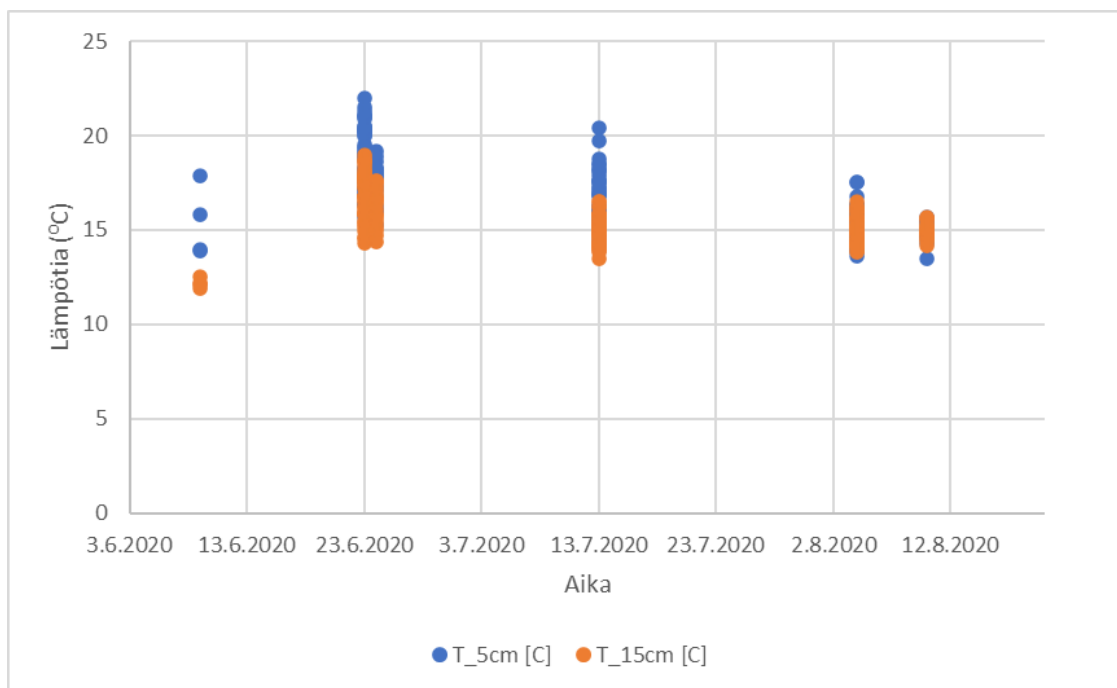
Kuva 11. Halssiaavalle upotetut inkubointipussit (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

Jokaisen pussin sisältö punnittiin ja kuivatettiin keräämisen jälkeen. Kuivatus tehtiin lämpökaapissa 40 asteessa 2 – 3 vuorokauden ajan. Pussien sisällöt oli punnittu myös ennen suohon upotusta ja ne punnittiin vielä kuivatuksen jälkeen. Vertailukohdaksi keväällä kuivatettiin samoja papanoita, joita pussiin laitettiin. Näin saatiin tietää, mikä oli papanoiden suhteellinen kuivamassa alkutilanteessa. Upotetuista papananäytteistä pystyttiin laskemaan myös kuivamassojen perusteella, kuinka paljon papanat ovat hajonneet suossa tietyssä ajassa.

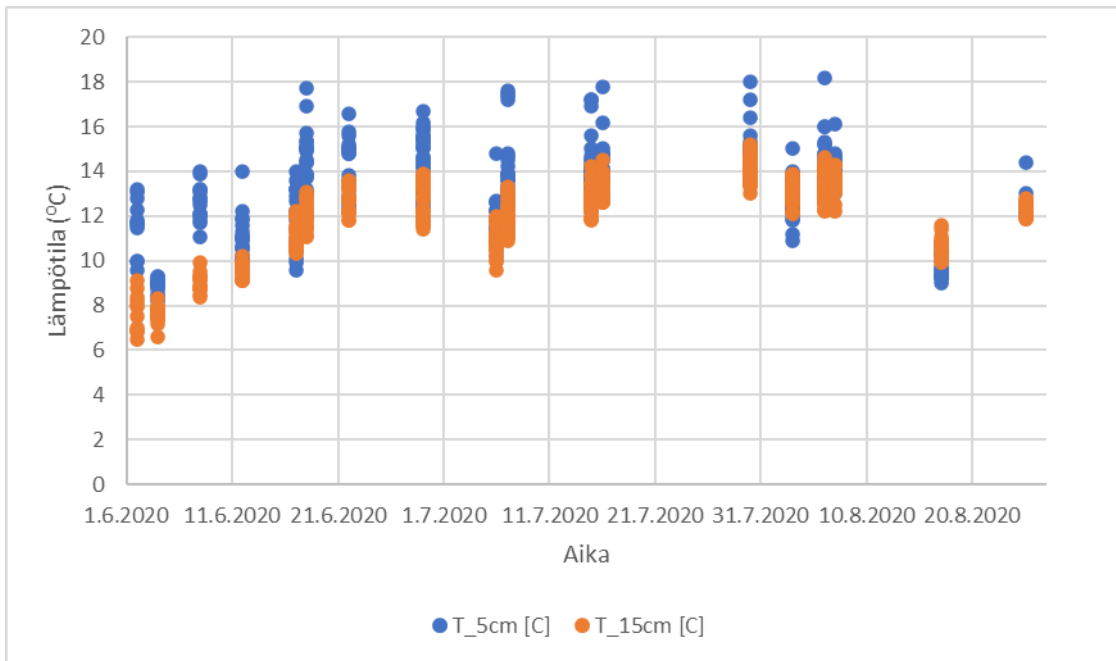
Suossa olleiden papanoiden sisällön koostumus oli tarkoitus määrittellä infrapunaspektillä kuivatuksen jälkeen. Näin pystyttäisiin selvittämään, mitä aineita näytteissä on ja missä suhteissa. Infrapunaspektrimääritys auttaisi selvittämään, miten poron papanat haajoavat turpeessa ajan kuluessa ja miten ravinteet liukenevat niistä suohon. Tähän kyseiseen pro gradu -työhön ei kuitenkaan ehditty enää tehdä infrapunaspektriajoja, mutta ne tehdään myöhemmin yleisesti osana Luonnonvarakeskuksen ACAP-projektia.

2.1.7 Muut mittaukset

Jokaiselta koealalta mitattiin metaanivuon ja lehtialan lisäksi turpeen lämpötila ja pohjavedenpinnan korkeus. Turpeen lämpötila mitattiin jokaisen metaanimittauksen yhteydessä heti mittauspisteen vierestä sekä viiden että viidentoista senttimetrin syvyydestä (Kuvat 12 ja 13). Lämpötilan mittaukseen käytettiin Fluke 52 II Thermometer -lämpömittaria, johon kiinnitettiin anturi, joka voitiin upottaa turpeeseen (Kuva 14). Anturiin merkittiin teipillä viiden ja viidentoista senttimetrin syvyydet, jotta mittaus oli helppo ja nopea suorittaa oikealta syvyydeltä.



Kuva 12. Turpeen lämpötila Halssiaavalla. Siniset pisteet esittävät lämpötilaa 5 cm syvyydessä ja oranssit 15 cm syvyydessä.

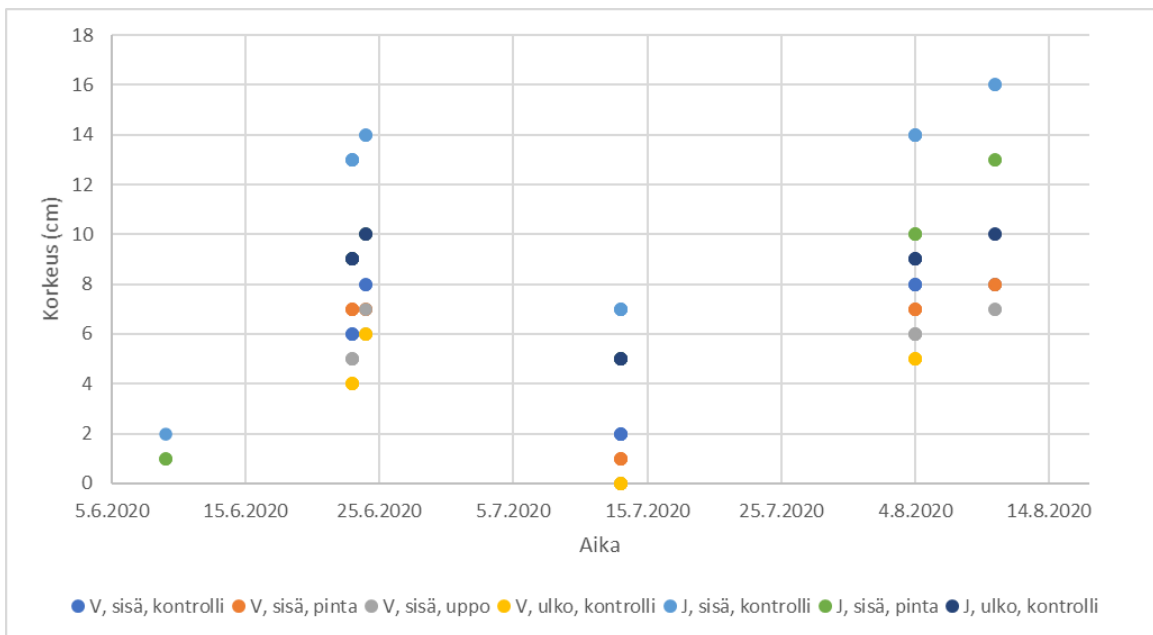


Kuva 13. Turpeen lämpötila Lompolonjätkältä. Siniset pisteet esittävät lämpötilaa 5 cm syvyydessä ja oranssit 15 cm syvyydessä.

