



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 34/2020

Kierrätyslannoitevalmisteiden ilmastopäästöt

Tapaus Demotehdas

Karettä Timonen, Satu Ervasti, Tapio Salo, Juha-Matti Katajajuuri ja
Saija Rasi

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 34/2020

Kierrätyslannoitevalmisteiden ilmastopäästöt

Tapaus Demotehdas

Karettä Timonen, Satu Ervasti, Tapio Salo, Juha-Matti Katajajuuri ja Saija Rasi

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2020



rakeistus



Viittausohje:

Timonen, K., Ervasti, S. Salo, T., Katajajuuri, J.-M. & Rasi, S. 2020. Kierrätyslannoitevalmisteiden ilmastopäästöt : tapaus Demotehdas. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 34/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 36 s.



ISBN 978-952-326-968-2 (Painettu)

ISBN 978-952-326-969-9 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-969-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Karetta Timonen, Satu Ervasti, Tapio Salo, Juha-Matti Katajajuuri ja Saija Rasi

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2020

Julkaisuvuosi: 2020

Kannen kuva: Erkki Oksanen / Luke

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Karetta Timonen¹, Satu Ervasti², Tapio Salo³, Juha-Matti Katajajuuri¹ ja Saija Rasi²

¹Luonnonvarakeskus, Biotalous ja ympäristö

²Luonnonvarakeskus, Tuotantojärjestelmät

³Luonnonvarakeskus, Luonnonvarat

Orgaanisten sivuvirtamassojen jalostamisella kierrätyslannoitevalmisteiksi pyritään edistämään ravinteiden kierrätystä, muun muassa helpottaen jakeiden kuljetusta ja levitystä vähentämällä materiaalin vesipitoisuutta ja prosessoimalla tuote helposti käsiteltävään olomuotoon.

Demotehdas-hankkeen tavoitteena oli rakentaa tuotantomittakaavan demonstraatiolaitos orgaanisten biomassojen käsittelyyn ja tuotteistamiseen. Tässä raportissa tarkastellaan demonstraatiolaitoksen kokonaisvaltaista ympäristökestävyyttä elinkaariotteella ilmastovaikutukseen keskittyen. Hiilijalanjäljen arviointi sisälsi Demotehdas-konseptilla jalostettavien kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjujen kasvihuonekaasupäästöt Suomessa. Arviointiin otettiin mukaan myös lopputuotteen lannoituskäytön päästövaikutukset. Valmistusketjuvaihtoehtoiksi valittiin neljä erilaista skenaariota, joiden pohjana oli demonstraatiolaitoksella tehdyt prosessointikoheet eri raaka-aineilla. Käsiteltävänä orgaanisena materiaalina oli joko biokaasulaitoksen lingottu mädäte tai puhdistamoliete yhdyskunnan jätevedenpuhdistamolta. Päästöt laskettiin lopputuotteille eli jalostetuille lannoitevalmisteille ennen kuin ne päätyvät myyntiin sekä lannoitevalmisteiden peltokäytölle. Päästöjä verrattiin mineraalilannoitteiden päästöihin.

Lähes kaikkien kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen ja peltokäytön päästöt olivat alhaisemmat kuin vastaavan mineraalilannoitteen päästöt. Kierrätyslannoitteiden valmistuksen päästöjä laskee mm. se, että ravinteet ovat kierrätettyjä ja jäteperäisiä, ja siten niiden päästöt raaka-aineina käsitetään nollapäästöisiksi. Kierrätyslannoitteiden peltokäytön päästöjä laskee orgaanisten lannoitteiden pienemmät dityppioksidin (N₂O) päästöt pellolla verrattuna mineraalilannoitteen N₂O-päästöihin. Sekä kierrätys- että mineraalilannoitteen tapauksissa peltokäytön päästöt olivat suuremmat kuin valmistusvaiheen päästöt, joten pellolle päätyvien ravinteiden määrällä on yleisestikin katsottuna suuri vaikutus päästöissä. Mikäli ilmastovaikutukseen ottaisi vielä huomioon kierrätyslannoitteen ansiosta maaperään palautuneen hiilen, joka kompensoi hiilen vapautumista maaperästä parantaen niiden hiilivarastoja, tilanne olisi vielä entistä parempi kierrätyslannoitteiden eduksi.

Asiasanat: kierrätyslannoite, kierrätyslannoitevalmiste, kasvihuonekaasupäästöt, ilmastovaikutus

Abstract

Karetta Timonen¹, Satu Ervasti², Tapio Salo³, Juha-Matti Katajajuuri¹ and Saija Rasi²

¹Natural Resources Institute Finland, Bioeconomy and environment

²Natural Resources Institute Finland, Production systems

³Natural Resources Institute Finland, Natural resources

When processing organic by-products into recycled fertilizer products, the aim is to promote the use of recycled nutrients. This requires usually reduction of the water content and processing the product into an easy-to-handle form which enables easier and economically and environmentally friendly transportation and distribution.

The aim of the Demotehdas-project was to build a production scale demonstration plant for the processing and commercialization of organic biomass. In this report we evaluate the comprehensive environmental sustainability of the demonstration plant and its products using life cycle analysis (LCA) and focus on climate impacts. The carbon footprint assessment included greenhouse gas emissions in the production chain of recycled fertilizer products processed in the Demotehdas-concept, including the greenhouse gas emissions when the products are used in fields. Four different scenarios were selected as production chain alternatives with different raw materials. Organic materials treated were a solid fraction of digestate from a biogas plant or sewage sludge from a municipal wastewater treatment plant. Emissions were calculated for final products, i.e. processed fertilizer products, before being sold and used for fertilizer products. Emissions were compared with those of mineral fertilizers.

The emissions of the production and field use of recycled fertilizers were lower compared to mineral fertilizers apart from few exceptions. Emissions from the production of recycled fertilizers are reduced by the fact that nutrients are recycled and waste-based, and hence their emissions as raw materials are considered to be zero-emission. Field use emissions of recycled fertilizer products were reduced by lower nitrous oxide (N₂O) emissions compared to N₂O-emissions from mineral fertilizers. In both recycled and mineral fertilizers, emissions in the field use chain were higher than the emissions in the production phase, so the amounts of nutrients that enter the field have a major impact on emissions in general. If also the carbon balance would be evaluated as a part of climate impact, recycled fertilizers would benefit even more - the carbon contained in the recycled fertilizers offsets the carbon release from the soil, improving the carbon stock of the soil.

Keywords: recycled fertilizer, recycled fertilizer product, greenhouse gas emissions, climate impact

Sisällys

1. Johdanto	6
2. Materiaalit ja menetelmät	7
2.1. Systeemirajaukset	7
2.1.1. Pääprosessit	7
2.1.2. Valmistusketjun systeemirajaus	8
2.1.3. Peltokäyttöketjun systeemirajaus	11
2.2. Lähtötiedot	11
2.3. Laskentamenetelmät ja systeemirajausten perustelut	15
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu	18
3.1. Ravinnetaseet	18
3.2. Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjun kasvihuonekaasupäästöt	19
3.3. Kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäyttöketjun kasvihuonekaasupäästöt	20
3.4. Herkkyystarkastelu	23
3.4.1. Kaatopaikka-, bio-, vai maakaasu	23
3.4.2. Kuljetusetäisyydet	24
3.5. Hiilen sitoutuminen maaperään	25
4. Pohdinta ja mahdolliset tuloksiin vaikuttavat tekijät	28
5. Yhteenveto	32

1. Johdanto

Orgaanisten sivuvirtamassojen jalostamisella kierrätyslannoitevalmisteiksi pyritään edistämään ravinteiden kierrätystä, muun muassa helpottaen jakeiden kuljetusta ja levitystä vähentämällä materiaalin vesipitoisuutta ja prosessoimalla tuote helposti käsiteltävään olomuotoon. Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelman rahoittamassa ”Kierrätyslannoitteiden klusteri Oulusta: Orgaanisten jätteiden tuotantomittakaavan demonstraatio – Demotehdas-konsepti” -hankkeessa pyrittiin toteuttamaan kokonaisvaltainen ratkaisu ravinnerikkaiden biomassojen kierrättämiseen. Hankkeessa kehitettiin täyden mittakaavan demonstraatiolaitosta ja samalla selvitettiin tuotteiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta lannoitteeksi.

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli arvioida demonstraatiolaitoksen kokonaisvaltaista ympäristö-kestävyyttä elinkaariotteella. Ilmastovaikutuksiin keskittynyt kestävyystarkastelu sisälsi Demotehdas-konseptilla jalostettavien kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjujen kasvihuonepäästöt Suomessa. Tarkasteltaviin skenaarioihin otettiin mukaan myös lopputuotteen lannoituskäytön päästövaikutukset.

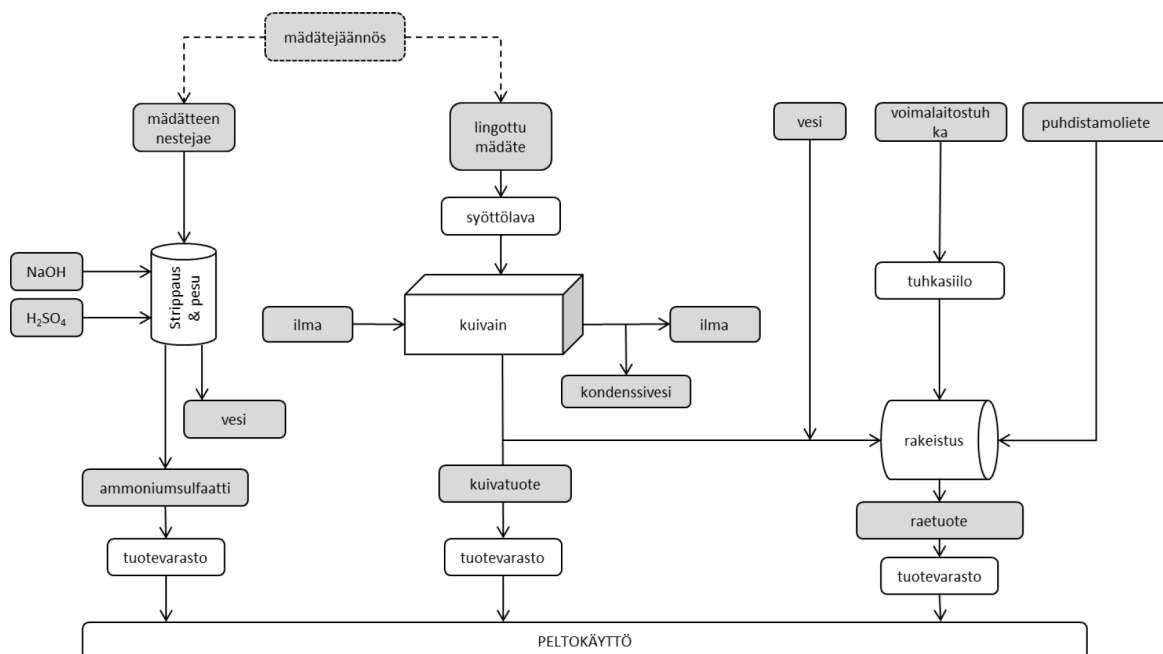
Tarkasteluun valittiin neljä erilaista skenaariota, joiden pohjana oli demonstraatiolaitoksella tehdyt prosessointikokeet eri raaka-aineille. Käsiteltävänä orgaanisena materiaalina oli joko biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä lingottu kuivajae tai puhdistamoliete yhdyskunnan jätevedenpuhdistamolta. Skenaarioille laadittiin massa- ja pääravinnetaseet, joita käytettiin ilmastovaikutusten arvioinnin pohjatietona. Päästöt laskettiin lopputuotteille eli kierrätyslannoitevalmisteille ennen kuin ne päätyivät myyntiin sekä kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäytölle. Tavoitteena oli tunnistaa ilmastovaikutuksiltaan parhaat jalostusskenaariot ja löytää päästöjen osalta kriittisiä prosessivaiheita. Lämmitysenergian lähteenä käytettiin kaatopaikkakaasua. Herkkyystarkasteluissa huomioitiin lämmön tuotannossa käytetyn kaatopaikkakaasun korvattavuus biokaasulla tai maakaasulla sekä kuljetusmatkojen pituuden vaihtelun vaikutus. Arviointiin sisällytettiin jatkojalostettujen kierrätyslannoitevalmisteiden päästöjen vertailu mineraalilannoitteiden päästöihin.

2. Materiaalit ja menetelmät

Tarkasteltavana oli neljä erilaista prosessointiskenaariota (S1-S4), joista kolmessa ensimmäisessä orgaanisena raaka-aineena oli lingottu mädäte ja neljännessä skenaariossa yhdyskuntapuhdistamoliete. Skenaariot perustuivat osittain laitoksilla tehtyihin koeajoihin (ravinnepitoisuudet, sähkön- ja lämmönkulutus) sekä osittain myös kirjallisuusarvioihin. Orgaanisten kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen päästöihin sisällytettiin prosessointien päästöt, kuljetukset, kuormaukset ja varastoinnit.

2.1. Systemirajaukset

Varsinainen Demotehdas-konsepti koostuu kahdesta pääprosessista, SFTec Oy:n ModHeat kuivaimesta sekä Rakeistus Oy:n mobiilirakeistuskoneesta. Kierrätyslannoitteiden prosessoinnin elinkaaritarkastelun systemirajaukseen sisältyy itse Demotehtaan prosessien (kuivaus ja rakeistus) lisäksi materiaalien siirto muodostumispaikoiltaan välivarastojen kautta prosessoitavaksi, materiaalien siirrot prosessoinneissa sekä siirto tuotevarastoihin. Lisäksi tarkasteltiin uusilla kierrätyslannoitevalmisteilla korvattavien tuotteiden, eli väkilannoitteiden, käytön välttämistä aiheutuvat hiilijalanjälkisäästöt peltokäytössä. Kierrätyslannoitevalmisteiden päästöt esitetään siis valmistuksen ja peltokäytön osalta erikseen.



Kuva 1. Prosessointiketjujen materiaaliavirrat.

2.1.1. Pääprosessit

Varsinaisia jalostusprosesseja Demotehdas-konseptissa ovat kuivaus ja rakeistus. Lisäksi yhdessä skenaariossa tarkastellaan typen talteenottoa nestejakeesta ammoniakki-rippauksella.

Kuivauksen tavoitteena on vähentää materiaalin kosteuspitoisuutta, mikä vähentää varastoitavan ja käsiteltävän massan määrää. Demotehtaan SFTec Oy:n ModHeat kuivauslaitteistossa materiaali siirrettiin tasolta toiselle ylhäältä alaspäin kuivauksen edetessä. Kuivaukseen käytävä lämmin ilma puhallettiin vastavirtaan alhaalta ylös. Kuivausilman lämmitys tapahtui kaatopaikkakaasulla, joka poltettiin kaasukattilassa. Vaihtoehtoisesti lämmityskattilassa tarkasteltiin poltettavan myös biokaasua tai

maakaasua. Lämpöenergian lisäksi kuivausprosessi vaati toimiakseen sähköä; suurimmat sähköä kuluttavat laitteet olivat tulo- ja poistopuhaltimet sekä materiaalin liikkeen aikaansaava hydraulikkokoneikko.

Rakeistuksen tavoitteena on materiaalin helpompi käsiteltävyys ja myös ominaisuuksien (esim. liukemisenopeuden) säätö. Prosessi tapahtui rakeistusrummussa, joka toimi sähköllä. Materiaali rakeistuu rummun pyörimisen seurauksena sopivassa kosteudessa, tarvittaessa sekaan voidaan syöttää myös vettä. Lisäsyötteenä voidaan käyttää tuhkaa, joka toimii sekä sideaineena että fosfori- ja kaliumpitoisena (P ja K) ravinnelisinä. Rakeistus ei vaadi lämmitysenergiaa.

