

**KOHTI ENERGIAOMAVARAISTA RUOANTUOTANTOA
MAATALOUDEN SIVUVIRTOJEN BIOKAASUTUKSELLA**

Iiris Ryske
Maisterintutkielma
Agroekologia
Helsingin yliopisto
Maataloustieteiden osasto
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Osasto — Sektion — Department			
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Maataloustieteiden osasto			
Tekijä — Författare — Author					
Iiris Ryske					
Työn nimi — Arbetets titel — Title					
Kohti energiaomavaraista ruoantuotantoa maatalouden sivuvirtojen biokaasutuksella					
Oppiaine — Läroämne — Subject					
Agroekologia					
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
Maisterintutkielma		Toukokuu 2021		63	
Tiivistelmä – Referent - Abstract					
<p>Nykymuotoinen ruoantuotanto kuluttaa runsaasti fossiilista energiaa. Samalla menee hukkaan bioenergiaa, jota on sitoutunut maatalouden sivuvirtabiomassoihin, kuten lantaan ja ylijäämänurmiin. Energia voitaisiin ottaa hyötykäyttöön biokaasulaitoksen mädätysprosessissa ja samalla tehostaa ravinteiden kierrätystä, sillä ravinteikasta mädätysjäännöstä voidaan käyttää lannoitteena. Agroekologinen symbioosi on kestäväään ruokajärjestelmään tähtäävä paikallinen toimintamalli, jossa ruoantuotannon toimijat hyötyvät toisistaan biokaasulaitoksen kautta. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten agroekologisen symbioosin soveltaminen vaikuttaa energiaomavaraisuuteen, ravinteiden kierrätykseen, ruoantuotantoon ja maatalouden rakenteeseen kuntatasolla.</p> <p>Tutkimuskohteena oli ahvenanmaalainen Saltvikin kunta, jossa viljellään rehunurmea ja laidunta 40 % osuudella ja viljaa 38 % osuudella maatalousalasta. Kotieläimiä on 0,56 eläinyksikköä maatalouden käytössä olevaa hehtaaria kohden. Ruoantuotannon nykytilanne mallinnettiin tilastotietoon perustuen. Sen pohjalta muodostettiin kolme skenaariota (S1-S3), joissa agroekologisen symbioosin periaatteiden mukaiset muutokset laajenivat asteittain. Ensimmäisessä skenaariossa (S1) nykytilanteeseen lisättiin ainoastaan sivuvirtojen biokaasutus, toisessa (S2) lisäksi 25 % vilja-alasta muutettiin viherlannoitusnurmeksi energiantuotantoon ja kolmannessa (S3) laajemmin 50 % vilja-alasta. Vilja-alan vähentäminen alensi viljarehuomavaraisuutta, mikä korjattiin vähentämällä eläimiä. Eläinten vähennys vapautti rehunurmialaa, jolla kasvatettiin hernettä suoraan ihmisten käyttöön. Siten skenaariot mukailivat mahdollista tilannetta, jossa kasvintuotanto ruoaksi on lisääntynyt ja eläintuotanto vähentynyt.</p> <p>Energiaomavaraisuutta mitattiin laskennallisesti bioenergian tuotannon ja fossiilisen energian kulutuksen suhteena. Energiaomavaraisuusaste nousi skenaarioittain sen ollessa S1:ssä 58 %, S2:ssa 69 % ja S3:ssa 83 %, mikä oli seurausta paitsi energian tuotannon kasvusta myös kulutuksen laskusta. Samalla kierrätysravinteiden osuus lannoituksessa kasvoi. Skenaarioissa lannoitetyypestä oli kierrätettyä alkuperäiseen 46 %:iin verrattuna 5 (S1), 9 (S2) ja 17 (S3) prosenttiyksikköä enemmän ja fosforista alkuperäiseen 70 %:iin verrattuna 3 (S1), 4 (S2) ja 5 (S3) prosenttiyksikköä enemmän. Rehunomavaraisuus säilyi samalla tasolla ja ruoantuotanto lähes samalla tasolla kaikissa skenaarioissa nykytilanteeseen verrattuna.</p> <p>Tutkimus osoitti potentiaalil tuottaa Saltvikissa maatalouden sivuvirroista bioenergiaa yli puolet paikallisen ruoantuotannon fossiilisen energian kulutuksesta ilman maatalouden rakenteen muutosta. Ruoantuotannon muuttuminen kasvintuotantovaltaisemmaksi ja viherlannoitusnurmialan lisääminen nostivat edelleen energia- ja ravinneomavaraisuutta.</p>					
Avainsanat — Nyckelord — Keywords					
Kiertotalous, biokaasu, uusiutuva energia, energiaomavaraisuus, agroekologinen symbioosi, ravinteiden kierrätys, viherlannoitusnurmi					
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited					
Maataloustieteiden osasto					
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information					
Työtä ohjasivat Kari Koppelmäki ja Juha Helenius					

ABSTRACT

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Osasto — Sektion — Department	
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author			
Iiris Ryske			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Towards energy self-sufficient food production by producing biogas from agricultural side streams			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Agroecology			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
M.Sc. Thesis		May 2021	63
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>The modern food production consumes substantial amounts of fossil energy. Meanwhile, the bioenergy that is embedded in the side streams of food production – such as manure and excess grass biomass, is lost. That energy could be utilized by anaerobic digestion in biogas plants, which would also contribute to an efficient nutrient cycling since the nutrient-rich digestate can be used as a fertilizer. Agroecological symbiosis is a local model for a sustainable food system that is based on the cooperative actions of food production stakeholders around a biogas plant. The aim of this study was to discover what the application of agroecological symbiosis would mean for energy self-sufficiency, nutrient cycling, food production and the structure of agriculture on municipal level.</p> <p>The study subject area was the agricultural area in the municipality of Saltvik on Åland, where grassland for forage and pasture cover 40 % and grains 38 % of the agricultural land area. There are 0,56 livestock units per agricultural hectare. The current state of the food production was modeled based on local farming statistics. Based on that, three scenarios (S1-S3) with increasingly wide modifications were created. In the first scenario (S1), only the digestion of side streams in a biogas plant was added compared to the current system. On the second scenario (S2), 25 % of the agricultural land area devoted to grain production was altered to green manure leys, and in the third scenario (S3) 50 %. The reduction of grain area led to a lower degree of local self-sufficiency of grain feed, which was corrected by reducing the number of animals. The released share of grassland for forage was used for cultivating peas for direct human use. That way the scenarios represented a possible situation, where plant-based food production is increased and animal-based is decreased.</p> <p>The energy self-sufficiency was estimated by the relation of potential bioenergy production and fossil energy use. The rate of energy self-sufficiency rose scenario by scenario, as it was 58 % in S1, 69 % in S2 and 83 % in S3 due to the increased amount of bioenergy produced, as well as the decreased amount of fossil energy used. Simultaneously the portion of recycled nutrients used for fertilization was increased. Compared to the 46 % share of recycled nitrogen in the current system, 5, 9 and 17 percentage units more were used in the S1-S3, respectively. As for phosphorus the corresponding percentage units compared to the original 70 % were 3, 4 and 5 in S1-S3, respectively. The local self-sufficiency of feed remained unchanged and the food production nearly unchanged in each scenario compared to the current state.</p> <p>The study demonstrated the current potential to produce renewable energy in Saltvik based on agricultural side streams to a degree that would cover over half of the current fossil energy use of local food production. By shifting the focus of food production towards plant production, and by expanding the area of green manure furthermore increased the energy and nutrient self-sufficiency.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Circular economy, biogas, renewable energy, energy self-sufficiency, agroecological symbiosis, nutrient cycling, green manure leys			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Department of Agricultural Sciences			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			
Supervisors: Kari Koppelmäki and Juha Helenius			

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 KOHTI ENERGIAOMAVARAISTA RUOANTUOTANTOA	7
2.1 Panosintensiivinen moderni ruoantuotanto	7
2.2 Ruoantuotannon riippuvuus uusiutumattomista luonnonvaroista ja fossiilisesta energiasta	8
2.2.1 Fossiilisen energian kulutus ruoantuotannossa.....	8
2.2.2 Intensiivisen maatalouden aiheuttama ympäristökuormitus.....	10
2.2.3 Kestävä tehostaminen ja uusiutuva energia.....	11
2.3 Energian tuotanto ja ruokajärjestelmän energiaomavaraisuus	11
2.3.1 Biokaasuntuotanto maatalan yhteydessä	12
2.3.2 Erilaiset syötemateriaalit.....	12
2.3.3 Biokaasun käyttökohteet ja fossiilisen energian korvaaminen	14
2.3.4 Ravinteiden kierrätys biokaasutuksen lisähyötynä	15
2.3.5 Biokaasuntuotannon potentiaali ja haasteet Suomessa	15
2.4 Kiertotaloudellinen ruoantuotannon malli – agroekologinen symbioosi	17
2.4.1 Agroekologisen symbioosin toimintaperiaatteet.....	17
2.4.2 Viherlannoitusnurmen merkitys agroekologisessa symbioosissa	18
2.4.3 Avoimia tutkimuskysymyksiä.....	20
3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	20
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	21
4.1 Tutkimuskohteen ruoantuotantosysteemin kuvailu	22
4.2 Skenaariot	23
4.3 Aineiston alkuperä ja laskelmat	25
4.3.1 Ruoantuotannon ja rehuomavaraisuuden laskeminen.....	25
4.3.2 Ravinnetaseen ja ravinteiden kierrätyksen laskeminen	27
4.3.3 Energian kulutuksen ja tuotantopotentiaalın laskeminen	30
4.4 Epävarmuudet ja herkkyysanalyysi	32
5 TULOKSET	33
5.1 Energiaomavaraisuus	33
5.2 Rehuomavaraisuus	35
5.3 Viljelyalat ja eläinten lukumäärä	35
5.4 Ruoantuotanto	37

5.5 Ravinteiden kierrätys ja ravinnetaseet	38
5.6 Herkkyysanalyysin tulokset	39
6 TULOSTEN TARKASTELU	41
6.1 Energiaomavaraisuus.....	41
6.2 Ravinneomavaraisuus.....	43
6.3 Maatalouden rakenteen ja ruoantuotannon muuttuminen	45
6.4 Kuntatason tarkastelun hyödyt	46
6.5 Tutkimuksen epävarmuudet ja rajoitteet.....	47
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	48
8 KIITOKSET.....	48
9 LÄHTEET	49
LIITE 1: REHUOMAVARAISUUS SKENAARIOISSA	62
LIITE 2: HERKKYYSANALYYSIN TULOKSET	63

1 JOHDANTO

Nykymuotoinen intensiivinen ruoantuotanto on monilta osin riippuvainen ulkoisista energianlähteistä. Niin maatilan toiminnot, mineraalilannoitteiden tuotanto kuin ruoanjalostuskin kuluttavat runsaasti energiaa, joka on suurimmilta osin fossiilista alkuperää (Pelletier ym. 2011, Ahokas 2013, Ladha-Sabur ym. 2019). Fossiiliset polttoaineet ovat paitsi kasvihuonepäästöjen lähde, myös hupeneva uusiutumaton luonnonvara, ja lisäksi niiden hintojen heilahtelut maailmanmarkkinoilla aiheuttavat epävarmuutta ruoantuotannon toimijoille (Neff ym. 2011, Pelletier ym. 2011). Ruoantuotanto ei ole kestävällä pohjalla, jos se perustuu jatkossakin uusiutumattomiin luonnonvaroihin, joiden hyödyntäminen ja myös tuhlaileva käyttö aiheuttavat negatiivisia ympäristövaikutuksia (Godfray ym. 2010).

Maataloudessa syntyy sivuvirtoina runsaasti biomassaa, jonka sisältämää uusiutuvaa energiaa ei ole otettu laajasti hyötykäyttöön Suomessa (Winqvist ym. 2019). Biokaasutus mahdollistaa esimerkiksi lantaan ja satojätteisiin sitoutuneen energian talteenoton mädätysprosessiin perustuen ja parantaa samalla ravinteiden kierrätystä (Helenius ym. 2020). Ravinteiden parempi kierrätys perustuu siihen, että prosessissa syntyvän mädätysjäännöksen käyttö lannoituksessa korvaa lannan lisäksi mineraalilannoitteiden käyttöä, mikä osaltaan vähentää ruoantuotannon energiankäyttöä (Ahokas 2013).

Kotieläintuotantovaltaisella alueella jatkuvasti muodostuva lanta on biokaasutukseen sopivaa syötettä, mutta etenkin lietelannan korkean vesipitoisuuden ja fosfortyppisuhteen vuoksi sitä kannattaa mädättää yhdessä esimerkiksi nurmimassan kanssa (Luostarinen ym. 2011). Siten saadaan tuotettua paitsi enemmän energiaa, myös sopivan ravinteikasta ja kasveille käyttökelpoista lannoitetta (Luostarinen ym. 2011). Biokaasuntuotanto voi perustua myös yksinomaan nurmiin, joten myös kasvituotantovaltaisilla alueilla voidaan siten tuottaa energiaa ja tehostaa ravinteiden kierrätystä (Koppelmäki ym. 2019). Etenkin biologista typensidontaa hyödyntävät viherlannoitusnurmetyypit ovat oivallisia nurmisyötteen lähteitä, sillä niiden viljely kasvattaa samalla viljelyn typpiomavaraisuutta. Kun viherlannoitusnurmiin ilmacehstä sitoutunut typpi päätyy mädätysjäännökseen, voidaan sen lannoituskäytön aika ja paikka kohdentaa vapaasti tarpeen mukaan muuallekin kuin nurmilohkolle korvaamaan mineraalilannoitteen käyttöä (Seppälä ym. 2014, Helenius ym. 2017).

Ruoantuotannon energiaomavaraisuuden kasvattamiseksi ja samalla ravinteiden käytön tehostamiseksi on kehitetty kiertotaloudellinen agroekologisen symbioosin malli (Helenius ym. 2020). Se perustuu paikallisten ruoantuotannon toimijoiden yhteistyöhön, jonka oleellinen osa on perustaa symbioosin sivuvirtabiomassoja hyödyntävä biokaasulaitos. Energian tuotannon lisäksi biokaasulaitos tehostaa myös paikallista ravinteiden kierrätystä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää agroekologisen symbioosin soveltuvuus ahvenanmaalaiseen Saltvikin kuntaan, jossa on kotieläintuotantoon painottunut maatalouden rakenne. Tutkimuksessa mallinnettiin skenaarioita, joiden tavoitteena oli kasvattaa alueen ruoantuotannon energiaomavaraisuutta. Tutkimus oli osa *Hungry for Saltvik* -hanketta, jota Ympäristöministeriö rahoitti ravinteiden kierrätyksen (RAKI) ohjelman kautta.

2 KOHTI ENERGIAOMAVARAISTA RUOANTUOTANTOA

2.1 Panosintensiivinen moderni ruoantuotanto

Kasvava ja vaurastuva maailmanväestö tarvitsee yhä enemmän ruokaa (Foley ym. 2011). Maatalouden laajentaminen uusille alueille aiheuttaa elinympäristöjen tuhoutumista, biodiversiteetin vähenemistä ja ilmastonmuutosta hillitsevien hiilinielujen menettämistä (Foley ym. 2005, Foley ym. 2011). Maatalousalan laajentaminen ei ole myöskään ollut viime vuosikymmeninä ruoantuotannon lisäämisen kannalta yhtä merkittävää kuin olemassa olevan maatalousmaan käytön tehostaminen (Foley ym. 2011, Pellegrini ja Fernández 2018). Niin sanotusta vihreästä vallankumouksesta 1960-luvulta lähtien tehostamisen ovat mahdollistaneet lähinnä teollisesti tuotettujen mineraalilannoitteiden ja kasvinsuojeluaineiden käyttö, kastelu ja maatalouden raskas koneellistuminen (Tilman 1998, Foley ym. 2011). Kyseisillä panoilla viljelijät ovat saaneet jalostetuista viljelylajeista mahdollisimman paljon irti ja satotasot ovat viime vuosikymmeninä nousseet huomattavasti (Foley ym. 2011, Pingali 2012). Samalla kun ruoantuotanto on muuttunut intensiivisemmäksi, on kotieläintuotannon määrä kasvanut, ja nykyään noin 70 % maatalousalasta liittyy kotieläintuotantoon sisältäen rehun viljelyn ja laidunnuksen (Foley ym. 2011, Van Zanten ym. 2016).

Tehostamisen näkökulmasta on tosin kyseenalaista, kuinka tehokasta on käyttää kasvien tarpeeseen nähden ylimäärin teollisesti tuotettua lannoitetta tai lantaa, jonka ravinteista vain murto-osa päätyy syötyyn ruokaan ja loput ympäristöön (Tilman 1998, Erisman ym. 2008). Myös intensiivistä eläintuotantoa voi pitää maankäytön kannalta tehottomampana kuin kasvintuotantoa suoraan ihmisten käyttöön, sillä vain murto-osa eläimen syömästä rehusta päätyy lopputuotteeseen (Woods ym. 2010). Tehotonta on etenkin kasvattaa rehua hyvin tuottavalla peltoalalla, jolla voitaisiin hyvin kasvattaa ruokaa ihmisille (Foley ym. 2011).

2.2 Ruoantuotannon riippuvuus uusiutumattomista luonnonvaroista ja fossiilisesta energiasta

Panosintensiivisen ruoantuotannon riippuvuus uusiutumattomista luonnonvaroista ilmenee nykymuotoisessa maataloudessa monin tavoin. Panokset voivat olla joko suoraan uusiutumattomaa tai fossiilista alkuperää, tai sitten niiden valmistukseen käytetään fossiilista energiaa. Ruoantuotanto ei voi olla kestävällä pohjalla, jos se nojautuu uusiutumattomiin luonnonvaroihin, jotka ennen pitkää loppuvat (Heleenius ym. 2020). Uusiutumattomien luonnonvarojen hyödynnys on nähtävissä myös ympäristöongelmien yhtenä alkulähteenä etenkin energian ja ravinteiden käyttöön liittyen.

2.2.1 Fossiilisen energian kulutus ruoantuotannossa

Maatalouden käyttämä energia jakautuu suoraan ja epäsuoraan kulutukseen. Suora kulutus tarkoittaa paikan päällä tapahtuvaa energian käyttöä, johon lukeutuvat maatilan koneiden polttoaineet, rakennusten lämmitys ja valaistus sekä viljan kuivaus (Pelletier ym. 2011, Ahokas 2013). Suomessa maatalouden suorasta energian kulutuksesta 45 % oli fossiilista alkuperää vuosien 2010–2016 keskiarvosta lasketuna, kun sähkö ja lämpö oletettiin tuotettavan Suomessa (Luke 2016, SVT 2020b).