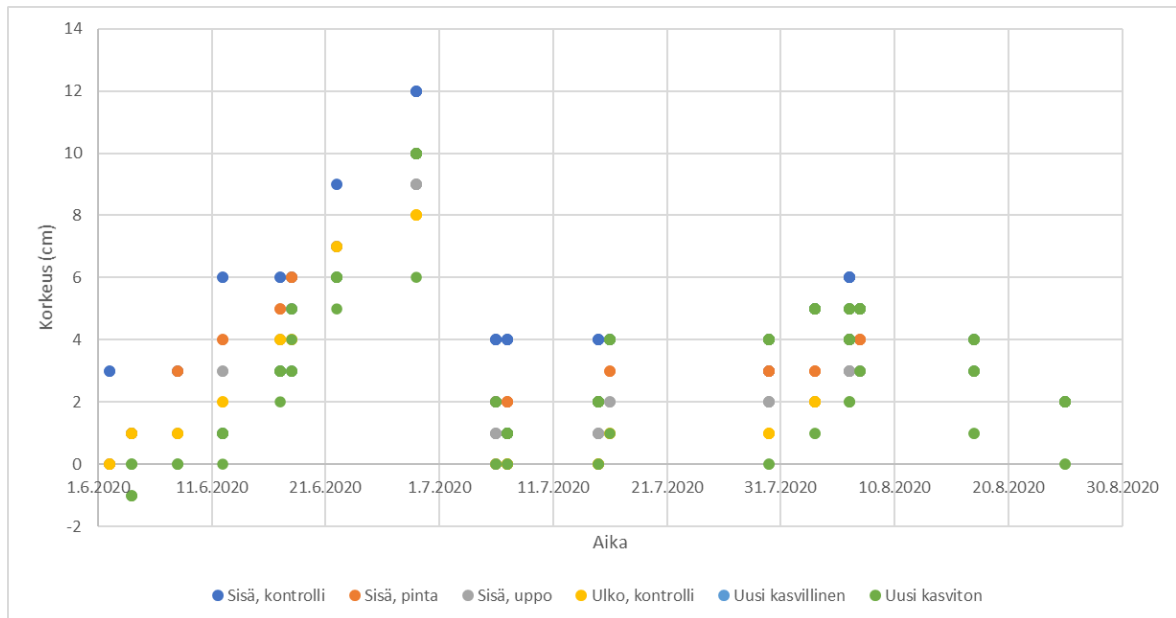


Kuva 14. Lämpömittari ja anturi turpeen lämpötilan mittaamiseen (Kuva: Elli-Noora Kamppuri).

Pohjavedenkorkeus mitattiin itse rakennetulla ”vesipiipalla” (Kuvat 15 ja 16). Vesipiippa sisälsi kovasta muovista tehdyn letkun, joka kiinnitettiin yhteen paksun metallilangan ja mittanauhan kanssa nippusiteillä. Kolmea mittauspistettä kohden turpeessa oli paksu muoviputki, joka nousi 10 senttimetriä turpeen pintaa korkeammalle. Putkiin oli tehty reikiä, jotta putkessa veden pinta pysyisi samalla korkeudella kuin putkessa. Vesipiippa asetettiin mittauksen ajaksi putkeen ja vesipiipan letkuun puhallettiin. Vedenpinnan korkeuden pystyi tunnistamaan sen perusteella, missä kohtaa veden pulputus lakkasi kuulomasta. Sillä kohtaa piipasta katsottiin mittanauhan lukema putken reunan tasolta ja lukemasta vähennettiin putken maanpäällisen osan pituus.



Kuva 15. Pohjavedenpinnan korkeus Halssiaavalta käsittelyittään. Selitteissä V viittaa välipintaan ja J jännepintaan.



Kuva 16. Pohjavedenpinnan korkeus Lompolonjänkältä käsittelyittäin.

2.2 Aineiston analysointi

Aineiston analysointiin käytettiin Exceliä ja R-tilasto-ohjelmaa. Tilastoanalyysien tekemisessä oli mukana Luonnonvarakeskuksen tilastotieteilijä Tuomas Rajala. Sekä meta-anipäästöjä että kasvillisuuden lehtialaa analysoitiin lineaarisilla sekamalleilla. Laidunnuksen vaikutusta metaanivuohon ja lehtialaan testattiin vertailemalla molemmilla soilla laidunnettujen ja laiduntamattomien mittauspisteiden välillä. Papanoiden vaikutusta testattiin vertailemalla kontrollimittauspisteiden ja papanalisäyksen saaneiden mittauspisteiden metaanivoita ja lehtialoja. Halssiaavalla vertailtiin papanoiden vaikutusta metaanivuohon erikseen jänteillä ja välipinnoilla. Lompolonjänkällä vertailtiin lisäksi kasvittomia ja uusia kasvillisia keskenään, jotta selviäisi, vaikuttaako papanoiden lisääminen metaanin määrään kasvillisuuden vai itse turpeen kautta. Laidunnuksen ja papanalisäysten vaikutusta kasvillisuuden lehtialaan analysoitiin vastaavilla tilastoanalyysillä.

Halssiaavalla laidunnusvaikutusta metaanivuohon välipinnalla analysoitiin R tilasto-ohjelmassa yhtälöllä:

```
lm(formula = ch4 ~ fence + timepoint, data = hall, subset = treatment == "control")
```

Jännepinnoilla laidunnusvaikutusta metaanivuohon analysoitiin yhtälöllä:

```
lm(formula = ch4 ~ fence + timepoint, data = halh, subset = treatment == "control")
```

Halssiaavalla välipinnoilla ja jänteillä käsittelyn vaikutusta metaanivuohon analysoitiin yhtälöllä:

```
lm(formula = ch4 ~ treatment + timepoint, data = halli)
lm(formula = ch4 ~ treatment + timepoint, data = halhi)
```

Lompolonjätkällä laidunnuksen vaikutusta suon metaanivuohon analysoitiin seuraavasti:

```
lm(formula = ch4 ~ fence + timepoint, data = lom, subset = vegetation == "yes" & plot_established == "2019")
```

Käsittelyn vaikutusta metaanivuohon tutkittiin yhtälöllä:

```
lm(formula = ch4 ~ fence + treatment + timepoint, data = lomv, subset = vegetation == "yes")
```

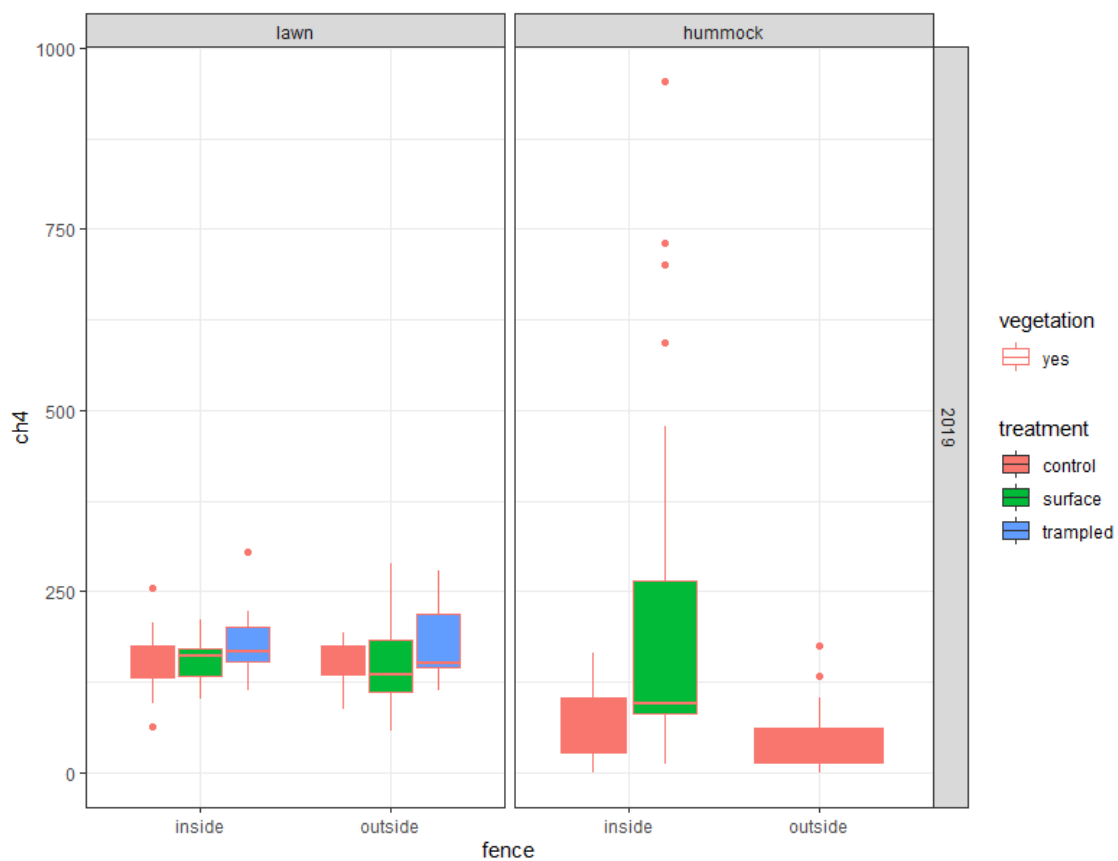
Metaanivuon muutoksia käsittelyn vaikutuksesta kasvittomilla ja kasvillisilla mittauspisteillä vertailtiin yhtälöllä:

```
lm(formula = ch4 ~ vegetation * treated_with, data = lom3)
```

3. TULOKSET

3.1 Metaanivuo

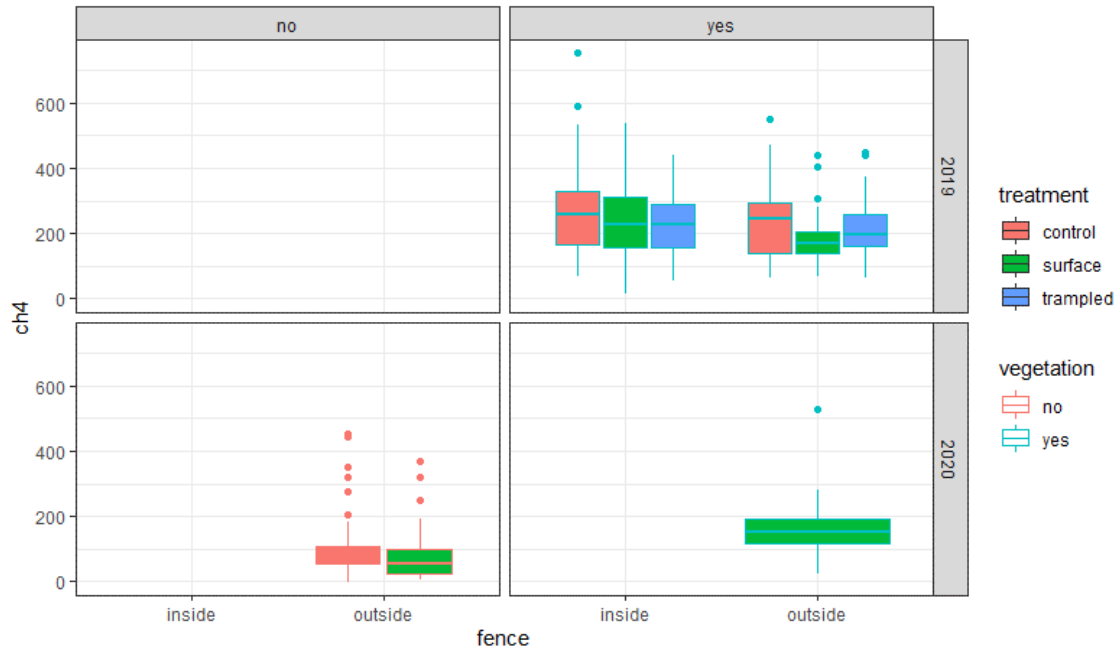
Halssiaavalla metaanivuon suuruus ja sen vaihtelu on esitetty käsittelyittäin kuvassa 17 siten, että mittauspisteet on jaoteltu pinnan, laidunnuksen ja papanalisäyksen mukaan. Välipinnoilla metaanivuo on ollut keskimäärin 159,8 mg/m²/d. Pienin mitattu vuo välipinnoilla on ollut 57,66 mg/m²/d ja suurin 304,6 mg/m²/d. Metaanivuon keskimääräinen suuruus jännepinnoilla on puolestaan ollut 116,0 mg/m²/d. Jänteiden pienin vuo on ollut 2,09 mg/m²/d ja suurin 953,1 mg/m²/d.



