

**TUOTOS- JA HEHTAARIKOHTAISTEN
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN PIENENTÄMINEN
TUOMALLA LYPSYKARJATALOUTTA JA BIOKAASUNURMIA
VILJAVALTASELLE MAATALOUSALUEELLE**

Ulrika Wikström
Maisterintutkielma
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden laitos
Agroekologia
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Maataloustieteet	
Tekijä – Författare – Author Ulrika Wikström			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Tuotos- ja hehtaarikohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen tuomalla lypsykarjataloutta ja biokaasunurmia viljavaltaiselle maatalousalueelle			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Kasvintuotantotiede, Agroekologia			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika – Datum – Month and year Toukokuu 2020	
		Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 64	
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Nykytuotantoon maatalouteen liittyy useita ympäristökestävyyden haasteita niin globaalilla kuin kansallisellakin tasolla. Nykyiselle ruoantuotannolle tyypillistä piirteitä ovat muun muassa riippuvuus kemianteollisista tuotantopanoksista, maatalousekosysteemien heikentynyt biodiversiteetti sekä kasvintuotannon ja kotieläintuotannon eriytyminen toisistaan. Ruoan alkutuotanto aiheuttaa myös suurimman osan koko ruokajärjestelmän kasvihuonekaasupäästöistä, jotka puolestaan ovat merkittävä osa globaaleja ja kansallisia kokonaispäästöjä.</p> <p>Ruoantuotannossa kasvihuonekaasupäästöjä aiheutuu erityisesti maankäytöstä ja sen muutoksista, kotieläinten ruoansulatuksesta ja lannankäsittelystä, typpilannoituksesta sekä suorasta ja epäsuorasta fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Päästöjä on kuitenkin mahdollista kompensoida varastoimalla ilmakehän hiilidioksidin hiiltä viljelymaiden hiilivarastoihin viljelykäytäntöjen avulla sekä tehostamalla kasvien yhteyttämän energian hyötykäyttöä maataloudessa.</p> <p>Agroekologisen symbioosin (AES) toimintamalli lisää maatalouden energia- ja ravinneomavaraisuutta vähentäen tuotannon riippuvuutta ulkoisista energia- ja ravinnepanoksista. Toimintamallin keskiössä ovat biokaasun tuotanto ja typensitojanurmien viljely. Typensitojanurmet sopivat myös rehunurmiksi maitokarjalle ja maitokarjatuotannon lisääminen on keino lisätä typensitojanurmien viljelyä ja paikallista ruoantuotantoa kasviviljelyvaltaisella alueella.</p> <p>Tämän tutkimuksen taustana oli agroekologisten symbioosien teoria, ja tavoitteena oli selvittää biokaasun tuotannon ja maitokarjatalouden lisäämisen vaikutukset kasvintuotantovaltaisen maatalousalueen tuotos- ja hehtaarikohtaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Tutkimus toteutettiin päästökertoimiin ja viljelymaiden hiilitasearvioihin perustuvana päästölaskelmana kahdelle mallinnetulle tuotantosysteemille. Toinen systeemeistä edusti tyypillistä kasvinviljelyvaltaista Etelä-Suomalaista maatalousaluetta ja toinen oli skenaario, jossa samalle alueelle sovellettaisiin agroekologisen symbioosin toimintamallia ja lisättäisiin maitokarjataloutta.</p> <p>Tutkimuksen tulokset osoittivat, että skenaarion mukainen tuotantosysteemi vähentäisi tutkitun alueen proteiinimääräisen ruokatuotoksen kasvihuonekaasupäästöjä 57 % ja energiamääräisen 41 %. Skenaarioitu tuotantosysteemi ei vähentäisi hehtaarikohtaisia kasvihuonekaasupäästöjä. Hehtaarikohtaiset päästöt kasvaisivat kuitenkin vain 4 % nykyiseen verrattuna.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Ruoantuotanto, maatalous, agroekologinen symbioosi (AES), kasvihuonekaasupäästöt, biokaasun tuotanto, typensitojanurmi, maitokarjatalous			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Juha Helenius ja Kari Koppelmäki			
Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited HELDA - Helsingin yliopiston digitaalinen arkisto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

ABSTRACT

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Agricultural Sciences
Tekijä – Författare – Author Ulrika Wikström		
Työn nimi – Arbetets titel – Title Reducing greenhouse gas emissions per food output and per hectare by increasing number of dairy cattle and adding biogas leys in cereal production focused area		
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Plant Production Sciences, Agroecology		
Työn laji – Arbetets art – Level Master's thesis	Aika – Datum – Month and year May 2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 64
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Currently agriculture faces several environmental sustainability challenges both at the global level and at the national level. Dependence on external inputs from chemical industry, biodiversity loss of agroecosystems and spatial separation of crop and livestock farms are examples of typical characteristics in current food production. Food production is also the largest source of greenhouse gas emissions in the food system. Emissions from the food system, in turn, are a significant part of total anthropogenic emissions both globally and nationally.</p> <p>Greenhouse gas emissions from food production are mainly caused by land use and its changes, livestock digestion, manure management, nitrogen fertilization and direct and indirect use of fossil fuels. However, these emissions can be partially compensated by increasing soil carbon stocks in arable land through agricultural practices and by enhancing the utilization of the energy of the side stream biomasses in agriculture.</p> <p>Agroecological symbiosis (AES) production model increases the energy and nutrient self-sufficiency of agriculture and food systems while reducing dependence of external inputs. Key functions of this production system are biogas production and cultivation of nitrogen fixation leys. Nitrogen fixation leys are also suitable for feed production in dairy farming. Increasing the number of dairy cattle is therefore a way to increase cultivation of nitrogen fixation leys and local food production in agricultural areas mainly focused on crop production.</p> <p>The aim of this study was to investigate the effects of a utilization of agroecological symbiosis and increasing number of dairy cattle on food output emissions and emissions per field hectare in agricultural area focused on crop production. The study was carried out as a greenhouse gas emission calculation based on emission factors and carbon balance estimates of arable land and was conducted for two modeled production systems. The first modeled system represented a typical crop production focused agricultural area in southern Finland and the second modeled system was a scenario made for the same agricultural area. In the scenario, agroecological symbiosis was applied to the area and the number of dairy cattle was increased.</p> <p>The results of the study showed that production system according to the scenario would reduce 57% greenhouse gas emissions of food protein output and 41% of food energy output in the modeled study area. Emissions per field hectare would not decrease in the scenario. However, those emissions per hectare would increase by only 4% compared to the current system.</p>		
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Food production, agriculture, agroecological symbiosis (AES), greenhouse gas emissions, biogas production, nitrogen fixation ley, dairy farming		
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Juha Helenius ja Kari Koppelmäki		
Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited HELDA - Digital Repository of the University of Helsinki		
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information		

SISÄLLYS

1. JOHDANTO.....	6
2. RUOKAJÄRJESTELMÄN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT.....	9
2.1 Päästöt ja niiden vähentäminen ruoantuotannossa.....	9
2.1.1 Hiilidioksidipäästöt.....	10
2.1.2 Metaanipäästöt.....	14
2.1.3 Dityppioksidipäästöt.....	14
2.2 Agroekologinen symbioosi.....	15
2.2.1 Elintarvikeketjun ekoteolliset symbioosit.....	15
2.2.2 Typensitojanurmien viljely.....	16
2.2.3 Biokaasun tuotanto maatalouden biomassoista.....	18
2.3 Maatalouden alueellinen tuotantorakenne Suomessa.....	19
2.3.1 Tuotantosuintien alueellinen eriytyminen.....	19
2.3.2 Alueellisen eriytyksen vaikutukset.....	19
3. TAVOITTEET.....	22
4. AINEISTO JA MENETELMÄT.....	23
4.1 Tuotantosysteemimallinnukset.....	23
4.2 Päästölähteiden ja päästösäästölähteiden rajaukset.....	25
4.3 Yksiköt.....	25
4.4 Viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöt ja päästösäästöt.....	25
4.4.1 Viljelymaiden hiilikadon hiilidioksidipäästöt ja hiilivaraston kasvun päästösäästöt.....	25
4.4.2 Dityppioksidipäästöt viljelymaiden orgaanisen aineksen hajoamisesta.....	27
4.5 Nautojen ruoansulatuksen metaanipäästöt.....	27
4.6 Typpilannoituksen kasvihuonekaasupäästöt.....	28
4.7 Biokaasuntuotannolla saavutettavat päästösäästöt.....	29

4.8 Uuden maidontuotantoinfrastruktuurin tuotantorakennus- ja materiaalipäästöt.....	29
4.9 Kasvihuonekaasupäästölaskennan epävarmuudet.....	30
4.10 Herkkyysanalyysi.....	31
5. TULOKSET.....	32
5.1 Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset.....	32
5.2 Herkkyysanalyysin tulokset.....	35
6. TULOSTEN TARKASTELU.....	40
6.1 Tuotoskohtaiset kasvihuonekaasupäästöt.....	41
6.2 Hehtaarikohtaiset kasvihuonekaasupäästöt.....	44
6.2.1 Systemien kokonaispäästöt ja kategoriakohtaiset päästöt.....	44
6.2.2 Päästöjen kompensointi skenaarioidussa tuotantosysteemissä	45
6.2.3 Päästökompensoinnin epävarmuudet ja ajallinen rajallisuus...	46
6.3 Erot tuotos- ja hehtaarikohtaisten päästöjen välillä.....	47
7. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	49
8. KIITOKSET.....	51
LÄHTEET.....	52

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on yksi keskeisesti tulevaisuuden ruokajärjestelmiin vaikuttavista megatrendeistä. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi yleisenä tavoitteena on ihmisen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen merkittävästi nykyisestä tasosta. Esimerkiksi globaalisti 4.11.2016 voimaan astuneessa ja Suomen hyväksymässä Pariisin ilmasopimuksessa on asetettu tavoitteeksi rajoittaa ilmaston lämpeneminen selvästi alle kahteen asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna ja pyrkiä toimiin 1,5 asteen tavoitteen saavuttamiseksi (YM 2019). Hallitusten välisen ilmastonmuutospaneelin IPCC:n julkaiseman 1,5 asteen erikoisraportin mukaan ilmaston lämpenemisen riskit ihmiskunnalle ovat pienemmät 1,5 asteen skenaariossa 2 asteen skenaarioon verrattuna (IPCC 2018). 1,5 asteen rajassa pysyminen olisi siis tärkeää haittavaikutusten minimoimiseksi.

Globaali ruokajärjestelmä aiheuttaa arviolta 21-37 % kaikista ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä (IPCC 2019) ja yli puolet muista ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasuista kuin hiilidioksidista (Smith ym. 2014). Ruokajärjestelmästä aiheutuvia kasvihuonekaasuja ovat hiilipitoiset hiilidioksidi (CO_2) ja metaani (CH_4) sekä typpipitoinen dityppioksidi (N_2O). Ruokajärjestelmän alkutuotannossa eli maataloudessa ja maatalouden aiheuttamissa maankäytön muutoksissa syntyy kaikkia näitä kasvihuonekaasuja, ja ne yhdessä aiheuttavat arviolta 16-27 % globaaleista ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä (IPCC 2019). Vastaavasti Suomessa maatalouden ja maatalouteen liittyvän maankäytön päästöt ovat yhteensä noin 20 % kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä (Regina ym. 2014).

Kasvihuonekaasupäästöistä hiilidioksidin merkitys ilmastonmuutosta edistävänä kasvihuonekaasuna on suurin, sillä sen osuus ilmakehän pitkällä aikavälillä lisääntyneestä kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttamasta säteilypakotteesta eli lämmitysvaikutuksesta on noin 80 prosenttia, ja sen elinikä ilmakehässä on pitkä (Butler ja Montzka 2019). Yhtä molekyyliä kohden tarkasteltuna metaani ja dityppioksidi ovat kuitenkin hiilidioksidia huomattavasti voimakkaampia kasvihuonekaasuja, niiden säteilypakotekerrointen ollessa

28 ja 265 kertaiset suhteessa hiilidioksidiin sadan vuoden aikahorisontilla tarkasteltuna (Myhre ym. 2013).

Ruokajärjestelmään liittyy ilmastovaikutusten lisäksi myös muita globaalisti merkittäviä ekologisen kestävyuden haasteita, joita voidaan kuvata esimerkiksi planeettarajatarkastelun avulla. Planeettarajatarkastelu mittaa tieteellisten analyysien avulla riskejä, jotka johtuvat ihmisen toiminnan aiheuttamasta maapallon ekosysteemin epätasapainosta ekologian eri osa-alueilla (Steffen ym. 2015). Tässä tarkastelussa korkeimmalle riskitasolle on arvioitu biosfäärin geneettisen monimuotoisuuden väheneminen sekä biosfäärille tärkeiden typen ja fosforin kierroissa tapahtuneet voimakkaat muutokset (Steffen ym. 2015). Lisäksi maaekosysteemien muutosten vaikutusten riskit ovat kasvussa (Steffen ym. 2015). Näillä haasteilla on selkeä yhteys ruokajärjestelmään. Nykyinen intensiivinen maataloustuotantotapa aiheuttaa huomattavan osan, noin puolet tai enemmän, eliöiden geneettisen monimuotoisuuden vähenemisestä ja kasvintuotannon kannalta tärkeiden makroravinteiden, typen ja fosforin kiertojen muutoksista sekä maaekosysteemien muutoksista.

Ruokajärjestelmiä on kehitettävä ekologisesti kestävämmiksi kaikkialla maailmassa. Ilmastovaikutusten osalta tämä edellyttää kasvihuonekaasupäästöjen määrän vähentämistä. Hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidipäästöjen vähentämiseksi on tunnistettava niiden päästölähteet ja –mekanismit ja löydettävä keinot päästöjen vähentämiseksi eri toiminnoissa. Tämä edellyttää hiilen ja typen kiertojen tuntemista maatalousekosysteemeissä. Tärkeä keino maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä onkin hiilen ja typen virtojen tehokkaampi hallinta (Smith ym. 2008).

Ekologisesti kestävien maataloustuotantosysteemien ja ruokajärjestelmien kehittämisessä on ilmastovaikutusten lisäksi huomioitava esimerkiksi ravinteiden käytön ja kierron vaikutukset sekä huolehdittava monimuotoisuuden ylläpitämisestä ja lisäämisestä. Ruokajärjestelmien uusien ratkaisujen tulisi siis keskittyä monihyötyisiin ratkaisuihin ja kestävään tehokkuuteen. Näin ruokajärjestelmiä ja maataloustuotantosysteemejä voidaan kehittää kohti kokonaisvaltaista ekologista kestävyyttä ja muita esimerkiksi Yhdistyneiden kansakuntien asettamia (UN 2015) kestävyuden tavoitteita.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää mallinnustutkimuksen avulla agroekologisen symbioosin soveltamisen ja maitokarjatalouden lisäämisen vaikutuksia kasvintuotantovaltaisen maatalousalueen ruokatuotos- ja hehtaarikohtaisiin kasvihuonekaasupäästöihin Suomessa.

2. RUOKAJÄRJESTELMÄN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT

2.1 Päästöt ja niiden vähentäminen ruoantuotannossa

Ruokajärjestelmällä tarkoitetaan systeemiä, joka kattaa kaikki ihmiskunnan ruoan tuotannon ja kulutuksen toiminnot, sisältäen ruoka-aineiden alkutuotannon, keruun, korjuun tai saalistuksen, niiden jalostamisen elintarvikkeiksi, kuljetukset eri vaiheissa, markkinoimisen, kuluttamisen, jätehuollon ja kierrätyksen, näihin liittyvän panostuotannon ja -kulutuksen, sekä eri vaiheisiin liittyvän julkisen hallinnoinnin, valvonnan ja säätelyn. Tässä tutkimuksessa keskitytään erityisesti ruoantuotannon suoriin ja epäsuoriin kasvihuonekaasupäästöihin, joita ovat esimerkiksi maatalouden suorat kasvihuonekaasupäästöt, maatalouden maankäytön päästöt sekä tuotantopanostuotannon päästöt. Lisäksi käsitellään myös maatalouden mahdollisuuksia bioenergian tuotantoon ja sen mahdollisuuksia lisätä erityisesti ruoantuotannon, jalostuksen ja eri vaiheiden kuljetusten energiaomavaraisuutta ja siten myös vähentää järjestelmän energiankäytön kasvihuonekaasupäästöjä.

Ruokajärjestelmän kasvihuonekaasupäästöt kattavat maatalouden tuotantopanostuotannon, maatalouden maankäytön, maatalouden (esimerkiksi kotieläintuotannon ja typpilannoituksen), maatalouden energiankäytön sekä järjestelmän muiden toimintojen, kuten prosessoinnin, kuljetuksen ja varastoinnin pääasiallisesti energiankäytöstä aiheutuvat päästöt. Globaalisti ruokajärjestelmän aiheuttamaksi kasvihuonekaasupäästöjen osuudeksi on arvioitu 21-37% kaikista ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä, perustuen vuosien 2007-2016 päästöarvioihin (IPCC 2019). Arvio sisältää myös ruoan menetysten sekä ruokahävikin aiheuttamat päästöt, joiden arvioidaan olevan 8-10% ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä (IPCC 2019). Maatalouden ja uuden maatalousmaan käyttöönoton aiheuttamat päästöt ovat arviolta 16-27 % kaikista ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä ja siten merkittävä osa ruokajärjestelmän kokonaispäästöistä (IPCC 2019). Vastaavasti Suomessa maatalouden ja maatalouteen liittyvän maankäytön päästöt ovat yhteensä noin 20 % kansallisista kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä (Regina ym. 2014).

