

Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismvaihtoehdot

– vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus

Susanna Horn, Ari-Matti Seppänen, Erika Winqvist,
Suvi Lehtoranta, Sari Luostarinen



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42 / 2020

Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismvaihtoehdot

– vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus

**Susanna Horn, Ari-Matti Seppänen, Erika Winquist,
Suvi Lehtoranta, Sari Luostarinen**



Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42 | 2020

Suomen ympäristökeskus
Kulutuksen ja tuotannon keskus

Kirjoittajat: Susanna Horn¹⁾, Ari-Matti Seppänen²⁾, Erika Winqvist²⁾, Suvi Lehtoranta¹⁾,
Sari Luostarinen²⁾

¹⁾ Suomen ympäristökeskus (SYKE)

²⁾ Luonnonvarakeskus (Luke)

Vastaava erikoistoimittaja: Ari Nissinen

Rahoittaja/toimeksiantaja: Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Susanna Horn

Kannen kuva: Julia Diak / Adobe Stock

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: www.syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke sekä
ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: syke.omapumu.com

ISBN 978-952-11-5229-0 (PDF)

ISBN 978-952-11-5228-3 (nid.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

ISSN 1796-1718 (pain.)

Julkaisuvuosi: 2020

Tiivistelmä

Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämism vaihtoehdot – vaihtoehtojen taloudellisuus ja ilmastovaikutukset

Ravinteet ovat tärkeä osa ruoantuotantoa sekä osa monen muun arkipäiväisen tuotteen elinkaarta. Erityisesti mineraalilannoitteet ovat mahdollistaneet tehokkaan maataloustuotannon, joka puolestaan on taannut ruoan ihmisille ja elinkeinon maaseudulle. Mineraalilannoitteiden tuotanto on kuitenkin resurssi-intensiivistä ja niiden käyttöä voidaan korvata eri jäte- ja sivuvirroista tuotetuilla kierrätysravinteilla. Kierrätysravinteiden avulla voidaan varmistaa, että materiaalit kiertävät takaisin yhteiskunnalliseen käyttöön ja niiden sisältämistä ravinteista ja energiasta saadaan hyödynnettyä mahdollisimman paljon. Samalla pystytään ehkäisemään materiaaleista koituvia haitallisia ympäristövaikutuksia. Usein tämä kierto linkittää eri arvoketjuja toisiinsa; materiaali- ja energiavirrat saattavat tarjota eri käyttötarkoituksessa lisäarvoa muissa tuoteketjuissa.

Tämän työn tavoitteena oli arvioida biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä jatkojalostettavan nestemäisen lannoitevalmisteen tuotantoprosessia sekä prosessikokonaisuuden kannattavuutta ja ympäristövaikutuksia. Esimerkkinä jatkojalostuksesta käytettiin mädätysjäännöksestä separoidun nestejakeen kalvosuodatusta. Tarkastelu toteutettiin yhteistyössä BioKymppi Oy:n kanssa käyttäen sen biokaasulaitosta tarkasteltavana tapauksena. Kannattavuuden arvioinnissa verrattiin kalvosuodatuslaitteiston investoinnin kannattavuutta siihen, että mädätysjäännöksestä separoitu nestejake hyödynnettäisiin lannoitevalmisteen sellaisenaan. Molemmille vaihtoehdoille arvioitiin myös niiden tuotannon ja käytön elinkaariset ympäristövaikutukset, joita verrattiin mineraalilannoitteen käytön ympäristövaikutuksiin.

Kierrätyslannoitevalmisteen osoittautuvat tarkastelussa ympäristön kannalta mineraalilannoitetta vähäpäästöisemmiksi vaihtoehtoiksi. Erot kahden eri kierrätyslannoitevalmisteen (mädätysjäännöksen nestejakeen ja ravinnekonentraatin) välillä eivät olleet suuria (n. 4 %). Mädätysjäännöksen kalvosuodatus mahdollistaa lopputuotteen massan vähentämisen, jolloin sen kuljettaminen aiheuttaa vähemmän päästöjä verrattuna nestejakeen kuljettamiseen (typpikiloa kohden laskettuna). Lyhyillä etäisyyksillä mädätysjäännöksen nestejake on ilmaston kannalta parempi vaihtoehto, sillä pienillä etäisyyksillä (<30 km) ravinnekonentraatin tuotantoon vaadittu lisäenergian käyttö ei kumoa kuljetusten päästöjä. Vastaavasti hyödyt väkeväinnistä eivät toteudu, jos kuljetusmatka on lyhyt ja samanaikaisesti suurempi osa tyyppistä päätyy kuivajakeeseen. Tässä tarkastelussa pääpaino oli ilmastovaikutusten arvioinnissa, ja on hyvä huomata, että vaikutukset muissa ympäristövaikutusluokissa voivat olla ilmastovaikutukselle riskittäisiä. Kokonaisuuden kannalta ympäristövaikutuksia tulisikin arvioida laajemmin kuin pelkästään ilmastovaikutuksia painottaen. Olennaisinta ravinnekiertojen ja ilmaston näkökulmasta on hyödyntää ravinteet tehokkaasti ja minimoida mineraalilannoitteiden tarve.

Ravinnekonentraatin valmistuksesta aiheutuvat lisäkustannukset olivat suurempia kuin mitä sen varastoinnissa, kuljetuksessa ja levityksessä voitiin nestejakeeseen verrattuna säästää. Tulos riippuu kuljetusmatkan pituudesta, jonka tässä arvioitiin olevan n. 50 km. Jos etäisyys olisi ollut yli 80 km, olisi ravinnekonentraatin valmistus ollut kannattavaa, sillä ravinnekonentraattia on mahdollista kuljuttaa pidempiä matkoja kuin nestejakeita. Lisäksi se sisältää vain vähän fosforia. Näin ollen sille on mahdollista löytää uusia käyttökohteita. Se soveltuisi myös typen ja fosforin erottamiseen ja lisäksi edellytyksiä hyödyntää tyyppiä ja kuljettaa pois fosforia alueilla, joilla on fosforiylijäämää. Kalvosuodatuksen sisältävässä prosessiketjussa on vielä teknistä kehittämistä sekä prosessin toimivuuden että lopputuotteiden koostumuksen optimoimiseksi, kuten myös hankkeessa tehdyt laboratoriokokeet osoittivat.

Asiasanat: kierrätysravinteet, biokaasulaitos, kannattavuus, ilmastovaikutukset, elinkaariarviointi

Abstract

The profitability and climate impacts of two alternatives of using a biogas plant's digestate

Nutrients are a significant part of food production as well as part of many other everyday products. Mineral fertilizers, in particular, have enabled efficient agricultural production chains, which have secured food production and livelihood in rural areas. However, the production of mineral fertilizers is resource intensive. Their use can be replaced by recycled fertilizers, produced from different waste and side flows. The recycling of nutrients will enable a recirculation of materials back to societal use, as well as capturing as much of their energy and nutrient potential as possible. At the same time, the negative environmental impacts of producing mineral fertilizers can be reduced, as well as the release of more mineral phosphorus into the environment. The concept of circularity links different value chains to each other, as material and energy flows are inherently tied together.

The aim of this study was to analyse the production process of a concentrated, recycled liquid fertilizer using the digestate of a biogas plant as raw material and to assess the process's climate impacts and profitability. The production process is based on membrane filtration. The study was carried out as a case study of the biogas process of BioKymppi Oy. Profitability was analysed by comparing the membrane filter unit investment's profitability against using the liquid fraction of the digestate as such. Climate impacts were assessed for the production and use of both the nutrient concentrate and the digestate's liquid fraction as such, which were compared with the climate impacts of using a mineral fertilizer.

The results indicate, from a climate perspective, that the recycled fertilisers are preferable to the mineral fertilizer. The differences between the two recycled fertilizers (the liquid fraction of the digestate and the nutrient concentrate) were not high (appr. 4%). The filtration of the digestate produces a lighter end product than the digestate's liquid fraction, which means that its transport causes less emissions, relative to the nitrogen content. Thus, the digestate's liquid fraction is preferable with short transport distances (<30 km), since the additional energy used for concentrating the nutrients is not compensated by the reduced transport emissions. The value of concentrating nutrients will not materialize if the transport distances are short. The main emphasis of this study was on the climate impacts, but further research is needed to study additional environmental impacts, in which case the results may differ. Nevertheless, for a holistic view, other impacts should be included as well. Altogether, it is important to utilize all nutrients efficiently and minimize the use of mineral fertilisers.

In terms of profitability, the additional costs of producing the concentrated fertilizer are higher than what could be saved during storing, transporting and spreading, in comparison to the liquid fraction. The results depend largely on the transport distance, which was assumed to be 50 km. The concentrated fertilizer becomes feasible at distances higher than 80 km. However, the concentrated fertilizer contains less phosphorus, which means that it has less restrictions for use and can therefore be used in areas with phosphorus surplus. Thus, the efficient separation of nitrogen and phosphorus into different fractions improves the usability of recycled nutrient products. The laboratory tests carried out during the project indicated that the membrane filtration process requires additional development for improving both technical functionality and end product quality.

Keywords: recycled nutrients, biogas plant, profitability, climate impacts, life cycle assessment

Sammandrag

Alternativ för att utnyttja rötresten från biogasanläggningar – alternativens lönsamhet och klimatkonsekvenser

Näringsämnen är en viktig del av livsmedelsproduktionen och ingår i livscykeln för många andra vardagsprodukter. I synnerhet mineralgödsel har möjliggjort en effektiv jordbruksproduktion, som i sin tur har garanterat livsmedel till människor och näringsverksamhet på landsbygden. Produktionen av mineralgödsel är dock resursintensiv och användningen av det kan ersättas med återvunna näringsämnen från olika avfalls- och sidoströmmar. Med hjälp av återvunna näringsämnen kan man säkerställa att materialen återgår till samhällsbruk och att de näringsämnen och den energi som de innehåller kan utnyttjas i största möjliga mån. Samtidigt kan man förebygga skadliga miljökonsekvenser av materialen. Ofta sammankopplar denna cirkulation olika värdekedjor till varandra; material- och energiflöden kan ge mervärde för olika användningsändamål i andra produktkedjor.

Syftet med detta arbete var att bedöma tillverkningsprocessen för det flytande gödselverket som vidareförädlas ur biogasanläggningens rötresten samt processens lönsamhet och miljökonsekvenser. Som exempel på vidareförädling användes membranfiltrering av en vätskefraktion som separerats från rötresten. Undersökningen genomfördes i samarbete med BioKymppi Oy genom att dess biogasanläggning användes som ett analysfall. Vid bedömningen av lönsamheten jämfördes lönsamheten hos investeringen i en membranfiltreringsanläggning med att den vätskefraktion som separerats från rötresterna utnyttjades som gödselverk som sådan. För båda alternativen bedömdes också de livscykelmässiga miljökonsekvenserna av produktion och användning, vilka jämfördes med miljökonsekvenserna vid användningen av mineralgödsel.

Undersökningen visar att återvunna gödselverket ger lägre miljöutsläpp än mineralgödsel. Skillnaderna mellan två olika återvunna gödselverket (vätskefraktion från rötresten och näringskoncentrat) var inte stora (cirka 4 %). Membranfiltrering av rötresten gör det möjligt att minska slutproduktens massa, vilket gör att transporten av slutprodukten orsakar mindre utsläpp än transporten av vätskefraktion (räknat per kvävekilo). Vid korta avstånd är vätskefraktion från rötresten ett bättre alternativ med tanke på miljön, eftersom den extra energi som krävs för att producera näringskoncentrat inte tar ut transportutsläppen vid korta avstånd (< 30 km). Likaså förverkligas inte fördelarna med koncentrerad om transportsträckan är kort och samtidigt hamnar en större del av kvävet i torrfraktionen. I denna undersökning låg tyngdpunkten på bedömningen av klimatkonsekvenserna, och det bör uppmärksammas att konsekvenserna i andra miljökonsekvensklasser kan vara motstridiga med klimatkonsekvenserna. Med tanke på helheten borde miljökonsekvenserna bedömas mer omfattande än enbart med betoning på klimatkonsekvenserna. Det viktigaste med tanke på näringscyklerna och klimatet är att näringsämnen utnyttjas effektivt och att behovet av mineralgödsel minimeras.

Jämfört med vätskefraktion var merkostnaderna för att producera näringskoncentrat större än vad man kunde spara på att lagra, transportera och sprida koncentrat. Resultatet beror på transportsträckans längd, som här uppskattades till cirka 50 km. Med ett avstånd på över 80 km skulle det ha varit lönsamt att producera näringskoncentrat, eftersom näringskoncentrat kan transporteras längre sträckor än vätskefraktion. Dessutom innehåller koncentrat endast lite fosfor. Därför är det möjligt att hitta nya användningsområden för det. Koncentrat skulle också lämpa sig för att separera kväve och fosfor och öka försättningarna för att utnyttja kväve och transportera bort fosfor i områden med fosforöverskott. Processkedjan som innehåller membranfiltrering måste genomgå ytterligare teknisk utveckling så att både processens funktion och slutprodukternas sammansättning optimeras, vilket även de laboratorieprov som gjorts inom projektet visade.

Ämnesord: återvunna näringsämnen, biogasanläggning, lönsamhet, klimatkonsekvenser, livscykelanalys

Esipuhe

”Ravinteiden kierrätyksessä on tapahtunut läpimurto, päästöt ympäristöön ovat pienet ja ravinteet kiertävät tehokkaasti. Vesistöihin karanteita ravinteita palautetaan kiertoon ja tuontiravinteiden määrä on pieni. Ravinteiden kierrätys on synnyttänyt uutta liiketoimintaa”. Tämä neljän ministeriön visio tulevaisuuden ravinteiden kierrätyksestä vuonna 2030 pohjautuu vahvasti kiertotalouden peruspilareihin. Kiertotalous vaatii uusia, innovatiivisia tapoja luoda ja arvioida arvoketjuja ja niihin liittyviä tuotanto- tai kulutusprosesseja. Materiaalivirrat, joita muodostuu erilaisten tuotantoprosessien sivuvirtoina ja joiden käsittelyssä on aiemmin pyritty hallittuun poistoon kierrättämisen sijaan, prosessoidaan arvotuotteiksi, joiden käytöllä voidaan korvata neitseellisiä ja fossiilisia materiaaleja ja vähentää päästöjä. Tämän saman ajattelutavan mukaan on myös BioRaEE-hankkeessa kehitelty viljelijöiden ja biokaasutoimijoiden kanssa yhdessä turvallisia ja tehokkaita kierrätyslannoitteita, jotka luovat uutta liiketoimintaa.

Biokaasuprosessiin syötetään yhteiskunnassa muodostuvia biohajoavia jätteitä ja sivuvirtoja (biojätteitä, teurasjätteitä, jätevedenpuhdistamoiden lietteitä tms.). Prosessin aikana niistä muodostuu biokaasua, joka voidaan hyödyntää uusiutuvana energiana, sekä mädätysjäännöstä, jota voidaan hyödyntää sellaisenaan tai jatkojalostettuna esimerkiksi lannoitevalmisteena. Biokaasun energialla voidaan korvata fossiilista energiaa ja mädätysjäännöksen ravinteilla mineraalilannoitetta. Konseptitasolla biokaasun tuotanto ja mädätysjäännöksen jatko- ja hyödyntäminen ovat hyviä kiertotalouden osia. Biokaasulaitoksen osaprosessit voivat vaihdella tehokkuudeltaan, resurssienkäytöltään ja päästöiltään riippuen niiden toteutustavasta. Niiden taloudellisten ja ympäristövaikutusten heikkouksien ja vahvuuksien arviointi on siksi tärkeää. Tämä mitattu ympäristöllinen ja taloudellinen tieto auttaa ymmärtämään erilaisten prosessiketjujen kokonaisvaikutuksia, vertailemaan eri tapoja prosessoida sekä määrittelemään kynnsarvoja taloudellisuudelle tai ympäristöhyödyille.

BioRaEE-hankkeessa on koottu tietopohjaa kierrätysravinteiden tuotannon ja käytön mahdollisuuksille sekä mahdollistettu vuoropuhelua tutkimuslaitosten ja yksityisen sektorin toimijoiden välille. Vuoropuhelun avulla on pystytty tuomaan tieteelliset arviointimenetelmät lähemmäs käytännön sovellettavuutta, mutta myös ymmärtämään käytännön pulmia, jotka liittyvät esim. prosessiteknologioihin, hinnoitteluun ja kysynnän parantamiseen. Tämä raportti vastaa hankkeen tutkimuskysymykseen siitä, mitä ympäristöllisiä tai taloudellisia hyötyjä kierrätyslannoitevalmisteilla on suhteessa mineraalilannoitteisiin ja millaisia teknisiä haasteita niiden tuotantoon vielä liittyy.

Tämä selvitys on osa Biokaasulaitoksesta ravinteita, energiaa ja elinkeinotoimintaa maaseudulle (BioRaEE) -hanketta (2017–2020). Hanketta rahoitti Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma vuosina 2017–2020 Euroopan aluekehitysrahaston maaseudun innovaatioryhmien (EIP-Agri) varoista.

Helsingissä elokuussa 2020,

Kirjoittajat

Sisällys

Tiivistelmä.....	3
Sammandrag.....	4
Abstract.....	5
Esipuhe.....	7
1 Johdanto.....	9
2 Yleistä biokaasun ja kierrätyslannoitevalmisteiden käytöstä.....	11
2.1 Biokaasuprosessi.....	11
2.2 Kierrätyslannoitevalmisteiden tuotanto.....	12
2.2.1 Mädätysprosessi.....	12
2.2.2 Mädätysjäännöksen jatkojalostusteknologiat.....	13
2.3 Kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäyttö.....	14
3 Tapaustutkimus: Biokaasulaitos ravinteiden jalostajana.....	16
3.1 Tapaus: BioKymppi.....	16
3.2 Prosessin massataseet ja tarkastelun rajaus.....	17
3.3 Biokympin jalostusprosessien hankkeessa toteutetut kehittämistoimet.....	19
4 Ympäristövaikutusten tarkastelut.....	22
4.1 Yleistä elinkaariarviointimenetelmästä.....	22
4.2 Ilmastovaikutukset.....	23
4.2.1 Elinkaariarvioinnin tavoitteet ja soveltamisala.....	23
4.2.2 Inventaarioaineisto.....	25
4.2.3 Ympäristövaikutusten arviointi.....	27
4.2.4 Ilmastovaikutusten arvioinnin tulokset.....	27
5 Kannattavuus.....	33
5.1 Lähtöarvot ja oletukset.....	33
5.2 Tulokset.....	34
6 Yhteenveto ja johtopäätökset.....	37
Sanasto.....	39
Lähteet.....	40
Liitteet.....	43

1 Johdanto

Ravinteiden kierrätystä, jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntämistä sekä biokaasun tuotantoa ja kulutusta pyritään määrätietoisesti lisäämään Suomessa Sanna Marinin hallituksen toimesta (Valtioneuvosto 2019). Sekä kierrätysravinteet, biokaasu että erilaisten sivuvirtojen hallittu kierrättäminen linkittyvät vahvasti toisiinsa ja niiden nähdään olevan osa kestävästä energia- ja ruokajärjestelmästä. Ravinteiden kierrätyksestä ja biokaasusta on tehty kansalliset toimenpideohjelmat, jotka tukevat Suomen elinvoiman kehittämistä ja ilmastotavoitteisiin pääsemistä (TEM 2020; Ravinteiden kierrätyksen seurantarayhmä 2019).

Biokaasuteknologia perustuu monivaiheiseen mikrobiologiseen hajoamisprosessiin, jonka raaka-aineena voidaan käyttää monenlaisia orgaanisia materiaaleja kuten lantaa, biojätettä, puhdistamolietettä, teollisuuden sivuvirtoja ja kasvibiomassaa. Prosessin tuotteina syntyy biokaasun lisäksi ravinnerikasta mädätysjäätännöstä (mädätysjäätännöstä), jossa kaikki syötteiden sisältämät ravinteet ovat tallella. Biokaasulaitosten kokonaiskestävyyden varmistamiseksi onkin olennaista hyödyntää sekä energiaa että ravinteet tehokkaasti. Biokaasuprosessista syntyvä biokaasu voidaan hyödyntää lämpönä, sähköinä, liikennepolttoaineena ja teollisuudessa. Mädätysjäätännös taas voi soveltua sellaisenaan tai jatkojalostettuna lannoitevalmistekseen tai korvaamaan esimerkiksi teollisuudessa tarvittuja ravinteita. Mädätysjäätännöksen jatkojalostusta, eli väkevöintiä, tarvitaan ravinteiden hyödyntämisen tehostamiseksi ja pidempien kuljetusmatkojen mahdollistamiseksi. Biokaasun tuottajilla onkin haasteena löytää jatkojalostukseen tapauskohtaisesti toimivia ja kannattavia teknologioita. Mädätysjäätännös myös korvaa mineraalilannoitteita.