Epäsuora energian kulutus tarkoittaa maatilan ulkopuolella tapahtuvaa kulutusta, jonka lopputuotteet hyödynnetään kuitenkin maatilalla. Esimerkiksi lannoitteiden, kasvinsuojeluaineiden ja maatalouskoneiden valmistukseen kuluva energia kuuluu

tähän kategoriaan, joka on usein se suurempi kategoria nykyaikaisessa intensiivisessä maataloudessa (Pelletier ym. 2011, Ahokas 2013). Suurin siivu maatalouden epäsuorasta energiankäytöstä maailmalla ja Suomessakin kuluu typpilannoitteen valmistukseen, jonka osuus maailman kokonaisenergiankulutuksesta on arvioitu olevan 1,1 % (Dawson ja Hilton 2011, Ahokas 2013). Typpeä kyllä riittää ilmakehässä, mutta sen sitominen lannoituksessa käytettävään muotoon ammoniumiksi energiaintensiivisellä Haber-Bosch -menetelmällä perustuu suurimmaksi osaksi maakaasuun, joka on uusiutumaton fossiilinen polttoaine (Wood ja Cowie 2004, Woods ym. 2010). Riippuvuussuhteesta teollisesti tuotettuun typpilannoitteeseen kertoo se, että Erismanin ym. (2008) arvion mukaan noin puolet ihmiskunnasta elää sen varassa. Uusiutumattomien ja yhä niukempien fosforivarantojen louhinta ja prosessointi lannoitekäyttöön nojaavat yhtä lailla fossiiliseen energiaan (Cordell ym. 2009).

Vaikka maatalouden energian kulutus on vain murto-osa koko maailmassa kulutettavasta energiasta tai Suomen tapauksessa koko maan kulutuksesta (Woods ym. 2010, Ahokas ym. 2013), on energian osuus maatalon kokonaiskustannuksissa kasvuun Suomessa, mikä osoittaa ongelman etenkin viljelijän kannalta (Ahokas 2013). Maatilojen talous rasittuu ja epävarmuus lisääntyy, koska esimerkiksi teollisesti tuotettujen lannoitteiden tuotanto perustuu fossiilisiin polttoaineisiin, joiden hinnan nousu ja ailahtelu vaikuttavat myös lannoitemarkkinoihin (Cordell ym. 2009, Woods ym. 2010, Luostarinen ym. 2011).

Kun maatalouden tuotteista tulee ruokatuotteita, linkittyvät maatalouden toiminnot osaksi laajemmin käsitettävää ruokajärjestelmää, jossa energiaa käytetään myös muun muassa kuljetuksiin ja ruoanjalostukseen (Pelletier ym. 2011). Ruoan kuljetuksen lisäksi ruoanjalostuskin perustuu Ladha-Saburin ym. (2019) mukaan pääosin fossiiliseen energiaan. Vaikka Suomessa uusiutuvien energianlähteiden käyttö on viime vuosina kasvanut, elintarviketeollisuuden kuluttamasta energiasta noin puolet on yhä fossiilista alkuperää (SVT 2020c). Myös ruoan hinta on yhteydessä energian hintaan niin kauan kuin se on riippuvainen siitä, joten myös kuluttajat voivat joutua maksamaan riippuvuussuhteen seurauksista (Woods ym. 2010).

2.2.2 Intensiivisen maatalouden aiheuttama ympäristökuormitus

Sen lisäksi, että intensiivinen maataloustuotanto kuluttaa kestävästi luonnonvaroja, aiheutuu panosten käytöstä negatiivisia ympäristövaikutuksia. Panosintensiivisyys on johtanut alueittain liialliseen lannoitteiden käyttöön, ja siihen liittyy myös keskittyneisyys isoihin eläintuotantoyksiköihin, joilla muodostuu ylimäärin lantaa (Ramankutty ym. 2018). Maataloudesta aiheutuva ravinnekuormitus on vahvasti yhteydessä vesistöjen pilaantumiseen ympäri maailmaa (Tilman 1998, Foley ym. 2005, Potter ym. 2010). Suomessa maatalous on alueellisesti eriytynyttä kotieläintuotantoon ja kasvintuotantoon, mikä vaikeuttaa ravinteiden tehokasta kierrätystä (Luostarinen ym. 2011, Marttinen ym. 2017). Kotieläinvaltaisilla alueilla on puutetta pelloista, joille levittää ravinnepitoista lantaa ja kasvintuotantoalueet tukeutuvat puolestaan teollisiin lannoitteisiin ravinteita saadakseen (Koppelmäki ym. 2021a). Sisävesissä ja Itämeressä onkin havaittu huomattavaa ravinnekuormitusta ja siitä aiheutuvaa rehevöitymistä ja hypoksiaa, eli happikatoa (Uusitalo ym. 2007a, Sonesten ym. 2018).

Eläinten ruokinnassa käytettävällä tuontirehulla on myös rooli ravinteiden kasautumisessa kotieläinkestittymiin. Tuontirehun mukana tuotantoalueelle kulkeutuu ja jää ravinteita, sillä vaikka tuotettu ruoka vietäisiin pois alueelta, eläinten lanta ja samalla pääosa ravinteista jäävät tuotantoalueelle (Parviainen ja Helenius 2020). Suomessakin kotieläinkestittymissä käytetään nykyään paljon tuontirehua, mikä osaltaan vaikuttaa ravinteiden alueelliseen kerääntymiseen (Uusitalo ym. 2007a, Parviainen ja Helenius 2020). Ravinnekuormitus on selvä merkki kierrätyksen epäonnistumisesta. Tällöin ravinteet eivät kierrä ruoantuotannossa tehokkaasti, vaan ne virtaavat lineaarisesti palautumatta kiertoon.

Myös ilmasto kuormittuu nykyaikaisen intensiivisen maatalouden kasvihuonekaasupäästöistä, jotka kattavat vajaa kolmanneksen koko maailman kasvihuonekaasupäästöistä (Foley ym. 2011, Ramankutty ym. 2018). Metaani, dityppioksidi ja hiilidioksidi ovat merkittävimmät maatalouden kasvihuonepäästöt, jotka edistävät ilmastomuutosta (Woods ym. 2010). Niitä vapautuu ilmakehään huomattavia määriä esimerkiksi maatalouskoneiden käytöstä, fosfori- ja typpilannoitteiden energiantensiivisestä valmistuksesta, typpilannoituksen tai lannan peltolevityksen aikana ja märehäntäjien ruoansulatuksessa (Woods ym. 2010, Brentrup ym. 2016).

Suomen kasvihuonekaasupäästöistä noin 20 % on peräisin maataloudesta (Regina ym. 2014).

2.2.3 Kestävä tehostaminen ja uusiutuva energia

Vesistöjen ja ilmaston ravinne- ja kasvihuonekaasukuormituksella on ihmiskunnan terveyttä ja olemassaoloa uhkaavat vaikutuksensa monella eri tavalla, mutta negatiiviset ympäristövaikutukset rapauttavat myös tukipilareita, joihin ruoantuotanto itse tukeutuu. Jotta ruokaa voidaan tuottaa tulevaisuudessakin, tulisi ympäristön kyetä vastaisuudessakin tarjoamaan välttämättömiä ekosysteemipalveluja, joita ovat esimerkiksi maaperän hedelmällisyyttä ylläpitävä hajottajayhteisö, pölytys ja kasviravinteiden ja hiilen kiertokulku. Niiden häiriöt ovat intensiivisen maatalouden seurauksena lisääntyneet, mikä voi aiheuttaa vaikeuksia tuottaa ruokaa tulevaisuudessa (Vitousek ym. 1997, Bommarco ym. 2013). Tavoitteena voi Tilmanin (1998) ja Foleyn ym. (2011) mukaan pitää tuottavuuden kasvattamista vähemmillä ympäristöhaitoilla, tätä kutsutaan myös kestäväksi tai ekologiseksi tehostamiseksi (Rockström ym. 2017).

Fossiilisen energian rajallisuus ja päästöt tekevät ongelmalliseksi ruoantuotannon riippuvuuden siihen. Jos ruoantuotannon tehostamista jatketaan kuten tähänkin asti pääosin fossiilisiin perustuvia panoksia lisäämällä, riippuvuussuhde vahvenee entisestään ja negatiiviset ympäristövaikutukset jatkuvat (Woods ym. 2010), mikä ei ole kestävä tehostamisen periaatteiden mukaista. Uusiutuvaan energiaan siirtyminen tarjoaa kuitenkin mahdollisuuksia tehostaa ruoantuotantoa kestävällä tavalla (Pimentel ym. 1999, Woods ym. 2010). Niin voidaan välttää osa ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöistä ja purkaa epäluotettavaa ja kestävyiden kannalta huonoa riippuvuussuhdetta fossiilisperäiseen energiaan.

2.3 Energian tuotanto ja ruokajärjestelmän energiaomavaraisuus

Aurinkoenergia, tuulivoima ja vesivoima ovat uusiutuvaa energiaa, mutta myös eloperäinen aines eli biomassa on uusiutuvan energian lähde (Angelis-Dimakis ym. 2011). Biomassaa voidaan polttaa suoraan tai siitä voidaan jalostaa polttoainetta, ja

etenkin biomassan mädätykseen perustuva biokaasun tuotanto on kehittynyt ja lisääntynyt viime vuosina Euroopassa (Angelis-Dimakis ym. 2011). Ruoantuotantosysteemissä muodostuu biomassaa, ja siten se voi siis paitsi kuluttaa energiaa toimintoihinsa ja panoksiinsa, myös tuottaa bioenergiaa käyttöönsä. Siten voidaan tarkastella ruoantuotantosysteemin energiaomavaraisuutta eli energian tuotannon suhdetta kulutukseen. Tässä tutkimuksessa keskityttiin maatalouden biomassoihin perustuvaan biokaasuntuotantoon, joka mahdollistaa kiertotalouden toimintaperiaatteilla tuotantopanosten tehokkaamman käytön ja samalla vähentää negatiivisia ympäristövaikutuksia.

2.3.1 Biokaasuntuotanto maatalan yhteydessä

Alkutuotannossa maatalan yhteydessä energiaa voidaan tuottaa biokaasulaitoksessa maatilalla muodostuvaa eloperäistä ainesta mädättämällä. Mädätysprosessissa mikrobit hajottavat eloperäistä ainesta hapettomissa olosuhteissa ja syntyy polttoaineena käytettävää biokaasua, joka sisältää lähinnä metaania ja hiilidioksidia (Massé ym. 2011). Biokaasulaitoksessa säädellään olosuhteet siten, että mikrobit tuottavat biokaasua tasaisesti ja runsaasti. Se tarkoittaa esimerkiksi syötemateriaalin ominaisuuksien ja syöttötahdin optimointia sekä lämpötilan ja pH-arvon säätöä (Ahlberg-Eliasson ym. 2017).

Biokaasulaitoksia on erilaisia. Yleisimpiä ovat märkämädätyslaitokset, joissa sekoi-tussäiliöön pumpataan syötettä (Latvala 2009, Motiva 2013). Esimerkiksi vesipitoi-nen lietelanta sopii hyvin märkämädätyslaitoksen pääasialliseksi syötteeneksi. Kuiva-mädätyslaitoksissa sen sijaan kasataan ilmatiiviiseen tilaan kuiva-ainepitoisuudelta korkeampaa syötettä, kuten nurmimassaa, ja kasan läpi valutetaan vettä (Latvala ym. 2009, Motiva 2013). Kaasu kerätään laitokselta varastoitavaksi, jalostettavaksi tai käyttökohteeseen (Latvala 2009).

2.3.2 Erilaiset syötemateriaalit

Biokaasuntuotanto energiakasveista, kuten maissista, on jo arkipäivää esimerkiksi Saksassa (Marttinen ym. 2013), jossa tuotetaan kansallisen tukijärjestelmän

seurauksena noin puolet EU:n biokaasusta (Scarlat ym. 2018). Energiakasveihin perustuva tuotanto ei ole kuitenkaan ongelmattonta, sillä niiden viljely on panosintensiivistä ja vie tilaa ruoantuotannolta (Foley ym. 2011, Britz ja Delzeit 2013).

Maataloudessa syntyy kuitenkin sivuvirtoja, esimerkiksi lantaa ja satojätettä, joita voidaan yhtä lailla käyttää biokaasuntuotannon syötemateriaaleina. Saksassakin on viime vuosina pyritty kestävyuden nimissä lisäämään sivuvirtaisten syötteiden käyttöä suhteessa varsinaisiin energiakasveihin (Marttinen ym. 2013, Winqvist ym. 2019). Jos energiaa tuotetaan sivuvirroista, ei kilpailua ruoantuotannon kanssa synny. Samalla otetaan askel kiertotalouden suuntaan, kun sivuvirtainen resurssi hyödynnetään tehokkaasti ja sille löytyy uusi tarkoitus ja arvo. Kotieläintuotannoltaan intensiivisessä Tanskassa onkin panostettu nimenomaan lannan hyödyntämiseen biokaasuntuotannossa (Marttinen ym. 2013). Lannan energiantuotto on kuitenkin usein matala ilman lisäsyötteitä, mikä on aiheuttanut ongelmia saada laitokset taloudellisesti kannattaviksi (Marttinen ym. 2013, Tufaner ja Avşar 2016).

Syötteiden välillä voi olla suuria eroja siinä, kuinka paljon niistä saadaan tuotettua biokaasua. Sitä mitataan biometaanintuottopotentialilla (BMP), joka kuvaa teoreettisesti suurinta tuotettavaa määrää biometaania syötteen orgaanista kuiva-ainekilogrammaa kohti normaalipaineessa litroina ($\text{NI CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ VS}$, volatile solids). Esimerkiksi lehmän lannan BMP on matalampi kuin maissin tai nurmen (Taulukko 1), joiden potentiaaliin vaikuttavat myös korjuuajankohta ja lajit tai lajikkeet (Ward ym. 2008). Niinpä eläinlannan ja kasvibiomassan yhteismädätyksellä on usein etua energiantuoton kannalta verrattuna pelkän lannan mädättämiseen (Seppälä ym. 2013). Useamman syötteen yhteismädätyksellä voidaan myös vaikuttaa mädätysjäännöksen hiili-typpisuhteeseen, joka olisi hyvä olla metaanintuottopotentialin saavuttamiseksi noin 20:1 (Amon ym. 2007, Ward ym. 2008).

Taulukko 1. Eri syötteiden BMP:n vaihteluväli eräisiin tutkimuksiin perustuen.

Syöte	NI CH ₄ kg ⁻¹ VS	Viitteet
Lehmän lanta	131-230	Lehtomäki ym. 2007, Amon ym. 2007, Seppälä ym. 2013, Seppälä ym. 2014, Kafle ja Chen 2016
Nurmi	253-394	Seppälä ym. 2009, Wahid ym. 2015
Maissi	268-419	Amon ym. 2007, Schittenhelm 2008, Bruni ym. 2010, Seppälä ym. 2013

Kotieläinvaltaisilla alueilla Suomessa syntyy paljon hyödynnettävää lantaa. Kasvi-biomassan käyttöä lisäsyötteenä biokaasulaitoksessa suositellaan esimerkiksi Luostarisen ym. (2011) lannan käsittelyn vaihtoehtoja vertailevassa raportissa. Etenkin Suomen yleisimmän viljelykasvin nurmen käyttö biokaasutuksen syötteenä on herättänyt kiinnostusta (Seppälä ym. 2014, Rasi ym. 2019). Luostarisen ym. (2011) ja Mosestin ym. (2017) mukaan nurmea kannattaa käyttää energiatuoton kannalta lisäsyötteenä, vaikka nurmen viljely kuluttaa energiaa ja nurmisyötteen käyttö kasvattaa biokaasulaitoksen energian kulutusta muun muassa raskaamman sekoittamisen takia.

2.3.3 Biokaasun käyttökohteet ja fossiilisen energian korvaaminen

Biokaasua voidaan käyttää lämmön- ja sähköntuotantoon sekä biometaaniksi puhdistettuna liikennepolttoaineena kaasukäyttöisissä ajoneuvoissa (Motiva 2013, Seppälä ym. 2014). Biometaania voi myös syöttää maakaasuverkostoon, jos sellainen sijaitsee laitoksen lähistöllä. Suomessa maataloilla tuotetaan yleensä sähköä ja lämpöä yhteistuotantona eli CHP-tuotantona (combined heat and power) (Latvala 2009). Siten saavutetaan erillistuotantoa korkeampi hyötysuhde, eli biokaasun sisältämästä energiasta saadaan muutettua lämpö- ja sähköenergiaksi suurempi osuus pienemmällä hävikillä (Hakawati ym. 2017).

Maatilalla voidaan siis korvata fossiilisen energian käyttöä uusiutuvalla energialla lämmityksessä ja sähkönkulutuksessa, sekä ajoneuvojen ja työkoneiden polttoainekulutuksessa, mikäli liikennepolttoainetta jalostetaan ja ajoneuvot ovat kaasukäyttöisiä. Energiaa voidaan suunnata myös elintarviketeollisuuden käyttöön ja ruoan kuljetuksien polttoaineeksi. Siten koko ruokajärjestelmän energiaomavaraisuus kasvaa ja riippuvuus ulkoisista, mahdollisesti fossiilisista energianlähteistä vähenee. Kansallinen huoltovarmuuskin paranee, kun kotimaisen uusiutuvan energian tuotanto lisääntyy (Mutikainen ym. 2016).

2.3.4 Ravinteiden kierrätys biokaasutuksen lisähyötynä

Sivuvirtoihin perustuva biokaasuntuotanto vaikuttaa energiaomavaraisuuteen, mutta se linkittyy vahvasti myös maatalouden ravinnekiertoon. Sen lisäksi, että biokaasulaitos tuottaa energiaa, syntyy sivutuotteena ravinnepitoista mädätysjännöstä, joka voidaan hyödyntää lannoitteena kasvintuotannossa (Luostarinen ym. 2011).

Kun kotieläinten lanta käy läpi biokaasulaitoksen mädätyskäsittelyn, muuttuu osa lannan orgaanisesta tyyppistä kasveille käyttökelpoiseen muotoon ammoniumiksi (Möller ja Müller 2012, Nkoa 2014). Siten mädätysjännöksellä voidaan saada käsittelemätöntä lantaa parempi lannoitusvaikutus kasveille. Mädätysjännös tulee kuitenkin varastoida katetusti ja levittää peltoon huolellisesti sijoittamalla, jotta vältetään kaasumaiset ammoniakkipäästöt, joiden riski kasvaa lannan mädätyksen taakia (Möller ja Stinner 2009, Luostarinen ym. 2011, Nkoa 2014).

Ravinteiden kierrätys ja maataloussysteemin ravinneomavaraisuus kasvavat etenkin silloin, kun lisäsyötteenä on lannan lisäksi muutakin materiaalia, kuten nurmea (Müller-Stöver ym. 2016). Nurmen ravinteet päätyvät mädätysjännökseen ja siten saadaan lisää kierrätyslannoitetta maatalouden käyttöön. Lannan ja kasvimassan yhteismädätyksestä on hyötyä myös lopputuotteen käytettävyydelle lannoituksessa, sillä pelkän lannan tyyppipitoisuus on usein liian matala kasveille ja toisaalta fosforipitoisuus liian korkea ympäristötuen ehtojen näkökulmasta (Luostarinen ym. 2011). Käyttämällä kasvimassaa lisäsyötteenä lannalle jäännöksen typpi-fosforisuhde siis nousee lannoituskäyttöön sopivammaksi.

