

Luonnonvara- ja  
biotalouden  
tutkimus 14/2015

# Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin

Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset

Sanna Marttinen, Elina Tampio, Taija Sinkko, Karetta Timonen,  
Sari Luostarinen, Juha Grönroos, Kaisa Manninen

# **Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin**

Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset

Sanna Marttinen, Elina Tampio, Taija Sinkko, Karetta Timonen,  
Sari Luostarinen, Juha Grönroos, Kaisa Manninen

Tutkimus toteutettiin Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksessa ja sen rahoitti  
Maa- ja metsätalousministeriö



ISBN: 978-952-326-067-2 (Painettu)

ISBN: 978-952-326-013-9 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-013-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Sanna Marttinen, Elina Tampio, Taija Sinkko, Karetta Timonen,  
Sari Luostarinen, Juha Grönroos, Kaisa Manninen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2015

Julkaisuvuosi: 2015

Kannen kuva: Biovakka Suomi Oy

## Tiivistelmä

Sanna Marttinen<sup>1</sup>, Elina Tampio<sup>1</sup>, Taija Sinkko<sup>2</sup>, Karetta Timonen<sup>2</sup>, Sari Luostarinen<sup>2</sup>, Juha Grönroos<sup>3</sup>, Kaisa Manninen<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Luonnonvarakeskus (Luke), Humppilantie, 31600 Jokioinen, etunimi.sukunimi@luke.fi

<sup>2)</sup> Luonnonvarakeskus (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki, etunimi.sukunimi@luke.fi

<sup>3)</sup> Suomen ympäristökeskus (Syke), Mechelininkatu 34a, PL 140, 00251 Helsinki, etunimi.sukunimi@ymparisto.fi

Työn tavoitteena oli tarkastella lantaa käsittelevän biokaasulaitoksen kokonaisketjua raaka-aineiden hankinnasta tai varastoinnista lopputuotteiden käyttöön sekä tunnistaa ketjun energia- ja ravinnetaseiden sekä ympäristövaikutusten näkökulmasta parhaat toimintatavat. Työ jakautui kahteen osaan: osa 1 tarkastelee laitosta (käsittelykapasiteetti 19 500 t/a), jonka pääsyöte on lanta ja vertailee kolmen lisäsyötteen vaikutusta taseisiin ja ympäristövaikutuksiin. Osa 2 tarkastelee erilaisia käsittelyjäännöksen jatkojalostusvaihtoehtoja kokoluokaltaan 100 000 t/a biokaasulaitoksessa. Biokaasulaitoksen taseet ja ympäristövaikutukset riippuvat käytetyistä syötteistä ja prosesseista, joten tämän työn tuloksia ei voi suoraan yleistää koskemaan yksittäisiä laitoksia. Tulokset osoittavat kuitenkin eri osaprosessien suhteellista merkitystä taseiden ja ympäristövaikutusten kannalta.

Lietelannan lisäsyötteinä käytetyillä lietelannan kuivajakeella, HVP-nurmella ja elintarviketeollisuuden sivutuotteella oli vain pieni vaikutus käsittelyjäännöksen ominaisuuksiin, kun lisäsyötteen määrä oli alle 20 % kokonaismäärästä.

Syötteen massa noin 8 % muuttui biokaasuksi ja 92 % muodosti käsittelyjäännöstä. Käsittelyjäännös voidaan separoida neste- ja kuivajakeiksi tuotteen kuljetettavuuden ja käytettävyyden parantamiseksi. Käsittelyjäännöksen separoinnissa noin 80 % massasta päättyy nestejakeeseen ja 20 % kuivajakeeseen. Ravinteista noin 70 % kokonaistypestä päättyy nestejakeeseen ja 70 % fosforista kuivajakeeseen.

Lietelannan lisäsyötteen tuottivat 37–53 % biokaasulaitoksella muodostuvasta metaanin kokonaismäärästä, vaikka niiden osuus oli vain alle 20 % syötteen kokonaismassasta. Tarkastelluissa biokaasuketjuissa koko ketjun energiankulutus oli 23–35 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä, jolloin ylijäämäenergiaa jäi 65–77 %.

Ympäristövaikutusten kannalta kaikki tarkastellut biokaasuketjut olivat parempia verrattuna referenssitilanteeseen. Biokaasuketjujen ilmastovaikutukset olivat negatiiviset, eli ketjussa syntyvät päästöt olivat pienemmät kuin korvattavien tuotteiden (mineraalilannoitteet ja fossiilinen energia) päästöt. Sekä ilmastonmuutos- että rehevöitymistarkastelussa suurin osa ketjun ympäristövaikutuksista aiheutui ravinteiden peltokäytöstä.

Käsittelyjäännöksestä separoitujen jakeiden jatkojalostuksella voidaan vähentää kuljetettavan massan määrää ja siten kuljetuskustannuksia. Ravinteiden fraktiointi ja konsentrointi parantavat ravinteiden käytettävyyttä sekä lannoitusikässä että teollisuuden sovellutuksissa.

Kokoluokaltaan 100 000 t/a laitoksen kokonaisketjussa tuotetun biokaasun energiasisällöstä noin 23 % kului varsinaisen biokaasuprosessin toimintaan ja käsittelyjäännöksen separointiin. Nestejakeen jatkojalostusprosessit kuluttivat energiaa 10–14 % ja tuotteiden kuljetukset ja peltolevitys 5–9 % syötteen energiasisällöstä. Ylijäämäenergian osuus oli 58–62 %, kun kuivajakeelle ei tehty jatkojalostusta.