Kuva 17. Halssiaavan metaanivuon vaihtelua käsittelyittäin, yksikkö mg/m²/d. ”Control” tarkoittaa kontrollimittauspisteitä, ”surface” pintakäsiteltyjä mittauspisteitä ja ”trampled” uppokäsiteltyjä mittauspisteitä. ”Lawn” tarkoittaa sijaintia välipinnalla ja ”hummock” jänneellä. ”Inside” viittaa sijaintiin aidan sisäpuolella ja ”outside” aidan ulkopuolella. 2019 viittaa mittauspisteiden perustamisvuoteen.

Lompolonjätkän metaanivuon suuruuden vaihtelu on vastaavasti esitelty kuvassa 18 sillä lisäyksellä, että mittauspisteet on jaoteltu myös käsittelyvuoden ja kasvillisuuden mukaan. Lompolonjätkällä metaanivuon keskimääräinen suuruus oli 216,0 mg/m²/d, kun

kasvittomien mittauspisteiden mittauksia ei oteta huomioon. Pienin metaanivuo oli 13,84 mg/m²/d ja suurin 754,2 mg/m²/d. Kasvittomilla mittauspisteillä puolestaan keskimääräinen metaanivuo oli 90,02 mg/m²/d, pienin oli -4,88 mg/m²/d ja suurin metaanivuo 754,2 mg/m²/d.



Kuva 18. Lompolonjätkän metaanivuon vaihtelua käsittelyittäin, yksikkö mg/m²/d. ”Control” tarkoittaa kontrollimittauspisteitä, ”surface” pintakäsiteltyjä mittauspisteitä ja ”trampled” uppokäsiteltyjä mittauspisteitä. ”Inside” viittaa sijaintiin aidan sisäpuolella ja ”outside” aidan ulkopuolella. 2019 ja 2020 viittaavat mittauspisteen perustamisvuoteen. ”Vegetation” kohdan ”no” viittaa kasvittomuuteen ja ”yes” kasvillisuuteen.

Halssiaavalla laidunnuksen vaikutusta metaanivuohon kuvataan taulukossa 3. Laiduntamattoman alueen vuoestimaatti välipinnalla on 178,137 mg/m²/d ja laidunnetun alueen vuoestimaatti eroaa siitä -3,466 mg/m²/d. Ero ei kuitenkaan ole tilastollisesti merkitsevä, sillä p-arvo on yli 0,05. Jänteillä puolestaan laidunnetun alueen vuoestimaatti on 25,851 mg/m²/d pienempi kuin laiduntamattoman alueen p-arvon ollessa alle 0,05. Tämä tarkoittaa, että jännepinnoilla aidan ulkopuolella metaanivuo on tilastollisesti merkitsevästi pienempi kuin aidan sisäpuolella.

Taulukko 3. Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon Halssiaavalla, yksikkö mg/m²/d.

Halssiaapa, välipinta			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
laiduntamaton*	178,137	10,820	<2e-16
laidunnettu	-3,466	9,767	0,72467
Halssiaapa, jännepinta			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
laiduntamaton*	32,473	36,557	0,3797
laidunnettu	-25,851	10,780	0,0212

*vertailuryhmä

Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon Lompolonjäнкällä on esitetty taulukossa 4. Lompolonjäнкällä keskimääräinen vuoestimaatti on laiduntamattomalla alueella 128,351 mg/m²/d ja laidunnetun alueen vuoestimaatti on siitä 34,301 mg/m²/d pienempi. Ero on tilastollisesti merkitsevä, sillä p-arvo on 3,73e-05, joka on alle 0,05.

Taulukko 4. Laidunnuksen vaikutus metaanivuohon Lompolonjäнкällä, yksikkö mg/m²/d.

Lompolonjäнкä			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
laiduntamaton*	128,351	21,034	2,53e-09
laidunnettu	-34,301	8,222	3,73e-05

*vertailuryhmä

Taulukossa 5 esitetään papanakäsittelyiden vaikutukset metaanivuohon Halssiaavalla. Taulukossa välipinta ja jännepinta on eroteltu. Keskimääräisen vuoestimaatin vertailuryhmänä toimivat kontrollimittauspisteet, joihin verrataan pinta- ja uppokäsittelyjä mittauspisteitä. Välipinnan kontrollin keskimääräinen vuoestimaatti on 187,1743 mg/m²/d. Pintakäsittely eroaa tästä -0,4583 mg/m²/d eron olematta tilastollisesti merkitsevä. Uppokäsittely sen sijaan eroaa kontrollista 21,4048 mg/m²/d, kun p-arvo on 0,021525. Tällöin uppokäsittelyn vuoestimaatti on tilastollisesti merkitsevästi korkeampi kuin kontrollin.

Jännepinnalla keskimääräinen vuoestimaatti kontrollilla on -108,41 mg/m²/d, josta pintakäsittely eroaa 169,34 mg/m²/d. Ero on tilastollisesti merkitsevä, sillä p-arvo on alle 0,05.

Taulukko 5. Papanakäsittelyjen vaikutus metaanivuohon Halssiaavalla, yksikkö mg/m²/d.

Halssiaapa, välipinta			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
kontrolli*	187,1743	9,3987	< 2e-16
pintakäsittely	-0,4583	8,9895	0,959499
uppokäsittely	21,4048	9,0800	0,021525
Halssiaapa, jännepinta			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
kontrolli*	-108,41	82,17	0,1941197
pintakäsittely	169,34	43,72	0,000370

*vertailuryhmä

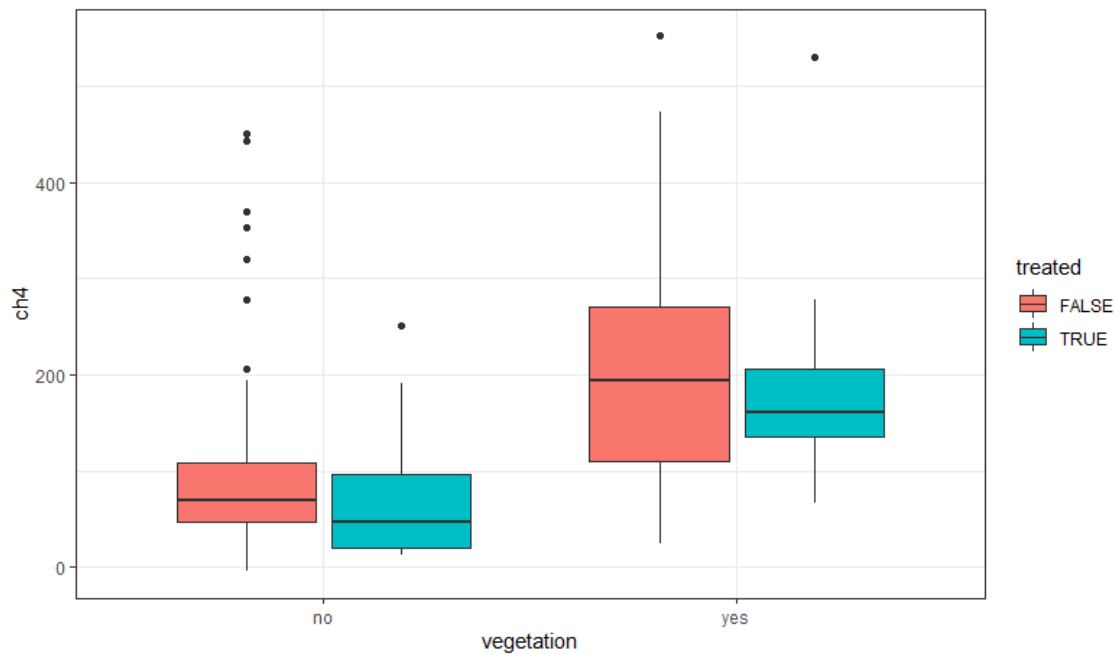
Lompolonjätkällä papanakäsittelyjen vaikutukset metaanivuohon on esitetty taulukossa 6. Tässäkin tapauksessa vertailuryhmänä on käytetty kontrollia, johon pinta- ja uppokäsittelyitä verrataan. Kontrollin keskimääräinen vuoestimaatti on 162,145 mg/m²/d. Sekä pinta- että uppokäsittelyjen arvot ovat tätä pienempiä tilastollisesti merkitsevästi.

Taulukko 6. Papanalisäysten vaikutus metaanivuohon Lompolonjätkällä, yksikkö mg/m²/d.

Lompolonjätkä			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
kontrolli*	162,145	21,271	1,94e-13
pintalisäys	-55,086	9,954	5,77e-08
uppolisäys	-37,534	9,937	0,000183

*vertailuryhmä

Kasvillisuuden ja kasvittomuuden vertailuun perustetut uudemmat mittauspisteet ja niiden metaanivuon vaihtelu on esitetty kuvassa 19. Kuvassa näkyy kasvillisten ja kasvittomien mittauspisteiden erot, sekä papanalisäyksen vaikutus.



Kuva 19. Metaanivuon vaihtelua uusilla kasvittomilla ja kasvillisilla mittauspisteillä, yksikkö mg/m²/d. ”Vegetation” kohdan ”no” viittaa kasvittomuuteen ja ”yes” kasvillisuuteen. ”Treated” tarkoittaa yleisesti, onko mittauspistettä käsitelty papanalisäyksellä (TRUE) vai ei (FALSE).

Taulukossa 7 vertaillaan, miten papanalisäykset vaikuttavat metaanivuon suuruuteen, kun paikalla on kasveja tai kasvit puuttuvat. Vertailuryhmänä taulukossa on käytetty kasvittonta kontrollia ja siihen verrataan kasvittomia mittauspisteitä, jotka saivat pintakäsittelyn, ja uusia kasvillisia mittauspisteitä ennen ja jälkeen pintakäsittelyn. Kasvittoman kontrollin vuoestimaatin suuruus on 101,384 mg/m²/d (Kuva 15), josta kasviton pintakäsittely eroaa -32,594 mg/m²/d. Ero ei ole tilastollisesti merkitsevä, sillä p-arvo on yli 0,05. Kasvilliset ennen papanalisäystä eroavat kasvittomista kontrolleista 103,120 mg/m²/d ja ero on tilastollisesti merkitsevä. Tämä tarkoittaa, että kasvilliset mittauspisteet tuottivat suuremman metaanivuon kuin kasvittomat.