Mahdollisuudet energian ja ravinteiden tuotannon lisäämiseen biokaasulaitoksissa ovat Suomessa merkittäviä: kun vuonna 2018 biokaasun kokonaistuotantomäärä oli noin yksi terawattitunti (TWh) niin kokonaispotentiaaliksi arvioidaan muodostuvan noin 10-16 TWh vuodessa (TEM 2020; Marttinen ym. 2015). Ravinnepitoisia biomassoja syntyy Luonnonvarakeskuksen (Luke) mukaan Suomessa vuosittain yli 21 miljoonaa tonnia. Merkittävin kierrätettävä massa on kotieläintuotannon lanta, mutta myös teollisuudessa ja yhdyskunnissa muodostuu monenlaisia kierrätettäviä ja biokaasutuotantoon soveltuvia sivuvirtoja. Lisäksi maatalouden kasvibiomassoja voidaan ohjata biokaasulaitoksiin. (Marttinen ym. 2017)

Biokaasulaitos sekä sen osaksi perustettava kierrätyslannoitelaitos voivat mahdollistaa maaseudulle uusia ja monipuolisia elinkeinomahdollisuuksia. Jotta kiinnostus uusille toimijoille ja laitosten tuotteita kohtaan heräisi, tarvitaan onnistuneita demonstraatioita ja käyttöönottoja. Lopputuotteiden, eli sekä energian että ravinteiden, tulee olla muodossa, joka vastaa kuluttajien tarpeisiin. Ravinteissa etenkin viljelijöiden tarpeiden ja käytäntöjen huomiointi on olennaista. Toisaalta myös heille voidaan luoda uudenlaisia toimintatapoja, jotka voivat osaltaan luoda maaseudulle uutta liiketoimintaa esimerkiksi urakointina.

Uusien raaka-aineiden hyödyntämisen, teknologioiden käyttöönoton ja tuotteiden markkinoille saattamisen suunnittelussa arvioidaan yleensä niiden hyödyt ja mahdolliset riskit ennen lopullista toteutusta. Hyödyt ja riskit tulisi analysoida sekä ympäristön että talouden kannalta. Ympäristövaikutusten kannalta voidaan hyödyntää laajasti käytettävää elinkaariarviointia (life cycle assessment, LCA), jossa lasketaan valitut ympäristövaikutukset tarkasteltavan arvoketjun kaikista vaiheista. Talouden tarkastelussa taas voidaan hyödyntää suunnitellulle investoinnille tehtävää kannattavuuslaskelmaa. Lisäksi voidaan arvioida yhteiskunnallisia vaikutuksia, kuten työllistymistä, elinkeinomahdollisuuksien monipuolistumista, energiaomavaraisuutta, maatalouden huoltovarmuutta tai yhteiskunnalle syntyviä verotuloja.

Tämän työn tavoitteena oli kuvata biokaasulaitoksen mädätysjäätännöksen jatkojalostus lannoitevalmistekseen ja arvioida prosessikokonaisuuden kannattavuutta ja ympäristövaikutuksia. Esimerkkinä jatkojalostuksesta on mädätysjäätännöksestä separoidun nestejakeen kalvosuodatus, jota Luke on kehittänyt laboratoriomittakaavassa. Muutoin tarkastelu toteutettiin yhteistyössä BioKymppi Oy:n kanssa käyttäen sen biokaasulaitosta tarkasteltavana tapauksena. Kannattavuuden arvioinnissa verrataan kalvosuodatus-

laitteiston investoinnin kannattavuutta siihen, että mädätysjäännöksestä separoitu nestejäte hyödynnettäisiin lannoitevalmisteena sellaisenaan. Molemmille vaihtoehdoille arvioidaan myös niiden tuotannon ja käytön elinkaariset ympäristövaikutukset, joita verrataan mineraalilannoitteen käytön ympäristövaikutuksiin.

2 Yleistä biokaasun ja kierrätyslannoitevalmisteiden käytöstä

2.1 Biokaasuprosessi

Biokaasuprosessi eli anaerobinen mädätys tarkoittaa hapettomissa olosuhteissa tapahtuvaa monivaiheista mikrobien biokemiallista reaktiota, jossa orgaaninen materiaali hajoaa ja siitä muodostuu biokaasua ja mädätysjäännöstä (kuva 1). Kyseessä on luonnollinen prosessi, jota toteutetaan reaktorissa kaasun tuottoa optimoiden hallituissa olosuhteissa. Prosessi soveltuu hyvin erilaisten jätteiden käsittelymenetelmäksi, sillä lopputuotteena muodostuu peltokäyttöön soveltuvaa mädätysjäännöstä ja lisäksi talteen saadaan energiaa. Raaka-aineena voidaan käyttää monenlaisia orgaanisia materiaaleja kuten lantaa, biojätettä, puhdistamolietettä, teollisuuden sivuvirtoja ja kasvibiomassaa.

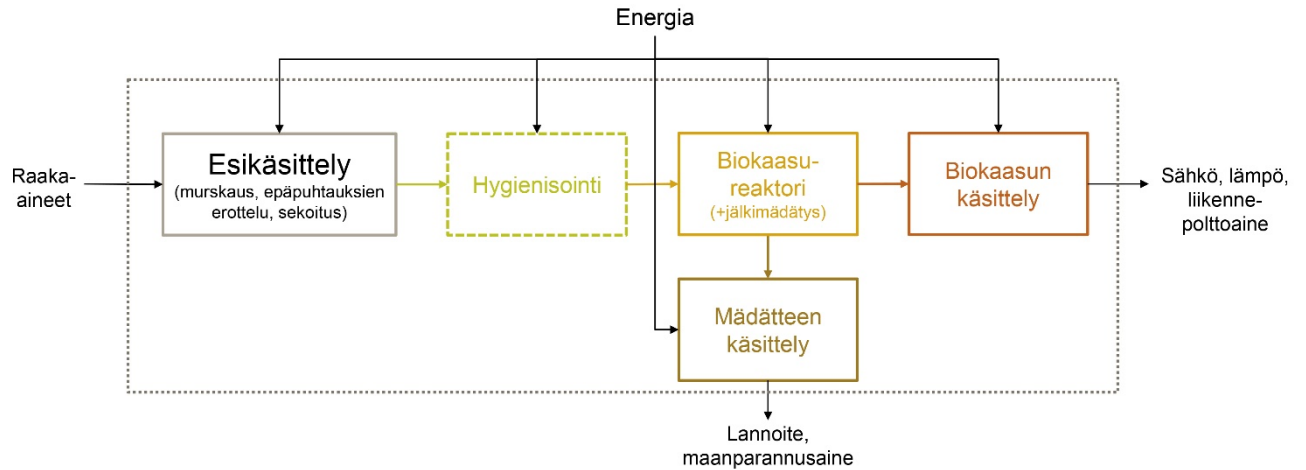
Mädätysprosessit voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin sen perusteella missä lämpötilassa mädätysprosessi tapahtuu; mesofiiliseen (35-40 °C) ja termofiiliseen mädätykseen (50-55 °C). Suomessa prosessit ovat yleensä mesofiilisiä (35 – 37 °C), sillä se on helpommin kontrolloitavissa kuin termofiilinen mädätys, joka on herkempi prosessiolosuhteiden vaihteluille (Latvala 2009). Termofiilinen mädätys voi kuitenkin olla tehokkaampi ja korkeammassa lämpötilassa liete hygienisoituu paremmin.

Lämpötilan lisäksi prosessi voi perustua valittujen syötteiden perusteella joko märkämädätykseen tai kuivamädätykseen. Märkämädätykseen soveltuvat lietemäiset syötteet, kuten lietelanta ja puhdistamoliete, ja sekoitettuna tai laimennettuna myös kuivemmat massat voivat soveltua siihen. Kuivaprosesseissa voidaan käsitellä kuiva-ainepitoisuudeltaan suurempia biomassoja, kuten kuivikelantaa tai erillis-kerättyä biojätettä.

Prosessin toimivuuden takaamiseksi on olennaista käyttää prosessiin soveltuvaa syötemateriaalia tai erilaisten syötemateriaalien yhdistelmää. Syötteen hiilen ja typen suhdetta voidaan tarvittaessa säätää erilaisilla biomassoilla biokaasuprosessin kannalta optimaaliseksi. Näin voidaan varmistaa, että prosessi tuottaa biokaasua tehokkaasti ja mädätysjäännös on laadukasta. Kestävyyden takaamiseksi on olennaista hyödyntää sekä biokaasun sisältämä energia että mädätysjäännöksen ravinteet tehokkaasti.

Prosessissa muodostuu biokaasua, joka sisältää pääosin metaania ja hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita yhdisteitä. Biokaasu voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa, sähköntuotannossa tai sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa (CHP), tai jalostaa biometaaniksi ja hyödyntää esimerkiksi liikennepolttoaineena. Biokaasulla voidaan korvata fossiilisten energianlähteiden käyttöä, mikä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä energiasektorilla.

Biokaasun lisäksi prosessissa muodostuu ravinnerikasta mädätysjäännöstä, jossa on kaikki syötteen sisältämät ravinteet tallella. Osa orgaanisesta tyypestä mineralisoituu prosessin aikana, joten jäännöksessä on enemmän kasveille liukoista tyypeä käytettävissä kuin syötemateriaalissa sellaisenaan. Mädätysjäännös voidaan separoida nesteen ja kuivajakeen erottamiseksi toisistaan, jolloin massan kuljettaminen ja käsiteltävyys helpottuu. Separoinnissa suurin osa liukoisesta tyypestä päättyy nestejakeeseen ja suurin osa fosforista päättyy kuivajakeeseen, jolloin myös jakeiden hyödyntäminen lannoituksessa on helpompaa.



Kuva 1. Biokaasulaitoksen yksinkertainen prosessikaavio.

2.2 Kierrätyslannoitevalmisteen tuotanto

2.2.1 Mädätysprosessi

Biokaasulaitoksen mädätysjäännös, eli mädäte, soveltuu yleensä hyvin käytettäväksi lannoitteena ja maanparannusaineena. Se ei kuitenkaan aina ole sellaisenaan käyttökelpoisimmillaan viljelijän tarpeiden kannalta ja sen koostumus ja ravinnepitoisuus vaihtelevat riippuen käytetyistä raaka-aineista ja mädätysprosessista.

Biokaasuprosessi, eli mädätys, on suljettu prosessi, joten syötemateriaalien sisältämät ravinteet säilyvät prosessissa. Merkittävin muutos on, että osa lannan orgaanisesta tyyppistä muuttuu kasveille helposti hyödynnettäväksi ammoniumtyypeksi. Lantatyypistä ja prosessointiolosuhteista riippuen lannan kokonaistyyppistä muuntuu ammoniummuotoon noin 20 % tai enemmän, ja kasveilla osuus voi olla 50–80 % (Paavola 2015). Fosfori, kalium ja muut hivenaineet eivät juuri muunnu prosessissa.

Mädätys vähentää syötebiomassojen hajuhaittoja merkittävästi ja hyvin hajonnut mädätysjäännös on lähes hajutonta. Mädätyksen yhteydessä tehtävä hygienisointi tuhoaa massan haitalliset bakteerit (Motiva 2013). On silti huomioitava, että esim. raaka-aineiden sisältämien haitallisten orgaanisten yhdisteiden tai lääkeaineiden hajoaminen biokaasureaktorissa riippuu kyseisen aineen ominaisuuksista ja biokaasulaitoksen prosessista ja/tai esikäsitystä. Osa haitallisista aineista voi päätyä mädätysjäännökseen ja asettaa haasteita sen käytölle. (Marttinen 2014)

Prosessista riippuen mädätysjäännöksen koostumus voi olla joko lietemäistä (märkäprosessit) tai kuivalantamaista (korkean kuiva-aineen kuivaprosessit). Lietemäinen mädätysjäännös voidaan separoida ruuvilla, lingolla tai suotonauhalla kuivaan (kuiva-ainepitoisuus 20-30 %) ja nestemäiseen jakeeseen. Nestejake voidaan palauttaa prosessiin laimennusvetenä, käyttää sellaisenaan peltovetytykseen tai jatkojalostaa väkevämmäksi ravinnetuotteeksi. Pääosa liukoisesta tyyppistä päätyy nestejakeeseen orgaanisen typen päätyessä kuivajakeeseen. Fosfori erottuu yleensä orgaaniseen aineeseen ja siksi sitä päätyy enemmän kuivajakeeseen. Erotustehot kuitenkin vaihtelevat separointiin käytetyn laitteen ja mädätysjäännöksen ominaisuuksien mukaan.

Mädätysjäännöksen sisältämiä ravinteita voidaan väkevöidä tietyillä prosesseilla, jolloin niiden kuljetettavuus paranee. Kun fosfori ja typi saadaan prosessoinnin avulla erotettua erillisiin jakeisiin, niiden lannoitekäyttöä on helpompi suunnitella ja niitä voidaan käyttää kohdennetummin mineraalilannoitteen tapaan. Samalla mahdollistuu fosforipitoisen jakeen kuljettaminen ylijäämäalueilta alueille, missä fosforia tarvitaan. Näin voidaan samanaikaisesti vähentää myös mineraalilannoitteiden käyttöä.

Mädätysjäännöksen jalostamiseen on olemassa useita vaihtoehtoisia teknologioita, joista osa on vielä kehitysasteella. Laitostoimijoilla onkin ollut haasteena löytää jatkojalostukseen toimivia ja kannattavia teknologioita. Esimerkiksi typpipitoisen nestejakeen väkevöintitekniikat ovat kohdanneet haasteita nesteen heterogeenisyyden vuoksi. Tästä syystä jäännöksen jalostaminen erilaisiksi lannoitetuotteiksi ei ole kansainvälisestikään kovin yleistä, vaan se on vasta kehitteillä olevaa tekniikkaa. Mädätysjäännöksen prosessointiteknologioita on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.2.2.

Mädätysjäännöksen ja siitä jalostettujen kierrätysravinteiden varastoinnin ja peltokäytön aikana muodostuu ammoniakkipäästöjä, kun osa liukoisesta tuestä haihtuu. Varastoinnin ja levityksen aikana tapahtuva typen haihtuminen vähentää peltoon päätyvän kasveille välittömästi käyttökelpoisen typen määrää. Kierrätyslannoitevalmisteen teho heikkenee sitä enemmän, mitä otollisempia olosuhteet ovat haihtumiselle. Varastoinnin aikaisia typpihävikkejä voidaan vähentää kattamalla kuivajakeen varasto ja säilyttämällä nestejake suljetussa säiliössä. Peltolevityksen yhteydessä kuivajake tulee mullata pian levityksen jälkeen ja nestejake levittää sijoittamalla.

Suomessa käytetään vuosittain mineraalilannoitteina noin 11 000 tonnia fosforia ja 152 000 tonnia typpeä (Marttinen ym. 2017). Mineraalilannoitteiden hinnat, hyvä saatavuus ja käytön helppous ovat pitäneet niiden käyttömäärät korkealla tasolla. Mineraalilannoitteiden valmistus aiheuttaa kuitenkin suuria päästöjä ilmakehään, vesistöihin ja maaperään (Basosi ym. 2014). Mineraalilannoitteiden onkin arveltu aiheuttavan 0,8 % maailman kasvihuonekaasupäästöistä (Brentrup 2009), minkä takia on tärkeää tuoda markkinoille myös vähäpäästöisempiä kierrätysravinteita. Hyödyntämällä biokaasuprosessin mädätysjäännöksen ravinteet tehokkaasti lannoitteena voidaan vähentää mineraalilannoitteiden käyttöä ja vähentää siten kasvihuonekaasupäästöjä.

2.2.2 Mädätysjäännöksen jatkojalostustekniikat

Mädätysjäännöksen kuivajakeen ja nestejakeen ravinteiden väkevöimiseksi ja tilavuuden pienentämiseksi on olemassa useita erilaisia tekniikoita, joista suurin osa on vielä kehitteillä olevaa tekniikkaa. Tekniikoiden kyky ottaa ravinteita talteen ja säilyttää niiden käyttökelpoisuus kasveille vaihtelee. Tässä kappaleessa esitellään yleisimpiä prosessointiteknologioita, joita voidaan käyttää ravinteiden väkevöinnissä. Laajempia teknologiakuvauksia on saatavilla mm. Marttisen ym. (2017) ja Seppäsen ym. (2019) raporteissa.

Kalvosuodatus perustuu puoliläpäisevään kalvoon ja sen avulla voidaan erottaa nestejakeesta liukoinen tyyppi. Myös pieni määrä fosforia päätyy ravinnekonentraattiin. Puhdasta typpiravinnetta voidaan tuottaa nestejakeesta stripperin avulla. Struviittikiteytyksellä voidaan saostaa fosforia nestemäisestä jakeesta.

Fosforipitoisen kuivajakeen tilavuutta voidaan pienentää merkittävästi termisillä menetelmillä, kuten poltolla tai pyrolyysillä. Termisissä menetelmissä ravinteista fosfori jää lopputuotteeseen ja useimmiten tyyppi menetetään. Pyrolyysi on orgaanisen materiaalin termokemiallista hajoamista joko vähähappisissa tai hapettomissa olosuhteissa korkeassa lämpötilassa (250-700 °C) (Kujala 2012; Laitinen 2015). Lopputuotteina syntyy hiilijakea, pyrolyysinestettä ja -kaasua. Neste- ja kaasujake voidaan käyttää prosessin energiantuotantoon ja fosforipitoinen hiili hyödyntää peltolevityksessä. Lopputuotteiden osuudet ja ominaisuudet riippuvat syötteen ominaisuuksista sekä käytetystä lämpötilasta ja lämmitysnopeudesta.

Kuivajakeen poltto edellyttää usein jakeen esikuivausta. Poltolla voidaan tuottaa energiaa, mutta prosessin energiatase on usein negatiivinen biomassan esikuivauksesta johtuen. Poltossa menetetään orgaaninen aine ja hiili. Lopputuotteena prosessissa muodostuu fosforipitoista tuhkaa, jossa fosfori on heikkoliukoisessa muodossa.

Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä separoidulle nestejakeelle voidaan soveltaa erilaisia tekniikoita ravinteiden väkevöimiseksi. Nestejake sisältää paljon ravinteita, etenkin typpeä. Joissain tapauksissa se voidaan myös kierrättää takaisin prosessiin. Ravinteiden väkevöimistä tarvitaan etenkin, jos nestejakea ei voida hyödyntää sellaisenaan lähialueella vaan ravinteet tulee kuljettaa kauemmaksi.

Kalvotekniikat perustuvat huokoiseen puoliläpäisevään kalvoon. Käsiteltävä neste jakautuu kalvon tulopuolelle jäävään retentaattiin ja sen läpäisevään permeaattiin. Kalvotekniikoilla voidaan optimoida erotusta usean eri tekijän suhteen. Kalvotekniikat voidaan jakaa tehon mukaan ultrasuodatukseen, mikro-suodatukseen, nanosuodatukseen sekä käänteisosmoosiin. Prosessin lopputuotteet ovat ravinnekon-sentraatti ja käsitelty jae. Ravinnekonsentraatti sisältää pääosin liukoista tyypeä, kaliumia sekä pienen määrän fosforia. Käsitellyn jakeen voi uudelleen ohjata prosessiin prosessi vetenä. Kalvot tukkeutuvat herkästi ja niitä tulee pestä usein kalvojen toimivuuden takaamiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa, että biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä separoitu nestejake tulee esikäsitellä mahdollisimman kiintoai-nevapaaksi esim. suodattamalla ennen kalvolle ohjaamista. Runsaan pesuvedenkulutuksen lisäksi kalvo-teknikat kuluttavat energiaa, pH:n säätökemikaaleja sekä kalvojen pesuaineita.