2.3.5 Biokaasuntuotannon potentiaali ja haasteet Suomessa

Suomessa olevista maatilakoon biokaasulaitoksista tuoreimmat tiedot ovat peräisin vuosilta 2018–2019. Silloin niitä oli noin 20 kappaletta ja energiaa tuotettiin vuosittain noin 15 GWh, joka oli alle kaksi prosenttia Suomen koko biokaasuntuotannosta (Huttunen ym. 2018, SBB 2018, SVT 2020a). Suurin osa Suomessa tuotetusta biokaasusta on peräisin jätevesilaitoksilta, kaatopaikkakeräämöiltä ja yhteiskäsittelylaitoksilta (SVT 2020a). Marttisen ym. (2015) mukaan maatalouden potentiaali

Suomessa olisi tuottaa biokaasuttamalla 8600 GWh energiaa lannasta, ylijäämänurmista ja satojätteistä, kun huomioon otettiin myös teknistaloudelliset rajoitukset. Näin ollen huomattavan suuri osa potentiaalista on hyödyntämättä.

Suomessa maanviljelijöiden kiinnostus tuottaa biokaasua maatalouden yhteydessä onkin viime vuosina tunnustettu (Marttinen ym. 2013, Winqvist ym. 2019). Uusiutuvan energian tuotannon ja ravinteiden kierrätyksen tehostamisen mahdollisuudet biokaasutuksen avulla on huomattu myös päättävällä taholla, ja nimenomaan hajautetussa maatilojen biokaasuntuotannossa nähdään potentiaalia (Valtioneuvosto 2020). Energiakasvien viljelyyn ei Suomessa ole suurissa määrin ryhdytty, vaan sivuvirtojen potentiaalinen hyödynnyks ruoantuotannon ohella nähdään tavoiteltavana (Valtioneuvosto 2020). Etenkin yksivuotisten kasvien viljely energiantuotantoon onkin todettu Suomen oloissa ongelmalliseksi, jos halutaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, sillä saatava sato jää Suomen oloissa alhaiseksi siihen käytettyihin energiapanoksiin nähden (Sinkko ym. 2010).

Kannattavuuden ongelma on tunnustettu Suomessakin etenkin maatilatason biokaasulaitoksissa, joiden volyyymi on suhteellisen pieni, ja jotka eivät saa merkittävää tuloa syötteiden vastaanottamisesta porttimaksuperiaatteella (Winqvist ym. 2019, Valtioneuvosto 2020). Ongelmaan on pyritty valtion puolesta vaikuttamaan eri ohjaukskeinoin, esimerkiksi myöntämällä investointitukea (Marttinen ym. 2013), sillä yhteiskunnalla on halua tukea ja kannustaa ravinteiden kierrätystä ja uusiutuvan energian tuotantoa (Winqvist 2019). Marttinen ym. (2013) ja Seppälä ym. (2014) näkivät biokaasualan kasvun edistämiseksi tarpeelliseksi ajattelumallin muuttamisen kokonaisvaltaisemmaksi käsittäen biokaasulaitoksen roolin niin energiantuotannossa kuin ravinteiden kierrätyksessä ja jätteiden käsittelyssäkin, minkä tulisi näkyä myös tukipolitiikassa. Toisaalta Winqvistin (2019) haastattelututkimuksessa selvisi, että viljelijät pitävät biokaasulaitoksesta saamiaan lisähyötyjä, kuten lannan käsittelyä ja ravinteiden tehokkaampaa kierrätystä, myös taloudellisesti merkittävänä. Niistä saatava säästö esimerkiksi ostolannoitteen tarpeen vähentymisenä ei välttämättä tule ilmi biokaasulaitoksen kannattavuuslaskelmissa. Marttinen ym. (2015) ja Winqvist ym. (2018) ennustivat kierrätyslannoitteiden myynnin merkityksen kasvavan suomalaisten maatilojen taloudessa tulevaisuudessa. Potentiaalia

olisi myös siinä, että biokaasusta jalostettaisiin biometaania raskaaseen liikenteeseen, jonka polttoaineen kulutus on tasaista ja ennakoitavaa (Valtioneuvosto 2020).

Tuotantomallien vakiintuminen ja tukijärjestelmän toimivuuden kehittäminen ovat Suomessa kuitenkin vielä kesken ja biokaasualan kasvupyrähdystä saadaan vielä odottaa. Sitran julkaiseman selvityksen (Mutikainen ym. 2016) mukaan tukijärjestelmän keskeinen ongelma on se, että investointitukea ei myönnetä, jos energian myynti ulos tilalta on merkittävää. Investointitukea ja sähkönsyöttötariffia eli sähkön takuuhintaa ei myönnetä myöskään samalle tuotantolaitokselle (Mutikainen ym. 2016).

2.4 Kiertotaloudellinen ruoantuotannon malli – agroekologinen symbioosi

Ruokajärjestelmän haasteisiin vastaamaan ja biokaasun tuotannon edistämiseksi on kehitetty Helsingin yliopiston tutkijoiden ja ruoantuotannon toimijoiden yhteistyönä kestävän maataloustuotannon malli nimeltä agroekologinen symbioosi (Koppelmäki ym. 2016, Helenius ym. 2017, Helenius ym. 2020). Agroekologinen symbioosi on ravinteita kierrättävä ja energiaa symbioosin käyttöön tuottava paikallinen ja yhteisöllinen ruoantuotantomalli. Agroekologisuus viittaa kokonaisvaltaisesti kestäväan ja ekologisiin menetelmiin perustuvaan toimintatapaan (Helenius ym. 2017). Symbioosi on puolestaan viittaus eliöiden yhteiselon muotoon, josta jokainen osallinen hyötyy. Termiä on aiemminkin käytetty teollisessa ekologiassa kuvaamaan kiertotaloudellista teollista symbioosia, joka perustuu materiaalien tehokkaan käyttöön ja suljettuun kierrätykseen paikallisesti, kun toimijat sijaitsevat maantieteellisesti lähekkäin toisiaan (Chertow ym. 2000).

2.4.1 Agroekologisen symbioosin toimintaperiaatteet

Agroekologisessa symbioosissa paikalliset ruokajärjestelmän toimijat eli käytännössä maatilat ja ruoanjalostusyksiköt hyötyvät toisistaan, kun alueelle tuodaan biokaasulaitos, joka tuottaa uusiutuvaa energiaa sivuvirroista symbioosin käyttöön ja kierrättää ravinteita (Koppelmäki ym. 2016). Siten symbioosin riippuvuus ulkoisista energia- ja ravinnepanoksista vähenee. Paikallisuus mahdollistaa tiiviin

yhteistyön symbioosin osallisten välillä. Agroekologisen symbioosin paikallisuus määrittyy sen mukaan, että materiaalien kuljettaminen toimijoiden välillä on kannattavaa ja kestävää (Helenius ym. 2020). Tavoitteena on irrottaa ruoantuotanto riippuvuudesta fossiiliseen energiaan ja muodostaa ravinne- ja energiaomavarainen ruoantuotantomalli, joka on monistettavissa eri paikkoihin (Helenius ym. 2017). Ideaalimallissa myös kuluttajat ovat osa symbioosia, eli agroekologisen symbioosin tuottama ruoka kulutetaan paikallisesti, minkä on tarkoitus lisätä myös ruoan arvostusta ja vahvistaa paikallista ruokakulttuuria (Helenius ym. 2017). Pilottihanke Palopuron kylässä Etelä-Suomen Hyvinkäällä on tähän mennessä tuottanut tietoa käytännön toteutuksesta (Koppelmäki ym. 2019), ja lisäksi Koppelmäki ym. (2021b) mallinsivat agroekologista symbioosia kasvintuotantovaltaisen Mäntsälän kunnan alueelle.

Energiantuotannon ei ole tarkoitus kilpailla ruoantuotannon kanssa agroekologisessa symbioosissa, vaan se perustuu ruoantuotannon sivuvirtojen hyödyntämiselle (Helenius ym. 2017). Mikäli alueella on kotieläimiä, niiden lanta kierrätetään biokaasulaitoksen kautta. Luonnonhoitopelloilta ja suojavyöhykkeiltä kerätään kasvi-biomassaa biokaasutukseen, ja lisäksi viljelykierrossa on viherlannoitusnurmia, joilta kerätään sato biokaasutusta ja edelleen ravinteiden tehokasta kierrätystä varten (Koppelmäki ym. 2016, Helenius ym. 2017).

2.4.2 Viherlannoitusnurmen merkitys agroekologisessa symbioosissa

Viherlannoitusnurmilla on erityinen rooli agroekologisessa symbioosissa. Tavallisesti viherlannoituksessa yksi- tai monivuotinen palkokasvinurmi sitoo tyypeä ilmakehästä, kasvusto muokataan maahan ja viljelykierrossa seuraava kasvi, esimerkiksi vilja, hyötyy lohkolla olevasta tyypestä (Stinner ym. 2008, Känkänen ym. 2013). Käytäntö on tärkeä osa etenkin luomukasvinviljelyn ravinnetaloutta, jos lannoitukseen ei ole saatavilla kotieläinten lantaa eikä mineraalilannoitteita saa käyttää. Agroekologisessa symbioosissa viherlannoitusnurmen kasvusto korjataan biokaasulaitoksen syötteeksi ja vasta mädätysjäännös muokataan maahan. Siten voidaan ohjata ilmakehästä sidottua tyypeä muillekin viljelylohkoille ja ajoittaa lannoitus tarkemmin kasvin tarpeen mukaan, samalla kun hyödynnetään kasvuston sisältämä

energia (Stinner ym. 2008, Möller ja Müller 2012). Maatalouden ravinneomavaraisuus kasvaa, sillä kasvuston sisältämä typpi vähentää tarvetta lannoittaa kasvustoa muilla keinoin (Känkänen ym. 2013). Siten etenkin biologista typensidontaa hyödyntävät kasvit kuten apila ovat kokonaisuuden kannalta hyviä vaihtoehtoja biokaasutuksen syötteenä (Tuomisto ja Helenius 2008, Stinner 2015, Müller-Stöver ym. 2016). Kasvihuonekaasupäästöt ja riippuvuus fossiilisesta energiasta vähenevät, kun bioenergialla korvataan suoraa fossiilisen energian käyttöä ja mineraalilannoitteiden käytön vähennyksellä epäsuoraa energiankulutusta.

Esimerkiksi Frøseth ym. (2014) raportoivat, että viherlannoitusnurmelta biokaasutukseen kerätystä typestä vain noin 45 % piti palauttaa alkuperäiselle lohkolle, jotta seuraavaksi viljellyn ohran satotaso säilyi samana kuin tavanomaisessa viherlannoitusmenettelyssä. Siten yli puolet typestä voitiin kohdentaa muiden peltojen lannoitukseen. Viherlannoitusnurmet muokataan maahan tyypillisesti syksyllä, vaikka seuraavan kevätkylvetyn kasvin lannoitustarve on korkeimmillaan vasta seuraavana keväänä (Känkänen ym. 2013). Nurmen korjuu pois pelloilta voi vähentää ravinnekuormitusta vesistöihin, sillä etenkin märkinä talvina ravinteita voi huuhtoutua peltoon muokatusta nurmimassasta (Möller ja Stinner 2009, Möller ja Müller 2012).

Agroekologisen symbioosin pilottihanketta mallintavassa tutkimuksessa kolmen maatilan ja yhden leipomon symbioosi saavutti energiayliomavaraisuuden tuottamalla energiaa sivuvirtojen biokaasutuksella niin paljon, että siitä 40 % jäi ylimääräiseksi symbioosin oman käytön jälkeen (Koppelmäki ym. 2019). Kyseessä oli luomukasvintuotantoon painottuva maatalous, jossa viherlannoitusnurmi oli biokaasulaitoksen pääasiallinen syöte. Koppelmäen ym. (2021b) tutkimuksessa mallinnettiin agroekologista symbioosia kasvintuotantovaltaiselle Mäntsälän alueelle korvaamalla skenaariossa 20 % osuus yksivuotisten kasvien viljelystä monivuotisella viherlannoitusnurmella biokaasutusta varten. Toisessa skenaariossa vastaavalla osuudella viljeltiin rehunurmea, jota alueelle tuotavat lypsylehmät hyödyntäisivät ja vasta niiden lanta vietiin biokaasutettavaksi. Viherlannoitusnurmen suora biokaasutus osoittautui energian tuotannon kannalta paremmaksi vaihtoehdoksi, vaikka ruoantuotanto vähenikin hieman. Eläinten tuominen alueelle puolestaan

lisäsi ruoantuotantoa, mutta energian tuotannossa ei ylletty edes maatalouden suoran kulutuksen tasolle.

2.4.3 Avoimia tutkimuskysymyksiä

Tutkimukset agroekologisen symbioosin soveltamisesta ovat painottuneet kasvin- tuotantovaltaisille alueille, joissa pääasiallinen biokaasutuksen syöte on ollut lähtökohtaisesti nurmibiomassa, jolle ei ole rehukäyttöä. Siten avoimeksi on vielä jäänyt agroekologisen symbioosin soveltuvuus muun tyyppiseen maatalouden rakentamiseen. Jos alkuasetelma onkin se, että lanta on biokaasutuksen pääasiallinen syöte, miten agroekologinen symbioosi saavuttaa energiaomavaraisuuden tavoitteen kilpailematta ruoantuotannon kanssa? Eläinten lanta sellaisenaan ei välttämättä ole alhaisen metaanintuottopotentialinsa vuoksi riittävä syöte energiaomavaraisuuden saavuttamiseksi. Myös mädätysjäännöksen ravinnekoostumuksen optimoinnin kannalta fosforipitoisen lannan lisäksi typpipitoisen nurmen käyttö biokaasutuksen lisäsyötteenä voi olla paikallaan. Energiakäyttöön suunnattujen nurmien viljely muiden kasvien sijaan voi puolestaan vähentää ruoantuotantoa.

Energiaomavaraisuutta on tarkasteltu maatalouden suoraan energian kulutukseen nähden (Koppelmäki ym. 2021b), eikä huomioon ole otettu esimerkiksi mineraalilannoitteiden valmistuksen epäsuoraa energian kulutusta. Myös tieto elintarvikkeiden jalostuksen kuluttaman energian osuudesta agroekologisessa symbioosissa on vajavaista, sillä se on ollut mukana vain Koppelmäen ym. (2019) tutkimuksessa, jossa leipomo kulutti osan energiasta.

3 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

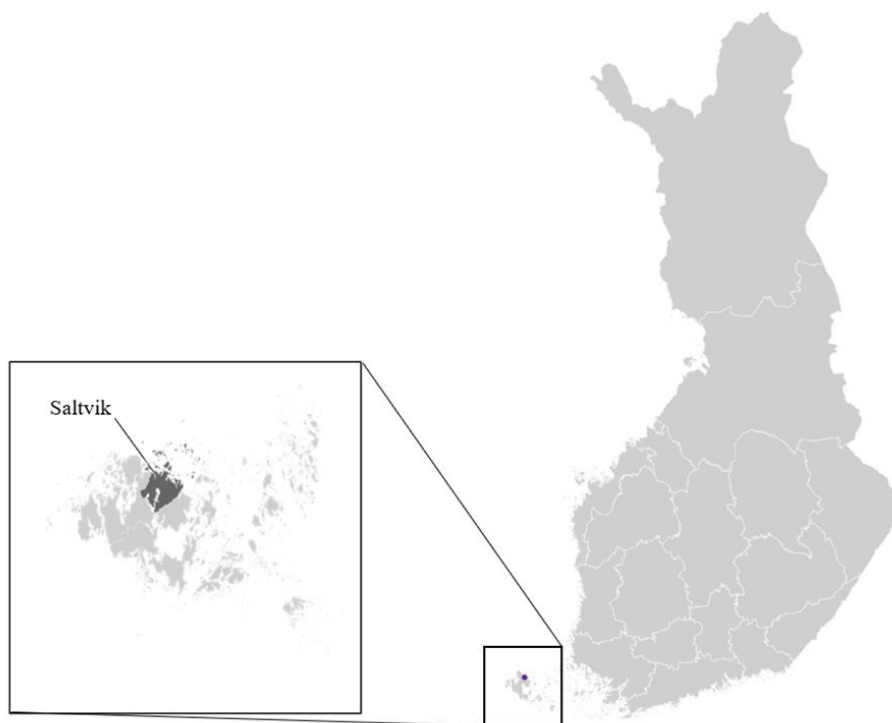
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ruoantuotantosysteemin laskennallinen potentiaali lisätä maatalousvaltaisen kunnan energiaomavaraisuutta korvaamalla käyttämäänsä fossiilista energiaa bioenergialla, kun biokaasuntuotanto integroitaisiin ruoantuotantoon. Taustalla oli agroekologisen symbioosin toimintamalli, johon liittyy biokaasutusyksikön lisäksi viherlannoitusnurmialan kasvattaminen. Osatavoitteena oli tarkastella energiaomavaraisuuden kytköstä ravinneomavaraisuuteen.

Tutkimuskysymykset tavoitteisiin liittyen olivat:

1. Miten energiaomavaraisuutta ruoantuotannossa voi lisätä vähentämättä alueen rehuomavaraisuutta ja ruoantuotantoa?
2. Miten energiaomavaraisuuden tavoittelu vaikuttaa ravinneomavaraisuuteen?

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimustavoitetta varten verrattiin eri skenaarioita Saltvikin kunnassa, joka edustaa kotieläintuotantoon painottunutta tuotantoaluetta. Saltvik on Ahvenanmaalla sijaitseva kunta (Kuva 1), joka on mukana Ympäristöministeriön rahoittaman ravinteiden kierrätyksen ohjelman (RAKI) *Hungry for Saltvik* -hankkeessa. Hanke pyrkii lisäämään ravinteiden kierrätystä Ahvenanmaalla, ja siten vähentämään ravinnekuormitusta Itämereen. Saltvikissa oli vuonna 2019 1849 asukasta ja kunnan kokonaismaapinta-ala on 152 km² (SVT 2020d). Saltvik on Ahvenanmaan laajin kunta, ja se on täysin maaseutua (SVT 2020d).



Kuva 1. Saltvikin sijainti Suomen kartalla.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin Saltvikin nykyisen ruoantuotantosysteemin tilanne pääosin tilastotietoon perustuen. Koppelmäen ym. (2021a) laskentamallia mukaillen rakennettiin Microsoft Excel-laskentataulukko, joka sisälsi tutkimuksessa tarvittavat tiedot ja laskukaavat. Sen perusteella saatiin käsitys nykytilasta, mikä toimi pohjana skenaarioille. Toisessa vaiheessa muodostettiin kolme skenaariota agroekologisen symbioosin testaamiseksi. Agroekologisen symbioosin mukaisten mallien lähtökohta oli samantapainen kuin Koppelmäen ym. (2021b) tutkimuksessa, jossa systeemiin lisättiin biokaasuntuotanto sivuvirroista ja kasvatettiin viherlannoitusnurmialan osuutta viljelyssä. Koppelmäen ym. (2021b) tutkimusalue Manner-Suomessa painottui tämän tutkimuksen kohdealueesta poiketen kasvintuotantoon ja kotieläintiheys oli hyvin matala (0,12 ey ha⁻¹).

4.1 Tutkimuskohteen ruoantuotantosysteemin kuvailu

Saltvikin maatalouden nykyinen rakenne painottuu eläintuotantoon. Alueen kotieläintiheys oli 0,69 eläinyksikköä maatalouden käytössä olevaa hehtaaria kohden (Taulukko 2 ja 3), kun keskimääräinen luku koko Suomessa oli 0,56 ja Ahvenanmaalla 0,51 vuosien 2015–2019 keskiarvona (Luke 2020b, Luke 2020i). Eläinyksiköiden (Valtioneuvosto 2015) perusteella laskien nautoja oli eniten verrattuna siipikarjaan ja lampaisiin (Taulukko 2). Hevosten lukumäärä oli pieni (3), ja lisäksi lukumäärätieto oli monen vuoden osalta puutteellinen, joten niitä ei otettu mukaan tutkimukseen.

