

**KIERRÄTYSLANNOITTEIDEN ELINKAARISET YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET
KAURAN (*AVENA SATIVA*) TUOTANNOSSA**

TIIVISTELMÄ

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Osasto — Sektion — Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Maataloustieteiden osasto	
Tekijä — Författare — Author			
Venla Kytä			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Kierrätyslannoitteiden elinkaariset ympäristövaikutukset kauran (<i>Avena Sativa</i>) tuotannossa			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Kasvintuotantotiede			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages
Maisterintutkielma		huhtikuu 2019	33 s.
Tiivistelmä – Referent - Abstract			
<p>Kasvava tarve tuottaa ruokaa vähemmällä materiaalilla ja energialla sekä pienemmillä kasviuonekaasupäästöillä asettaa kyseenalaiseksi nykyisen neitseellisistä raaka-aineista valmistettävien ja runsaasti energiaa kuluttavien mineraalilannoitteiden käytön. Toisaalta myös erilaisista sivuvirroista ja biomassoista valmistettavia kierrätyslannoitteita tulee kuitenkin useimmiten prosessoida lannoitekäyttöön sopivaksi tai niiden käyttömäärät ovat merkittävän suuria, jolloin osa niiden ympäristöhyödyistä menetetään.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää sekä kierrätyslannoitteiden (ammoniumsulfaatti, biokaasulaitoksen mädätysjännös ja lihaluujauho) että mineraalilannoitteen elinkaarinen energiankäyttö ja kasviuonekaasupäästöt kauratonnin tuotannossa elinkaarianalyysin avulla ja vertailla eri lannoiteilla mahdollisesti saavutettavia ympäristöhyötyjä.</p> <p>Kaikkien kierrätyslannoitteiden havaittiin aiheuttavan mineraalilannoitetta vähemmän kasviuonekaasupäästöjä ja kuluttavan vähemmän energiaa. Kaikista vähiten kasviuonekaasupäästöjä aiheutti ammoniumsulfaattilannoitus ja energiatehokkain lannoite oli mädätysjännös.</p> <p>Maailman ravinnon- ja energiankäytön kasvun sekä ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja raaka-aineiden kierrätyksen kannalta tarkasteltuna kierrätyslannoitteet osoittautuivat mineraalilannoitetta tehokkaammiksi lannoiteiksi. Myös maankäytön ja sadontuottokyvyn perusteella kierrätyslannoitteiden havaittiin olevan potentiaalisia mineraalilannoitteiden korvaajia.</p> <p>Lisätutkimukset ovat kuitenkin tarpeen kierrätyslannoitteiden lukuisista raaka-aineista ja jatkuvasti lisääntyvistä prosessointimenetelmistä johtuen.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Elinkaariarviointi, LCA, kierrätyslannoite, lannoite, lihaluujauho, ammoniumsulfaatti, mädätysjännös, kasviuonekaasu			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Maataloustieteiden maisteriohjelma, maataloustieteiden osasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			
Työtä ohjasivat Juha Helenius ja Hanna Tuomisto			

ABSTRACT

HELSINGIN YLIOPISTO — HELSINGFORS UNIVERSITET — UNIVERSITY OF HELSINKI

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Osasto — Sektion — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Venla Kyttä			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Environmental impacts of recycled fertilizers in production of oat (<i>Avena Sativa</i>)			
Oppiaine — Läroämne — Subject Plant production sciences			
Työn laji — Arbetets art — Level M.Sc. Thesis	Aika — Datum — Month and year April 2019	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 33 p.	
Tiivistelmä – Referent - Abstract <p>Global growing demand to produce more food with less inputs and energy without causing greenhouse gas emissions challenges the current practice of using mineral fertilizers which are produced from new and partly non-renewable raw materials with considerable amount of energy. On the other hand recycled fertilizers made of different side streams and biomasses also need to be processed before usage or the amount needed per area is so great that the environmental advantages might be lost.</p> <p>The aim of this study was to discover and compare the energy consumption and greenhouse gas emissions of recycled fertilizers (ammonium sulfate, biogas digestate and meat bone meal) and mineral fertilizer in production of oat by using Life Cycle Assessment (LCA). All recycled fertilizers were found to cause less greenhouse gas emissions and consume less energy than mineral fertilizer. The least emissions caused the usage of ammonium sulfate and the best energy efficiency was achieved with biogas digestate fertilization.</p> <p>Considered relative to global increase in food and energy consumption and control of climate change and recycling of raw materials recycled fertilizers proved to be effective compared to mineral fertilizer. Also on the grounds of land use and yield recycled fertilizers turned out to be potential substitute for mineral fertilizers.</p> <p>Further studies are still needed due to large number of raw materials and constantly increasing amount of processing techniques of recycled fertilizers.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Life cycle analysis, LCA, recycled fertilizer, fertilizer, meat bone meal, ammonium sulfate, digestate, greenhouse gas			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Master's Programme in Agricultural Sciences, Department of Agricultural Sciences			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Thesis supervisors were Juha Helenius and Hanna Tuomisto			

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 LANNOITTEIDEN ELINKAARI	7
2.1 Ammoniumsulfaatti (NH ₄) ₂ SO ₄	8
2.2 Lihaluujauho	9
2.3 Mädätysjäännös	11
2.4 Mineraalilannoite	11
2.5 Ravinteiden kierto	12
3 TAVOITTEET	13
4 AINEISTO JA MENETELMÄT	13
4.1 Toiminnallinen yksikkö	14
4.2 Systemin kuvaus ja vaikutuskategoriat	14
4.2.1 Ilmastoja lämmittävä vaikutus	15
4.3 Lannoitteet	15
4.4 Lannoituskokeet	16
4.5 Elinkaariarvioinnissa käytetty data	17
4.5.1 Ammoniumsulfaatin valmistus ja levitys	17
4.5.2 Lihaluujauhollannoitteen valmistus	18
4.5.4 Mineraalilannoitteen valmistus	18
4.6 Allokointi	18
4.7 Herkkyysanalyysi	19
5 TULOKSET	19
5.1 Systemin variointi	20
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	24
8 KIITOKSET	25
9 LÄHTEET	25
10 LIITTEET	31

1 JOHDANTO

Maailman ympäristöongelmien lisääntyessä yhä enemmän huomiota kiinnitetään luonnonvarojen kestäväan käyttöön ja ympäristövaikutusten minimointiin. Myös ruuantuotannon tulee vastata uusiin ympäristömuutoksen torjumiselle asetettuihin tavoitteisiin ja toisaalta kasvavan väestön ravinnonkulutuksen tarpeisiin. Esimerkiksi vuoteen 2050 mennessä maailman väkiluvun odotetaan kasvaneen kymmeneen miljardiin ja maataloustuotannon tarpeen 50 % verrattuna vuoteen 2013 (FAO 2017).

Maapallon systeemien vakautta kuvaamaan on kehitetty planetaaristen rajojen malli, jossa on määritetty maapallon systeemien vakautta ohjaavat prosessit (Rockström ym. 2009, Steffen ym. 2015). Näille seitsemälle pääprosesseille on määritetty biofyysiset rajat, joiden puitteissa ihmiskunta voi turvallisesti toimia ja rajan ylittymistä pidetään riskinä, joka voi johtaa odottamattomiin ja äkillisiin muutoksiin globaaleissa systeemeissä. Prosessit ovat myös toisistaan riippuvaisia, joten muutokset yhdessä saattavat vaikuttaa muiden prosessien toimintaan. Typen ja fosforin kierron määrittelyä jo ylittäneen nämä ihmiskunnan turvallisen toiminnan rajat (Rockström ym. 2009). Maatalouden tulisi siis pyrkiä tuottamaan enemmän ravintoa pinta-alaa kohden pienemmällä kasvihuonekaasupäästöillä sekä energian ja raaka-aineiden kulutuksella.

Suomen energian kokonaiskulutus oli vuonna 2016 377793 GWh, josta maa- ja puutarhatalouden osuus oli noin 3 % (SVT 2017, SVT 2018a). Suomen hiilidioksidipäästöistä puolestaan vain 0,6 % oli peräisin maataloudesta, mutta metaanin ja dityppioksidin osuudet kasvihuonekaasupäästöistä olivat merkittävät (54 % ja 80 %) (SVT 2018b). Näin ollen maataloustuotannossa tehtävillä ratkaisuilla on merkitystä etenkin dityppioksidin ja metaanin kokonaispäästöihin.

Suomen maapinta-alasta maatalousmaan osuus on vain 7,4 % (Tattari ym. 2015). Siitä huolimatta maatalous on toimialana suurin typen ja fosforin kuluttaja ja huomattava ympäristövaikutusten aiheuttaja (Marttinen ym. 2017). Suorien päästöjen lisäksi

ravinteista aiheutuu epäsuoria päästöjä ja esimerkiksi vuonna 2016 vesistöjen typpikuormituksesta 48,9 % ja fosforikuormituksesta 59,2 % arvioitiin olleen peräisin maataloudesta (Ympäristöhallinto 2017). Maatalouden toimilla voidaan tehostaa typen ja fosforin kiertoa ja näin vähentää vesistöjen kuormitusta.