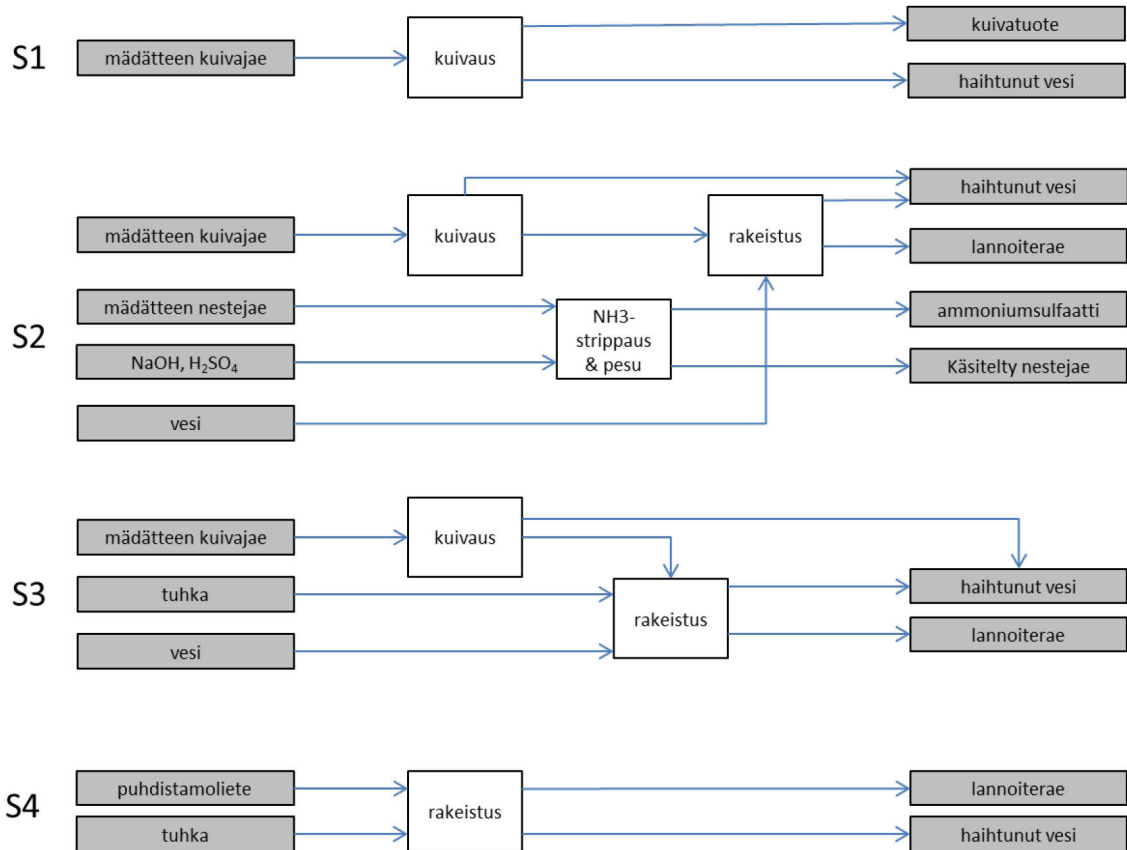
Strippauksessa erotetaan haihtuvat komponentit nesteestä. Ravinteiden talteenotossa sitä voidaan hyödyntää ammoniumtyypen talteenottoon. Suurista nestemääristä, joiden tyyppipitoisuudet ovat alun perin liian laimeita lannoituskäyttöä ja kuljetusta ajatellen, pystytään konsentroimaan tyyppi väkevöityyn muotoon. Jotta tyyppi (N) saadaan haihtuvaan ammoniakkiinmuotoon, täytyy nesteen lämpötilaa ja pH:ta nostaa, eli tarvitaan lämmitysenergiaa ja pH:n säätökemikaalia. Tässä tarkastelussa pH:n säätelyyn käytettiin natriumhydroksidia (NaOH) ja konsentroiintiin rikkihappoa. Lisäksi nesteenkäsittelyprosessi vaatii energiaa mm. pumppauksiin (sähkö). Ammoniiumsulfaatin valmistuksen systeimirajaukseen sisältyy mädätteen nestejakeen strippauksen sähkön kulutus sekä siihen tarvittavien kemikaalien (NaOH ja rikkihappo) valmistuksen päästöt. Ammoniakkistrippauksen vaatima nestejakeen esilämmitys toteutetaan kaasukattilalla tuotetulla lämmöllä.

2.1.2. Valmistusketjun systeimirajaus

Yleisen tason valmistusketju alkaa syötteen (lingottu mädäte tai puhdistamoliete) siirrosta muodostumispaikaltaan syöttölavalle, josta materiaali siirretään kuivauslaitteistoon kuivattavaksi tai rakeistuslaitteistoon rakeistettavaksi (kuva 1).

Kuivattu materiaali siirretään kuivauslaitteistosta välisäiliöön ja sieltä joko tuotevarastoon tai rakeistuslaitteistoon. Tuhkan kuormaus ja kuljetus voimalaitokselta kuuluu myös systeimirajaukseen. Raetuote siirretään rakeistuslaitteistosta lopulta vaihtolavalle, josta se kuormataan tuotevarastoon. Skenaariot, joita on neljä kappaletta, ovat erilaisia yhdistelmiä osa-prosesseista (kuva 2).

Ensimmäisessä skenaariossa (S1) käsitellään lingottua mädätettä, lopputuotteena syntyi kuiva-tuotetta ja pääprosesseista mukana on vain kuivaus. Systeimirajaukseen sisällytetyt materiaalien siirrot on listattu taulukossa 1. Toisessa skenaariossa (S2) syntyi kahta lopputuotetta: raetuote sekä nestemäinen ammoniumsulfaatti. Osaprosesseista olivat mukana kuivaus, rakeistus sekä ammoniakkin strippaus ja konsentroiinti. Materiaalien siirto ja toteutustavat on esitetty taulukossa 2. Kolmannessa skenaariossa (S3) syntyi tuotteena raetuote. Lingotun mädätteen valmistusketjussa oli mukana sekä kuivaus että rakeistus, ja rakeistusvaiheessa lisättiin sekaan myös tuhkaa. Valmistusketjuun sisällytetyt materiaalien siirrot on esitetty taulukossa 3. Neljännessä skenaariossa (S4) prosessoitiin jätevesiliettestä tuhkan kanssa raetuotetta pelkkää rakeistusprossia hyödyntäen (taulukko 4).



Kuva 2. Jalostusskenaariot 1–4, eli raaka-aineiden ja osaprosessien erilaiset yhdistelmät valmistusketjussa.

Taulukko 1. Skenaarion 1 valmistusketjun systeemirajaukseen sisällytetyt materiaalien siirrot ja niiden toteutustavat.

Jae	Mistä	Mihin	Menetelmä, energialähde
lingottu mädäte	biokaasulaitoksen tuotevarasto	kuivauksen syöttölava	kuormaus, polttoaine
lingottu mädäte	kuivauksen syöttölava	kuivain	kuljetin, sähkö
kuivatuote	kuivain	kuivatuotteen välivarasto/lava	kuljetin, sähkö
kuivatuote	kuivatuotteen välivarasto/lava	kuivatuotteen tuotevarasto	kuormaus, polttoaine

Taulukko 2. Skenaarion 2 valmistusketjun systeemirajaukseen sisällytetyt materiaalien siirrot ja niiden toteutustavat.

Jae	Mistä	Mihin	Menetelmä, energialähde
lingottu mädäte	biokaasulaitoksen tuotevarasto	Kuivauksen syöttölava	kuormaus, polttoaine
lingottu mädäte	kuivauksen syöttölava	kuivain	kuljetin, sähkö
kuivattu mädäte	kuivain	kuivatuotteen välivarasto/lava	kuljetin, sähkö
kuivattu mädäte	kuivatuotteen välivarasto/lava	rakeistin	kuljetin, sähkö
raetuote	rakeistin	lava	kuljetin, sähkö
raetuote	lava	rakeen tuotevarasto	kuormaus, polttoaine
mädätteen nestejää	biokaasulaitoksen tuotevarasto	stripperi	pumppaus, sähkö

Taulukko 3. Skenaarion 3 valmistusketjun systeemirajaukseen sisällytetyt materiaalien siirrot ja niiden toteutustavat.

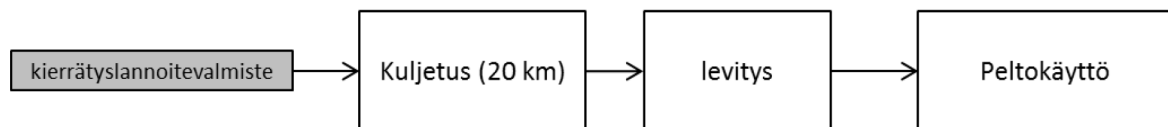
Jae	Mistä	Mihin	Menetelmä, energialähde
lingottu mädäte	biokaasulaitoksen tuotevarasto	Kuivauksen syöttölava	kuormaus, polttoaine
lingottu mädäte	kuivauksen syöttölava	kuivain	kuljetin, sähkö
kuivattu mädäte	kuivain	kuivatuotteen välivarasto/lava	kuljetin, sähkö
kuivattu mädäte	kuivatuotteen välivarasto/lava	rakeistin	kuljetin, sähkö
raetuote	rakeistin	lava	kuljetin, sähkö
raetuote	lava	rakeen tuotevarasto	kuormaus, polttoaine
lentotuhka	voimalaitos	tuhkan syöttösäiliö	kuormaus ja kuljetus, molemmissa polttoaine
lentotuhka	tuhkan syöttösäiliö	rakeistin	kuljetin, sähkö

Taulukko 4. Skenaarion 3 valmistusketjun systeemirajaukseen sisällytetyt materiaalien siirrot ja niiden toteutustavat.

Jae	Mistä	Mihin	Menetelmä, energialähde
puhdistamoliete	jätevedenpuhdistamon lieteväri	rakeistuksen syöttölava	kuormaus, polttoaine
puhdistamoliete	rakeistuksen syöttölava	rakeistin	kuljetin, sähkö
raetuote	rakeistin	lava	kuljetin, sähkö
raetuote	lava	rakeen tuotevarasto	kuormaus, polttoaine
lentotuhka	voimalaitos	tuhkan syöttösäiliö	kuormaus ja kuljetus, molemmissa polttoaine
lentotuhka	tuhkan syöttösäiliö	rakeistin	kuljetin, sähkö

2.1.3. Peltokäyttöketjun systeimirajaus

Peltokäyttöketju (kuva 3) alkaa valmistusketjun päätyttyä, eli kierrätyslannoitevalmisteen tuotevarastoista. Varastosta kierrätyslannoitevalmiste kuljetetaan maatilalle ja sieltä levitettäväksi pellolle. Kuljetukset varastosta tilalle toteutetaan puoliperävaunun yhdistelmällä ja tilalta pellolle traktorilla (tyhjät kuljetukset huomioon ottaen). Systeimirajaus sisältää lisäksi lannoitteen levityksen pellolle ja suorat ja epäsuorat N_2O -päästöt pellolta. Kuljetusetäisyys Demotehtaalta pellolle oli 20 km. Lisäksi herkkyystarkastelussa vertailtiin pidempien kuljetusetäisyyksien, 50 ja 150 km, vaikutuksia peltokäytön päästöihin. Fosforilannoitukseen käytettävien kierrätyslannoitevalmisteiden levityksen tehdään viiden vuoden välein kun taas ammoniumsulfaattia ja mineraalilannoitetta levitetään vuosittain.



Kuva 3. Peltokäyttöketjun osat.

2.2. Lähtötiedot

Pääraaka-aineina tarkasteltavissa orgaanisten materiaalien jalostusskenaarioissa oli biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä lingottu kuivajae, eli lingottu mädäte ja yhdyskunnan jätevedenpuhdistamon puhdistamoliette. Biokaasulaitoksen syötteenä oli puhdistamolietteitä, elintarviketeollisuuden sivuvirtoja sekä biojätettä. Jätevedenpuhdistamo oli mitoitettu 15 000 asukkaan jätevesiä vastaavalle määrälle. Skenaarion 2 nesteenkäsittelyosiossa käsiteltävä materiaali oli mädätysjäännöksen linkouksessa erottuvaa nestejakea.

Rakeistuksessa käytettävät tuhkat olivat voimalaitosten lentotuhkia. Mädätysjäännöksen kuiva-jakeen rakeistuksessa käytetyssä tuhassa polttosuhteena oli ollut puu ja turve suhteessa 50/50, puuosuuden ollessa murskattua puuta ja kuorta. Puhdistamolietteen rakeistuksessa käytetty tuhka oli peräisin kaukolämpölaitoksesta, jossa pääraaka-aineena olivat puuperäiset jakeet, esim. puru, puunkuori ja hake.

Muita panoksia käsittelyprosesseissa olivat vesi, ammoniakkistriippauksessa ja -konsentroidinnissa käytettävät kemikaalit (natriumhydroksidi (NaOH) ja rikkihappo (H_2SO_4)) sekä energia kaasuna, sähköinä ja polttoaineena. Näiden panosten valmistuksen päästöt ovat systeimirajauksessa mukana.

Orgaanisten raaka-aineiden (lingotun mädätteen ja puhdistamolietteen) vuosittaiset määrät saatiin Demotehtaalla kokeilussa olleiden orgaanisten materiaalien tuottajilta (taulukko 5). Tarvittava tuhkan määrä rakeistukseen skenaarioissa 3 ja 4 laskettiin Rakeistus Oy:ltä saatujen orgaanisen syöttömateriaalin, veden ja tuhkan syöttösuhteiden perusteella (taulukko 6). Ammoniakkistriippauksen massataseen pohjana käytettiin sekä pilot-mittakaavan kokeiden tuloksia (erotustehokkuus, puskurointikyky) että biokaasulaitosten ammoniumsulfaatin tuotetietoja (typpipitoisuus 90 g/kg, Envor, 2014). Stripausolosuhteina käytettiin lämpötilaa 60 °C ja pH-tasoa 10, jolloin ammoniakin erotustehokkuus pilot-kokeissa oli 77,5 %. pH:n noston vaatima NaOH-määrä laskettiin pilot-kokeiden yhteydessä tehtyjen emästitrausten pohjalta.

Taulukko 5. Syötteiden vuosittaiset massat (t/a) skenaarioittain.

Skenaariot	Syöte	Massa (t/a)
S1	lingottu mädäte	9 500
S2	lingottu mädäte	9 500
	mädätteen nestejäte	58 357
	NaOH (100 %, kuiva)	737
	rikkihappo (100 % happo)	477
S3	lingottu mädäte	9 500
	tuhka	997
S4	puhdistamoliete	5 000
	tuhka	2 500

Taulukko 6. Väli- ja lopputuotteiden vuosittaiset massat (t/a) skenaarioittain.

Skenaariot	Väli- ja lopputuotteet	Massa (t/a)
S1	kuivatuote	2657
S2	kuivattu mädäte ennen rakeistusta	4338
	raetuote	4115
	ammoniumsulfaatti	1515
S3	kuivattu mädäte ennen rakeistusta	4338
	raetuote	5247
S4	raetuote	3682

Syötteistä, välituotteista ja kierrätyslannoitevalmisteista määritettiin kuiva-aineen (TS), orgaanisen kuiva-aineen (VS), hiilen (C) ja ravinteiden (N, P ja K) pitoisuudet laboratorioissa (taulukko 7) (lukuun ottamatta ammoniumsulfaattia, jonka ominaisuudet otettiin kirjallisuudesta). Pitoisuuksien avulla määritettiin kuivaus- ja rakeistusprosesseille sekä näiden yhdistelmille massa-, hiili- ja pääravinneta-seeet. Taselaskennan lähtötietoina käytettiin myös Demotehtaalla ja pilot-mittakaavan stripperillä toteutettuja koeajoja. Lisäksi laskentaoletuksena oli, että prosessiin syötetyn kuiva-ainemäärät olivat samat kuin ulostulevat kuiva-ainemäärät väli- ja lopputuotteissa (ts. ei kuiva-ainehäviöitä). Ulospuhallettavasta kuivausilmasta ja siitä talteen otetusta kondenssivedestä ei saatu näytettä analysoitavaksi, kuten ei myöskään rakeistuksesta poistuvasta ilmasta.