Ruokajärjestelmän ja maatalouden globaaleissa kokonaispäästöarvioissa ei kuitenkaan ole huomioitu maatalousmaiden hiilivarastojen muutoksien vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin niiltä mailta, joiden maankäyttö pysyy muuttumattomana (IPCC 2019). Maankäytön muutoksien päästöt kattavat siis nimensä mukaisesti vain tarkasteltavana ajankohtana tapahtuneet muutokset aiemmasta (usein metsämaasta tai kosteikoista) maankäytöstä maatalouden maankäyttöön eli laitumiksi ja pelloiksi. Kuitenkin viime vuosina on yhä laajemmin kiinnitetty huomiota siihen, että maatalousmaat voivat sopivin tuotantomenetelmin myös sitoa jonkin verran hiiltä ilmakehästä takaisin hiilivarastoihinsa (Lal 2004a, Lal 2004b, Stockmann ym. 2013). Maatalousmaiden hiilivarastoja kasvattavilla tuotantomenetelmillä on siis mahdollista kompensoida historiallisten maankäytön muutoksien aiheuttamaa päästäakkaa.

2.1.1 Hiilidioksidipäästöt

Ruokajärjestelmän hiilidioksidipäästöt aiheutuvat pääasiassa maankäytöstä ja lisäksi energiankäytöstä. Maatalouden hallussa oleva maapinta-ala kattaa nykyisin noin 37 % maapallon maapinta-alasta (FAO 2019). Suurin osa tästä alasta on viimeisen 300 vuoden aikana metsistä raivattua tai luontaisilta ruohoalueilta käyttöön otettua maatalousmaata (Janzen 2004), eli ihminen on muuttanut maankäyttöä suurella osalla maapallon maapinta-alasta. Maankäytön muutoksien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt johtuvat luontaisen kasvillisuuden tuhoamisesta esimerkiksi polttamalla ja maaperän hiilivarastojen pienene- misestä (Guillou ja Matheron 2014). Nämä muutokset ovat vapauttaneet ilmakehään yhteensä arviolta 214 ± 67 Pg hiiltä, josta arviolta 78 ± 12 Pg on maaperän hiilivarastoista vapautunutta hiiltä (Zomer ym. 2017).

Maaperän hiilivarastojen pienenemistä aiheuttavat maaperän fysikaalisen häirinnän myötä lisääntyvä orgaanisen aineksen hajotus, häirinnän ja kasvillisuuden muutoksien myötä lisääntyvä eroosio sekä kasvillisuuden muutoksien ja sadonkorjuun aiheuttama maaperään kohdistuvan hiilisyötteen pieneneminen (Janzen 2004, Smith ym. 2016). Hiilivarastoista ilmakehään hajotuksen myötä vapautuva hiilimäärä on erityisen suuri maatalouskäyttöön otetuilla orgaanisilla mailla, kuten turvemailla, johtuen niiden suuresta hajotukselle altistuvasta hiilimäärästä (Smith ym. 2016). Maankäytön muutoksien jälkeen maatalousmaiden hiilivarastot pienenevät, kunnes maaperän hiilipitoisuus asettuu vallit-

sevan maankäyttömuodon ja olosuhteiden määrittämään tasapainotilaan. Tasapainotilassa hajotuksen ja eroosion myötä maaperän hiilivarastosta poistuva hiilimäärä ja maaperään varastoituva hiilimäärä eli hiilen sisään- ja ulosvirtaukset vastaavat toisiaan ja hiilivarasto pysyy muuttumattomana (Fearnside ja Barbosa 1998).

Uusista maankäytön muutoksista aiheutuvia päästöjä lukuun ottamatta maatalouden maankäytön hiilidioksidipäästöistä ei ole saatavilla globaalia arviota (IPCC 2019). Maankäyttömuotojen vaikutuksia hiilen varastoitumiseen ja vapautumiseen kuitenkin tunnetaan, ja esimerkiksi kaikissa Euroopan maissa viljelymaat ovat ilmakehään päätyvän hiilidioksidin nettolähteitä (Janssens ym. 2005). Viljelymaiden toimiminen hiilidioksidin päästölähteinä viittaakin maankäytön muutoksien seurauksena tapahtuvaan hiilivaraston pienenemiseen myös pitkäaikaisilla viljelymailla (Smith ym. 2005). Suomessa kivennäismaiden orgaanisen hiilen vuosittaisen kadon on arvioitu olevan 220 kg C/ha/a yksivuotisten kasvien viljelyssä (Heikkinen ym. 2013). Vastaavasti orgaanisilla mailla hiilikadon on arvioitu olevan yksivuotisten kasvien viljelyssä 2100-8300 kg C/ha/a ja nurmiviljelyssä 790-7500 kg/ha eli huomattavasti enemmän kuin kivennäismailla (Maljanen ym. 2007).

Ruokajärjestelmän energiankäytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt muodostuvat fossiilisen energianlähteiden käytöstä. Maataloudessa energiankäytön päästöt ovat alle 10% suorista kasvihuonekaasupäästöistä, joihin ei ole huomioitu maankäytön hiilidioksidipäästöjä (Guillou ja Matheron 2014). Ruokajärjestelmän muilla tasoilla päästöt sen sijaan koostuvat lähes kokonaan energiankäytön hiilidioksidipäästöistä (Garnett 2011, Vermeulen ym. 2012). Fossiilisen energiankäytön päästöjä aiheuttavat lannoitteiden valmistus, maatalouden suora energiankäyttö sekä järjestelmän muut toiminnot, kuten kuljetukset eri vaiheissa ja elintarvikkeiden valmistus (Garnett 2011). Ruokajärjestelmän energiankäytöstä aiheutuvat päästöt ovat arviolta 6-13% ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä (IPCC 2019).

Maatalouden hiilidioksidipäästöjen tärkeimpiin vähentämiskeinoihin kuuluvat olemassa olevien hiilivarastojen säilyttäminen maaperässä ja kasvillisuudessa sekä ilmakehän hiilidioksidin sitominen maaperän hiilivarastoihin (Smith ym. 2016). Olemassa olevia hiilivarastoja voidaan säilyttää välttämällä hiilen vapautumista edistäviä maankäytön muutoksia, kuten metsien ja pysyvien nurmien muuttamista viljelymaiksi (Guo ja Gifford

2002, Janssens ym. 2005, Poeplau ym. 2011) ja saman maankäyttömuodon sisällä muuttamalla vallitsevia käytäntöjä maatalousmaiden hiilivarastoja säilyttäväksi. Maankäytön muutoksien välttäminen koskee kuitenkin vain uuden maatalousmaan käyttöönottoa, eikä ole keino vähentää olemassa olevan maataloustuotannon päästöjä. Tästä syystä maaperän hiilivarastojen kasvattamisella on suurempi rooli jo olemassa olevien maatalousmaiden päästöjen kannalta.

Globaalisti maaperän hiilivarastojen kasvattamisella on suuri ilmastonmuutoksen hillintäpotentiaali (Smith 2012). Smith (2012) arvioi hiilen varastoinnin olevan hyvä keino erityisesti lyhyen ja keskipitkän aikavälin ilmastonmuutoksen hillintätavoitteiden saavuttamiseksi. Myös Lal (2004a) korostaa maaperän ja kasvillisuuden hiilivarastojen kasvattamisen olevan hyvä ja tehokas keino kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiselle muutamien vuosikymmenten ajan, mutta ei sen pidemmällä aikavälillä. Tämä arvio perustuu viljelymaiden hiilivarastojen rajalliseen kasvukapasiteettiin. Esimerkiksi Zomer ym. (2017) esittävät kuitenkin raportissaan globaalin arvion, jonka mukaan viljelymaihin voitaisiin kahdenkymmenen vuoden ajan sitoa vuosittain 0,9-1,85 Pg hiiltä. Samankaltaisen arvion 0,4-1,2 Pg vuosittaisesta hiilen varastoitumispotentiaalista viljelymaille on esittänyt myös Lal (2004b). Paustianin ym. (2016) mukaan vastaava potentiaali vaihtelee 1,5-5,3 Pg välillä riippuen taloudellisista tekijöistä. Euroopan viljelymailla vuosittaisen hiilen varastoitumispotentiaalin on arvioitu olevan 0,11-0,42 Pg väliltä (Aertsens ym. 2013, Zomer ym. 2017).

Hiilen varastoitumista maaperän hiilivarastoihin voidaan lisätä hiilivarastoja vapauttaviin muutoksiin nähden käänteisillä maankäytön muutoksilla, kuten maatalousmaan metsittämisellä (Guo ja Gifford 2002, Poeplau ym. 2011). Näiden muutosten toteuttaminen kuitenkin vähentää käytettävissä olevaa maatalousmaata, joten ne ovat potentiaalisimpia keinoja heikkotuottoisilla tai todella päästöintensiivisillä mailla. Hiilivarastoa voidaan kuitenkin kasvattaa maatalousmailla myös maankäyttömuotoa muuttamatta, toteuttamalla hiilen varastoitumista edistäviä viljelykäytäntöjä (Lal 2004a, Lal 2004b, Smith 2012).

Hiilen varastoitumista edistävässä viljelyssä pyritään lisäämään maaperään kohdistuvaa hiilisyötettä tai vähentämään maaperän orgaanisen aineksen hajoamista edistäviä viljelykäytäntöjä, usein molempia. Esimerkiksi monivuotisten nurmien viljelyssä nämä mo-

lemmat hiilen varastoitumista edistävät tekijät toteutuvat, ja nurmien viljelyn onkin yleisesti osoitettu olevan potentiaalinen keino kasvattaa maatalousmaiden hiilivarastoa yksivuotisten viljelykasvien viljelyyn verrattuna (Conant ym. 2001, Soussana ym. 2004, Kätterer ym. 2004, Smith ym. 2005, Müller-Stöver ym. 2011).

Muita hiilen varastoitumista maaperään edistäviä käytäntöjä viljelymailla ovat esimerkiksi maan muokkauksen vähentäminen tai minimoiminen, kasvintähteiden korjuun välttäminen, kerääjäkasvien kasvattaminen viljelykasvien ohella, viljelykiertojen parantaminen, peltometsäviljely sekä lannan tai muiden hiiltä sisältävien maanparannusaineiden lisääminen maaperään (Lal 2004a, Lal 2004b, Smith ym. 2005, Smith ym. 2008, Paustian ym. 2016). Kaiken kaikkiaan viljelymaiden hiilivarastojen kasvattaminen on monihyötyinen ja erityisesti myös tuotantoa hyödyttävä tapa maatalouden hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi (Lal 2007), ja sen tavoittelu on järkevää ruokajärjestelmien kokonaisvaltaista kestävyyttä ajatellen.

Maaperän hiilivarastojen kasvattaminen viljelykäytäntöjen avulla on kuitenkin mahdollista vain kivennäismailla. Orgaanisten maatalousmaiden orgaanisen hiilen pitoisuus maaperässä on niin suuri, ettei viljelyn tuomalla hiilisyötteellä voida kompensoida maaperän hajoavasta orgaanisesta aineksestä ilmakehään vapautuvaa hiilimäärää. Orgaanisilakin mailla päästöjä voidaan kuitenkin vähentää esimerkiksi vaihtamalla yksivuotisten kasvien viljelyä nurmiviljelyyn ja nostamalla pohjaveden pinnan tasoa esimerkiksi sääntösalaajituksen avulla (Regina ym. 2014). Tasapainotilaa maaperän hiilen sisään- ja ulosvirtausten välillä ei kuitenkaan näillä viljelykäytännöillä saavuteta.

Ruokajärjestelmän energiankäytöstä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää kaikilla järjestelmän tasoilla korvaamalla fossiilista energiaa bioenergialla tai muilla uusiutuvilla ja mahdollisimman vähäpäästöisillä energiamuodoilla. Lisäksi energiaintensiivisten tuotantopanosten tai menetelmien korvaaminen vähemmän energiaa vaativilla panoksilla tai menetelmillä on mahdollisuus hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Esimerkkinä toimii esimerkiksi kemianteollisten typpilannoitteiden korvaaminen biologisella typensidonnalla (Crews ja Peoples 2004) tai sellaisilla kierrätyslannoitteilla, joiden elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt ovat kemianteollisia mineraalilannoitteita vähäisempiä (Kytä 2019).

2.1.2 Metaanipäästöt

Globaalisti maatalouden osuus ihmisen aiheuttamista metaanipäästöistä on 44 % (Van Dingenen ym. 2018). Merkittävimpiä maatalouden metaanipäästöjen lähteitä ovat märehitjoiden ruoansulatus, kotieläinten lanta sekä riisiviljelmät (Mosier ym. 1998, Guillou ja Matheron 2014). Kaiken kaikkiaan metaanipäästöt ovat noin puolet maatalouden suorista kasvihuonekaasupäästöistä, joihin ei ole huomioitu maankäytön hiilidioksidipäästöjä (Guillou ja Matheron 2014). Nämä metaanipäästöt muodostuvat orgaanisen aineksen hajotusreaktioissa hapettomissa olosuhteissa (Mosier ym. 1998). Metaania muodostavissa hajotusreaktioissa biomassaan fotosynteesissä hiilidioksidista sitoutunut hiili vapautuu siis ilmakehään hiilidioksidia 28 kertaa voimakkaampana kasvihuonekaasuna, ilmakehän säteilypakotetta voimistaen.

Suomessa maatalouden metaanipäästöt aiheutuvat märehitjoiden ruoansulatuksesta ja kotieläinten lannankäsittelystä. Nämä päästöt ovat yhteensä noin 14% Suomen maatalouden päästöistä maankäytön päästöt mukaan luettuina ja energiankäytön päästöt pois luettuina (Regina ym. 2014).

2.1.3 Dityppioksidipäästöt

Maatalouden dityppioksidipäästöt kattavat globaalisti noin 40% kaikista maatalouden suorista kasvihuonekaasupäästöistä, joihin ei ole huomioitu maankäytön hiilidioksidipäästöjä (Guillou ja Matheron 2014). Globaalisti maatalous aiheuttaa noin 60% kaikista ihmisen aiheuttamista dityppioksidipäästöistä (Reay ym. 2012). Maatalouden dityppioksidipäästöt vapautuvat ilmakehään mikrobien nitrifikaatio- ja denitrifikaatioprosessien seurauksena.

Suoria dityppioksidipäästöjä vapautuu maaperästä ja lannankäsittelystä (Wang ym. 2011, Regina ym. 2014). Maaperästä vapautuvaa dityppioksidia muodostuu kaikesta maahan lisäystä tpeystä, esimerkiksi mineraalilannoitteista ja lannasta, typensitojakasvien sitomasta tpeystä, maanpäällisten ja -alaisten kasvintähteiden hajotessa sekä maaperän orgaanisen aineksen hajotessa (Regina ym. 2014). Maaperän orgaanista ainesta hajoaa huomattavasti enemmän eloperäisillä viljelymailla kuin kivennäismailla, ja näin ollen myös viljelyn aiheuttamat maaperän dityppioksidipäästöt ovat suurempia eloperäisillä mailla.

Suomessa maatalouden suorat dityppioksidipäästöt lannankäsittelystä ja maaperästä ovat noin 31 % kaikista Suomen maatalouden suorista päästöistä maankäytön päästöt mukaan luettuina ja energiankäytön päästöt pois luettuina (Regina ym. 2014).

Suorien dityppioksidipäästöjen lisäksi maataloudesta aiheutuu epäsuoria dityppioksidipäästöjä typen huuhtoutumien ja valumien myötä (Wang ym. 2011). Koko ruokajärjestelmän epäsuoriin dityppidioksidipäästöihin kuuluvat myös mineraalityppilannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat dityppioksidipäästöt (Vermeulen ym. 2012). Kyseiset päästöt lasketaan kuitenkin lannoitteiden valmistuksen erillisiin päästöihin, eikä niitä tyypillisesti huomioida maatalouden päästölaskennassa.

Dityppioksidipäästöjä voidaan maataloudessa vähentää typen käyttöä tehostamalla (Reay ym. 2012). Typen käyttöä voidaan tehostaa mahdollisesti useilla erilaisilla menetelmillä, kuten lannoituksen ajoituksen, määrän ja kohdentamisen täsmentämisellä (Regina ym. 2014). Myös maankäyttöön liittyvillä toimilla voidaan vähentää dityppioksidipäästöjä. Maaperän orgaanisen aineksen hajotessa orgaanisen aineksen sisältämää typpeä mineralisoituu ja samalla muodostuu dityppioksidia. Näin ollen maaperän hiilivarastojen pienehkömisen vähentäminen ja pysäyttäminen ovat keinoja vähentää myös dityppioksidipäästöjä.