Sadon mukana poistuneita ravinteita korvaamaan maatalous kuitenkin vaatii vuosittain panoksena lannoitteita, jotka tulevat maataloille usein teollisina mineraalilannoitteina. Näin ollen tuotantosysteemiin tuodaan jatkuvasti lisää neitseellisistä raaka-aineista valmistettuja ravinteita.

Ravinteita voidaan kuitenkin ohjata takaisin alkutuotantoon esimerkiksi erilaisten yhdyskunnassa ja teollisuudessa syntyvien sivuvirtojen saattamisella lannoitekäyttöön. Ravinteiden kierrätystä tehostamalla voidaan pienentää maatalouden ympäristöhaittoja sekä säästää uusiutumattomia luonnonvaroja ja energiaa lannoitteiden valmistuksessa (Marttinen ym. 2017).

Ravinteiden kierrättämisen kannalta merkittäviä ovat biomassat, joissa on korkea ravinnepitoisuus ja joita muodostuu runsaasti. Useat biomassat eivät kuitenkaan sovellu pellolle levitettäväksi sellaisenaan, vaan niitä pitää prosessoida erilaisin menetelmin. Lannoitteiden tulisi esimerkiksi olla hyvin säilyviä, helposti levitettäviä sekä runsasravinteisia, jolloin niiden kuljettaminen ja varastointi on edullisempaa ja energiatehokkaampaa pienemmästä tilavuudesta johtuen.

Toisaalta prosessointi lisää energiankulutusta ja aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä, jolloin kierrätyslannoitteista saatavat ympäristösäästöt pienenevät. Kierrätyslannoitteiden ravinnesisältö voi myös olla huomattavasti mineraalilannoitetta pienempi, jolloin pinta-alaa kohden valmistetta tulee levittää moninkertainen määrä, mikä johtaa kuljetuksen, varastoinnin ja levityksen suurempiin ympäristövaikutuksiin. Vastaavasti valmisteen pienempi levitysmäärä voi johtaa heikompiin viljasatoihin ja sitä kautta tehottomaan maankäyttöön.

2 LANNOITTEIDEN ELINKAARI

Tuotteiden koko elinkaaren aikana aina raaka-aineista ja tuotteen käytöstä jätteen käsittelyyn asti aiheutuneita ympäristövaikutuksia voidaan mitata ja tarkastella eri indikaattorein sekä vertailla muiden tuotteiden ympäristövaikutuksiin. Tarkastelun kohteeksi voidaan valita erilaisia vaikutuskategorioita, esimerkiksi ilmastonmuutos, maankäyttö, happamoituminen tai energiankulutus.

Elinkaariarvioinnin (ISO 14040:2006) menetelmien avulla voidaan selvittää tuotesysteemiin menevät ja sieltä poistuvat materiaalit ja energia sekä elinkaaren eri prosessien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt. Näin saadaan selville eri vaiheiden ympäristövaikutukset. Saatua tietoa voidaan edelleen hyödyntää esimerkiksi tuoteketjun parantamisessa, markkinoinnissa tai päätöksenteossa. Koska tuotteen täydellisen elinkaariarvioinnin toteuttaminen kaikkien vaikutusten suhteen on kuitenkin hyvin työlästä ja aikaa vievää, on usein perusteltua keventää arviointia esimerkiksi rajaamalla arviointiin vain tutkimuskysymyksen kannalta relevantit vaikutuskategoriat (Weitz & Sharma 1998).

Menetelmänä elinkaariarvioinnin vahvuuksia ovat erilaisten ympäristöongelmien kokoaminen yhteen ja niiden tieteellinen tarkastelu kvantitatiivisesti samassa viitekehyksessä koko elinkaaren ajalta (Wolf ym. 2012). Arviointi mahdollistaa vaikutusten tarkastelun suhteessa erilaisiin systeemeihin, kuten tiettyyn määrään jotakin tuotetta tai johonkin tuotettuun palveluun sekä näiden systeemien vertailun tasa-arvoisesti.

Elinkaariarviointiin liittyy myös joitakin heikkouksia; se huomioi vain ympäristöön kohdistuvat päästöt ja ympäristöstä peräisin olevat resurssit eikä suoria ihmisiin kohdistuvia vaikutuksia, kuten terveyshyötyjä tai –haittoja (Wolf ym. 2012). Lisäksi arvioinnit perustuvat yleensä vain tavalliseen systeemin toimintaan eikä huomioi mahdollisia sattumia ja tapaturmia.

Erilaiset dataan ja tutkittavan systeemin malliin liittyvät ongelmat voivat myös olla haasteellisia. Tutkittavista systeemeistä ei aina ole saatavissa tarvittavaa dataa tai

käytetty data perustuu erilaisiin keskiarvoihin, jolloin se ei välttämättä kuvaa tutkittavaa systeemiä tarpeeksi tarkasti (Finnveden ym. 2009). Systeemin malliin puolestaan voi liittyä ongelmia esimerkiksi systeemin rajauksen ja vaikutusten allokoinnin suhteen. Näin ollen elinkaariarvioinnin tuloksiin voi liittyä huomattavaa epävarmuutta (Finnveden ym. 2009). Tuloksien epävarmuutta voidaan kuitenkin arvioida lähtöoletusten muuttamisen vaikutuksilla tuloksiin eli herkkyysanalyysillä.

Ympäristövaikutuksia tutkittaessa on usein hyödyllistä tarkastella vaikutuksia useammasta näkökulmasta eri vaikutuskategorioiden avulla kattavamman kuvan saamiseksi. Esimerkiksi typpilannoituksen eri määriä tutkittaessa pienimmät ympäristövaikutukset saavutetaan mahdollisimman pienellä lannoituksella, jos tarkasteltavana on vain syntyneet kasvihuonekaasut (Brentrup ym. 2004). Intensiivinen viljely ja korkeat lannoitustasot taas pärjäävät vertailussa, jossa vaikutuskategoriaina on maankäyttö ja tuotettu sato. Keskimääräiset typpitasot puolestaan tuottavat pienimmät ympäristövaikutukset, jos tarkastelun kohteena on fossiilisten polttoaineiden käyttö. Näin ollen elinkaariarvioinnin perusteella ei välttämättä voida todeta jonkin tuotteen olevan yksiselitteisesti parempi, vaan tuote on jostakin näkökulmasta, esimerkiksi hiilijalanjäljeltään, muita tutkittuja tuotteita ympäristöystävällisempi.

Elinkaaristen ympäristövaikutusten laskemiseksi tulee selvittää kaikki tuotteen elinkaareen kuuluvat prosessit. Lannoitteiden elinkaareessa merkittävä prosessi on valmistus, sillä se poikkeaa suuresti eri lannoitteiden välillä ja sen ympäristövaikutukset ovat usein merkittävät.

2.1 Ammoniumsulfaatti (NH₄)₂SO₄

Ammoniumsulfaattia voidaan valmistaa useista eri raaka-aineista. Suomessa sitä valmistetaan muun muassa nikkeliteollisuuden sivuvirroista, biokaasun tuotannon mädätysjäännöksestä ja kotieläinten lannasta strippaamalla. Esimerkiksi biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen nestejakeesta ammoniumsulfaatin strippaaminen tapahtuu nostamalla nesteen pH-arvo natriumhydroksidilla (NaOH) arvoon 10-11, kuumentamalla neste 80°C lämpötilaan ja päästämällä prosessiin ilmaa, jolloin muodostuu kaasumaista ammoniakkia (Marttinen ym. 2015). Tämän jälkeen

kaasu pestään rikkihapolla, jolloin muodostuu nestemäistä ammoniumsulfaattia. Prosessissa syntynyt ammoniumsulfaatti voidaan levittää pellolle tavallisella lietteenlevityskalustolla.

Ammoniumsulfaattia voidaan myös jatkojalostaa kiteiksi, jolloin sen varastointi ja kuljetus on tehokkaampaa. Ammoniumsulfaattikiteet sopivat käytettäväksi mineraalilannoitteen tapaan tai ne voidaan liuottaa veteen ja levittää pellolle esimerkiksi kasvinsuojeluruiskulla.

Ammoniumsulfaatin ravinnepitoisuus on N 21 % ja S 24 % eli lannoite ei sisällä lainkaan fosforia (Soilfood 2018). Tästä syystä lannoitetta voidaankin hyödyntää joko sellaisenaan tai muiden lannoitteiden väkevöinnissä.

2.2 Lihaluujauho

Lihaluujauhoa käytettiin vuosia kotieläinten ruokinnassa proteiinien ja mineraalien lähteenä. Hullun lehmän taudin ilmaantumisen myötä lihaluujauhon käyttö kiellettiin kotieläintuotannossa ja jauholle piti etsiä uusia käyttötarkoituksia (Mondini ym. 2008).