Kuivauksen vuosittainen sähkön ja lämmön kulutus (MWh/a) vaihteli sen mukaan kuivattiinko massa noin 41 % kosteuteen rakeistusta varten (skenaariot 2 ja 3) vai kuivattiinko massa suoraan kuivatuotteeksi 3 % kosteuteen (skenaario 1) (taulukko 8). Rakeistusprosessin sähkönkulutukseen käytettiin yritykseltä saatua sähkönkulutuksen arviota. Kuivauksen sähkön kulutusta mitattiin suoraan kuivaimen läheisyydessä olevasta sähkömittarista. Strippauksen vuotuinen lämmitysenergiatarve määritettiin pilot-kokeiden pohjalta ja sähkönkulutukseen käytettiin Bauermeisterin ym. (2010) arviota strippauksen energiankulutuksesta, 2 kWh/m³ käsiteltävää nestettä (Zarebska 2015). Skenaariossa nestejäte johdettiin suoraan strippaukseen, jolloin lämmitystarve oli mesofiilisen mädätyksen lämpötilatasolta 35 °C käsittelylämpötilaan 60 °C.

Taulukko 7. Syötteiden, välituotteiden ja kierrätyslannoitevalmisteiden kemiallisia ominaisuuksia, pitoisuudet tuorepainoa kohti.

		TS (g/kg)	VS (g/kg)	N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)	C (g/kg)
S1	lingottu mädäte	270	163	10,3	10,9	1,5	83
	kuivatuote	967	582	33,1	37,6	4,9	306
S2	lingottu mädäte	270	163	10,3	10,9	1,5	83
	mädätteen nestejää	13	3	3,7	0,1	0,8	-
	kuivattu mädäte ennen rakeistusta	592	322	17,4	22,0	7,2	167
	raetuote	624	367	22,1	24,8	4,0	187
	ammoniumsulfaatti	-	-	90,0	0,0	0,0	-
	käsitelty neste	28	8	1,2	0,1	0,9	-
S3	lingottu mädäte	270	163	10,3	10,9	1,5	83
	lentotuhka	994	0	0,0	11,2	14,4	7
	kuivattu mädäte ennen rakeistusta	592	322	17,4	22,0	7,2	167
	raetuote	678	196	6,9	16,8	6,8	72
S4	puhdistamoliete	132	90	5,3	4,1	0,4	46
	lentotuhka	993	39	0,0	14,0	24,5	42
	raetuote	854	83	0,7	11,5	19,3	41

Lämpöä tarvitaan skenaarioissa 1–3. Pelkistetyksi kaiken kuivaimeen syötetyn energian on laskettu menevän kosteudenpoistoon, eikä laskelmassa ole huomioitu savukaasujen, häviöiden tai muiden muutujien osuutta. Kaikki kattilan tuottama energia ajettiin kuivaimeen. Kaasun keskimääräinen virtaama oli 120 kg/h ja metaanipitoisuus 50 %. Kaasun kulutus mitattiin kaasuputkiston virtausmittarilta. Sähkön ja lämmön kulutustiedot saatiin yritykseltä koeajoittain, ja näiden perusteella laskettiin vuosittaiset kulutusmäärät (MWh/a), taulukko 8.

Taulukko 8. Pääprosessien energiankulutukset skenaarioittain, MWh/vuosi.

	kuivaus		rakeistus		ammoniakkistriippaus	
	sähkö	lämpö	sähkö	lämpö	sähkö	lämpö
S1	752	12 574	0	0	0	0
S2a	763	8 662	41	0	0	0
S2b	0	0	0	0	117	1834
S3	763	8 662	53	0	0	0
S4	0	0	37	0	0	0

Kuljetusetäisyydet panosten kuljetuksista Demotehtaalle ja takaisin sekä kuljetukset lannoitevalmisteiden varastoinnista maatilalle sekä maatilalta pellolle ja takaisin esitetään taulukossa 9. Kuljetusten päästöt perustuvat LIPASTO tietokantaan, jossa päästöt on ilmoitettu tonnikilometriä (kuljetetun tonnin määrän ja kuljetusmatkan pituuden tulo) kohden.

Taulukko 9. Kuljetusetäisyydet.

	Materiaali	Kuljetusetäisyydet (km)
S1	lingottu mädäte laitokselta Demotehtaalle	0
S2	lingotun mädäte ja mädätteen nestejake laitokselta Demotehtaalle	0
	kemikaalit Demotehtaalle ¹	20
S3	lingottu mädäte laitokselta Demotehtaalle	0
	tuhka voimalaitokselta Demotehtaalle ¹	10
S4	puhdistamoliete puhdistamolilta Demotehtaalle	0
	tuhka voimalaitokselta Demotehtaalle ¹	2
tuotteet	kierrätyslannoitevalmiste varastosta maatilalle ¹	20
	kierrätyslannoitevalmiste maatilalta pellolle ²	5
	mineraalilannoite maatilalle ¹	200
	mineraalilannoite tilalta pellolle ²	5

¹Puoliperävaunu, EURO V, kapasiteetti 25 m³

²Traktori, kapasiteetti 12 m³

Arviot kuljetuksiin, levityksiin ja kuormauksiin tarvittavista polttoaineen kulutuksista esitetään taulukossa 10. Lannoitteiden kuljetuksen polttoaineenkulutus varastolta tilalle puoliperävaunulla perustui LIPASTO tietokantaan. Maataloustraktorilla tapahtuvan kuljetusten polttoaineenkulutus täydellä kuormalla tilalta pellolle perustui Posio (2010) arvioon ja tyhjä kuljetus takaisin asiantuntija-arvioon. Työkoneiden polttoaineen käyttö eri lannoitteiden levitykseen arvioitiin keskimääräisen hehtaarikohtaisen polttoainekulutuksen mukaan (Mikkola & Ahokas 2009 ja Grönroos & Voutilainen 2001). Kaikkien referenssinä toimivien mineraalilannoitteiden levitykseen sovellettiin väkilannoitteen pintalevitykseen arvioitua hehtaarikohtaista polttoaineen kulutusta (Mikkola & Ahokas 2009), orgaanisten kierrätyslannoitteiden levityksiin kuivalannan levityksen hehtaarikohtaista polttoaineen kulutusta (Grönroos & Voutilainen 2001) ja mädätteen nestejakeesta valmistetun ammoniumsulfaatin levitykseen virtsan levityksen hehtaarikohtaista polttoaineen kulutusta (Grönroos & Voutilainen 2001).

Taulukko 10. Koneiden polttoaineenkulutukset.

Koneisto	Kapasiteetti (m ³)	Kulutus	Lähde
Traktori, ajo	12	0,2 l/tkm	Posio 2010
Traktori, pumppaus/kuormaus		0,06 l/m ³	Asiantuntija-arvio
Traktori, virtsan levitys	12	1,8 l/ha	Grönroos & Voutilainen 2001
Traktori, väkilannoite, pintalevitys		2,9 l/ha	Mikkola & Ahokas 2009
Traktori, kuivajakeen levitys		4,8 l/ha	Grönroos & Voutilainen 2001
Traktori, tyhjä kuorma		0,20 l/km	Asiantuntija-arvio
Puoliperävaunu, ajo	25	0,17 kWh/tkm	VTT LIPASTO 2012

Koska kierrätyslannoitevalmisteiden hiilijalanjälkiä verrattiin mineraalilannoitteiden vastaaviin, valittiin kullekin kierrätyslannoitevalmisteelle oma mahdollisimman hyvin ravinnesuhteiltaan vastaava referenssilannoite. Taulukossa 11 on listattu vertailuun valitut referenssilannoitteet skenaarioittain.

Taulukko 11. Referenssilannoitteet.

referenssilannoitteiden tiedot				
skenaario ja kierrätystuote	kauppanimi	ravinnesuhteet (N-P-K)	ilmastopäästöt (kg CO ₂ -ekv. /kg P)	Lähde
S1, kuivatuote	Puutarhan Y3	11-11-21	4,5	Yara, 2011
S2a, raetuote	Puutarhan Y3	11-11-21	4,5	Yara, 2011
S2b, ammoniumsulfaatti	ammoniumsulfaatti	21-0-0	3*	Skowrońska & Filippek, 2013
S3, raetuote	Puutarhan Y2	6-12-24	2,8	Yara, 2011
S4, raetuote	superfosfaatti (SSP)	0-20-0	0,6	Williams ym., 2010

*kg CO₂-ekv./kg N

2.3. Laskentamenetelmät ja systeemirajauksen perustelut

Hankeessa arvioitiin kierrätyslannoitteiden valmistus- ja peltokäyttökettujen elinkaarisia ilmastovaikutuksia verrattuna vastaavien mineraalilannoitteiden ilmastovaikutuksiin noudattaen kansainvälisiä elinkaariarviointimenetelmän standardeja (ISO 2006a, ISO 2006b), RES -direktiiviä (EC 2009) ja IPCC:n (2006) laskentaohjeistuksia, sekä soveltaen tässä raportissa esitettyjä rajoituksia ja oletuksia.

Kierrätyslannoitevalmisteiden ilmastovaikutukset on arvioitu valmistuksen ja käytön osalta vuositasolla ja päästöt on kohdistettu valmistusketjun lopputuotteelle eli nk. toiminnalliselle yksikölle. Koska tässä tarkastelussa mukana olevat lopputuotteet ovat kierrätyslannoitteita, ja yhtä lukuun ottamatta ominaisuuksiltaan fosforilannoitteita, katsottiin toiminnallisen yksikön olevan lannoitteen sisältämä fosforimäärä eli päästöjen kohdistus tehtiin suurimmalle osalle tuotteista lannoitteen fosforikilolle. Toisin sanoen, tulokset esitetään käytännössä kaikkien kiinteiden lannoitteiden osalta kg CO₂-ekv. per kg fosforia (P). Tämä siis tarkoittaa sitä, että fosforikilolle kohdistetut päästöt eivät ole vain fosforista muodostuneet päästöt vaan päästöt ovat koko systeemirajauksen (ks. systeemirajaukset luku 2.1.) osalta ja myös siis muistakin lannoitteen sisältämistä syötteistä ja ravinteista (N ja K) muodostuneet päästöt (ks. Taulukko 7 ja 13). Ainoastaan ammoniumsulfaatin katsotaan vastaavan typpilannoitetta, joten sen toiminnallinen yksikkö on vastaavasti lannoitteen sisältämä typpimäärä eli ts. sille vuosittaiset kokonaispäästöt ovat kohdistettu tuotetulle typpikilomäärälle eli tulokset esitetään kg CO₂-ekv. per kg typpeä (N).

Laskennassa huomioitiin kasviuonekaasuista hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O). Ketjuissa syntyvät kasviuonekaasupäästöt yhteismitallistettiin hiilidioksidiekvivalenteiksi karakterisointikertoimilla (taulukko 12).

Taulukko 12. Käytetyt kasviuonekaasujen karakterisointikertoimet.

Päästömuuttuja	Ekvivalenttikerroin	Lähde
Ilmastonmuutos	kg CO ₂ -ekv.	RES-direktiivi
- CO ₂	- 1	
- CH ₄	- 23	
- N ₂ O	- 296	

Raaka-aineiden, eli lingotun mädätteen, mädätteen nestejakeen, puhdistamolietteen sekä tuhkien valmistukset arvioitiin nollapäästöiseksi, koska kaikkien orgaanisten raaka-aineiden ja tuhkien muodostuminen nähtiin tapahtuvan Demotehtaasta huolimatta. Myös mädätysjäätännöksen separointi tapahtuu jo nykyisin, riippumatta Demotehtaan olemassaolosta. Määdte pohjaisilla jakeilla kokonaispäästöt tulee myös RES-direktiivin mukaisesti kohdistaa biokaasulle eikä mädätteelle. Rajauksiin päädyttiin myös sen vuoksi, ettei materiaaleilla sivutuotteena/jätteenä ole vielä taloudellista arvoa markkinoilla, ja näin ollen raaka-aineiden valmistuksen päästöt on kohdistettu päätuotteelle (esim. mädätysprosessissa biokaasulle ja lämpövoimalaitoksilla energialle).

Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjun päästöihin sisällytettiin kuitenkin itse jalostusskenaarioiden vaatimien tuotantopanosten (esim. strippauksessa käytettävien kemikaalien) valmistuksesta aiheutuvat päästöt, tuotantopanosten kuljetusten päästöt, koneiston ja ajoneuvojen polttoaineen kulutuksen päästöt, kuivauksen ja rakeistuksen sähkön kulutus sekä kaasun polton päästöt.

Tässä tutkimuksessa katsottiin, että kaatopaikkakaasun muodostuminen ja biokaasun valmistus tapahtuvat Demotehtaan energian kysynnästä huolimatta, ts. kaasun tuotanto ei ole riippuvaista Demotehtaasta ja siten päästöjä tai päästöhyvityksiä valmistuksen ajalta ei huomioida laskennassa. Maakaasun tuotanto perustuu puhtaasti energian kysyntään, joten sen tuotannon päästöt on laskettava mukaan. Gasum (2015) raportin mukaan ekvivalenteiksi CO₂-päästöinä laskettuna (kun otetaan mukaan myös muut kasvihuonekaasut) Venäjän puolella Suomeen siirretyn maakaasun päästöt ovat 7,7 g CO₂-ekv./MJ ja Suomen puolella siirrosta aiheutuvat päästöt korkeapaineputkiston osalta 0,2 g CO₂-ekv./MJ. Yhteen laskettuna maakaasun valmistuksen ja siirron päästöt ennen polttoa ovat 7,9 g CO₂-ekv./MJ.

Kaasun polton aikaiset päästöt sisällytettiin arvioon kaikilla kolmella kaasulla. Kaatopaikkakaasulla ja biokaasulla polton aikaisiin päästöihin sovellettiin IPCC:n oletusarvoa 0,1 g CO₂-ekv./MJ biokaasun polton CH₄- ja N₂O-päästöille (kaatopaikka- ja biokaasu ovat CO₂-päästöjen osalta biogeenisiä). Sekä kaatopaikka- että biokaasu muodostuvat Demotehtaan läheisyydessä, joten siirroista ei katsottu koi-tuvan päästöjä. Maakaasun polton päästöt lämmöksi ovat Gasumin raportin (2015) mukaan 55,04 g CO₂/MJ. Sähkö kuivaukseen ja rakeistukseen ostetaan Demotehtaan ulkopuolelta, joten sen päästöjen arvioimiseksi sovelsimme keskimääräistä suomalaista sähköä.

Lannoitteiden peltokäyttökettujen päästöissä huomioitiin kappaleessa 2.1.3 esitettyjen kuljetusten ja levitysten aiheuttamat päästöt sekä maahan lisätystä typpilannoituksesta, kasvintähteiden hajoamisesta ja eloperäisten maiden orgaanisen aineksen hajoamisesta aiheutuvat suorat N₂O-päästöt, sekä typen huuhtoumasta ja haihdunnasta aiheutuvat epäsuorat N₂O-päästöt.

Kuljetuksista aiheutuvat suorat päästöt perustuvat LIPASTO yksikköpäästöt -tietokantaan (2017). Syötteiden ja lannoitetuotteiden kuormauksen ja levityksen päästöt laskettiin polttoaineen kulutuksen (Taulukko 10) perusteella fossiilisen dieselin päästökertoimien mukaan.