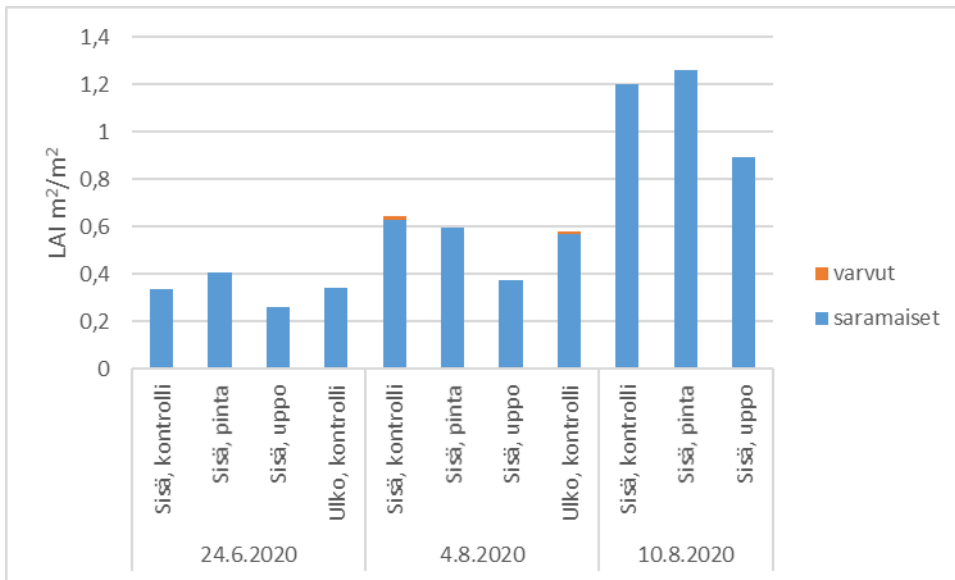
Taulukko 7. Kasvillisuuden ja papanalisäysten vaikutus metaanivuohon Lompolonjäнкällä, yksikkö mg/m²/d.

Lompolonjäнкä			
	Keskimääräinen vuoestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
kasviton kontrolli*	101,384	10,784	< 2e-16
kasviton pintakäsittely	-32,594	18,263	0,0756
uusi kasvillinen ennen papanalisäystä	103,120	15,250	1,09e-10
uusi kasvillinen pa- panalisäyksen jälkeen	3,592	24,439	0,8833

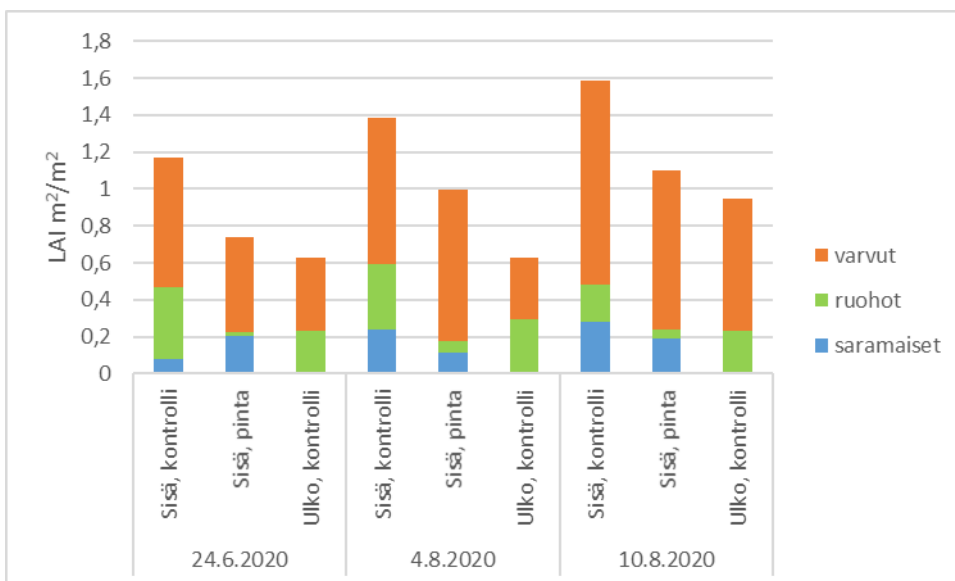
*vertailuryhmä

3.2 Lehtiala

Lehtialan (LAI) suuruus Halssiaavalla käsittelyittäin kunakin mittauspäivänä on esitetty välipinnan osalta kuvassa 20 ja jännepinnan osalta kuvassa 21. Kesän suurimmat lehtialat mitattiin kaikilla mittauspisteillä 10.8. Välipinnan kontrollien keskimääräinen lehtialaindeksi oli korkeimmillaan 1,20 m²/m², pintalisäysmittauspisteiden 1,26 m²/m² ja uppoli- säysmittauspisteiden 0,89 m²/m². Laidunnetun alueen kontrollimittauspisteiltä ei tuona mittauspäivänä määritetty lehtialaa, sillä mittauspisteet tuhottiin toisen tutkimuksen koetta varten. Välipinnalla lehtiala koostui lähes yksinomaan saramaisesta kasvillisuudesta. Jänteillä keskimääräinen korkein lehtialaindeksi kontrolleilla oli 1,58 m²/m², pintalisäysmittauspisteillä 1,10 m²/m² ja laidunnetun alueen kontrolleilla 0,95 m²/m². Jänteillä hal- litsevin kasvillisuusryhmä oli varvut.



Kuva 20. Lehtiala käsittelyittäin kunakin mittauspäivänä Halssiaavan välipinnalla.



Kuva 21. Lehtiala käsittelyittäin kunakin mittauspäivänä Halssiaavan jänteillä.

Laidunnuksen vaikutusta lehtialaan Halssiaavalla esitetään taulukossa 8. Keskimääräinen lehtialaestimaatti välipinnan laiduntamattomalla alueella on $0,35691 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Laidunnetun alueen lehtialaestimaatti ei poikkea tästä tilastollisesti merkitsevästi, sillä p-arvo on korkeampi kuin 0,05. Jännepinnalla laiduntamattoman alueen estimaatti on $1,2224 \text{ m}^2/\text{m}^2$, josta laidunnetun alueen estimaatti poikkeaa negatiivisesti tilastollisesti merkitsevästi.

Taulukko 8. Laidunnuksen vaikutus lehtialaan Halssiaavalla. Yksikkö m²/m².

Halssiaapa, välipinta			
	Keskimääräinen lehtialaestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
laiduntamaton*	0,35691	0,11619	0,010628
laidunnettu	-0,03232	0,13417	0,814099
Halssiaapa, jännepinta			
laiduntamaton*	1,2224	0,1779	7,68e-06
laidunnettu	-0,6458	0,1779	0,00273

*vertailuryhmä

Käsittelyn vaikutus lehtialaan Halssiaavalla näkyy taulukossa 9. Kontrollimitauspisteillä lehtialaestimaatti välipinnalla on keskimäärin 0,40015 m²/m². Pintalisäyspisteiden estimaatti ei poikkea tästä tilastollisesti merkitsevästi, mutta uppolisäyspisteiden estimaatti on tilastollisesti merkitsevästi pienempi. Jänneillä kontrollimitauspisteiden keskimääräinen lehtialaestimaatti on 1,1716 m²/m². Pintalisäyspisteiden estimaatti on pienempi kuin kontrollipisteiden ja p-arvon ollessa alle 0,05 on ero tilastollisesti merkitsevä.

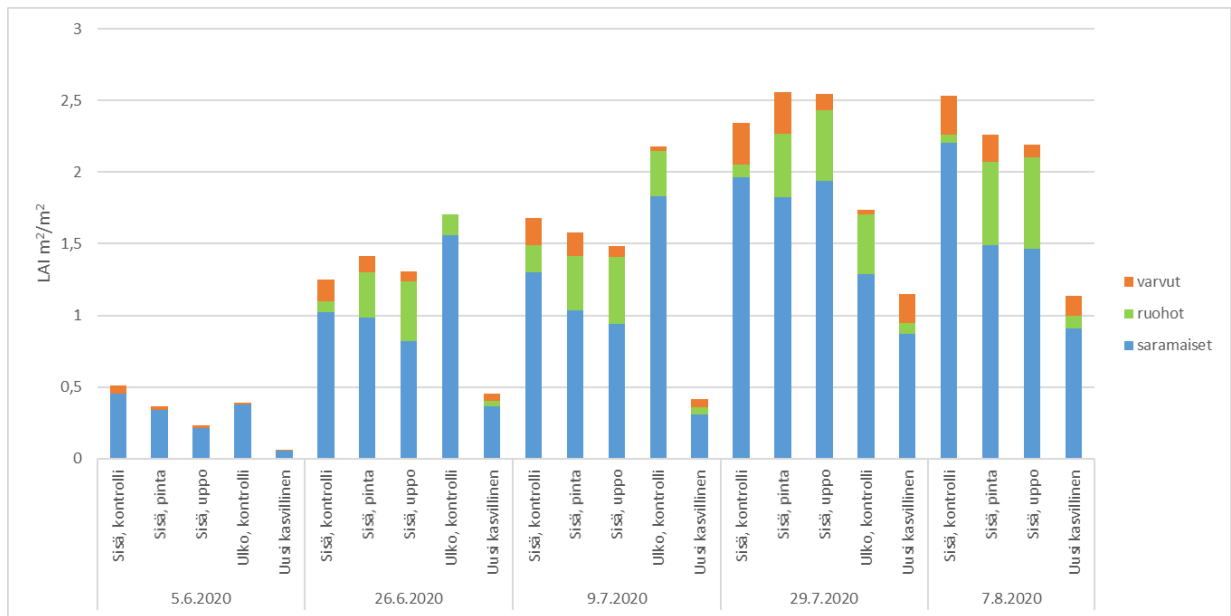
Taulukko 9. Käsittelyn vaikutus lehtialaan Halssiaavalla. Yksikkö m²/m².