2.2 Agroekologinen symbioosi

2.2.1 Elintarvikeketjun ekoteolliset symbioosit

Agroekologinen symbioosi (AES) on kokonaisvaltaiseen kestäväyteen pyrkivä ruokajärjestelmän toimintamalli ja esimerkki elintarvikeketjun ekoteollisesta symbioosista (Koppelmäki ym. 2016, Helenius ym. 2017). Elintarvikeketjun ekoteollisessa symbioosissa ruoantuotannon toimijat ja muut ruokajärjestelmän toimijat, kuten ruoan jalostus- ja jakelutoimijat muodostavat teollisen symbioosin. Agroekologisen symbioosin taustalla on agroekologian soveltaminen teollisen symbioosin yleiseen malliin (Chertow 2000, Helenius ym. 2017). Agroekologia tieteenalana tutkii maataloutta ekosysteeminä, ja käytännön tasolla agroekologiassa lähtökohtana on suunnitella ja hoitaa maatalousekosysteemejä ekologisesti kestäväillä tavoilla (Castree ym. 2013). Teollisen symbioosin ajatuksena

puolestaan on saavuttaa hyötyjä erilaisten yhteistyössä toimivien ja maantieteellisesti läheisten teollisuuden toimijoiden välisellä ainevirtojen kierrätyksellä ja hukkaenergiavirtojen minimoimisella (Chertow 2000). Näin ollen myös agroekologinen symbioosi perustuu ruokajärjestelmän toimijoiden paikallisuuteen ja sen mahdollistamaan paikalliseen toimijoiden väliseen ravinnekiertoon sekä toimijoiden sivuvirtabiomassoista tuotetun bioenergian hyödyntämiseen järjestelmässä (Helenius ym. 2017).

Agroekologinen symbioosin toimintamalli on kehitetty Suomessa, Helsingin yliopiston maataloustieteiden osaston johtamassa hankkeessa *Ravinne- ja energiaomavaraisen lähiruuan tuotanto – Palopuron agroekologinen symbioosi* (Helenius ym. 2017). Palopuron agroekologinen symbioosi on toimintamallin pilotti ja symbioosin toimijoita ovat muun muassa vilja-, öljy- ja valkuaiskasveja tuottava luomutila, luomu-munituskanala, luomuvihannestila, luomuleipomo sekä biokaasua tuottava yritys (Koppelmäki ym. 2016, Helenius ym. 2017). Lisäksi symbioosi hyödyntää toiminnoissaan esimerkiksi lähialueen hevostilojen tuottamaa lantaa (Koppelmäki ym. 2016, Helenius ym. 2017).

Symbioosin ravinne- ja energiaomavaraisuuden kannalta keskeisiä toimintoja ovat typensitojakasveihin perustuvien viherlannoitusnurmien viljely sekä biokaasun tuotanto (Koppelmäki ym. 2019a). Biokaasuntuotanto tapahtuu kuivamädätyslaitoksessa symbioosin sivuvirtabiomassoista eli viherlannoitusnurmien nurmibiomassasta sekä kanan- ja hevosennannasta (Helenius ym. 2017). Biokaasulaitoksen biokaasua käytetään symbioosin toimintojen energiatarpeisiin sekä liikennepolttoaineena ja prosessin ravinnepitoista mädätettä peltoviljelyn lannoitteena (Koppelmäki ym. 2016, Helenius ym. 2017).

2.2.1 Typensitojanurmien viljely

Typensitojakasveihin perustuvien monivuotisten nurmien viljely on agroekologisen symbioosin toimintamallissa keskeinen toiminto. Typensitojanurmien typensitojakasvit, kuten apilat, sitovat symbiootisten typensitojabakteeriensa avulla ilmakehän N_2 -muotoista typpeä kasveille käyttökelpoiseksi ammoniumtypeksi (NH_3) (Wagner 2011). Tämä biologinen typensidonta on potentiaalinen keino korvata teollisten mineraalityypilannoitteiden käyttöä (Crews & Peoples 2004), ja siihen perustuvat viherlannoitusnurmet ovat yleinen käytäntö peltojen ravinteikkuuden ylläpitoon esimerkiksi kasvinviljelyyn erikoistuneilla luomutiloilla (Frøseth ym. 2014). Suomessa biologisen typensidonnan on arvioitu

voivan korvata 60% teollisten mineraalityypilannoitteiden käytöstä, mikä samalla vähentäisi huomattavan määrän typpilannoituksesta aiheutuvia fossiilisen energian päästöjä (Känkänen ym. 2013). Tämä toteutuisi, mikäli typensidontaa toteutettaisiin rehunurmilla sekä hyödynnettäisiin viherlannoitusnurmia, aluskasveja sekä palkoviljojen täysmittaista viljelyä (Känkänen ym. 2013).

Monivuotisia viherlannoitusnurmia sisältävien viljelykiertojen avulla voidaan typensidontan lisäksi saavuttaa myös muita etuja ja hyötyjä yksipuoliseen yksivuotisiin kasveihin perustuvaan viljelykiertoon verrattuna. Maataloustuotannon kasvihuonekaasupäästöjen kannalta tärkeä etu on monivuotisten nurmien, erityisesti nurmipalkokasveja sisältävien monivuotisten nurmien potentiaali maaperän hiilivaraston kasvattamisessa (Conant ym. 2001, Soussana ym. 2004, Kätterer ym. 2004, Smith ym. 2005, Müller-Stöver ym. 2011). Maaperän hiilivaraston kasvattamisella on kuitenkin ilmastohyötyjen lisäksi paljon muitakin hyötyjä.

Maaperän orgaanisen aineksen lisääntyminen muun muassa parantaa maan rakennetta, lisää maaperän tuottavuutta, parantaa ravinteiden käytön tehokkuutta ja maan vedenpidätyskykyä sekä vähentää eroosioherkkyyttä (Lal 2007). Kaikki ominaisuudet liittyvät maan kasvukuntoon. Nurmien avulla saavutetaan siis myös tuotannollisia hyötyjä maan kasvukunnon parantumisen ja biologisen aktiivisuuden lisääntymisen myötä (Cherr ym. 2006, Lal 2007, Riley ym. 2008, Müller-Stöver ym. 2011). Lisäksi hyötyjä voidaan saavuttaa esimerkiksi rikkakasvien ja kasvintuhoojien hallintaan liittyen (Cherr ym. 2006).

Märehtiviin eläimiin perustuvassa kotieläintuotannossa, kuten maidontuotannossa typensitojanurmia voidaan viljellä rehukäyttöön. Esimerkiksi puna-apila (*Trifolium pratense*) on Pohjois-Euroopassa erityisesti luomutuotannossa yleisesti käytetty ja märehtijöille soveltuva rehukasvi (Vanhatalo ym. 2009, Halmemies-Bauchet-Filleau ym. 2014). Sillä on kuitenkin kasvavaa potentiaalia yleistyä myös tavanomaisen tuotannon rehukasvina (Vanhatalo ym. 2009, Halmemies-Bauchet-Filleau ym. 2014).

2.2.2 Biokaasun tuotanto maatalouden biomassoista

Maataloustuotantoon ja siihen paikallisesti kytkeytyneeseen ruokajärjestelmään yhdistetyllä bioenergian tuotannolla on potentiaalia saavuttaa maataloustuotannon energiaomavaraisuus ja vähintäänkin lisätä koko paikallisen ruokajärjestelmän energiaomavaraisuutta huomattavasti (Helenius ym. 2017). Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen ja energiatehokkuuden kannalta biokaasutuotanto maataloustuotannon yhteydessä on tehokas menetelmä bioenergian tuottamiseksi (Jungmeier ja Spitzer 2001), ja erityisesti siinä voidaan monitavoitteisesti hyödyntää apilanurmia (Tuomisto ja Helenius 2008).

Maatalouden biomassat, kuten lanta, nurmibiomassa sekä ruokajärjestelmän prosesseissa syntyvät muut sivuvirrat ovat biokaasuntuotantoon hyvin soveltuvia raaka-aineita (ProAgria, Motiva 2013, Seppälä ym. 2014). Agroekologisissa symbiooseissa biokaasun pääasiallisina raaka-aineina käytetään typensitojanurmilta korjattua nurmibiomassaa sekä symbioosiin kuuluvien tilojen tuotantosuunnista riippuen erilaisia lantoja. Kotieläintiloilla biokaasutuotantoon käytettävää nurmibiomassaa saadaan rehunurmien ylijäämäisestä tuotannosta. Raaka-aineet ovat siis symbioosissa syntyviä sivuvirtabiomassoja.

Biokaasutuotannossa sivuvirtabiomassojen energia saadaan hyötykäyttöön toisin kuin vallitsevissa käytännöissä. Esimerkiksi kasvinviljelytiloilla viherlannoitusnurmien vallitsevissa viljelykäytännöissä kasvustoa ei korjata vaan jätetään maahan ja kynnetään lopuksi maaperään. Kyseisessä käytännössä kasvuston sisältämä energia hukkaantuu ja riski typen huuhtoutumiselle ja kaasumaisille päästöille kasvaa biomassan hajotessa ja ravinteiden vapautuessa viljelykasvien tarpeisiin nähden liian aikaisin (Askegaard ym. 2005, Tuomisto & Helenius 2008, Stinner ym. 2008). Viherlannoitusnurmien biomassan hyödyntäminen biokaasutuotannossa ja ravinteiden palautus viljelykäyttöön mädätteessä on kaiken kaikkiaan lannoitusarvoltaan vallitsevaa viherlannoituskäytäntöä parempi käytäntö (Stinner ym. 2008). Joitain potentiaalisia lannoituksellisia hyötyjä kasvinviljelyssä, verrattuna raakalannan käyttöön, voidaan saavuttaa myös lantojen mädätyksellä (Möller ja Müller 2012). Näin ollen myös ravinteiden, erityisesti typen, kierron ja käytön tehokkuutta voidaan parantaa biokaasutuotannon avulla.

2.3 Maatalouden alueellinen tuotantorakenne Suomessa

2.3.1 Tuotantosuuntien alueellinen eriytyminen

Suomessa maatalouden tuotantosuunnat ovat viimeisten vuosikymmenien aikana eriytyneet alueellisesti toisistaan ja yksittäiset maatilat ovat erikoistuneet tyypillisesti joko kasvintuotantoon tai kotieläintuotantoon. Tuotantosuuntien eriytymisen taustalla ovat vaikuttaneet Suomen eri maatalousalueiden luonnonoloista johtuvat mahdollisuudet ja rajoitteet sekä historialliset, taloudelliset ja maatalouspoliittiset tekijät (Voutilainen ym. 2012). Suomessa maatilojen yleisimmät tuotantosuunnat ovat kasvinviljely ja nautakarjatalous (Luke 2018). Nautakarjataloudessa yleisin tuotantosuunta on maidontuotanto (Luke 2018). Nämä yleisimmät tuotantosuunnat ovat maantieteellisesti keskittyneet eri puolille Suomea. Kasvinviljely on keskittynyt voimakkaimmin eteläiseen ja läntiseen Suomeen ja nautakarjatalous puolestaan itäiseen ja pohjoiseen Suomeen (Voutilainen ym. 2012).

Luken (2018) tilastotietoihin perustuen vuonna 2018 esimerkiksi eteläisessä Suomessa Uudenmaan maakunnassa 81 % alueen maatalous- ja puutarhayrityksistä oli suuntautunut peltoviljelyyn perustuvaan kasvintuotantoon ja vain 7 % maidontuotantoon tai naudanlihan tuotantoon. Samankaltainen jakauma kasvintuotannon ja nautakarjatuotannon välillä vallitsee myös Varsinais-Suomessa, jossa vastaavat luvut ovat 75 % ja 5 %. Pohjoisemmassa Suomessa Pohjois-Savon maakunnassa ja Pohjois-Pohjanmaalla hieman yli puolet maatalous- ja puutarhayrityksistä on suuntautunut kasvintuotantoon ja maidontuotantoon tai naudanlihantuotantoon 37 % ja 32 %.

2.3.2 Alueellisen eriytymisen vaikutukset

Tuotantosuuntien alueellinen eriytyminen ja maatilojen erikoistuminen joko kasvintuotantoon tai kotieläintuotantoon on vaikuttanut maataloudessa muun muassa peltojen maankäyttöön ja ravinteiden kiertoihin. Erityisesti nautakarjatalouden ja kasvintuotannon eriytyminen toisistaan on johtanut monokulttuurisen viljelyn yleistymiseen kasvintuotantoon keskittyneillä alueilla (Heikkinen ym. 2013). Monokulttuurinen yksivuotisten kasvien viljely puolestaan on johtanut esimerkiksi peltojen orgaanisen aineksen pitoisuuden vähenemiseen ja siitä aiheutuvaan kasvukunnon heikkenemiseen (Heikkinen ym. 2013).

Nautakarjatalouden voimakas keskittyminen tietyille alueille on osaltaan vaikuttanut myös viime vuosikymmeninä tapahtuneeseen uuden pellon raivaukseen Suomessa. 2000-luvulla raivatusta uudesta pellostasta yhteensä 60 % on raivattu nautakarjatalouden tarpeisiin voimakkaasti nautakarjatalouteen keskittyneillä alueilla (Niskanen ja Lehtonen 2014). Yksivuotisten kasvien viljelyn yleistyminen ja siitä aiheutuva peltojen orgaanisen aineksen hajoaminen ja uuden maatalousmaan raivaamisesta ja viljelystä seuraava maaperän orgaanisen aineksen hajoaminen tuottavat molemmat kasvihuonekaasupäästöjä ilmakehään.

Maatalouden ravinnekierto on voimakkaasti sidoksissa kotieläintuotantoon. Kotieläintuotannon alueellisen keskittymisen myötä myös lannan käyttö on Suomessa keskittynyt vain tietyille viljelyalueille, kasvintuotannon lannoitetarpeen ja vesiensuojelun kannalta epäoptimaalisella tavalla (Ylivainio ym. 2014). Erityisesti vuosittain kotieläinten lantaan erittyvän fosforin määrä on Suomessa niin suuri, että se riittäisi optimaalisesti jaettuna kattamaan koko maan kasvintuotannon vaatiman pelloille lisättävän fosforin tarpeen (Turtola ja Ylivainio 2009, Ylivainio ym. 2014). Erityisesti rehuravinteiden nettotuonti Suomeen on merkittävä osa kotieläintuotannon keskittymiin suuntautuvaa ravinneylijäämää (Parviainen ja Helenius 2020). Nykyisillä käytössä olevilla tekniikoilla lantafosforin kuljettaminen pois sen syntysijoilta on kuitenkin taloudellisesti kannattamatonta, ja lannan sisältämiä ravinteita käytetään tietyillä alueilla, tiloilla ja pelloilla kasvintuotannon tarpeisiin nähden ylimäärin (Ylivainio ym. 2014). Fosforin käyttöä olisi siis Suomessa mahdollista tehostaa, mikäli fosforin dislokaatio rehuntuotantoalueilta kotieläintuotannon alueille voitaisiin pysäyttää, ja kotieläintuotannossa syntyvä lantafosfori pystyttäisiin hyödyntämään optimaalisella tavalla ja teollisten fosforilannoitteiden käyttö samalla vähenisi.

Maatalouden vesistökuormituksen kannalta alueellisesti keskittynyt kotieläintuotanto ja sen vaikutukset maatalouden ravinnekiertoon ja ravinteiden käyttöön ovat ongelmallisia. Esimerkiksi suomalaisten maitotilojen typen ja fosforin porttitaseet ovat tyypillisesti selvästi ylijäämäisiä (Turtola ja Ylivainio 2009). Maatilojen ylijäämäiset ravinnetaseet lisäävät riskiä maatalouden vesistökuormitukselle, sillä peltoihin kertyvät ylijäämäiset ravinteet ovat alttiita huuhtoutumiselle (Turtola ja Ylivainio 2009). Pitkällä aikavälillä maatalouden vesistökuormituksen vähentäminen edellyttääkin tilojen ravinneylijäämien vä-

hentämistä ja kotieläintuotannossa syntyvän lannan hyödyntämistä myös kasvintuotantoon erikoistuneiden tilojen lannoitustarpeisiin (Uusitalo ym. 2007, Turtola ja Ylivaino 2009). Ravinteiden käytön ja kierron tehokkuuden sekä vesiensuojelun kannalta kotieläintuotannon tasaisempi alueellinen jakautuminen ja integroituminen kasvintuotannon kanssa olisi siis nykyiseen alueellisesti keskittyneeseen rakenteeseen verrattuna suotuisampi.

3. TAVOITTEET

Työn tavoitteena oli selvittää argoekologisen symbioosin mallia noudattavan maataloustuotantosysteemin mahdollisuuksia ruokatuotos- ja hehtaarikohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen Suomessa. Erityisesti tavoitteena oli arvioida skenaariota, jossa kasvintuotantovaltaisen maatalousalueen rakenne muuttuisi maitokarjatalouden yhdistelmätuotannon suuntaan. Tuotantosysteemin skenaarioinnin lähtökohtana käytettiin Mäntsälän kunnan maatalouden nykytilaa, joka edustaa pääasiallisesti viljanviljelyyn keskittyttä maataloustuotantoa.

Tuotoskohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen osalta tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon kasvihuonekaasupäästöjä systeemeissä syntyy paikallisesti tuotettuja energia- ja proteiinimääräisiä ruokatuotoksia kohti. Tutkimuksen keskeinen tavoite oli siis selvittää, kuinka paljon kasvihuonekaasupäästöjä syntyy tuotettua ruokaa kohti kahdessa eri tuotantosysteemissä.

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimuksessa käytetty kasvihuonekaasupäästölaskenta perustui kirjallisuudessa esitettyihin arvioihin ja erilaisiin päästökertoimiin. Kasvihuonekaasupäästölaskelmat tehtiin Koppelmäen ym. (2019b) tuottamille maataloustuotantosysteemien mallinnuksille.

4.1. Tuotantosysteemimallinnukset

Koppelmäen ym. (2019b) aikaisemmassa tutkimuksessa tuotetuista maataloustuotantosysteemien mallinnuksista tähän tutkimukseen valikoitu kaksi erilaista. Toinen valikoiduista systeemimallinnuksista vastaa kasvintuotantovaltaisen Etelä-Suomessa sijaitsevan Mäntsälän kunnan maatalouden nykytilaa, joka puolestaan kuvaa tyypillistä Etelä-Suomalaista viljelyaluetta. Toinen systeemimallinnuksista on skenaario Mäntsälän kunnan maataloudesta. Skenaariossa alueen maataloustuotantoa on muutettu kohti maitokarjatalouden ja kasvintuotannon yhdistelmätuotantoa. Lisäksi skenaariossa sovelletaan agroekologisen symbioosin toimintamallia. Skenaarion lähtökohtana oli tasapainottaa mallinnetun maatalousalueen ravinnetasetta vähentämällä rehun vientiä alueen ulkopuolelle ja tuomalla alueelle sen sijaan lisää maitokarjataloutta. Agroekologisen symbioosin soveltamisen tavoitteena on myös ruoantuotannon paikallistaminen. Paikallistamisen myötä ruoantuotannon ulkoistetut kasvihuonekaasupäästöt ja muut ympäristövaikutukset vähenvät. Suljetumpi ja paikallisempi tuotantosysteemi helpottaa ruoantuotannon ympäristövaikutusten systemaattista arvioimista.

Nykytilaa vastaavassa systeemissä (NS: Koppelmäki ym. 2019b) peltopinta-alaa on 14990 hehtaaria ja suurin osa peltoviljelyssä tuotetuista sadoista (88% viljoista ja 42% öljy- ja palkokasveista) kulutetaan eläinten rehuna Suomen muilla alueilla sijaitsevilla kotieläintuotantotiloilla. Kokonaispeltopinta-alasta noin 60 % on viljanviljelyssä, noin 7 % öljy- ja palkokasvien, noin 4 % muiden (muut peltoviljelykasvit ja puutarhakasvit) kasvien ja noin 16 % lyhytaikaisten (alle 5 vuotisten) nurmien viljelyssä. Lisäksi viherkesantona on noin 12 % kokonaispeltopinta-alasta. Kotieläintuotannon yleisin tuotantomuoto nykytilaa vastaavassa systeemissä on maitokarjatalous. Tämä tuotanto on kuitenkin vähäistä ja alueen lypsykarjatililla lypsylehmiä on yhteensä vain 834. Systeemin

vuosittaiset proteiini- ja energiamääräiset ruokatuotokset ovat 674845 kg ja 23230 milj. kcal.

Agroekologisen symbioosin toimintamallia soveltavassa ja maitokarjataloutta ja kasvin-tuotantoa yhdistävässä skenaariossa (AES+MKT: Koppelmäki ym. 2019b) kokonaispel-topinta-ala (14990 ha) pysyy nykytilaan nähden muuttumattomana, mutta pellonkäyttö muuttuu. Skenaarioinnissa viljelypinta-alojen keskinäisiä osuuksia on muutettu siten, että 20 % yksivuotisten viljelykasvien (viljat sekä öljy- ja palkokasvit) viljelypinta-alasta on muutettu apilanurmirehun tuotantoalaksi. Näin ollen skenaariossa kokonaispeltopinta-alasta noin 48 % on viljanviljelyssä, noin 6 % öljy- ja palkokasvien ja noin 30 % lyhytai-kaisten (alle 5 vuotisten) nurmien viljelyssä. Muiden kasvien ja viherkesannon osuudet (4 % ja 12 %) kokonaispeltopinta-alasta on säilytetty nykytilaan nähden muuttumatto-mina.

Maitokarjatalouden määrää on lisätty siten, että skenaariossa lypsylehmiä on yhteensä 4201. Lypsylehmien lukumäärä määräytyi skenaarion apilanurmirehun tuotantoalan kautta, eli perustui systeemin skenaarioituihin pellonkäytön muutoksiin (Koppelmäki ym. 2019b). Lisäksi skenaariossa tuotetaan biokaasua maataloustuotannon sivuvirtabiomas-soista, joiden energia muutoin hukkaantuisi. Biokaasua tuotetaan skenaariossa kaikesta alueen maidontuotantokarjan lannasta, ylijäämäisestä apilanurmirehusta sekä yksivuotis-ten viljelykasvien yhteydessä viljeltyjen aluskasvien biomassasta. Biokaasuntuotannossa syntyvä mädäte käytetään lannoitteena peltoviljelyssä. Systeemin vuosittaiset proteiini- ja energiamääräiset ruokatuotokset ovat 1641496 kg ja 41034 milj. kcal (Koppelmäki ym. 2019b).

Kasvihuonekaasupäästölaskennassa systeemimallinnuksien muiden (muut peltoviljely-kasvit ja puutarhakasvit) viljelykasvien viljelypinta-alat ja viherkesannon pinta-alat sekä näiden kahden maankäyttömuodon vaikutukset systeemien kasvihuonekaasupäästöihin on jätetty laskennan ulkopuolelle. Näitä ei huomioitu, sillä kyseiset pinta-alat ja vaiku-tukset kasvihuonekaasupäästöihin ovat kummassakin mallinnetussa systeemissä täysin samat (Koppelmäki ym. 2019b). Laskelmassa käytetty systeemien kokonaispeltopinta-ala oli siis kummassakin systeemissä 12 572 hehtaaria.

4.2 Päästölähteiden ja päästösäästölähteiden rajaukset

Laskelmissa huomioitiin tuotantosysteemien hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidipäästöt ja päästösäästöt seuraavista päästökategorioista: viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöt ja päästösäästöt, nautojen ruoansulatuksen metaanipäästöt, typpilannoituksen kasvihuonekaasupäästöt, biokaasun tuotannon päästösäästöt sekä uuden maidontuotantoinfrastruktuurin rakennus- ja materiaalipäästöt.

4.3 Yksiköt

Laskelmassa kaikki kasvihuonekaasupäästöt muunnettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi. Metaani- ja dityppioksidipäästöt muunnettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi (CO₂-ekv) käyttäen IPCC:n 100 vuoden aikahorisontille laskettuja säteilypakotekertoimia, jotka ovat 28 metaanille ja 265 dityppioksidille (Myhre ym. 2013).

Systeemien hehtaarikohtaisessa kasvihuonekaasupäästölaskennassa päästöt laskettiin yhtä peltohehtaaria (1 ha) kohti. Tuotoskohtaiset kasvihuonekaasupäästöt laskettiin molemmissa tuotantosysteemeissä yhtä ruoaksi tuotettua proteiinikiloa (1 kg) ja tuhatta ruoaksi tuotettua kilokaloria (1000 kcal) kohti. Systeemien kokonaisviljelypinta-alat ja proteiini- ja energiamääräiset ruokatuotokset saatiin Koppelmäen ym. (2019b) mallinlaskelmasta.

4.4 Viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöt ja päästösäästöt

4.4.1 Viljelymaiden hiilikadon hiilidioksidipäästöt ja hiilivaraston kasvun päästösäästöt

Viljelymaiden hiilidioksidipäästöt ja -päästösäästöt laskettiin hiilitaselaskentaan perustuen. Laskennassa käytetyt tiedot kahden eri tuotantosysteemin (NS ja AES+MKT) yksivuotisten viljelykasvien ja lyhytaikaisten (alle 5 vuotisten) nurmien viljelypinta-aloista sekä lannan ja mädätteen käyttömääräistä ovat Koppelmäen ym. (2019b) mallinlaskelmista. Hiilitaselaskenta perustui kirjallisuudessa esiintyvään arvioon suomalaisten kivennäismaiden hiilikadosta yksivuotisten kasvien viljelyssä ja kirjallisuudessa esiintyviin kansainvälisiin arvioihin viljelymaihin vuosittain varastoituvasta hiilimäärästä siirryttä-

essä yksivuotisten kasvien viljelystä pysyville nurmille (kts. erittely seuraavassa kappa-leessa). Lisäksi hiilitaselaskennassa laskettiin lannan ja mädätteen hiilestä vuosittain peltoon varastoituva hiilimäärä per ustuen kirjallisuudessa esitettyyn arvioon siitä, kuin suuri osa peltoon levitetyn lannan sisältämästä hiilimäärästä varastoituu pellon pitkäaikaisiin hiilivarastoihin. Laskennassa oletettiin, että hiilivaraston pienentymisen tai suurentumisen nopeus (kg C/ha/a) eivät ole dynaamisesti riippuvaisia peltomaan hiilivaraston koosta. Todellisuudessa hiilivarasto on saturoituva, eli lisäsyötteellä saavutettavat lisäys pienenee ajan funktiona (Lal 2004a).

Heikkisen ym. (2013) mukaan Suomalaisten kivennäismaiden keskimääräiseksi vuosittaiseksi hiilikadoksi on arvioitu 0,22 t C/ha yksivuotisten kasvien viljelystä. Tähän perustuen määriteltiin laskennassa käytetty viljelymaiden vuosittainen hiilitase -0,22 t C/ha yksivuotisten kasvien viljelystä olevalle viljelymaalle. Arvio pysyvällä nurmella saavutettavasta vuosittaisesta hiilivarastoinnista perustuu seuraaviin arvioihin 0,6 t C/ha (Smith 2004), 0,5 t C/ha (Soussana ym. 2004), 0,6 t C/ha (VandenBygaart ym. 2008), 0,6 t C/ha (VandenBygaart ym. 2010) ja 0,6 t C/ha (Freibauer ym. 2004). Näistä arvoista laskettiin keskiarvo 0,58 t C/ha/a kuvaamaan pysyvillä nurmilla saavutettavaa vuosittaista hiilen varastoitumista.

Lyhytaikaisiin nurmiin ja yksivuotisiin viljelykasveihin perustuvilla viljelykierroilla viljeltävien viljelymaiden osalta laskennassa käytetty vuosittainen hiilitase oli 0,29 t C/ha/a. Tämä arvo kyseisellä viljelykierroilla saavutettavasta vuosittaisesta hiilivarastoitumisesta saatiin jakamalla edellä esitetty pysyvillä nurmilla saavutettava hiilen varastoitumisnopeus kahdella. Määrä jaettiin kahdella, sillä kirjallisuudessa esiintyvän arvion mukaan lyhytaikaisiin nurmiin ja muihin viljelykasveihin perustuvalla viljelykierroilla voidaan saavuttaa noin puolet pysyvillä nurmilla vuosittain saavutettavasta hiilivarastoitumisesta (Soussana ym. 2004). Apilanurmikierrossa oleva peltopinta-ala saatiin tekemällä oletus siitä, että molemmissa mallinnetuissa tuotantosysteemeissä apilanurmea viljellään viisivuotisessa kierrossa. Kyseisessä kierrossa oletetaan olevan kolme apilanurmivuotta ja kaksi yksivuotisen viljelykasvin, kuten viljan viljelyvuotta. Tätä tietoa hyödyntäen Koppelmäen ym. (2019b) mallinlaskelmien apilanurmen pinta-ali tiedoista johdettiin apilanurmikierrossa oleva pinta-ala, kertomalla tiedossa oleva apilanurmipinta-ala $\frac{5}{3}$ -kertaiseksi.

Lannasta ja mädätteestä vuosittain viljelymaahan varastoituva hiilimäärä laskettiin perustuen arvioon siitä osuudesta, joka peltoon levitetyn lannan ja mädätteen vuosittaisesta hiilisyötteestä varastoituu maaperän pysyväksi orgaaniseksi hiileksi. Arvio tästä osuudesta perustui Menichettin ym. (2015) esittämiin ruotsalaisen pitkäaikaisen peltokokeen tuloksiin. Kokeessa pellon hiilivarasto kasvoi 53 vuoden ajan noin 0,22 t/ha/vuosi, kun lantaa lisättiin vuosittaista kahden tonnin hiilisyötettä vastaava määrä (Menichetti ym. 2015). Näin ollen noin 11 % lannan hiilisyötteestä kertyi maaperän pysyväksi orgaaniseksi hiileksi, ja laskelmissa käytetty vuosittaisten lanta- ja mädättemäärien hiilimäärien maaperään varastoituvan hiilen kerroin oli noin 0,11 (laskelmassa käytetty tarkkaa arvoa).

4.4.2 Dityppioksidipäästöt viljelymaiden orgaanisen aineksen hajoamisesta

Dityppioksidipäästöt viljelymaiden orgaanisen aineksen hajoamisesta laskettiin käyttäen maan pysyvän orgaanisen aineksen keskimääräistä hiili-typpe-suhdetta 11,6 (Kirkby ym. 2011), hiilitaselaskennassa saatuja maaperän hiilikadon myötä vapautuvia hiilimääriä sekä IPCC:n päästökerrointa 0,01 kg N₂O-N/kg N maaperän orgaanisen aineksen hajoamisessa vapautuvan typen N₂O-päästöille (DeKlein ym. 2006).

4.5 Nautojen ruoansulatuksen metaanipäästöt

Nautojen ruoansulatuksen metaanipäästölaskenta perustui kansallisiin päästökertoimiin. Märehtijöiden ruoansulatuksen kansalliset päästökertoimet lypsylehmälle, hieholle ja vasikalle ovat 128, 58 ja 34 kg CH₄/eläin/vuosi (Regina ym. 2014).

Laskennassa käytetyt kahden eri tuotantosysteemin (NS ja AES+MKT) lypsylehmä-, hieho- ja vasikkamäärät ovat Koppelmäen ym. (2019b) mallinlaskelmista.

4.6 Typpilannoituksen kasvihuonekaasupäästöt

Typpilannoituksen kasvihuonekaasupäästöihin laskettiin mineraalityppilannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt, lannan ja mädätteen käsittelyn ja varastoinnin kasvihuonekaasupäästöt sekä typpilannoituksen seurauksena viljelymaasta vapautuvat kasvihuonekaasupäästöt mineraalilannoitteiden, lannan ja mädätteen käytöstä sekä biologisesti sidotusta typestä.

Kemianteollisten mineraalityppilannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt laskettiin käyttäen typpikilolle määriteltyä päästökerrointa 3,6 kg CO₂-ekv (Yara 2020). Kyseinen päästökerroin vastaa Euroopan Unionin määrittelemillä parhailla mahdollisilla tuotantotekniikoilla valmistetun typpilannoitteen päästöjä ja on päästökerroin esimerkiksi Yaran typpilannoitteille (Yara 2020).

Lannan ja mädätteen käsittelystä ja varastoinnista aiheutuvat metaanipäästöt laskettiin käyttäen IPCC:n laskentamenetelmään (Tier 2) perustuvia lannan päästökertoimia. Lypsylehmille, hiehoille ja vasikoille käytetyt lannan päästökertoimet olivat 9,5, 2,9 ja 1,9 kg CH₄/eläin/vuosi (Kaparaju & Rintala 2011). Lannan ja mädätteen käsittelyn ja varastoinnin dityppioksidipäästöt laskettiin IPCC:n päästökerrointa 0,005 kg N₂O-N/kg N käyttäen (Dong ym. 2006).

Mineraali-, lanta- ja mädätetyppilannoituksen seurauksena maaperästä vapautuvat N₂O-päästöt laskettiin IPCC:n päästökerrointa 0,01 kg N₂O-N/kg N käyttäen (DeKlein ym. 2006). Biologisesti sidotulle typelle ei ole määritelty omaa päästökerrointa. Laskelmassa biologisesti sidotulle typelle sovellettiin samaa IPCC:n päästökerrointa kuin lannoitetyypelle (0,01 kg N₂O-N/kg N: DeKlein ym. 2006).

Laskennassa käytetyt kahden eri tuotantosysteemin (NS ja AES+MKT) mineraalilannoitteiden, lannan ja mädätteen käyttömäärät sekä biologisesti sidotun typen määrät ovat Koppelmäen ym. (2019b) mallinluslaskelmista.