Lannoitevalmisteiden levitysmäärien arviointiin sovellettiin Timosen ym. (2019) käyttämää fosforilannoituksen määrää 14 kg/ha. Kiinteät kierrätyslannoitevalmisteet sekä skenaarion 4 referenssimineraalilannoite arvioitiin levitettävän kerran viidessä vuodessa (ensimmäisen vuoden aikana kerralla 70 kg P/ha). Kyseiset tuotteet ajateltiin fosforilannoitteina, joita käytettäisiin peltolohkon fosforitilan korjaamiseen ja riittävän lannoitevästteen saamiseen, ja niillä viiden vuoden salliman määrä levitettäisiin jo ensimmäisenä vuonna. Näin toimimalla pystytään vähentämään kuljetus- ja levityskustannuksia. Skenaarion 4 referenssilannoite arvioitiin levitettävän pintalevityksenä käyttäen Mikkola & Ahokas (2009) polttoaineenkulutustietoja (2,9 l/ha), kun taas kiinteiden kierrätyslannoitevalmisteiden levityksen polttoaineenkulutus arvioitiin kuivalannan levitystä vastaavaksi (4,8 l/ha, Grönroos & Voutilainen 2001). Muut mineraalilannoitteet laskettiin levitettävän vuosittain (14 kg P/ha). Ammoniumsulfaatin käyttömäärää rajoittaa sen korkea rikkipitoisuus, joka on 1,15-kertainen suhteessa typen määrään.

Ammoniumsulfaattia on periaatteessa käytettävissä koko viljelyalalla vastaten typpimäärää noin 20 kg/ha, jolla rikkilannoitustarve tulee tyydytettyä. Stripaamalla nestejakeesta valmistetun ammoniumsulfaatin levityksen päästöt arvioitiin virtsan levitystä vastaaviksi (1,8 l/ha, Grönroos & Voutilainen 2001) ja referenssiksi valitun kiteisen ammoniumsulfaatin levityksen päästöt määritettiin käyttäen väkilannoitteen levityksen polttoaineen kulutusta (2,9 l/ha, Mikkola & Ahokas 2009).

Peltokäytön suorat ja epäsuorat N₂O-päästöt arvioitiin lannoitevalmisteiden kokonaistyppimäärään perustuen. Suorat N₂O-päästöt perustuvat IPCC:n (2006) lantapohjaisen typpilannoitteen kertoimiin. Epäsuorat N₂O-päästöt laskettiin soveltamalla lannan päästökertoimia, perustuen Grönroosin ym. (2009) kansalliseen ammoniakkipäästöinventaarioon, koska mädäte- ja puhdistamolietepohjaisille kierrätyslannoitevalmisteille ei ole olemassa omia päästökertoimia. Kuivatuille ja rakeistetulle kierrätyslannoitevalmisteille käytettiin kuivalannan päästökertoimia ja ammoniumsulfaatille virtsan päästökertoimia. Päästökertoimien lisäksi epäsuorien päästöjen laskennassa huomioitiin peltomaan tyyppi ja kasvipeitteisyys, sillä lannan päästökerroin vaihtelee eri tapauksissa.

Mineraalilannoitteiden valmistuksen päästöt saatiin eri kirjallisuuslähteistä (taulukko 11). Vertailuun valituille mineraalilannoitteille määritettiin myös peltokäytön päästöt sisällyttämällä arviointiin kuljetusten päästöt tilalle ja pellolle, lannoitteen levitys pellolla sekä suorat ja epäsuorat N₂O-päästöt. Levityksen päästöjen arvioinnissa käytettiin Mikkola & Ahokas (2009) polttoainekulutuksen arvoa 2,9 l/ha (taulukko 10). Mineraalilannoitteiden N₂O-päästöjen laskennassa hyödynnettiin IPCC:n (2006) julkaisemia väkilannoitteen kertoimia.

3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Kierrätyslannoitevalmisteiden ilmastopäästöt esitetään valmistuksen ja peltokäytön osalta erikseen. Ilmastopäästöt on kohdistettu kuivilla tuotteilla fosforikilolle (kg CO₂-ekv./kg P) ja ammoniumsulfaatin osalta päästöt ovat kohdistettu typelle (kg CO₂-ekv./kg N).

3.1. Ravinnetaseet

Ravinnetaseet (taulukko 13) muodostettiin analysoitujen ravinnepitoisuuksien (taulukko 7) ja vuosittaisten massojen (taulukot 5 ja 6) perusteella. Taseet esitetään muodossa t/a ja tasetta käytettiin myös kasvihuonekaasupäästölaskelmien pohjana.

Skenaarioissa 1–3 oli kaikissa sama lingotun mädätteen vuosittainen syöttömäärä, joten myös kyseisestä orgaanisesta materiaalista tuleva syöttö oli sama kaikissa. Erilaiset prosessoinnit, prosessointi-olosuhteet ja lisäsyötteen vaikuttivat kuitenkin tuotteissa oleviin ravinnemääriin. Varsinkin typpeä vapautui prosesseissa huomattavasti. Etenkin skenaariossa 4 typen hävikki on suuri, 90 %. Syynä oli luultavimmin suuri tuhkan osuus, mikä nostaa pH:ta ja mahdollistaa ammoniumtypen haihtumisen. Kaikkien skenaarioiden kiinteissä tuotteissa oli pääravinteista (N-P-K) eniten fosforia. Typpeä oli mukana orgaanisissa raaka-aineissa melkein samassa suhteessa kuin fosforia, skenaarion 4 syötteessä enemmänkin, mutta prosessointien seurauksena kuivissa lopputuotteissa oli ravinteista eniten fosforia.

Taulukko 13. Massa-, ravinne- ja hiilitaseet.

		massa (t/a)	N (t/a)	P (t/a)	K (t/a)	C (t/a)
S1	lingottu mädäte	9 500	98	103	14	791
	kuivatuote	2 657	88	100	13	813
S2	lingottu mädäte	9 500	98	103	14	791
	kuivattu mädäte ennen rakeistusta	4 338	75	95	31	726
	raetuote	4 115	91	102	17	768
	mädätteen nestejäte	58 357	218	8	49	0
	ammoniumsulfaatti	1 515	136	0	0	0
	käsitelty neste	58 957	71	8	50	0
S3	lingottu mädäte	9 500	98	103	14	791
	lentotuhka	997	0	11	14	7
	kuivattu mädäte ennen rakeistusta	4 338	75	95	31	726
	raetuote	5 247	36	88	36	379
S4	puhdistamolijäte	5 000	27	21	2	230
	lentotuhka	2 500	0	35	61	104
	raetuote	3 682	3	42	71	151

Vuositasolla tarkasteltuna skenaario 2 tuotti kuivassa lopputuotteessaan eniten fosforia vuositasolla (102 t/a). Seuraavaksi eniten fosforia vuositasolla oli skenaarion 1 kuivatuotteessa ja vähiten fosforia lopputuotteeseen (t/a) tuotti skenaario 4.

Taseisiin tuo epävarmuutta se, että kuivauksen ulospuhallusilmasta ja siitä kondensoituvasta nesteestä, eikä myöskään rakeistuksesta poistuvasta ilmasta saatu näytteitä. Näin ollen oletettuja typen

vapautumisreittejä ei pystytty todentamaan. Toisaalta myös materiaalien epähomogeenisen rakenteen vuoksi edustava näytteenotto oli haastavaa, ja taselaskennassa pienetkin pitoisuuserot kerrantuvat lopputuloksiin.

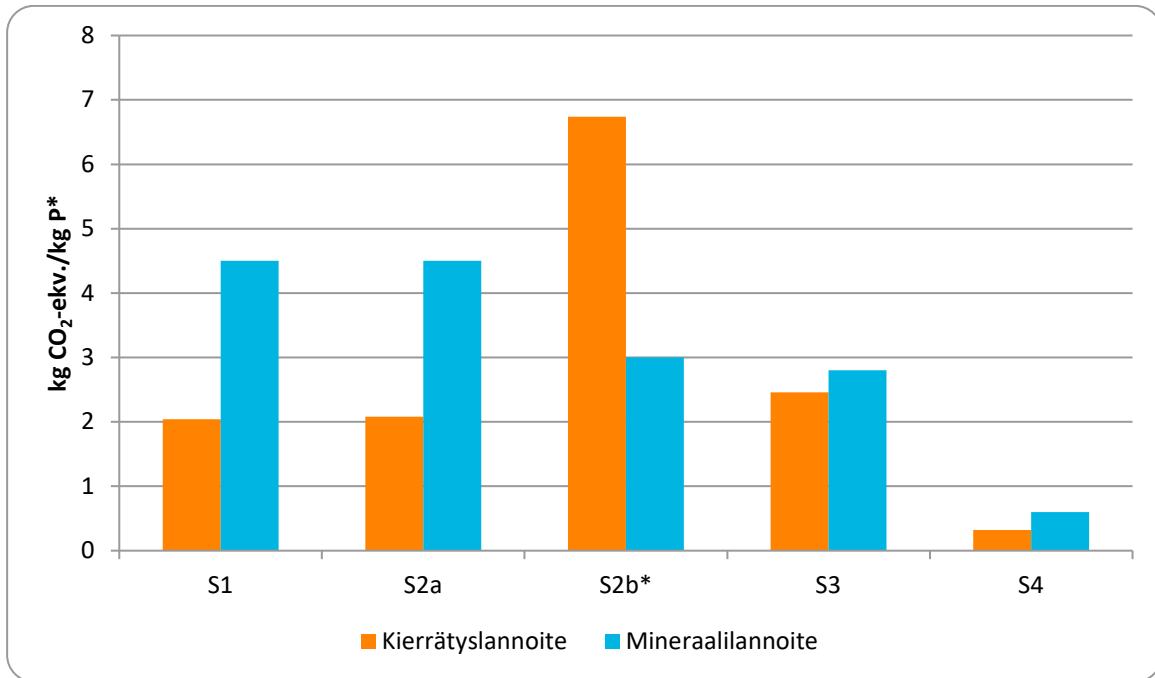
3.2. Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjun kasvihuonekaasupäästöt

Kaikkien kiinteiden kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen ilmastopäästöt olivat pienemmät kuin vastaavien mineraalilannoitteiden valmistuksen päästöt. Kuivatuote skenaariossa 1 ja raetuote ilman tuhkaa skenaariossa 2 olivat päästöiltään pienemmät (2,04 ja 2,08 kg CO₂-ekv./kg P) kuin referenssiksi valittu mineraalilannoite (Puutarha Y3, päästöt 4,5 kg CO₂-ekv./kg P, Yara 2011). Samoin raetuote, johon lisättiin tuhkaa (S3) oli päästöiltään pienempi (kg 2,46 CO₂-ekv./kg P) kuin referenssiksi valittu mineraalilannoite (Puutarhan Y2, päästöt 2,8 kg CO₂-ekv./kg P, Yara 2011). Puhdistamolietteestä valmistetun raetuotteen (S4) valmistuksen päästöt (0,32 kg CO₂-ekv./kg P) olivat pienemmät kuin referenssiksi valitulla fosforilannoitteella (SSP, päästöt 0,6 kg CO₂-ekv./kg P, Williams ym. 2010). Ainoastaan nestemäisen mädätepohjaisen ammoniumsulfaatin valmistuksen päästöt (6,74 kg CO₂-ekv./kg N) olivat suuremmat kuin vastaavan mineraalilannoitteen valmistuksen päästöt (3 kg CO₂-ekv./kg N, Skowrońska & Filipek 2013). Typen strippauksessa ja talteenotossa käytettyjen kemikaalien valmistuksen päästöt olivat huomattavan suuret, mikä näkyy prosessin korkeina kokonaispäästöinä.

Koska mineraalilannoitteiden ja kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen prosessivaiheet poikkeavat toisistaan, päästöjä ei voitu suoraan verrata keskenään vaihe vaiheelta. Kierrätyslannoitevalmisteiden pienemmät päästöt johtuvat todennäköisesti mm. siitä, että ne hyödyntävät raaka-aineenaan kierätettyä orgaanista ainesta (mädäte ja puhdistamoliete), joka on jätteenä nollapäästöistä, kun taas mineraalilannoitteiden raaka-aineiden hankinnasta koituu päästöjä.

Kierrätyslannoitevalmisteiden jalostusprosessin suurin päästölähde oli sähkön hyödyntäminen kuivauslaitteistossa, toiseksi suurin oli sähkön hyödyntäminen rakeistusprosessissa ja kolmanneksi suurimpana olivat kaatopaikkakaasun polton päästöt kattilassa lämmöksi. Pienin päästölähde oli raaka-aineiden kuljetukset, joka tarkoitti nyt tuhkan kuljetuksia, mädätettä ja puhdistamolietettä kun ei tarvinnut kuljettaa jalostuslaitokselle. Myös syötteiden kuormauksella prosessiin ja varastoon oli pieni päästöosuus valmistusketjussa (Liite 1).

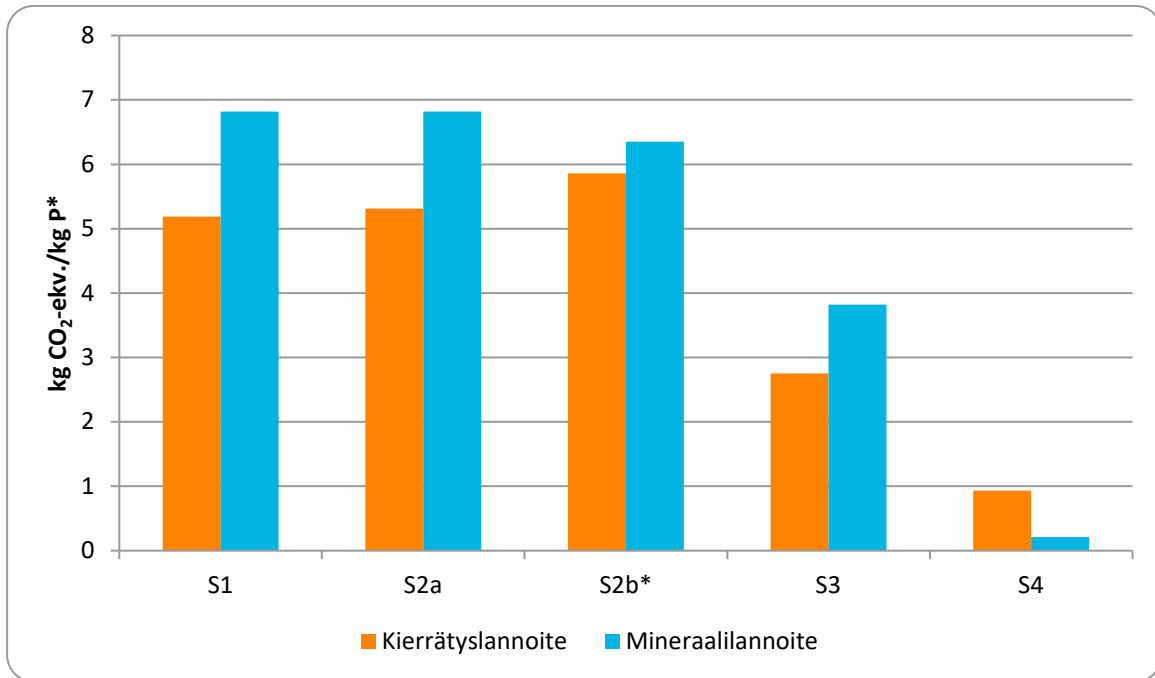
Kun kiinteitä kierrätyslannoitevalmisteita vertaillaan keskenään, on suurin päästö lingotusta mädätteestä valmistetulla, tuhkaa sisältävällä raetuotteella skenaariosta 3 (kuva 4). Raetuotteen (S3) jalostusprosessi sisälsi eniten ketjuvaiheita mm. tuhkan kuljetukset ja tuotti vuositasolla myös vähemmän fosforia kuin lannoitetuotteet S1 ja S2, mistä syystä päästöt fosforikiloa kohden kasvavat. Pienin päästö oli puolestaan puhdistamolietteestä valmistetulla raetuotteella (S4), jonka valmistuksen käsittelyketjusta puuttui täysin kuivausvaiheen päästöt eli se kuluttaa huomattavasti vähemmän sähköä kuin muut skenaarit, ja ei ollenkaan lämmitysenergiaa. Skenaariota 4 tuotti vuositasolla vähiten fosforia, mutta siitä huolimatta päästöt suhteessa fosforikiloa kohden jäivät pieniksi koska vuositaso päästöt olivat niin pienet. Ammoniumsulfaatin päästöt on kohdistettu typpikilolle (kg N) joten päästöjä ei voida verrata muihin kierrätyslannoitteisiin, koska niiden päästöt on kohdistettu fosforikilolle (kg P).