Tyypeä voidaan ottaa kemiallisesti talteen strippaamalla, jossa ammoniumtyppi erotetaan nesteestä kaasumaisessa ammoniakkimuodossa. Ammoniumtyppi saadaan haihtumaan lämpötilasäädön, pH:n säätämisen ja ilmapuhalluksen avulla. Kaasumainen ammoniakki voidaan ottaa talteen esim. pesemällä se rikkihappoon, jolloin muodostuu ammoniumsulfaattia. Stripattavan nestejakeen kiintoainepitoisuus tulee olla alhainen prosessin toimivuuden varmistamiseksi. Prosessi kuluttaa energiaa ja kemikaaleja. Puhtaan typpituotteen lisäksi prosessissa muodostuu fosforia ja reagoimatonta tyypeä sisältävää laimeaa rejektiä, johon päätyvät syötteen sisältämät haitta-aineet. Laitoksen investointikulut ovat varsin merkit-tävät ja siten tekniikkaa hyödynnetäänkin yleensä vain suurissa laitoksissa.

Struviitti eli magnesiumammoniumfosfaatti on fosfaattimineraali, joka sisältää fosfaatin lisäksi ammoniumtyypeä ja magnesiumia. Sitä muodostuu, jos fosforin, ammoniumtyypin ja magnesiumin io-nipitoisuudet sekä ympäristön olosuhteet ovat sopivat. Usein struviitin muodostusta varten vaaditaan magnesiumin (Mg) lisäys. Prosessissa saostuskemikaalia lisätään nesteeseen, sekoitetaan ja annetaan saostua. Saostunut struviittisakka erotetaan nesteestä suodattamalla. Struviitti soveltuu hidasliukoiseksi fosforilannoitteeksi. Prosessissa jäljelle jäävä nestejake pitää ohjata jätevedenkäsittelyyn.

Kehitteillä olevassa NPharvest -menetelmässä hyödynnetään puoliläpäisevää kalvoa ravinteiden tal-teenottoon. Menetelmässä ammoniumtyppi muutetaan ammoniakiksi nostamalla pH:ta kalsiumhydrok-sidin avulla, jonka jälkeen ammoniakki erotetaan puoliläpäisevään kalvon läpi ja saostetaan ammonium-sulfaatiksi kierrättämällä rikkihappoa ammoniakkiliuoksessa. Prosessin alkuvaiheessa fosfori saostuu kalsiumsuolan avulla. Syötteen tyypestä on mahdollista saada talteen jopa 99 % ja fosforista 90 – 99 %. Menetelmä on vielä kehitysvaiheessa, mutta sitä on testattu useille eri syötteille, mm. mädätyksen rejek-tivesille, jätevedelle ja virtsalle. Menetelmän etuna on hyvä ravinteiden talteenottokyky, mutta mahdol-lisena haittana voi olla korkean pH:n omaava sivuvirta, jota syntyy yhtä paljon kuin käsiteltävää syötet-tä. (Pradhan ym. 2019; Pradhan ym. 2018; NPharvest 2020)

2.3 Kierrätyslannoitevalmisteiden peltokäyttö

Lannoituksen tarkka suunnittelu on tärkeää resurssitehokkuuden kannalta. Mitä tarkemmin lannoituksen määrä saadaan vastaamaan kasvin todellisia ravinnetarpeita, sitä enemmän ravinteista päätyy satoon ja sitä pienemmäksi jäävät hävikit vesistöihin ja ilmakehään. Kierrätyslannoitevalmisteita käytettäessä lannoitussuunnitelman teko voi olla haastavampaa kuin mineraalilannoitteita käytettäessä (Mattila 2019). Kierrätyslannoitevalmisteiden käyttäjän kannattaakin perehtyä eri valmisteiden ominaisuuksiin ja valita erilaisiin toimiinsa soveltuvat tuotteet tapauskohtaisesti.

Kierrätyslannoitevalmisteet sisältävät usein laajan spektrin eri ravinteita ja niiden suhteet poikkeaa-vat kasvin tarpeesta. Näihin ravinnepitoisuuksiin vaikuttavat laitoksen prosessit ja käytetyt raaka-aineet. Monesti myös saman kierrätyslannoitevalmisteiden erien välillä on eroavaisuuksia ravinteiden pitoi-suuksissa ja liukoisuudessa.

Eloperäisillä lannoitteilla voidaan vaikuttaa myös muihin maan ominaisuuksiin kuin ravinteisiin. Eloperäisen aineen lisäys maahan lisää maan murustuvuutta, multavuutta ja biologista aktiivisuutta, maan rakennetta, kationinvaihtokapasiteettia sekä veden pidätyskykyä (Celestina ym. 2019; Chenu ym. 2019; Ravander ym. 2019). Lannoituksella on myös vaikutus kalkitustarpeeseen (Harmsen ym. 1990;

Mattila ja Rajala 2018) ja monet kierrätyslannoitevalmisteet poikkeavat ylläpitokalkitustarpeeltaan selvästi väkilannoitteista. Lisäksi osa kierrätyslannoitevalmisteista sisältää kasvunedisteitä eli biostimulantteja (Calvo ym. 2014; Mattila 2019).

Kierrätyslannoitevalmisteiden käytön suunnittelu vaatii kokonaisvaltaisempaa tarkastelua, jossa huomioidaan sekä lannoitus- että maanparannusvaikutukset. Kierrätyslannoitevalmisteet voivat toimia viljelyn pääasiallisena kasvinravinteiden lähteenä. Toisaalta lannoitusta voidaan tarvittaessa täydentää mineraalilannoitteilla, toisilla kierrätyslannoitevalmisteilla tai biologisella typensidonnalla. Kierrätyslannoitevalmisteiden ravinnepitoisuudet eivät yleensä ole yhtä korkeita kuin mineraalilannoitteiden, mutta teknisesti väkevöinti vastaaviin pitoisuuksiin on mahdollista. Huomiota on kiinnitettävä liukoisen typen oikean suuruiseen annosteluun, sillä orgaaniseen ainekseen sitoutuneen orgaanisen typen satovaikeus syntyy vasta typen mineralisoituessa eikä sen täsmällistä ajankohtaa voi ennustaa (Seppänen ym. 2019).

Typen liukoistumisen hitaus ja liukoisen typen saatavuus voivat rajoittaa kierrätyslannoitevalmisteen käytön suotuisuutta tietyille viljelykasveille. Kasvit (esim. viljat), jotka ottavat suurimman osan ravinteistaan kasvukauden alussa, kärsivät ravinteiden puutteesta, jos ravinteiden saatavuus ei vastaa tarvetta (Tontti ym. 2015). Toisaalta kasvit, joiden ravinnetarve jatkuu koko kasvukauden, hyötyvät hitaammin vapautuvista ravinteista. Väärin ajoitetut lannoitustoimet ja ravinteiden liukoistuminen nostaa myös riskiä ravinnevalumille ympäristöön.

Jos kierrätyslannoitevalmisteen olomuoto on sopiva, niin sen levitys onnistuu yleisesti käytössä olevalla kalustolla. Lietemäiset ja nestemäiset valmisteet voidaan levittää lietevaunuilla ja kuivat ja kuonamaiset jakeet joko kuivalannan levittimillä tai kalkitusvaunuilla. Rakeistettuja tai kiteytettyjä kierrätyslannoitevalmisteita voidaan levittää keskipakoislevittimillä tai mahdollisesti myös kylvölannoittimilla. Koska kierrätyslannoitevalmisteiden olomuodot poikkeavat mineraalilannoitteista, ne vaativat myös omat erityiset varastoinnin ja kuljetuksen ratkaisunsa (Seppänen ym. 2019).

3 Tapaustutkimus: Biokaasulaitos ravinteiden jalostajana

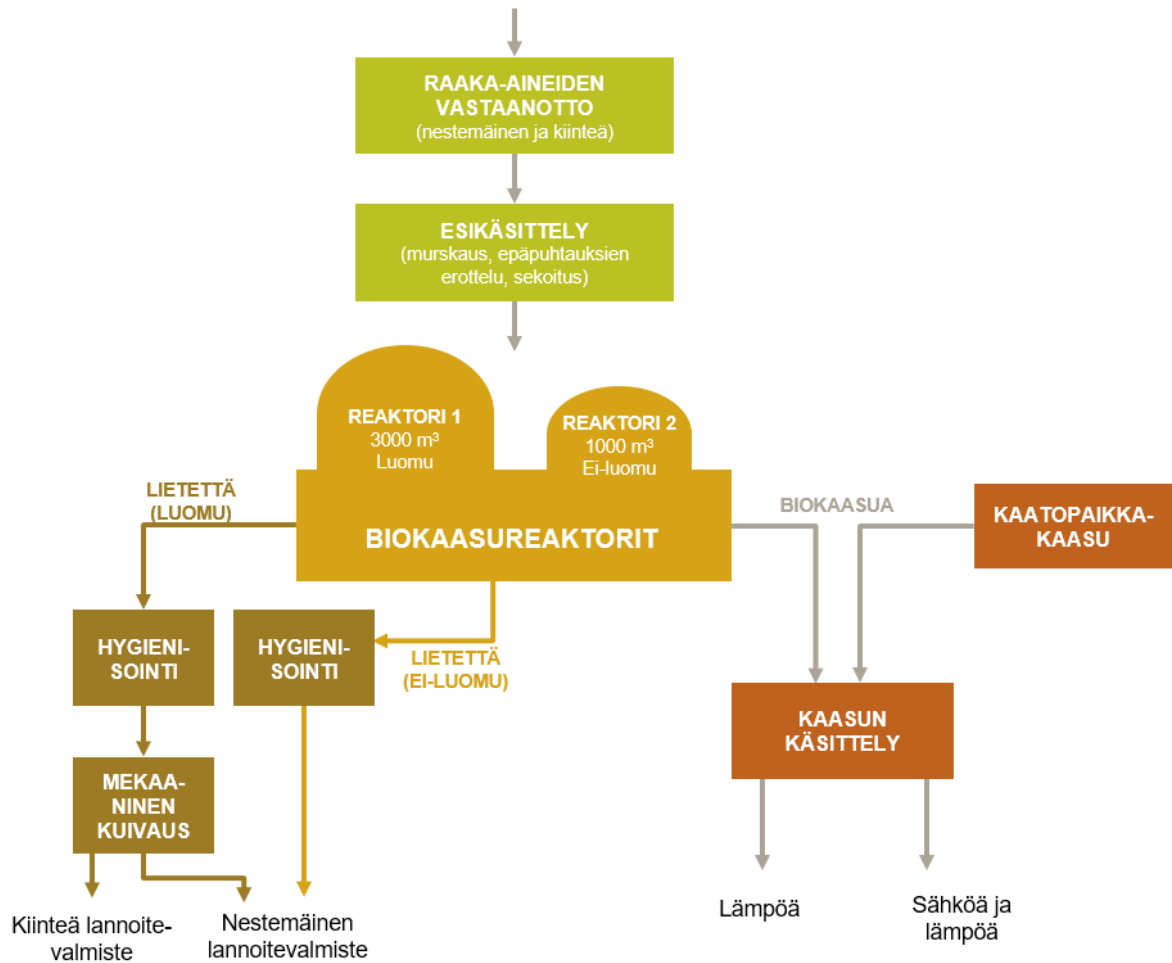
3.1 Tapaus: BioKymppi

Tutkimuksessa arvioidaan biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä jalostetun kierrätyslannoitevalmisteen tuotannon ja käytön ympäristövaikutuksia ja kannattavuutta tapaustutkimuksen keinoin. Tarkasteltavana tapauksena on Kiteellä sijaitseva BioKymppi Oy:n biokaasulaitos, jonka mädätysjäännöksen hyödyntämistä pyritään tehostamaan kalvosuodatuksen avulla.

Kiteellä toimiva biokaasulaitos BioKymppi Oy on erikoistunut erilaisten orgaanisten sivuvirtojen käsittelyyn jalostamalla niistä uusiutuvaa energiaa ja lannoitevalmisteita. Biokaasulaitoksen ympäristölupa mahdollistaa enintään 35 000 t laitospasiteetin ja raaka-aineista tuotetaan biokaasua ja orgaanisia lannoitevalmisteita, jotka soveltuvat osin käytettäväksi myös luomuviljelyn täydennyslannoitteena. (BioKymppi 2020a)

BioKymppin biokaasu tuotetaan kaksilinjaisessa mesofiilisessa märkämädätysprosessissa (32 - 42 °C, kuiva-ainepitoisuus alle 15 %). Toinen reaktori käsittelee vain luomukelpoista materiaalia ja toinen tavanomaista, ei-luomukelpoista materiaalia. Reaktoreita sekoitetaan säännöllisin väliajoin syötteen tasaisen hajoamisen mahdollistamiseksi. Reaktoreissa syntyvällä biokaasulla ja Kiteen suljetulta kaatopaikalta kerättävällä kaatopaikkakaasulla toimiva BioKymppin CHP-laitos (jossa on kaasumoottori ja generaattori) tuottaa kaasusta sähköä ja lämpöä. Biokaasun keskimääräiseksi metaanipitoisuudeksi on BioKymppin vuosiraportissa raportoitu 59 %. Biokaasun tuotantomäärä oli 1 705 000 m³ ja kaatopaikkakaasua hyödynnettiin lämmöntuotannossa 58 875 m³ vuonna 2019. Näiden avulla tuotettiin CHP-laitoksella yhteensä 2 216 MWh sähköä, josta noin 70% käytettiin itse ja loput on myyty joko samalla tontille oleville toimijoille tai Oulun Sähkönmyynnille valtakunnan verkon kautta. Lämpöä on tuotettu noin 6 000 MWh, josta noin 45 % on käytetty itse ja loput on myyty. Energian lisäksi luomulinjalla tuotetaan sekä nestemäistä lannoitetta että kiinteää lannoitetta. Tavanomaisen materiaalin linjastolla tuotetaan separoimatonta mädätysjäännöstä. (BioKymppi 2020b,c).

BioKymppin laitoksen prosessit alkavat raaka-aineiden vastaanotolla (kuva 2). Käytettävät raaka-aineet ovat erilaisia biohajoavia jätteitä ja tähteitä, mm. kotitalouksien lajiteltu erilliskeräyksen piirissä oleva biojäte, pakattu biojäte, elintarviketeollisuuden sivuvirrat, rasvanerotuskaivojen lietteet ja jäteveden puhdistamoiden lietteet. Luomulinjalle kelpaamattomia raaka-aineita ovat rasva- ja jätevesilietteet. Näitä varten on erilliset vastaanottosäiliöt. Raaka-aineiden vastaanoton jälkeen materiaali ohjataan esikäsittelyyn, jossa kiinteä jäte murskataan ja epäpuhtaudet, kuten pakkaukset, erotellaan. Kiinteän raaka-aineen joukkoon sekoitetaan nestettä (reaktorin lietettä, nestejakeeta, suotovettä tai ultrasuodatuksen retentaattia) ja myös nestemäiset jakeet sekoitetaan homogeenisemmäksi. Luomukelpoinen jae menee tämän jälkeen isompaan biokaasureaktoriin (2700 m³) ja ei-luomukelpoinen jae (ml. puhdistamoliete) menee pienempään reaktoriin (1000 m³). Isommassa reaktorissa viipymä on 17-22 päivää ja pienemässä 25-35 päivää. Biokaasureaktorin jälkeen mädätysjäännökset hygienisoidaan, ja luomumädätysjäännös separoidaan ruuvikuivaimella kuiva- ja nestejakeeseen. Laitoksella ei ole käytössä jälkimädätystä, vaan nestejakeet (Luomukymppi A ja Nurmikymppi A) ja kuivajakeet (LuomuKymppi B) siirretään suoraan varastoihin, joista ne viedään peltokäyttöön. Luomujae ja tavanomainen jae pysyvät toisista erillään koko prosessin ajan. Osa luomureaktorin mädätysjäännöksestä erotetusta nestejakeesta johdetaan takaisin syötteenvalmistukseen, osa kuljetetaan lannoitteeksi peltoon. Tässä tutkimuksessa keskitytään vain nestejakeeseen. (BioKymppi 2020b, Summala 2020)



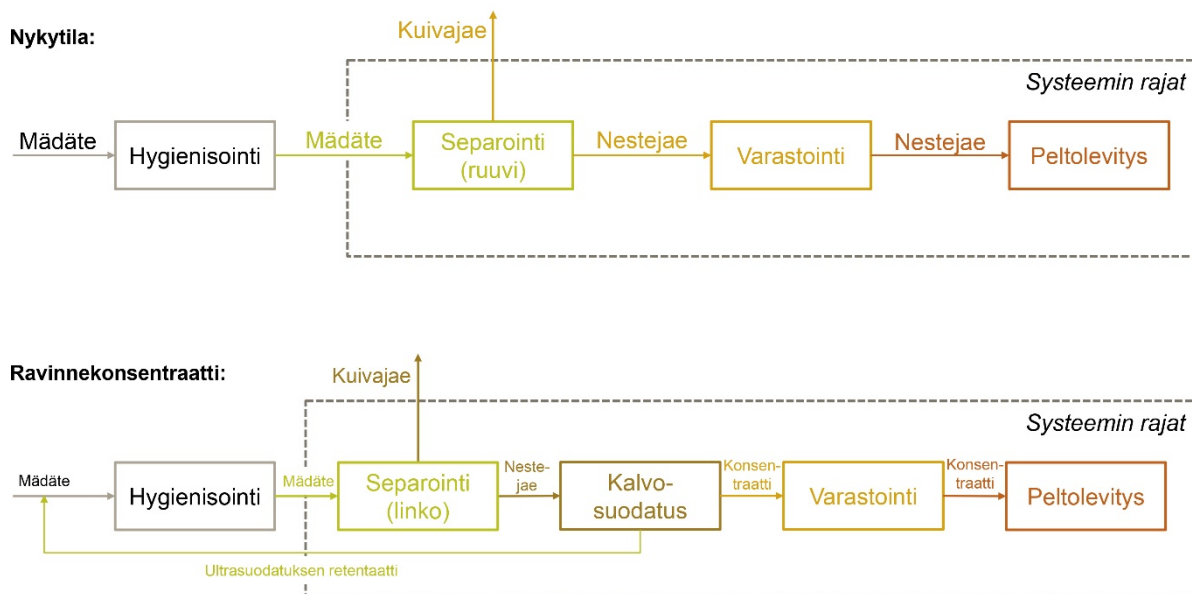
Kuva 2. BioKympin tuotantoprosessi (BioKymppi 2020b).

BioKympillä on pilotointivaiheessa oleva kalvosuodatuslaitteisto, joka perustuu ultrasuodatukseen ja käänteisosmoosiin. Ultrasuodatus ja käänteisosmoosi ovat erotusmenetelmiä, jotka perustuvat puoliläpäisevään kalvoon, joka erottelee yhdisteet molekyylikoon tai varauksen perusteella. Nestettä kalvon läpi ajavana voimana toimii paine-ero. Syöttöliuoksesta pienemmät molekyylit kulkeutuvat kalvon läpi suodokseen eli permeaattiin ja isommat molekyylit jäävät kalvon pinnalle konsentraattiin eli retentaattiin. Tämän selvityksen konsentraatin tuotanto on määritelty suurelta osin olemassa olevan laitteiston mukaan, tosin separointi on oletettu tapahtuvan ruuvin sijasta lingolla, jotta päästään parempaan erotustehoon. Konsentraatin tuotanto etenee siis lingolla tehtävän nestejakeen separoinnin jälkeen ultrasuodatukseen, jonka jälkeen neste erotellaan vielä käänteisosmoosilla. Käänteisosmoosin retentaatti on tuotteeksi saatava ravinnekonsentraatti, joka siirretään varastoon ja sieltä peltokäyttöön. (Summala 2020)

3.2 Prosessin massataseet ja tarkastelun rajaus

Tässä tarkastelussa laskettiin biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä tuotetun lannoitevalmisteen ympäristövaikutukset ja taloudellinen kannattavuus. Kahta erilaista mädätysjäännökseen hyödyntämistä vaihtoehtoa tarkasteltiin, eli mädätysjäännökseen nestejakeita ja nestejakeesta jalostettua ravinnekonsentraattia. Näiden tuotannon lisäksi analyysiin sisällytettiin myös tuotteiden varastointi, kuljetus pellolle, peltolevitys ja suorat päästöt pellolta. Näitä kahta vaihtoehtoa verrattiin mineraalilannoitteeseen, jonka ympäristövaikutukset laskettiin käyttämällä LCA-tietokantaa (ecoinvent) lannoitteen tuotannolle ja lisäämällä

tähän kuljetukset sekä pellon suorat päästöt. Työn tavoitteena oli täten selvittää kahden eri kierrätyslannoitevalmisteen ympäristövaikutuksia ja vertailla niitä mineraalilannoitteeseen. Vastaavasti vertailtiin vaihtoehtoisten tuotteiden valmistuksen taloudellista kannattavuutta.