4.7 Biokaasun tuotannolla saavutettavat päästösäästöt

Biokaasun tuotannon päästösäästölaskelmassa kaiken tuotetun biokaasun oletettiin korvaavan fossiilista dieselöljyä. Tilastokeskuksen (2020) polttoaineluokituksessa dieselöljylle määritelty päästökerroin on 63,9 t CO₂/TJ (Tilastokeskus 2020). Kyseisessä polttoaineluokituksessa dieselöljyn oletetaan sisältävän 13,2 % bio-osuuden tilavuudesta. Laskelmassa biokaasun oletettiin korvaavan täysimääräisesti fossiilista energiaa, joten laskelmassa käytetty dieselöljyn päästökerroin oli 72,3 t CO₂/TJ. Tämä kerroin saatiin kertomalla Tilastokeskuksen (2020) polttoaineluokituksen kerroin 63,9 t CO₂/TJ 1,132-kerlaiseksi. Oletuksena oli, että tämän kaltainen paikallinen biokaasun tuotanto vähentäisi dieselöljyn käyttömäärää Suomessa. Tällöin nykysaatavuuden mukainen dieselöljyn bio-osuus jakautuisi pienemmälle polttoainemäärälle ja edelleen käytettävän dieselöljyn suhteellinen bio-osuus voisi kasvaa, jolloin biokaasun ei tarvitsisi korvata dieselin bio-osuutta.

Laskennassa käytetty biokaasun saanto on Koppelmäen ym. (2019b) mallinlaskelmista. Biokaasun tuotannon päästösäästöt laskettiin vain skenaarioidulle tuotantosysteemille (AES+MKT), sillä nykysysteemissä (NS) ei tuoteta biokaasua.

4.8 Uuden maidontuotantoinfrastruktuurin tuotantorakennus- ja materiaaliipäästöt

Uuden maidontuotantoinfrastruktuurin elinkaaristen tuotantorakennus- ja materiaaliipäästöjen yhdelle tuotantovuodelle kohdistuva osuus laskettiin käyttäen päästökerrointa 19 kg CO₂-ekv/t EKM (Kekkonen 2015) ja skenaarioidun tuotantosysteemin (AES+MKT) vuosittaista nykysysteemiin nähden lisäästä energiakorjattua maitotuotosta. Tuotantosysteemien vuosittainen energiakorjattu maitotuotos laskettiin mallinlaskelmien vuosittaisia maitotuotoksista (Koppelmäki ym. 2019b) käyttäen raakamaidolle määriteltyjä rasva- ja proteiinipitoisuuksia (USDA 2015) ja energiakorjatun maitotuotoksen laskentakaavaa ($\text{ekm (kg)} = \text{maitotuotos (kg)} \times (383 \times \text{rasva-\%} + 242 \times \text{valkuaisaine-\%} + 783,2) / 3140$) (Sjaunja ym. 1990).

Tuotantorakennus- ja materiaalipäästöt laskettiin vain skenaariodun tuotantosysteemin (AES+MKT) lisäksi tarvittaville uusille tuotantorakennuksille, jotka tarvitaan lypsylehmien määrän lisääntyessä.

4.9 Kasvihuonekaasupäästölaskennan epävarmuudet

Tutkimuksen kasvihuonekaasupäästölaskentaan liittyy useita epävarmuuksia. Viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan epävarmuutta aiheuttaa tuotantosysteemien viljelymaiden vuosittaisen hiilikadon laskentaan käytetty kerroin. Kerroin perustuu yhden suomalaisen tutkimuksen tuloksiin, ja on keskimääräinen arvio koko Suomen kiivenäismaapeltojen vuosittaisesta hiilikadosta. Kerroin ei siis anna tarkkaa tietoa tarkasteltujen tuotantosysteemien viljelymaiden todellisista orgaanisen aineksen hajoamisesta aiheutuvista hiilidioksidi- ja dityppioksidipäästöistä. Lisäksi osa viljelymaiden hiilikadosta saattaa orgaanisen aineksen hajoamisen seurauksena tapahtuvan hiilikadon sijaan olla seurausta eroosiosta. Eroosion vaikutusta viljelymaiden hiilikatoon ei ole huomioitu tässä tutkimuksessa.

Myös viljelymaiden hiilen varastointilaskentaan ja sillä saavutettavien päästösäästöjen laskentaan liittyy epävarmuutta. Laskennassa käytetyt arviot pysyvillä nurmilla saavutettavasta vuosittaisesta hiilen varastoinnista ovat kansainvälisiä keskimääräisiä arvioita, sillä vastaavia kansallisia arvioita ei ollut saatavilla. Kansainvälisten keskimääräisten arvioiden soveltaminen Suomen olosuhteisiin aiheuttaa jo itsessään epävarmuutta. Lisäksi epävarmuutta aiheuttaa vähäinen tieto lyhytaikaisiin apilanurmiin ja muihin viljelykasveihin perustuvien viljelykiertojen potentiaalista hiilen varastointiin verrattuna pysyvien nurmien arvioituun potentiaaliin. Arvio lannan ja mädätteen käytöllä saavutettavasta hiilen varastoitumisesta perustuu vain yhden pitkäaikaisen peltokokeen tuloksiin, joten myös siihen liittyy epävarmuutta. Lisäksi lannan ja mädätteen yhdenvertaistaminen laskelmissa aiheuttaa epävarmuutta kaikkeen tutkimuksen laskentaan, joka koskee mädätettä.

Lisäksi kaikkeen tutkimuksen päästökertoimiin perustuvaan laskentaan liittyy tiettyä epävarmuutta. Laskennassa käytetyt globaalit, kansalliset ja jollekin laajalle alueelle määritetyt päästökertoimet tai muille tutkituille systeemeille laskennassa saadut päästökertoimet

met eivät vastaa tarkasti tässä tutkimuksessa tarkasteltujen mallinnettujen tuotantosysteemien päästöjä. Tutkittujen mallinnettujen tuotantosysteemien ominaispiirteiden huomioiminen päästölaskennassa yleisten päästökertoimien käyttämisen sijaan johtaisi tarkempaan tuloksiin kyseisten systeemien todellisista tai odotetuista kasvihuonekaasupäästöistä.

4.10 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysissä analysoitiin tutkimuksen tulosten herkkyyttä laskennassa käytettyjen hiilitasearvojen ja tiettyjen päästökertoimien vaihtelulle. Ensimmäinen variointi tehtiin yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevan viljelymaan hiilitaseelle. Varioinnissa tasearvoa muutettiin ensin alkuperäistä 20% pienemmäksi ja tämän jälkeen 20% alkuperäistä suuremmaksi. Toisessa varioinnissa sama toistettiin lyhytaikaisiin nurmiin ja yksivuotisiin viljelykasveihin perustuvilla viljelykierroilla viljeltävien viljelymaan hiilitaseelle. Kolmannessa varioinnissa nautojen ruoansulatuksen metaanipäästökertoimia variointiin ensin 20% alkuperäistä pienemmiksi ja tämä jälkeen 20% alkuperäistä suuremmiksi.

5. TULOKSET

5.1 Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset

Skenaarioidun (AES+MKT) tuotantosysteemin ruokatuotoskohtaiset kasvihuonekaasupäästöt olivat 10,45 kg CO₂-ekv/kg ruokaproteiinia ja 0,42 kg CO₂-ekv/1000 kcal ja siten pienemmät kuin nykysysteemin (NS) vastaavat päästöt (24,37 kg CO₂-ekv/kg ruokaproteiinia ja 0,71 kg CO₂-ekv/1000 kcal) (**Taulukko 1**). Skenaarioidussa systeemissä ruoaksi tuotetulle proteiinille kohdistetut päästöt (kg CO₂-ekv/kg ruokaproteiinia) olivat noin 57 % pienemmät kuin nykysysteemissä. Vastaavasti tuotetun ruoan energiamäärälle kohdistetut päästöt (kg CO₂-ekv/1000 kcal) olivat noin 41 % pienemmät skenaarioidussa systeemissä kuin nykysysteemissä. Peltopinta-alakohtaiset päästöt puolestaan olivat noin 4 % alhaisemmat nykysysteemissä skenaarioituun systeemiin verrattuna eli skenaarioitu systeemi ei vähentänyt mallinnetun maatalousalueen hehtaarikohtaisia kasvihuonekaasupäästöjä.

Päästökategorioittain tarkasteltuna nykysysteemissä (NS) vuosittain eniten päästöjä aiheutui epäsuorasti mineraalityppilannoitteiden valmistuksesta (4350 tCO₂-ekv), typpilannoituksen maaperäpäästöistä (4278 tCO₂-ekv) sekä nautojen ruoansulatuksesta (4202 tCO₂-ekv). Typpilannoituksesta kokonaisuudessaan aiheutui molemmissa systeemeissä iso osa systeemin kokonaispäästöistä, ja typpilannoituksen kokonaispäästöjen määrä olikin molemmissa systeemeissä melko sama. Skenaarioidussa systeemissä (AES+MKT) selvästi eniten vuosittaisia päästöjä aiheutui kuitenkin nautojen ruoansulatuksesta (17709 tCO₂-ekv). Viljelymaiden hiilenvarastointi ja biokaasun tuotanto sivuvirtabiomassoista tuottivat skenaarioidussa systeemissä yhteensä 11095 t CO₂-ekv negatiivisia päästöjä eli päästösäästöjä, jotka kompensoivat muita systeemissä aiheutuneita päästöjä. (**Taulukko 2, Kuva 1**)

Taulukko 1. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset mallinnetuille tuotantosysteemeille (NS ja AES+MKT) ilmaistuna kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia (kg CO₂-ekv) tuotettua ruokaproteiini-kiloa kohti ja ruoaksi tuotettua energiaa (1000 kcal) kohti, tonnia hiilidioksidiekvivalenttia (t CO₂-ekv) yhtä systeemin peltohehtaaria (1 ha) kohti sekä vuosittaiset kokonaispäästöt (kg CO₂-ekv ja t CO₂-ekv).

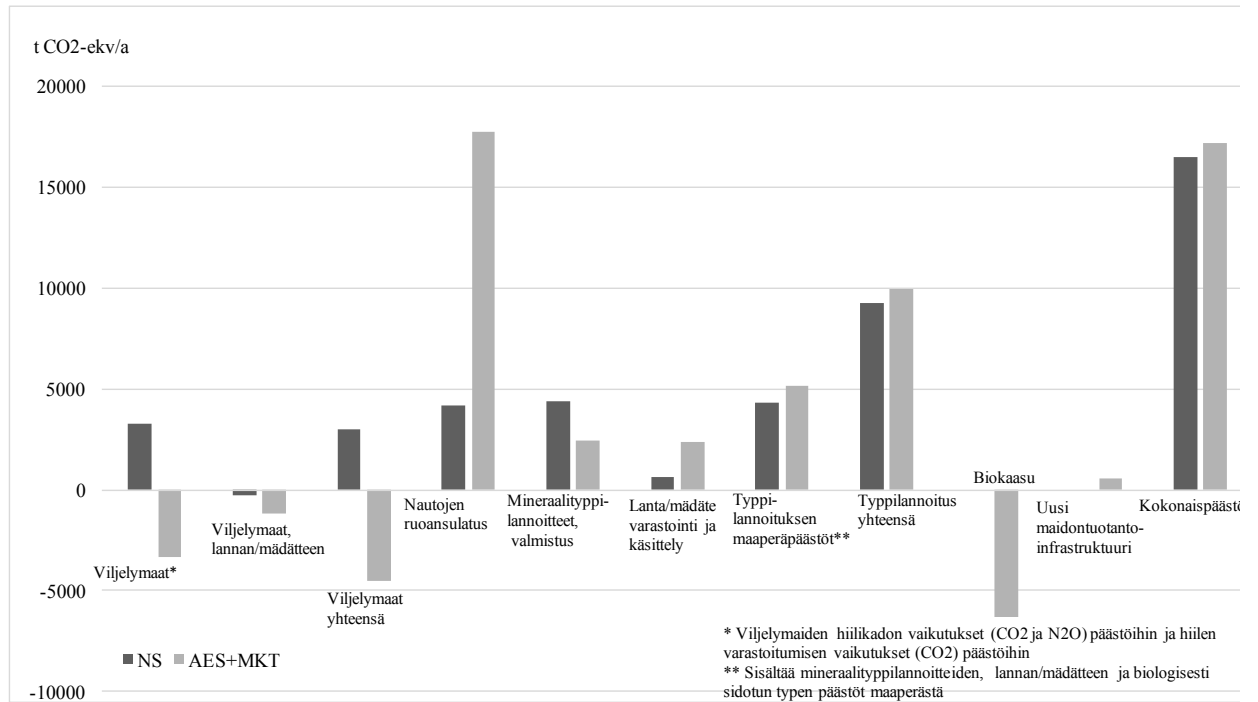
Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	24,37	10,45
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,71	0,42
Pinta-alkohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,31	1,36
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	16443	17146
kg CO ₂ -ekv/vuosi	16443044	17145816

Taulukko 2. Mallinnettujen tuotantosysteemien (NS ja AES+MKT) vuosittaiset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv) päästökategorioittain.

Päästöt (t CO₂ -ekv/vuosi)	NS	AES+MKT
Viljelymaat*	3245	-3344
Viljelymaat, lannan/mädätteen vaikutus	-277	-1155
Viljelymaat yhteensä	2968	-4500
Nautojen ruoansulatus	4202	17709
Mineraalityppilannoitteet, valmistus	4350	2420
Lanta/mädäte, varastointi ja käsittely	645	2379
Typpilannoituksen maaperäpäästöt**	4278	5148
Typpilannoitus yhteensä	9273	9948
Biokaasu		-6595
Uusi maidontuotantoinfrastrukturi		584
Kokonaispäästöt	16443	17146

* Viljelymaiden hiilikadon vaikutukset (CO₂ ja N₂O) päästöihin ja hiilenvarastoitumisen vaikutukset (CO₂) päästöihin

** Sisältää mineraalityppilannoitteiden, lannan/mädätteen ja biologisesti sidotun typen päästöt maaperästä



Kuva 1. Mallinnettujen tuotantosysteemien (NS ja AES+MKT) vuosittaiset kasvihuonekaasupäästöt (t CO₂-ekv) päästökategorioittain.

5.2 Herkkyysanalyysin tulokset

Herkkyysanalyysi kuvaa tuotos- ja hehtaarikohtaisten päästötulosten herkkyyttä laskennassa käytettyjen hiilitasearvioiden ja nautojen ruoansulatuksen päästökerrointen muutoksille. Herkkyysanalyysin tulokset osoittavat skenaariodun tuotantosysteemin tuotoskohtaisten päästöjen olevan edelleen huomattavasti nykysysteemiä alhaisemmat, vaikka laskelman alkuperäisiä hiilitasearvoja yksivuotisilla viljelykasveilla tai nurmikierrolla olevista viljelymaista muutettaisiin 20 % pienemmäksi tai suuremmaksi (**Taulukot 3, -6**). Herkkyysanalyysin tuloksissa erot nykysysteemin ja skenaariodun systeemin ruoka-proteiinikohtaisissa ja energiamääräkohtaisissa päästöissä olivat 59 % ja 43 %, kun yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevien maiden hiilitasetta muutettiin 20 % pienemmäksi tai nurmiviljelykierrossa olevien maiden hiilitasetta 20 % suuremmaksi (**Taulukko 3, Taulukko 6**). Vastaavat erot olivat 55 % ja 38 %, kun yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevien maiden hiilitasetta muutettiin 20 % suuremmaksi tai nurmiviljelykierrossa olevien maiden hiilitasetta 20 % pienemmäksi (**Taulukko 4, Taulukko 5**).

Skenaariodussa systeemissä hehtaarikohtaiset päästöt olivat 8 % nykysysteemiä suuremmat, kun yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevien maiden hiilitasetta muutettiin 20 % suuremmaksi tai nurmiviljelykierrossa olevien maiden hiilitasetta 20 % pienemmäksi (**Taulukko 4, Taulukko 5**). Kun yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevien maiden hiilitasetta muutettiin 20 % pienemmäksi tai nurmikierron olevien viljelymaiden hiilitasetta muutettiin 20 % suuremmaksi nykysysteemin ja skenaariodun systeemin hehtaarikohtaisissa päästöissä ei ollut eroa.

Taulukko 3. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset, kun yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevan viljelymaan hiilitasetta on muutettu 20 % pienemmäksi.

Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	26,60	11,00
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,77	0,44
Pinta-ala-kohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,43	1,44
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	17953	18057
kg CO ₂ -ekv/vuosi	17952872	18056770

Taulukko 4. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset, kun yksivuotisten viljelykasvien viljelyssä olevan viljelymaan hiilitasearvoa on muutettu 20 % suuremmaksi.

Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	22,13	9,89
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,64	0,40
Pinta-ala-kohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,19	1,29
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	14933	16235
kg CO ₂ -ekv/vuosi	14933217	16234862

Taulukko 5. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset, kun lyhytaikaisiin nurmiin ja yksivuotisiin viljelykasveihin perustuvilla viljelykierroilla viljeltävän viljelymaan hiilitasetta on muutettu 20 % pienemmäksi.

Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	25,64	11,41
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,74	0,46
Pinta-alkohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,38	1,49
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	17304	18726
kg CO ₂ -ekv/vuosi	17303872	18725669

Taulukko 6. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset, kun lyhytaikaisiin nurmiin ja yksivuotisiin viljelykasveihin perustuvilla viljelykierroilla viljeltävän viljelymaan hiilitasetta on muutettu 20 % suuremmaksi.

Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	23,09	9,48
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,67	0,38
Pinta-alkohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,24	1,24
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	15582	15566
kg CO ₂ -ekv/vuosi	15582217	15565963

Analyysissä tutkittiin myös tutkimuksen alkuperäisten tulosten herkkyyttä nautojen ruoansulatuksen metaanipäästöille, niiden ollessa skenaarioidussa systeemissä huomattavan suuri päästölähde. Skenaarioidun tuotantosysteemin tuotoskohtaiset päästöt olivat kuitenkin nykysysteemiin verrattuna selvästi alahaisemmat, vaikka nautojen metaanipäästöt olivat 20 % alkuperäistä suuremmat (**Taulukko 8**). Erot nykysysteemin ja skenaarioidun systeemin ruokaproteiinkohtaisissa ja energiamääräkohtaisissa päästöissä olivat 50 % ja 32 %, kun nautojen ruoansulatuksen päästökertoimet olivat 20 % alkuperäistä suuremmat (**Taulukko 8**). Vastaavat erot olivat 64 % ja 51 %, kun nautojen ruoansulatuksen päästökertoimet olivat 20 % alkuperäistä pienemmät (**Taulukko 7**). Hehtaarikohtaiset päästöt olivat nykysysteemissä 13 % suuremmat kuin skenaarioidussa systeemissä, kun nautojen ruoansulatuksen päästökertoimet olivat 20 % alkuperäistä pienemmät (**Taulukko 7**). Vastaavasti, kun kyseiset päästökertoimet olivat 20 % suuremmat skenaarioidun systeemin hehtaarikohtaiset päästöt olivat 20 % suuremmat kuin nykysysteemissä (**Taulukko 8**).

Taulukko 7. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset, kun nautojen ruoansulatuksen metaanipäästökertoimia on muutettu 20 % pienemmiksi.

Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	23,12	8,29
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,67	0,33
Pinta-ala-kohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,24	1,08
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	15603	13604
kg CO ₂ -ekv/vuosi	15602638	13603987

Taulukko 8. Kasvihuonekaasupäästölaskennan tulokset, kun nautojen ruoansulatuksen metaanipäästökertoimia on muutettu 20 % suuremmiksi.

Tuotoskohtaiset päästöt	NS	AES+MKT
kg CO ₂ -ekv/kg ruokaproteiinia	25,61	12,60
kg CO ₂ -ekv/1000 kcal	0,74	0,50
Pinta-ala-kohtaiset päästöt		
t CO ₂ -ekv/ha	1,37	1,65
Kokonaispäästöt		
t CO ₂ -ekv/vuosi	17283	20688
kg CO ₂ -ekv/vuosi	17283451	20687645

6. TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimuksen keskeisimpänä tavoitteena oli selvittää agroekologisen symbioosin toimintamallia soveltavan ja kasvintuotantoa ja maitokarjataloutta integroivan skenaarioidun tuotantosysteemin mahdollisuuksia alkutuotannon ruokatuotoskohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Skenaarioidun tuotantosysteemin vertailukohta oli skenaarion lähtökohtana käytetty kasvintuotantovaltainen, erityisesti viljanviljelyyn erikoistunut maatalousalue. Tämän tutkimuksen tuloksiin perustuen skenaarioidun tuotantosysteemin päästöt olivat sekä proteiinimääräiselle että energiamääräiselle ruokatuotokselle kohdistettuna pienemmät kuin nykysysteemissä, kun tarkasteltiin vain paikallisesti mallinnetuissa systeemeissä tuotetun ruoan päästöjä. Nykysysteemin muuttaminen kohti skenaarioitua systeemiä vähentäisi siis kyseisen maataloustuotantosysteemin ruokatuotoskohtaisia päästöjä.

Mikäli skenaarion mukaista maitokarjatalouden tai muun nautakarjatalouden lisäämistä toteutettaisiin Suomen kasvintuotantovaltaisilla alueilla, niin olisi lisäksi arvioitava nautakarjatalouden kokonaismäärää ja alueellista jakautumista Suomessa. Nautakarjatalouden kokonaismäärän säilyttäminen nykyisellään tarkoittaisi tuotannon siirtämistä nautakarjatalouteen keskittyneiltä alueilta kasvintuotantovaltaisille alueille esimerkiksi poliittisen ohjauksen avulla. Samalla voitaisiin vähentää maatalouden ravinnekiertojen keskittymistä Suomessa, kun kotieläinten lanta jakautuisi tasaisemmin koko maahan. Tämä voisi ratkaista myös lannankäytön keskittymiseen liittyviä nykyisiä ongelmia, joita ovat esimerkiksi lantaravinteiden kasvintuotantoon nähden epäoptimaalisesti jakautunut käyttö ja siitä aiheutuva vesistökuormitus (Turtola ja Ylivainio 2009, Ylivainio ym. 2014).

Lisäksi nautakarjatalouden tasaisemmalla jakautumisella koko Suomeen voisi olla myös uuden pellon raivaustarvetta vähentävä vaikutus. Jos nautakarjatalous vähenisi siihen keskittyneillä alueilla, joilla myös yli puolet 2000-luvulla raivatusta pellostä on raivattu (Niskanen ja Lehtonen 2014), niin ainakin nautakarjatalouden tarpeisiin raivattavan pellon tarve vähenisi. Tämä olisi erityisesti maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen vähen-

tämisen kannalta edullista. Maatalouden keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan sektori-suunnitelmassakin todetaan laajentavan kotieläintuotannon sijaitsevan pääasiassa samoilla alueilla, joilla päästöintensiiviset eloperäiset maat ovat yleisiä, ja uuden pellon raivaus on lisännyt eloperäisten maiden suhteellista osuutta viljelyalasta (MMM 2017). Kyseisessä suunnitelmassa todetaan myös eloperäisen viljelymaan pinta-alan kasvun jatkuvan yhä tulevaisuudessakin (MMM 2017). Tämä kasvu on kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemisen kannalta ongelmallista, sillä uuden pellon raivauksen aiheuttamat päästöt ovat erityisen merkittävät uuden viljelymaan olleessa eloperäistä (Smith ym. 2015).

Toisaalta maidontuotannossa ja muussa kotieläintuotannossa vesi on yksi tärkeistä ja välttämättömistä tuotantotekijöistä (Palhares ym. 2020). Tästä syystä Suomen toimimista nautakarjatalouteen keskittyneenä ruoantuotantoalueena puoltaa Suomen runsaat vesivarat. Suomessa maidontuotannon veden niukkuusvaikutusmenetelmällä (elinkaaritarkasteluun pohjautuva menetelmä) tarkasteltu vedenkulutus onkin suhteellisen vähäistä (Usva ym. 2019). Suomen voitaisiinkin ajatella olevan nautakarjatalouden tuotteiden viejä, mikäli paikallisen ruoantuotannon ja ruokajärjestelmien sijaan tai ohella keskityttäisiin kestävästi tuotetun ruoan kansainväliseen vientiin (Lehikoinen ym. 2019).

6.1 Tuotoskohtaiset kasvihuonekaasupäästöt

Havaitut erot kahden vertailun tuotantosysteemin kasvihuonekaasupäästöissä selittyvät eroavaisuuksilla systeemien ruokatuotoksissa, sillä vuosittaiset kokonaispäästöt olivat kummassakin systeemissä lähes saman suuruiset. Skenaarioidussa tuotantosysteemissä nykytilaan nähden lisääntynyt maitokarjatalous kasvattaa vuosittaisen paikallisen proteiinimääräisen ruokatuotoksen 2,4-kertaiseksi ja energiamääräisen ruokatuotoksen 1,7-kertaiseksi nykysysteemin tuotoksiin verrattuna (Koppelmäki ym. 2019b). Skenaarioidussa systeemissä kokonaispäästöt jakautuvat siis huomattavasti suuremmalle ruokamäärälle, kun tarkastellaan vain paikallisesti tutkituissa systeemeissä tuotettuja ruokamääriä.

Ruokatuotoskohtaisia päästöjä tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että nykysysteemissä suurin osa peltokasvien sadosta viedään rehuna systeemin ulkopuolelle. Näin ollen nykysysteemi osallistuu ruoantuotantoon tarkastellun maatalousalueen ulkopuolella huomattavasti enemmän kuin skenaarioitu systeemi. Skenaarioidussa systeemissä on tarkoi-

tuksellisesti vähennetty alueen rehuvientä vähennetty ja lisätty sen sijaan paikallista ruoantuotantoa. Nykysysteemistä viedyistä rehuista tuotetaan siis ruokaa tarkastellun systeemin ulkopuolella. Viedyillä rehuilla tuotetun ruoan energia- ja proteiinimäärisiä tuotoksia ei ole huomioitu tässä tutkimuksessa, sillä tarkoituksena oli arvioida vain paikallisesti tuotetulle ruokatuotokselle kohdistuvat päästöt. Viedyistä rehuista tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöjä ei voida siis tarkastella paikallisesti tässä tutkimuksessa tutkitulla maatalousalueella.

Mikäli laskennassa kuitenkin huomioitaisiin myös nykysysteemistä viedyistä rehuista muualla tuotettu energia- ja proteiinimääräinen ruoka, niin nykysysteemille kuuluvat kokonaisruokatuotokset kasvaisivat. Samalla olisi odotettavissa nykysysteemille kohdistuvien hehtaariohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen kasvu systeemille kohdistuvien kokonaispäästöjen kasvun myötä. Kokonaispäästöt kasvaisivat systeemin ulkopuolisen ruoantuotannon päästöjen allokoituessa osittain tämän tutkimuksen nykysysteemille. Tarkastellun systeemin ulkopuolella tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöt riippuvat kuitenkin useista tuotantosysteemikohtaisista tekijöistä, joita ei tämän tutkimuksen aineistosta saada selville.

Systeemin ulkopuolella viedyistä rehuista tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseksi tarvittaisiin tietoa ainakin tuotantomuodosta, johon rehut käytetään sekä tuotannon maankäytöstä tämän tutkimuksen nykysysteemin ulkopuolella. Viedyt rehut voidaan esimerkiksi käyttää systeemin ulkopuolella joko yksimahaisten (sika ja siipikarja) eläinten tai märehtijöiden, kuten nautojen rehuina. Ruoansulatusjärjestelmän tyyppi vaikuttaa merkittävästi kotieläintuotannossa syntyviin metaanipäästöihin märehtijöiden ruoansulatuksen tuottaessa huomattavasti enemmän metaania yksimahaisiin verrattuna. Suomessa märehtijöiden ruoansulatus tuottaa 24 % maatalouden päästöistä, joihin ei ole huomioitu maatalouden maankäytön tai energiankäytön päästöjä (Regina ym. 2014). Märehtijöiden ja yksimahaisten ruoansulatuksen metaanipäästöt yhteenlaskettuna ovat noin 27 % kyseisistä päästöistä (Regina ym. 2014) eli tässä suhteessa yksimahaisten tuottama osuus on pieni.

Systeemin ulkopuolella tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttaa myös maankäyttö. Maankäytön päästöt riippuvat muun muassa siitä, kuinka paljon ulkopuolisissa

tuotantosysteemeissä tuotettua ruokaa kohti tuotetaan paikallisia rehuja tässä tutkimuksessa tarkastellulta alueelta vietyjen rehujen lisäksi. Yksimahaisiin kotieläimiin perustuvassa tuotannossa tämä rehuntuotanto tarkoittaisi pääasiallisesti yksivuotisten viljelykasvien viljelyä ja nautakarjatuotannossa puolestaan pääasiallisesti karkearehun, kuten monivuotisten rehunurmien viljelyä. Yksivuotisten rehukasvien viljelyssä viljelymaiden kasvihuonekaasupäästöt ovat suuremmat monivuotisten rehukasvien viljelyyn verrattuna (Heikkinen ym. 2013). Monivuotisten kasvien viljelyssä mahdolliset hiilen varastoinnilla aikaansaavat päästösäästöt riippuvat viljelyn tuottaman maahan kohdistuvan hiilisyöteen ja maasta vapautuvien kasvihuonekaasupäästöjen määrien keskinäisestä suhteesta.

Lisäksi näiden ulkopuolisten systeemien maankäytön päästöjen kannalta merkittävä seikka on mahdollinen viljely eloperäisillä mailla. Maankäytön päästöt ovat huomattavasti suuremmat eloperäisillä mailla kuin kivennäismailla. Arvio kivennäismaiden keskimääräisestä vuosittaisesta hiilikadosta yksivuotisten kasvien viljelyssä on 220 kg/ha (Heikkinen ym. 2013). Eloperäisillä mailla vastaava arvio on 2100-8300 kg C/ha/ ja nurmiviljelyssä 790-7500 kg/ha (Maljanen ym. 2007). Näin ollen tämän tutkimuksen nykyiseen nähden ulkopuolisissa tuotantosysteemeissä tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöihin vaikuttaa se, tuotetaanko tuotantoon vientirehujen lisäksi vaadittavia paikallisia rehuja eloperäisillä mailla. Esimerkiksi nautakarjan nurmirehuntuotanto eloperäisillä mailla tuottaa huomattavat päästöt, kun taas tämän tutkimuksen skenaarioidussa tuotantosysteemissä (AES+MKT) nurmirehun tuotannolla saavutetaan merkittävästi muita tuotannon päästöjä kompensoivat päästösäästöt.

Tutkimuksessa käytetyn skenaarioidun tuotantosysteemimallinnuksen (AES+MKT) lähtökohtana oli kuitenkin tasapainottaa mallinnetun alueen ravinnetasetta vähentämällä rehuvientiä ja tuomalla alueelle nurmirehua hyödyntävää ja alueen ruokatuotosta lisäävää kotieläintuotantoa (Koppelmäki ym. 2019b). Agroekologisen symbioosin ja maitokarjatalouden sisältävässä skenaarioinnissa on siis myös kyse ruoantuotannon paikallistamisesta ja suljetumpien ravinne- ja energiankiertojen luomisesta paikallisiin ruokajärjestelmiin. Tähän seikkaan liittyen nimenomaan paikallisesti ja mahdollisimman suljetuissa ravinne- ja energiakerroissa tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöt ovat tarpeellisia ja kiinnostavia tietoja.

6.2 Hehtaarikohtaiset kasvihuonekaasupäästöt

Tutkimuksessa tavoitteena oli selvittää myös vaikutukset hehtaarikohtaisiin päästöihin, jotka tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella ovat hieman vähäisemmät nyky-
systeemissä kuin skenaarioidussa systeemissä. Havaittu alle 5 % ero hehtaarikohtaisissa
päästöissä systeemien välillä oli kuitenkin pieni suhteutettuna noin 50 % eroon systeemien
ruokatuotoskohtaisissa päästöissä. Hehtaarikohtaiset päästöt havainnollistavat lisäksi
eroavaisuutta systeemien vuosittaisissa kokonaispäästöissä.

6.2.1 Systeemien kokonaispäästöt ja kategoriakohtaiset päästöt

Tässä tutkimuksessa skenaarioidun systeemin ja nykysysteemin kokonaispäästöt ja siten
myös hehtaarikohtaiset päästöt olivat lähes saman suuruiset. Huomattavia eroja systeemien
välillä oli kuitenkin päästökategoriakohtaisissa päästöissä. Skenaarioidun tuotanto-
systeemin merkittävin yksittäinen päästölähde oli nautojen ruoansulatus, jonka tuot-
tama päästömäärä oli hieman suurempi kuin koko systeemin kokonaispäästömäärä. Ny-
kysysteemissä nautojen ruoansulatuksen päästöt olivat noin neljä kertaa vähäisemmät
kuin skenaarioidussa systeemissä, jossa maitokarjatalouden määrää on lisätty. Typpilan-
noitukseen liittyvät kokonaispäästöt puolestaan olivat lähes saman suuruiset molemmissa
systeemeissä.

Nautojen ruoansulatuksen rooli skenaarioidun systeemin merkittävänä päästölähteenä oli
odotettavissa oleva tulos. Suomessa kotieläinten (pääasiassa märehitijöiden) ruoansulatus
on maatalouden toiseksi suurin päästölähde, kun orgaanisten viljelymaiden maankäytön
päästöjä ei huomioida (Regina ym. 2014). Myös erilaisten nurmipohjaisten maidontuo-
tantosysteemien elinkaarianalyyseissa lehmien ruoansulatuksen on havaittu olevan mai-
dontuotannon suurin yksittäinen kasvihuonekaasupäästölähde (Eide 2002, O'Brien ym.
2011).

6.2.2 Päästöjen kompensointi skenaarioidussa tuotantosysteemissä

Vertailtujen tuotantosysteemien lähes saman suuruisia kokonais- ja hehtaari päästöjä selittävät skenaarioidun systeemin runsaampi nurmien viljely nykysysteemiin verrattuna, mädätteen käyttö viljelyssä sekä biokaasun tuotanto systeemin sivuvirtabiomassoista. Skenaarioidussa systeemissä toteutuu siis kaksi erilaista ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiskeinoa: hiilen varastointi maaperään ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen kestäväällä energiamuodolla. Lal (2004a) on aikaisemmin esittänyt kyseiset päästövähennyskeinot potentiaalisina ja toisiaan tukevinä keinoina vähentää maatalouden kasvihuonekaasupäästöjä.