Lihaluujauhon lämpöarvo on melko korkea, joten sitä voidaan hyödyntää polttoaineena termokemiallisissa prosesseissa. On laskettu, että Euroopassa vuosittain syntyvällä 3,5 miljoonalla tonnilla voitaisiin korvata 0,22 painoprosenttia Euroopassa käytettävästä hiilestä (Cascarosa ym. 2012). Polttamisen tai pyrolyysin jälkeen muodostunutta tuhkaa voidaan vielä hyödyntää edelleen lannoitteena sen ravinnepitoisuuden vuoksi (Cascarosa ym. 2012).

Lannoitteiden raaka-aineena käytettävä lihaluujauho valmistetaan luokan 2 eläinperäisistä sivutuotteista, kuten tiloilta kerätyistä sikojen ja siipikarjan raadoista sekä teurastamoiden lihatarkastuksessa tai ante mortem -hylätystä materiaalista (Matti Lehtinen, Honkajoki Oy, sähköpostiviesti 17.12.2018). Ensin raaka-aine murskataan ja siitä poistetaan metallit. Tämän jälkeen seuraa hienomurskaus ja raaka-aineen kuumennus sekä esikuivaus, jonka jälkeen materiaali steriloidaan ja loppukuivataan. Lopuksi rasva ja kiintoaine erotetaan puristamalla. Prosessissa erotettua rasvaa käsitellään edelleen ja lopulta se toimitetaan asiakkaille polttoaineeksi tai biodieselin

valmistukseen. Valkuaisrouhe jäähdytetään, hienonnetaan jauheeksi ja lisäaineistetaan, minkä jälkeen se kuljetetaan lannoitetehtaalle (Matti Lehtinen, Honkajoki Oy, sähköpostiviesti 17.12.2018).

Lihaluulannoitteen muut komponentit ovat kananlanta, jauhettu kaura, kaliumsulfaatti ja vinassi (Jukka Kivelä, Ecolan Oy, sähköpostiviesti 22.1.2019). Lihaluujauhon osuus valmiissa lannoitevalmisteessa on 75-80 %, sillä lannoitteen typpipitoisuuden pitää pysyä samana raaka-aineiden laadunvaihtelusta riippumatta (Jukka Kivelä, Ecolan Oy, sähköpostiviesti 22.1.2019). Lannoitteen komponentit sekoitetaan ja pelletöidään, jonka jälkeen ne soveltuvat kylvölannoittimiin käytettäväksi perinteisten lannoitteiden tavoin.

Korkean orgaanisen aineen pitoisuuden ansiosta lihaluujauholla on positiivisia vaikutuksia maaperän fysikaalisiin, kemiallisiin ja mikrobiologisiin ominaisuuksiin. Sen on tutkittu vaikuttavan tyypin käytettävyyden nousuun maaperässä ja lisäävän mikrobibiomassan määrää ja aktiivisuutta (Mondini ym. 2008). Lisäksi lihaluujauhon sisältämät lipidit toimivat mikro-organismien energianlähteenä ja kasvualustana.

Lihaluujauholannoituksella on saavutettu mineraalilannoitusta vastaavat kaurasadot käyttämällä samoja typpimääriä (Chen ym. 2011). Lannoituksilla saavutetuissa tuhannen jyvän painoissa sekä proteiinipitoisuuksissa ei myöskään ollut tilastollisesti merkittävää eroa.

Lihaluujauhon ympäristövaikutuksia energianlähteenä ja lannoitteena on tutkittu kevätvehnän tuotannossa (Spångberg ym. 2011). Ensimmäisessä systeemissä lihaluujauhoa käytettiin lannoitteena ja lihaluujauhon tuotannossa syntyvällä rasvalla korvattiin osa fossiilisista energianlähteistä. Toisessa esitetyssä systeemissä lannoitteena käytettiin mineraalilannoitteita ja luokan 2 eläinperäinen sivutuote hyödynnettiin kokonaan lietteenä polttamalla. Tutkimuksessa havaittiin, että lannoitekäyttö vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja uusiutumattoman energian käyttöä, mutta systeemin kokonaisenergiankulutus on mineraalilannoitteen käyttöä korkeampi.

2.3 Mädätysjäännös

Biokaasutuotannon raaka-aineiksi soveltuvat useat maatalouden sivuvirrat, kuten lannat, hävikkirehut ja kasvijätteet sekä yhdyskunnan jätteet, kuten biojätteet ja jätevesi (Seppänen ym. 2018). Prosessissa orgaanisia materiaaleja hajotetaan mikrobien avulla hapettomissa olosuhteissa. Biokaasuprosessi on hyvin suljettu, minkä ansiosta lopputuotteena syntyvä mädätysjäännös sisältää alkuperäisen syötteen ravinteet (Seppänen ym. 2018). Käsittely jopa parantaa joidenkin ravinteiden käyttökelpoisuutta, esimerkiksi osa tyydestä muuttuu orgaanisesta tyydestä ammoniumtyypeksi ja fosforin käyttökelpoisuus raakalantaan verrattuna paranee (Virkajärvi ym. 2016). Myös jätevesilietettä sisältävien syötteiden mädätysjäännöstä voidaan pitää turvallisena hygieenisyydeltään, eikä sen ole havaittu sisältävän haitallisia aineita (Marttinen ym. 2013).

Bioenergiantuotannosta on suoria ympäristöhyötyjä sen korvatesa fossiilisia polttoaineita, mutta myös lukuisia epäsuoria hyötyjä, kuten orgaanisten jätteiden käsittelyn tehostuminen, ravinteiden kierrätys ja näin säästetyt ympäristöpäästöt lannoiteteollisuudessa (Arthurson 2009, Börjesson ja Berglund 2007).

Mädätysjäännös sopii lannoitteeksi sellaisenaan suoraan biokaasulaitokselta maatilalle kuljetettuna, jolloin lannoitetta ei tarvitse prosessoida erikseen. Sitä voidaan kuitenkin jatkojalostaa esimerkiksi hygienisoimalla, separoimalla, valmistamalla erilaisia seoksia ja kuivaamalla (Seppänen ym. 2018).

Astiakokeissa nestemäisen anaerobisen lietteen on tutkittu tuottavan mineraalilannoitusta vastaavan ohrasadon (Haraldsen ym. 2011). Myös kasvien ravinteiden oton havaittiin olevan molemmilla lannoitteilla yhtä tehokasta. Suoran lannoitusvaikutuksen lisäksi mädätysjäännös lisää myös orgaanisen aineen määrää maaperässä (Haraldsen ym. 2011).

2.4 Mineraalilannoite

Mineraalilannoitteiden valmistuksen vaikutus maataloustuotteiden hiilijalanjälkeen on merkittävä. Etenkin typpilannoitteen valmistus, joka perustuu fossiilisiin raaka-aineisiin, kuten maakaasuun ja hiileen aiheuttaa suuren osan energiankulutuksesta ja kasvihuonekaasupäästöistä (Brentrup ym. 2018).

Fosfori puolestaan on uusiutumaton luonnonvara, jota louhitaan kallioperästä fosfaatteina. Jäljellä olevista fosforivarannoista on useita arvioita viidestäkymmenestä vuodesta yli sataan vuoteen (Cordell ym. 2008; Roy ym. 2006). Jäljellä olevat varannot ovat kuitenkin jo käytettyjä heikkolaatuisempia tai vaikeammin saatavissa sekä maantieteellisesti vain muutamien valtioiden hallinnassa, jolloin esimerkiksi hinnankehitys voi olla vaikeasti ennustettavaa.

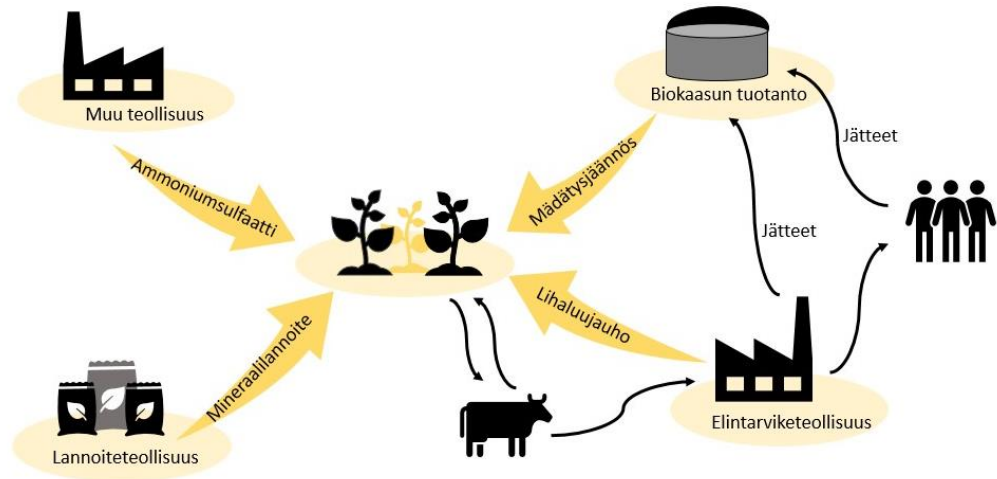
Valmistusteknologia ja raaka-aineiden käytön tehokkuus kuitenkin vaihtelee suuresti eri alueiden välillä, esimerkiksi Kiinassa tuotetun ammoniumnitraattikilon hiilijalanjälki on yli kolminkertainen verrattuna Euroopassa tuotettuun (Brentrup ym. 2018). Lannoitteiden valmistuksen päästöt ovat edelleen huomattavia, mutta tekniikan kehittyessä myös mineraalilannoitteen valmistuksen päästöt ovat pienentyneet. Euroopassa typpihappoa valmistavien tehtaiden dityppioksidipäästöt ovat vähentyneet jopa 80-90 % katalysaattoreiden asentamisen jälkeen (Brentrup ym. 2016).