Kuva 3. BioKymppin nykyinen tuotantoprosessi ja tilanne, jossa mädätysjäännöksestä tuotetaan ravinnekonstraattia.

Kuva 3 esittää BioKymppin tuotannon nykytilan (eli mädätysjäännöksen nestejakeen hyödyntäminen) verrattuna siihen tilanteeseen, jossa ravinnekonstraattia tuotetaan kalvosuodatuslaitteistolla. Tämä on tilanne, jota BioKymppi on testannut (pl. linkoseparointi) ja johon tässä tutkimuksessa perustuvat ravinnekonstraatin prosessioletukset perustuvat.

Laitoksen nykytilassa otettiin näytteitä ruuviseparoinnissa syntyvistä neste- ja kuivajakeista, joiden koostumus analysoitiin laboratoriossa. Ravinnekonstraatti-tapauksessa linkoseparointikokeita ei tehty vaan linkoseparoinnin erotustehokkuudelle käytettiin kirjallisuusarviota (mm. Hjorth ym. 2010), jonka perusteella laskettiin syntyvien jakeiden massat ja ravinnepitoisuudet. Linkoseparointi päätettiin valita kalvosuodatuksen esikäsittelyksi, koska ruuvilta tuleva nestejake sisältää liikaa kiintoainesta, joka tukkii esisuodatuksen. Lingolta saatava nestejake sisältää hyvin toimiessaan huomattavasti vähemmän kiintoainesta. Myös kirjallisuusarvot valittiin kuvaamaan tehokasta kiintoaineksen erottumista kuivajakeeseen. Samalla kuitenkin myös ravinteita ohjautuu enemmän kuivajakeeseen, jolloin lingolla separoitu nestejake sisältää vähemmän ravinteita kuin ruuvilla separoitu. Vastaavasti pienempi osa ravinteista ohjautuu linkoseparoidun nestejakeen mukana kalvosuodatuksen sekä edelleen lopputuotteena saatavaan ravinnekonstraattiin (taulukko 1).

Taulukko 1. Ruuvi- ja linkoseparoinnissa syntyvien neste- ja kuivajakeiden sekä kalvosuodatuksen lopputuotteena syntyvän ravinnekonstraatin massat ja ravinnepitoisuudet (TS = kuiva-aine, N tot = kokonaistyyppi, N liuk = liukoinen tyyppi, P = fosfori, K = kalium, t = tonnia, katso myös Sanasto).

	Ruuvi: kuivajae ^a	Ruuvi: nestejake ^a	Linko: kuivajae ^b	Linko: nestejake ^b	Kalvosuodatus: ravinne-konstraatti ^b
Massa (t)	1 775	15 972	2 662	15 084	4 047
TS (%)	21,6	3,8	26,1	2,0	2,8
N tot (kg/t)	7,1	5,6	9,6	5,1	12,5
N liuk (kg/t)	3,3	4,0	5,0	3,7	9,9
P tot (kg/t)	1,1	0,6	4,1	0,1	0,1
K (kg/t)	1,6	1,5	1,5	1,5	18,4

^a analysoitu, ^b laskennallinen

BioKympillä käytössä oleva kalvosuodatusprosessi on kolmivaiheinen. Esisuodatuksessa poistetaan nestejakeen sisältämä kiintoaine, jonka jälkeen varsinainen kalvosuodatus kattaa ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosin. Ultrasuodatuksen retentaatti eli nestejake, joka ei läpäise ultrasuodatuskalvoa, kiertää takaisin biokaasuprosessiin. Ultrasuodatuksen permeaatti eli kalvon läpäisevä nestejake jatkaa edelleen käänteisosmoosiin. Käänteisosmoosi on väkevöintiprosessi, jossa nestejakeesta poistetaan vettä, ja sen retentaatti on haluttu lopputuote eli ravinnekonsentraatti. Käänteisosmoosin permeaatti on lähes puhdas-ta vettä, jota voidaan käyttää laitoksella prosessivetenä.

Kalvosuodatusprosessin aikana lingolta tulevan nestejakeen kokonaisuudessa pienenee ja typpi- sekä kaliumpitoisuudet nousevat. Fosforipitoisuus ei kuitenkaan nouse, koska suurin osa nestejakeen sisältämästä fosforista päätyy ultrasuodatuksen retentaattiin, joka kiertää biokaasuprosessiin. Biokaasuprosessin jälkeen mädätysjäännös puolestaan separoidaan lingolla, joka erottaa fosforia tehokkaasti kuivajakeeseen. Jälkikäsitteilyprosessissa, jossa linkoseparointi yhdistetään kalvosuodatukseseen, fosfori päätyykin tehokkaasti kuivajakeeseen (Taulukko 1). Kalvosuodatusprosessin massavirtojen laskemiseen käytettiin apuna sekä Landcon¹ omia koeajotuloksia BioKympin mädätysjäännöksellä, että Tampereen Ammattikorkeakoulun tekemiä kokeita Landcon laitteistolla (Malila ym. 2019). Ultrasuodatuksen retentaatin kierrättäminen biokaasuprosessiin otettiin huomioon taselaskennassa.

3.3 Biokympin jalostusprosessien hankkeessa toteutetut kehittämistoimet

Kalvosuodatuslaitteiston pilotoinnissa BioKympin laitoksella nousi esiin haasteita yhteensovittaa ruuvi-separointi ja kalvosuodatus. Biokympin mädätysjäännöksestä ruuviseparoitu nestejake ei ollut ominaisuuksiltaan soveltuvaa kalvosuodatukseseen, vaan on aiheuttanut kalvojen tukkeutumista. Laitoksella haasteeseen on vastattu varastoimalla nestejakeita lietealtaassa kolme kuukautta ennen kalvosuodatusta, jotta kiintoaine laskeutuu. Tällöin ravinnekonsentraatin tuotanto onnistuu ongelmitta, mutta lannoitevalmisteen tuotantokulut ylittävät väkevöinnissä saadun hyödyn.

Tukkeutumisen ratkaisemiseksi hankkeessa tehtiin laboratoriokokeita. Keskeiseksi kehityskohteeksi nähtiin separointitehokkuuden parantaminen. Separointimenetelmän tehokkuus riippuu mm. biokaasulaitoksessa käytettävistä syötteistä. Ruuviseparoinnin erotustehokkuus on yleensä alhaisempi kuin linkoseparoinnin (Guilaynab ym. 2019). Polymeerien avulla flokkaamalla separointitehokkuutta voidaan lisätä jopa 15-20 % (Luehurst 2010) ja polymeerikäsitteily parantaa mädätysjäännöksen kalvosuodatuksen läpäisyvirtausta (Camilleri-Rumbaua ym. 2019).

Polymeerien lisäämistä ruuviseparaattorin erotustehon parantamiseksi selvitettiin hankkeessa laboratoriokokeissa kahdeksalla eri polymeerillä. Polymeerit valikoituivat Kemiran Oyj:n tarkastellulle mädätysjäännökselle suosittelemista Superfloc-polymeereista, jotka olivat C-491, C-492, C-494, C-496, C-498, A-100, A-130 ja A-150. Koeasetelmassa BioKympin laitokselta otettuun mädätysjäännökseen sekoitettiin erivahvuisia polymeerikäyttöliuoksia (0,1 %, 0,2 %, 0,5 %) eri suhteessa näytemäärään (korkeintaan 1:3). Tavoitteena oli selvittää sopiva polymeeri ja annostus, jolla separoituva nestemäärä suurenisi ja kirkastuisi. Mädätysjäännöksen ja polymeerin seosta sekoitettiin 10 sekuntia 1600rpm nopeudella, minkä jälkeen seos separoitiin välittömästi ruuviseparaattoria demonstroivalla 0,5 mm testi-seulalla. Polymeerin vaikutusta seurattiin kirjaamalla seulan läpäisevä vesivuo ja analysoimalla kuiva-aineen erottumista seulalla. Kokeiden tuloksena ei löytynyt BioKympin mädätysjäännökselle sopivaa polymeerituotetta tai sen annostelusuhdetta. Polymeerien käyttö heikensi testiseulan läpäisevyyttä, jolloin tavoiteltu erotustehokkuuden parantuminen jäi saavuttamatta.

Biokympin nestejakeita käytettiin kalvosuodatuksen laboratoriomittakaavan kokeissa käyttäen esisuodatusta testiseuloilla ja kalvosuodatusta laboratoriomittakaavan membraanisuodatuslaitteistolla. Toistaessa suodatus Biokympin prosessia vastaavalla prosessiketjulla havaittiin, että esisuodatuksen tukkeutuminen nousi keskeiseksi haasteeksi kalvosuodatuksen toiminnalle. Tuore nestejake aiheutti esi-

¹ <http://landco.lu/technology>

suodatuksen tukkeutumisen välittömästi, kun taas laskeutettu nestejake meni esisuodatuksen läpi ongelmitta. Esisuodatuksen jälkeen itse kalvosuodatus onnistui ongelmitta, vaikkakin tuoreen nestejakeen esisuodatus oli haastavaa ja vaati jatkuvaa puhdistusta.

Koska linkous saattaisi olla separointiteholtaan parempi, mädätysjäännöksen linkoseparointia testattiin laboratoriomittakaavan sentrifugilla. Linkousta käytettiin sekä korvaamaan ruuviseparointi että sen jälkeisenä prosessina. Linkous paransi huomattavasti hienoimman orgaanisen aineksen erottumista Biokympin mädätysjäännöksestä ja täten helpotti esisuodatuksen ongelmia. Raa'an ruuviseparoimattoman jäännöksen lingottu nestejake ei kuitenkaan ollut yhtä puhdasta kuin sekä ruuviseparoitu että lingottu nestejake, sillä siihen jäi kellumaan kevyitä partikkeleja, kuten biojätepussin palasia. Nämä kertyivät ensimmäiselle esisuodatuksen siivilälle, joka voisi ajan saatossa aiheuttaa tukkeutumisongelmia tai ainakin säännöllisen puhdistustarpeen (kuva 4).



Kuva 4. BioKympin lingotun, ei-ruuviseparoidun nestejakeen esisuodatuksen laboratorio demonstrointi kolmella eri suodatin tiheydellä 400µm, 200 µm ja 125 µm.

Taulukko 2. Laboratoriokokeiden konsentroidin tulosten vertailu Biokympin tulokseen (UF = Ultrasuodatus, NF = Nanosuodatus, RO = Käänteisosmoosi).

Liukoisen tyypin erotustehokkuudet	UF	NF	RO	Konsentraatin N liuk g/kg
Biokympin prosessi	76 %		74 %	8,1
Ruuvi+ Laskeutus + NF+ RO		33 %	35 %	4,2
Linko + UF	43 %			
Linko + UF + RO	41 %		32 %	5,2
Ruuvi+ Linko + UF	60 %			
Ruuvi+ Linko + UF +RO	50 %		32 %	4,6

Laboratoriokokeissa vertailtiin myös eri kalvojen toimivuutta ja vaikutusta väkevöintitehokkuuteen Biokympin mädätysjäännöksellä. Huomattava osa liukoisesta tyypestä ei läpäissyt ultrasuodatusta (jopa 50 %), vaan jäi päätyvästi toivotusti ravinnekonsentraattiin. Tämän vuoksi kokeissa päätettiin myös selvittää mikro- ja nanosuodatuksen mahdollisuuksia ultrasuodatuksen korvaajana. Nanosuodatuskal-

volla ilmeni tukkeutumista lingottujen syötteiden kanssa, kun taas laskeutetut ja ruuviseparoidut syötteet eivät tukkineet nanosuodatusta. Ultrasuodatusta testattiin kolmella eri tiheydellä eivätkä näiden erottamat neste- ja ravinnemäärät poikenneet toisistaan merkittävästi. Mikro-suodatus oli ultrasuodatusta tehottomampi pienemmän käyttöpaineen ja kalvojen rikkoutumisherkkyuden vuoksi.

Laboratoriokokeiden perusteella linkoseparointi pystyy korjaamaan kalvosuodatuksen tukkeutumisongelman joko ruuviseparoinnin korvaajana tai sen jälkeisenä lisäprosessina. Sopivaa polymeeriä BioKympin mädätysjäännöksen separoinnin tehostamiseksi ei kuitenkaan onnistuttu testattujen joukosta löytämään. Väkevointitehokkuudeltaan soveltuvimmalta tekniikalta vaikutti ruuviseparoinnin ja linkoseparoinnin yhdistäminen ultrasuodatukseen ja käänteisosmoosiin. Laboratoriokokeissa saavutetut liukoisien typen erotustehokkuudet jäivät kuitenkin BioKympillä saavutettua tehokkuutta pienemmäksi, mikä voi johtua käytettyjen ns. flat sheet-kalvojen sopimattomuudesta ravinteiden väkevointiin. Kokeita tulisi jatkaa testaten spiraalikalvojen vaikutusta ja pilotoida lingon vaikutusta kalvosuodatukseen isomassa mittakaavassa.

4 Ympäristövaikutusten tarkastelut

4.1 Yleistä elinkaariarviointimenetelmästä

Ympäristövaikutusten arviointi perustuu elinkaariarviointimenetelmään (LCA), joka perustuu ISO 14040-standardiin (ISO 14040:2006). Elinkaariarviointi on järjestelmäanalyttinen menetelmä, jonka tavoitteena on tunnistaa tuotteen tai palvelun koko elinkaaren aikaiset vaikutukset ympäristöön. Laskentaan sisällytetään elinkaaren aikaisten vaiheiden prosessien raaka-aineiden ja energian kulutus sekä päästöt ja sivuvirrat. Näin ollen pystytään suorien tuotannon päästöjen lisäksi sisällyttämään myös välilliset ympäristövaikutukset, eli energian tuotannon, raaka-aineiden valmistuksen ja alkutuotannon luonnonvarojen käytön aiheuttama ympäristökuormitus. Laskettavat vaikutukset ympäristöön voivat olla moninaiset, esim. ilmastonmuutos, happamoituminen, rehevöityminen, biodiversiteetin katoaminen. Tässä työssä tarkasteluun sisällytettiin ainoastaan ilmastovaikutus.

Elinkaariarviointi tehdään standardin mukaisesti neljässä vaiheessa:

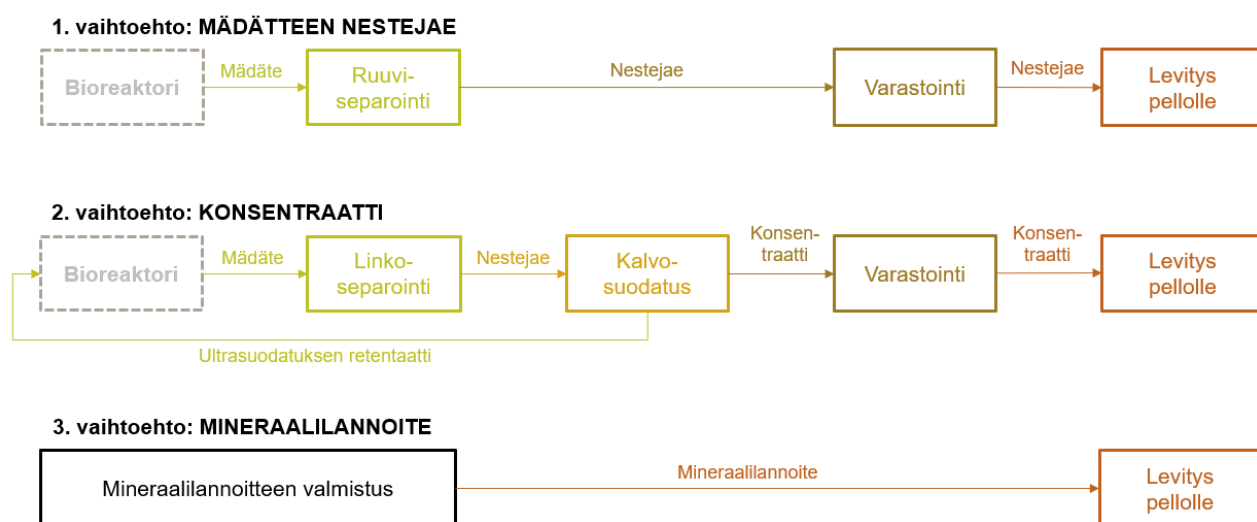
- 1) Tavoitteen ja soveltamisalan määrittely: Määritellään tutkimuksen tavoite ja elinkaaren vaiheet, jotka laskentaan sisällytetään (systeemin rajat). Lisäksi esitetään toiminnallinen yksikkö, johon tulokset suhteutetaan. Toiminnalliseksi yksiköksi määritellään yleensä tuotteen funktio, eikä määrää (eli lannoitepotentiaali eikä lannoitteen määrä), jotta kahta saman funktion tarjoamaa tuotetta pystytään paremmin vertaamaan keskenään. Ensimmäisessä vaiheessa tulisi päättää mitkä ympäristövaikutukset laskentaan sisällytetään sekä esim. maantieteelliset, tekniset tai ajalliset rajaukset.
- 2) Inventaariovaihe: Kerätään tiedot elinkaaren sisältämien prosessien syötteistä (energia ja materiaalit) ja päästöistä/jätteistä. Tietojen olisi hyvä olla tapauskohtaisia ns. primääritietoja (mitattuja tietoja), mutta näiden puuttuessa voidaan käyttää myös sekundääritietoja (kirjallisuuteen tai tietokantoihin perustuvia tietoja).
- 3) Vaikutusarviointi: Lasketaan inventaariotiedoista ympäristövaikutukset. Lasketaan inventaarion virroille niiden vaikutus valittuihin ympäristövaikutusluokkiin. Esimerkiksi ilmastonmuutospotentiaalinen (hiilijalanjäljen) laskemista varten tulee inventaariodatasta hakea kaikki kasvihuonekaasupäästöt. Nämä karakterisoidaan (yhteismitallistetaan) hiilidioksidiekvivalenteiksi, joka on ilmastonmuutoksen vertailuyksikkö. Vastaava laskenta voidaan tehdä myös muille ympäristövaikutusluokille.
- 4) Tulosten tulkinta ja raportointi: Tässä vaiheessa vaikutusarvioinnin tuloksista vedetään johtopäätöksiä valitulle kohdeyleisölle.

Elinkaariarvioinnin tarkoitus on – absoluuttisten ympäristövaikutusten laskennan lisäksi – arvioida, mitkä vaiheet tai prosessit vaikuttavat eniten tarkasteltavaan tuotteeseen tai palveluun, pystyä vertailemaan eri tuotteita keskenään ja välttää systeemin/elinkaaren sisäinen osaoptimointi. Tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotteiden ja palveluiden kehittämisessä, viestinnässä, poliittisissa linjauksissa tai strategisessa suunnittelussa. Tuotteiden ympäristöjalanjälki (product environmental footprint, PEF) on Euroopan komission luoma yhdenmukainen menetelmä, jolla arvioidaan tuotteiden elinkaarisia ympäristövaikutuksia ja joka perustuu elinkaariarviointiin. Vaikka menetelmää ei tällä hetkellä ole vielä jalokautettu lannoitevalmisteisiin, on silti näköpiirissä, että sen mukaista ympäristövaikutusten laskentaa tullaan kasvavassa määrin edellyttämään.