Skenaarioidussa systeemissä viljelymaiden päästöt ovat selvästi negatiiviset nurmiviljelyn ja mädätteen käytön hiiltä maahan varastoivasta vaikutuksesta johtuen. Hiilen varastoituminen maahan puolestaan kompensoi skenaarioidun systeemin muita päästöjä, jotka ovat suurempia kuin nykysysteemissä. Myös esimerkiksi Lal (2004a), Lal (2007) ja Smith (2012) ovat aikaisemmin todenneet viljelymaiden hiilen varastoinnin olevan hyvä keino vähentää maatalouden hiilidioksidipäästöjä tuotantoa hyödyttävällä tavalla. Skenaarioidussa systeemissä hiilen varastoinnilla siis paitsi kompensoitaisiin kasvihuonekaasupäästöjä, niin myös parannettaisiin kasvintuotantovaltaisen maatalousalueen viljelymaiden kasvukuntoa, tuottavuutta ja resilienssiä (Lal 2007). Kyseiset ominaisuudet ovat maataloustuotantoa kokonaisvaltaisesti hyödyttäviä ominaisuuksia.

Myös biokaasun tuotanto skenaarioidun tuotantosysteemin sivuvirtabiomassoista kompensoi huomattavan osan systeemin muista päästöistä. Tutkimuksen tuloksen kannalta biokaasun tuotanto on siis huomattavan tärkeä osa skenaarioitua tuotantosysteemiä ja sen aikaansaamia päästösäästöjä. Biokaasun tuotannon lisäämistä maatalouden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi tukee myös esimerkiksi Jungmeierin ja Spitzerin (2001) tutkimustulos, joka osoittaa biokaasun tuotannon olevan tehokas menetelmä maatalouden bioenergian tuotantoon. Lisäksi biokaasun tuotanto sopii hyvin yhteen viljelymaiden maaperän hiilivaraston kasvattamiseen liittyvien tavoitteiden kanssa. Biokaasun tuotannon etuna onkin erityisesti mahdollisuus hyödyntää monivuotisia nurmia monitavoitteisesti (Tuomisto ja Helenius 2008), sillä nurmibiomassat ovat hyvää syötettä biokaasutusprosessiin (ProAgraria, Motiva 2013, Seppälä ym. 2014). Tutkimuksen tuloksen mukaisia

kompensaatiomääriä voidaan saavuttaa biokaasun tuotannolla, niin kauan kuin biokaasulla korvataan fossiilista energiaa.

6.2.3 Päästökompensoinnin epävarmuudet ja ajallinen rajallisuus

Päästöjä kompensoivan hiilen varastoitumisen määrään liittyy epävarmuuksia. Epävarmuudet liittyvät puutteelliseen tutkimustietoon säännöllisesti ja toistuvasti viljeltyjen lyhytaikaisten nurmien potentiaalista varastoida hiiltä viljelymaihin pitkäaikaisesti. Tässä tutkimuksessa käytetty arvio nurmiviljelyn hiilenvarastointipotentiaalista ei esimerkiksi huomionnut nurmien kasvilajikoostumuksen ja käsittelyn vaikutusta hiilen varastointiin, vaan oli yksinkertainen arvio nurmiviljelykierron vaikutuksesta. Nurmityypillä ja nurmen viljelykäytännöllä on kuitenkin osoitettu olevan huomattava vaikutus viljelykierrossa viljeltävien lyhytaikaisten nurmien aikaansaamaan maaperän hiilivaraston kasvuun (Soussana ym. 2004). Soussananan ym. (2004) arvion mukaan nurmipalkokasveihin perustuvien nurmien potentiaali on muita lyhytaikaisia nurmia suurempi, joten tässä tutkimuksessa skenaarioitujen apilanurmien potentiaali voisi tämän arvion mukaan olla suurempi kuin tämän tutkimuksen laskennassa saatu arvio.

Tutkimuksessa saatuihin tuloksiin hiilen varastoitumisesta on kuitenkin kokonaisuudessaan suhtauduttava tietyllä kriittisyydellä laskennassa käytettyjen arvioiden ollessa vain kansainvälisiä keskimäärisiä yleistettyjä arvioita hiilen varastoitumispotentiaalista. Näihin arvioihin perustuva laskenta jättää huomiotta monia pitkäaikaiseen hiilen varastoitumiseen vaikuttavia tuotantosysteemikohtaisia ominaisuuksia. Hiilen varastoitumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa maaperän biologiset, ekologiset, fysiologiset ja kemialliset ominaisuudet, käytetyt maan muokkausmenetelmät ja muut viljelykäytännöt, priming-ilmiö (maahan lisätyn mikrobeille helppokäyttöisen hiilen hajotustoimintaa lisäävä vaikutus) sekä paikalliset ilmasto- ja sääolosuhteet (Lal 2018, Heinonsalo 2020). Suomessa lisätutkimusta tarvittaisiin siis erityisesti nurmiviljelykiertojen ja muiden viljelykäytäntöjen vaikutuksesta maaperän pitkäaikaiseen hiilen varastoitumiseen.

Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat kuitenkin skenaarioidun tuotantosysteemin ja nykyjärjestelmän välisten alueella tuotetun ruoan tuotoskohtaisten päästöjen eroavaisuuden olevan huomattava. Myös tutkimuksessa tehty herkkyysanalyysi osoitti, että 20 % muu-

tokset suuntaan tai toiseen laskennan hiilitasearvoissa tai nautojen ruoansulatuksen päätökertoimissa muuta tutkimuksen ensisijaista tulosta skenaarioidun tuotantosysteemin nykysysteemiä huomattavasti alhaisemmista tuotoskohtaisista päästöistä. Erot kokonais- ja hehtaarikohtaisissa päästöissä sen sijaan muuttuivat enemmän laskennan arvojen muuttuessa, sillä alkuperäiset erot systeemien välisissä kokonais- ja hehtaarikohtaisissa päästöissä olivat huomattavasti pienemmät kuin tuotoskohtaisissa päästöissä.

Tuloksia tarkasteltaessa on myös huomioitava, ettei viljelykäytännöillä voida loputtomasti kasvattaa maaperän hiilivarastoa ja siten kompensoida tuotantosysteemin muita päästöjä. Lal (2004a) esimerkiksi arvioi hiilen varastointikapasiteetin riittävän maatalousmailla muutamaksi vuosikymmeneksi. Tähän arvioon perustuen tämän tutkimuksen tulosten mukaiset päästöt voisivat skenaarioidussa tuotantosysteemissä toteutua muutaman vuosikymmenen ajan. Jos tasapainotila maaperän hiilen sisään- ja ulosvirtauksen välillä saavutetaan eivät samat käytössä olevat viljelykäytännöt enää riitä kasvattamaan hiilivarastoa (Lal 2004a, Fearnside ja Barbosa 1998). Tutkimuksen skenaarioidussa systeemissä tämä tarkoittaisi sitä, että nurmiviljelyllä ja mädätteen käytöllä saavutettaisiin nurmiviljelykierrossa olevilla viljelymailla tasapaino, jossa maasta ei nettomääräisesti vapautuisi hiilidioksidipäästöjä eikä maahan varastoituisi lisää hiiltä ilmakehästä. Mikäli päästöjä haluttaisiin edelleen kompensoida hiilivarastoa kasvattamalla, niin vielä tasapainotilan saavuttamisen jälkeen viljelykäytäntöjä olisi muutettava suuntaan, jossa maahan kohdistuva hiilisyöte kasvaisi ja maan hajotustoiminta vähenisi.

6.3 Erot tuotos- ja hehtaarikohtaisten päästöjen välillä

Tämän tutkimuksen tuloksissa mallinnettujen tuotantosysteemin (NS ja AES+MKT) tuotoskohtaisten päästöjen välillä oli keskimäärin noin 50 % ero kun taas hehtaarikohtaisten päästöjen välillä ero oli vain noin 5 %. Tämä tulos havainnollistaa hehtaarikohtaisiin päästöihin perustuvan päästömittarin yksipuolisuutta ruoan ja ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa.

Hehtaarikohtaisten päästöjen perusteella tässä tutkimuksessa voitaisiin todeta skenaarioidun systeemin lisäävän ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjä hieman nykysysteemiin verrattuna. Tuotoskohtaisia päästötuloksia tarkastellessa voidaan puolestaan todeta

skenaarioidun tuotantosysteemin puolittavan alueella tuotetun ruoan kasvihuonekaasupäästöt nykysysteemiin verrattuna. Tämän tuloksen merkitys laajennettuna koko Suomen ruoantuotantosysteemin tasolle vaatisi kuitenkin laskelmien täydentämistä siten, että nykytilassa rehunviljelyyn keskittyneellä viljavaltaisella alueella tuotetun rehun osuus alueen ulkopuolella tuotettuun kotieläinperäiseen ruokatuotokseen otettaisiin huomioon. Tällöin tuotosyksikköä kohden lasketut erot pienenevät. On pääteltävissä, että nykytilan mukainen tuotanto ei kuitenkaan yllä samaan tuotoskohtaiseen ilmastotehokkuuteen kuin skenaarion mukainen tuotanto, koska nykytilassa hiilensidontaa tai päästösäästöjä ei muodostu.

Vastaavia tuloksia, jossa tuotos- vs. hehtaarikohtaiset päästöt eroavat, on saatu myös luomutuotannon ja tavanomaisen tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vertailussa. Luomutuotannon hehtaarikohtaiset päästöt ovat usein pienemmät tavanomaiseen tuotantoon verrattuna ja tuotoskohtaiset päästöt puolestaan voivat olla merkittävästi pienemmät tavanomaisessa tuotannossa (Roininen ja Katajajuuri 2014).

Ruoan ja ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjä arvioitaessa ja kyseisiin päästöarvioihin perustuvassa päätöksenteossa sekä suosituksissa kannattaisi siis keskittyä ensisijaisesti tuotoskohtaisiin päästöihin tai vähintäänkin huomioida ne hehtaarikohtaisten päästöjen ohella. Maa- ja metsätalousministeriön vuonna 2014 laatimassa ilmasto-ohjelmassa onkin esitetty tavoitteeksi vähentää nimenomaan ruoan litra- ja kilokohtaisia päästöjä säilyttäen samalla kannattavan kotimaisen ruoantuotannon edellytykset (MMM 2017). Myös Regina ym. (2014) korostavat kotimaisen ruoantuotannon tärkeyttä omavaraisuuden kannalta, eivätkä siksi pidä ainakaan tuotannon vähentämistä tavoiteltavana tai ensisijaisena keinona ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Nämä seikat huomioon ottaen ruoantuotannon päästövähennyksissä tulisi tavoitella nimenomaan tuotoskohtaisten päästöjen vähentämistä.

Lisäksi suomalaisissa ravitsemussuosituksissa (2014) on jo huomioitu kestävän kehityksen näkökulma, jonka mukaan ruoan ravitsemuksellisen laadun lisäksi esimerkiksi oppilaitosten ruokailussa tulisi ottaa huomioon myös ruoan ympäristövaikutukset (VRN ym. 2019). Tulevaisuudessa on siis hyvin todennäköisesti odotettavissa ruoan ravitsemuksellisen laadun ja ympäristövaikutusten yhtäaikaista arviointia ja siihen pohjautuvaa päätöksentekoa ja suosituksia.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tuloksiin perustuen kasvintuotantovaltaisen maatalousalueen muuttaminen kohti agroekologisen symbioosin mallia noudattavaa maitokarjatalouden yhdistelmätuotantoa vähentäisi huomattavasti maatalousalueen paikallisia ruokatuotoskohtaisia kasvihuonekaasupäästöjä. Muutos vähentäisi sekä energia- että proteiinimääräisen ruokatuotoksen päästöjä.

Maitokarjatalouden tuominen alueelle lisäisi alueen paikallista ruoantuotantoa. Maitokarjatalouden lisääntymisen myötä lisääntyvä nurmien viljely ja agroekologiseen symbioosiin kuuluva biokaasuntuotanto lannasta ja ylijäämäisestä nurmibiomassasta sekä biokaasun tuotannossa syntyvän mädätteen käyttö peltoviljelyssä puolestaan kompensoisivat tuotannon lisääntyviä kasvihuonekaasupäästöjä. Nämä tekijät selittävät kasvintuotantovaltaisen maatalousalueen ruokatuotoskohtaisten päästöjen vähenemistä noin puolella, samalla kun alueen hehtaarikohtaiset päästöt kasvavat vain noin viisi prosenttia maitokarjatalouden lisääntyessä alueella.

Nautakarjatalouteen perustuva ruoantuotanto on useiden tutkimusten valossa ilmastoa lämmittävien kasvihuonekaasujen osalta hyvin päästöintensiivistä tuotantoa. Sekä globaalisti että kansallisesti nautojen ruoansulatuksen metaanipäästöt muodostavatkin ison osan ruoantuotannon ja koko ruokajärjestelmän kasvihuonekaasupäästöistä. Myös tässä tutkimuksessa maitokarjatalouden lisääminen tarkastellulle alueelle kasvattaisi nautojen ruoansulatuksen metaanipäästöt selvästi suurimmaksi yksittäiseksi kasvihuonekaasupäästölähteeksi. Tästä syystä tämän tutkimuksen tulokset päästövähennyksistä, joihin agroekologisen symbioosin toimintamallin ja maitokarjatalouden lisääminen kasvintuotantovaltaisella alueella johtaisi ovat tärkeitä ja antavat uutta näkökulmaa maitokarjatalouden päästöintensiivisyydelle.

Ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa ehdottoman tärkeää onkin kokonaisvaltainen systeemitarkastelu, joka huomioi mahdollisimman kattavasti kokonaispäästöihin vaikuttavan kokonaisuuden yksittäisiin päästölähteisiin keskittymisen sijaan. Ruoantuotannon päästöjä arvioidessa olisi myös järkevää tarkastella useampia erilaisia

päästömittareita. Kuten tämänkin tutkimuksen tulokset osoittivat, päästömittareina hehtaari- ja tuotoskohtaiset päästöt voivat antaa hyvinkin erilaisia tuloksia. Ruoantuotannon ensisijainen tehtävä on kuitenkin tuottaa ruokaa ja siksi ruokatuotoskohtaisten päästöjen käyttäminen ensisijaisena päästömittarina olisi perusteltua. Tuotoskohtaisiin päästöihin keskittyminen sekä ruoantuotannon ilmastovaikutusten tutkimuksessa, että tutkimustietoon perustuvassa poliittisessä päätöksenteossa olisi siis suositeltavaa. Myös ruoan ravitsemuksellisen laadun huomioiminen ja arvottaminen määrällisen ruokatuotoksen tarkastelun ohella ovat kokonaiskuvan kannalta tärkeitä seikkoja, kun tulevaisuudessa arvioidaan ruoan ilmastovaikutuksia ja muita ympäristövaikutuksia.

Tässä tutkimuksessa skenaarioitu tuotantosysteemi yhdessä agroekologisen symbioosin toimintamallin ja lisääntyvän maitokarjatalouden kanssa tuottaisivat tarkastellulle kasvintuotantovaltaiselle maatalousalueelle ruokatuotoskohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähenemisen lisäksi myös muita tuotannollisia hyötyjä ja ympäristöhyötyjä. Agroekologisen symbioosin toimintamalli ja maitokarjatalouden lisääntyminen muun muassa tehostaisivat ravinteiden kiertoa ja kasvien yhteyttämän energian hyötykäyttöä, lisäisivät alueen ravinne- ja energiaomavaraisuutta, monipuolistaisivat viljelykiertoja sekä parantaisivat viljelymaiden kasvukuntoa ja resilienssiä esimerkiksi vaihtelevia ja äärimmäisiä sääolosuhteita vastaan.

8. KIITOKSET

Kiitokset Juha Heleniukselle ja Kari Koppelmäelle työni erityisen mielenkiintoisesta ja moniulotteisesta aiheesta sekä hyvästä ohjauksesta. Kari Koppelmäelle kiitokset myös työhöni saamasta aineistosta. Kiitokset myös mahdollisuudesta päästä maisterintutkielmani kautta mukaan Ympäristöministeriön rahoittamaan Agroekologisten symbioosien verkostot: ravinne- ja energiaomavarainen alueellinen ruokajärjestelmä- hankkeeseen, jonka toimijoita ovat Helsingin yliopiston maataloustieteiden laitos, Ruralia-instituutti, Luonnonvarakeskus sekä hankkeen yhteistyökumppanit.