Koska typpilannoitteen valmistus on edelleen merkittävä ympäristövaikutusten aiheuttaja maataloustuotannossa, lannoituksen optimointi etenkin typen levitysmäärän suhteen on tärkeää (Hasler ym. 2015). Lannoitteiden valmistuksen lisäksi siis myös niiden oikeanlaisella käytöllä on merkitystä ympäristövaikutusten syntyyn.

2.5 Ravinteiden kierto

Edellä esitellyt lannoitteet ohjautuvat eri toimialoilta ja prosesseista maataloustuotannossa hyödynnettäviksi (Kuva 1). Myös ruokaketjun ulkopuolelta löytyviä ravinnevirtoja on perusteltua ohjata maataloustuotantoon, sillä ravinteiden kiertäessä systeemissä aiheutuu myös ravinteiden hävikkiä, joka pitää korvata tuomalla

systemiin lisää ravinteita. Tällainen ratkaisu voi myös vähentää jonkin toisen toimialan jätteiden syntyä.



Kuva 1. Lannoitteita tuottavat prosessit ja ravinteiden kierto.

3 TAVOITTEET

Työn tavoitteena on selvittää ja vertailla ammoniumsulfaatin, lihaluujauholannoitteen ja mädätysjäännöksen sekä perinteisen mineraalilannoitteen käytön elinkaarin energiankulutus ja CO₂-, N₂O- ja CH₄-päästöt sekä näiden ilmastoalämmittävä vaikutus (GWP) kauran (*Avena sativa*) tuotannossa.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

Elinkaariarviointi (ISO 14040:2006) koostuu neljästä eri osasta; tavoitteiden ja laajuuden määrittäminen, inventointianalyysi, vaikutusten arviointi ja tulosten tulkinta. Tavoitteiden ja laajuuden määrittelyssä rajattiin tutkittava systeemi ja valittiin arvioinnin laajuus eli tutkittavat vaikutuskategoriat. Toisessa vaiheessa, inventointianalyysissä, kerättiin valitun systeemin vaikutuskategorioiden mukainen data systeemin syötteistä ja ulostuloista.

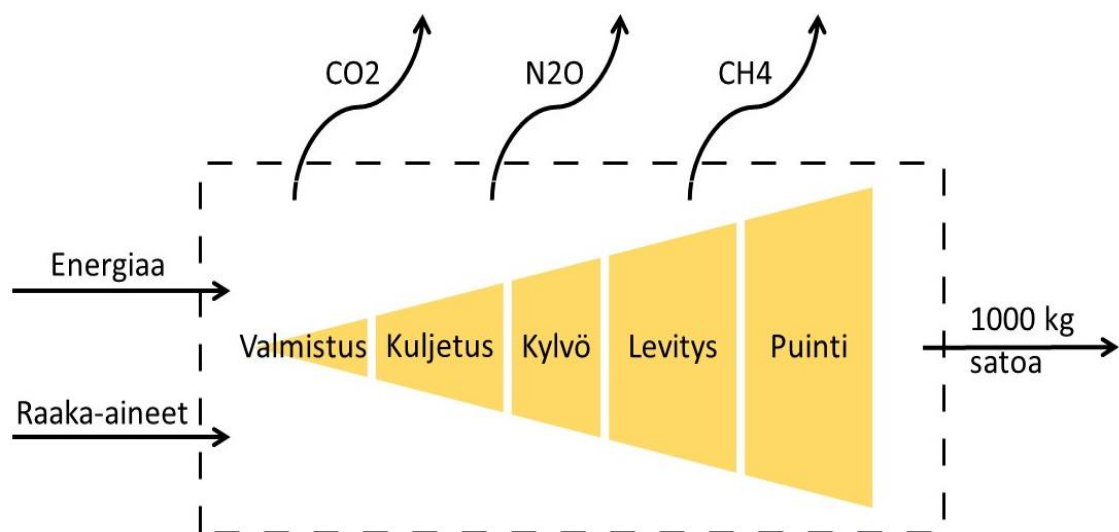
Vaikutusten arvioinnissa dataa käsiteltiin tavoitteita ja vaikutuskategorioita vastaavaksi ja vertailukelpoiseksi. Lisäksi tutkittiin valitun systeemin herkkyyttä joidenkin arvojen muutoksille. Lopuksi tuloksista esitettiin yhteenveto.

4.1 Toiminnallinen yksikkö

Elinkaarianalyysin toiminnalliseksi yksiköksi valittiin 1000 kg kauraa, jonka tuottamiseen tarvittavalle lannoitemäärälle elinkaariset ympäristövaikutukset laskettiin.

4.2 Systeemin kuvaus ja vaikutuskategoriat

Elinkaarisia vaikutuksia eri lannoitteille laskettaessa systeemin tarkasteltaviksi prosesseiksi valittiin lannoitteen valmistus, kuljetus (100 km), levitys, kylvö ja puinti (Kuva 1). Tarkastelun ulkopuolelle rajattiin kylvösiemenen tuotanto, lannoitteiden varastointi eri vaiheissa, pakkaus sekä maanmuokkaus ja kasvinsuojelu. Myös sadon kuivaus rajattiin arvioinnin ulkopuolelle, sillä sen arvojen katsottiin olevan kauratonnia kohden lannoitteesta riippumattomat. Elinkaarianalyysin vaikutuskategorioiksi valittiin eri prosessien energiankulutus sekä prosesseissa syntyvien hiilidioksidi-, dityppioksidi- ja metaanipäästöjen (CO_2 , N_2O ja CH_4) määrä ja näiden ilmastovaikutus (GWP).



Kuva 2. Tarkasteltavan systeemin ja sen sisältämien prosessien kuvaus.

4.2.1 Ilmastoa lämmittävä vaikutus

GWP (Global Warming Potential) on indeksi, joka kuvaa eri kaasujen pysymistä ilmakehässä ja niiden tehokkuutta absorboida lähtevää lämpösäteilyä tietyssä ajassa (Solomon ym. 2007). Eri kaasujen arvot on suhteutettu hiilidioksidiin, jonka GWP-arvo on 1. GWP-arvoja on eri aikajaksoille, mutta yleisin käytetty on 100 vuotta, jota käytettiin myös tässä työssä.

GWP-arvoja päivitetään ajoittain, jolloin arvot saattavat hieman muuttua. Tässä työssä kasvihuonekaasupäästöt muutettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi (CO₂-eq) IPCC:n neljännessä arviointiraportissa käytettyjen GWP-kertoimien mukaan (Taulukko 1) (Solomon ym. 2007).

Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen GWP-arvon laskemisessa käytetyt kertoimet (Solomon ym. 2007).

Kasvihuonekaasu	Kemiallinen kaava	GWP-kerroin
Hiilidioksidi	CO ₂	1
Dityppioksidi	N ₂ O	298
Metaani	CH ₄	25

4.3 Lannoitteet

Tutkimuksessa käytetyt lannoitteet olivat biokaasulaitoksen mädätysjäännös, ammoniumsulfaattikiteet, lihaluujauho ja perinteinen mineraalilannoite. Koska lannoitteiden valmistusprosessi ja raaka-aineet poikkeavat suuresti toisistaan, myös niiden ravinne- ja levitysmäärissä on huomattavia eroja. Ohessa (Taulukko 2) esitettyjä arvoja käytettiin elinkaariarvioinnin laskujen perustana. Taulukossa esitetyt ravinnepitoisuudet perustuvat valmistajan tai jälleenmyyjän ilmoittamiin pitoisuuksiin (Soilfood 2018, Lantmännen Agro 2019, Yara 2018) .

Taulukko 2. Tarkasteltavat lannoitteet, käytetyt lannoitusmäärät ja lannoitteiden pääravinteiden pitoisuudet.