4.2 Ilmastovaikutukset

4.2.1 Elinkaariarvioinnin tavoitteet ja soveltamisala

Elinkaariarvioinnin tarkoituksena on tutkia BioKympin mädätysjäännöksen hyödyntämisvaihtoehtojen ilmastovaikutuksia. Tarkastelussa laskettiin mädätysjäännöksestä tuotetun lannoitevalmisteeseen hiilijalanjälki. Kahta erilaista mädätysjäännöksen hyödyntämisvaihtoehtoa tarkasteltiin: a) mädätysjäännöksestä separoitu nestejäte ja b) mädätysjäännöksen nestejakeesta kalvosuodatuksen avulla jatkojalostettu ravinnekonsentraatti. Lannoitevalmisteiden tuotannon lisäksi analyysiin sisällytettiin myös niiden varastointi, kuljetus pellolle, peltolevitys sekä suorat päästöt pellolta. Näitä kahta vaihtoehtoa verrattiin mineraalilannoitteeseen, jonka ympäristövaikutukset laskettiin käyttämällä LCA-tietokantaa (ecoinvent) lannoitteen tuotannolle ja lisäämällä tähän tarvittavat kuljetukset sekä levityksen jälkeiset pellon suorat päästöt. Työn tavoitteena oli täten selvittää kahden eri kierrätyslannoitevalmisteiden ympäristövaikutuksia ja vertailla niiden ilmastovaikutuksia mineraalilannoitteeseen (ks. kuva 5).



Kuva 5. Vertailtavat vaihtoehdot elinkaariarvioinnissa.

Elinkaariarvioinnin toiminnallinen yksikkö on tässä tarkastelussa lannoitevalmisteeseen sisältämä tyypin määrä, eli *kilo liukoista typpeä*. Täten tulokset esitetään muodossa *xx kg CO₂ekvivalenttia per kilo liukoista typpeä*.

Koska arvioinnissa keskityttiin mädätysjäännökseen ja siitä tuotettavaan lannoitevalmisteeseen eikä samalla tuotettavaan energiaan, on biokaasuprosessi ja sen ympäristövaikutukset rajattu työn ulkopuolelle. Jos biokaasuprosessin toinen tuote, eli energia, olisi otettu mukaan, olisi biokaasuprosessin ympäristövaikutukset pitänyt allokoita (eli jakaa) energian ja tuotetun lannoitevalmisteeseen välillä. Tyypillisesti allokointi tehdään joko taloudellisen jaon perusteella (ympäristövaikutusten jako tulojen mukaisessa suhteessa tuotteelle A ja tuotteelle B), massan perusteella (ympäristövaikutusten jako tuotetun massan mukaisessa suhteessa tuotteelle A ja tuotteelle B) tai jonkun muun asiantuntijanäkemyksen mukaisen jaon perusteella (ISO 14040). Kaikki vaihtoehdot katsottiin tässä tapauksessa hankaliksi. Kierrätyslannoitevalmisteella ei laskentahetkellä ole määriteltä hintaa toimivien markkinoiden puutteen vuoksi ja sen massaa on vaikea verrata energiasisältöön. Yksi vaihtoehto olisi ollut laajentaa mallin rajoja siten, että biokaasu olisi sisällytetty laskentaan tuotteena ja sille olisi laskettu ns. vältetyt päästöt. Tämä olisi lisännyt laskennan epävarmuuksia ja oletuksia sidonnaisuuksista siten, että tulokset olisivat jääneet hankalasti tulkittaviksi. Näin ollen laskennassa päädyttiin siihen, että biokaasuprosessin päästöt jyvitetään täysin energiantuotannolle ja vain lannoitevalmisteiden tuotannon aiheuttamat lisäympäristövaikutukset

sisällytetään tähän laskelmaan. Tämä tarkoittaa siis käytännössä sitä, että lannoitteen raaka-aineet laskeaan mukaan ilman edeltävien prosessien ympäristötaakkaa. Myös mädätysjäännöksen kuivajae rajattiin laskennan ulkopuolelle ilman allokaatiota, sillä kuivajakeelle ei pystytty arvioimaan hintaa. BioKymppi luovuttaa kuivajaeita maanparannustarkoituksiin, mutta ei saa siitä tuloa.

Samat oletukset systeemin rajoista tehtiin myös kannattavuuslaskelmille, jotta näiden kahden arvioinnin yhteistulkinta olisi mahdollisimman helppoa (ks. kappale 5 Kannattavuus).

Muut oletukset malliin tehtiin taulukon 3 mukaisesti. Lisäksi tutkimuksessa tunnistettiin muuttujia, joiden arvolla on suuri merkitys tuloksiin tai joiden arvo itsessään on epävarmin. Nämä olivat a) valittu sähköntuotanto; b) kuljetusetäisyydet tuotantolaitokselta pellolle; c) varastoinnin päästöt. Näiden muuttujien vaikutukset lopputuloksiin käsiteltiin erikseen, joko vaihtamalla muuttujan lähtötietoja (sähkön tuotanto, varastointitapa) tai herkkyytarkastelulla (kuljetusetäisyydet).

Taulukko 3. Elinkaariarvioinnin oletukset.

Laskentaan vaikuttava tekijä	Perusoletus	Vaihtoehtoinen oletus tai herkkyytarkastelut
Kierrätyslannoitevalmisteet Sijainti ja etäisyydet (tuotanto ja käyttö) Lannoitevalmiste ja sen tuotantoteknologia Systeemin rajat Kulutettu sähkö Varastointitapa Levitysmenetelmä	Biokaasulaitos Kiteellä, pellot keskimäärin 50 km etäisyydellä. Mädätysjäännöksen nestejaje: ruuviseparointi. Ravinnekonsentraatti: linkoseparointi ja kalvosuodatus (ultrasuodatus ja käänteisosmoosi). Tuotettu biokaasu energiakäyttöineen ja mädätysjäännöksen kuivajae rajattiin analyysin ulkopuolelle. Biokaasusähkö Suljettu Sijoittamalla	Etäisyys pellolta 0–300 km Suomalainen verkkosähkö Avoin
Mineraalilannoite Lannoitevalmiste Etäisyys (tuotanto ja käyttö)	Kalsiumammoniumnitraatti (ecoinvent-tietokannasta) Keskimäärin 250 km etäisyys pellolta	

Laskentatyökaluna käytettiin OpenLCA-elinkaari mallinnusohjelmaa. OpenLCA on saksalaisen GreenDeltan kehittämä avoimen lähdekoodin elinkaariarvointiohjelmisto, jota käytetään laajalti elinkaariarvioinneissa². Siihen on kytketty sveitsiläinen ecoinvent-tietokanta, jossa on tietoa tuhansista käyttöhyödykkeistä (materiaalien ja energian tuotannoista) ja niiden ympäristövaikutuksista. Tässä tutkimuksessa mallinnetuille käyttöhyödykkeille ja kuljetuksille käytettiin ecoinventin ympäristöprofiileja. OpenLCA:ssa pystyy myös valitsemaan haluamansa ympäristövaikutusten arviointimenetelmän (LCIA-menetelmän) ja tässä on käytetty ReCiPe-midpoint (H)-menetelmää. Työssä keskityttiin ilmastomuutospotentialiin (eli hiilijalanjäljen) laskentaan.

² www.openlca.org

4.2.2 Inventaarioaineisto

Elinkaarinarvioinnin laskentaa varten kerättiin inventaariodataa eri käsittelyvaihtoehtojen yksikköprosesseista. Tarvittavia tietoja ovat kuhunkin yksikköprosessiin liittyvät syötteet ja tuotokset, kuten energiankulutus, käytetyt raaka-aineet ja käyttöhyödykkeet (esim. kemikaalit) sekä prosessien suorat päästöt (esim. kuljetuksen päästöt). Inventaariodatan keräämiseen haastateltiin BioKymppin prosessiasiantuntijoita, käytettiin tietoja aikaisemmista tutkimuksista ja hyödynnettiin ecoinvent-elinkaaritietokantaa.

Taulukot 4, 5 ja 6 näyttävät kullekin vertailuvaihtoehdolle (mädätysjäätöksen nestejäte, ravinnekonsentraatti, mineraalilannoite) mitä syötteitä tai tuotoksia/päästöjä on sisällytetty malliin. Tiedot separoinnista ja kalvosuodatuksesta on kerätty pääosin BioKymppin omasta prosessista, tosin linkoa varten jouduttiin tekemään oletuksia sekä erotustehokkuudelle että prosessin sähkön kulutukselle valmistajan tietoihin perustuen.

Nestejakeen ja ravinnekonsentraatin varastoinnin aikana sekä levityksessä vapautuvat ammoniakkipäästöt laskettiin käyttämällä kansainvälisiä päästölaskentaohjeita (EMEP/EEA 2016) ja kansallista laskentamallia (Grönroos ym. 2017). Nestejakeelle ja ravinnekonsentraatille sovellettiin virtsan kertotomia, koska mädätysjäätöksen nestejakeelle ja ravinnekonsentraatille ei ole olemassa omia päästökerrotoimia. Typpikaasun (N₂) sekä typpioksidin (NO) päästöjen laskenta perustui myös EMEP/EEA:n (2016) laskentaohjeisiin. Dityppioksidipäästöt (N₂O) laskettiin IPCC:n laskentaohjeen mukaisesti (IPCC 2006).

Taulukko 4. Mädätysjäätöksen nestejakeen tuotantovaiheet, niihin liittyvät syötteet ja tuotokset/päästöt (kursiivilla näkyvässä tuote ja sen pääraaka-aine) sekä käytetyt lähteet.

Tuotantovaihe	Syötteet (input)	Tuotokset, päästöt (output)	Lähde
Ruuviseparointi	<i>Hygienisoitu mädätysjäätös</i> Sähkön kulutus	<i>Nestejäte</i>	BioKymppi
Varastointi	<i>Nestejäte</i>	<i>Varastoitu nestejäte</i> NH ₃ N ₂ O NO ₂ N ₂	EMEP/EEA 2016, Grönroos ym. 2017. IPCC 2006 EMEP/EEA 2016 EMEP/EEA 2016
Kuljetukset	<i>Varastoitu nestejäte</i> Kuljetus laitokselta pellolle, rekka-auto Levitys pellolla, traktori	<i>Kuljetettu nestejäte</i>	BioKymppi, ecoinvent Karelia AMK, ecoinvent
Peltokäyttö	<i>Kuljetettu nestejäte</i>	NH ₃ N ₂ O NO ₂ N ₂	EMEP/EEA 2016, Grönroos ym. 2017. IPCC 2006 EMEP/EEA 2016 EMEP/EEA 2016

Kalvosuodatuksen osalta käytettiin mittausdataa BioKympin laitokselta (taulukko 5).

Taulukko 5. Konsentraatin tuotantovaiheet sekä käytetyt syötteet ja tuotetut väli-/lopputuotteet. Kursiivilla on näkyvissä tuote ja sen pääraaka-aine.

Tuotantovaihe	Syötteet (input)	Tuotokset, päästöt (output)	Lähde
Linkoseparointi	<i>Hygienisoitu mädätys-jäännös</i> Sähkön kulutus	<i>Nestejæ</i>	
Kalvosuodatus	<i>Nestejæ</i> Lipeä (NaOH) Rikkihappo Suolahappo Sähkö Vesi (prosessivesi)	<i>Ravinnekonsentraatti</i>	BioKymppi BioKymppi BioKymppi BioKymppi BioKymppi
Varastointi	<i>Ravinnekonsentraatti</i>	<i>Varastoitu konsentraatti</i> NH ₃ N ₂ O NO ₂ N ₂	EMEP/EEA 2016, Grönroos ym. 2017. IPCC 2006 EMEP/EEA 2016 EMEP/EEA 2016
Kuljetukset	<i>Varastoitu ravinnekonsentraatti</i> Kuljetus laitokselta pellolle, rekka-auto Levitys pellolla, traktori	<i>Kuljetettu ravinnekonsentraatti</i>	BioKymppi, ecoinvent Karelia AMK, ecoinvent
Peltokäyttö	<i>Kuljetettu konsentraatti</i>	NH ₃ N ₂ O NO ₂ N ₂	EMEP/EEA 2016, Grönroos ym. 2017. IPCC 2006 EMEP/EEA 2016 EMEP/EEA 2016

Mineraalilannoitteen ympäristövaikutuksia arvioitiin käyttämällä eurooppalaista keskiarvoa kalsiumammoniumnitraatista ecoinventin tietokannasta (taulukko 6). Luku pitää sisällään kuljetukset alueelliseen varastoon, joten mineraalilannoitteen elinkaaren lisätiin vielä kuljetukset pellolle ja levityksen aikana sekä peltokäytön suorat päästöt.

Taulukko 6. Mineraalilannoitteen tuotanto, kuljetukset ja käyttö.

Tuotantovaihe	Syötteet (input)	Tuotokset, päästöt (output)	Lähde
Mineraalilannoitteen tuotanto		Kalsiumammoniumnitraatti	ecoinvent
Kuljetukset	Kalsiumammoniumnitraatti Kuljetus laitokselta pellolle, rekka-auto Levitys pellolla, traktori	Kuljetettu kalsiumammoniumnitraatti	Oletus perustuen lähimmän tuotantolaitoksen sijaintiin, ecoinvent Karelia AMK, ecoinvent
Peltokäyttö	Kuljetettu kalsiumammoniumnitraatti	NH ₃ N ₂ O NO ₂ N ₂	EMEP/EEA 2016 IPCC 2006 EMEP/EEA 2016 EMEP/EEA 2016

Näiden perustietojen lisäksi haettiin tietoja kolmeen lisäskenaarioon johtuen kappaleessa 4.2.1 mainituista herkkyyksanalysoitavista muuttujista:

- 1) Sähkön tuotannolle haettiin biokaasusta tuotetun sähkön rinnalle vaihtoehto, että sähkö olisi ositettu kansallisesta sähköverkosta. Kansallinen sähköntuotannon CO₂-päästökerroin on SYKEN laskema kolmen vuoden keskiarvo vuosilta 2013-2015 eli 184 kg CO₂e/MWh (SYKE 2017).
- 2) Kierrätyslannoitevalmisteiden varastoinnin oletettiin perusvaihtoehdossa tapahtuvan suljetussa varastossa, jotta haihtuvien tyyppiyhdisteiden (ammoniakki) määrä voidaan minimoida. Tällöin peltoon päätyy enemmän liukoisessa muodossa olevaa tyypeä, joka on kasvien käytettävissä. Jos kierrätyslannoitevalmiste varastoidaan avovarastossa, osa tuestä pääsee haihtumaan ilmaan ja sitä jää vähemmän lannoitteeseen. Tässä tapauksessa peltoon päätyy vähemmän tyyppiä ja peltolevityksestä muodostuvat tyypipäästöt ovat alhaisemmat (ellei kierrätyslannoitevalmisteen lisäksi lannoitusta täydennetä mineraalityypilannoituksella). Koska perusskenaariossa varastointi oletettiin tapahtuvan suljetussa varastossa, herkkyystarkastelussa arvioitiin avoimen varastoinnin vaikutusta elinkaariin päästöihin.
- 3) Kierrätyslannoitevalmisteen kuljetusetäisyydeksi oletettiin 50 km. Tällä on vaikutusta elinkaaren aikaisiin kokonaisvaikutuksiin, joten herkkyyksanalyysin avulla pyrittiin arvioimaan, miten pitkiä lannoitekuljetuksia voidaan ympäristön kannalta perustellusti käyttää.

4.2.3 Ympäristövaikutusten arviointi

Ympäristövaikutusten osalta laskettiin sekä ravinnekonsentraatin, mädätysjäätännöksen nestejakeen, että mineraalilannoitteen ilmastonmuutospotentiaali (hiilijalanjälki). Ilmastonmuutosta ei kiihdytä pelkäämään hiilidioksidipäästöt, vaan myös muut kasvihuonekaasupäästöt, kuten esimerkiksi metaani, dityppioksidi, otsoni ja vesihöyry. Tarkoituksena ympäristövaikutusten arvioinnissa on yhteismitallistaa kaikki ilmastonmuutokseen vaikuttavat päästöt yhdeksi ja samaksi yksiköksi. Tämä yksikkö on hiilijalanjäljen tapauksessa hiilidioksidi, joten muut kasvihuonekaasut muutetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi sen mukaan, mikä niiden ilmastopakote, eli ilmastoa lämmittävä vaikutus, on suhteessa hiilidioksidiin (esim. Acero ym. 2017).

Mädätysjäätännöksen nestejakeen, ravinnekonsentraatin ja mineraalilannoitteen elinkaaret mallinnettiin OpenLCA-ohjelmalla ja vaikutukset laskettiin ReCiPe Midpoint (hierarchist) LCIA-menetelmää³ hyödyntäen. ReCiPe-LCIA menetelmän mukaan esim. dityppioksidipäästöille lasketaan 298-kertainen ilmastonmuutospotentiaali hiilidioksidiin verrattuna, kun taas metaanille vaikutus on 34-kertainen (100 vuoden aikaperspektiivillä).

4.2.4 Ilmastovaikutusten arvioinnin tulokset

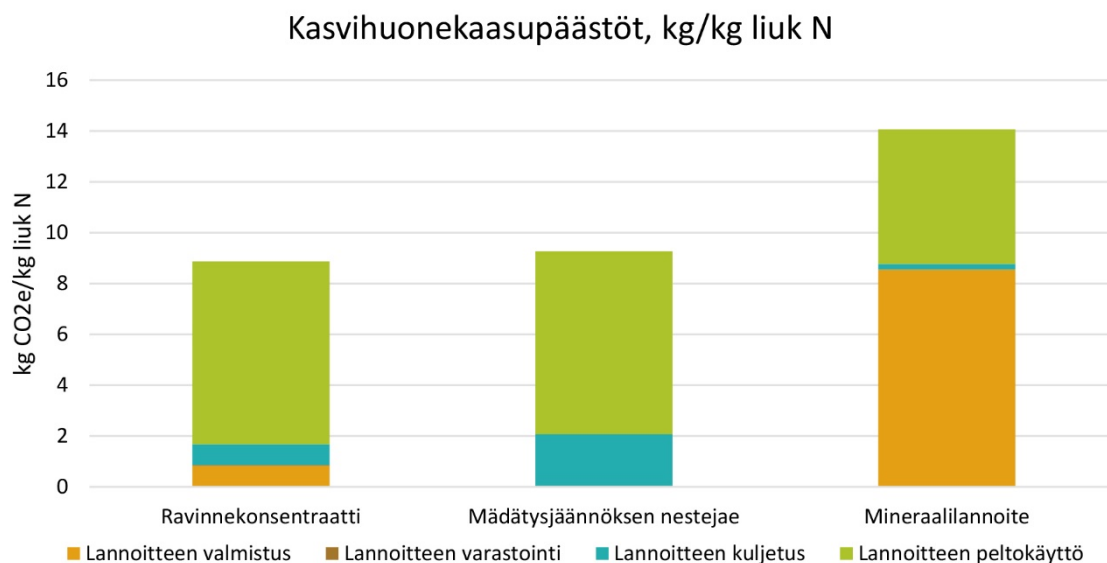
Käytetyillä oletuksilla kierrätyslannoitevalmisteet osoittautuivat ilmaston kannalta mineraalilannoitetta vähäpäästöisemmiksi vaihtoehtoiksi (kuva 6). Erot kahden eri kierrätyslannoitevalmisteen (mädätysjäätännöksen nestejakeen ja ravinnekonsentraatin) välillä eivät olleet suuria. Tässä laskelmassa ravinnekonsentraatin hiilijalanjälki oli 4 % mädätysjäätännöksen nestejakeen hiilijalanjälkeä pienempi; sen elinkaarelliset CO₂e-päästöt ovat 8,9 kg CO₂e/kg liukoista tyyppiä. Mädätysjäätännöksen nestejakeen päästöt ovat 9,3 kg CO₂e/kg liukoista tyyppiä. Mineraalilannoitteen elinkaarelliset päästöt ovat 14,1 kg CO₂e/kg liukoista tyyppiä.

Kierrätysravinteissa suurin suhteellinen hiilijalanjälkivaikutus tulee lannoitteen käytöstä, eli suorista päästöistä pellolta. Kierrätysravinteiden kokonaistyyppipitoisuus voi olla mineraalilannoitteita suurempi, sillä ne sisältävät usein liukoisen tyyppiä lisäksi myös orgaanista tyyppiä. Kierrätyslannoitevalmisteen peltokäytön päästö voi siis olla mineraalilannoitetta suurempi, mikäli siihen jää orgaanista tyyppiä.