Halssiaapa, välipinta			
	Keskimääräinen lehtialaestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
kontrolli*	0,40015	0,08580	0,000119
pintalisäys	0,02601	0,09399	0,784565
uppolisäys	-0,021863	0,09399	0,029621
Halssiaapa, jännepinta			
kontrolli*	1,1716	0,1437	1,1e-06
pintalisäys	-0,4375	0,1437	0,00875

*vertailuryhmä

Lehtialaindeksin kehittyminen Lompolonjäнкällä esitetään kuvassa 22. Kesän korkeimmat lehtialaindeksit eivät ole kaikilla mittauspistetyypeillä sijoittuneet samalle mittauspäivälle. Laiduntamattoman alueen kontrollimitauspisteiden keskimääräisin korkein lehtiala on 2,54 m²/m². Pintalisäyspisteiden korkein keskimääräinen lehtialaindeksi on 2,56

m^2/m^2 . Uppolisäyspisteiden lehtialaindeksi on keskimäärin korkeimmillaan $2,54 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Laidunnetun alueen kontroleilla keskimääräinen korkein lehtialaindeksi on $2,18 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Uusilla kasvillisilla mittauspisteillä lehtialaindeksi oli korkeimmillaan kesällä $1,14 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Laidunnetun alueen kontrollimittauspisteiden lehtiala määritettiin muista poiketen vain neljä kertaa, sillä mittauspisteet tuhottiin ennen viimeistä lehtialan määrittystä toisen tutkimuksen kokeen vuoksi. Kaikilla mittauspisteillä saramaiset ovat hallitsevin kasvillisuusryhmä. Ruohojen osuus kasvillisuudesta on suurempi käsitellyillä ja laidunnetuilla mittauspisteillä kuin laiduntamattoman alueen kontroleilla.



Kuva 22. Lehtiala käsittelyittäin kunakin mittauspäivänä Lompolonjäнкällä.

Laidunnuksen vaikutusta lehtialaan Lompolonjäнкällä esitetään taulukossa 10. Laiduntamattoman alueen keskimääräinen lehtialaestimaatti on $0,35994 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Laidunnetun alueen lehtialaestimaatti ei poikkea tästä merkittävästi, sillä p-arvo on suuruudeltaan yli 0,05.

Taulukko 10. Laidunnuksen vaikutus lehtialaan Lompolonjäнкällä. Yksikkö m^2/m^2 .

Lompolonjäнкк			
	Keskimääräinen	Keskivirhe	p-arvo
	lehtialaestimaatti		
laiduntamaton*	0,35994	0,11790	0,0036
laidunnettu	0,06391	0,13080	0,6272

*vertailuryhmä

Käsittelyn vaikutus Lompolonjäнкällä kasvillisuuden lehtialaan esitetään taulukossa 11. Kontrollimitauspisteiden keskimääräinen lehtialaestimaatti on 0,40705 m²/m². Sekä pinta- että uppolisäyspisteiden estimaatit ovat pienempiä, mutta kummassakaan tapauksessa ero ei ole tilastollisesti merkitsevä.

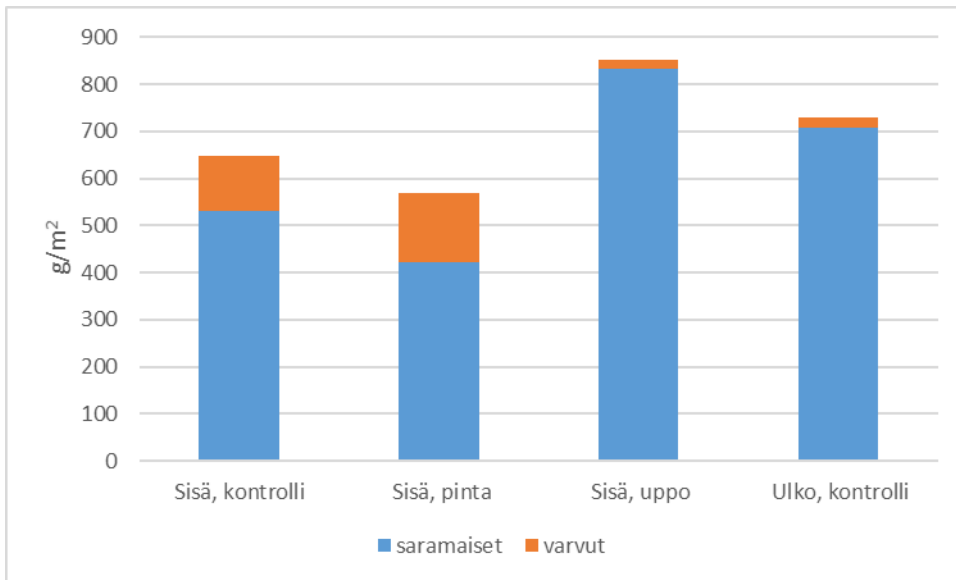
Taulukko 11. Käsittelyn vaikutus lehtialaan Lompolonjäнкällä. Yksikkö m²/m².

Lompolonjäнкä			
	Keskimääräinen lehtialaestimaatti	Keskivirhe	p-arvo
kontrolli*	0,40705	0,14598	0,00752
pintalisäys	-0,02894	0,14523	0,84288
uppolisäys	-0,11240	0,14523	0,44269

*vertailuryhmä

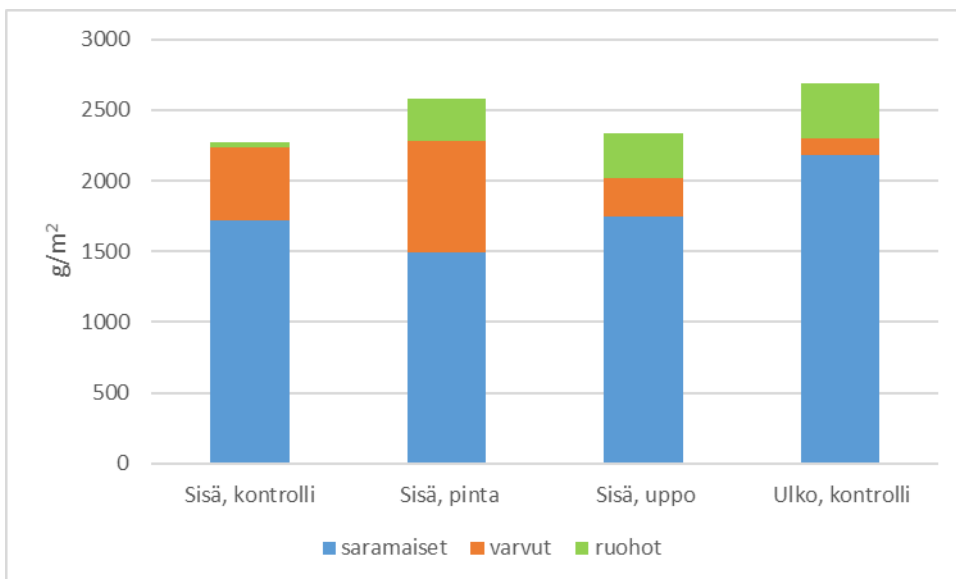
3.3 Biomassa

Halssiaavan mittauspisteiden kokonaisbiomassaa käsittelyittäin havainnollistetaan kuvassa 23. Korkein biomassa on ollut laiduntamattoman alueen uppolisäyspisteillä, joilla kuivabiomassa on keskimäärin 852,0 g/m². Matalin biomassa on laiduntamattoman alueen pintalisäyspisteillä, joilla biomassa on keskimäärin 568,7 g/m². Laiduntamattoman kontrollin keskimääräinen biomassa on 647,9 g/m² ja laidunnetun kontrollin 729,3 g/m². Varpujen osuus biomassasta on selkeästi suurempi laiduntamattoman alueen kontrolleilla ja pintalisäyspisteillä kuin uppolisäyspisteillä ja laidunnetulla alueella.



Kuva 23. Mittauspisteiden kokonaisbiomassa Halssiaavalla. Yksikkö g/m^2 (kuivamassaa neliömetrillä).

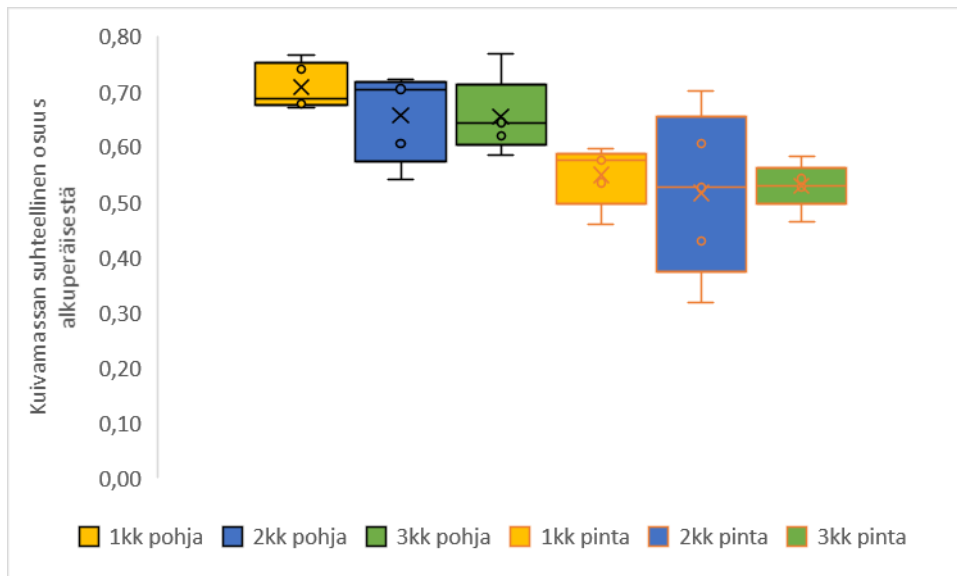
Kokonaisbiomassaa käsittelyittain Lompolonjäнкällä on esitetty kuvassa 24. Korkein biomassa on laidunnetun alueen kontrolleilla, missä biomassa on keskimäärin $2689,7 \text{ g/m}^2$. Laiduntamattomien kontrolleiden biomassa on keskimäärin $2270,3 \text{ g/m}^2$, pintalisäyspisteiden $2580,1 \text{ g/m}^2$ ja uppolisäyspisteiden $2334,3 \text{ g/m}^2$. Varpuja on suhteellisesti vähiten laidunnetuilla kontrolleilla ja ruohoja laiduntamattomilla kontrolleilla.



Kuva 24. Mittauspisteiden kokonaisbiomassa Lompolonjäнкällä. Yksikkö g/m^2 (kuivamassaa neliömetrillä).