Kuva 4. Kierrätyslannoitevalmisteiden ja mineraalilannoitteiden valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt (kg CO₂-ekv.) kohdistettuna lopputuotteen fosforikilolle (kg P). *kg CO₂-ekv./kg N

3.3. Kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäyttöketjun kasvihuonekaasupäästöt

Lähes kaikkien kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäytön ilmastopäästöt olivat pienemmät kuin referensseiksi valittujen mineraalilannoitteiden peltokäytön päästöt (kuva 5). Kuivatuote (S1) ja raetuote ilman tuhkaa (S2) olivat päästöiltään (5,19 kg CO₂-ekv./kg P ja 5,31 kg CO₂-ekv./kg P) pienemmät kuin referenssiksi valittu mineraalilannoite (päästöt 6,82 kg CO₂-ekv./kg P). Samoin raetuote, johon lisättiin tuhkaa (S3) oli päästöiltään pienempi (2,75 kg CO₂-ekv./kg P) kuin referenssiksi valittu mineraalilannoite (3,82 kg CO₂-ekv./kg P). Mädätteen nestejakeesta jatkojalostetun ammoniumsulfaatin peltokäytön päästöt (5,86 kg CO₂-ekv./kg N) olivat myös pienemmät kuin referenssiksi valitun kaupallisen ammoniumsulfaatin peltokäytön päästöt (6,35 kg CO₂-ekv./kg N) (kuva 5). Ainoastaan puhdistamolietteestä valmistetun raetuotteen (S4) peltokäytön päästöt (0,93 kg CO₂-ekv./kg P) olivat suuremmat kuin referenssiksi valitun fosforilannoitteen päästöt (0,21 kg CO₂-ekv./kg P). Tämä johtuu siitä, että mineraalifosforilannoite ei sisällä ollenkaan typpeä ja muodostaa siten pienemmät N₂O-päästöt pellolta. Myös kuljetusten päästöt olivat pienemmät koska kuljetuskertoja tilalta pellolle ei tarvitse niin paljon fosforilannoitteen korkeamman fosforipitoisuuden (20 %) takia.

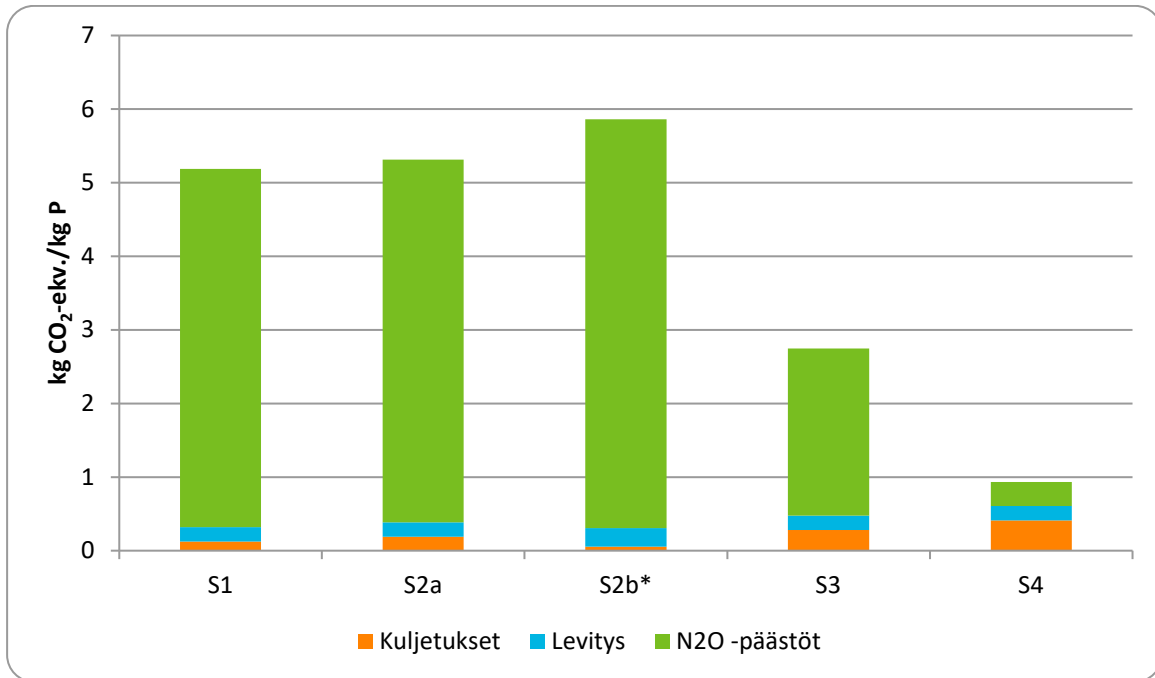


Kuva 5. Kierrätyslannoitevalmisteiden ja mineraalilannoitteiden peltokäytön kasvihuonekaasupäästöt (kg CO₂-ekv.) lopputuotteen fosforikiloa kohden. *kg CO₂-ekv./kg N

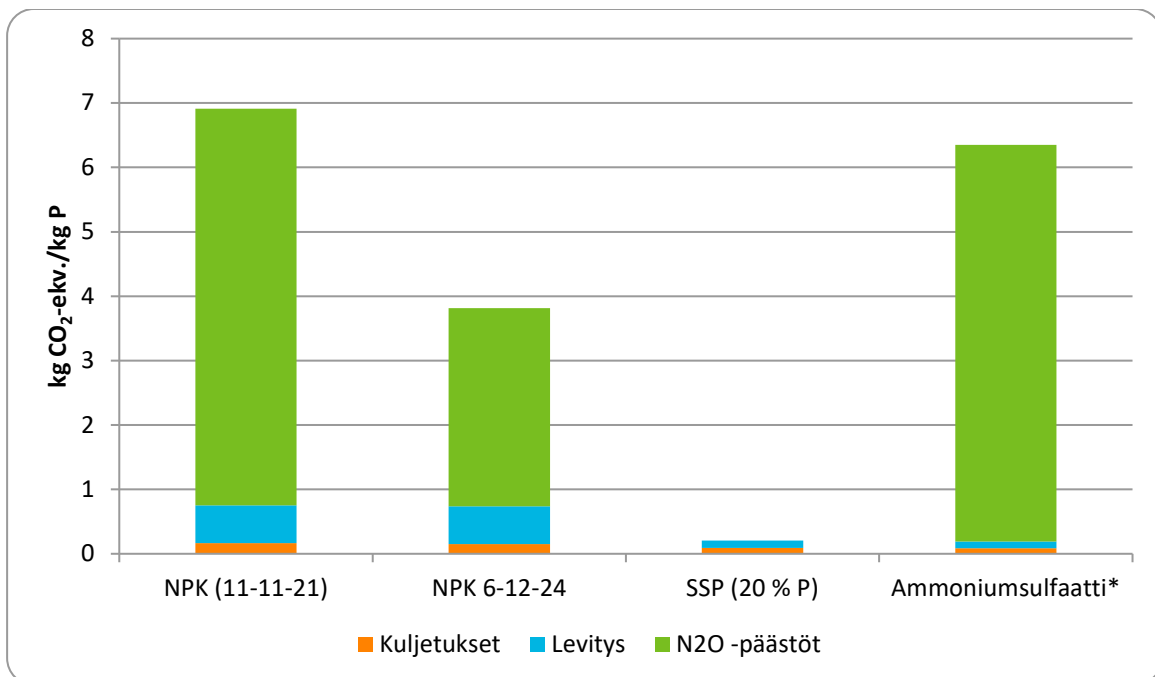
N₂O-päästöt olivat suuremmat mineraalilannoitteilla (kuva 7) kuin kierrätyslannoitevalmisteilla (kuva 6). Tämä johtuu siitä että mineraalilannoitteiden typpimäärät olivat hieman suuremmat ja mineraalilannoitteilla käytettiin IPCC:n väkilannoitteen kertoimia, kun taas kierrätyslannoitevalmisteilla käytettiin orgaanisen lannoitteen (kuivalannan) kertoimia. Ainoastaan puhdistamoliettestä valmistetulla raetuohteella (S4) ja sitä vastaavalla fosforilannoitteella N₂O-päästöt olivat pienin peltokäyttöketjun päästölähde, mikä johtuu näiden lannoitteiden pienistä typpimääristä (t/a). Keskinäisessä vertailussa N₂O-päästöt olivat suuremmat puhdistamoliettestä valmistetulla kierrätyslannoitevalmisteella, koska se sisälsi hieman typpeä, kun taas pelkkä fosforilannoite ei ollenkaan.

Levityksen päästöt fosforikiloa kohden olivat referenssien vastaavia pienemmät lähes kaikilla kiinteillä kierrätyslannoitevalmisteilla, vaikka hehtaarikohtainen traktorin polttoaineen kulutus on suurempi kierrätyslannoitteilla johtuen suuremmista levitysmassoista pienemmän ravinnepitoisuuden takia. Tämä johtuu siitä, että tässä tarkastelussa kiinteitä kierrätyslannoitteita levitettiin vain kerran viidessä vuodessa 70 kg P/ha samalla kertaa, mutta mineraalilannoitteita joka vuosi 14 kg P/ha. Siten kiinteiden kierrätyslannoitteiden levitysala lannoitteen fosforikiloa kohden on pienempi (0,01 ha/kg P) kuin mineraalilannoitteiden vastaava (0,07 ha/kg P). Ainoastaan skenaarion 4 raetuohteen referenssinä toimivaa mineraalilannoitetta (SSP) levitetään myös kerran viidessä vuodessa, koska se ei sisällä ollenkaan typpeä. Skenaarion 4 referenssilannoitteen levityksen päästöt ovatkin pienemmät kuin vastaavan puhdistamolietepohjaisen kierrätyslannoitteen, koska mineraalilannoitteen levityksen polttoaineen kulutus oli levitystekniikasta johtuen pienempi, vaikka levitysalat fosforikiloa kohden olivat samat. Nestemäisen, mädätteen nestejakeesta valmistetun, ammoniumsulfaatin levityksen päästöt typpikiloa kohden (0,255 kg CO₂-ekv./kg N) olivat suuremmat kuin kiinteänä rakeena olevan referenssilannoitteen (0,103 kg CO₂-ekv./kg N).

Kuljetusten päästöt tilalle ja tilalta pellolle olivat puolestaan hieman suuremmat kierrätyslannoitteilla kuin mineraalilannoitteilla, vaikka mineraalilannoitteita kuljetetaan kauempaa. Tämä johtuu siitä, että kierrätyslannoitteita joudutaan kuljettamaan useampi erä, koska kierrätyslannoitteiden fosforipitoisuudet ovat pienemmät kuin mineraalilannoitteiden. Ainoastaan kuivatuotteen (S1) kuljetusten päästöt olivat pienemmät kuin mineraalilannoitteen johtuen kuivatuotteen suuresta fosforipitoisuudesta.



Kuva 6. Kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäytön kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen fosforikiloa kohden ketjuvaiheittain tarkasteltuna. *kg CO₂-ekv./kg N



Kuva 7. Mineraalilannoitteiden peltokäytön kasvihuonekaasupäästöt lopputuotteen fosforikiloa kohden ketjuvaiheittain tarkasteltuna. *kg CO₂-ekv./kg N

Suurimmat ja pienimmät päästölähteet vaihtelivat eri kierrätyslannoitevalmisteilla. Suurin päästölähde lähes kaikilla kierrätyslannoitevalmisteilla (S1–S3) oli kuitenkin N₂O-päästöt pellolta (kuva 6, liite 2). Ainoastaan puhdistamolietteestä valmistetun raetuohteen (S4) suurimmaksi päästölähteeksi nousivat kuljetukset ja levitys pitkälti siitä syystä, että N₂O-päästöt olivat pienet vähäisen typpimäärän takia. Kuljetukset varastolta tilalle ja tilalta pellolle olivat pienin päästölähde kuivatuohtella (S1) ja kuivatulla

raetuotteella (S2). Tuhkaa sisältävän raetuotteen (S3) ja puhdistamolietteestä valmistetun raetuotteen (S4) kuljetusten päästöt olivat suuremmat, koska niiden fosforipitoisuus oli pienempi ja niitä piti kuljettaa useampia kertoja pellolle fosforikiloa kohden.

Verrattaessa kierrätyslannoitteita keskenään, suurimmat peltokäytön päästöt olivat lingotusta mädätteestä valmistetulla raetuotteella, joka ei sisältänyt tuhkaa (S2) ja pienemmät puhdistamolietteestä valmistetulla raetuotteella (S4). Tämä johtuu suureksi osaksi siitä, että mädätteestä jalostetun raetuotteen typpipitoisuus oli suurin muodostaen suurimmat N₂O-päästöt pellolla ja vastaavasti puhdistamolietteestä valmistetun raetuotteen (S4) typpipitoisuus oli pienin muodostaen myös pienet N₂O-päästöt pellolla (jopa niin pienet, että kuljetuksien päästöt nousivat suuremmiksi).

Levityksen polttoaineen kulutuksen päästöt olivat kaikilla kiinteillä kierrätyslannoitevalmisteilla (raakeet ja kuivatuote) samat fosforikiloa kohden. Tämä johtuu siitä, että kierrätyslannoitevalmisteita levitetään fosforimäärän mukaisesti hehtaarikohtaisesti yhtä paljon 70 kg P/ha ja levitysala fosforikiloa kohti on jokaiselle skenaariolle sama eli 0,01 ha/kg P. Levityksen polttoaineen kulutus ja sen päästöt ovat hehtaarikohtaisesti vakio, joten siten myös päästöt per kg P ovat kiinteille kierrätyslannoitevalmisteille samat. Sama tilanne oli myös skenaarioissa 1–3 käytetyillä referenssilannoitteilla (Puutarhan Y3 ja Puutarhan Y2), joilla levitysala oli 0,07 ha/kg P (14 kg P/ha), jolloin levityksen päästöt fosforikiloa kohti olivat keskenään samat (0,587 kg CO₂-ekv./kg P). Skenaarion 4 referenssinä toimivaa mineraalilannoitetta (SSP) levitettiin fosforin suhteen sama määrä kuin kiinteitä kierrätyslannoitevalmisteita (70 kg/ha), mutta kierrätyslannoitevalmisteihin verrattuna pienemmällä polttoainekulutuksella. Näin ollen SSP:n levityksen päästöt (0,117 kg CO₂-ekv./kg P) poikkesivat sekä muiden referenssilannoitteiden että viiden vuoden jaksoissa levitettävien kierrätyslannoitevalmisteiden levityksen päästöistä. Ammoniumsulfaatin levitysala määräytyi muista lannoitteista poiketen typpipitoisuuden perusteella ja sen levityksen päästöt olivat näin ollen myös muista lannoitteista poikkeavat.