³ <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>

Lannoitteiden käytöstä aiheutuu kasvihuonekaasujen (dityppioksidi) lisäksi myös muita typpipäästöjä (ammoniakki-, typpidioksidi- typpikaasupäästöjä), jotka ovat suoraan verrannollisia lannoitteena käytetävän tyypin määrään ja käytettävään levitystekniikkaan. Mineraalilannoitteen kylvölannoituksessa (sijoittamalla) ammoniakkipäästöjä ei nykytiedon mukaan muodostu, toisin kuin nestejakeen sijoituslevityksessä, jossa hieman alle 5 % ammoniumtypestä haihtuu arvion mukaan ammoniakkinä.

Mineraalilannoitteen hajalevityksessä sen sijaan ammoniakkipäästöjä muodostuu lähes saman verran kuin nestejakeen sijoituslevityksessä. Näin ollen kierrätyslannoitevalmisteeseen verrattuna mineraalilannoitteen ammoniakkipäästöt riippuvat levitystekniikasta, ollen joko alhaisemmat tai lähes yhtä suuret kuin nestejakeen sijoituslevityksellä.



Kuva 6. Tarkasteltujen lannoitevalmisteiden ilmastovaikutukset.

Taulukossa 7 nähdään tarkempi jaottelu hiilidioksidipäästöistä elinkaaren eri vaiheesta. Kierrätysravinteiden päästöistä suurin osa muodostuu pellolla tapahtuvista päästöistä, kun taas mineraalilannoitteen tapauksessa suurin vaikutus aiheutuu resurssi-intensiivisestä valmistusprosessista. Mineraalilannoitteen pienemmän massan takia esimerkiksi kuljetukset aiheuttavat vähemmän päästöjä verrattuna kierrätyslannoitevalmisteesiin. Suuremman massan takia myös mädätysjäännöksen nestejake aiheuttaa taas enemmän päästöjä kuin väkevämpi ravinnekonsentraatti. Konsentraattia on jalostettu nestejakeeta pidemmälle, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että sen tuottamisessa kuluu enemmän energiaa ja kemikaaleja, mikä lisää sen ympäristövaikutuksia. Kuitenkin oletetulla 50 km kuljetusetäisyydellä mädätysjäännöksen nestejakeen kuljetuksen aiheuttama päästö on suurempi kuin konsentraatin valmistuksen ja kuljetuksen yhteensä.

Taulukko 7. Tarkasteltujen lannoitevalmisteiden ilmastovaikutukset pääprosessittain.

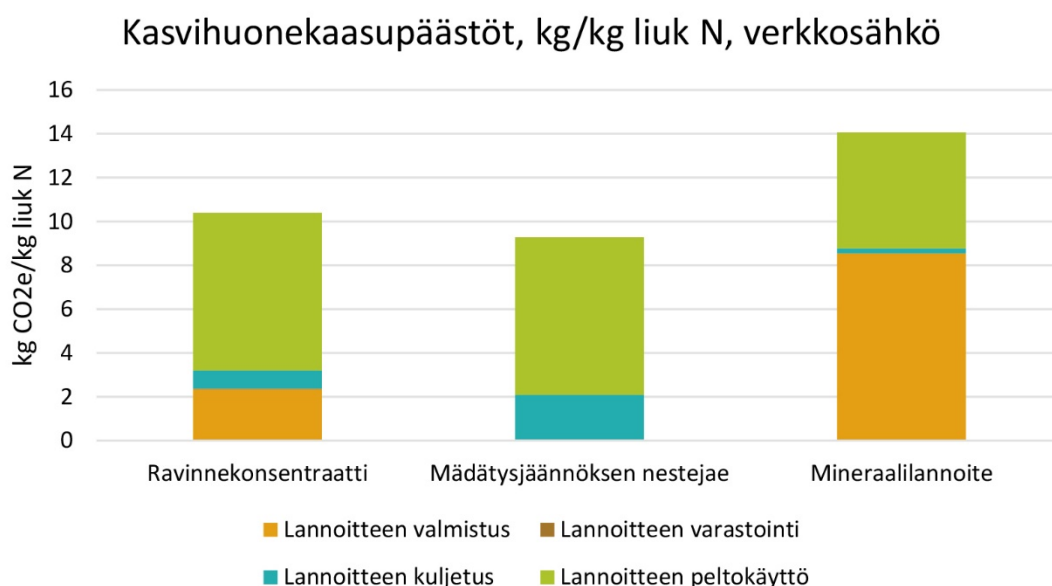
kg CO ₂ e/kg liuk N	Ravinnekonsentraatti	Mädätysjäännöksen nestejake	Mineraalilannoite
Valmistus	0,82	0,005	8,55
Varastointi	0,04	0,04	0
Kuljetus	0,82	2,04	0,22
Peltokäyttö	7,19	7,19	5,30
Summa	8,87	9,27	14,07

Herkkyyksanalyysit

Kuten oletuksissa todettiin, on osa lähtötiedoista joko epävarmoja tai niillä on suhteellisen iso vaikutus tuloksiin. Tämän takia tarkastellaan erikseen vielä a) sähkön lähteen ja b) avoimen varastoinnin vaikutuksen sekä c) kuljetusetäisyyden muuttamisen vaikutusta.

a) Tulokset verkkosähköä käyttäen

Jos ravinnekonstraatin tuotannossa ja separoinnissa käytettäisiin keskimääräistä suomalaista verkkosähköä ja sen CO₂-päästökerrointa (SYKE 2017) biokaasusähkön sijaan muuttuisivat tulokset kierrätyslannoitevalmisteiden osalta hieman (kuva 7). Konstraatin, jonka tuottamiseen vaaditaan sähköä vuosittain noin 400 MWh, hiilidioksidipäästöt kasvavat 17 %, kun taas mädätysjäännöksen nestejakeen vain 0,1 %, sillä sen prosessointiin käytetään selkeästi vähemmän sähköä.



Kuva 7. Tarkasteltujen lannoitevalmisteiden ilmastovaikutukset verkkosähköä käyttäen.

Taulukossa 8 on näkyvissä tarkemmat lukemat kasvihuonekaasupäästöille, jaoteltuna elinkaaren päävaiheisiin.

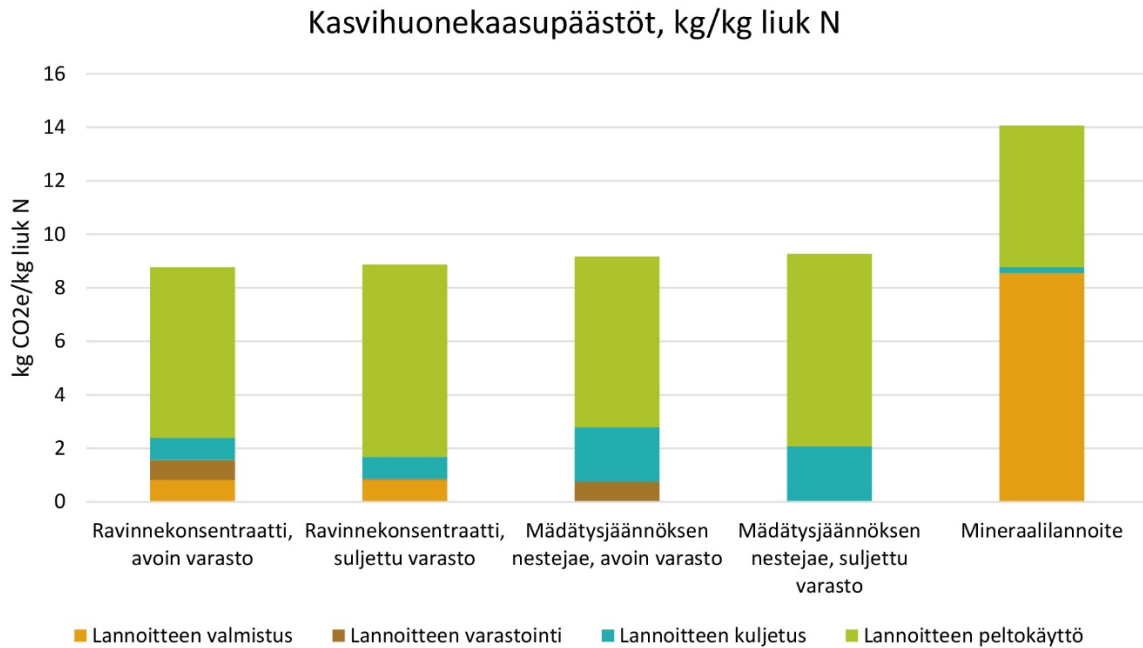
Perustiedoilla tehdyssä analyysissä tarkastellaan vain lannoitteita (ja suljetaan siis biokaasun energiahyödyntäminen ja energian substituutiovaikutus analyysin ulkopuolelle), ja ympäristön kannalta toiminta kannattaa, sillä lannoitetuotanto voi käyttää biokaasulla tuotettua sähköä. Mutta systeemillä tasolla asiaa analysoidessa on todettava, että tätä biokaasulla tuotettua sähköä ei siinä tapauksessa voi myydä teollisuudelle tai kotitalouksille, missä se voisi vähentää niiden päästöjä suhteessa suurempipäästöiseen verkkosähköön. Tämä hyöty siis menetetään, jos energiaa hyödynnetään omissa ns. lisäyksellisissä prosesseissa.

Taulukko 8. Tarkasteltujen lannoitevalmisteiden ilmastovaikutukset pääprosesseittain verkkosähköä käyttäen.

kg CO ₂ e/kg liuk N	Ravinnekonstraatti	Mädätysjäännöksen nestejake	Mineraalilannoite
Valmistus	2,34	0,02	8,55
Varastointi	0,04	0,04	0
Kuljetus	0,82	2,04	0,22
Peltokäyttö	7,19	7,19	5,3
Summa	10,39	9,28	14,07

b) Tulokset avoimen varastoinnin tapauksessa

Perusmallissa ilmastovaikutukset on laskettu sille vaihtoehdolle, että valmis tuote (mädätysjäännöksen nestejake tai konsentraatti) varastoitaisiin suljetussa varastossa. Tämä oletus ei kuitenkaan aina päde, joten perusmallin tuloksia on vertailtu siihen tilanteeseen, että tuote varastoitaisiin avoimessa varastossa (kuva 8). Avoimesta varastosta haihtuvat päästöt päätyisivät näin ollen suoraan ilmakehään. Toisaalta tyyppiyhdisteiden haihtuminen tarkoittaa myös sitä, että kierrätysravinteen sisältämästä tuestä päätyy pienempi osa peltoon kasvien käytettäväksi. Näin ollen myös pellon suorat päästöt ovat hieman pienemmät. Nestejakeen ja ravinnekonsentraatin pH:ta ei huomioitu. Tässä skenaariossa sähkölle käytettiin perusvaihtoehtoa, eli biokaasusta tuotettua sähköä.



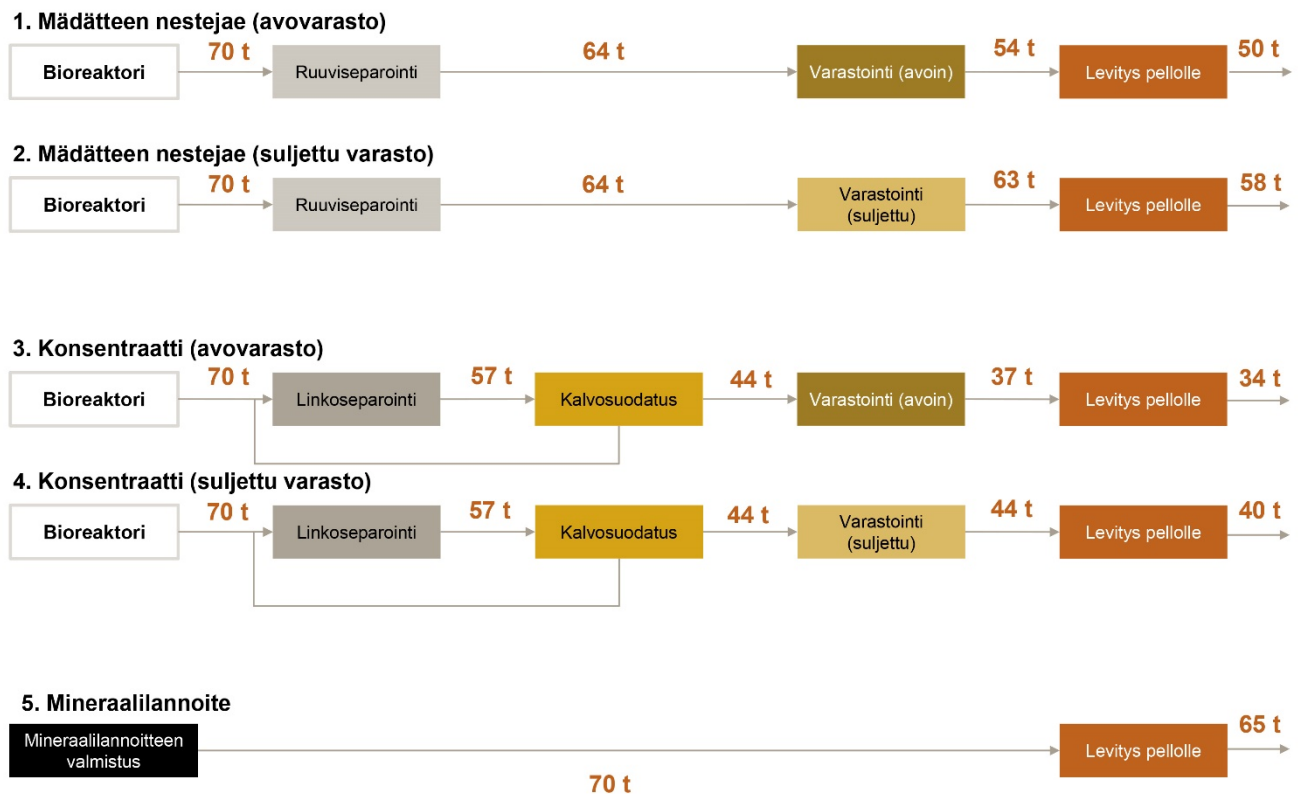
Kuva 8. Suljetun ja avoimen varastoinnin vaikutukset kokonaispäästöihin, suhteutettuna liukoisen tyypin määrään.

Tuloksista näkyy kuitenkin selvästi, että elinkaaren aikaisten kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen ero jää pieneksi. Suljetussa varastossa haihtuminen on vähäistä varastoinnin aikana, mutta vastaavasti peltoon päätyvän tuotteen suuremman tyyppipitoisuuden vuoksi pellolle levitettynä tyyppiä haihtuu enemmän verrattuna avoimen varastoinnin kautta levitettävään tyypilannoitteeseen (taulukko 9). Avoimessa varastossa päästöt ovat suuremmat varastoinnin aikana, mutta sitä vastoin pienemmät peltokäytön osalta. Käytännössä siis kummankin vaihtoehdon kasvihuonekaasupäästöt ovat lähes yhtä suuret. Suurempi huomio tulisikin keskittää kasvihuonekaasupäästöjen sijaan muodostuviin ammoniakkipäästöihin sekä tehokkaiden ravinnekiertojen toteutumiseen.

Taulukko 9. Prosessikohtaiset päästöt suljetussa ja avovarastossa.

kg CO ₂ e/kg liuk N	Ravinnekonsentraatti (sulj. varasto)	Ravinnekonsentraatti (avoin varasto)	Mädätysjäännöksen nestejake (sulj. varasto)	Mädätysjäännöksen nestejake (avoin varasto)	Mineraalilannoite
Valmistus	0,8	0,8	0,005	0,005	8,5
Varastointi	0,04	0,7	0,04	0,7	0
Kuljetus	0,8	0,8	2	2	0,2
Peltokäyttö	7,2	6,4	7,2	6,4	5,3
Summa	8,9	8,8	9,3	9,2	14,1

Kun typpitasetta tarkastellaan koko laitoksen tasolla, niin huomataan, että nestejakeessa hyötykäyttöön päätyy enemmän liukoista typpeä kuin ravinnekonstraatissa (kuva 9). Kalvosuodatuksessa koko typpimäärää ei saada talteen vaan osa päätyy permeaattiin, joka kiertää takaisin prosessiin. Prosessissa osa tuestä päätyy jälleen kuivajakeeseen ja osa nestejakeeseen ja kierto jatkuu. Lisäksi haihduntaa voi tapahtua eri vaiheissa, jolloin typen määrä vähenee. Määtysjäännöksen mukana separointiin tulee 70 tonnia liukoista typpeä, josta ruuviseparoinnilla päätyy 64 tonnia nestejakeeseen, linkoseparoinnilla vain 57 tonnia lingon tehokkaamman kuiva-aineen erotustehon takia. Jos nestejakeesta prosessoidaan ravinnekonstraattia, tarkoittaa tämä, että vain 44 tonnia menee eteenpäin nestejakeessa varastointiin. Huomioitavaa kuitenkin on, että separointitehokkuus vaikuttaa myös kuivajakeen typpipitoisuuteen. Linkoseparoinnin jälkeen kuivajakeessa on enemmän typpeä kuin ruuviseparoidussa kuivajakeessa. Myös kuivajakeen varastoinnissa ja levityksessä muodostuu typpihävikkejä, mutta ne on rajattu tässä tarkastelussa ulkopuolelle.



Kuva 9. Liukoisen typen eteneminen prosessivaihtoehdoissa.

Avoimen varastoinnin tapauksessa typpeä päätyy nestejakeessa ja ravinnekonstraatissa vähemmän pellolle kasvien käyttöön, mikä havainnollistetaan kuvassa 9 lukumäärällisesti. Riippuen siitä, onko kyseessä avoin vai suljettu varasto, häviää molemmista tuotteista typpeä varastoinnin aikana noin 1,5 % (suljettu varasto) tai 15 % (avoin varasto). Myös levityksen aikana tapahtuvat typpihävikit vähentävät kasveille käyttöön jäävää typen määrää.

Laitostasolla tarkasteltuna, ja etenkin, jos lukuihin lasketaan mukaan mineraalilannoitteen substitutiovaikutus (eli kuinka paljon vältetään mineraalilannoitteen valmistusta), aiheuttaa konsentraatin tuottaminen ja käyttö kolme kertaa niin paljon ilmastovaikutuksia kuin määtysjäännöksen nestejake. Tämä johtuu siitä, että konsentroidulla nestejakeella voidaan korvata vähemmän mineraalilannoitteita tarkastellulla rajauksella. Tulosten tulkintaan aiheuttaa kuitenkin haasteita tarkastelun rajausta, jossa kuivajakeita ei tarkastella osana systeemiä. Lisäksi tarkastelu keskittyy vain liukoisen typen hyödyntämiseen. Käytännössä kuitenkin typpeä haihtuu kuivajakeen käsittelyssä enemmän kuin nestejakeen tai ravinnekonstraatin käsittelyssä, niinpä tasetta eri jakeiden välillä tulisi tarkastella lähemmin. Peltoon

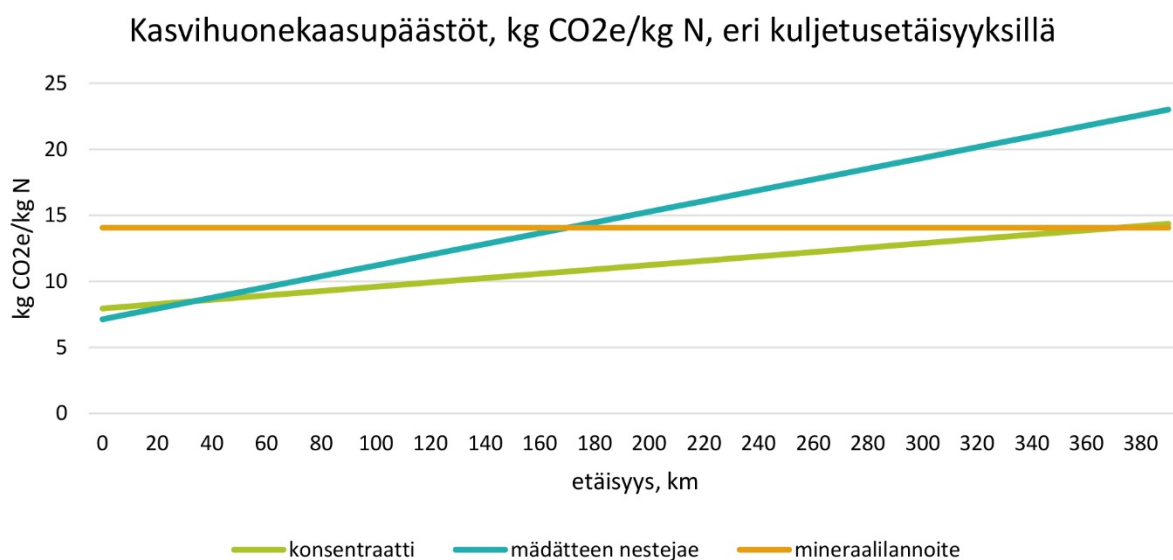
päätyvän kuivajakeen tyyppipitoisuus ja vaikutukset ravinteiden kierrätykseen ja ilmastoon tulisi myös laskea mukaan, kun kokonaisuutta tarkastellaan.