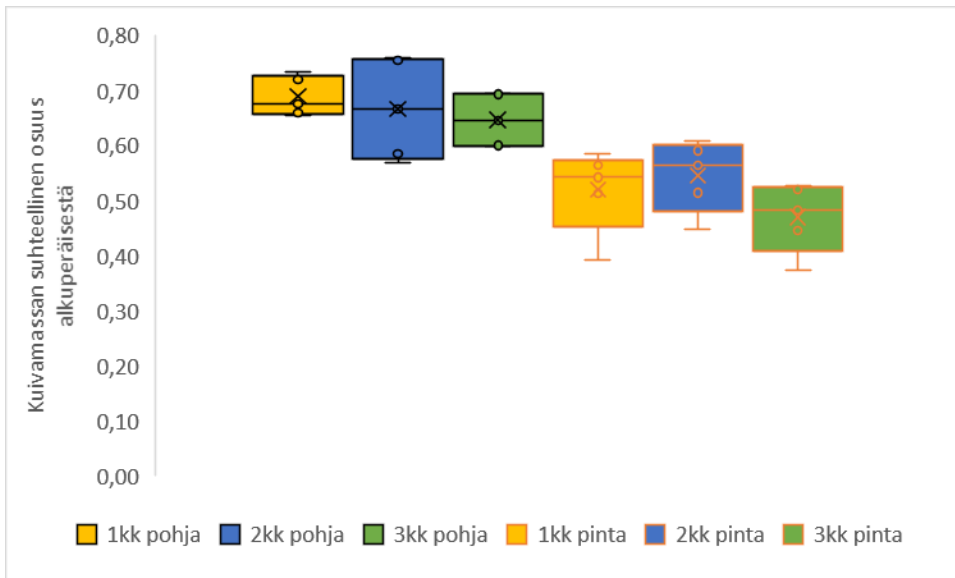
3.4 Inkubointikokeet

Poron papanoiden hajoamisnopeutta suon eri syvyyksillä Halssiaavalla esitetään kuvassa 25. Pintapapanoiden, eli viiden senttimetrin syvyydellä olleiden kuivapainosta oli yhden kuukauden jälkeen jäljellä keskimäärin 55 % alkuperäisestä. Kahden kuukauden jälkeen pintapapanoista oli jäljellä keskimäärin 52 % ja kolmen kuukauden jälkeen 53 %. Pohjapapanoiden, eli viidentoista senttimetrin syvyydelle upotettujen papanoiden kuivamassasta oli yhden kuukauden jälkeen keskimäärin 71 % jäljellä. Kahden kuukauden jälkeen kuivamassasta oli jäljellä 66 % ja kolmen kuukauden jälkeen 65 %. Hajoamisnopeus oli selkeästi suurempi pintapapanoilla pohjapapanoihin verrattuna.



Kuva 25. Poron papanoiden hajoaminen turpeessa Halssiaavalla.

Lompolonjätkällä upotettujen poron papanoiden hajoamisnopeus on esitetty kuvassa 26. Pintapapanoiden kuivamassasta oli yhden kuukauden jälkeen keskimäärin 52 % jäljellä. Kahden kuukauden turpeessa olon jälkeen kuivamassasta oli jäljellä 54 % ja kolmen kuukauden jälkeen 47 %. Pohjapapanoiden kuivamassasta oli ensimmäisen kuukauden jälkeen keskimäärin 69 % jäljellä alkuperäiseen nähden. Kahden kuukauden jälkeen papanoista oli jäljellä keskimäärin 67 % ja kolmen kuukauden jälkeen 65 %. Kuten Halssiaavalla, myös Lompolonjätkällä pintapapanat hajosivat pohjapapanoita nopeammin. Merkittävää eroa hajoamisnopeudessa soiden välillä ei ole havaittavissa.



Kuva 26. Poron papanoiden hajoaminen turpeessa Lompolonjätkällä.

4. TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Papanalisäysten vaikutus metaanivuohon ja kasvillisuuteen

Poron papanoilla ei ollut selkeää vaikutusta metaanivuohon, sillä Halssiaavan kokeella papanat lisäsivät metaanivuota, kun taas Lompolonjänkällä vaikutus oli päinvastainen. Huomattava metaanivuon lisäys havaittiin Halssiaavan välipinnan mittauspisteillä, joille vuonna 2019 oli upotettu papanoita. Vastaavanlaisia vaikutuksia ei ollut näkyvissä vuonna 2019 (Salovaara 2020), joten tästä voidaan päätellä, että muutokset metaanivuossa saattavat näkyä vasta seuraavina kasvukausina. Myös Van der Wal ym. huomasi tutkimuksessaan, että ulostelisäysten vaikutukset ekosysteemeissä, kuten ruohojen ja maaperämikrobiston lisääntyminen, voivat näyttäytyä vasta parin vuoden jälkeen (2004).

Kasvillisuuden lehtiala ei näyttäisi olevan yksiselitteisesti vaikuttavan korkeampiin metaanivoihin. Halssiaavan laidunnetuilla jänteillä sekä lehtialat että metaanivuot olivat pienempiä laiduntamattomiin verrattuina. Jänteillä korkeita metaanivuoarvoja tuottaneet pintalisäyspisteet saivat lehtialaindeksikseen pienempiä tuloksia kuin kontrollit. Halssiaavan välipinnan uppolisäyspisteillä, joissa metaanivuo oli korkeampi, oli lehtiala pienempi kuin muilla mittauspisteillä. Biomassa näillä pisteillä oli puolestaan selkeästi korkein. Biomassa ja lehtiala eivät täysin korreloi keskenään, koska biomassa on määritetty koko mittauspisteeltä ja lehtiala määritettiin mittauspisteen osakoealasta. Näin ollen upopapanalisäysten mittauspisteillä lehtiala on ollut otanta-alueella suhteessa pienempi kuin mittauspisteellä muuten. Myöskin papanalisäykset lehtialaosakoealoilla ovat voineet fyysisesti estää kasvien kasvua.

Lompolonjänkällä kasvillisuudessa ja biomassassa ei näkynyt suuria eroja, jotka selittäisivät käsittelypisteiden pienempi metaanivoita. Jos biomassaa pidetään absoluuttisempaan mittarina kasvillisuuden määrässä kuin lehtialaa, voidaan yleistää, että kasvillisuuden määrä korreloi positiivisesti korkeampien metaanivoiden kanssa välipinnoilla. Kuten Bridgham ym. totesivat kasvillisuuden lisäävän metanogeenien toimintaa juurieritteiden kautta (2013), näyttäisi kasvillisuuden korkeampi määrä myös tässä tutkimuksessa lisäävän metanogeneesiä suolla ja sitä kautta suurentavan metaanivuota. Ruohojen suhteellisesti suurempi määrä näyttäisi Lompolonjänkällä korreloivan pienempien metaanivoiden

kanssa. Tämä voisi osittain johtua siitä, että näillä paikoin sarojen määrä jää pienemmäksi ruohojen runsauden takia ja tämä vähentää metaanin pääsyä ilmakehään. Sarat kuljettavat muita kasviryhmiä paremmin metaania aerenkymisolukoiden kautta turpeesta ilmakehään ja lisäksi sarojen hajoamisesta liukenevat orgaaniset yhdisteiden on tutkittu aktivoivan metanogeneesiä (Bridgham ym. 2013).

Halssiaavalla välipinnan mittauspisteillä, joille oli lisätty uppopapanoita, oli pienempi lehtiala, kuin kontrolleilla ja mittauspisteillä, joille oli lisätty pintapapanoita. Uppopapanat survottiin turpeeseen, joten tämä on myös voinut vaurioittaa kasvillisuutta, mikä selittäisi pienemmän lehtialan. Uppopapanat näyttäisivät siis vähentävän lehtialaa. Pintapapanoilla ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta lehtialan suuruuteen. Lehtialan määrä on kuitenkin ristiriidassa biomassan kanssa, sillä suurimmat biomassat saatiin Halssiaavan välipinnoilla mittauspisteiltä, joille oli lisätty uppopapanoita. Näillä mittauspisteillä suurin osa biomassasta tuli saramaisista kasveista. Saramaisten biomassassa näyttäisi tässä siis korreloivan oletetun laisesti metaanivuon kanssa, eli korkein metaanivuo tulee sieltä, missä kasvaa eniten saramaisia kasveja.

Halssiaavan jännteillä kontrollipisteiden lehtiala oli pintalisäyspisteiden lehtialoja merkittävästi suurempi. Tämän perusteella papanalisäykset vähentäisivät lehtialan määrää jännepinnoilta. Jännepinnoilla ei kartoitettu kokonaisbiomassaa, joten papanalisäysten vaikutusta biomassaan ei voida tässä yhteydessä tarkastella. Lehtialaa ei myöskään mitattu vuonna 2019 jännepinnoilta, joten lehtialan kehittymistä ei voida verrata aiempaan vuoteen.

Lompolonjäнкällä kesän suurimmat lehtialat saatiin mittauspisteiltä, joihin oli lisätty pinta- tai uppopapanoita. Myös ruohojen määrä ja osuus koko lehtialasta oli näillä mittauspisteillä selkeästi suurin. Näin ollen papanalisäykset nostaisivat lehtialaa ja erityisesti ruohojen lehtialaa. Vuonna 2019 kontrollipisteiden lehtiala oli suurin ja pintalisäyspisteiden pienin (Salovaara 2020). Kokonaisbiomassan perusteella papanalisäykset nostaisivat aavistuksen biomassaa ja merkittävästi ruohojen biomassaa.

Biomassan ja lehtialan laskemisen perusteella papanalisäys lisää ruohojen osuutta kasvilisuudesta. Papanalisäys ei puolestaan vaikuta nostavasti tai laskevasti sarojen tai varpu-

jen määrään. Tutkimuksen tulokset olivat osittain odotettuja ja osittain yllättäviä. Ensimmäisen hypoteesin mukaan odotettiin, että poron papanoista vapautuvat ravinteet edistävät sarakasvien tuotantoa ja kasvua. Myös ravinteita enemmän tarvitsevat lajit lisääntyvät. Kuitenkin poron papanoista vapautuvat ravinteet vaikuttavat hyödyttävän eniten ruohoja. Ruohot hyötyvät ravinnelisäyksestä kaikista eniten ja niukkaravinteisissa oloissa pärjäävät sarat puolestaan eivät juuri reagoi papanoiden antamiin ravinteisiin.

Lehtiala ei muuttunut merkittävästi papanalisäyksen vuoksi. Lompolonjängkällä papanalisäys kasvatti lehtialaa jonkin verran, mutta Halssiaavalla lehtiala oli korkein, kun papanalisäystä ei ollut tehty. Papanat eivät välttämättä sisällä ravinteita niin paljoa, että sillä olisi konkreettista lannoitusvaikutusta kasvillisuudelle.

Tämän tutkimuksen perusteella metaanivuossa ei tapahdu muutoksia, kun papanoita lisätään suolle, kun kasvillisuutta ei ole paikalla. Poron papanoista vapautuvat ravinteet vilkastavat suon hajottajamikrobien toimintaa ja sitä kautta lisäävät metaanin tuotantoa (Hahn ym. 2014). Kuitenkaan metaanivuo ei muuttunut papanalisäysten myötä suuntaan tai toiseen. Papanalisäys tehtiin kesällä 2020, joten ei voida tietää, jos tässäkin tapauksessa vaikutus näkyisi vasta vuoden päästä papanalisäyksistä. Samoja papanoita käytettiin Laiho ym. tutkimuksessa, jossa turpeen metaanivuo lisääntyi papanalisäyksen seurauksena. Tähän voi olla syynä, että papanalisäykset jäivät suon pinnalle, eivätkä päässeet lisäämään hapettomien olosuhteiden metanogeenien toimintaa.