Kasvintuotannon käytössä oleva pinta-ala oli yhteensä 2139 hehtaaria, ja vallitseva tuotantosuunta oli nurmen ja viljan viljely rehuksi (Taulukko 3). Kesantoalan osuus pinta-alasta oli myös suuri – lähes viidesosa kunnan maatalousmaasta. Kesantoalaan lukeutuivat tässä tutkimuksessa varsinaisten kesantojen lisäksi monivuotiset viherlannoitusnurmet ja luonnonlaitumet. Lisäksi Saltvikissa viljeltiin alle sadalla hehtaarilla perunaa sekä öljy- ja proteiinikasveja. Muita kasveja, kuten monia eri puutarhakasveja viljeltiin yhteensä alle yhden prosentin alalla kokonaisalasta, joten mallinnuksen yksinkertaistamiseksi ne jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Taulukko 2. Kotieläinten lukumäärät Saltvikissa (Luke 2020e). Luvut ovat keskiarvoja vuosilta 2015–2019.

	kpl	eläinyksiköt
Yhteensä	20406	1475
<i>Naudat</i>	1334	1063
<i>Siiplikarja</i>	18023	252
<i>Lampaat</i>	1046	157
<i>Hevoset*</i>	3	3

*Rajattu tutkimuksen ulkopuolelle.

Taulukko 3. Maatalousmaan jakautuminen eri kasvien viljelyyn Saltvikissa (Luke 2020a). Luvut ovat keskiarvoja vuosilta 2015–2019.

	ha	%
Maatalousmaa yhteensä	2139	100,0
<i>Viljat</i>	807	38,0
<i>Nurmet alle 5 vuotta</i>	846	39,9
<i>Kesanto*</i>	365	17,2
<i>Öljy- ja proteiinikasvit</i>	62	2,9
<i>Peruna</i>	41	2,0
<i>Muut**</i>	18	0,8

*Sisältää kesannot, luonnonhoitopellot, viherlannoitusnurmet ja vähintään 5-vuotiset nurmet.

**Sisältää puutarhakasvit ja muut kasvit. Rajattu tutkimuksen ulkopuolelle.

4.2 Skenaariot

Nykytilanteen lisäksi mallinnettiin vertailua varten kolme skenaariota (Taulukko 4), jotka mukailivat eri asteisesti agroekologista symbioosia. Ruoantuotantosysteemiin kohdistettujen muutosten määrä ja laajuus kasvoivat skenaarioittain nykytilanteeseen nähden. Ensimmäisessä skenaariossa ainoa muutos nykytilanteeseen oli tuoda systeemiin biokaasutus perustuen maatalouden sivuvirtoihin, eli lantaan ja ylijäämänurmiin. Näin havainnollistettiin nykyisessä systeemissä muodostuvien sivuvirtojen potentiaalia kattaa systeemin energian ja mineraaliravinteiden käyttöä ilman, että maataloustuotannon rakenne muuttui.

Toisessa skenaariossa testattiin biokaasutuksen mukaan tuomisen lisäksi maatalousmaan käytön muuttumista siten, että 25 % viljojen viljelyalasta muutettiin monivuotiseksi viherlannoitusnurmeksi, jota ei lannoiteta. Kolmannessa skenaariossa vastaava luku oli 50 %. Viherlannoitusnurmelta kerätyn biomassan käytön biokaasuntuotannon syötteenä oli tarkoitus lisätä energiantuotantoa ja korvata mineraalilannoituksen käyttöä mädätysjäännöksen muodossa. Viljojen viljelyalan supistaminen vaikutti kuitenkin väistämättä systeemin rehuomavaraisuuteen ja

ruoantuotannon määrään. Niinpä alueen eläinten lukumäärä optimoitiin viljarehun tuotannon mukaan siten, että skenaarioissa säilyi nykytilannetta vastaava viljarehuomavaraisuus. Optimointi toteutettiin niin, että ensin määritettiin eri eläinryhmien (naudat, siipikarja, lampaat) viljarehukulutuksen osuus nykyisestä kokonaiskulutuksesta eläinkohtaisen rehunkulutuksen (Koppelmäki ym. 2021a) mukaan. Kun tiedettiin viljarehun tuotannon määrä skenaarioissa, määritettiin Excelin 'Tavoitteen haku' -toiminnolla vastaava viljarehun kulutuksen määrä tavoitellun viljarehuomavaraisuuden mukaan. Kunkin eläinryhmän osuus kokonaiskulutuksesta määritti sitten sen, kuinka monta eläintä kustakin ryhmästä skenaarion viljarehun tuotanto alueella salli. Siten viljarehuomavaraisuus oli kaikissa skenaarioissa nykytilanteen tasolla, ja eläinryhmien keskinäiset määrät eivät muuttuneet. Vapautunut rehunurmiala korvattiin puolestaan proteiinikasvien viljelyllä ihmisten suoraan käyttöön. Proteiinikasviksi valittiin alueella nykyäänkin viljeltävä herne.

Taulukko 4. Skenaarioiden muutokset verrattuna nykytilanteeseen.

Ominaisuus	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
Energian- tuotanto	Biokaasuntuotanto sivuvirroista	Biokaasuntuotanto sivuvirroista	Biokaasuntuotanto sivuvirroista
Viljelyn muu- tos	Ei muutosta	25 % viljojen alasta viherlannoitusnur- meksi	50 % viljojen alasta viherlannoitusnur- meksi
Eläinten määrä	Ei muutosta	Vähennetään eläimiä viljarehuomavaraisuu- den säilyttämiseksi	Vähennetään eläimiä viljarehuomavaraisuu- den säilyttämiseksi
Ruoan-tuo- tanto	Ei muutosta	Korvataan kasvintuo- tannolla: viljellään her- nettä vapautuneella re- hunurmialalla	Korvataan kasvintuo- tannolla: viljellään her- nettä vapautuneella re- hunurmialalla

4.3 Aineiston alkuperä ja laskelmat

Tutkimuksessa käytetty aineisto oli pääosin peräisin Luonnonvarakeskuksen ylläpitämästä tilastotietokannasta (Luke 2020). Koppelmäen ym. (2021a) kokonaisille ELY-keskuksille tekemää laskentamallia ei voitu käyttää suoraan, sillä kaikkia tietoja ei ollut saatavilla kuntatasolla. Sen vuoksi tehtiin arvioita ja oletuksia, jotka käydään seuraavissa luvuissa läpi aineiston alkuperän ja laskentamenetelmien tarkastelun ohella.

4.3.1 Ruoantuotannon ja rehuomavaraisuuden laskeminen

Taulukkoon 5 on koottu Saltvikin ruoantuotannon määrän ja rehuomavaraisuuden laskemista varten käytetyt tietolähteet. Pääasiallisena lähteenä oli Luken tilastotietokanta, sen tiedot keskiarvoina vuosilta 2015–2019. Tutkimuksessa käytettiin keskiarvoisia lukuja vuosien välillä tapahtuvan vaihtelun tasoittamiseksi.

Taulukko 5. Saltvikin ruoan- ja rehuntuotannon laskemiseen käytetyt tiedonlähteet.

Tieto	Lähdeviite
Viljelyala kasveittain	Luke 2020a: Käytössä oleva maatalousmaa kunnittain; Luke 2020b: Käytössä oleva maatalousmaa ELY-keskuksittain (Ahvenanmaa)
Sato	Luke 2020c: Viljelykasvien sato (Ahvenanmaa)
Viljojen käyttö ruuaksi ja rehuksi	Luke 2020d: Viljatase; Lena Clemes, Finströmin maatalouskanslia, sähköpostiviesti kirjoittajalle 14.12.2020
Perunan ja herneen käyttö ruuaksi ja rehuksi	Lena Clemes, Finströmin maatalouskanslia, sähköpostiviesti kirjoittajalle 14.12.2020
Kotieläinten lukumäärä	Luke 2020e: Kotieläinten lukumäärä 1.4. ja 1.5. kunnittain
Eläintuotanto	Luke 2020f: Lihantuotanto kunnittain vuosittain (nauta, sika ja lammas); Luke 2020g: Alueittainen maidontuotanto (Ahvenanmaa); Luke 2020h: Kanamunien tuotanto; Luke 2020i: Kotieläinten lukumäärä
Eläinkohtainen rehun kulutus	Koppelmäki ym. 2021a

Tilastotiedoissa ei ollut eriteltyä ruokakasveja ja rehukasveja, joten kasviperäistä ruoantuotantoa laskiessa otettiin huomioon kasvintuotannon kokonaissadosta se osuus, joka käytettiin suoraan ihmisten ruuaksi. Esimerkiksi viljoja käytetään sekä ihmisten ruoaksi että eläinten rehuksi. Rehuomavaraisuuden määrittämistä varten laskettiin paikallisen rehuntuotannon määrä perustuen puolestaan sadon rehukäytön osuuteen. Sadonkäytön jakautuminen suoraan ihmisten ruuaksi ja eläinten rehuksi määritettiin kasvikohtaisesti (Taulukko 5). Seosviljan, vihantaviljan ja rehunurmien tuotanto oletettiin käytettävän kokonaisuudessaan rehuksi, mutta viljojen, herneen ja perunan tuotannosta jaoteltiin erikseen ruoka- ja rehukäyttö.

Ruoantuotanto mitattiin kasvin- ja eläintuotannon proteiinin (kg ha^{-1}) ja energian (MJ ha^{-1}) tuotantona. Ruokatuotteiden koostumukset vaihtelevat paljon, jolloin niiden vertailu vain yhdellä indikaattorilla voi olla harhaanjohtavaa. Näiden kahden indikaattorin rinnakkainen tarkastelu on ollut käytössä myös aiemmissa tutkimuksissa (Tilman ym. 2011, van Kernebeek ym. 2016, van Zanten ym. 2016, Koppelmäki ym. 2021b).

Kasvien kokonaissadot laskettiin kertomalla kunkin tuotetun kasvin viljelyala ja hehtaarikohtainen satotaso keskenään. Hehtaarisato määritettiin koko Ahvenanmaan tietojen perusteella, koska kuntakohtaista tietoa ei ollut saatavilla. Luomutuotantoa ei eritelty, koska Saltvikin luomutuotannon osuus on noin 30 % (Tina Danielsson, Ahvenanmaan maatalousvirasto, sähköpostiviesti kirjoittajalle 30.12.2020), mikä on samaa luokkaa kuin hehtaarisatoon vaikuttanut koko Ahvenanmaan 23,6 prosentin osuus (Ruokavirasto 2019).

Tuotetun proteiinin määrä laskettiin kokonaissadosta kullekin kasville ominaiseen kuiva-ainepitoisuuteen ja typpipitoisuuteen perustuen (Luke 2015). Proteiinin määrä saatiin kertomalla typpisato luvulla 6.25 (Mariotti ym. 2008). Kyseinen kerroin on yleisesti käytetty muutettaessa typen määrää proteiiniksi. Tuotetun energian määrä laskettiin kunkin kasvituotteen energiasisällön perusteella (USDA 2021).

Eläinperäisen proteiinin ja energian tuotanto ruoaksi laskettiin eri tavoin tuotteen mukaan. Lihana tuotettu proteiini ja energia laskettiin kunnallisen lihantuotannon

(Luke 2020f) ja sen kuiva-aine- ja proteiinipitoisuuden sekä energiasisällön (USDA 2021) perusteella.

Sen sijaan tiedot Saltvikin kunnan maidontuotannosta (Luke 2020g) olivat viimeiseltä kolmelta vuodelta puutteelliset tietosuojan nojalla. Niinpä tässä tutkimuksessa arvioitiin lehmäkohtainen tuotos jakamalla vuosien 2015–2016 keskiarvoinen maidon kokonaistuotanto kyseisten vuosien lehmien lukumäärällä (Luke 2020e). Siten saatiin arvioitua alueen maidontuotanto kokonaisuudessaan, kun lehmien määrä kuitenkin tiedettiin kaikilta vuosilta.

Kananmunien tuotannosta ei ollut tietoa muutoin kuin koko Suomen tasolla, joten kananmunien tuotanto kanaa kohden saatiin jakamalla koko Suomen vuosittainen tuotanto (Luke2020h) kanojen lukumäärällä (Luke 2020i). Saltvikin osuus tuotannosta laskettiin alueen kanojen lukumäärän mukaan (Luke 2020e). Niin maidon kuin kananmunienkin muodossa tuotettu proteiini ja energia laskettiin niiden kuiva-aine- ja proteiinipitoisuuden sekä energiasisällön (USDA 2021) perusteella.

Vuosittainen rehunkulutus kokonaisuudessaan laskettiin kotieläinten lukumäärän ja eläinkohtaisen rehunkulutuksen perusteella. Rehun tuotannon ja kulutuksen perusteella tarkasteltiin alueen rehuomavaraisuutta, eli kuinka suuren osuuden alueen eläinten ruokinnasta alueen oma tuotanto kattoi. Tämä tarkastelu kohdistui nurmirehuun ja viljarehuun, sillä teollinen rehu ja mineraalit oletettiin tuotavan kokonaisuudessaan systeemin ulkopuolelta. Tutkimuksen skenaarioissa ei siis tehty toimia rehuomavaraisuuden kasvattamiseksi, vaan nykyinen omavaraisuuden aste määritettiin skenaarioiden eläinmäärän optimointia varten.

4.3.2 Ravinnetaseen ja ravinteiden kierrätyksen laskeminen

Taulukkoon 6 on koottu tiedonlähteet, joita käytettiin laskettaessa Saltvikin alueen ravinnetasetta ja ravinteiden kierrätystä. Tutkittavat ravinteet olivat typpi ja fosfori, jotka ovat tärkeitä kasviravinteita mutta toisaalta myös merkittäviä ympäristön kuormittajia (OECD 2021).

Ravinnetase laskettiin peltoon tulevien ja sieltä lähtevien ravinteiden erotuksena (typpi kg ha^{-1} ja fosfori kg ha^{-1}). Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus havainnollistaa

Taulukko 6. Saltvikin ravinnetaseen ja ravinteiden kierrätyksen laskemiseen käytetyt tiedonlähteet.

Tieto	Lähdeviite
Eläinkohtainen lannan määrä ja ravinnesisältö (typpi ja fosfori)	Luostarinen ym. 2017
Mineraalilannoitus (typpi ja fosfori)	Turtola ym. 2017; Valtioneuvosto 2014; Ravinnetaseen osatekijät ELY-keskuksittain (Ahvenanmaa), Pasi Mattila, Luke, välitetty sähköpostiviesti kirjoittajalle 25.2.2020
Biologinen typensidonta	Angladen ym. 2015 laskukaava

viljelijöiden ravinteiden käyttöä, joten peltoon tuleviin ravinteisiin luettiin peltoon lisättyjen mineraalilannoitteiden sekä alueen eläinten erittämän lannan sisältämä typpi ja fosfori. Typen osalta myös biologisen typensidonnan osuus laskettiin taseeseen. Se laskettiin viljellyn herneen alalle, minkä lisäksi arvioitiin, että 25 % rehunurmien, 30 % kesantojen sekä 50 % seosviljan alasta olisi typensitojakasveja. Kun tiedettiin typensitojakasvien kuiva-ainepitoisuus ja typpipitoisuus (Luke 2015), käytettiin Angladen ym. (2015) laskukaavaa biologisesti sidotun typen määrän arvioimiseksi. Ravinnetaseeseen ei otettu mukaan sellaisia virtoja, joihin viljelijä ei pysty suuresti vaikuttamaan, kuten typen laskeumaa suoraan ilmakehästä tai kylvösiemenen sisältämiä ravinteita.

Pelloilta lähteviksi ravinteiksi laskettiin korjatun sadon mukana poistunut määrä ravinteita (Taulukko 5). Skenaarioissa kerättiin satoa nykytilanteesta poiketen myös viherlannoitusnurmilta, viherkesannoilta ja luonnonhoitopelloilta biokaasutukseen. Niiden satotason oletettiin olevan sama kuin luomuna viljellyn säilörehun tuotesato Ahvenanmaalla keskimäärin vuosina 2015–2019 eli 7090 kg ha⁻¹ (Luke 2020c). Satotasojen oletettiin pysyvän samana kaikissa skenaarioissa, vaikka lantaa muodostui vähemmän. Ylijäämäinen typpi- ja fosforitase tarkoittaa sitä, että ravinteita tulee peltoon enemmän kuin lähtee, eli pellon ravinnevarasto kasvaa. Sen on todettu lisäävän ravinteiden huuhtoutumisriskiä, ja siten ympäristön kuormitusta (Turtola ja Yli-Halla 1999, Turtola ym. 2017, OECD 2021). Alijäämäinen ravinnetase voi johtaa maaperän köyhtymiseen (OECD 2021).

Ravinteiden kierrätys osoitettiin kierrätyslannoitteen (lanta tai mädätysjäännös) ravinteiden osuutena koko lannoituksen ravinteista, joka sisälsi myös

mineraalilannoitteet. Mineraalilannoitteen käyttö eri kasveille (Taulukko 7) määritettiin Turtolan ym. (2017) tutkimien viljelyvyöhykekohtaisten käyttötasojen mukaan. Puuttuvat tiedot rukiin ja herneen osalta täydennettiin arvioilla perustuen nitraattiasetuksen (Valtioneuvosto 2014) maksimimääriin. Jotta käyttötasot vastaisivat paremmin Saltvikin alueen todellista tilannetta, sovitettiin ne kasveittain Ahvenanmaan keskimääräisen mineraalilannoitustason (kg ha^{-1}) mukaiseksi (Pasi Mattila, Luke, välitetty sähköpostiviesti kirjoittajalle 25.2.2020). Näin myös luomuna ilman mineraalilannoitteita viljelty osuus näkyi mineraalilannoitteen käyttömäärässä Ahvenanmaan luomutasolla.

Skenaarioissa biokaasulaitoksen mädätysjäännös korvasi paitsi täysmääräisesti lannan myös osittain mineraalilannoitteiden käyttöä. Stinneriä ym. (2015) mukailen nurmibiomassasta peräisin oleva mädätysjäännös korvasi mineraalilannoitetta typen osalta 80 % ja fosforin osalta 100 % vastaavuudella. Tämä perustui typen haihtumishävikkiin, kun lannoitetaan mädätysjäännöksellä. Lisäksi mädätysjäännöksessä olevan typen lannoitusarvo kasveille ei ole Stinnerin ym. (2015) tutkimuksen mukaan aivan yhtä korkea kuin mineraalitypen.

Taulukko 7. Mallinnuksessa käytetyt satotasot Ahvenanmaan vuosien 2015–2019 keskiarvoisten satojen mukaan (Luke 2020c) ja mineraalilannoitemäärät eri kasveille.