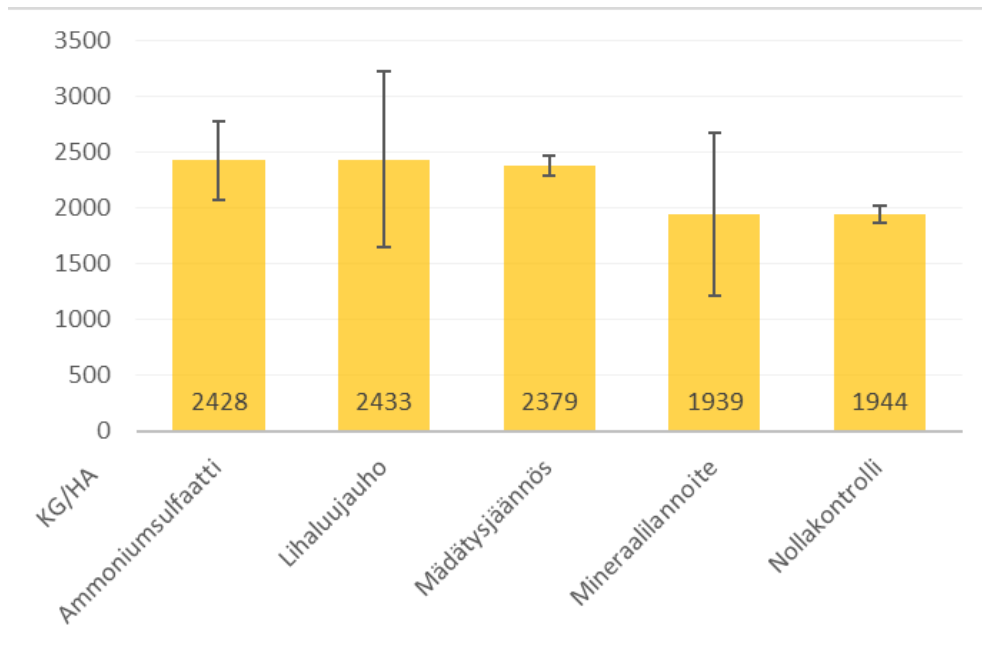
Lannoite	Lannoitusmäärä kg/ha	Ravinnepitoisuus %		
		N	P	K
Ammoniumsulfaatti	571	21	-	-
Lihaluujauho	900	8	4	2
Mädätysjäänös	10080	1,1	0,06	2
Mineraalilannoite	545	19,6	4,6	9,6

4.4 Lannoituskokeet

Lannoitteiden satokokeet toteutettiin peltokokeina kasvukaudella 2018 Haltialassa Helsingissä osana Hyvän sadon kierrätyslannoitus -hanketta. Ammoniumsulfaatin ja mädätysjäänöksen koeruudut olivat kooltaan 8x20 metriä, lihaluujauhon 4x10 metriä, mineraalilannoitteen 4x20 metriä ja lannoittamattoman kontrolliruudun 2x10 metriä. Hankkeen peltokokeissa tutkittiin useampia lannoitteita, joiden sijainnit neljässä replikaatissa olivat satunnaistettuja.

Kaura 'Obelix' kylvettiin 6-7 senttimetrin syvyyteen kylvötiheydellä 420 kpl/m². Mineraalilannoite ja lihaluujauholannoite levitettiin käsin ja ammoniumsulfaatti veteen liuotettuna kastelukannuilla maan pintaan ennen kylvöä. Mädätysjäänös levitettiin kastelukannuilla kauran ollessa kasvuasteella 13-3 (lehti täysin avautunut). Kasvinsuojelutoimenpiteenä kasvustot käsiteltiin kerran Nufarm-MCPA –valmisteella.

Elinkaarianalyysissä käytettiin kunkin lannoitteen keskimääräisiä kokeissa saatuja hehtaarisatoja (Kuva 2). Satojen pohjalta laskettiin kauratonnin tuotantoon tarvittu peltopinta-ala, joka oli ammoniumsulfaatilla ja lihaluujauholla 0,41 hehtaaria, ravinnelietteellä 0,42 hehtaaria ja mineraalilannoitteella 0,52 hehtaaria. Pinta-aloja käytettiin lannoitteen levityksen, kylvön ja puinnin ympäristövaikutusten laskemisen perustana.



Kuva 3. Peltokokeissa koeruuduilta kasvukaudella 2018 saavutetut kauran keskimääräiset hehtaarisadot kg/ha ja satojen hajonta eri lannoituksilla.

4.5 Elinkaariarvioinnissa käytetty data

Kuljetuksien energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen käytettiin NTMCalc Basic 4.0 –ohjelmaa, kuljetusvälineenä kuorma-autoa 28-34 t, kuljetusmatkana 100 km ja kuljetettavana massana lannoitteille sekä lannoitteiden komponenteille suurinta sallittua auton ja perävaunun massaa tiellä kuljetettaessa 76 t (VN 1992) jolloin kuorman massaksi jää 42 t.

Lannoitteiden valmistuksessa käytetyn sähkön on oletettu olevan ydinvoimalla tuotettua. Sähkön päästöt on laskettu perustuen Ruotsissa sijaitsevan Ringhalsin ydinvoimalaitoksen päästöihin (Vattenfall 2007). Lannoitteiden valmistuksessa käytetyn dieselin lämpöarvona on käytetty 41,5 MJ/kg (Alakangas ym. 2016).

Kaikkien lannoitteiden levityksen, kylvön ja puinnin ympäristövaikutusten laskemiseen käytetty data on peräisin Ecoinvent 3.01 –tietokannasta (Ecoinvent 2013). Tietokannasta haetun datan tarkat selitteet esitetään työn lopussa (Liite 1).

4.5.1 Ammoniumsulfaatin valmistus ja levitys

Ammoniumsulfaatin valmistuksen tiedot ovat peräisin Ecoinvent 3.01 –tietokannasta. Data perustuu ammoniumsulfaatin valmistukseen nailonin tuotannon sivutuotteena. Valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt laskettiin tuotannossa käytettävän energian ja energianlähteiden, dieselin ja maakaasun, päästöjen mukaan (Liite 2).

Ammoniumsulfaatin levityksen laskelmissa käytettiin Ecoinvent 3.01 -tietokannan dataa kasvinsuojeluaineiden levityksestä kasvinsuojeluruiskulla, jonka työleveys on 15 metriä ja säiliö 800 litraa.

4.5.2 Lihaluujuuholannoitteen valmistus

Lihaluujuuhopohjaisen lannoitteen valmistuksessa huomioitiin lihaluujuuhon valmistukseen kuluva energia (Matti Lehtinen, Honkajoki Oy, sähköpostiviesti 17.12.2018) ja tämän turpeella tuotetun energian päästöt (MMM 2007) sekä lihaluujuuhon kuljetus lannoitetehtaalte (100 km). Lannoitteen muiden komponenttien osalta huomioitiin komponenttien kuljetus lannoitetehtaalte (vinassi 200 km, kananlantarae 1850 km). Lannoitteessa käytettävä kaurankuori tulee tehtaan läheisyydestä, joten sen kuljetusta ei huomioitu laskelmissa.

Lannoitteen pelletöinnin energiankulutuksen laskemisessa käytettiin isojen kotieläinten rehujen pelletöinnin energiankulutusta, kun pelletöinnin vaiheet ovat sekoitus, pelletöinti ja jäähdytys (Dabbour ym. 2015). Lannoitteen valmistuksen eri vaiheiden tiedot on esitetty liitteissä (Liite 2).

4.5.4 Mineraalilannoitteen valmistus

Mineraalilannoitteen valmistuksen osalta huomioitiin vain lannoitteen pääravinteiden valmistus (Liite 2). Energiankulutus laskettiin kirjallisuudessa (Williams ym. 2006) esitettyjen ammoniumnitraatin, kolmoissuperfosfaatin ja kaliumin valmistuksen energiankulutuksen mukaisesti. Valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt puolestaan perustuvat Euroopan lannoitevalmisteiden hiilijalanjäljen viitearvoihin (Brenttrup ym. 2018).

4.6 Allokointi

Mädätysjäännöksen katsottiin syntyvän täysin biokaasun tuotannon sivutuotteena, jolloin sen valmistus allokoitiin biokaasun tuotannolle, sillä mädätysjäännöstä ei kaasun tuotannon jälkeen käsitellä tai varastoida vaan se kuljetetaan suoraan maataloille.

Kaikkien kuljetusten ympäristövaikutukset laskettiin täydelle kuormalle, josta saadut ympäristövaikutukset jaettiin tarkasteltavan lannoitemäärän massalle. Kylvön energiankulutuksen ja päästöjen laskemisessa käytettiin kaikille lannoitteille samoja arvoja, jolloin lannoitteen levityksen kylvön yhteydessä ei katsottu lisäävän energiankulutusta tai päästöjä.