Kuljetusten päästöt varastosta tilalle ja tilalta pellolle olivat suurimmat puhdistamolietteestä valmistetulla raetuotteella (S4) ja pienimmät kuivatulla mädätteellä (S1). Tämä johtuu siitä, että puhdistamolietteestä valmistetulla raetuotteella on pienin fosforipitoisuus eli vaikka etäisyydet varastolta tilalle ja tilalta pellolle olivat samat skenaarioiden välillä, joutuu puhdistamolietteestä valmistettua lannoitetta (S4) kuljettamaan useampia kertoja lannoitekiloa kohden pellolle jotta tarvittava fosforimäärä saadaan levitettyä.

3.4. Herkkyystarkastelu

3.4.1. Kaatopaikka-, bio-, vai maakaasu

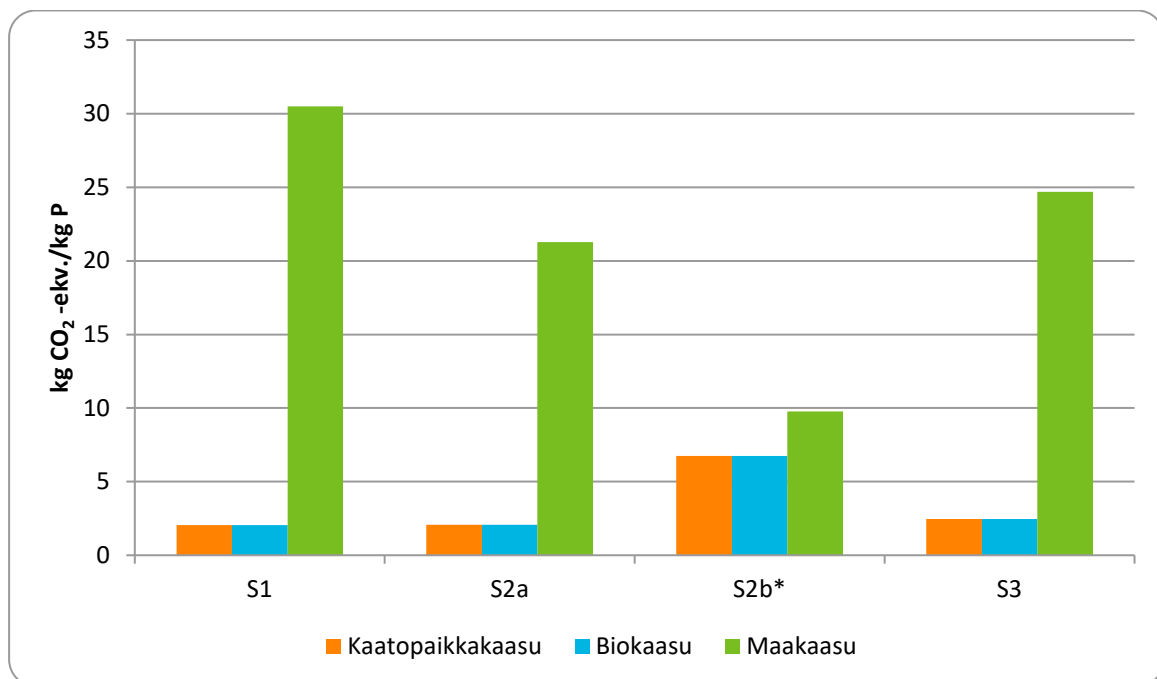
Ensimmäisessä herkkyystarkastelussa vertailtiin miten kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen päästöihin vaikuttaa se, jos lämmön lähteenä polttoprosessissa hyödynnettäisiinkin kaatopaikkakaasun sijasta biokaasua tai maakaasua (kuva 8). Skenaariossa 4 ei hyödynnetä lämpöenergiaa joten se on jätetty lämmöntuotannon herkkyystarkastelun ulkopuolelle.

Kasvihuonekaasupäästöt olivat odotetusti selvästi suurimmat tapauksessa, kun lämpö tuotettiin maakaasulla. Ketjuvaiheittain tarkasteltuna (Liite 1) havaittiin, että suurin päästölähde on kaasun poltto lämmöksi Demotehtaan kattilassa ja toiseksi suurimpana oli maakaasun valmistus ja siirto Venäjältä Suomeen. Suurimmat päästöt maakaasun osalta oli kuivatuotteella (30,5 kg CO₂-ekv./kg P), jonka valmistuksessa kulutettiin eniten lämpöä. Pienimmät päästöt maakaasun osalta oli skenaarion 2 raetuotteella (21,3 kg CO₂-ekv./kg P). Skenaarion 3 raetuotteen päästöt maakaasun osalta olivat hieman suuremmat (24,7 kg CO₂-ekv./kg P), vaikka skenaariossa oli sama lämmön kulutus kuin skenaariolla 2. Tämä johtui puolestaan siitä että skenaarion 3 prosessiketjussa oli enemmän muita päästöjä aiheuttavia vaiheita kuin skenaariolla 2. Tarkasteltaessa kuivatuotteiden valmistusketjuja yleisesti, maakaasun

käyttö (valmistus, siirto ja poltto) olisi niissä suurin päästölähde, ohittaen sähkönkulutuksen, joka oli suurin päästölähde kaatopaikkakaasua käytettäessä.

Kaatopaikka- ja biokaasun käytön päästöissä ei ollut eroja, johtuen niiden päästölaskennan samanlaisista rajauksista ja oletuksista tässä hankkeessa: molemmat nähdään biogeenisinä kaasuina, kaatopaikka- ja biokaasun valmistus tapahtuu Demotehtaan energian kysynnästä huolimatta ja metaanihiivityksiä kaatopaikkakaasun keräyksestä ei lasketa Demotehtaan hyväksi. Kaatopaikka- ja biokaasu tulevat molemmat Demotehtaan vierestä putkea pitkin, joten siirron päästöjä ei ole huomioitu, eikä lämpökattilaa varten tarvita myöskään metaanipitoisuuden nostoa. Sekä kaatopaikka- että biokaasun polttoon sovellettiin IPCC:n oletusarvoa biokaasun polton CH₄- ja N₂O-päästöistä (0,1 g CO₂-ekv./MJ).

Myös ammoniumsulfaatin valmistuksessa (S2b, kuva 8) maakaasu lämmönlähteenä aiheutti suurimmat kasvihuonekaasupäästöt. Kaatopaikka- tai biokaasulla päästöt olivat kuivien tuotteiden tapaan keskenään samat. Ammoniumsulfaatin jalostusprosessissa päästöerot maakaasun ja muiden kaasujen välillä ei ollut niin suuri johtuen pienemmästä lämmön kulutuksesta.



Kuva 8. Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjun päästöt lopputuotteen fosforikiloa kohden (*ammoniumsulfaatin päästöt tyypikiloa kohden), kun lämmön lähteenä kaatopaikkakaasu, biokaasu tai maakaasu.

3.4.2. Kuljetusetäisyydet

Herkkyystarkastelussa vertailtiin myös sitä, mikä vaikutus kierrätyslannoitevalmisteiden kuljetusetäisyyden kasvattamisella on peltokäyttökettujen päästöihin. Varastosta maatilalle valitun etäisyyden, 20 km, ohelle laskettiin päästöt 50 km ja 150 km kuljetusetäisyyksille. On myös hyvä huomioida, että kuljetusosion päästöihin vaikuttavat myös kuormaukset kuljetuksiin sekä kuljetukset tilalta pellolle (5 km). Odotetusti kuljetusten päästöt kasvoivat, kun etäisyydetkin kasvoivat (taulukko 14). Päästöt eivät kuitenkaan kasvaneet lineaarisesti etäisyyksien pidentyessä, sillä kuljetusosion päästöihin vaikuttivat myös muut tekijät, kuten edellä onkin selitetty. Kuljetusten päästöosuudet kasvoivat huomattavan suuriksi skenaarioiden 3 ja 4 raeuotteilla, koska ne sisälsivät vähemmän fosforia ja niitä jouduttiin kuljettamaan useampi erä varastosta tilalle.

Taulukko 14. Kierrätyslannoitevalmisteiden kuljetusten päästöt kuljetusetäisyyksillä 20km, 50km ja 150km ja etäisyyksien vaikutus peltokäyttöketjun kokonaispäästöihin.

Skenaario	Lannoitevalmiste	varastosta tilalle kuljetuksen päästö (kg CO ₂ -ekv./kg P)			Osuus peltokäyttöketjun päästöistä (%) (suluissa peltokäyttöketjun päästöt, kg CO ₂ -ekv.)		
		20 km	50 km	150 km	20 km	50 km	150 km
S1	kuivatuote	0,126	0,186	0,386	2 % (5,19)	4 % (5,25)	7 % (5,45)
S2a	raetuote	0,191	0,282	0,585	4 % (5,31)	5 % (5,40)	10 % (5,70)
S2b	ammoniumsulfaatti	0,053*	0,078*	0,161*	1 % (5,86)	1 % (5,89)	3 % (5,97)
S3	raetuote	0,282	0,416	0,863	10 % (2,75)	14 % (2,88)	26 % (3,33)
S4	raetuote	0,412	0,608	1,261	44 % (0,93)	54 % (1,13)	71 % (1,78)

* kg CO₂-ekv./kg N

3.5. Hiilen sitoutuminen maaperään

Orgaanisia lannoitevalmisteita käytettäessä pystytään palauttamaan peltoon myös hiiltä, mikä on tärkeää hiilivarastojen kasvattamisessa ilmastonmuutoksen torjumiseksi. Tällä hetkellä yksivuotisten kasvien viljelyssä maaperästämme vapautuu hiiltä koko ajan, mutta kierrätyslannoitevalmisteiden mukana maahan palautettu hiili kompensoisi tuota maaperän hiilen vapautumista. Maaperän hiilivarastojen muutosten, eli hiilen sitoutumisen ja vapautumisen laskenta, on kuitenkin vasta alkumetreillään systeemissä tuotekohtaisissa laskennoissa. Tässä hankkeessa päädyimme siksi kokeilemaan karkean tason arviointia kierrätyslannoitevalmisteiden hiilensidontapotentiaalista. Karkea arviointi tehtiin soveltamalla Reginan ja Heikkisen (2019) maanparannusaineiden hiilitasevaikutuksen mallinnusta, jossa tarkasteltiin mm. naudnan lietalantaa ja lietalantaperäistä mädätettä. Suurin osa maahan lisäystä orgaanisesta aineksesta hajoaa nopeasti, mutta biomassan käsittely, esimerkiksi mädättämällä ja pyrolysoimalla hidastaa aineksen hajoamista (Regina & Heikkinen 2019). Myös Demotehdas-hankkeessa tarkasteltavista kierrätyslannoitevalmisteista osa on mädättepohjaisia (vain yksi on suoraan rakeistettu puhdistamolietteestä). Skenaariossa 2 tuotettu ammoniumsulfaatti jätettiin tarkastelun ulkopuolella, koska se ei sisällä hiiltä.

Reginan ja Heikkisen (2019) mukaisessa mallinnuksessa mädätteen hiilimäärästä on vuoden kuluttua peltolevityksestä maaperässä jäljellä 75 % (laskettuna materiaalin kuiva-ainetta kohti). Hiiltä vapautuu kuitenkin edelleen myös seuraavien vuosien aikana, jolloin 10 vuoden kuluttua maaperässä on jäljellä mädätteen alkuperäisestä hiilimäärästä n. 30–35 % (Regina, Heikkinen & Luostarinen 2018). Demotehdas-hankkeen kierrätyslannoitteiden tapauksessa esitämme varovaisen arvion edellä esitettyjen mallinnusten pohjalta (taulukot 15 ja 16). Ensimmäisen vuoden aikaiselle hiilen sitoutumiselle käytettiin vaihteluväliä 70–80 %, joka on siis osuus, mikä lannoitteen sisältämästä hiilestä on tallella maassa vuoden kuluttua. Pidemmällä aikavälillä, eli 10 vuoden jälkeen maaperässä arvioitiin olevan jäljellä noin 30–35 % kierrätyslannoitevalmisteen alkuperäisestä hiilimäärästä. Vaikka malli perustuu mädätetyllä naudnan lietalannalla tehtyihin kokeisiin, voidaan mädäte- ja puhdistamolietepohjaisten tuotteiden kemiallisen laadun perusteella päätellä niiden hajoavan maaperässä samalla tai hitaammalla nopeudella kun testissä käytetyn naudnan lannan (Heikkinen ym. käsikirjoitus 2020). Taulukossa 15 on esitettyinä

Demotehtaan tuotteiden hiilipitoisuudet tonnia lannoitevalmisteen kuiva-ainetta kohti sekä kyseisestä lannoitevalmistemäärästä maaperään vuodessa ja 10 vuodessa jäävät hiilimäärät.

Taulukko 15. Hiilen määrät tonnissa kierrätyslannoitevalmisteen kuiva-ainetta sekä kyseisistä lannoitemääristä maaperään jäänyt hiilimäärä yhden ja 10 vuoden jälkeen.

Skenaario ja lannoitevalmiste	Lannoitevalmisteen hiili-pitoisuus (kg C/t TS)	Lannoitevalmisteesta peräisin olevasta hiilestä jäljellä maaperässä 1 v jälkeen 70–80 % (kg C)	Lannoitevalmisteesta peräisin olevasta hiilestä jäljellä maaperässä 10 v jälkeen 30–35 % (kg C)
S1, kuivatuote	317	222–253	95–111
S2, raetuote	299	209–239	90–105
S3, raetuote	107	75–85	32–37
S4, raetuote	48	34–39	14–17

TS, kuiva-aine

Vaikutuksia maaperän hiilivarastoon arvioitiin myös hehtaarikohtaisesti, ja laskennassa käytettiin samoja lannoitusmääriä kuin ilmastovaikutusten arvioinnissa. Hankkeessa tarkasteltuja kierrätyslannoitevalmisteita pidettiin fosforilannoitteina ja niiden levitykseen sovellettiin 5 vuoden fosforitasausjaksoa. Näin ollen myös lannoitevalmisteiden mukana tulevat hiilimäärät on laskettu 5 vuoden tasausjakson käytön mukaisesti. Lisäksi arviossa on selkeyden vuoksi mukana vain yhden lannoituskerran vaikutukset. 10 vuoden aikana maaperään olisi lisätty jo toinenkin lannoite-erä, jota ei tarkastelussa (taulukot 15 ja 16) kuitenkaan otettu huomioon.

Hiiltä vapautuu luonnollisesti kivennäismailta 220 kg/ha vuodessa (Heikkinen ym. 2013) eli 5 vuoden aikana yhteensä 1100 kg/ha ja 10 vuoden aikana 2200 kg/ha. Kuten hehtaarikohtaisia hiilimääriä esittelevästä taulukosta 16 nähdään, skenaarioiden 1 ja 2 kierrätyslannoitevalmisteissa oli muita tuotteita korkeammat hiilipitoisuudet, joten myös maaperässä pysyvä hiilimäärä on suurempi. Tuhkaa sisältävän raetuotteen (S3) ja puhdistamolietteestä valmistetun raetuotteen (S4) hiilipitoisuudet olivat pienemmät, joten maaperäänkin sitoutunut hiilen määrä oli pienempi.