	Tuoresato kg ha^{-1}	Typpi kg ha^{-1}	Fosfori kg ha^{-1}
Syysvehnä	4930	81,6	6,2
Kevätvehnä	3540	65,3	5,4
Ruis	4774	53,8	7,2
Rehuohra	4000	53,8	7,2
Kaura	3068	57,3	7,6
Seosvilja	2830	43,0	6,3
Säilörehu	9668	86,1	5,2
Kuivaheinä	3464	61,5	5,2
Laidun	9668	86,1	5,2
Herne	2528	20,1	6,3
Rypsi ja rapsi	1546	59,2	5,8
Peruna	29284	53,2	6,6

4.3.3 Energian kulutuksen ja tuotantopotentiaalin laskeminen

Energiaomavaraisuutta tarkasteltiin tässä tutkimuksessa fossiilisen energian kulutukseen nähden. Selvitettiin, kuinka suuren osuuden potentiaalinen sivuvirtoihin perustuva biokaasuntuotanto (MWh ha^{-1}) kattaisi ruoantuotantosysteemin fossiilisen energian kulutuksesta (MWh ha^{-1}). Mitä suuremman osuuden se kattoi, sitä energiaomavaraisempi systeemi oli. Uusiutuvia energianlähteitä ja ydinvoimaa ei siis laskettu mukaan energian kulutukseen, mutta turve laskettiin fossiiliseksi energianlähteeksi. Energian tuotantopotentiaalia ja kulutusta vertailtiin systeemin laskennallisen energiaomavaraisuuden selvittämiseksi ottamatta huomioon käytännön toteutusta korvata fossiilisperäistä energiaa bioenergialla.

Biokaasuntuotannon ei haluttu lähtökohtaisesti kilpailevan ruoantuotannon kanssa, vaan syötteiksi mallinnettiin lannan lisäksi nurmibiomassoja, joita ei käytetä eläinten ruokinnassa. Viherlannoitusnurmet ajateltiin osaksi viljelykiertoa ja siten myös osaksi ruoantuotantoa, vaikka niillä oli myös rooli bioenergiakasvina.

Taulukossa 8 on listattu lähteet, joita on käytetty energialaskelmissa. Energian kulutukseen kuului ensinnäkin maatalouden toimintoihin, kuten työkoneiden ja tekniikan käyttöön, viljankuivaukseen ja rakennusten lämmitykseen kuluva energia. Siitä fossiiliseksi laskettiin moottoripolttoöljy, lämmityspolttoöljy, polttoöljy viljankuivaukseen, raskas polttoöljy ja turve. Laskuihin laskettiin myös se osa sähköstä (20 %) ja ostetusta lämpöenergiasta (54 %), joka tuotettiin Suomessa fossiilisella energialla vuosien 2015–2019 keskiarvona (SVT 2020b). Niin laskettuna maatalouden käyttämästä energiasta fossiiliseksi luettiin 43 %. Skenaarioissa maatalouden kulutuksen oletettiin olevan vakio, vaikka esimerkiksi muutokset tuotannossa ja syötemassojen kuljetus biokaasulaitokseen voivat lisätä tai vähentää energian kulutuksen kokonaismäärää.

Taulukko 8. Saltvikin energian kulutuksen ja energiantuotantopotentiaalin laskemiseen käytetyt tiedonlähteet.

Tieto	Lähdeviite
Fossiilisen energian kulutus maataloudessa 7 056 MJ ha ⁻¹ a ⁻¹	Luke 2010: Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus (Ahvenanmaa); Luke 2016: Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus energialähteittäin (GWh)
Mineraalilannoitteiden tuotannon energiankulutus	¹ Schröder ym. 2015, ² Brentrup ym. 2016
Fosfori ¹ 20 MJ kg ⁻¹	
Typpi ² 32 MJ kg ⁻¹	
Ruoanjalostuksen energiankulutus	Ladha-Sabur ym. 2019
Leipä 5,21 MJ kg ⁻¹	
Herne 1,36 MJ kg ⁻¹	
Maito 2,73 MJ kg ⁻¹	
Juusto 5,04 MJ kg ⁻¹	
Liha 2,15 MJ kg ⁻¹	
Syötteiden biometaanintuottopotentiaali (NI CH ₄ kg ⁻¹ ka)	¹ Seppälä ym. 2009, ² Kafle ja Chen 2016
Nurmi ¹ 290	
Lanta/nauta ² 172	
Lanta/siipikarja ² 324	
Lanta/lammas ² 120	

Energiankulutukseen laskettiin myös täysmääräisesti mineraalilannoitteiden (typpi ja fosfori) tuotannon kuluttama energia, vaikka teollisen lannoitevalmistuksen energiankäyttö ei välttämättä ole kokonaisuudessaan fossiilista alkuperää. Teollisuuden ilmastotavoitteiden vuoksi kuitenkin oletettiin, että energiankäytön vähenys ja uusiutuvilla korvaaminen kohdistuisi nimenomaan fossiilista alkuperää olevaan energiaan lannoiteteollisuudessa. Koppelmäen ym. (2021a, 2021b) laskentamalleista poiketen ruoanjalostuksen kuluttama energia (MWh ha⁻¹) otettiin mukaan tutkimukseen, jotta agroekologiselle symbioosille olennainen ruoanjalostusyksikkö tulisi havainnollistettua. Raaka-aineita on mahdollista jalostaa monella eri tavalla, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi määritettiin tietyt tuotteet. Viljasta jalostettiin leipää, herneistä pakasteita ja lihasta kylmää paloitetua luutonta lihaa. Maidon jalostus jaettiin kahteen osaan: 60 %:sta raaka-ainetta jalostettiin kylmää tuoremaidon ja 40 %:sta juustoa.

Ruoanjalostuksen energiankulutus laskettiin keskimääräiseen lopputuotteen prosessointiin kuluvaan energiaan perustuen (Taulukko 8), josta mukaan laskettiin fossiilisten energianlähteiden osuus, joka oli Suomessa 48 % elintarviketeollisuuden energiankulutuksesta vuosien 2015–2019 keskiarvona (SVT 2020c). Lukuihin ei kuulunut ruoan pakkaus eikä kuljetus. Raaka-aineiden määrästä johdettiin lopputuotteen määrät erinäisin oletuksin. Leivän tuotannossa oletettiin myllyn jauhoisaannin olevan 70 % raaka-aineen määrästä (Nuttall ym. 2012) ja leivän koostumuksesta 64 % olevan jauhoja (Wanhalinna 2010). Jalostetun maidon määrän oletettiin olevan sama kuin raakamaidon, ja juuston valmistukseen tarvittavan kymmenkertaisesti maitoa juustokiloa kohden (Farkye 2004).

Potentiaalisen biokaasuntuotannon syötteiksi lukeutuivat kotieläinten lanta, sekä viherlannoitusnurmilta ja 60 %:n osuudelta viherkesantojen ja luonnonhoitopeltojen alasta saatu sato. Suurin osa Saltvikin kesantoalasta on viherkesantoa (Lena Clemes, Finströmin maatalouskanslia, sähköpostiviesti kirjoittajalle 14.12.2020) ja Niemeläisen ym. (2014) mukaan noin 60 % viherkesantojen ja luonnonhoitopeltojen alasta Suomessa on riittävän suurilla pelloilla, jotta korjuu on mielekästä. Osa kyseisistä pelloista on myös luonnon monimuotoisuuden kannalta hyvä jättää korjaamatta (Niemeläinen ym. 2014). Lisäksi oletettiin, että 5 % säilörehunurmen alasta oli ylimääräistä, jota voitiin kerätä syötteeksi. Hehtaarisato oletettiin korjattavilta nurmilta samansuuruiseksi kuin luomuna viljellyn säilörehun tuoresato Ahvenanmaalla vuosien 2015–2019 keskiarvona (7090 kg ha⁻¹, Luke 2020c).

Kirjallisuuden perusteella määritettiin eri syötteiden biometaanintuottopotentiaali litroina syötteen kuiva-ainekiloa kohti (BMP, Taulukko 8). Kun tiedettiin eri syötteiden määrä ja kuiva-ainepitoisuus, laskettiin kokonaisuudessaan potentiaalisen energiantuoton määrä. Biokaasulaitoksen oletettiin kuluttavan toimintoihinsa 15 % energiasta ja CHP-tuotannon hyötysuhteen olevan 85 %.

4.4 Epävarmuudet ja herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysissä tarkasteltiin tulosten herkkyyttä mallinnuksessa käytetyille arvoille, jotka olivat erityisen epävarmoja, ja joiden vaihtelulla arvioitiin olevan vaikutusta tuloksiin. Tutkimuksessa syötteeksi kerättävän kesantonurmen satotas

perustui koko Ahvenanmaan keskiarvoiseen luomusäilörehun satotasoon ja oli siten vain suuntaa antava arvio. Viherlannoitusnurmi lukeutui tässä tutkimuksessa kesantonurmiin ja oli oleellisessa osassa tämän tutkimuksen tuloksia, joten satotason vaikutusta tuloksiin arvioitiin herkkyysanalyysissa. Herkkyysanalyysi toteutettiin muuttamalla kesantonurmen satotaso vuorollaan 20 % suuremmaksi ja 20 % pienemmäksi tutkimuksessa käytettyyn tasoon verrattuna, ja sitten tarkasteltiin muutoksien vaikutusta energiaomavaraisuusasteeseen skenaarioissa.

Eri syötteiden BMP-arvot vaihtelivat lähdeaineistona käytetyissä tutkimuksissa, ja lopulliseen metaanin tuotantopotentiaalin saavuttamiseen vaikuttavat myös monet käytännön toteutukseen liittyvät asiat (Ward ym. 2008). Herkkyysanalyysissa tarkasteltiin tulosten herkkyyttä BMP-arvon vaihtelulle muuttamalla kaikkien syötteiden BMP 20 % suuremmaksi ja vuorostaan 20 % pienemmäksi.

5 TULOKSET

5.1 Energiaomavaraisuus

Ruoantuotannon energiaomavaraisuus kasvoi skenaarioittain (Taulukko 9). Tulokset osoittivat ensinnäkin nykytilanteen potentiaalin kattaa fossiilisen energian käytöstä yli puolet ilman maatalouden rakenteen muutoksia skenaarion 1 mukaisesti. Skenaarioissa 2 ja 3 energiaomavaraisuus nousi entisestään. Skenaariossa 3 bioenergian tuotanto kattoi noin neljä viidesosaa fossiilisen energian käytöstä.

Energiaomavaraisuuden kasvu skenaarioissa johtui ensinnäkin kulutuksen laskusta (Taulukko 9). Mineraalilannoitteiden valmistukseen kului skenaarioittain vähemmän fossiilista energiaa nykytilanteeseen ($0,56 \text{ MWh ha}^{-1}$) verrattuna. Myös ruoanjalostukseen kulunut energia väheni skenaarioissa 2 ja 3 verrattuna skenaario 1:een, jossa ruoantuotanto ja siten ruoanjalostukseen kulunut energian määrä ei muuttunut nykytilanteesta.

Toiseksi energian tuotanto oli kaikissa skenaarioissa neljän ja viiden GWh:n välillä, mutta kasvoi skenaarioittain (Taulukko 10). Syötemateriaalista selvästi suurin osa oli lantaa kaikissa skenaarioissa, mutta skenaarioittain sen osuus pieneni kasvibio-massan osuuden kasvaessa (Taulukko 10). Energia oli skenaariossa 1 valtaosin

peräisin lannasta, skenaariossa 2 lähes tasaisesti lannasta ja kasvibiomassasta, ja skenaariossa 3 puolestaan kasvibiomassa oli ensisijainen energianlähde (Taulukko 10).

Taulukko 9. Energiaomavaraisuus eri skenaarioissa, energian tuotannon ja kulutuksen määrä maatalousalan hehtaaria kohden, sekä kulutuksen jakautuminen eri kohteisiin.

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
Energiaomavaraisuus	58 %	69 %	83 %
	MWh ha⁻¹ a⁻¹	MWh ha⁻¹ a⁻¹	MWh ha⁻¹ a⁻¹
Tuotanto	2,04	2,19	2,34
Kulutus	3,53	3,17	2,82
<i>*Maatilojen käyttöenergia</i>	1,96	1,96	1,96
<i>*Lannoitteiden valmistus</i>	0,52	0,37	0,23
<i>*Ruoanjalostus</i>	1,05	0,84	0,63

Taulukko 10. Syötemateriaalin kokonaismäärä ja energian kokonaistuotanto, sekä syötemateriaalien (lanta ja kasvibiomassa) osuudet niistä skenaarioittain. Syötteen määrä on ilmaistu tuorepainona.

	Skenaario 1				Skenaario 2				Skenaario 3			
	Syöte		GWh		Syöte		GWh		Syöte		GWh	
	t a⁻¹	%	a⁻¹	%	t a⁻¹	%	a⁻¹	%	t a⁻¹	%	a⁻¹	%
Yhteensä	23283	100	4,33	100	18249	100	4,65	100	13197	100	4,97	100
<i>Lanta</i>	22783	98	3,10	72	17316	95	2,36	51	11835	90	1,61	32
<i>Kasvibio- massa</i>	500	2	1,23	28	932	5	2,30	49	1362	10	3,36	68

5.2 Rehuomavaraisuus

Kunnan rehuomavaraisuutta tarkasteltiin tuotannon ja kulutuksen määrän suhteena, ja se vaihteli eri rehutyyppien välillä (Taulukko 11). Saltvikin kunnan alueen heinän tuotanto ylitti alueellisen kulutuksen, ja myös viljarehuomavaraisuus oli lähellä 100 %:a. Sen sijaan säilörehun ja laitumen omavaraisuus jäi tutkimusalueella selvästi vajaaksi. Nykytilannetta vastaava rehuomavaraisuus säädettiin samaksi kaikkiin skenaarioihin muuttamalla eläinten ja siten kulutuksen määrää (Liite 1).

Taulukko 11. Nykytilanteen rehuomavaraisuus.

	Kulutus t ka a⁻¹	Tuotanto t ka a⁻¹	Omavaraisuus %
Säilörehu	4324	2160	50
Laidun	649	218	34
Heinä	153	231	151
Viljarehu	1630	1588	97
Teollinen rehu	1655	0	0

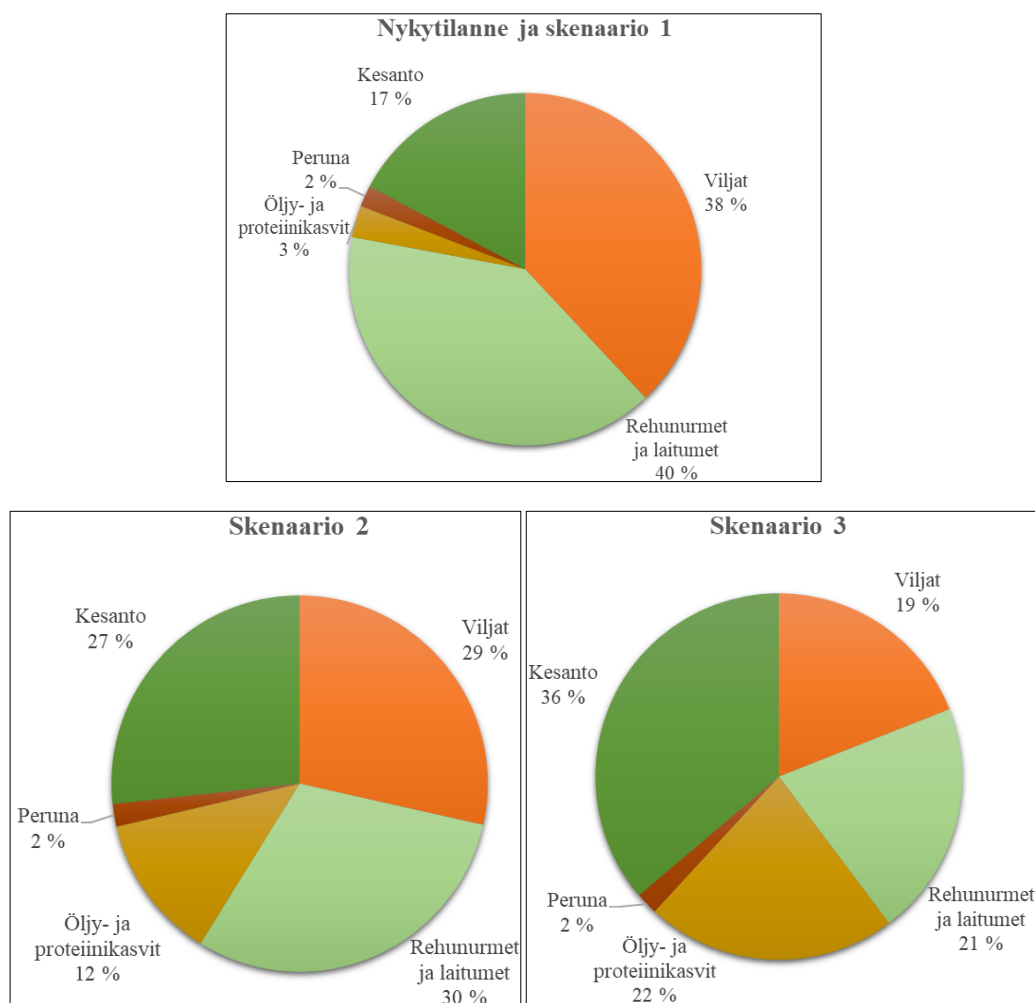
ka = kuiva-aine

5.3 Viljelyalat ja eläinten lukumäärä

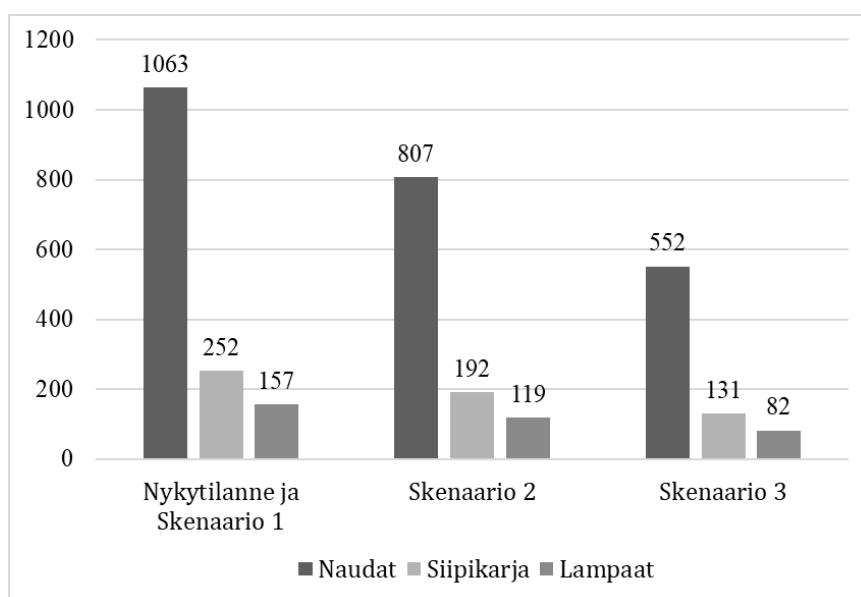
Maatalousmaan käyttö muuttui skenaarioittain siten, että rehukasvien viljely väheni ja kesannon ja proteiinikasvien ala kasvoi (Kuva 2). Kun vilja-alasta muuttui 25 % viherlannoitusnurmialaksi skenaarion 2 mukaisesti, kasvoi kesannon osuus viljelyalasta 10 % nykytilanteeseen verrattuna, sillä viherlannoitusnurmiala lukeutui kesantoihin. Vapautunut rehunurmiala muutettiin herneen viljelyyn, jonka osuus kasvoi siten 9 % nykytilanteesta (Kuva 2).