4.7 Herkkyyshanalyysi

Systeemin varioinnilla arvioitiin eri muuttujien vaikutusta tuloksiin. Ensimmäisessä variaatiossa laskettiin lannoitteiden energiankulutus ja ilmastoa lämmittävä vaikutus, kun toiminnallisena yksikkönä oli hehtaari pinta-alaa. Toisessa variaatiossa lannoitteiden kuljetusmatkaksi tehtaalta maatilalle muutettiin 200 kilometriä.

5 TULOKSET

Mineraalilannoitteen elinkaarin energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt olivat tutkituista lannoitteista suurimmat (Taulukko 3.) Mineraalilannoitteen valmistus, etenkin typpikomponentin, kulutti merkittävän paljon energiaa ja aiheutti suuret kasvihuonekaasupäästöt. Koska mineraalilannoite tuotti peltokokeissa kaikista huonoiten satoa, myös kylvölannoituksen ja puinnin energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt olivat satotonna kohden suuremmat.

Ammoniumsulfaatin ilmastoa lämmittävä vaikutus oli tutkituista lannoitteista pienin. Lannoitteen valmistus vaatii kuitenkin paljon energiaa, joten ammoniumsulfaattilannoituksen energiankulutus oli lannoitteista toiseksi suurinta. Lihaluujuuhopohjaisen lannoitteen valmistus puolestaan on melko energiatehokasta, mutta energianlähteenä käytettävästä turpeesta johtuen kasvihuonekaasupäästöt ovat ammoniumsulfaattiin verrattuna yli kolminkertaiset.

Taulukko 3. Lannoitteiden elinkaarin energiankulutus (MJ) ja kasvihuonekaasupäästöt (kg CO₂-eq) prosesseittain tuotettaessa 1000 kg kauraa.

Lannoite	Prosessi	Energia MJ	CO ₂ kg	N ₂ O g	CH ₄ g	CO ₂ -eq	
Ammoniumsulfaatti							
	Valmistus	1481,74	19,24	1,37	11,57	19,94	
	Kuljetus	28,53	1,96	0,07	1,82	2,03	
	Levitys	30,08	2,26	0,09	0,09	2,29	
	Kylvö	65,45	4,90	0,19	0,20	4,96	
	Puinti	569,06	42,41	1,65	1,77	42,95	
	Yhteensä	2174,86	70,77	3,36	15,46	72,16	
Lihaluujauho							
	Valmistus	790,53	65,90	7,59	13,34	68,49	
	Kuljetus	44,92	3,08	0,12	2,86	3,19	
	Kylvölannoitus	65,32	4,89	0,19	0,20	4,95	
	Puinti	567,91	42,33	1,64	1,77	42,86	
	Yhteensä	1468,68	116,20	9,54	18,17	119,50	
Mädätysjäännös							
	Kuljetus	514,39	32,73	1,34	32,73	33,94	
	Levitys	34,69	2,60	0,10	0,11	2,63	
	Kylvö	66,63	5,00	0,19	0,21	5,06	
	Puinti	580,85	43,29	1,68	1,81	43,84	
	Yhteensä	1196,56	83,61	3,31	34,85	85,47	
Mineraalilannoite							
	Valmistus						
		N	2258,18	*	*	*	187,43
		P	245,60	*	*	*	4,85
		K	153,77	*	*	*	11,24
	Kuljetus		34,12	2,34	0,09	2,17	2,42
	Kylvölannoitus		81,95	6,14	0,24	0,25	6,21
	Puinti		712,55	53,11	2,06	2,22	53,78
	Yhteensä		3486,16	61,58	2,39	4,64	265,93

*Valmistuksen päästöt ilmoitettu suoraan GWP-arvoina (Brentrup ym. 2018).

Mädätysjäännöksen lannoitekäytön energiankulutus oli tutkituista lannoitteista pienin, koska lannoite voidaan ajaa suoraan biokaasulaitokselta pellolle ilman käsittelyitä. Lannoitteen suuresta levitysmäärästä pinta-alaa kohden johtuen sen kuljetuksen aiheuttamat päästöt ja energiankulutus on kuitenkin yli kymmenenkertaista muihin lannoitteisiin verrattuna.

Vähiten päästöjä aiheuttaneen ammoniumsulfaatin ilmastovaikutus oli vain 27 % ja energiankulutus 62 % mineraalilannoitteen vastaavasta. Puolestaan

mädätysjäännöksen energiankulutus oli 34 % ja päästöt 33 % mineraalilannoitteen arvoista.

5.1 Systeemin variointi

Kuljetusmatkojen kasvaessa sadasta kilometristä kahteensataan kilometriin mädätysjäännöksen energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt kasvoivat eniten, jolloin lihaluujauhon energiankulutus oli kaikista pienin (Taulukko 4). Myös lihaluujauhon päästöt jäivät ammoniumsulfaatin lisäksi mädätysjäännöstä pienemmäksi. Mineraalilannoitteen energiankulutus ja päästöt olivat myös kuljetusmatkan kasvaessa suurimmat.

Taulukko 4. Systeemin variointi; alkuperäiset arvot sekä lannoitteiden elinkaarin energiankulutus (MJ) ja päästöt (kg CO₂-eq) kuljetusmatkan ollessa 200 km tai toiminnallisen yksikön ollessa hehtaari.

Muutettu arvo	Alkuperäiset arvot		Kuljetus 200 km		Toiminnallinen yksikkö ha	
	MJ	CO ₂ -eq	MJ	CO ₂ -eq	MJ/ha	CO ₂ -eq /ha
Ammoniumsulfaatti	2175	72	2203	74	5305	181
Lihaluujauho	1469	119	1514	123	3582	299
Mädätysjäännös	1197	85	1711	125	2849	204
Mineraalilannoite	3486	266	3520	268	6704	511

Toiminnallisen yksikön ollessa hehtaari kauratonnin sijaan alhaisimmat päästöt olivat ammoniumsulfaatilla ja pienin energiankulutus mädätysjäännöksellä (Taulukko 4). Mineraalilannoitteen energiankulutus ja päästöt puolestaan olivat suurimmat myös hehtaaria kohden laskettuna.

Koska lannoituskäsitelyissä on käytetty eri ravinnemääriä eri lannoitteilla, on perusteltua tarkastella päästöjä myös tästä näkökulmasta. Esimerkiksi lihaluujauhon lannoituksella kasvustot saivat vain hieman yli 70 kiloa typpeä hehtaarille, kun taas ammoniumsulfaattikäsitelyllä määrä oli 120 kiloa. Lannoitteiden päästöt hehtaarille levitettyä lannoitetyypikiloa kohden ovat ammoniumsulfaatilla 1,5 kg CO₂-eq, lihaluujauholla 4,2 kg CO₂-eq, mädätysjäännöksellä 1,7 kg CO₂-eq ja mineraalilannoitteella 4,8 kg CO₂-eq.

6 TULOSTEN TARKASTELU

Maaperän viljavuuden ja satokokeiden kasvukauden erityisen kuivuuden ja kuumuuden vuoksi kaikilla lannoitteilla saadut sadot jäivät melko pieniksi ja lannoittamattomalta kontrolliruudultakin saatiin lannoitettuja ruutuja vastaava sato. Mineraalilannoituksella saatu sato jäi kierrätyslannoitteita jonkin verran pienemmäksi, toisin kuin aiemmissa tutkimuksissa, joissa mineraalilannoituksen on havaittu tuottavan satoa saman verran kuin lihaluujauhon ja mädätysjäännöksen (Chen ym. 2011, Haraldsen ym. 2011). Tällaisina haastavina kasvukausina energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi myös maankäytön näkökulmasta tehokkainta olisi viljely ilman lannoitusta. Pitkällä aikavälillä ravinteiden lisäämättömyys ei kuitenkaan ole kestävää ja lannoitteita tulee lisätä maan viljelykunnan ylläpitämiseksi.

Ammoniumsulfaatin pienet päästöt johtuivat valmistuksen vähäisistä kasvihuonekaasupäästöistä sekä lannoitteella saavutetusta verrattain korkeasta sadosta, jolloin viljelytoimenpiteiden päästöt jäivät pienemmiksi. Valmistuksen kasvihuonekaasupäästöiksi laskettiin kuitenkin vain prosessin vaatiman energian päästöt, eikä valmistusprosessissa mahdollisesti syntyviä päästöjä huomioitu, koska tietoa ei ollut saatavilla.

Lihaluujauholannoitteen elinkaarista energiankulutuksesta ja kasvihuonekaasupäästöistä noin puolet syntyivät lannoitteen valmistuksesta. Päästöt johtuivat suureksi osaksi turpeen käytöstä energianlähteenä lihaluujauhokomponentin prosessoinnissa. Lihaluujauho tuotti kuitenkin tutkituista lannoitteista eniten satoa, jolloin sen viljelytoimenpiteistä syntyvät päästöt ja energiankulutus olivat pienimmät. Näin ollen myös maankäyttöä tarkasteltaessa lihaluujauho oli tutkituista lannoitteista tehokkain.