Laitoksen tuottama nestejake ja ravinnekonentraatti sisältävät pääosin liukoista typpeä, mutta ruuvilla separoidussa nestejakeessa on enemmän fosforia kuin linkoseparoidussa (ks. taulukko 1). Nestejakeen fosforipitoisuus voi rajoittaa sen levityskelpoisuutta etenkin alueilla, missä peltojen fosforipitoisuus on korkea. Myös linkoseparoituun nestejakeeseen ja siitä konsentroiduun lannoitevalmisteseen päätyy hiukan fosforia. Kun fosfori rajoittaa levitysmääriä, niin typen tarve pellolla ei todennäköisesti täyty nestejakeella levitettäessä, ja lannoitusta tulee täydentää mineraalilannoitteilla. Nestejakeen suurempi fosforipitoisuus voi johtaa siten pitempiin kuljetusmatkoihin, etenkin alueella, missä peltojen fosforipitoisuus on korkea.

c) Tulokset etäisyyden mukaan

Perusmallissa keskimääräinen kierrätyslannoitteen kuljetusetäisyys on 50 km. Todelliset kuljetusetäisyydet vaihtelevat ja niiden vaikutus lopputuloksiin on suhteellisen suuri verrattuna muihin prosesseihin. Tämän takia tehtiin kuljetusetäisyyksille herkkyysanalyysi, jossa kuljetettavan matkan pituutta tarkasteltiin 0-380 kilometrin vaihteluvälillä. Tämän herkkyysanalyysin avulla saatiin määriteltyä ns. breakeven-piste mädätysjäännöksen nestejakeen ja ravinnekonstraatin välille, eli missä vaiheessa kuljetushyödyt konstraatin pienemmästä massasta peittoavat valmistukseen käytetyn lisäenergian.

Kuten kuvasta 10 ilmenee, on mädätysjäännöksen nestejakeen ja ravinnekonstraatin välinen breakeven-piste kuljetusten osalta noin 34 km kohdalla. Eli jos kuljetus on alle 34 km, kannattaa ilmaston kannalta mädätysjäännöksen nestejake hyödyntää sellaisenaan pellolla. Mikäli etäisyys on yli 34 km, on ravinnekonstraatti ilmaston kannalta parempi vaihtoehto. Jos taas etäisyys on hyvin pitkä, eli yli 375 km, on mineraalilannoite ravinnekonstraattia parempi vaihtoehto lannoitukseen. Mineraalilannoite olisi ilmaston kannalta mädätysjäännöksen nestejakeetta parempi vaihtoehto, jos mädätysjäännöksen nestejakeetta pitäisi kuljettaa yli 170 km.



Kuva 10. Hiilijalanjäljen suhde kuljetusetäisyyteen.

5 Kannattavuus

5.1 Lähtöarvot ja oletukset

Kannattavuuslaskennassa tehtiin samat systeemin rajaukset kuin ilmastovaikutusten arvioinnissa. Biokaasuprosessi jätettiin kokonaisuudessaan rajauksen ulkopuolelle ja tarkasteluun otettiin ainoastaan hygienisoidun mädätysjäännöksen jatkojalostus separoimalla (nestejake) sekä separoimalla ja kalvosuodatuksella (ravinnekonsentraatti).

Jalostusprosessien kuluttaman sähkön oletettiin olevan BioKympin biokaasusta tuottamaa sähköä. Sähkön hintana käytettiin korvaushintaa myytävästä sähköstä (taulukko 10). Tähän lisättiin sähkövero, koska mädätysjäännöksen jatkojalostus ei ole sähköverosta vapaata toimintaa. Sähkönsiirtomaksua ei kuitenkaan jouduta tässä tapauksessa maksamaan, koska toiminta tapahtuu samalla tontilla.

Tehdyille laiteinvestoinneille oletettiin saavan investointitukea 30 %. Tämä on kirjoitushetkellä biokaasun yritystoiminnalle myönnettävä enimmäistuki. Sanna Marinin hallitusohjelmassa on tarkoitus tukea erikseen kierrätysravinteiden valmistusta lannasta ja biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä. Tukimuoto ja tuen määrä ovat kuitenkin edelleen valmistelussa tämän raportin kirjoitushetkellä.

Kannattavuuslaskennassa oletettiin, että biokaasulaitos maksaa mädätysjäännöksen separoinnissa syntyvän nestejakeen varastoinnin, kuljetuksen ja levityksen. Biokaasulaitos saa nykykäytännön mukaan nestejakeesta tuloa 1 €/kg liukoisia ravinteita (N, P ja K kaikista erikseen, mutta sama hinta) peltoon levitettynä, mikä vastaa suunnilleen mineraalilannoitteiden hintaa. Kun nestejakeesta valmistetaan ravinnekonsentraattia, varastointi-, kuljetus- ja levityskustannukset laskevat. Jalostus kuitenkin aiheuttaa myös lisää kustannuksia, joita ovat sähkö, kemikaalit, työ, huollot ja korjaukset sekä laitteiden investointikustannukset. Ravinnekonsentraatista oletettiin saatavan myös mineraalilannoitteita vastaava hinta, eli 1 €/kg liukoisia ravinteita (N, P, K) peltoon levitettynä. BioRaEE-hankkeessa tehtyjen viljelykokeiden tulosten perusteella todettiin ravinnekonsentraatin olevan lannoitteena yhtä hyvä kuin vastaava mineraalilannoite, mikä puoltaa nykykäytännön mukaista hinnoittelua (Horn ym. 2020).

Taulukko 10. Kannattavuuslaskennassa käytettyjä hintatietoja.

	Hinta (alv 0)	Viite
Sähkö	76,65 €/MWh	Korvaushinta Biokympin tuottamasta sähköstä + sähkövero
Rikkihappo (37%)	0,63 €/dm ³	BioKympin hintatieto
Suolahappo (33%)	1,19 €/dm ³	BioKympin hintatieto
Emäspesuaine (Pintty)	2,07 €/dm ³	BioKympin hintatieto
Työ, tuntihinta	25,80 €/h, ml. sivukulut	Palva 2019
Kuljetus	8,62 €/t/100 km	BioKympin arvio
Levitys	2,83 €/m ³	Palva 2019
Ruuvipuristin	30 000 €	BioKympin arvio
Dekantterilinko	103 500 €	Alfa Laval lietalinko ALDEC 75
Kalvosuodatuslaitteisto	600 000 €	Landco, BioKympin arvio
Sekoitin varastoaltaaseen	15 000 €	BioKympin arvio
Varastoallas (2 500 m ³)	100 000 €	BioKympin arvio
Kiinteä vesikate varastoaltaaseen	80 €/m ²	MMM 2016
Investointituki	30 %	
Annuiteetin laskentakorko	4 %	
Käyttöikä, tekniikka	10 vuotta	
Käyttöikä, rakenteet	20 vuotta	

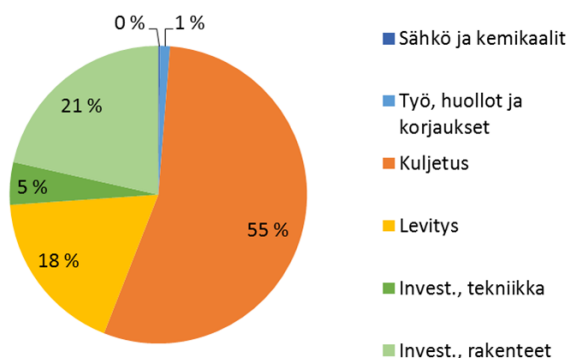
5.2 Tulokset

Tehdyillä lähtöoletuksilla, joista tärkein oli tuotteiden kuljetusmatka eli peltojen etäisyys laitoksesta (50 km), kierrätyslannoitevalmisteen tuotannon ja käytön kokonaiskustannukset jäivät nestejakeella alhaisemmiksi (153 810 €, Liite 1) kuin ravinnekonentraatilla (215 739 €, Liite 2). Sekä nestejakeen että ravinnekonentraatin valmistus ja käyttökustannukset aiheutuvat prosessien kuluttamasta sähköstä ja kemikaaleista, tarvittavasta työpanoksesta, huolto- ja korjauskustannuksista sekä lopputuotteen kuljetuksesta ja levityksestä. Tuloja saadaan kummastakin tuotteesta ravinnepitoisuuden mukaan. Investointikustannuksen muodostavat vaaditut laitteet ja varastointikapasiteetti.

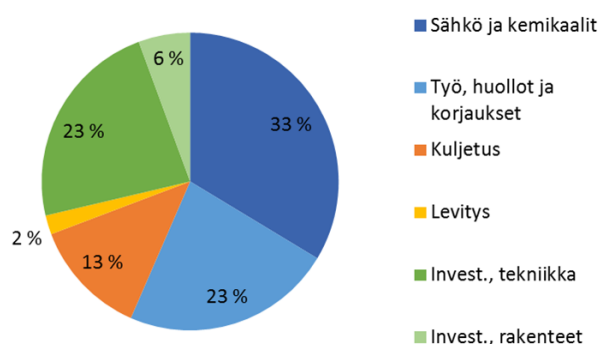
Nestejakeesta aiheutuvista kustannuksista suurin on kuljetus (kuva 11). Kuljetuskustannus laskettiin syntyvän nestejakeen määrän ja kuljetusetäisyyden perusteella. Keskimääräiseksi kuljetusetäisyydeksi laitokselta pelloille arvioitiin 50 km, jolloin edestakaiseksi kuljetusmatkaksi saadaan 100 km. Seuraavaksi suurin kustannus aiheutuu varastoaltaiden vuosittaisista poistoista. Kaiken nestejakeen varastointiin tarvitaan seitsemän kooltaan 2 500 m³ olevaa katettua varastosäiliötä, jotka on varustettu sekoittimella. Kolmanneksi suurin kustannuserä muodostuu levityksestä lietteenlevityskalustolla.

Ravinnekonentraatin valmistuskustannuksista suurin osa aiheutuu sähkön ja kemikaalien kulutuksesta (kuva 11). Kalvosuodatuksessa tarvitaan myös vettä kalvojen pesuun. Tarkastelussa oletettiin, että käänteisosmoosin permeaattina syntyvä vesi on riittävän puhdasta käytettäväksi prosessivetenä eikä vettä siten tarvitse tätä varten ostaa. Kaksi seuraavaksi suurinta kustannuserää ovat työ, huollot ja korjaukset sekä laitteiston investointikustannukset. Ravinnekonentraatin varastointi, kuljetus ja levitys ovat puolestaan huomattavasti nestejakeetta edullisempia johtuen noin neljäsosaan jäävästä nestetilavuudesta. Tämän lisäksi BioKymppi arvioi levityskustannuksen ravinnekonentraattia varten kehitetyllä laitteistolla olevan noin puolta pienempi tilavuutta kohti kuin tavanomaisella lietteenlevityskalustolla.

Nestejake:



Ravinnekonentraatti:



Kuva 11. Mädätysjäännöksestä ruuvipuristimella separoidun nestejakeen sekä linkoseparoidun ja kalvosuodatetun ravinnekonentraatin suhteelliset valmistus- ja käyttökustannukset.

Sekä nestejakeen että ravinnekonentraatin lannoitekäytöstä saadaan myös tuloja (taulukko 11). Nykykäytännön mukaan tämä on 1 €/kg liukoisia ravinteita (N, P, K) peltoon levitettynä, mikä vastaa suunnilleen mineraalilannoitteiden hintaa. Ruuvipuristimella erotettuun nestejakeeseen päätyy suurempi osa mädätysjäännökseen sisältämistä ravinteista kuin tehokkaammin lingolla separoituun ja kalvosuodatettuun ravinnekonentraattiin, minkä vuoksi siitä saadaan myös enemmän tuloja. Ravinnekonentraatin valmistuksessa suurempi osa ravinteista päätyy linkoseparoinnissa kuivajakeeseen. Nykytilanteessa puolestaan nestejake erotetaan ruuvipuristimella, jonka ravinteiden ja orgaanisen aineen erotusteho on linkoa heikompi ja sisältää siksi myös kalvosuodatukselle haitallista pienikokoista kiintoainesta. Onkin tapauskohtaisesti tärkeää pohtia kokonaisuutta: onko tarkoituksenmukaista maksimoida fosforin, orgaanisen typen ja orgaanisen aineen erotus kuivajakeeseen niiden kierrättämisen maksimoimiseksi vai riit-

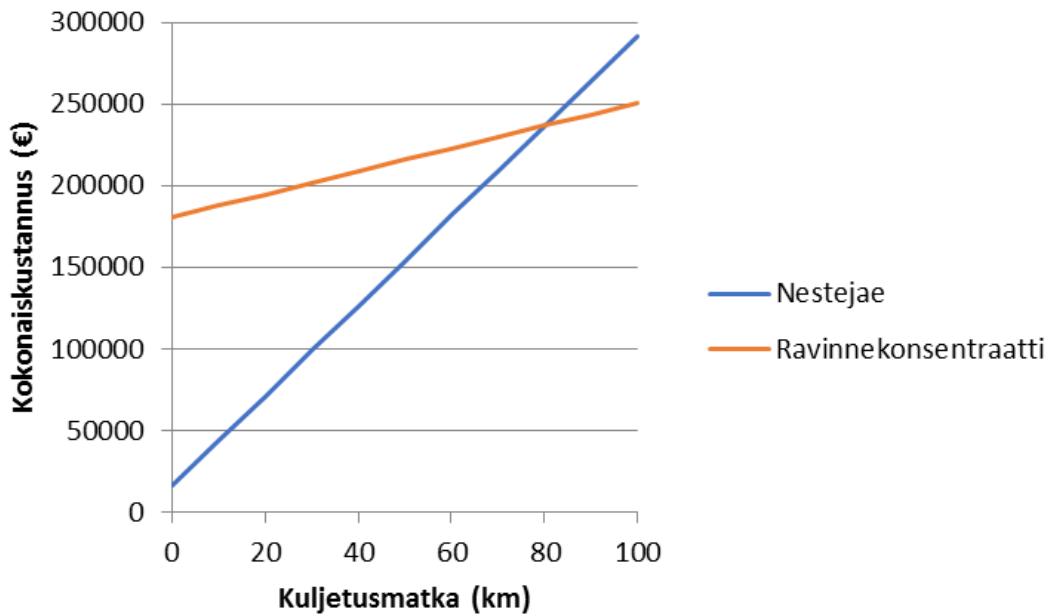
tääkö vähäisempikin erotusteho ruuvipuristimella siten, että kuivajakeelle ja nestejakeelle on soveltuvat käyttökohteet sopivin logistisin järjestelyin ja ravinteiden tarpein. Esimerkiksi voimakkaan fosforin ylijäämän alueella voi tehokas fosforin erotus kuivajakeeseen olla välttämätöntä, jotta juuri se voidaan kuljettaa alueelta pois ja jäljelle jäävän typen käyttö lähialueella tehostuu. Näitä tekijöitä ei tässä hankkeessa tarkasteltu.

Taulukko 9. Määtysjäännöksestä ruuvipuristimella separoidun nestejakeen sekä linkoseparoidun ja kalvosuodatetun ravinne-konsentraatin valmistus- ja käyttökustannukset sekä tulot ja vuositulos.

	Nestejae (€)	Ravinne-konsentraatti (€)
Sähkö ja kemikaalit	-518	-92 360
Työ, huollot ja korjaukset	-2 682	-62 945
Kuljetus	-137 743	-34 904
Levitys	-45 200	-5 727
Investoinnit: tekniikka	-11 651	-63 304
Investoinnit: rakenteet	-54 083	-15 452
Kustannukset yht.	-251 876	-274 692
Tulot	98 066	58 953
Kaikki yht.	-153 810	-215 739

Ravinne-konsentraatin valmistusprosessia on kuitenkin edelleen mahdollista optimoida tässä esitettyä tilannetta tehokkaammaksi paremman kannattavuuden saavuttamiseksi. Määtysprosessin viipymää pidentämällä määtysjäännökseen jäisi todennäköisesti vähemmän orgaanista ainesta, jolloin se mahdollisesti erottuisi paremmin myös ruuvilla. Tämä tosin riippuu orgaanisen aineksen partikkelikoosta ja ruuvin operointiparametreista (puristusvoima ja seulakoko). Mikäli ravinteiden erottuminen tehostuisi joko em. syystä tai ottamalla käyttöön linkoseparoinnin, kalvosuodatukselle ohjattavan nestejakeen liukoisien typen pitoisuus voisi olla alkutilanteessa korkeampi ja toisaalta fosforin pitoisuus alhaisempi. Tämä muuttaisi myös lannoitusperustetta, joka nestejakeella saattaa nykyisellä ruuvilla määräytyä fosforin mukaan, kun taas fosforin erottuessa paremmin sekä nestejakeen että ravinne-konsentraatin levitys määräytyisi typen mukaan. Myös kalvosuodatuksen liukoisien typen erotustehokkuutta voisi parantaa optimoimalla kalvon ominaisuuksia. Nyt käytössä olevalla ultrasuodatuskalvolla merkittävä osa liukoisesta tyydestä jää retentaattiin, joka kiertää takaisin biokaasuprosessiin. Myös kalvon rakenteella voi olla merkitystä suodatustulokselle, kuten hankkeessa toteutetuissa laboratorikokeissa havaittiin.

Ravinne-konsentraatin valmistuksessa merkittävimäksi säästökseen osoittautui alhaisempi kuljetuskustannus. Tässä oletettu 50 km:n keskimääräinen etäisyys laitokselta peltoille ei kuitenkaan riittänyt kattamaan ravinne-konsentraatin valmistuksesta aiheutuvia suurempia kustannuksia. Jos etäisyys olisi ollut vähintään 80 km, olisi ravinteiden väkevöinti ollut edullisempaa (kuva 12). Riippuu laitoksen sijainnista, millaisia peltoja lähialueella on, mitä niillä tuotetaan, missä ravinteita näin ollen tarvitaan ja minkä ravinteiden perusteella lannoitus voidaan suunnitella.



Kuva 12. Määtysjäännöksestä ruuvipuristimella separoidun nestejakeen sekä linkoseparoidun ja kalvosuodatetun ravinnekonsentraatin kokonaiskustannukset kuljetusmatkaan suhteutettuna.

Myöskään ravinteiden nykyinen hinnoittelu BioKympin lähialueella ei tee oikeutta ravinnekonsentraatille. Nykytilanteessa arvoa lasketaan kaikille ravinteille, mutta monilla alueilla kuitenkin fosfori rajoittaa lannoitteiden käyttöä, jolloin päinvastoin hyvin vähän fosforia (0,1 g/kg) sisältävälle lannoitteelle löytyy enemmän kysyntää. Eri ympäristössä ja erilaisessa käytössä ravinnekonsentraatista voisi saada myös nestejaetta enemmän tuloja. Ravinnekonsentraatille on tunnistettu myös muita etuja sekä viljelijän että ympäristön kannalta, joita tässä kannattavuustarkastelussa on vaikea muuttaa euroiksi:

- Kevyempi kalusto: vähemmän vaikutusta pellon tiivistymiseen.
- Leveämpi työleveys: konsentraatti nopeampi levittää.
- Sisältää vain hyvin vähän fosforia: sopii myös korkean P-luvun pelloille.
- Sisältää myös rikkiä: usein toivottava lisäravinne.
- Ohuempi ja juoksevampi koostumus: imeytyy maaperään paremmin.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Kierrätyslannoitevalmisteet osoittautuvat tarkastelussa mineraalilannoitetta vähäpäästöisemmiksi vaihtoehtoiksi. Erot kahden eri kierrätyslannoitevalmisteen (mädätysjäännöksen nestejakeen ja ravinnekonentraatin) välillä eivät olleet suuria (n. 4 %). Lannoitevalmisteesta riippuen päästöt voivat muodostua eri vaiheissa tuotanto- ja käyttöketjua. Kierrätyslannoitevalmisteet sisältävät useita eri ravinteita, kuten fosforia sekä liukoista että orgaanista typpeä.