Skenaariossa 3 vilja-alan muutos 50 %:n osuudella nykytilanteesta monivuotiseksi viherlannoitusnurmeksi johti siihen, että kesantoalan osuus oli kaikista suurin verrattuna muihin kasviryhmiin (Kuva 2). Hernealan lisäys kasvatti skenaariossa 3 öljy- ja proteiinikasvien osuutta 19 % alkuperäisestä, jolloin vilja-alan, rehunurmien ja öljy- ja proteiinikasvien ala oli lähes tasapainossa (Kuva 2).

Skenaariossa 2 eläinyksiköiden määrä väheni noin 24 % alkuperäisestä viljarehuomavaraisuuden (Taulukko 11) mukaisesti (Kuva 3). Skenaariossa 3 eläinyksiköitä oli 48 % alkuperäisestä määrästä (Kuva 3). Eläinryhmien keskinäiset määräsuhteet säilyivät samoina kaikissa skenaarioissa.



Kuva 2. Viljelyalan jakautuminen nykytilanteessa ja skenaarioissa. Viherlannoitusnurmi lukeutui kesantoihin ja herne proteiinikasveihin.



Kuva 3. Eläinten määrä eläinyksiköiksi muutettuna nykytilanteessa ja skenaarioissa.

5.4 Ruoantuotanto

Ruoantuotannon määrä pysyi yleisesti ottaen samalla tasolla skenaariosta riippumatta. Tulokset osoittivat vain vähän kasvua tuotetussa proteiinissa skenaarioissa tehtyjen muutosten laajetessa, kun proteiinin tuotanto kasvoi skenaario 1 ja 2 välillä 8 kg ha⁻¹ (4 %) ja skenaarion 1 ja 3 välillä 16 kg ha⁻¹ (9 %) (Taulukko 12). Proteiini oli nykytilanteessa suurimmaksi osaksi peräisin eläintuotannosta ja skenaario 3:ssa peltotuotannosta. Skenaario 2:ssa pelto- ja eläintuotanto olivat tasapainossa proteiinin tuotannossa, kun likimain sama määrä tuotettiin kummassakin.

Sama trendi tuotannon jakautumisessa oli nähtävissä ruoan sisältämässä energiassa. Energian kokonaistuotanto ruuaksi kuitenkin laski hieman nykytilanteeseen verrattuna: 0,4 % skenaariossa 2 ja 0,8 % skenaariossa 3.

Taulukko 12. Hehtaarikohtainen vuosittainen ruoantuotanto ilmaistuna ruoan sisältämällä proteiinilla ja energialla ja jaoteltuna pelto- ja eläintuotantoon.

	Nykytilanne ja skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
Proteiini kg ha ⁻¹	178	186	194
*Peltotuotanto kg ha ⁻¹	55	92	130
*Eläintuotanto kg ha ⁻¹	123	94	64
Energia MJ ha ⁻¹	14767	14700	14643
*Peltotuotanto MJ ha ⁻¹	5549	7694	9856
*Eläintuotanto MJ ha ⁻¹	9218	7007	4787

5.5 Ravinteiden kierrätys ja ravinnetaseet

Ravinteiden kierrätys kasvoi tasaisesti skenaarioittain niin typen kuin fosforinkin osalta, kun sitä mitattiin kierrätysravinteiden osuutena ravinteiden kokonaiskäytöstä (Taulukko 13). Nykytilanteessa lähes puolet lannoitukseen käytetystä tyypestä oli kierrätettyä, ja fosforista vain noin kolmannes oli systeemin ulkopuolelta tuotua mineraalilannoitetta. Skenaariossa 3 kierrätystypen käyttö kasvoi suhteessa nykytilanteeseen 37 % ja fosforin 7 %.

Taulukko 13. Ravinteiden kierrätys ja ravinnetaseet.

	Nykytilanne	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
Kierrätetyn typen osuus %	46	51	55	63
Kierrätetyn fosforin osuus %	70	73	74	75
	<i>kg ha⁻¹</i>	<i>kg ha⁻¹</i>	<i>kg ha⁻¹</i>	<i>kg ha⁻¹</i>
Typen sisään virtaus yhteensä	129,4	130,4	115,5	100,5
<i>*biologinen typensidonta</i>	18,5	18,5	27,0	35,6
<i>*mineraalilannoitteet</i>	59,7	55,4	39,7	24,1
<i>*lanta/mädätysjäännös</i>	51,3	56,6	48,7	40,8
Typen ulosvirtaus	60,1	64,1	62,8	61,5
Typpitase	69,3	66,3	52,7	39,1
Fosforin sisään virtaus yhteensä	16,0	16,0	12,8	9,6
<i>*mineraalilannoitteet</i>	4,8	4,3	3,3	2,4
<i>*lanta/mädätysjäännös</i>	11,2	11,8	9,5	7,2
Fosforin ulosvirtaus	9,0	9,4	8,6	7,8
Fosforitase	7,0	6,6	4,2	1,8

Typen ja fosforin ravinnetaseet laskivat skenaarioittain, mikä johtui ensinnäkin lannoitteiden käytön pienemmästä määrästä. Skenaario 1:ssä typpeä ja fosforia virtasi sisään systeemiin vähemmän, koska biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen nurmi-peräinen osuus korvasi ja siten vähensi mineraalilannoitteen käyttöä. Skenaario 2 ja 3:ssa lisäksi viljeltävien kasvien keskinäiset määräsuhteet muuttuivat, mikä vähensi mineraalilannoitusta. Esimerkiksi vilja-alan supistuminen viherlannoitusnurmen laajennuksen myötä vaikutti fosforilannoituksen vähentymiseen skenaarioissa 2 ja 3. Samoin herneen typpilannoitustaso oli alempi kuin sen korvaaman rehununurmen. Siihen liittyy myös biologisen typensidonnan kasvu maatalouden rakenteen muutoksien seurauksena skenaarioissa 2 ja 3. Herneen ja viherlannoitusnurmialan laajemman alan takia biologisesti sidottua typpeä oli enemmän, mikä ilmeni mineraalityppilannoituksen tarpeen alenemisena: sitä pystyttiin vähentämään skenaarioissa 1-3 järjestyksessä 7 %, 34 % ja 60 % alkuperäisestä (Taulukko 13).

Toiseksi kaikissa skenaarioissa myös korjattiin sadon mukana hieman enemmän typpeä, eli typen ulosvirtaus oli suurempi kuin nykytilanteessa. Se johtui siitä, että kasvien määräsuhteet muuttuivat ja lisäksi korjattiin nurmea biokaasutukseen. Sen sijaan fosforia korjattiin sadon mukana vähemmän skenaarioissa 2 ja 3 johtuen siitä, että nurmikasvuston fosforipitoisuus oli alempi kuin esimerkiksi viljojen. Siten kesantoalan kasvu vilja-alan kustannuksella vähensi fosforin ulosvirtausta.

5.6 Herkkyysanalyysin tulokset

Kun kesannon satotaso varioitiin 20 % suuremmaksi herkkyysanalyysissä, kasvoi energiaomavaraisuusaste jokaisessa skenaariossa, mutta eniten skenaariossa 3 (Taulukko 14). Muutos johtui pääasiassa energian tuotannon kasvusta, kun biokaasutukseen oli enemmän syötemassaa. Myös energian kulutus väheni, kun nurmi-biomassa korvasi isomman osuuden mineraalilannoituksesta, jolloin sen tuotantoon kului vähemmän energiaa. Kesannon satotason varioiminen 20 % matalammaksi vaikutti myös eniten skenaario 3:een.

BMP-kertoimen varioiminen 20 %:lla vaikutti satotasoakin enemmän skenaarioiden energiaomavaraisuuteen (Taulukko 14). Skenaarion 1 kohdalla kaikkien syötemateriaalien BMP-arvojen muutos 20 % suuremmaksi nosti

energiaomavaraisuusasteen samalle tasolle kuin alkuperäisissä tuloksissa skenaario 2:ssa oli. Samalla tavalla skenaario 2:en energiaomavaraisuusaste nousi alkuperäisen skenaario 3:en tasolle, jonka tulos oli lähes 100 % energiaomavaraisuusastevarioinnin jälkeen. BMP-kertoimien muutos 20 % matalammaksi alensi energiaomavaraisuusastetta ja vaikutus oli suurin skenaario 3:ssa. Tarkemmat herkkyysoanalyysin tulokset on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 14. Herkkyysoanalyysin tulokset. Energiaomavaraisuusasteen muutos prosenttiyksikköinä eri lähtöarvojen varioinneilla tutkimuksen tuloksiin verrattuna. Kesantoon lukeutuivat viherlannoitusnurmet.

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
Kesannon satotaso +20 %	+3	+7	+11
Kesannon satotaso -20 %	-3	-6	-11
BMP +20 %	+12	+14	+17
BMP -20 %	-12	-14	-17

6 TULOSTEN TARKASTELU

Skenaarioiduissa tuotantorakenteissa energiaomavaraisuus kasvoi sitä mukaa kun bioenergiaa tuotettiin enemmän ja fossiilista energiaa kulutettiin vähemmän nykytilanteeseen verrattuna. Samalla ravinteiden kierrätys tehostui, mikä johti ravineomavaraisuuden kasvuun etenkin biologisen typensidonnan ansiosta. Tämä edellytti kuitenkin maatalouden rakenteen muuttumista ruoantuotannon osalta alkupeleistä kasvintuotantovaltaisemmaksi ja viherlannoitusnurmen laajempaa alaa viljelyssä. Ruokaa tuotettiin skenaarioissa kuitenkin saman verran kuin nykytilanteessa.

Rockströmiä ym. (2017) mukaillen kestävä tehostaminen ilmeni resurssien käytön tehostumisena ja ulkopuolisten resurssien tarpeen vähentymisenä tutkimusalueella sitä mukaa kun energiaomavaraisuutta ja ravinteiden kierrätystä lisättiin agroekologisen symbioosin toimintamallin mukaisesti. Fossiilisen energian korvaaminen uusiutuvalla energialla ja ravinteiden tehokkaampi käyttö voivat myös vähentää ruoantuotannon kasvihuonekaasupäästöjä ja ravinnekuormitusta vesistöihin; näitä ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa tarkasteltu.

6.1 Energiaomavaraisuus

Tulokset osoittivat, että Saltvikin kunnan alueella olisi nykyiselläänkin potentiaalia tuottaa lähes puolet alueen ruoantuotannon käyttämästä fossiilisesta energiasta maatalouden sivuvirtoja biokaasuttamalla. Tässä tutkimuksessa skenaarioitiin tuotantopotentiaalin kasvattamista entisestään lisäämällä viherlannoitusnurmialaa ja vähentämällä vilja-alaa. Viljarehuomavaraisuuden ja ruoantuotannon määrän säilyttäminen ennallaan vaati kuitenkin eläinten määrän vähennyksen ja proteiinikasvien viljelyn ihmisten suoraan käyttöön, mikä teki alueiden tuotantorakenteesta erilaisen verrattuna nykyiseen – eläintuotanto väheni huomattavasti ja peltotuotanto suoraan ihmisten käyttöön kasvoi skenaarioittain. Samalla kuitenkin energiankulutus laski, mikä helpotti energiaomavaraisuuden tavoitteen saavuttamista ja siten ruoantuotannon irtautumista riippuvuussuhteesta fossiiliseen energiaan.

Jokaisessa skenaariossa tuotettiin huomattava määrä uusiutuvaa energiaa. Määrää havainnollistaa se, että skenaarion 1 energian tuotanto kattaisi 433 henkilöauton

energian kulutuksen keskimääräisellä vuositasolla (Mutikainen ym. 2016) lasketuna ja vastaavasti skenaario 3:ssa jo 497 henkilöauton. Toinen esimerkki on verrata energian määrää sähkölämmitteisten omakotitalojen kulutukseen (Motiva 2021): skenaario 1:en energiantuotanto kattaisi 217 omakotitalon vuosikulutuksen ja skenaario 3 jo 249 omakotitalon.

Tutkimuksessa selvitettiin vain laskennallista energiaomavaraisuutta, eikä käytännön toteutusta korvata fossiilisen energian käyttöä bioenergialla otettu laskuissa huomioon. Maatilan yhteydessä toimivat biokaasulaitokset tuottavat Suomessa yleensä lämpöä ja sähköä (Marttinen ym. 2015, Mutikainen ym. 2016). Niinpä suurimmat säästöt maatilalle voisivat tulla käytännössä ostolämmön ja -sähkön korvaamisesta. Polttoaineen korvaaminen biometaanilla olisi myös yksi mahdollisuus kasvattaa energiaomavaraisuutta maatilalla, mutta liikennepolttoaineen tuottaminen ei ole vielä yleistynyt maatiloilla, vaikka potentiaalia olisi (Marttinen ym. 2015, Mutikainen ym. 2016). Biometaanilla käyviä traktoreita on vähän markkinoilla, mutta Suomessakin esimerkiksi Laukaalla sijaitsee Kalmarin maatila, jossa tuotetaan liikennebiokaasua omaan käyttöön traktoreille ja autoille sekä myytäväksi tilan ulkopuolelle (Mutikainen ym. 2016). Maatalouden investointitukea voi saada myös traktorien muuntamiseen biokaasukäyttöisiksi (Valtioneuvosto 2020).

Maatalouden riippuvuussuhde fossiiliseen energiaan väheni myös mineraalilannoitteiden käytön vähennyttyä skenaarioissa mädätysjäännöksen korvatessa niiden käyttöä. Ruoanjalostuksen ollessa osa symbioosia, myös sen käyttöön voisi suunnata bioenergiaa fossiilisen energian tilalle, jolloin ruokajärjestelmän energiaomavaraisuus kasvaisi. Tässä tutkimuksessa ei otettu huomioon sitä, että ruoanjalostuksessaakin muodostuu usein sivutuotteita, joita voisi myös käyttää biokaasutuksen syötteenä (Garcia ym. 2019). Mikäli ruoanjalostus sijaitsisi paikallisesti, se voisi siis tarjota syötettä biokaasulaitokseen, jolloin energiaa voisi tuottaa entistä enemmän symbioosin käyttöön.

Täydellistä laskennallistakaan riippumattomuutta fossiilisesta energiasta ei tämän tutkimuksen laskentatavalla ja skenaarioilla saavutettu. Tulokset olivat silti linjassa Halbergin ym. (2008), Pugesgaardin ym. (2014) ja Markkussenin ym. (2015) tanskalaisiin mallinnustutkimuksiin, joissa skenaarioihin lisätty viherlannoitusnurmiala kasvatti maatalouden energiaomavaraisuutta. Kyseisissä tutkimuksissa energian

kulutukseen oli tosin laskettu vain maatalan suora energian käyttö, ja maataloussysteemi tuotti jopa ylimääräistä energiaa omaan käyttöönsä nähden. Jos tässä tutkimuksessa ei olisi otettu huomioon mineraalilannoitteiden valmistuksen ja ruoanjalostuksen vaatimaa energiaa, olisivat skenaariot olleet energiantuotannoltaan ylijäämäisiä fossiilisperäisen energian kulutukseen nähden, eli energiaa olisi tuotettu yli tarpeen ja energiaomavaraisuuden tavoite saavutettu. Energian kulutuksen laajempi ajattelu oli kuitenkin oleellinen tässä tutkimuksessa, joka perustui agroekologisen symbioosin malliin (Helenius ym. 2020), jossa myös kierrätysravinteiden käyttö ja ruoanjalostus ovat tärkeässä roolissa.

Metaania hyvin tuottavan nurmibiomassan merkitys syötteenä osoittautui tärkeäksi, kuten myös Koppelmäen ym. (2021b) mallinnustutkimuksessa, jossa tehtiin vastaavia skenaarioita kasvintuotantovaltaiselle alueelle. Kyseisessä tutkimuksessa osoitettiin tarve muuttaa osa pelloista energiantuotantoon, mikäli tavoitteena oli tuottaa runsaasti energiaa biokaasutuksella. Vaihtoehtoinen eläinten ja siten lanta-syötteen lisääminen alueelle ei kasvattanut energiantuotantopotentiaalia vaan jopa alensi sitä, sillä osa nurmesta syötettiin eläimille ja lannan metaanintuottopotentiaali on alhaisempi verrattuna nurmeen. Kuten tämänkin tutkimuksen tulokset osoittivat, energiaa tuotettiin enemmän kasvin- kuin eläintuotantoon painottuvassa systeemissä. Tosin laskenta perustui ainoastaan syötemateriaalien erillisiin ominaisuuksiin, eikä tutkimuksessa otettu huomioon lannan ja kasvimassan yhdistelmämädätykseen liittyviä seikkoja, jotka voivat vaikuttaa energiasaantoon, kuten Lehtomäen ym. (2007) tutkimus havainnollisti.

6.2 Ravinneomavaraisuus

Ravinnetaseet osoittivat ravinteiden kierrätyksen ja käytön tehostumisen skenaarioittain. Se oli seurausta siitä, että ostolannoitetta tarvittiin vähemmän, ja mädätysjäännöksen osuus lannoituksen kokonaismäärästä kasvoi. Siten typpi- ja fosforiomavaraisuus kasvoivat skenaarioittain. Nykytilanteessa kierrätysravinteet olivat yksinomaan peräisin rehun kierrätyksestä kotieläinten ruoansulatuksen läpi, mutta skenaarioissa ohelle tuotiin biokaasulaitos, jonka läpi kiertävä nurmi toi lisää kierrätysravinteita viljelykiertoon. Etenkin viherlannoitusnurmen ja siten

typensitojakasvien laajempi viljely lisäsi typpeä mädätysjäännökseen, jolloin ulkopuolelta tuodun mineraalitypen tarve väheni. Vaikka kotieläimiä ja siten lantaa oli skenaarioittain vähemmän biokaasulaitokseen vietäväksi, nurmen osuus mädätysjäännöksessä mahdollisti myös fosforilannoitteen vähennyksen skenaarioissa. Tulokset olivat linjassa Koppelmäen ym. (2021b) mallinnustutkimuksen tuloksiin, joissa osoitettiin agroekologisen symbioosin parantavan typen ja fosforin kierrätystä ja siten vähentävän mineraalilannoitteiden tarvetta.

Tulokset olivat kuitenkin ravinnetaseiden osalta vain suuntaa antavia, sillä kasvien satotasot oletettiin skenaarioissa samoiksi kuin nykytilanteessa. Niin siitäkin huolimatta, että eläimiä, ja siten lantaa oli vähemmän käytettävissä, kun ruoantuotanto skenaarioitiin kasviperäisemmäksi. Mädätysjäännöksessä ei sen vuoksi ollut kahdessa viimeisessä skenaarioissa yhtä paljon ravinteita kuin alkutilanteen lannassa oli. Etenkin fosforin osalta ero oli jo selvä, mikä selittyy lannan korkealla fosforipitoisuudella. Toisaalta tutkimuksessa ei otettu huomioon lannan parempaa lannoitusarvoa mädätyksen jälkeen (Möller ja Müller 2012), jolloin pienempi määrä mädätysjäännöstä kuin käsittelemätöntä lantaa voisi riittää samaan satotasoon. Myöskään monivuotisten viherlannoitusnurmien viljelykierrollisia pitkän tähtäimen hyötyjä esimerkiksi maan rakenteelle ja orgaanisen aineksen pitoisuudelle ei otettu huomioon, vaikka ne voivat kasvattaa satotasoa (Riley ym. 2008, Weißhuhn ym. 2017).