Mädätysjäännöksen elinkaarsa kuljetus oli energiankulutukseltaan ja päästöiltään merkittävä prosessi, sillä sen kuljetusmäärä oli yli kymmenkertainen muihin lannoitteisiin verrattuna. Systemin varioinnista huomattiin, että lannoitteen prosessoimattomuudella saavutetut säästöt katosivat kuljetusmatkojen kasvaessa, sillä

muiden lannoitteiden energiankulutukseen ja päästöihin kuljetusmatkan muuttuminen ei juurikaan vaikuttanut.

Mineraalilannoitteen elinkaariset vaikutukset olivat tutkituista lannoitteista suurimmat. Osittain tuloksia selittää mineraalilannoituksella saavutettu huono sato, joka oli jopa lannoittamatonta kontrollia heikompi, ja tästä johtuva muita lannoitteita suurempi maankäyttö. Toisaalta mineraalilannoitteen ympäristövaikutukset olivat suurimmat myös hehtaaria kohden laskettuna, vaikka erot hieman tasoittuivatkin.

Mineraalilannoitteita voidaan valmistaa useista eri komponenteista, joiden valmistuksen energiankulutus ja päästöt vaihtelevat suuresti (Brentrup ym. 2018). Koska lannoitteen valmistuksen osuus koko elinkaarisista vaikutuksista on merkittävä, eri komponenttien käyttäminen vaikuttaisi tuloksiin huomattavasti.

Tutkimuksessa ei huomioitu sivuvirtojen lannoitekäytöllä saavutettuja ympäristösäästöjä, kuten vältetyt kuljetukset kaatopaikoille tai jätevedenpuhdistamoihin. Myös mineraalilannoitteen käytön välttämällä saavutettavia ympäristö- ja energiasäästöjä ei otettu huomioon, sillä lannoitteen korvaamisen laskemiseen on useita eri menetelmiä, joilla voidaan saada hyvin toisistaan poikkeavia tuloksia (Hansrud ym. 2018).

Tutkimuksessa ei myöskään huomioitu lannoitteiden aiheuttamia maaperän kasvihuonekaasujen päästöjä. Orgaanisten lannoitteiden on havaittu aiheuttavan kemiallisia lannoitteita suuremmat maaperän dityppioksidipäästöt, joten näiden päästöjen huomioiminen olisi luultavasti nostanut orgaanisten lannoitteiden päästöjä (Jones, ym. 2007, Hayakawa ym. 2009). Pellolla syntyviin päästöihin vaikuttaa merkittävästi myös lannoitteen levitystapa, esimerkiksi lannan levityksen metaanipäästöt vähenevät noin 90 %, jos lanta peitetään auraamalla välittömästi levityksen jälkeen (Webb ym. 2010).

Systeemin rajauksen lisäksi myös valituilla allokoinneilla oli merkittävä vaikutus elinkaariarvioinnin tuloksiin. Esimerkiksi osan biokaasuenergian tuotannosta allokointi mädätysjäännökselle tai lihaluujauhon valmistuksesta energiantuotantoon menevän

osuuden huomiointi olisi vähentänyt molempien lannoitteiden elinkaarista energiankulutusta. Lannoitteiden valmistuksessa käytetty energianlähde vaikutti myös huomattavasti päästöihin, joten eri energianlähteiden käyttäminen vaikuttaisi tuloksiin merkittävästi.

Tutkimuksessa käytetty data on suurelta osin peräisin erilaisista tietokannoista, jotka edustavat yleensä maailman tai jonkin muun tietyn alueen keskiarvoja, eikä näin ollen pysty tarjoamaan tarkkaa tietoa tutkittavasta systeemistä (Finnveden ym. 2009). Useita kierrätyslannoitteita voidaan myös valmistaa erilaisista sivuvirroista tai prosessoida usealla tavalla, mikä vaikuttaa valmistuksen energiankulutukseen ja päästöihin merkittävästi.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen valossa mineraalilannoitteen elinkaarinen energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat kierrätyslannoitteita huomattavasti korkeammat. Ero johtuu etenkin typpilannoitteen valmistuksen suuresta kuormittavuudesta, jolloin typpilannoitteen ympäristöystävällisemmän valmistustavan kehittäminen pienentäisi mineraalilannoitteen käytön ympäristövaikutuksia merkittävästi.

Myös kierrätyslannoitteiden energiankulutuksen ja päästöjen välillä on eroja. Lannoitteita, joita tulee levittää pinta-alaa kohden runsaasti, on hyödyllisintä käyttää vain maantieteellisesti niiden tuotantopaikan läheisyydessä. Puolestaan ravinnepitoisuudeltaan tiheämpien lannoitteiden ympäristövaikutuksiin kuljetusmatkojen pituus ei vaikuta yhtä paljon, vaan merkittävämpää on lannoitteiden valmistuksen vaikutukset.

Kierrätyslannoitteiden käytöllä saavutetaan mineraalilannoitusta pienemmät ympäristövaikutukset ja vähennetään uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä. Lannoitteiden raaka-aineena käytettävien sivuvirtojen hyödyntäminen myös vähentää muussa tuotannossa syntyvää jätettä. Esimerkiksi mädätysjäännökselle ei juurikaan ole

vaihtoehtoisia käyttötarkoituksia polton tai kaatopaikkasijoituksen lisäksi (Ossi Kinnunen, Soilfood, sähköpostiviesti kirjoittajalle).

Kierrätyslannoitteita voidaan valmistaa lukuisista eri sivuvirroista ja prosessoida monilla tavoin hyödyntäen erilaisia energianlähteitä. Uusia prosessointitapoja myös kehitetään jatkuvasti. Jatkotutkimus onkin tarpeellista eri menetelmien ja lannoitteiden ympäristövaikutusten selvittämiseksi. Koska lannoitteiden käyttö on vahvasti vuodenaikaan sidottua, tulisi myös varastoinnin vaikutusta energiankulutukseen ja päästöihin tutkia. Etenkin pinta-alaa kohden runsaasti levitettävien lannoitteiden elinkaareissa varastointi voi muodostua merkittäväksi prosessiksi.

Maailman ravinnon- ja energiankäytön kasvun sekä ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja raaka-aineiden kierrätyksen kannalta tarkasteltuna kierrätyslannoitteet osoittautuivat tutkimuksessa mineraalilannoitteita tehokkaammaksi tavaksi tuottaa ruokaa. Myös maankäytön ja sadontuottokyvyn perusteella kierrätyslannoitteet ovat potentiaalisia mineraalilannoitteiden korvaajia.

8 KIITOKSET

Kiitos Juha Heleniukselle ja Hanna Tuomistolle työn ohjaamisesta.

9 LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M. Laatikainen-Luntama, J. ja Korhonen, J. 2016.

Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258.

Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 263 S.

Arthurson, V. 2009. Closing the Global Energy and Nutrient Cycles through Application of Biogas Residue to Agricultural Land – Potential Benefits and Drawbacks. *Energies* 2: 226-242.

Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P. ja Kuhlmann, H.

2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using

g the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy* 20 (3): 265-279.

Brentrup, F., Lammel, J., Stephani, T. ja Christensen, B. 2018. Updated carbon footprint values for mineral fertilizer from different world regions. (11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2018 (LCA Food) in conjunction with the 6th LCA AgriFood Asia and 7th International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI) On "Global food challenges towards sustainable consumption and production" 17-19 October 2018, Bangkok, Thailand) LCA Food 2018 and LCA AgriFood Asia 2018: (1-B) From Farm to Table. 4 s.

Brentrup, F., Hoxha, A. ja Christensen, B. 2016. Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. https://www.researchgate.net/publication/312553933_Carbon_footprint_analysis_of_mineral_fertilizer_production_in_Europe_and_other_world_regions. 9 s.

Börjesson, P. ja Berglund, M. 2007. Environmental systems analysis of biogas systems—Part II: The environmental impact of replacing various reference systems. Elsevier. *Biomass and Bioenergy* 31: 326–344.

Cascarosa, E., Gea, G. ja Arauzo, J. 2012. Thermochemical processing of meat and bone meal: A review. Elsevier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 942–957.

Chen, L., Kivelä, J., Helenius, J. ja Kangas, A. 2011. Meat bone meal as fertiliser for barley and oat. *Agricultural and food science* 20: 235-244.

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.