Kierrätyslannoitevalmisteiden hiilen hehtaarikohtainen sitoutuminen kompensoi osittain hiilen luonnollista vapautumista maaperästä. Ensimmäisen vuoden jälkeen maaperässä on skenaarioiden 1 ja 2 kierrätyslannoitevalmisteistä jäljellä enemmän hiiltä (370–456 kg/ha) kuin vuosittainen vapautuva hiilimäärä (220 kg/ha) ja skenaarion 3 kierrätyslannoitevalmisteesta hiiltä on jäljellä noin vuosittaisen vapautumista vastaava määrä (210–240 kg/ha). Puhdistamolietteestä valmistetun raetuotteen (S4) hiilipitoisuus oli pieni, joten maaperäänkin sitoutunut hiilen määrä oli pienempi kuin muilla ja pienempi kuin vuosittainen luonnollisesti maaperästä vapautuva määrä. On kuitenkin huomattava, että kierrätyslannoitevalmisteiden levitykseen sovellettiin 5 vuoden tasausjaksoa, eli hiiltä sisältävää kierrätyslannoitevalmistetta ei lisätty vuosittain. Näin ollen pidemmällä 10 vuoden tarkastelujaksolla luonnollinen hiilen vapautumisen määrä (2200 kg/ha) ylittää arvioidun kierrätyslannoitteista maaperään jääneen hiilimäärän (75–200 kg/ha) selvästi. Joka tapauksessa kierrätyslannoitevalmisteiden käytöllä hiiltä saadaan tuotua takaisin maaperään, vaikka fosforilannoituksen tasoitusjakson, eli viiden vuoden aikaista vapautumista ei pystytäkään kokonaan kompensoimaan.

Taulukko 16. Kierrätyslannoitevalmisteiden hiilipitoisuudet, levitettävät hehtaarikohtaiset hiilimäärät sekä maaperään jäävät hiilimäärät.

Skenaario ja lannoite-valmiste	Lannoitevalmi steen hiilipitoisuus (kg C/t)	Levitettävä hiilimäärä (kg C/ha/5 v jakso)	Lannoitevalmis-teesta peräisin olevasta hiilestä jäljellä maaperässä 1 v jälkeen 70–80 % (kg C/ha)	Lannoitevalmis-teesta peräisin olevasta hiilestä jäljellä maaperässä 10 v jälkeen 30–35 % (kg C/ha)
S1, kuivatuote	306	570	399–456	171–200
S2, raetuote	187	528	370–422	158–185
S3, raetuote	72	301	210–240	90–105
S4, raetuote	41	251	176–201	75–88

4. Pohdinta ja mahdolliset tuloksiin vaikuttavat tekijät

Tässä tutkimuksessa arvioitiin fosforilannoitteina käytettävien kierrätyslannoitevalmisteiden ilmasto-vaikutuksia ja niitä verrattiin mineraalilannoitteisiin. Arvioinnissa käytiin läpi kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjujen kasvihuonekaasupäästöt sekä lopputuotteiden lannoituskäytön päästövaikutukset. Arvioinnin pohjana käytettiin Demonstraatiolaitoksen koeajoista saatua mittausdataa, mutta myös lukuisia oletuksia vaadittiin arvioinnin soveltamisessa vuositason tasolle.

Valmistusketjun päästöjä tarkasteltaessa havaittiin, että kaikkien kiinteiden kierrätyslannoitevalmisteiden päästöt olivat pienemmät kuin vastaavien mineraalilannoitteiden. Tämä johtuu muun muassa siitä, että kierrätysraaka-aineiden, eli mädätteen, puhdistamolietteen ja tuhkan valmistus ja niiden päästöt päätettiin jättää systeemirajauksen ulkopuolelle, kun taas mineraalilannoitteiden päästöjen laskennassa huomioidaan raaka-aineiden eli ravinteiden valmistuksen päästöt. Kierrätysraaka-aineiden muodostuminen nähtiin tapahtuvan Demotehtaasta huolimatta eli niiden valmistus oli riippumaton Demotehtaan kysynnästä. Mikäli kierrätysraaka-aineiden valmistuksen päästöt rajattaisiinkin systeemin sisäpuolelle, niin on hyvä huomioida, että mädätteen valmistus biokaasuprosessissa on pääsääntöisesti nähty nollapäästöisenä, sillä mädätysprosessin päästöt on kohdistettu RES-direktiivin mukaisesti päätuotteelle eli biokaasulle. Käytetyillä kierrätysraaka-aineilla sivutuotteena/jätteenä ei ole myöskään vielä taloudellista arvoa markkinoilla, ja näin ollen raaka-aineiden valmistuksen päästöt on kohdistettu päätuotteelle (esim. mädätysprosessin päästöt biokaasulle). Mikäli kuitenkin näille raaka-aineille muodostuisi myöhemmin sellaista taloudellista arvoa siten, että muut yritykset olisivat niistä valmiita maksamaan, pitäisi kierrätyslannoitevalmisteiden ympäristövaikutuslaskennat mahdollisesti päivittää, eli raaka-aineiden valmistuksen päästöjä kohdistettaisiin myös Demotehtaassa hyödynnetylle sivutuotteelle (esim. mädätteelle) eikä pelkästään päätuotteelle (esim. biokaasulle). Systeemirajauksen ulkopuolelle jätettiin nyt myös mädätteen separointi kuiva- ja nestejakeeksi, mutta separoinnin päästöt ovat melko vähäiset verrattuna muihin kierrätyslannoitteen ketjuvaiheisiin (Marttinen 2015). Myös mädätteen ja puhdistamolietteen katetussa tilassa varastoinnit nähtiin nollapäästöisinä. Toki hyödyntämättä jättäminen voi lisätä pitkän, erityisesti katteettoman varastoinnin tai jopa varastoimatta jättämisen myötä päästöjä, mutta niiden mukaisia päästövähennyksiä ei tässä tutkimuksessa huomioitu.

Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjun päästöjä laski myös kaatopaikka- ja biokaasun käyttö lämmön lähteenä. Sekä kaatopaikka- että biokaasun valmistuksen päästöt rajattiin systeemirajauksen ulkopuolelle päästölaskennassa, sillä niiden valmistus kaatopaikalla ja biokaasulaitoksella nähtiin olevan riippumaton Demotehtaan lämmön kysynnästä. Kaatopaikkakaasun muodostumisen päästöt olisi hyvä kuitenkin arvioida tarkemmin tulevaisuudessa, ja siinä tapauksessa päästöihin tulisi laskea vain kaasun keräyksen sähkönkulutus ja metaanipäästöt kaatopaikalta ilmakehään, sillä kaatopaikkakaasun on biogeeninen kaasu. Oletuksena kuitenkin on, että kaatopaikkakaasun keräyksen sähkötulutus sekä metaanipäästöt/metaanihyvitykset olisivat todennäköisesti merkitykseltään hyvin pieniä. Mikäli lämpö tuotettaisiin Demotehtaassa maakaasulla, kierrätyslannoitteiden valmistusketjun päästöt olisivat huomattavasti suuremmat ja jopa suuremmat kuin referenssimineraalilannoitteilla. Tämä johtui siitä että maakaasun tuotannon nähtiin olevan puhtaasti energian kysyntään perustuvaa, ja siten sen tuotannon päästöt sisällytettiin laskentaan mukaan.

Jos lämmön lähteenä hyödynnettiin kaatopaikka- tai biokaasua, olivat suurimmat päästölähteet kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen ajalta kuivaus- ja rakeistusprosessien sähkön kulutukset. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että sähkön oletettiin olevan suomalaista keskimääräistä sähköä ja keskimääräinen sähkö tuotetaan osittain fossiilisista raaka-aineista. Sähkön osuus voisi olla paljon pienempi jos sähkön lähteenä käytettäisiin suurimmaksi osaksi esim. uusiutuvaa energiaa.

Mädätteen nestejakeesta valmistetun ammoniumsulfaatin valmistuksen päästöt olivat referenssilannoitetta suuremmat. Nestemäisen kierrätyslannoitevalmisteen jalostuksen päästöistä suurin osa aiheutui käytetyistä kemikaaleista, ja strippaus- ja pesuprosessia voisikin kehittää esimerkiksi etsimällä pH:n säätökemikaaleiksi ja vastaanottoliuoksiksi kierrätettyjä ja jäteperäisiä yhdisteitä. Tämän tutkimuksen myötä ei kuitenkaan pystytä sanomaan, onko nestejakeen jatkojalostaminen ammoniumsulfaattiksi ilmastonäkökulmasta kannattavampaa kuin nestejakeen hyödyntämättä jättäminen koska arviossa ei huomioitu nestejakeen hyödyntämättä jättämisen ilmastovaikutuksia. Nestejakeetta syntyy separoinnissa kuivajakeen ohella huolimatta siitä jalostetaanko nesteestä ammoniumsulfaattia vai ei. Tässä hankkeessa mädätteen neste- ja kuivajakeen jalostusketjujen päästöjä on tarkasteltu erikseen ja niiden päästöt on kohdistettu omille eri toiminnallisille yksiköilleen. On kuitenkin hyvä tiedostaa, että raetuote ja ammoniumsulfaatti tuotettiin samasta jättepohjaisesta raaka-aineesta eli mädätteestä, ja kiertotalousnäkökulmasta molempien jakeiden hyödyntäminen voi olla ympäristön kannalta kannattavampaa kuin erikseen valmistettavat mineraalilannoitteiden (fosforilannoite ja ammoniumsulfaatti) valmistus.

Myös peltokäytön osalta lähes kaikki tarkastellut kierrätyslannoitevalmisteet olivat ilmastovaikutuksiltaan pienemmät kuin mineraalilannoitteet. Tässä ilmenee kierrätyslannoitteiden jatkojalostuksen merkitys, koska peltokäytön päästöt voivat jalostamattomilla, vesipitoisilla sivuvirroilla (esim. mädäte ja mädätteen neste- ja kuivajae sellaisenaan) olla vastaavia mineraalilannoitteita korkeammat. Esimerkiksi käsittelemättömällä mädätteellä peltokäytön päästöjen on todettu olevan jopa hieman suuremmat kuin mineraalilannoitteella johtuen mineraalilannoitteen korkeammasta ravinnepitoisuudesta (Timonen ym. 2019). Kierrätyslannoitteiden jalostuksessa pyritäänkin ravinteiden konsentroidiin ja tuotteiden vesipitoisuuden pienentämiseen, jolloin säästetään kuljetuskerroissa ja saadaan ravinteet sijoitettua tehokkaammin laajemmalle alueelle. Ainoa kierrätyslannoitevalmiste, jonka peltokäyttökettujen päästöt olivat mineraalilannoitetta suuremmat, oli puhdistamolietepohjainen lannoite. Tämä johtuu mm. siitä, että mineraalifosforilannoite ei sisällä ollenkaan typpeä ja muodostaa siten pienemmät N₂O-päästöt pellolta.

Suurimmat päästölähteet peltokäyttökettussa olivat suorat ja epäsuorat N₂O-päästöt pellolta. Ainoastaan edellä mainittu puhdistamolietteestä valmistettu raetuote sisälsi niin vähän typpeä, että sen N₂O-päästöt olivat pienemmät kuin kuljetusten ja levityksen aikaiset päästöt. On kuitenkin huomattava, että kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäytöstä aiheutuvat N₂O-päästöt ovat arvioitu käyttämällä kuivikelannan (ammoniumsulfaatilla virtsan) päästökertoimia, koska kierrätyslannoitevalmisteille ei ole olemassa omia laskentamalleja tai päästökertoimia. Omat päästökertoimet mädätteelle ja siitä jatkojalostetuille jakeille voisivat siten muuttaa peltokäytön päästöjä jopa optimaalisempaan suuntaan. Mittauksia tulisikin jatkossa tehdä mm. käsittelyjäännöksen ja siitä erotettujen jakeiden peltokäytöstä aiheutuvista päästöistä, minkä avulla näille voitaisiin määrittää omat päästökertoimet. Mineraalilannoitteiden päästöt perustuivat puolestaan väkilannoitteen omaan IPCC päästökertoimeen.

Myös levityksen aikaisten päästöjen arviointi perustuen työkoneiden hehtaarikohtaiseen polttoainekulutukseen tehtiin kuivalannan levityksen hehtaarikohtaisen polttoainekulutustietoja/-arvioita käyttäen. Prosessoidut kierrätyslannoitevalmisteet ovat kuitenkin konsentroidumpia ravinteiden suhteen kuin lanta, joten levityksen päästöjen arviointi vaatii tulevaisuudessa lisäselvitystä ja mahdollisesti omat polttoainekulutuserviot kierrätyslannoitevalmisteille.

Mikäli kierrätyslannoitevalmisteiden mukana peltomaan maaperään sitoutuva hiili otettaisiin mukaan kestävyystarkasteluun, kasvaisi ero entisestään uusien kierrätyslannoitevalmisteiden eduksi. Tulosten mukaan kierrätyslannoitevalmisteen mukana maahan lisättävä ja sitoutuva hiili kompensoisi jonkin verran, joskaan ei täysin, maaperän hiilen vapautumista. Mineraalilannoitteilla ei kuitenkaan voida kompensoida hiilen vapautumista ollenkaan, sillä mineraalilannoitteet eivät sisällä hiiltä. Aiempien tulosten mukaan orgaanisten massojen prosessoinnit, esim. mädätys parantavat myös jäljelle jäävän

hiilen pysyvyyttä maassa. Epävarmuutta Reginan & Heikkisen (2019) mallin soveltuvuuteen tämän hankkeen lannoitevalmisteille tuo se, että mallin arviot perustuvat mädätteen hiilen sidontaan, kun taas tässä hankkeessa tarkastellaan mädätteestä ja puhdistamolietteestä jatkojalostettuja lannoitevalmisteita. Myös orgaanisten materiaalien alkuperässä oli eroa; mallin mädäte oli naudanlantaperäistä, kun taas Demotehtaan kierrätyslannoitevalmisteiden raaka-aineena oli puhdistamolietettä, biojätettä ja elintarviketeollisuuden sivuvirtoja. Tarkastelussamme kuivauksen ja rakeistuksen ei oletettu muuttavan lannoitevalmisteiden hajoamisnopeutta, koska käsittelylämpötilat olivat matalia ja siten kierrätyslannoitevalmisteiden hiilen sitoutumisen maaperään oletettiin olevan samaa tasoa kuin pelkän mädätteenkin. Mikäli prosessoitu kierrätyslannoitevalmiste käsittelyn myötä hajoaakin hitaammin kuin raaka-aineena hyödynnetty mädäte, voi hiilen sitoutuminen maaperään olla myös voimakkaampaa.

Korvaaviksi mineraalilannoitteiksi valittiin tuotteet, jotka vastasivat ravinnesuhteiltaan mahdollisimman hyvin kierrätyslannoitevalmisteita, mutta siltikään kierrätyslannoitevalmisteiden N-P-K suhteet ja pitoisuudet eivät ole täysin samaa luokkaa referensseinä toimivien mineraalilannoitteiden kanssa. Sellaisia ravinnesuhteiltaan sopivia korvattavia mineraalilannoitteita, joille oli saatavilla myös luotettava ilmastovaikutustieto fosforikiloa kohden, löytyi vähän. Iso osa kirjallisuudesta löytyneistä mineraalilannoitteiden ilmastovaikutusten tiedoista oli melko vanhaa ja päästölukujen vaihtelut olivat suuria. Koska kirjallisuuden tiedot olivat niukat, käytettiin tarkastelussa mahdollisuuksien mukaan myös Yaran lannoitteilleen laskemia ilmastovaikutustietoja.

Kierrätyslannoitevalmisteiden keskinäisessä vertailussa tulee olla hieman varovainen, koska niiden ravinnesuhteet ja -pitoisuudet vaihtelevat keskenään ja osa kierrätyslannoitteista sisältää myös muita ravinteita fosforin lisäksi. Skenaarioiden 1 ja 2 lopputuotteessa on huomattavasti enemmän typpeä ja fosforia kuin skenaarioiden 3 ja 4 lopputuotteissa. Samaten typen ja fosforin suhdeluvut ovat samaa luokkaa skenaarioiden 1 ja 2 lopputuotteissa, kun puolestaan skenaarioiden 3 ja 4 lopputuotteissa typen määrä suhteessa fosforiin on erittäin pieni. Typpeä sisältävät lannoitevalmisteet korvaavat osaksi typen mineraalilannoitustarvetta, mutta typpipitoisuus vaikuttaa mm. erityisesti lannoitetuotteiden peltokäytön N_2O -päästöihin. Skenaarioiden 3 ja 4 raetuohteissa on puolestaan PK-lannoitteen mahdollisuuksia, sillä niissä on muita lopputuotteita korkeammat kaliumpitoisuudet. Käytännössä eri kierrätyslannoitevalmisteita tulee siis täydentää sopivassa suhteessa, mutta toisiinsa nähden erillä tavalla N- tai NK-lannoitteilla, joilla on puolestaan omat päästönsä. Lisäksi on huomioitava, että ammoniumsulfaattia ei voi verrata muihin kierrätyslannoitevalmisteisiin, sillä niillä on erilainen toiminnallinen yksikkö; ammoniumsulfaatin päästöt kohdistettiin tuotetuille typpimäärälle eli per kg N.