Vaikka ravinnetaseet laskivat, ne pysyivät edelleen positiivisina. Positiivinen ravinnetase ei kuvaa kuitenkaan suoraan pelloilta huuhtoutuvien ravinteiden määrää. Esimerkiksi sademäärä, maanmuokkaus ja maaperän orgaanisen aineksen laatu vaikuttavat siihen, kuinka paljon ravinteita sitoutuu maaperään tai lopulta huuhtoutuu (Turtola ja Yli-Halla 1999, Turtola ym. 2017, Laine ym. 2018). Tutkimuksen laskentatavalla typen ja fosforin ravinnetaseet laskivat agroekologisen symbioosin mukaisilla toimintatavoilla, mikä oli osoitus lähinnä siitä, että huuhtoutumisriski väheni. Kotieläintuotantoon keskittyneillä alueilla Suomessa muodostuu liikaa lantafosforia kasvien tarpeeseen verrattuna (Marttinen ym. 2017), mihin tämänkin tutkimuksen positiivinen fosforitase Saltvikissa voi viitata. Ahvenanmaalla fosforin huuhtoutumisen riski on Ylivainion ym. (2015) mukaan Suomen keskiarvoa korkeampi kaltevien peltujen vuoksi, ja 76 % pelloista fosforilannoituksella ei saada edes

satovastetta. Vuosien takainen voimakas fosforilannoitus on kerryttänyt fosforia Suomen peltoihin ja aiheuttaa vesistökuormitusta (Turtola ja Ylivainio 2009), mikä antaa aihetta alentaa fosforitasetta. Jos kotieläinkestittymät säilyvät ennallaan, eikä niiden ravinnevirtoihin tule muutoksia, voi Uusitalon ym. (2007b) mukaan niiden aiheuttama fosforikuormitus vesistöihin kasvaa entisestään. Myös McCrackin ym. (2018) mukaan Itämeren ravinnekuorman vähentämisessä on oleellista kiinnittää huomiota eläintuotannon keskittymiin, joissa muodostuvaa lantaa ei käytetä tehokkaasti.

6.3 Maatalouden rakenteen ja ruoantuotannon muuttuminen

Maatalouden rakenne muuttui melko paljon, kun siitä skenaarioitiin fossiilisesta energiasta irtautuvaa ruoantuotantosysteemiä, jossa käytettiin ravinteitakin nykytilannetta tehokkaammin ja voitiin siten vähentää vesistö- ja ilmastokuormitusta.

Ruoantuotanto pysyi skenaarioissa jotakuinkin samalla tasolla ruoan sisältämän proteiinin ja energian määrällä mitattuna, kun kasvintuotanto korvasi vähentyntä eläintuotantoa. Kasvien käyttäminen suoraan ihmisravinnoksi on yleensä tehokkaampaa kuin kotieläintuotanto, sillä eläinten kuluttaman rehun ravinto- ja energiasisällöstä väistämättä vain osa siirtyy ihmisen käyttämään eläintuotteeseen. Toisaalta esimerkiksi Van Zantenin ym. (2016) ja Van Kernebeekin ym. (2016) tutkimukset osoittivat eläintuotannolla olevan rooli kestävässä ruoantuotannossa maankäytön kannalta. Kyseisten tutkimusten mukaan esimerkiksi märehitijät, joiden rehu on peräisin huonosti tuottavilta mailta tai peltoviljelyn sivutuotteista, voivat olla osa tehokkaaseen maankäyttöön perustuvaa ruoantuotantoa. Sen vuoksi ei välttämättä ole syytä tavoitella tilannetta, jossa kotieläintuotannosta luovuttaisiin kokonaan.

Kasvintuotannon painottaminen ruoantuotannossa ei kuitenkaan lisännyt merkittävästi ruoantuotannon määrää nykytilanteeseen verrattuna, mikä johtui kotieläinten ruokinnassa käytetystä tuontirehusta. Herneen viljely korvasi siis vain sen osan eläinten vähentymisen seurauksena vapautuneesta rehualasta, joka sijaitsi paikallisesti kunnan alueella. Muut vaikutukset jäivät systeemin ulkopuolelle – ja silti ruoantuotanto pysyi lähes samalla tasolla kuin nykytilanteessa. Tosin luonnonlaitumien osuutta eläinten ruokinnassa ei otettu huomioon, mikä voi selittää vain 34 %:n

omavaraisuusasteen laitumen suhteen nykytilanteessa. Eläinten vähennys vapauttaisi periaatteessa myös luonnonlaitumen alaa, joten ruokaa voisi skenaarioissa tuottaa suoraan ihmisille entistä enemmän siirtämällä eläimistä aiempaa suuremman osuuden luonnonlaidunruokintaan.

6.4 Kuntatason tarkastelun hyödyt

Kuntatason energiantuotantopotentiaalin selvittäminen antaa lähtötietoja usean toimijan yhteishankkeena toteutettavalle biokaasulaitokselle, joka on agroekologisen symbioosin periaatteiden mukainen yksittäisten maatilakohtaisten laitosten sijaan. Maatilat voisivat myös hyödyttää toisiaan tuotantosunnista riippuen, esimerkiksi kotieläintilan lannan käsittely helpottuisi ja kasvintuotantotila saisi kierrätysravinteita käyttöönsä. Yhteishankkeessa myös taloudellinen riski ja vaiva hajautuisivat useammalle toimijalle (Valtioneuvosto 2020). Kunnan alueella tilat voivat sijaita lähellä toisiaan, jolloin syötemateriaalia ja mädätysjäännöstä voisi kuljettaa alueella suurella volyyymilla, mikä voisi helpottaa myös laitoksen kannattavuuden saavuttamista ja jopa liikennepolttoaineen jalostukseen ryhtymistä (Valtioneuvosto 2020, Marttinen ym. 2015). Toisaalta lämpöä ei kannata lämpöhävikin takia siirtää kovin kauas biokaasulaitoksesta (Motiva 2013), joten sen jako kaikkien osapuolien käyttöön tuskin onnistuisi, vaan todennäköisesti sitä tuotettaisiin liikaa vain laitoksen välittömässä läheisyydessä olevien maatilatoimijoiden käyttöön nähden. Jos yhteishankkeena toteutetun biokaasulaitoksen tuottamalle lämmölle ei löydy kuluttajaa lähistöllä, voi Marttisen ym. (2015) mukaan olla kannattavampaa perustaa useampia pienempiä biokaasulaitoksia mautilojen yhteyteen. Agroekologiseen symbioosiin kuuluva paikallinen ruoanjalostusyksikkö voisi olla yksi ratkaisu sähkön ja lämmön hyödyntäjänä. Yksi vaihtoehto olisi myös puhdistaa kaasu biometaaniksi ja syöttää kaasuputkiverkoston maakaasun tapaan, mutta se tarkoittaisi, että laitoksen tulisi sijaita verkoston läheisyydessä Etelä-Suomen alueella (Mutikainen ym. 2016), johon Saltvik ei kuulu.

6.5 Tutkimuksen epävarmuudet ja rajoitteet

Tutkimukseen liittyi epävarmuuksia ja se perustui osittain olettamuksiin, mikä tulee ottaa huomioon tulosten luotettavuuden ja käytettävyyden arvioinnissa. Herkkyysanalyysi osoitti, että kesantoalan satotasolla oli vaikutusta tulokseen eniten skenaario 3:ssa, minkä selittää nurmibiomassan osuuden kasvu biokaasutuksen syötteenä. Herkkyysanalyyseissä ilmeni myös, että BMP-arvojen variaationilla oli sitäkin suurempi vaikutus energiaomavaraisuusasteeseen ja skenaario 3:een sillä oli suurin vaikutus. Variaationit eivät kuitenkaan vaikuttaneet skenaarioiden vertailuun perustuviin tuloksiin ja siten johtopäätöksiin.

Tutkimuksessa oletettiin maatalouden suoran energian kulutuksen olevan samalla tasolla kaikissa skenaarioissa. Todennäköisesti eläintuotannon vähennyttä skenaarioittain myös suoran energian kulutus laskisi, sillä ruoan tuotantoketju lyhenisi. Esimerkiksi Ahokkaan ja Schäferin (2013) raportoimissa maatilojen energia-analyyseissä eläintuotanto kulutti noin nelinkertaisesti suoraa energiaa peltokasvintuotantoon verrattuna, kun energian kulutusta mitattiin lopputuotetta kohti. Siten kasvintuotantoon siirtyminen voisi helpottaa energiaomavaraisuuden tavoitteen saavuttamista. Toisaalta huomioon ei otettu sitä, miten paljon syötteen keruu ja kuljetus biokaasulaitokseen, sekä mädätysjäännöksen kuljetus ja levitys pelloille kuluttaisi energiaa.

Kuntatason tarkastelussa jouduttiin käyttämään monia oletuksia ja arvioita, sillä tarkkoja tietoja ei ollut saatavilla. Esimerkiksi kunnan rajat eivät todennäköisesti rajaa maataloussysteemiä käytännössä, vaan rehua ja lantaa voidaan kuljettaa rajojen yli molempiin suuntiin. Sitä ei otettu huomioon rehuomavaraisuuden arvioinnissa ja lannan ravinteiden määrässä kunnan sisäpuolella. Myös lannoituksessa käytettävä mineraalilannoitus arvioitiin koko Ahvenanmaan lannoitustason perusteella, vaikka lannoituskäytännöt voivat todellisuudessa olla Saltvikissa toisenlaisia. Toisaalta tutkimuksen tuloksen kannalta oleellisinta olivat syy-seuraussuhteet, joita skenaarioissa tehdyt muutokset aiheuttivat, eivätkä tarkat lähtötilanteen määreet.

Maatalouden rakenne muuttui skenaarioissa esimerkiksi eläinten määrän vähennyttä. Tutkimuksessa ei otettu huomioon tekijöitä, jotka ovat vaikuttaneet nyky-muotoisen maatalouden rakenteen muodostumiseen. Avoimeksi kysymykseksi siis

jäi, kuinka realistisia skenaarioiden muutokset olisivat tosielämässä. Esimerkiksi maatalouden painopisteen siirtyminen kotieläintuotannosta kasvintuotantoon olisi radikaali muutos, johon vaikuttavat ehdottomasti myös monet taloudelliset ja kulttuuriset seikat. Tarvitaan lisätutkimusta esimerkiksi viljelijöiden ja ruoanjalostusyritysten kanssa yhteistyössä tehtynä, jotta paitsi ravinne- ja energiavirrat voidaan laskea tarkemmin, myös soveltuvuus ja hyväksyttävyyys voidaan arvioida.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa osoitettiin Saltvikin kunnan maatalouden potentiaali tuottaa sivuvirroistaan huomattava määrä uusiutuvaa energiaa, jolla voitaisiin korvata fossiilisen energian käyttöä ruoantuotannossa. Lisäksi mallinnettiin agroekologista symbioosia jäljittelevissä skenaarioissa mahdollisuus entisestään kasvattaa potentiaalia muuttamalla maatalouden rakennetta, kuitenkin vähentämättä nykyistä rehuomavaraisuuden tasoa ja ruoan tuotannon määrää.

Energiaomavaraisuus fossiilisen energian käyttöön nähden oli tässä tutkimuksessa korkeimmillaan ruoantuotannoltaan kasviperäiseen painottuneessa maatalouden rakenteessa, jossa viljelyalaa käytettiin runsaasti myös monihyödyllisten viherlannoitusnurmien viljelyyn. Samalla kun saavutettiin korkeampi energiaomavaraisuuden taso, tehostui ravinteiden käyttö biokaasulaitoksen ansiosta, jolloin ulkopuolisia ravinteita tarvittiin vähemmän. Energian ja ruoan tuotannon paikallinen tasapainottaminen johti siten energia- ja ravinneomavaraiseen ruoantuotantoon, jonka riippuvuus fossiilisesta energiasta ja ulkoisista resursseista väheni.

8 KIITOKSET

Haluan kiittää ohjaajiani Kari Koppelmäkeä ja Juha Heleniusta asiantuntevasta ohjauksesta, sekä *Hungry for Saltvik* -hankkeen toimijoita mielenkiintoisesta aiheesta ja tilaisuudesta päästä mukaan osallistumaan. Lisäksi haluan kiittää läheisiäni tuesta ja kannustuksesta tutkielman kirjoituksen aikana.

9 LÄHTEET

- Ahlberg-Eliasson, K., Nadeau, E., Levén, L. & Schnürer, A. 2017. Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. *Biomass and Bioenergy* 97: 27-37.
- Ahokas, J. 2013. Maatalouden energian käyttö. Teoksessa: Ahokas, J. (toim.) Maatilojen energiankäyttö, ENPOS-hankkeen tulokset. Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki. Publications 15. s. 8-19.
- Ahokas, J. & Schäfer, W. 2013. Maatilan energiankäytön seuranta. Teoksessa: Ahokas, J. (toim.) Maatilojen energiankäyttö, ENPOS-hankkeen tulokset. Department of Agricultural Sciences, University of Helsinki. Publications 15. s. 20-26.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. & Gruber, L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118: 173-182.
- Angelis-Dimakis, A., Biberacher, M., Dominguez, J., Fiorese, G., Gadocha, S., Gnansounou, E., Guariso, G., Kartalidis, A., Panichelli, L., Pinedo, I. & Robba, M. 2011. Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 1182-1200.
- Anglade, J., Billen, G. & Garnier, J. 2015. Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* 6: 1-24.
- Bommarco, R., Kleijn, D. & Potts, S. G. 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution* 28: 230-238.
- Brentrup, F., Hoxha, A. & Christensen, B. 2016. Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. Teoksessa: The 10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food, October 19-21, 2016, Dublin, Ireland.
- Britz, W. & Delzeit, R. 2013. The impact of German biogas production on European and global agricultural markets, land use and the environment. *Energy Policy* 62: 1268-1275.

- Bruni, E., Jensen, A. P., Pedersen, E. S. & Angelidaki, I. 2010. Anaerobic digestion of maize focusing on variety, harvest time and pretreatment. *Applied Energy* 87: 2212-2217.
- Chertow, M. R. 2000. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment* 25: 313-337.
- Cordell, D., Drangert, J. O. & White, S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19: 292-305.
- Dawson, C. J. & Hilton, J. 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* 36: S14-S22.
- Erismann, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z. & Winiwarter, W. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1: 636-639.
- Farkye, N. Y. 2004. Cheese technology. *International Journal of Dairy Technology* 57: 91-98.
- Foley, J., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. & Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S. & Tilman, D. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478: 337-342.
- Frøseth, R. B., Bakken, A. K., Bleken, M. A., 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.
- Garcia, N. H., Mattioli, A., Gil, A., Frison, N., Battista, F. & Bolzonella, D. 2019. Evaluation of the methane potential of different agricultural and food processing substrates for improved biogas production in rural areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 112: 1-10.

- Godfray H. C. J., Beddington J. R., Crute I. R., Haddad L., Lawrence D., Muir J. F., Pretty J., Robinson S., Thomas S. M. & Toulmin C. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327: 812-818.
- Hakawati, R., Smyth, B. M., McCullough, G., De Rosa, F. & Rooney, D. 2017. What is the most energy efficient route for biogas utilization: heat, electricity or transport? *Applied Energy* 206: 1076-1087.
- Halberg, N., Dalgaard, R., Olesen, J. E. & Dalgaard, T. 2008. Energy self-reliance, net-energy production and GHG emissions in Danish organic cash crop farms. *Renewable Agriculture and Food Systems* 23: 30-37.
- Helenius, J., Hagolani-Albov, S. E. & Koppelmäki, K. 2020. Co-creating Agroecological Symbioses (AES) for sustainable food system networks. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4, 588715.
- Helenius, J., Koppelmäki, K. & Virkkunen, E. 2017. Agroekologinen symbioosi ravinne- ja energiaomavaraisessa ruoantuotannossa. Ympäristöministeriön raportteja 18. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/80004>. Julkaistu 2017. Viitattu 15.3.2021
- Huttunen, M. J., Kuittinen, V. & Lampinen, A. 2018. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 21. Tiedot vuodelta 2017. *Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences* 33/2018. 50 s.
- Kafle, G. K. & Chen, L. 2016. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste Management* 48: 492-502.
- 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 (Finland). Teoksessa: P. Rytkönen & U. Hård (toim.) *Challenges for the New Rurality in a Changing World (Proceedings from the 7th International Conference on Localized Agri-Food Systems, May 8-10 2016 Stockholm, Sweden)* COMREC Studies in Environment and Development 12: 171-172.
- Koppelmäki, K., Helenius, J. & Schulte, R. P. 2021a. Nested circularity in food systems: A Nordic case study on connecting biomass, nutrient and energy flows from field scale to continent. *Resources, Conservation and Recycling* 164, 105218.

- Koppelmäki, K., Lamminen, M., Helenius, J. & Schulte, R. P. 2021b. Smart integration of food and bioenergy production delivers on multiple ecosystem services. Food and Energy Security: Early View e279. <https://doi-org.libproxy.helsinki.fi/10.1002/fes3.279>. Viitattu 15.3.2021.
- Koppelmäki, K., Parviainen, T., Virkkunen, E., Winqvist, E., Schulte, R. P. & Helenius, J. 2019. Ecological intensification by integrating biogas production into nutrient cycling: Modeling the case of Agroecological Symbiosis. *Agricultural Systems* 170: 39-48.
- Känkänen, H., Suokannas, A., Tiilikkala, K. & Nykänen, A. 2013. Biologinen typensidonta fossiilisen energian säästäjänä: 2. korjattu painos. MTT Raportti 76. Jokioinen: MTT. 60 s.
- Ladha-Sabur, A., Bakalis, S., Fryer, P. J. & Lopez-Quiroga, E. 2019. Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in Food Science & Technology* 86: 270–280.
- Laine, M., Rütting, T., Alakukku, L., Palojärvi, A. & Strömmer, R. 2018. Process rates of nitrogen cycle in uppermost topsoil after harvesting in no-tilled and ploughed agricultural clay soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 110: 39-49.
- Latvala, M. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. *Suomen ympäristö 24/2009*. 114 s.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S. & Rintala, J. A. 2007. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling* 51: 591-609.
- Luke 2010. Tilastotietokanta. Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_08%20Indikaattorit_02%20Ilmastonmuutos_08%20Maatalouden%20energiankulutus/01_Maatalouden_energiankulutus.px/ Viitattu 16.4.2021.
- Luke 2016. Tilastotietokanta: Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus energialähteittäin (GWh). http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_02%20Rakenne_08%20Maa-

%20ja%20puutarhatalouden%20energiankulutus/01_Maa_ja_puutarhatal_energiankulutus.px/table/tableViewLayout1/?loadedQueryId=73a3c987-9220-4e0a-b18e-1d46b2d4db28&timeType=from&timeValue=2010 Viitattu 16.4.2021.

Luke 2015. Rehutaulukot ja ruokintasuositukset. Märehtijät - Siat - Siipikarja - Hevoset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2015. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 80 s.

Luke 2020. Tilastotietokanta: Maataloustilastot. <https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/>. Luonnonvarakeskus. Viitattu 15.3.2021.