Toisessa hypoteesissa oletettiin, että poron papanoiden vaikutukset suokasvillisuuteen eivät ole näkyvissä välittömästi, sillä ravinteiden liukeneminen papanoista suohon on hidasta. Tämä hypoteesi vaikuttaisi pitävän paikkaansa, sillä esimerkiksi Halssiaavalla metaanivuo kohosi papanalisäysten vaikutuksesta kesällä 2020, vaikka kyseistä vaikutusta ei vielä ollut näkyvissä edeltävänä vuonna, kun papanalisäykset itsessään tehtiin. Myös Lompolonjängkällä kasvillisuuden lehtiala kohosi papanalisäysmittauspisteillä suhteessa kontrollimittauspisteisiin kesällä 2020 verrattuna kesään 2019.

4.2 Papanoiden hajoaminen turpeessa

Papanat hajosivat molemmilla soilla nopeammin lähempänä turpeen pintaa kuin syvemmällä. Pintapapanoista noin puolet hajosi kolmessa kuukaudessa eli yhden kasvukauden aikana. Pohjapapanoista noin kolmasosa ehti hajota samassa ajassa. Suurin osa hajoamisesta tapahtuu jo ensimmäisen kuukauden aikana, minkä jälkeen hajoaminen jatkuu hitaampana ja tasaisena. Kesäkaudella kolmen kuukauden mittausjaksolla papanoiden hajoaminen lisääntyy, mitä kauemmin papanat ovat turpeessa. Hajoamisvauhti oli molemmilla soilla suurin piirtein sama.

Viimeisen hypoteesin perusteella uskottiin, että ravinteet liukenevat turpeeseen paremmin lähempänä pintaa kuin syvemmällä, sillä papanat hajoavat siellä nopeammin. Papanoiden hajoamisnopeuden seuraamisen perusteella hypoteesin voisi kuvitella pitävänsä paikkaansa. Vaikka tässä tutkimuksessa ei päästy tutkimaan ravinteiden liukenemistä, voisi uskoa, että ravinteet liukenevat papanoista sitä mukaa, kun ne hajoavat. Tässä tapauksessa pinta- ja pohjapapanoiden käytöstä ei voida kuitenkaan yhdistää mittauspisteille lisättyihin papanoihin. Mittauspisteiden pintapapanat jäivät kokonaan suon pinnan päälle ja uppopapanoita yritettiin talloa vähän suohon. Hajotusnopeuden tutkimuksessa pintapapanat viittaavat turpeessa 0–5 senttimetrin syvyydellä oleviin papanoihin, joten nämä pintapapanat vastaisivat käytökseltään ehkä enemmän mittauspisteille lisättyihin niin sanottuihin ”uppopapanoihin”.

4.3 Metaanivuon taso verrattuna aiempiin tutkimuksiin

Halssiaavan keskimääräiset metaanivuot kesällä 2020 olivat 159,8 mg/m²/d välipinnalta ja 116,0 mg/m²/d jänteiltä. Välipinnan metaanivuo vaihteli välillä 57,66–304,6 mg/m²/d ja jänteiden välillä 2,09–953,1 mg/m²/d. Vuonna 2019 Salovaara sai Halssiaavan keskimääräiseksi metaanivuoksi välipinnoilla 67 mg/m²/d ja jänteillä 25 mg/m²/d (2020). Dinsmore ym. tutkimuksessa kammiomittauksilla saadut metaanivuot Halssiaavalta olivat suuruudeltaan 3,5±0,44 mg/m²/h eli 80,4 ±10,56 mg/m²/d kesäaikana (2017). Mörsky ym. mittausten mukaan Halssiaavan kesän suurimmat keskimääräiset metaanivuot olivat 150 mg/m²/d vuonna 2003, 200 mg/m²/d vuonna 2004 ja 250 mg/m²/d vuonna 2005 (2012). Salovaaran mukaan kesän 2019 keskimääräinen metaanivuo välipinnalta oli 67

mg/m²/d ja jänteiltä 25 mg/m²/d (2020). Välipintojen metaanivuot ovat suhteessa samalla tasolla kuin Mörskyn ym. (2012) tutkimuksessa, mutta reilusti korkeammalla kuin vuotta aiemmin Salovaaran (2020) tutkimuksessa. Tämä voi johtua siitä, että kesä 2019 oli huomattavasti viileämpi kuin kesä 2020. Jännepintojen metaanivuot ovat huomattavasti aiempia tutkimuksia korkeammalla tasolla johtuen pintakäsitteltyjen jännemittauspisteiden selkeästi korkeammista metaanivuoarvoista.

Kesällä 2020 Lompolonjäнкällä keskimääräinen metaanivuo oli suuruudeltaan 216,0 mg/m²/d. Metaanivuo vaihteli välillä 13,84–754,2 mg/m²/d. Lompolonjäнкän vuoden 2019 keskimääräinen metaanivuo oli 231 mg/m²/d (Salovaara 2020). Drewer ym. mittasivat Lompolonjäнкän metaanivuota kammionmittauksilla vuosina 2006, 2007 ja 2008 (2010). Lompolonjäнкän metaanivuot vaihtelivat välillä 5,0–360 mg/m²/d vuonna 2006, 4,7–576 mg/m²/d vuonna 2007 ja –3,5–370 mg/m²/d vuonna 2008. Vuonna 2006 vuo oli keskimäärin 145 mg/m²/d, vuonna 2017 164 mg/m²/d ja vuonna 2008 97 mg/m²/d (Drewer ym. 2010) Li ym. tutkimuksessa Lompolonjäнкän keskimääräiset kesän suurimmat metaanivuot Eddy covariance -menetelmällä olivat tasolla 192–288 mg/m²/d (2016). Kesällä 2019 Lompolonjäнкän metaanivuon suuruus oli keskimäärin 231 mg/m²/d (Salovaara 2020). Lompolonjäнкän metaanivuon suuruus kesällä 2020 vastaa aiempien vuosien tutkimusten tuloksia varsin hyvin.

4.4 Tutkimuksen virhelähteet

Tutkimuksen tarkkuuteen vaikuttavia virheitä on voinut tapahtua aineiston keruun ja analysoinnin aikana. Virhelähteitä on voinut aiheuttaa mittalaitteiden toimintahäiriöt ja virheellinen käyttö, mittaajan huolimattomuusvirheet ja virheet aineistojen käsittelyssä ja analysoinnissa Excelillä tai R:llä.

Metaanimittausten tuloksiin merkittävimmin vaikuttava virhetekijä olisi kellonaikojen virheet mittauslomakkeiden ja mittausdatan välillä. Mittauksen aloitus- ja lopetusajankohdat katsottiin sekunnin tarkkuudella aina kellosta. Mittaajan kello käännettiin yleensä aina ennen jokaista mittauspäivää samaan aikaan kaasuanalysaattorin kanssa, sillä kaasuanalysaattorin sisäinen kello oli kesän alussa todellista aikaa noin 11 minuuttia edellä. Kerran mittaajan kello oli siirtynyt huomaamatta takaisin todelliseen aikaan, mistä syystä

4. ja 5.6. tapahtuneet mittauksien alkamis- ja päättymisajat merkittiin noin 11 minuuttia kaasuanalysointia aikaa jälkeen. Kellojen erotusta ei kuitenkaan tarkistettu sekunnilleen, joten mittausdatan vuot ovat voineet hypätä yhdellä mittauksella suuntaan tai toiseen vastaamaan väärää mittauspistettä. Kaasuanalysointikello myös siirtyi mystisesti kesken kesää vastaamaan todellista aikaa lähes sekunnilleen. Tämäkin on voinut aiheuttaa hyppäyksiä mittauspisteestä toiseen mittausdatassa. Myös virheellisesti merkityt kellonajat ovat voineet siirtää näitä vuotietoja väärille mittauksille. Tällaista on voinut tapahtua erityisesti silloin, kun mittauksen aloituksen jälkeen mittaus on jouduttu keskeyttämään ja aloittamaan alusta, jolloin väärä aloitus- tai lopetusaika on vahingossa jäänyt kirjatuksi.

Metaanimittauksissa ongelmia aiheuttivat myös Lompolonjätkän kasvittomien mittauspisteiden mittaaminen. Kasvittomilla mittauspisteillä vedenpinta oli koko kesän varsin korkealla ja kasvittomuuden takia ne olivat erittäin herkkiä tuottamaan metaanikuplia pienestäkin täryksestä. Näin ollen tietyt mittauspisteet tuottivat mitatessa systemaattisesti hyvin herkästi metaanikuplia, mikä pilasi metaanivuon. Mittausvirheitä on voinut tuottaa myös kaasuanalysointikellon toimimattomuus, sillä kaasuanalysointikello ei kestänyt liikaa kosteutta. Erityisesti märemmillä mittauspisteillä kaasuanalysointikello saattoi vahingossa saada ilmaa kaasun sisäänottoaukosta liikaa kosteutta. Tätä ehkäisemään kaasuanalysointikellon letkuihin asennettiin kesän puolivälissä filtri.

Lehtialan mittaaminen on tarkkuutta vaativaa työtä, joten suurimmat virhelähteet lehtialan määrityksessä tulevat huolimattomuudesta. Lehtialan mittauksessa laskettiin lehtialan otanta-alalta jokaisen kasvilajin lehtien määrä erikseen ja karpaloitten kohdalla mitattiin varret. Virheitä on voinut tulla siis lasku- ja mittausvirheistä ja vääristä lajinmäärityksistä. Eri lajeja on mittauspisteillä ollut kohtuullisen vähän, joten lajinmäärityksen aiheet virheet ovat käytännössä voineet tulla sarojen kohdalla alkukesänä, jolloin niiden erottaminen toisistaan on ollut vaikeampaa kuin pidemmällä kasvukaudella. Lehtialan määritykseen valittiin joka kerralla otantayksilöt edustamaan mittauspisteen tyyppisten yksilöiden kokoluokkaa. Nämä yksilöt on voitu valita vahingossa siten, että ne ovat olleet suhteettoman suuria tai pieniä. Seuraava virhelähde on voinut tulla otantayksilöiden kuvaamisessa ja kuvien analysoinnissa. Otantayksilöt kuvattiin valkoisista A4-paperista vasten ja kuvia muokatessa kuvat rajattiin mahdollisimman tarkasti vastaamaan paperin reunoja kuvassa. Kuitenkaan kuvat eivät ole aina täysin kohtisuorassa ylhäältäpäin otettuja, minkä vuoksi kuvista ei saa täysin paperin kokoisia. Kuvien vihreitä värejä myös korostettiin,

mutta Canopeo-ohjelma ei silti välttämättä täysin tunnistanut koko vihreää alaa, mikä on voinut vähentää vihreän alan määrää.