Kaikkien kierrätyslannoitevalmisteiden, ammoniumsulfaattia lukuun ottamatta, katsottiin rinnastuvan fosforilannoitteisiin, eli niillä korvataan pääasiassa fosforin osuutta mineraalilannoitteissa. Koska päästöjä tarkastellaan per kg P, voidaan samalla arvioida myös tuotannon ja peltokäytön ympäristötehokkuutta. Jalostusprosessilla voi olla esim. suhteellisen alhaiset vuosipäästöt verrattuna toisiin prosessivaihtoehtoihin, mutta mikäli fosforin tuotanto on erittäin pientä, voivat päästöt per tuotettu fosforikilousta yllättävän suureksi.

Kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusprosessien ravinne-, ja etenkin typpitaseessa havaittiin olevan epätarkkuutta, mikä tuo epävarmuutta tarkasteluun ja tarvetta ravinnetaseiden tarkennukseen jatkossa. Ilmastovaikutusten arvioinnin pohjana käytettiin Demotehtaalla tehtyjen koeajojen tuloksia ja niiden pohjalta laadittuja ravinnetaseita. Syitä taseen epätasaisuuteen ovat luultavasti epähomogeenisen materiaaliin haastava näytteenotto ja sitä myötä näytteiden edustavuus sekä se, että pääprosessien (kuivaus ja rakeistus) poistoilmasta ei analysoitu ammoniakkipitoisuutta. Oletus on, että typpeä haihtuu ammoniakkinä etenkin pH:n noustessa tuhkalisyksen myötä. Molempien hypoteesien testaus vaatii siis näytteenoton ja analysoinnin lisäämistä. Ilmastovaikutusten ja taloudellisuudenkin kannalta tulevaisuudessa on tarve tarkentaa valmistusprosessin typpitasetta, ja edelleen typen talteenottoa, jotta ravinteet pystyttäisiin hyödyntämään entistä tehokkaammin. Typen lisäksi fosforia

sisältävien kierrätyslannoitteiden ilmastovaikutusten ohella olisi hyvä tulevaisuudessa arvioida myös kierrätyslannoitteiden rehevöittäviä sekä happamoittavia päästöjä. Tämän lisäksi ympäristövaikutuksia olisi hyvä arvioida peltokäytön lisäksi myös metsäkäytössä.

5. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että lähes kaikkien kierrätyslannoitevalmisteiden valmistusketjujen päästöt olivat alhaisemmat kuin vastaavan mineraalilannoitteen valmistuksen päästöt. Ainoastaan mädätteen nestejakeesta jalostetun ammoniumsulfaatin valmistuksen päästöt olivat suuremmat kuin vastaavan mineraalilannoitteen johtuen hyödynnettävien kemikaalien suurista päästöistä. Kiinteillä kierrätyslannoitevalmisteilla, eli kuivatuilla ja/tai rakeistetuilla tuotteilla valmistuksen päästöt olivat referenssimineraalilannoitteita pienemmät. Kierrätyslannoitteiden valmistuksen päästöjä laskee mm. se, että raaka-aineiden ravinteet ovat kierrätettyjä ja niiden päästöt jätteinä nollapäästöisiä.

Suurin päästöjen aiheuttaja valmistusketjuissa oli sähkön kulutus; sähköä kulutettiin eniten mädätepohjaisen raetuohteen kuivauksessa ja rakeistusprosessissa. Toiseksi suurimpana päästölähteenä oli kuivausprosessiin käytetyn lämpöenergian tuotto biogeenisestä kaatopaikkakaasusta tai biokaasusta. Mikäli kaatopaikkakaasun sijaan käytettäisiin maakaasua, olisi maakaasulla tuotettavan lämmön ilmastovaikutus huomattavasti suurempi kuin sähkön kulutuksen ilmastovaikutus, ja maakaasun käyttö nostaisi kokonaisuudessaan kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksen päästöt suuremmiksi kuin mineraalilannoitteiden valmistuksen päästöt.

Sekä kierrätys- että mineraalilannoitteen tapauksissa peltokäytön päästöt olivat suuremmat kuin valmistusvaiheen päästöt. Kokonaisketjussa suurimmat päästöjen aiheuttajat olivat peltokäytön aikaiset suorat ja epäsuorat N_2O -päästöt. Kuten valmistusketjussakin, myös peltokäytön osalta lähes kaikkien kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäytön päästöt olivat alhaisemmat kuin vastaavien mineraalilannoitteiden päästöt. Peltokäytön osalta ainoastaan puhdistamolietteestä valmistetun raetuohteen päästöt olivat hieman korkeammat kuin referenssiksi valitun fosforilannoitteen päästöt johtuen raetuohteen suuremmista typpimääristä. Kierrätyslannoitteiden peltokäytön päästöjä laskee niiden hieman pienemmät N_2O -päästöt pellolla, mikä johtuu pienemmistä typpimääristä ja käytettävistä epäsuorien N_2O -päästöjen kertoimista. Kuivattujen ja/tai rakeistettujen kierrätyslannoitevalmisteiden päästöt on laskettu kuivalannan päästökertoimilla, sillä mädätejäännökselle, puhdistamolietteelle ja niistä jalostetuille lannoitetuotteille ei tiettävästi ole olemassa omia päästökertoimia.

Päästölaskelmien ohella on myös oleellista huomioida, että kierrätyslannoitevalmisteissa on usein mukana hiiltä, toisin kuin mineraalilannoitteissa. Kierrätyslannoitteiden hiili parantaa maaperän hiilivastojen tilannetta palauttamalla hiiltä takaisin maaperään ja kompensoimalla osittain vuosittaista hiilen vapautumista maaperästä.

Kierrätyslannoitteiden ympäristövaikutusten ei voi suoraan verrata keskenään, koska tuotteet sisälsivät hyvin eri suhteissa ravinteita, mikä vaikuttaa ravinteiden loppukäyttöön ja tarvittavaan täydennyslannoitukseen. Ravinnemäärät vaikuttavat myös voimakkaasti peltokäytön päästöihin. Alhaisin ilmastovaikutus jalostusprosessin ajalta oli puhdistamolietteestä valmistetulla raetuohteella ja suurin mädätepohjaisella raetuohteella, joka sisälsi tuhkaa. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että jälkimmäinen skenaario sisälsi eniten ketjuvaiheita, ja näin ollen vuositason kokonaispäästöt suhteessa tuotettuun fosforimäärään olivat suurimmat ($kg\ CO_2\text{-ekv.}/kg\ P$). Puhdistamolietteestä valmistettu raetuohte sisälsi vain rakeistusvaiheen jonka sähkön kulutus oli pieni ja lämmön tarvetta ei ollut ollenkaan. Ammoniumsulfaattia ei myöskään voi verrata muihin kierrätyslannoitteisiin, koska sillä on erilainen toiminnallinen yksikkö: ammoniumsulfaatin päästöt kohdistettiin tuotetulle typpimäärälle, kun taas muiden kierrätyslannoitteiden päästöt kohdistettiin tuotetulle fosforimäärälle.

Viitteet

- Bauermeister, U., Wild, A. & Meier, T. 2010. Stickstoffabtrennung mit dem ANAStrip – Verfahren System GNS. Gulzower Fachgespräch Garrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzungs- Stand and F&E Bedarf.
- EC 2009. Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>
- Envor, 2014. Ammoniumsulfaatin tuoteseloste. Viitattu 5.11.2019. Saatavissa: <https://envor.fi/wp-content/uploads/2017/06/Ammoniumsulfaatti-Tuoteseloste-ID-72.pdf>
- Gasum 2015. Venäjältä tuodun maakaasun toimitusketjun ympäristövaikutukset. Saatavissa: <https://www.gasum.com/globalassets/pdf-files/gasum-venajalta-suomeen-tuodun-maakaasun-toimitusketjun-ymparistovaikutukset-2015.pdf>
- Grönroos, J., & Voutilainen, P. 2001. Maatalouden tuotantotavat ja ympäristö. Inventaarioanalyysin tulokset. Suomen ympäristökeskus, Helsinki
- Grönroos, J., Mattila, P., Regina, K., Nousiainen, J., Perälä, P., Saarinen, K. & Mikkola-Pusa, J. 2009. Development of the ammonia emission inventory in Finland. Revised model for agriculture. The Finnish Environment 8/2009. 60 s.
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology* (2013) 19, 1456–1469, doi: 10.1111/gcb.12137
- Heikkinen J., Ketoja E., Seppänen J., Luostarinen S., Fritze H., Pennanen T., Peltoniemi K., Velmala S., Hanajik P., Regina K. Chemical quality determines decomposition of organic amendments in agricultural soils. Manuscript in preparation.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006a. ISO 14040. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. International Organization for Standardization, Brussels.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006b. ISO 14044. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Brussels.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan. Saatavissa: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf
- LIPASTO yksikköpäästöt -tietokanta 2017. Työkoneiden keskimääräinen päästö ja energia polttoainelitraa kohden Suomessa vuonna 2016. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet_litra.htm
- Mikkola, H. & Ahokas, J. 2009. Energy ratios in Finnish agricultural production. *Agricultural and Food Science*, 18: 332–346.
- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J., Manninen, K., 2015. Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin. Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. 67 s.
- Posio, M. 2010. Kotieläintilojen energiankulutus. Pro gradu -tutkielma. Maataloustieteiden laitos. 12.5.2010. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/17573/Gradu%2020.8.2010.pdf?sequence=1>
- Regina, K. & Heikkinen, J. 2019. Toimintasuosituksien - Eloperäiset aineet ja maan hiilivarasto. Maanparannusaineiden hiilitasevaikutuksen mallinnus (MAHTAVA) -hanke Policy brief. 3 s.
- Regina, K., Heikkinen, J. & Luostarinen, S. 2018. Maanparannusaineiden hiilitasevaikutuksen mallinnus (MAHTAVA). Powerpoint-esitys. MATO-tutkimusohjelman vuosiseminaari 7.2.2018. Saatavissa:

https://mmm.fi/documents/1410837/3476612/Regina_Mahtava_MATO_2018.pdf/5ce012ee-d944-48cf-9a1a-78191eec2970/Regina_Mahtava_MATO_2018.pdf

- Skowronska, M. & Filipek, T. 2014. Life cycle assessment of fertilizers: a review. *International Agrophysics*, 28: 101–110
- Timonen, K., Sinkko, T., Luostarinen, S., Tampio, E. & Joensuu, K. 2019. LCA of anaerobic digestion: emission allocation for energy and digestate. *Journal of Cleaner Production*, 235: 1567–1579
- Williams, A., Audsley, E. & Sandars, D.L. 2010. Environmental burdens of producing bread wheat, oilseed rape and potatoes in England and Wales using simulation and system modelling. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15: 855–868
- Yara 2011. Lannoitedatat MTT:n perunatutkimukseen. Henkilökohtainen tiedonanto sähköpostitse.
- Zarebska, A., Romero Nieto, D., Christensen, K. V., Fjerbæk Sjøtoft, L. & Norddahl, B. 2015. Ammonium Fertilizers Production from Manure: A Critical Review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45:14, 1469–1521

Liite 1. Valmistusketjujen päästöt eriteltynä ketjuvaiheittain ja kohdistettuna fosforikilolle (kg P) ja ammoniumsulfaatin osalta lopputuotteen typpikilolle (kg N). Lisäksi vertailu lämmön lähteenä hyödynnettävän kaasun (kaatopaikka-, bio- ja maakaasun) vaikutuksista päästöihin.

Skenaario	Lopputuote	Kaasun lähde		Kuljetukset	Kuormaus	Kuivaus			Rakeistus	Strippaus				Kuormaus	Yhteensä
						Kuormaus laitteistoon	Kaasun tuotanto ja siirto	Poltto (Lämpö)		Sähkö	Sähkö	Kemikaalien valmistus	Sähkö		
S1	Kuivatuote	K	kg CO ₂ -ekv./kg P	--	0,02	0,00	0,05	1,98	--	--	--	--	--	0,005	2,04
		B	kg CO ₂ -ekv./kg P	--	0,02	0,00	0,05	1,98	--	--	--	--	--	0,005	2,04
		M	kg CO ₂ -ekv./kg P	--	0,02	3,58	24,92	1,98	--	--	--	--	--	0,005	30,50
S2	Raetuote	K	kg CO ₂ -ekv./kg P	--	0,02	0,00	0,03	1,89	0,13	--	--	--	--	0,007	2,08
		B	kg CO ₂ -ekv./kg P	--	0,02	0,00	0,03	1,89	0,13	--	--	--	--	0,007	2,08
		M	kg CO ₂ -ekv./kg P	--	0,02	2,41	16,81	1,89	0,13	--	--	--	--	0,007	21,27
	Ammoniumsulfaatti	K	kg CO ₂ -ekv./kg N	0,13	0,07	--	--	--	--	6,31	0,21	0,00	0,005	0,002	6,74
		B	kg CO ₂ -ekv./kg N	0,13	0,07	--	--	--	--	6,31	0,21	0,00	0,005	0,002	6,74
		M	kg CO ₂ -ekv./kg N	0,13	0,07	--	--	--	--	6,31	0,21	0,38	2,663	0,002	9,78
S3	Raetuote	K	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,01	0,02	0,00	0,04	2,19	0,19	--	--	--	--	0,01	2,46
		B	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,01	0,02	0,00	0,04	2,19	0,19	--	--	--	--	0,010	2,46
		M	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,01	0,02	2,80	19,46	2,19	0,19	--	--	--	--	0,010	24,68
S4	Raetuote	K	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,01	0,05	--	--	--	0,25	--	--	--	--	0,010	0,32
		B	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,01	0,05	--	--	--	0,25	--	--	--	--	0,010	0,32
		M	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,01	0,05	--	--	--	0,25	--	--	--	--	0,010	0,32

K= Kaatopaikkakaasu, B= Biokaasu, M= Maakaasu

Liite 2. Kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäyttökettujen päästöt kohdistettuna lopputuotteen fosforikilolle (kg P) ja ammoniumsulfaatin osalta lopputuotteen typpikilolle (kg N).

Skenaario	Lopputuote		Kuljetukset (sis. kuormaukset)	Levitys	N ₂ O -päästöt	Yhteensä
S1	kuivatuote	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,126	0,194	4,869	5,19
S2a	raetuote	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,191	0,194	4,928	5,31
S2b	ammoniumsulfaatti	kg CO ₂ -ekv./kg N	0,053	0,255	5,553	5,86
S3	raetuote	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,282	0,194	2,271	2,75
S4	raetuote	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,412	0,194	0,327	0,93
Mineraali-lannoite 1	NPK (11-11-21)	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,165	0,587	6,160	6,82
Mineraali-lannoite 2	Ammoniumsulfaatti, AS (21-0-0)	kg CO ₂ -ekv./kg N	0,086	0,103	6,160	6,35
Mineraali-lannoite 3	NPK (6-12-21)	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,150	0,587	3,076	3,82
Mineraali-lannoite 4	Fosforilannoite, SSP (0-20-0)	kg CO ₂ -ekv./kg P	0,090	0,117	0	0,21



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000