Luke 2020a. Tilastotietokanta. Käytössä oleva maatalousmaa kunnittain. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_22%20Kaytossa%20oleva%20maatalousmaa/02_Kaytossa_oleva_maatalousmaa_kunta.px/ Viitattu 17.4.2021

Luke 2020b. Tilastotietokanta. Käytössä oleva maatalousmaa ELY-keskuksittain. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_22%20Kaytossa%20oleva%20maatalousmaa/01_Kaytossa_oleva_maatalousmaa_ELY.px/ Viitattu 17.4.2021

Luke 2020c. Tilastotietokanta. Viljelykasvien sato. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_14%20Satotilasto/01_Viljelykasvien_sato.px/ Viitattu 17.4.2021

Luke 2020d. Tilastotietokanta. Viljatase. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_32%20Viljatase/01_Viljatase.px/ Viitattu 17.4.2021

Luke 2020e. Tilastotietokanta. Kotieläinten lukumäärä 1.4. ja 1.5. kunnittain. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_12%20Kotielainten%20lukumaara/02_Kotielainten_lukumaara_kevaalla_kunta.px/ Viitattu 17.4.2021.

Luke 2020f. Tilastotietokanta. Lihantuotanto kunnittain vuosittain (nauta, sika ja lammas). https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_06%20Lihantuotanto_04%20Vuositilastot/10_Lihantuotanto_kunta.px/ Viitattu 17.4.2021.

- Luke 2020g. Tilastotietokanta. Maidontuotanto kunnittain vuosittain. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_02%20Maito-%20ja%20maitotuotetila_04%20Vuositilastot/12_Maidontuotanto_kunta_v.px/ Viitattu 17.4.2021.
- Luke 2020h. Tilastotietokanta. Kanamunien kokonaistuotanto. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_10%20Kanamunien%20tuotanto/02_Kanamunien_kokonaistuotanto.px/ Viitattu 17.4.2021.
- Luke 2020i. Tilastotietokanta. Kotieläinten lukumäärä. https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_12%20Kotielainten%20lukumaara/09_Kotielainten_lukumaara.px/ Viitattu 17.4.2021.
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017. Suomen normilanta –laskentajärjestelmän kuvaus ja ensimmäiset tulokset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2017. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 54 s.
- Luostarinen, S., Logrén, J., Grönroos, J., Lehtonen, H., Pavola, T., Rankinen, K., Rintala, J., Salo, T., Ylivainio, K. & Järvenpää, M. 2011. Lannan kestävä hyödyntäminen. MTT Raportti 21. Jokioinen: MTT. 165 s.
- Mariotti, F., Tomé, D. & Mirand, P. P. 2008. Converting nitrogen into protein—beyond 6.25 and Jones' factors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48: 177-184.
- Markussen, M. V., Pugesgaard, S., Oleskowicz-Popiel, P., Schmidt, J. E. & Østergård, H. 2015. Net-energy analysis of integrated food and bioenergy systems exemplified by a model of a self-sufficient system of dairy farms. *Frontiers in Energy Research* 3, 49.
- Marttinen, S., Lehtonen, H., Luostarinen, S. & Rasi, S. 2013. Biokaasuyrittäjän toimintaympäristö Suomessa: Kokemuksia MMM:n investointiavustusjärjestelmästä 2008–2010. MTT Raportti 103. Jokioinen: MTT. 44 s.
- Marttinen, S., Luostarinen, S., Winquist, E. & Timonen, K. 2015. Rural biogas: feasibility and role in Finnish energy system. Research report no 1.1.3-4. Helsinki: Cluster for Energy and Environment. 31 s.

- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiahho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A. & Zu Castell-Rüdenhausen, M. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa – Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. 47 s.
- Massé, D. I., Talbot, G. & Gilbert, Y. 2011. On farm biogas production: A method to reduce GHG emissions and develop more sustainable livestock operations. *Animal Feed Science and Technology* 166: 436-445.
- McCrackin, M. L., Gustafsson, B. G., Hong, B., Howarth, R. W., Humborg, C., Savchuk, O. P., Svanbäck, A. & Swaney, D. P. 2018. Opportunities to reduce nutrient inputs to the Baltic Sea by improving manure use efficiency in agriculture. *Regional Environmental Change* 18: 1843-1854.
- Moset, V., Fontaine, D. & Møller, H. B. 2017. Co-digestion of cattle manure and grass harvested with different technologies. Effect on methane yield, digestate composition and energy balance. *Energy* 141: 451-460.
- Motiva. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf. Julkaistu 2013. Viitattu 16.4.2021.
- Motiva. 2021. Teho- ja energiayksiköt. https://www.motiva.fi/ajankoh-taista/energiasanasto_ja_-_yksikot/teho-_ja_energiayksikot Viitattu 24.4.2021.
- Mutikainen, M., Sormunen, K., Paavola, H., Haikonen, T. & Väisänen, M. 2016. Bio-kaasusta kasvua. Sitran selvityksiä 111. Helsinki: Sitra. 127 s.
- Müller-Stöver, D. S., Sun, G., Kroff, P., Thomsen, S. T. & Hauggaard-Nielsen, H. 2016. Anaerobic co-digestion of perennials: Methane potential and digestate nitrogen fertilizer value. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179: 696-704.
- Möller, K. & Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Engineering in Life Science* 12: 242-257.
- Möller, K. & Stinner, W. 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy* 30: 1-16.

- Neff, R. A., Parker, C. L., Kirschenmann, F. L., Tinch, J. & Lawrence, R. S. 2011. Peak oil, food systems, and public health. *American Journal of Public Health* 101: 1587-1597.
- Niemeläinen, O., Hyvönen, T., Jauhiainen, L., Lötjönen, T., Virkkunen, E. & Uusi-Kämppä, J. 2014. Hoidettu viljelemätön pelto biokaasuksi – biomassan sopivuus syötteenä ja korjuun vaikutukset tukiohjelmien muiden tavoitteiden saavuttamiseen. HVP biokaasuksi hankkeen loppuraportti. Makena Dnro 2619/312/2009. Jokioinen: MTT. 31 s.
- Nkoa, R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 34: 473-492.
- Nuttall, J., O'Leary, G., Panozzo, J. & Fitzgerald, G. J. 2012. A model for predicting milling yield in wheat. Teoksessa: Yunusa, I. (toim.) *Capturing opportunities and overcoming obstacles in Australian agronomy* (Proceedings of the 16th Australian Agronomy Conference, October 14-18, Armidale, Australia). Warra-gul, Australia: Australian Society of Agronomy Inc.
- OECD 2021. Nutrient balance (indicator). <https://data.oecd.org/agrland/nutrient-balance.htm> Organisation for Economic Co-operation and Development. Viitattu 18.4.2021.
- Parviainen, T. & Helenius, J. 2020. Trade imports increasingly contribute to plant nutrient inputs: case of the Finnish food system 1996–2014. *Sustainability* 12, 702.
- Pellegrini, P. & Fernández, R. J. 2018. Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 2335-2340.
- Pelletier, N., Audsley, E., Brodt, S., Garnett, T., Henriksson, P., Kendall, A., Kramer, K. J., Murphy, D., Nemecek, T. & Troell, M. 2011. Energy intensity of agriculture and food systems. *Annual Review of Environment and Resources* 36: 223–246.
- Pimentel, D., Pimentel, M. & Karpenstein-Machan, M. 1999. Energy use in agriculture: an overview. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 1/1999.
- Pingali, P. L. 2012. Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 12302-12308.

- Potter, P., Ramankutty, N., Bennett, E. M. & Donner, S. D. 2010. Characterizing the spatial patterns of global fertilizer application and manure production. *Earth Interactions* 14: 1-22.
- Pugesgaard, S., Olesen, J. E., Jørgensen, U. & Dalgaard, T. 2014. Biogas in organic agriculture—effects on productivity, energy self-sufficiency and greenhouse gas emissions. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 29: 28-41.
- Ramankutty, N., Mehrabi, Z., Waha, K., Jarvis, L., Kremen, C., Herrero, M. & Rieseberg, L. H. 2018. Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. *Annual Review of Plant Biology* 69: 789-815.
- Rasi, S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Pulkkinen, H., Tampio, E., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2019. Nurmi biokaasun raaka-aineena: RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 46/2019. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 29 s.
- Regina, K., Lehtonen, H., Palosuo, T. & Ahvenjärvi, S. 2014. Maatalouden kasvihuonekaasupäästöt ja niiden vähentäminen. *MTT Raportti* 127. Jokioinen: MTT. 42 s.
- Riley, H., Pommeresche, R., Eltun, R., Hansen, S. & Korsath, 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.
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Shah, M., Steduto, P., de Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L. & Smith, J. 2017. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* 46: 4-17.
- Ruokavirasto 2019. Luomuvalvonnan tilastot ja tietohaut. Toimijoiden ja tuotantoalojen yhteenveto ELY-keskuksittain 2019. <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/viljelijat/luomutilat/tilastot/luomu-2019ep.pdf> Viitattu 17.4.2021.
- SBB 2021. Biokaasun tuotanto. <https://biokierto.fi/biokaasu/tuotanto/> Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Viitattu 16.4.2021.
- Scarlat, N., Dallemand, J. F. & Fahl, F. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 129: 457-472.

- Schittenhelm, S. 2008. Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy* 29: 72-79.
- Schröder, J. J., Cordell, D., Smit, A. L. & Rosemarin, A. 2010. Sustainable use of phosphorus. Report 357. Wageningen, The Netherlands: Plant Research International. 124 s.
- 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. 97 s.
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. & Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses—specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology* 100: 2952-2958.
- Seppälä, M., Pyykkönen, V., Väisänen, A. & Rintala, J. 2013. Biomethane production from maize and liquid cow manure – Effect of share of maize, post-methanation potential and digestate characteristics. *Fuel* 107: 209-216.
- Sinkko, T., Hakala, K. & Thun, R. 2010. Biopolttoaineiden raaka-aineeksi viljeltävien kasvien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt Suomessa Euroopan parlamentin ja Neuvoston direktiivin 2009/28/EY mukainen laskenta. MTT Raportti 9. Jokioinen: MTT. 41 s.
- Sonesten, L., Svendsen, L. M., Tornbjerg, H., Gustafsson, B., Frank-Kamenetsky, D. & Haapaniemi, J. 2018. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea: HELCOM PLC-6. Helsinki: Helsinki Commission. 48 s. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:su:diva-164600> Viitattu 16.4.2021.
- Stinner, P. W. 2015. The use of legumes as a biogas substrate-potentials for saving energy and reducing greenhouse gas emissions through symbiotic nitrogen fixation. *Energy, Sustainability and Society* 5: 1-7.
- 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.
- SVT 2020a. Energian hankinta ja kulutus 2019. <http://www.stat.fi/til/ehk/2019/index.html> Suomen virallinen tilasto. Julkaistu 2020. Viitattu 16.4.2021.

- SVT 2020b. Sähkön ja lämmön tuotanto 2019. <http://www.stat.fi/til/sala-tuo/2019/index.html> Suomen virallinen tilasto. Julkaistu 2020. Viitattu 19.3.2021.
- SVT 2020c. Teollisuuden energiankäyttö 2019. <http://www.stat.fi/til/tene/2019/index.html> Suomen virallinen tilasto. Julkaistu 2020. Viitattu 23.3.2021.
- SVT 2020d. Kuntien avainluvut. <https://www.stat.fi/tup/alue/kuntienavainluvut.html#?active1=SSS&year=2020> Suomen virallinen tilasto. Julkaistu 2020. Viitattu 17.4.2021.
- Tilman, D. 1998. The greening of the green revolution. *Nature* 396: 211-212.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J. & Befort, B. L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 20260-20264.
- Tufaner, F. & Avşar, Y. 2016. Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13: 2303-2312.
- Tuomisto, H. L. & 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., Salo, T., Miettinen, A., Iho, A., Valkama, E., Rankinen, K., Virkajärvi, P., Tuomisto, J., Sipilä, A., Muurinen, S., Turakainen, M., Lemola, R., Jauhiainen, L., Uusitalo, R., Grönroos, J., Mylly, M., Heikkinen, J., Merilaita, S., Bernal, J., Savela, P., Kartio, M., Salopelto, J., Finer, A. & Jaakkola, M. 2017. Hyötyä taseista: Ravinnetaseiden tulkinta ympäristön ja viljelyn hyödyksi. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 15/2017. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 70 s.
- Turtola, E. & Yli-Halla, M. 1999. Fate of phosphorus applied in slurry and mineral fertilizer: accumulation in soil and release into surface runoff water. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55: 165-174.
- Turtola, E. & Ylivainio, K. 2009. Suomen kotieläintalouden fosforikierto – säätöpotentiaali maataloilla ja aluetasolla. *Maa- ja elintarviketalous* 138. Jokioinen: MTT. 244 s.
- USDA 2021. Food Data Central. <https://fdc.nal.usda.gov/> U.S. Department of Agriculture. Viitattu 17.4.2021.

- Uusitalo, R., Ekholm, P., Turtola, E., Pitkänen, H., Lehtonen, H., Granlund, K., Bäck, S., Puustinen, M., Räike, A., Lehtoranta, J., Rekolainen, S., Walls, M. & Kauppila, P. 2007a. Maatalous Itämeren rehevöittäjänä. *Maa- ja elintarviketalous* 96. Jokiainen: MTT. 34 s.
- Uusitalo, R., Turtola, E. & Grönroos, J. 2007b. Finnish trends in phosphorus balances and soil test phosphorus. *Agricultural and Food Science* 16: 301-316.
- Valtioneuvosto 2015. Valtioneuvoston asetus eläinyksiköistä eräissä maatalouden tuissa. Asetus 45/2015. Annettu 22.1.2015. Finlex® sähköinen säädöstietopankki: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150045>. Viitattu 17.5.2021.
- Valtioneuvosto 2014. Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta. Asetus 1250/2014. Annettu 18.12.2014. Finlex® sähköinen säädöstietopankki: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20141250>. Viitattu 6.3.2021.
- Valtioneuvosto 2020. Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162032>. Julkaistu 2020. Viitattu 17.4.2021.
- Van Kernebeek, H. R., Oosting, S. J., Van Ittersum, M. K., Bikker, P. & De Boer, I. J. 2016. Saving land to feed a growing population: consequences for consumption of crop and livestock products. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21: 677-687.
- Van Zanten, H. H., Mollenhorst, H., Klootwijk, C. W., van Middelaar, C. E. & de Boer, I. J. 2016. Global food supply: land use efficiency of livestock systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21: 747-758.
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H. & Tilman, D. G. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications* 7: 737-750.
- Wahid, R., Ward, A. J., Møller, H. B., Søgaard, K. & Eriksen, J. 2015. Biogas potential from forbs and grass-clover mixture with the application of near infrared spectroscopy. *Bioresource Technology* 198: 124-132.
- Wanhalinna, V. 2010. Leivän hiilijalanjälki. Pro Gradu-tutkielma. Helsingin yliopiston elintarvike- ja ympäristötieteiden laitos.

- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J. & Jones, D. L. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* 99: 7928-7940.
- Weißhuhn, P., Reckling, M., Stachow, U. & Wiggering, H. 2017. Supporting agricultural ecosystem services through the integration of perennial polycultures into crop rotations. *Sustainability* 9, 2267.
- Winqvist, E., Rikkonen, P., Pyysiäinen, J. & Varho, V. 2019. Is biogas an energy or a sustainability product? Business opportunities in the Finnish biogas branch. *Journal of Cleaner Production* 233: 1344-1354.
- Winqvist, E., Rikkonen, P. & Varho, V. 2018. Suomen biokaasualan haasteet ja mahdollisuudet. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 47/2018. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 21 s.
- Woods, J., Williams, A., Hughes, J. K., Black, M. & Murphy, R. 2010. Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 2991-3006.
- Wood, S. W. & Cowie, A. 2004. A review of greenhouse gas emission factors for fertiliser production. For IEA Bioenergy Task 38. Research and Development Division, State Forests of New South Wales: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. 20 s.
- Ylivainio, K., Sarvi, M., Lemola, R., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2015. Regional P stocks in soil and in animal manure as compared to P requirement of plants in Finland: Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. WP4 Standardisation of manure types with focus on phosphorus. *Natural resources and bioeconomy studies* 62/2015. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 34 s.

LIITE 1: REHUOMAVARAISUUS SKENAARIOISSA

Taulukko 1. Rehuomavaraisuus tuotannon ja kulutuksen suhteena skenaariossa 2.

	Kulutus <i>t ka a⁻¹</i>	Tuotanto <i>t ka a⁻¹</i>	Omavaraisuus%
Säilörehu	3286	1641	50
Laidun	492	165	34
Heinä	116	176	151
Viljarehu ja palkokasvit	1238	1206	97
Teollinen rehu	1258	0	0

ka = kuiva-aine

Taulukko 2. Rehuomavaraisuus tuotannon ja kulutuksen suhteena skenaariossa 3.

	Kulutus <i>t ka a⁻¹</i>	Tuotanto <i>t ka a⁻¹</i>	Omavaraisuus %
Säilörehu	2246	1122	50
Laidun	337	113	34
Heinä	80	120	151
Viljarehu ja palkokasvit	846	825	97
Teollinen rehu	860	0	0

ka = kuiva-aine

LIITE 2: HERKKYYSANALYYSIN TULOKSET

Taulukko 1. Skenaario 1:en herkkyyssanalyysin tulokset.

	Energian tuotanto		Fossiilisen energian kulutus		Omavarai-	Erotus alku-
	GWh	MWh ha ⁻¹	GWh	MWh ha ⁻¹	suus	peräiseen
					%	%-yksikkö
Alkuperäinen	4,33	2,04	7,49	3,53	57,84	
Kesannon sato- taso +20 %	4,52	2,13	7,47	3,52	60,53	2,69
Kesannon sato- taso -20 %	4,14	1,95	7,50	3,54	55,17	-2,68
BMP +20 %	5,20	2,45	7,49	3,53	69,41	11,57
BMP -20 %	3,46	1,63	7,49	3,53	46,27	-11,57

Taulukko 2. Skenaario 2:en herkkyyssanalyysin tulokset.

	Energiantuotanto		Fossiilisen energian kulutus		Omavarai-	Erotus alku-
	GWh	MWh ha ⁻¹	GWh	MWh ha ⁻¹	suus	peräiseen
					%	%-yksikkö
Alkuperäinen	4,65	2,19	6,73	3,17	69,11	
Kesannon sato- taso +20 %	5,07	2,39	6,70	3,16	75,66	6,55
Kesannon sato- taso -20 %	4,23	2,00	6,76	3,19	62,62	-6,49
BMP +20 %	5,58	2,63	6,73	3,17	82,94	13,82
BMP -20 %	3,72	1,75	6,73	3,17	55,29	-13,82

Taulukko 3. Skenaario 3:en herkkyyssanalyysin tulokset.

	Energiantuotanto		Fossiilisen energian kulutus		Omavarai-	Erotus alku-
	GWh	MWh ha ⁻¹	GWh	MWh ha ⁻¹	suus	peräiseen
					%	%-yksikkö
Alkuperäinen	4,97	2,34	5,98	2,82	83,12	
Kesannon sato- taso +20 %	5,61	2,65	5,93	2,80	94,59	11,47
Kesannon sato- taso -20 %	4,32	2,04	6,02	2,84	71,82	-11,30
BMP +20 %	5,96	2,81	5,98	2,82	99,74	16,62
BMP -20 %	3,97	1,87	5,98	2,82	66,50	-16,62