Dabbour, M., Bahnasawy, A., Ali, S. ja El-Haddad, Z. 2015. Energy consumption in manufacturing of different types of feeds. https://www.researchgate.net/publication/275463500_Energy_Consumption_i

- n_Manufacturing_Different_Types_of_Feeds?channel=doi&linkId=553d0fc30cf2c415bb0ed10a&showFulltext=true. 15 s. Viitattu: 20.2.2019.
- Ecoinvent. 2013. Ecoinvent Database version 3.01. Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (9): 1218–1230.
<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>
- FAO. 2017. The future of food and agriculture – Trends and challenges. Rooma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 166 S.
- Finnveden, G., Hauschild, M., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D. ja Suh, S. 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91 (1): 1-21.
- Hansrud, O. S., Cherubini, F., Øgaard, A. F., Müller, D. B. ja Brattebø, H. 2018. Choice of mineral fertilizer substitution principle strongly influences LCA environmental benefits of nutrient cycling in the agri-food system. *Science of the Total Environment* 615: 219–227.
- Haraldsen, T.K., Andersen, U., Krogstad, T. ja Sørheim, R. 2011. Liquid digestate from anaerobic treatment of source-separated household waste as fertilizer to barley. *Waste Management & Research* 29 (12): 1271–1276.
- Hasler, K., Bröring, S., Omta, S.W.F. ja Olf, H.-W. 2015. Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. *European Journal of Agronomy* 69: 41-51.
- Hayakawa, A., Akiyama, H., Sudo, S. ja Yagi, K. 2009. N₂O and NO emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 521–529.
- ISO 14040:2006. International Organization for Standardization. ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>. Viitattu: 6.2.2019.
- Jones, S.K., Rees, R.M., Skiba, U.M. ja Ball, B.C. Influence of organic and mineral N fertiliser on N₂O fluxes from a temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121: 74–83.

- Lantmännen Agro. 2019. Ecolan Agra® Organic 8-4-2 luomulannoite 700kg.
<https://www.lantmannenagro.fi/tuotteet/lannoitteet-ja-kalkit/luomulannoitteet/ecolan-agra-organic-8-4-2-luomulannoite-700kg/>.
 Lantmännen Agro Oy. Viitattu 29.1.2019.
- Marttinen, S., Venelempi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiaho, J., Valve, H., LaineYlijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A. ja zu Castell-Rüdenhausen, M. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 47 s.
- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J. ja Manninen, K. 2015. Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin. Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 68 s.
- Marttinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Salo, T., Kapuinen, P., Rintala, J., Vikman, M., Kapanen, A., Torniainen, M., Maunuksela, L., Suominen, K., Sahlström, L. & Herranen M. 2013. Biokaasulaitosten lopputuotteet lannoitevalmisteina. MTT raportti 82. Jokioinen: MTT. 72 s.
- MMM. 2007. Greenhouse Impacts of the Use of Peat and Peatlands in Finland. Research Programme Final Report. Ministry of Agriculture and Forestry. 70 s.
- Mondini, C., Cayuela, M. L., Sinicco, T., Sánchez-Monedero, M. A., Bertolone, E. ja Bardi, L. 2008. Soil application of meat and bone meal. Short-term effects on mineralization dynamics and soil biochemical and microbiological properties. Elsevier. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 462–474.
- NTM CalcBasic 4.0. Environmental Performance Calculator. Network for transport measures. <https://www.transportmeasures.org/ntmcalc/v4/basic/index.html>. Viitattu 29.1.2019.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T.

- Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, ja J. Foley.
2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32. 33 s.
- Roy, R.N., Finck, A., Blair, G.J. & Tandon, H.S.L. 2006. Plant nutrition for food security, a guide for integrated nutrient management. *FAO fertilizer and plant nutrition bulletin* 16. Rome: Food and agriculture organization of the United Nations. 366 s.
- Seppänen, A-M., Laakso, J. ja Luostarinen, S. 2018. Sivuvirrasta väkilannoitteen korvaajaksi. Mädätysjäännöksen jalostusteknologioiden nykytila, tarpeet ja tulevaisuuden mahdollisuudet Suomessa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 31/2018. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 51 s.
- Soilfood. 2018. Lannoitteet. <https://www.soilfood.fi/viljelijalle/tuotteiden-saatavuus/lannoitteet/>. Soilfood. Viitattu 15.11.2018.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 s.
- Spånberg, J., Hansson, P.-A., Tidåker, P. ja Jönsson, H. 2011. Environmental impact of meat meal fertilizer vs. chemical fertilizer. *Resources, Conservation and Recycling* 55: 1078– 1086.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., E. Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. ja Sörlin,

- S. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 33 (347/6223): 12 s.
- STV. 2018a. Suomen virallinen tilasto: Maa- ja puutarhatalouden energiankulutus. Helsinki: Luonnonvarakeskus. <http://www.stat.fi/til/mpen/index.html>. Viitattu: 20.2.2019.
- STV. 2018b. Suomen virallinen tilasto: Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990-2017. Helsinki: Tilastokeskus. http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ymp__khki/statfin_khki_pxt_111k.px/?rxid=488ab714-0116-4c9f-85df-b2cf46dd6b51. Viitattu: 20.2.2019.
- STV. 2017. Suomen virallinen tilasto: Energian hankinta ja kulutus. Helsinki: Tilastokeskus. http://www.stat.fi/til/ehk/2017/ehk_2017_2018-12-11_tie_001_fi.html. Viitattu: 20.2.2019
- Tattari, S., Puustinen, M., Koskiahho, J., Röman, E., & Riihimäki, J. 2015. Vesistöjen ravinnekuormituksen lähteet ja vähentämismahdollisuudet. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35/2015. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. 78 s.
- Vattenfall. 2007. Vattenfall AB Generation Nordic Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Ringhals Nuclear Power Plant. Tukholma: Vattenfall AB Generation Nordic. 59 s.
- Virkajärvi, P., Hyrkäs, M., Rätty, M., Pakarinen, T., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2016. Biokaasuteknologiaa maataloilla II. Biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen hyödyntäminen lannoitteena. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 37/2016. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 117 s.
- VN 1992. Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä. 4.12.1992/1257. Auton ja perävaunun yhdistelmän massa. Annettu 5.4.2018. Finlex® sähköinen säädöstietopankki: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257#L4aP30c>. Viitattu 15.11.2018.

- Webb, J., Pain, B., Bittman, S. ja Morgan, J. 2010. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response—A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 137: 39–46.
- Weitz, K. ja Sharma, A. 1998. Practical life cycle assessment through streamlining. *Environmental Quality Management* 7 (4): 81-87.
- Williams, A.G., Audsley, E. ja Sandars, D.L. 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. Main Report. Defra Research Project IS0205. Bedford: Cranfield University and Defra.
- Wolf, M.-A., Pant, R., Chomkamsri, K., Sala, S. ja Pennington, D. 2012. The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe. European Commission. Luxemburg: Publications Office of the European Union. 72 S.
- Yara. 2018. YaraMila Y 5.
<https://www.yara.fi/lannoitus/lannoitteet/yaramila/yaramila-y-5/>. Yara. Viitattu 15.11.2018.
- YK. 2012. United Nations Secretary-General’s High-level Panel on Global Sustainability (2012). Resilient People, Resilient Planet: A future worth choosing. New York: United Nations. 96 s.
- Ympäristöhallinto. 2017. Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu Ympäristö.fi. Vesistöjen kuormitus ja luonnon huuhtouma. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesistojen_kuormitus_ja_luonnon_huuhtouma. Suomen ympäristökeskus. Viitattu 4.6.2018

10 LIITTEET

Liite 1. Ecoinvent 3.01 -tietokannasta käytetyn datan tarkka kuvaus.

Prosessi	Kuvaus
Ammoniumsulfaatin valmistus	ammonium sulfate production, GLO
	diesel, burned in building machine, GLO
	heat and power co-generation, diesel, 200kW electrical, SCR-NOx reduction, GLO
	heat and power co-generation, natural gas, 1MW electrical, lean burn, Europe without Switzerland
Kylvö	sowing, GLO
Levitys kasvinsuojeluruiskulla	application of plant protection product, by field sprayer, GLO
Levitys lietevaunulla	liquid manure spreading, by vacuum tanker, GLO
Puinti	combine harvesting, GLO

Liite 2. Lannoitteiden valmistuksen tiedot komponenteittain.

Ammoniumsulfaatin valmistus

/t satoa	MJ	CO ₂ kg	N ₂ O g	CH ₄ g
Diesel	0,78	3,77	0,14	0,19
Sähkö	27,35	0,03	0,03	0,54
Lämpö/maakaasu	1152,36	6,58	0,59	9,40
Lämpö/muu kuin maakaasu	301,27	8,86	0,60	1,44

Lihaluujauholannoitteen valmistus

/t satoa	MJ	CO ₂ kg	N ₂ O g	CH ₄ g
Lihaluujauhon valmistus	672,21	59,55	6,96	7,32
Komponenttien kuljetukset	92,09	6,32	5,86	0,24
Pelletöinti	26,24	0,03	0,52	0,03

Mineraalilannoitteen valmistus

Komponentti	MJ/kg komponenttia	CO ₂ eq/kg komponenttia	Levitysmäärä kg/t satoa
Ammoniumnitraatti (rae)	41,0	3,40	55,08
Triple super phosphate	18,0	0,38	12,93
Kaliumkloridi	5,7	0,42	26,98