LÄHTEET

- Aertens, J., Nocker, L. & Gobin, A. 2013. Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture. *Land Use Policy* 31: 584-594.
- Askegaard, M., Olesen, J.E. & Kristensen, K. 2005. Nitrate leaching from organic arable crop rotations: effects of location, manure and catch crop. *Soil Use and Management* 21: 181-188.
- Butler, J. H. & Montzka, S. A. 2019. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>. Julkaistu 2019, viitattu 4.3.2020.
- Castree, N., Kitchin, R. & Alisdair, R. 2013 *A dictionary of Human Geography*. 1. painos. Oxford, Englanti: Oxford University Press. 11 s.
- Cherr, C., Scholberg, J. & McSorley, R. 2006. Green Manure Approaches to Crop Production: A Synthesis. *Agronomy Journal* 98: 302-319.
- Chertow, M. 2000. Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment* 251: 313-337.
- Conant, R., Paustian, K. & Elliott, E. 2001. Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications* 11: 343-355.
- Crews, T.E. & Peoples, M. B. 2004. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 102: 279-297.
- DeKlein, C., Novoa, R., Ogle, S., Smith, K., Rochette, P. & Wirth, T. 2006. Chapter 11: N₂O Emissions from managed soils and CO₂ emissions from lime and urea application. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 4: Agriculture, Forestry and other Land Use.

- Dong, H., Mangino, J., McAllister, T., Hatfield, J., Johnson, D., Lassey, K., Aparecida de Lima, M. & Romanovskaya, A. 2006. Chapter 10: Emissions from livestock and manure management. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- Eide, M.H. 2002. Life cycle assessment (LCA) of industrial mil production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7: 115-126.
- FAO 2019. FAOSTAT Data, land use.
<http://www.fao.org/faostat/en/#data/EL/visualize>. Julkaistu 2019, viitattu 4.3.2020.
- Fearnside, P. & Barbosa, R. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108: 147-166.
- Freibauer, A., Rounsevell, M., Smith, P. & Verhagen, J. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122: 1-23.
- Frøseth, R., Bakken, A., Bleken, M., Riley, H., Pommeresche, R., Thorup-Kristensen, K. & Hansen, S. 2014. Effects of green manure herbage management and its digestate from biogas production on barley yield, N recovery, soil structure and earthworm populations. *European Journal of Agronomy* 52: 90- 102.
- Garnett, T. 2011. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy* 36: 23-32.
- Guillou, M. & Matheron, G. 2014. *The World's Challenge: Feeding 9 Billion people*. Dordrecht, Netherlands: Springer. 141-183. 226 s.
- Guo, L. & Gifford, R. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis.

Global Change Biology 8: 345-360.

Halmemies-Bauchet-Filleau, A., Vanhatalo, A., Toivonen, V., Heikkilä, T., Lee, M. & Shingfield, K. 2014. Effect of replacing grass silage with red clover silage on nutrient digestion, nitrogen metabolism, and fat composition in lactating cows fed diets containing a 60:40 forage-to-concentrate ratio. *Journal of Dairy Science* 97: 3761-3776.

Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974-2009. *Global Change Biology* 19: 1456-1469.

Heinonsalo 2020. Hiiliopas – katsaus maaperän hiileen ja hiiliviljelyyn perusteisiin. Kaarina, Paino-Kaarina.

Helenius, J., Koppelmäki, K. & Virkkunen, E. 2017. Agroekologinen symbioosi ravinne- ja energiaomavaraisessa ruoantuotannossa. Ympäristöministeriön raportteja 18. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80004/YMra_18_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Julkaistu 2017, viitattu 4.3.2020.

IPCC 2018. Summary for policymakers. Global Warming of 1,5C. IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. s. 24.

IPCC 2019. Summary for policymakers. Climate Change and Land Use, An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. s. 41.

- Janssens, A., Freibauer, A., Schlamadinger, B., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, A., Heimann, M., Nabuurs, G., Smith, P., Valentini, R. & Schulze, E. 2005. The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study. *Biogeosciences* 2: 15-26.
- Janzen, H. 2004. Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104: 399-417.
- Jungmeier, G. & Spitzer, J. 2001. Greenhouse gas emissions of bioenergy from agriculture compared to fossil energy for heat and electricity supply. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 267-273.
- Kaparaju, P. & Rintala, J. 2011. Mitigation of greenhouse gas emissions by adopting anaerobic digestion technology on dairy, sow and pig farms in Finland. *Renewable Energy* 36: 31-41.
- Kekkonen, H. 2015. Maidontuotantotilojen kasvihuonekaasupäästöt kansainvälisessä vertailussa. Pro Gradu-tutkielma. Helsingin yliopiston maataloustieteiden laitos.
- Kirkby, C., Kirkegaard, J., Richardson, A., Wade, L., Blanchard, C. & Batten, G. 2011. Stable soil organic matter: A comparison of C:N:P:S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma* 163: 197-208.
- Koppelmäki, K., Eerola, M., Albov, S., Kivelä, J., Helenius, J., Winqvist, E. & Virkkunen, E. 2016. 'Palopuro Agroecological Symbiosis' A Pilot Case Study on Local Sustainable Food and Farming. Challenges for the New Rurality in Changing World. Proceedings from the 7th International Conference on Localized Agri-Food Systems: 171-172.
- Koppelmäki, K., Parviainen, T., Virkkunen, E., Winqvist, E., Schulte, R.P.O. &

- Helenius, J. 2019a. Ecological intensification by integrating biogas production into nutrient cycling: Modeling the case of Agroecological Symbiosis. *Agricultural Systems* 170: 39-48.
- Koppelmäki, K., Lamminen, M., Helenius, J., & Schulte, R. 2019b. Smart integration of food security and energy sovereignty delivers on multiple ecosystem services. Manuscript.
- Kyttä, V. 2019. Kierrätyslannoitteiden elinkaariset ympäristövaikutukset kauran (*Avena sativa*) tuotannossa. Pro Gradu-tutkielma. Helsingin yliopiston maataloustieteiden laitos.
- Känkänen, H., Suokannas, A., Tiilikkala, K. & Nykänen, A. 2013. Biologinen typensidonta fossiilisen energian säästäjänä. MTT RAPORTTI 76. 2. korjattu painos. MTT Jokioinen.
- Kätterer, T., Andrén, O. & Persson, J. 2004. The impact of altered management on long-term agricultural soil carbon stocks – a Swedish case study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70: 179-187.
- Lal, R. 2004a. Agricultural activities and the global carbon cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70: 103-116.
- Lal, R. 2004b. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304: 1623-7.
- Lal, R. 2007. Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12: 303-322.
- Lal, R. 2018. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* 24: 3285-3301.

- Lehikoinen, E., Parviainen, T., Helenius, J., Jalava, M., Salonen, A.O. & Kummu, M. 2019. Cattle production for exports in water-abundant areas: the case of Finland. *Sustainability* 11: 1075.
- Luke 2018. Tilastotietokanta. Maatalous- ja puutarhayritysten lukumäärä tuotantosunnittain maakunnittain.
https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__02%20Maatalous__02%20Rakenne__02%20Maatalous-%20ja%20puutarhayritysten%20rakenne/05_Maatalous_ja_puutarhayrit_lkm_tuot_maakunta.px/table/table-ViewLayout1/?rxid=5d24db52-1ff6-428d-92ea-2318ff15212a. Viitattu 1.4.2020.
- Maljanen, M., Hytönen, J. Mäkiranta, P., Alm, J., Minkkinen, K., Laine, J. & Martikainen, P. 2007. Greenhouse gas emissions from cultivated and abandoned organic cropland in Finland. *Boreal Environment Research* 12: 133-140.
- Menichetti, L., Ekblad, A. & Kätterer, T. 2015. Contribution of roots and amendments to soil carbon accumulation within the soil profile in a long-term field experiment in Sweden. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 200: 79-87.
- MMM 2017. Maatalouden keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan sektorisuunnitelma.
<https://docplayer.fi/48143904-Maatalouden-keskipitkan-aikavalin-ilmastopolitiikan-sektorisuunnitelma-maa-ja-metsatalousministerio-2017.html>. Julkaistu 2017, viitattu 15.5.2020.
- Mosier, A.R., Duxbury, J.M., Freney, J.R., Heinemeyer, O., Minami, K. & Johnson, D.E. 1998. Mitigating Agricultural Emissions of Methane. *Climatic Change* 40: 39-80.
- Motiva. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla.

https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf. Julkaistu 2013, viitattu 3.3.2020.

- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglesvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. & Zhang, H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom, Cambridge, USA, New York: Cambridge University Press.
- Müller-Stöver, D., Hauggaard-Nielsen, H., Eriksen, J., Ambus, P. & Johansen, A. 2011. Microbial biomass, microbial diversity, soil carbon storage, and stability after incubation of soil from grass – clover pastures of different age. *Biology and Fertility of Soils* 48: 371-383.
- Möller, K. & Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12: 242-257.
- Niskanen, O. & Lehtonen, E. 2014. Maatilojen tilusrakenne ja pellonraivaus Suomessa 2000-luvulla. MTT Raportti 150. MTT Jokioinen.
- O'Brien, D., Shalloo, L., Buckley, F., Horan, B., Grainger, C. & Wallace, M. 2011. The effect of methodology on estimates of greenhouse gas emissions from grass-based dairy systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141: 39-48.
- Palhares, J., Novelli, T., & Morelli, M. 2020. Best practice production to reduce the water footprint of dairy milk. *Revista Ambiente & Agua* 15: 1-10.
- Parviainen, T. & Helenius, J. 2020. Trade imports increasingly contribute to plant

nutrient inputs: case of Finnish food system 1996-2014. *Sustainability* 12: 702.

Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. & Smith, P. 2016. Climate-smart soils. *Nature* 532: 49-57.

Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Wesemael, B., Schumacher, J. & Genesior, A. 2011. Temporal dynamics of soil carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology* 17.

ProAgria. Maatalouden biomassat biokaasulaitoksessa. Opas biomassojen ominaisuuksista syötteenä ja lannoitteena. Proagrian hankejulkaisut 6. https://www.proagria.fi/sites/default/files/attachment/maatalouden_biomassat_biokaasulaitoksessa_opas_s.pdf. Viitattu 3.3.2020.

Reay, D., Davidson, E., Smith, K., Smith, P., Melillo, J., Dentener, F. & Crutzen, P. 2012. Global Agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change* 2: 410-416.

Regina, K., Lehtonen, H., Palosuo, T. & Ahvenjärvi, S. 2014. Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vähentäminen. MTT RAPORTTI 127. MTT Jokioinen.

Riley, H., Pommeresche, R., Eltun, R., Hansen, S. & Korsaeath, A. 2008. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 124: 275-284.

Roininen, T. & Katajajuuri, J.-M. 2014. Osa 4: Ruokavaliomuutoksilla saavutettavat ilmastohyödyt. Ilmastopaneeli – Kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa (toim. Seppälä, J.): 91-98.

Seppälä, A., Kässi, P., Lehtonen, H., Aro-Heinilä, E., Niemeläinen, O., Lehtonen, E.,

Höhn, J., Salo, T., Keskitalo, M., Nysand, M., Winqvist, E., Luostarinen, S. & Paavola, T. 2014. Nurmesta biokaasua liikennepolttoaineeksi. Bionurmi-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 151. MTT Jokioinen.

Sjaunja, L., Baevre, L., Junkkarinen, L. & Pedersen, J. 1990. A Nordic proposal for an energy corrected milk (ECM) formula. Teoksessa: Gaillon, P. & Chabert, Y. (toim.). Performance Recording of Animals. State of Art, 1990. PUDOC, Wageningen, Alankomaat: EAAP Publication no. 50, s. 156-157.

Smith, P., Andrén, O., Karlsson, T., Perälä, P., Regina, K., Rounsevell, M. & Wesemael, B. 2005. Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated. *Global Change Biology* 11.

Smith, P. 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy* 20: 229-236.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towprayoon, S., Wattenbach, M. & Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363: 789-813.

Smith, P. 2012. Soils and climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4: 539- 544.

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Masera, O, Mbow, C., Ravindarath, N., Rice, C., Robledo Abad, C., Romanovskaya, A., Sperling, F. & Tubiello, F. 2014. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom, Cambridge, USA, New York: Cambridge University Press.

- Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Clark, J.M., Adhya, T., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P., Cotrufo, M.F., Elliott, J.A., McDowell, R., Griffiths, R.I., Asakawa, S., Bondeau, A., Jain, A.K., Meersmans, J. & Pugh, T.A.M. 2015. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology* 22: 1008-1028.
- Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Clark, J.M., Adhya, T., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P., Cotrufo, M.F., Elliott, J.A., McDowell, R., Griffiths, R.I., Asakawa, S., Bondeau, A., Jain, A.K., Meersmans, J. & Pugh, T.A.M. 2016. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology* 22: 1008-1028.
- Soussana, J-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chavallier, T., & Arrouays, D. 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20: 219-230.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., de Vries, W., de Wit, C., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G., Persson, L., Ramanathan, V., Reyers, B. & Sörlin, S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347: 736-747.
- Stinner, W., Möller, K. & Leithold, G. 2008. Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *European Journal of Agronomy* 29: 125-134.
- Stockmann, U., Adams, M., Crawford, J., Field, D., Henakaarchchi, N., Jenkins, M.,

Minasny, B, McBratney, A., de Remy de Courcelles, V., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P., Chenu, C., Jastrow, J., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A., Parton, W., Whitehead, D. & Zimmermann, M. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164: 80-99.

Tilastokeskus 2020. Polttoaineluokitus 2020.

https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html. Julkaistu 2020, viitattu 17.4.2020.

Tuomisto, H. & Helenius, J. 2008. Comparison of energy and greenhouse gas balances of biogas with other transport biofuel options based on domestic agricultural biomass in Finland. *Agricultural and Food Science* 17: 240-251.

Turtola, E. & Ylivaino, K. 2009. Suomen kotieläintalouden fosforikierto – sääätöpotentiaali maatiloilla ja aluetasolla. *Maa- ja elintarviketalous* 138. MTT Jokioinen.

UN 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. United Nations A/RES/70/1.

USDA 2015. Composition of Foods. Raw, Processed and Prepared – USDA national nutrient database for standard reference, release 27. U.S. Department of Agriculture – Agricultural Research Service, Beltsville.

Usva, K., Virtanen, E., Hyvärinen, H., Nousiainen, J., Sinkko, T. & Kurppa, S. 2019. Applying water scarcity footprint methodologies to milk production in Finland. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24: 351-361.

Uusitalo, R., Turtola, E., Grönroos, J., Kivistö, J., Mäntylähti, V., Turtola, A., Lemola,

- R. & Salo, T. 2007. Finnish trends in phosphorus balances and soil test phosphorus. *Agricultural and food science* 16: 301-316.
- VandenBygaart, A., Bremer, E., McConkey, B., Janzen, H., Angers, D., Carter, M., Drury, C., Lafond, G. & McKenzie, R. 2010. Soil carbon stocks on long term agroecosystem experiments in Canada. *Canadian Journal of soil science* 90: 543-550.
- VandenBygaart, A., McConkey, B., Angers, D., Smith, W., De Gooijer, H., Bentham, M. & Martin, T. 2008. Soil carbon change factors for the Canadian agriculture national greenhouse gas inventory. *Canadian Journal of soil science* 88: 671-680.
- Van Diegenen, R., Crippa, M., Maenhout, G., Guizzardi, D. & Denetener, F. 2018. Global trends of methane emissions and their impacts on ozone concentrations. JRC Science for Policy Report. Luxemburg: European Union. 95 s.
- Vanhatalo, A, Kuoppala, K., Ahvenjärvi, S. & Rinne, M. 2009. Effects of feeding grass or red clover silage cut at two maturity stages in dairy cows. 1. Nitrogen metabolism and supply of amino acids. *Journal of Dairy Science* 92: 5620-5633.
- Vermeulen, S.J., Campbell, B.M. & Ingram, J.S.I. 2012. Climate Change and Food Systems. *Annual Review of Environmental and Resources* 37: 195-222.
- Voutilainen, O., Wuori, O., & Muilu, T. 2012. Eriytyvät alue- ja maatalouden rakenteet Suomessa maaseutunäkökulmasta. MTT Raportti 64. MTT Jokioinen.
- VRN, Opetushallitus & THL 2019. Hyvinvointia ja yhteisöllisyyttä ruokailusta – ruokailusuositus ammatillisiin oppilaitoksiin ja lukioihin. Oppaat ja käsikirjat 2019:5a. Helsinki: PunaMusta Oy.
- Wagner, S.C. 2011. Biological Nitrogen Fixation. *Nature Education Knowledge* 3:15.

- Wang, J., Cardenas, L., Misselbrook, T., Gilhespy, S. 2011. Development and application of a detailed inventory framework for estimating nitrous oxide and methane emissions from agriculture. *Atmospheric Environment* 45: 1454-1463.
- Yara 2020. Fertilizer life cycle perspective. <https://www.yara.com/crop-nutrition/why-fertilizer/environment/fertilizer-life-cycle/>. Julkaistu 2020, viitattu 17.4.2020.
- Ylivaino, K., Sarvi, M., Lemola, R., Uusitalo, R., & Turtola, E. 2014. Regional P stocks in soil and in animal manure as compared to P requirement of plants in Finland. MTT Report 124. MTT Jokioinen.
- YM 2019. Pariisin ilmastopimus. https://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmastoneuvottelut/Pariisin_ilmastopimus. Ympäristöministeriö. Julkaistu 2018, viitattu 3.3.2020.
- Zomer, R., Bossio, D., Sommer, R. & Verchot, L. 2017. Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. *Nature Scientific reports* 7: 1-8.