Papanoiden hajoamisnopeuden tutkimisessa suurin virhelähde tulee punnitusvirheistä. Papanoita punnittiin ennen pusseihin laittamista, maasta nostamisen jälkeen ja kuivatuksen jälkeen, joten virheet vaa'an käytössä ja vaa'assa ovat voineet johtaa virheisiin. Käytetty vaaka ei myöskään aina ollut sama, joten erot vaakojen tarkkuudessa ovat voineet vaikuttaa punnituksiin. Papanat myös pakastettiin usein maasta nostamisen jälkeen, sillä niitä ei päässyt heti punnitsemaan. Pakkasesta ottamisen jälkeen papanoiden kaapiminen pusseista oli paikoin hankalaa ja pussien sisältöä ei ole välttämättä saatu kokonaan kuivatettavaksi. Tämä johtaisi suurempiin arvioihin hajoamisnopeudesta. Yhden ja kahden kuukauden jälkeen suosta nostetut papanat kuivatettiin Pallasjärven tutkimusaseman lämpökaapissa, joka ei kuitenkaan toiminut optimaalisesti, joten papanat eivät kuivuneet kunnolla. Tästä syystä kyseiset papanat kuivatettiin uudelleen Helsingissä Viikin laboratorion lämpökaapissa 15-18.12.2020. Kosteaksi jääneet papanat ovat voineet hajota huoneenlämmössä, jolloin niiden uudelleen kuivatuksen jälkeiset punnitukset viittaisivat nopeampaa hajoamiseen kuin todellisuudessa.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tärkeimpänä tarkoituksena oli selvittää, miten poron papanat vaikuttavat subarktisen alueen minerotrofisten sarasoiden metaanipäästöihin ja kasvillisuuteen. Tutkimuksessa erityisesti kiinnosti selvittää, olisiko papanoiden vaikutus metaanipäästöihin seurausta muutoksista kasvillisuuteen ja sitä kautta näkyvissä vasta seuraavina kasvukausina papanalisäyksistä.

Tutkimuksen perusteella huomattiin, että porojen laidunnukselle tai papanalisäyksillä ei ole yksiselitteisiä vaikutuksia soiden metaanipäästöihin tai kasvillisuuteen. Vaikutukset olivat paikoin päinvastaisia tutkimussuosta ja mittauspisteiden sijainnista riippuen. Erityisesti jänteillä poron papanat näyttäisivät selkeästi nostavan metaanipäästöjä. Kasvillisuuden runsaus puolestaan tuntui korreloivan useammin pienempien metaanivoiden kanssa. Papanalisäykset tuntuivat lisäävän välipinnoilla ruohojen osuutta muusta kasvillisuudesta, mikä monissa paikoin korreloi pienenevien metaanivoiden kanssa.

Soilla ympäristötekijöitä ja muuttujia on niin paljon, että metaanivuon suuruuteen vaikuttavia asioita on yleensä vaikea eritellä. Laboratorio-olosuhteissa on pystytty näyttämään, että poron papanat lisäävät turpeessa metaanin tuotantoa. Kuitenkin kenttätutkimuksessa samaa vaikutusta ei saada systemaattisesti näkyviin.

Tutkimus osoitti sen, että ekosysteemeissä muutokset eivät tapahdu välittömästi ja poron papanoiden vaikutus kasvillisuuden runsaudessa ja metanogeenien aktiivisuudessa voidaan havaita selvemmin vasta vuoden päästä.

Tutkimus ei vielä täysin osoittanut, mitkä tekijät poron papanoissa lisäävät tai pienentävät metaanivuota suolla. Olisiko lannoitusvaikutus suurin, jos papanat olisivat turpeen pinnan alla hapellisissa oloissa, jolloin niiden hajoaminen olisi nopeinta? Nouisivatko metaanipäästöt eniten, jos papanat olisivat suon hapettomissa oloissa aktivoimassa metanogeenien toimintaa?

6. LÄHTEET

Barthelemy, H., Stark, S. ja Olofsson, J. Strong Responses of Subarctic Plant Communities to Long-Term Reindeer Feces Manipulation. 2015. *Ecosystems* 18: 740-751.

Bridgham, S. D., Cadillo-Quiroz, H., Keller, J., K. ja Zhuang, Q. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. 2013. *Global Change Biology*. Volume 19, Issue 5: 1325-1346

Bubier, J. L. The relationship of vegetation to methane emission and hydrochemical gradients in northern peatlands. 1995. *Journal of Ecology* 1995, 83, 403-420.

Dinsmore, K., Drewer, J., Levy, P., George, C., Lohila, A., Aurela, M. ja Skiba, U. 2017. Growing season CH₄ and N₂O fluxes from a subarctic landscape in northern Finland; from chamber to landscape scale. *Biogeosciences* 14(4): 799-815.

Drewer, J., Lohila, A., Aurela, M., Laurila, T., Minkkinen, K., Penttilä, T., Dinsmore, K. J., Mckenzie, R. M., Helfter, C., Flechard, C., Sutton, M. A. ja Skiba, U. M. Comparison of greenhouse gas fluxes and nitrogen budgets from an ombrotrophic bog in Scotland and a minerotrophic sedge fen in Finland. 2010. *European Journal of Soil Science* 61(5): 640–650.

Falk, J. M., Schmidt N. M. ja Ström L. Effects of simulated increased grazing on carbon allocation patterns in a high arctic mire. 2014. *Biochemistry*. 119:229-244.

Ghosh, A., Patra, P., Ishijima, K., Umezawa, T., Ito, A., Etheridge, D., Sugawara, S., Kawamura, K., Miller, J., Dlugokencky, E., Krummel, P., Fraser, P., Steele, L., Langenfelds, R., Trudinger, C., White, J., Vaughn, B., Saeki, T., Aoki, S. ja Nakazawa, T. Variations in global methane sources and sinks during 1910-2010. 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15(5): 2595-2612.

Hahn, J., Juottonen, H., Fritze, H. ja Tuittila, E. S. Dung application increases CH₄ production potential and alters the composition and abundance of methanogen community in restored peatland soils from Europe. 2018. *Biology and Fertility of Soils* 54(4): 533-547.

Ilmatieteenlaitos. GHG Measurement stations [www-sivusto]. Saatavissa: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ghg-measurement-stations> [Viitattu 6.3.2020].

Jackowicz-Korczynski, M., Christensen, T. R., Bäckstrand, K., Crill, P., Friborg, T., Mastepanov, M. ja Ström, L. Annual cycle of methane emissions from a subarctic peatland. 2010. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* / Volume 115, Issue G2.

Kempainen, J., Kettunen, J. ja Nieminen, M. Porotalouden taloustutkimusohjelma 2003-2007. 2003. Kala- ja riistaraportteja nro. 281: 56 s. + 2 liitettä.

Korkiakoski, M., Tuovinen, J., Aurela, M., Koskinen, M., Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Rainne, J., Laurila, T. ja Lohila, A. Methane exchange at the peatland forest floor – automatic chamber system exposes the dynamics of small fluxes. 2017. *Biogeosciences*, 14, 1947–1967.

Laiho, R., Penttilä, T. ja Fritze, H. Reindeer droppings may increase methane production potential in subarctic wetlands. 2017. *Soil Biology & Biochemistry* 113: 260-262.

Li, T., Raivonen, M., Alekseychik, P., Aurela, M., Lohila, A., Zheng, X., Zhang, Q., Wang, G., Mammarella, I., Rinne, J., Yu, L., Xie, B., Vesala, T. & Zhang, W. Importance of vegetation classes in modeling CH₄ emissions from boreal and subarctic wetlands in Finland. 2016. *Science of the Total Environment* 572: 1111-1122.

Megognical, J. P., Whalen, S. C., Tissue, D. T., Bovard, B. D., Allen, A. S. ja Albert, D. B. A Plant-Soil-Atmosphere Microcosm for Tracing Radiocarbon from Photosynthesis through Methanogenesis. 1999. *Soil Science Society of American Journal*. Volume 63, Issue 3: 665-671.

Nyström, A., Heikkinen, H. I. ja Tolvanen, A. 2013. Soiden käyttö ja merkitys poronhoidossa Kiimingin, Kollajan, Pudasjärven ja Oijärven paliskunnissa vuonna 2011. Metlan työraportteja 258: 190-212.

Paliskunnat. (2019). [www-sivusto] Paliskuntain yhdistys.

Saatavissa: <https://paliskunnat.fi/poro/poronhoito/paliskunnat/>. [Viitattu 19.3.2020].

Poro ja poronhoito talousmetsissä. Metsäkeskus Lappi. 2008.

Saatavissa: https://paliskunnat.fi/ohjeet_oppaat/Poro_ja_poronhoito_talousmetsissa_2008.pdf

Poronhoito Suomessa. (2017). [www-sivusto] Maa- ja metsätalousministeriö.

Saatavissa: <https://mmm.fi/lisatietoja-poronhoidosta>. [Viitattu 19.3.2020].

Salovaara, P. Porolaidunnuksen vaikutus subarktisten minerotrofisten sarasoiden metaanivirtoihin. 2020.

Spahni, R., Wania, R., Neef, L., van Weele, M., Pison, I., Bousquet, P., Frankenberg, C., Foster, P. N., Joos, F., Prentice, I. C., ja van Velthoven, P. Constraining global methane emissions and uptake by ecosystems. 2011. *Biogeosciences*, 8, 1643-1665.

Turetsky, M., Kotowska, A., Bubier, J., Dise, N., Crill, P., Hornibrook, E., Minkinen, K., Moore, T., Myers-Smith, I., Nykänen, H., Olefeldt, D., Rinne, J., Saarnio, S., Shurpali, N., Tuittila, E., Waddington, M., White, J., Wickland, K. ja Wilmking, M. A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. 2014. *Global Change Biology* 20(7): 2183-2197.

Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K. ja Reinikainen, A. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and subarctic regions. 2002. *The Holocene* 12,1: 69–80.

Van Der Wal, R., Bardgett, R. D., Harrison, K. A. ja Stien, A. Vertebrate herbivores and ecosystem control: cascading effects of faeces on tundra ecosystems. 2004. *Ecography*. Volume 27, Issue 2: 242-252.

Van Der Wal, R. ja Brooker, R. W. Mosses mediate grazer impacts on grass abundance in arctic ecosystems. 2004. *Functional Ecology*. Volume 18, Issue 1: 77-86.

Verville, J. H., Hobbie, S. E., Chapin III, F. S. ja Hooper, D. U. Response of tundra CH₄ and CO₂ flux to manipulation of temperature and vegetation. 1998. *Biogeochemistry* 41: 215–235.