Ravinnekonentraatin valmistaminen biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä separoidusta nestejakeesta ei lisää tulosten mukaan kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna pelkkään separoituun nestejakeeseen, kun tarkastellaan päästöjä typpikiloa kohden. Tulos tukee sitä, että ravinnekonentraattia on ilmastonäkökulmasta järkevää valmistaa etenkin silloin, kun ravinteiden tehokas hyödyntäminen edellyttää pitkiä kuljetusmatkoja. Ruuviseparoidun nestejakeen fosforipitoisuus on suurempi kuin linkoseparoidussa ja kalvosuodatetussa ravinnekonentraatissa. Korkeampi fosforipitoisuus saattaa rajoittaa nestejakeen lannoitekäyttöä konentraattia enemmän etenkin alueilla, missä peltojen fosforipitoisuus on korkea.

Mädätysjäännöksen kalvosuodatus mahdollistaa lopputuotteen pienemmän massan, jolloin sen kuljettaminen aiheuttaa vähemmän päästöjä verrattuna nestejakeen kuljettamiseen typpikiloa kohden lasketuna. Lyhyillä etäisyyksillä mädätysjäännöksen nestejake on ilmaston kannalta parempi vaihtoehto, sillä pienillä etäisyyksillä (alle 30 km) ravinnekonentraatin tuotantoon vaadittu lisäenergian käyttö aiheuttaa kuljetusten päästövähennemää suuremman lisäpäästön. Samanaikaisesti suurempi osa typestä päätyy kuivajakeeseen.

Tarkastelussa typpeä päätyi ravinnekonentraattiin vähemmän kuin ruuvilla separoituun nestejakeeseen. Ero muodostui ravinnekonentraatin valmistuksessa käytetystä tehokkaammasta linkoseparoinnista ja kalvosuodatuksesta. BioKymppin tapauksessa linkoseparoinnin käyttö oli kuitenkin perusteltua, koska ruuviseparoinnin heikko orgaanisen hienoaineksen erotusteho häiritsi kalvosuodatusprosessia. Myös ravinteiden ja erityisesti fosforin tehokkaammasta erottumisesta kuivajakeeseen on hyötyä, jos halutaan tuottaa erikseen fosforia sisältävää ja toisaalta lähes fosforivapaata kierrätyslannoitevalmistetta. Ruuviseparoinnin sijaan linkoseparoinnilla tuotettua nestejaetta tarkasteltiin tässä työssä vain kalvosuodatuksen yhteydessä, mutta lingon tehokkaampi ravinteiden erotuskyky voisi mahdollistaa tehokkaamman nestejakeen hyödyntämisen myös sellaisenaan, mikäli fosforin levitystä nestejakeen muodossa halutaan vähentää ja nestejaetta hyödyntää nimenomaan typpilannoitteena.

Jos tuloksia tarkastellaan laitostasolla typen ja ilmastovaikutusten näkökulmasta, ravinnekonentraattiin päätyy vähemmän typpeä kuin nestejakeeseen, ja ravinnekonentraatin valmistus on ilmastonäkökulmasta huonompi vaihtoehto. Tällöin suurempi osa syötteen sisältämästä typestä päätyy kuivajakeeseen, jonka tuotantoketju rajattiin tämän tarkastelun ulkopuolelle. Kuivajakeen typpipitoisuuden parantaminen voi kuitenkin olla hyödyllistä paremman typen ja fosforin suhteen ja siten lannoitevaikutuksen saavuttamisen vuoksi. Tulee kuitenkin huomioida, että kuivajakeen varastoinnista ja levityksestä aiheutuvat typpihävikit voivat olla nestejaetta ja ravinnekonentraattia suuremmat, kun riski ammoniakkipäästöihin kasvaa. Tarkastelua tulisikin täydentää myös kuivajakeen huomioimisella, jotta kokonaisvaikutuksia voitaisiin arvioida tarkemmin.

Ravinnekonentraatin valmistuksesta aiheutuvat lisäkustannukset olivat suurempia kuin sen varastoinnissa, kuljetuksessa ja levityksessä voitiin nestejakeeseen verrattuna säästää. Tulos kuitenkin riippuu paljon oletetusta kuljetusmatkasta, joka tässä arvioitiin 50 kilometriksi. Jos etäisyys olisi ollut yli 80 km, olisi ravinnekonentraatin valmistus ollut kannattavaa, sillä ravinnekonentraattia on mahdollista kuljettaa huomattavasti pidempiä matkoja kuin nestejaetta. Lisäksi se sisältää vain vähän fosforia. Näin ollen sille on mahdollista löytää uusia käyttötapoja ja -kohteita. Tuotetta onkin jo kokeiltu puutarha- ja kasvihuoneviljelyssä. Se soveltuisi myös typen ja fosforin erottamiseen ja lisäksi edellytyksiä hyödyntää typpeä ja kuljettaa pois fosforia alueilla, joilla on fosforiylijäämää. Kalvosuodatuksen sisältävässä proses-

siketjussa on kuitenkin vielä teknistä kehittämistä sekä prosessin toimivuuden että lopputuotteiden koostumuksen optimoimiseksi, kuten myös hankkeessa tehdyt laboratoriokokeet osoittivat.

Ravinnekiertojen kannalta kokonaisuudessaan parhaan toimintatavan valinnassa tulisi laitoskohtaisesti arvioida typen lisäksi myös fosforin käytön mahdollisuuksia tapauskohtaisesti vaihtelevissa olosuhteissa (ottaen huomioon mm. alueen ravinteiden tarjonta ja tarve), mitä tässä tarkastelussa ei tehty. Tässä tarkastelussa pääpaino oli ilmastovaikutusten arvioinnissa, ja on hyvä huomata, että vaikutukset muissa ympäristövaikutusluokissa voivat olla ilmastovaikutukselle ristikkäisiä. Kokonaisuuden kannalta ympäristövaikutuksia tulisikin arvioida laajemmin kuin pelkästään ilmastovaikutuksia tarkastellen. Olennaisinta ravinnekiertojen ja ilmaston näkökulmasta on hyödyntää ravinteet tehokkaasti ja minimoida mineraalilannoitteiden tarve.

Sanasto

CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CO ₂	Hiilidioksidi
CO ₂ ekvivalentti, CO ₂ e	Hiilidioksidiekvivalentti, kasvihuonekaasupäästöjen yksikkö
dm ³	kuutiodesimetri (litra)
ISO	Kansainvälinen standardisointijärjestö
K	Kalium
km	kilometriä
LCA	Elinkaariarviointi
LCIA	Ympäristövaikutusten arviointimenetelmä
m ²	Neliometri
MWh	Megawattituntia
N	Typpi
N ₂	Typpikaasu
N ₂ O	Dityppioksidi
NaOH	Lipeä
NF	Nanosuodatus
NH ₃	Ammoniakki
NO	Typpioksidi
NO ₂	Typpidioksidi
N liuk	Liukoinen typpi
N tot	Kokonaistyyppi
P	Fosfori
P tot	Kokonaisfosfori
PEF	Tuotteen ympäristöjalanjälki
pH	Happamuus
RO	Käänteisosmoosi
t	tonnia
TWh	Terawattituntia
TS	Kuiva-aine
UF	Ultrasuodatus

Lähteet

- Acero, A., Rodriguez, C. & Ciroth, A. 2017. LCIA Methods – Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. Version 1.5.6. GreenDelta, Berlin. 23 s. https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/openLCA_LCIA_METHODS-v.1.5.6.pdf [Vierailtu 8.7.2020]
- Basosi, R., Spinelli, D., Fierro, A. & Jez, S. 2014. Mineral Nitrogen Fertilizers: Environmental Impact of Production and Use. Teoksessa: López-Valdez, F., Fernandez-Luqueno, F. (toim.), Fertilizers: Components, Uses in Agriculture and Environmental Impacts. Nova Science Publishers.
- Brentrup, F. 2009. The impact of mineral fertilizers on the carbon footprint of crop production. The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI. University of California, USA.
- BioKymppi 2020a. BioKymppi: Yritys. https://bio10.fi/?page_id=15 [Vierailtu 12.3.2020]
- BioKymppi 2020b. BioKymppi: Prosessi https://bio10.fi/?page_id=37 [Vierailtu 25.3.2020]
- BioKymppi 2020c. Kiteen biokaasulaitoksen toimintavuosi 2019. Lähetetty 27.2.2020 Pohjois-Karjalan ELY-keskukseen.
- Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J.W., 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383: 3–41.
- Camilleri-Rumbaua, M., Popovicb, O., Briceñoa, K., Erricoa M., Fjerbæk, L., Knud, S., Christensena, V. & Norddahl, B. 2019. Ultrafiltration of separated digestate by tubular membranes: Influence of feed pretreatment on hydraulic performance and heavy metals removal. *Journal of Environmental Management* 250.
- Celestina, C., Hunt, J.R., Sale, P.W.G. & Franks, A.E., 2019. Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. *Soil and Tillage Research* 186: 135–145.
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D. & Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research, Soil Carbon and Climate Change: the 4 per Mille Initiative* 188: 41–52.
- EIP AGRI 2017. EIP AGRI Focus Group on Nutrient Recycling: Final Report. EIP AGRI, Brussels. https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_fg_nutrients_recycling_final_report_2017_en.pdf [Vierailtu 21.7.2020]
- EMEP/EEA 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Report No 21/2016. 24s.
- Grönroos, J. 2014. Maatalouden ammoniakkipäästöjen vähentämismahdollisuudet ja –kustannukset. Ympäristöministeriön raportteja 26/2014.
- Grönroos, J., Munther, J. & Luostarinen, S. 2017. Calculation of atmospheric nitrogen and NMVOC emissions from Finnish agriculture. Description of the revised model. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 37.
- Guilaynab, F., Jimenez, J., Rouezb, M., Crestb, M. & Patureau, D. 2019. Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice. *Bioresource Technology* 274.
- Harmsen, K., Loman, H. & Neeteson, J.J. 1990. A derivation of the Pierre-Sluijsmans equation used in the Netherlands to estimate the acidifying effect of fertilizers applied to agricultural soils. *Fertilizer Research* 26: 319–325.
- Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L., Sommer, S.G. 2010. Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30: 153–180. <https://doi.org/10.1051/agro/2009010>. [Vierailtu 8.7.2020]
- Horn, S.; Seppänen, A-M.; Winquist, E.; Kokkonen, A.; Juvonen, M.; Vänskä, J. 2020. Biokaasulaitoksesta ravinteita, energiaa ja elinkeinotoimintaa maaseudulle - BioRaEE-hanke. Loppuraportti. Käsikirjoitus lähetetty julkaistavaksi EIP Agri-sivustolla (<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/eip-agri-projects>)
- 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). Published: IGES, Japan. ISBN 4-88788-032-4.
- ISO 14040: 2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.
- Kujala, M. 2012. Biosampo koulutus- ja tutkimuskeskuksen hitaan pyrolyysireaktorin koeajo. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Teknologiaosaamisen johtaminen. Opinnäytetyö. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48984/Kujala%20Mia.pdf?sequence=1>. [Vierailtu 25.5.2020.]
- Laitinen, A. 2015. Kolmivaiheisen pyrolyysiprosessin mallintaminen. Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos. Pro Gradu -tutkielma. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/48787/URN:NBN:fi:jyu-201602151576.pdf?sequence=1>. [Vierailtu 25.5.2020.]

- Lukehurst, C., Frost, P. & Al Seadi, T. 2010. Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. IEA Bioenergy http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/publi-task37/Digestate_Brochure_Revised_12-2010.pdf [Vierailtu 8.7.2020]
- Malila, R., Viskari, E.-L. & Kallio, J. 2019. Virtsan ravinteet kiertoon. MORTTI-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 49.
- Marttinen, S., Suominen, K., Lehto, M., Jalava, T. & Tampio, E. 2014. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjäännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 135.
- Marttinen, S., Luostarinen, S., Winquist, E. & Timonen, K. 2015. Rural biogas: feasibility and role in Finnish energy system. BEST suitable Bioenergy Solutions for Tomorrow. Research Report no 1.1.3-4.
- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turto, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., K., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A. & zu Castell-Rüdenhausen, M. 2017. Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjaukeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2017.
- Mattila, T. 2019. Lähestymistapoja lannoitus suunnitteluun – Kierrätysravinteiden haasteita. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2019.
- Mattila, T.J. & Rajala, J. 2018. Kationinvaihtokapasiteetin määrittäminen ja käyttö viljavuusanalyysin tulkinnaissa. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, Mikkelä.
- MMM (Maa- ja metsätalousministeriö) 2016. Maa- ja metsätalousministeriön asetus maatalouden investointien hyväksyttävistä yksikkökustannuksista 1559/2016. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161559>
- Motiva 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. Motiva, Helsinki. https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf [Vierailtu 2.6.2020]
- NPHarvest 2020. <https://www.aalto.fi/fi/npharvest> [Vierailtu 8.7.2020]
- Paavola, T. 2015. Määtysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. Teoksessa Kymäläinen, M. ja Pakarinen, O. (toim.), Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen (s. 94-113). Hämeen ammattikorkeakoulu, Hämeenlinna.
- Palva, R. 2019. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat, TTS:n julkaisu 447. https://www.tts.fi/files/2480/Konetyon_kustannukset_ja_tilastolliset_urakointihinnat_20.9.2019.pdf [Vierailtu 21.7.2020]
- Pradhan, S.K., Mikola, A., Sihvonen, M. & Vahala R. 2018. Nitrogen and phosphorus harvesting from liquid waste using membrane (GPHM) – Market potential study: NPHarvest technique - Market potential study. Aalto University publication series, Science + Technology 3/2018.
- Pradhan, S.K., Mikola, A. & Vahala, R. 2019. Nitrogen and phosphorus harvesting from liquid waste using gas permeable hydrophobic membrane (GPHM). NPHarvest – A business model study. Aalto University publication series, Science + Technology 3/2019.
- Ravander, J., Mattila, T.J. & Rajala, J. 2019. Murekestävyys maan kasvukunnon mittarina. Helsingin yliopisto Ruraliainstituutti. Julkaisuja 191.
- Ravinteiden kierrätyksen seurantarayhmä 2019. Ravinteiden kierrätyksen toimenpideohjelma 2019-2030, ”Kokeiluista tuloksiin – ravinteiden kierrätyksen arkea”. Ympäristöministeriö, Maa- ja metsätalousministeriö, Työ- ja elinkeinoministeriö, Valtiovarainministeriö. <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BD7F9043A-0090-4785-B029-9C119B566BDD%7D/146284> [Vierailtu 1.3.2020]
- Sakthivel, S.R., Tilley, E. & Udert, K.M. 2012. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. Science of the Total Environment 419: 68-75.
- Seppänen, A., Laakso, J. & Luostarinen, S. 2018 Sivuvirrasta väkilannoitteen korvaajaksi: Määtysjäännöksen jalostusteknologioiden nykytila, tarpeet ja tulevaisuuden mahdollisuudet Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 31/2018.
- Seppänen, A., Luostarinen, S. & Pesonen, L. 2019. Kierrätyslannoitus: suunnittelu, käytännöt ja mahdollisuudet tulevaisuudessa. Luonnonvarakeskus, Helsinki. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/544071/LUKE_Kierr%C3%A4tyslannoitus_opas.pdf?sequence=5&isAllowed=y [Vierailtu 21.7.2020]
- Summala, O. 2020. BioKympin kuvaus ja prosessikuvaus. Sähköpostiviesti 25.3.2020 Susanna Hornille.
- SYKE (Suomen ympäristökeskus) 2017. Suomen sähkönhankinnan päästöt elinkaarilaskelmissa. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Resurssitehokkuus/Elinkaariajattelu/Sahkonhankinnan_paastot [Vierailtu 20.3.2020]

- Tontti, T., Kapuinen, P., Ojajärvi, J., Joki-Tokola, E., Laurila, M., Ikäläinen, T., Kekkonen J. & Veijalainen, A. 2015. Orgaanisten lannoitevalmisteiden varastointi, levittäminen ja annostelu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2015
- TEM (Työ- ja elinkeinoministeriö) 2020. Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3.
- Valtioneuvosto 2019. Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Pääministeri Antti Rinteen hallituksen ohjelma 6.6.2019. Valtioneuvosto, Helsinki. Valtioneuvoston julkaisuja 2019:23. 2014. http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161662/Osallistava_ja_osaava_Suomi_2019_WEB.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Vierailtu 21.7.2020]

Liitteet

Liite 1. Nestejakeen valmistuksen kustannukset ja tulot.

Käyttökustannukset		MWh/v	€/MWh	€/v
Sähkö (ruuvi)		6,8	-76,65	-518
		h/v	€/h	€/v
Työ		40	-25,80	-1 032
Huolto ja korjaus (ruuvi)	5% investointi-hinnasta			-1 500
Vakuutus	0,5% investointi-hinnasta			-150
	t/v	km	€/t/100 km	€/v
Kuljetus	15 972	100	-8,62	-137 743
	m3/v		€/m3	€/v
Levitys	15 972		-2,83	-45 200
Käyttökustannukset			yht.	-186 142
Tulot		t/v	€/kg	€/v
Nestejake	N liuk	63,9	1,00	63 887
	P tot	10,2	1,00	10 222
	K	24,0	1,00	23 957
Tulot			yht.	98 066
Investointikustannukset				
Tekniikka (10 vuotta)			€	€ tuettu
Ruuvipuristin			30 000	
Sekoitin varastoaltaaseen	15 000	7	105 000	
		yht.	135 000	94 500
		Annuiteetti (4%)		-11 651
Rakenteet (20 vuotta)	€	kpl	€	
Varastoallas (2 500 m ³)	100 000	7	700 000	
Kiinteä vesikate	50 000	7	350 000	
		yht.	1 050 000	735 000
		Annuiteetti (4%)		-54 083
Investointikustannukset		Annuiteetti	yht.	-65 734
Vuosittaiset kustannukset ja tulot			yht.	-153 810

Liite 2. Ravinnekonsentraatin valmistuksen kustannukset ja tulot.

Käyttökustannukset		MWh/v	€/MWh	€/v
Sähkö (linko)		47,9	-76,65	-3 668
Sähkö (kalvosuodatus)		412,7	-76,65	-31 630
		m3/v	€/m3	€/v
Vesi		941,7	0	0
Rikkihappo (37%)		55,6	-635	-35 295
Suolahappo (33%)		11,9	-1 190	-14 113
Emäspesuaine		3,7	-2 065	-7 653
		h/v	€/h	€/v
Työ		940	-25,80	-24 252
Huolto ja korjaus (linko)	5% investointi- hinnasta			-5 175
Huolto ja korjaus (kalvosuodatus)	5% investointi- hinnasta			-30 000
Vakuutukset	0,5% investointi- hinnasta			-3 518
	t/vuosi	km	€/t/100 km	€/v
Kuljetus	4 047	100	-8,62	-34 904
	m3/v		€/m3	€/v
Levitys	4 047		-1,42	-5 727
Käyttökustannukset			yht.	-195 936
Tulot		t/v	€/kg	€/v
Nestejäte	N liuk	40,2	1,00	40 183
	P tot	0,4	1,00	420
	K	18,4	1,00	18 350
Tulot			yht.	58 953
Investointikustannukset				
Tekniikka (10 vuotta)			€	€ tuettu
Dekantterilinko			103 500	
Kalvosuodatuslaitteisto			600 000	
Sekoitin varastoaltaaseen	15 000	2	30 000	
		yht.	733 500	513 450
		Annuiteetti (4%)		-63 304
Rakenteet (20 vuotta)	€	kpl	€	
Varastoallas (2 500 m ³)	100 000	2	200 000	
Kiinteä vesikate	50 000	2	100 000	
		yht.	300 000	210 000
		Annuiteetti (4%)		-15 452
Investointikustannukset		Annuiteetti	yht.	-78 756
Vuosittaiset kustannukset ja tulot			yht.	-215 739



ISBN 978-952-11-5229-0 (PDF)

ISBN 978-952-11-5228-3 (nid.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

ISSN 1796-1718 (pain.)