Jatkojalostuksen osalta merkittävin päästöjen aiheuttaja oli sekä ilmastovaikutuksen että rehevöittävän vaikutuksen osalta jakeiden peltokäyttö. Ilmastovaikutusten osalta myös kemikaalien käytöllä on suuri merkitys.

**Avainsanat:** Biokaasu, energiatase, ravinnetase, ympäristövaikutukset, kasvihuonekaasupäästöt

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OSA 1: Biokaasulaitokset – syötteistä lopputuotteisiin .....</b>	<b>7</b>
2.1. Tausta ja tavoitteet .....	7
2.2. Aineisto ja menetelmät.....	8
2.2.1. Tarkasteltavien ketjujen kuvaukset.....	8
2.2.2. Tarkasteltujen biokaasu- ja referenssiketjujen rajaukset ja oletukset.....	14
2.2.3. Laskentaperusteet.....	15
2.2.4. Massa-, ravinne- ja energiataseet .....	16
2.3. Tulokset ja tulosten tarkastelu .....	19
2.3.1. Massa ja ravinnetaseet .....	19
2.3.2. Energiataseet .....	20
2.3.3. Ympäristövaikutukset.....	27
2.4. Yhteenveto.....	35
<b>3. OSA 2: Biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen jatkojalostus .....</b>	<b>37</b>
3.1. Tausta ja tavoitteet .....	37
3.2. Aineisto ja menetelmät.....	37
3.2.1. Tarkasteltujen jatkojalostusketjujen kuvaus.....	37
3.2.2. Tarkasteltujen jatkojalostusketjujen rajaukset ja oletukset .....	42
3.2.3. Laskentaperusteet.....	43
3.3. Tulokset ja tulosten tarkastelu .....	45
3.3.1. Massa- ja ravinnetaseet .....	45
3.3.2. Energiataseet .....	50
3.3.3. Ympäristövaikutukset.....	56
3.4. Yhteenveto.....	58
<b>4. Johtopäätökset.....</b>	<b>60</b>

# 1. Johdanto

Maatalouden sivutuotteiden ja lannan käytön tehostaminen erityisesti biokaasun tuotannossa on mainittu yhtenä tavoitteena vuonna 2008 valmistuneessa kansallisessa pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiassa (Valtioneuvoston selonteko 2008). Ilmasto- ja energiastrategian päivityksessä (Valtioneuvoston selonteko 2013) todetaan, että maatalouspohjaisen biomassan energiakäytön edistämässä painotetaan erityisesti muiden kuin ruuaksi käytettävien kasvien tai kasvinosien tuotantoa ja käyttöä sekä elintarvikkeiden sivujakeiden ja jätteiden (ml. lanta) käyttöä. Strategian mukaan Suomessa edistetään toimia, joilla kehitetään suljettuja ravinne- ja ainekiertoja maatalouspohjaisessa energiatuotannossa. Strategian päivityksessä kiinnitetään lisäksi huomiota kaiken bioenergian kestävyteen ja ympäristövaikutuksiin ja todetaan, että bioenergian käytön lisäämishankkeissa elinkaariaikainen hiilitase tunnistetaan. Pelkkää energiatarkehtelua laajemmista tavoitteista huolimatta uusiutuvan energian tuottamisvaihtoehtoja ja ilmasto- ja energiastrategian toteutumista arvioitaessa kiinnitetään usein huomiota ainoastaan biokaasulaitosten energiantuotannon määrään ja energian tuottamisen kustannustehokkuuteen.

Biokaasuprosessin käsittelyjäännös on pääsääntöisesti pyritty hyödyntämään joko kasvinravinteena maataloudessa, viherrakentamisessa tai esim. kaatopaikkojen maisemoinnissa, mutta sille ei ole juuri nähty taloudellista arvoa. Näin siitä huolimatta, että käsittelyjäännös sisältää kaikki käytettyjen raaka-aineiden ravinteet, joille voidaan laskea teoreettinen arvo mineraalilannoitteiden hinnan perusteella.

Käsittelyjäännöksen ravinteiden hyödynnettävyyttä maataloudessa voi heikentää se, että ravinteiden lisäksi jäännös sisältää muita ainesosia eivätkä ravinnesuhteet ole välttämättä kasvintarpeen kannalta oikeat. Maatalouskäytössä käsittelyjäännöstä on varastoitava sallittujen levitysaikojen ulkopuolella, mikä voi vaatia lantaloita vastaavaa varastokapasiteettia ja on siten kalliimpaa kuin mineraalilannoitteiden varastointi. Lisäksi käsittelyjäännöksen levitys pelloille on mineraalilannoitusta työläämpää ja kalliimpaa. Viljelijöiden maksuhalukkuus biokaasulaitoksista peräisin olevista kierrätysravinteista onkin ollut vähäistä. Kierrätysravinteiden käyttöä pyritään edistämään uudessa maaseutuohjelmassa olevilla ympäristökorvausjärjestelmän toimenpiteillä, joilla mm. tuetaan lietalannan sijoittamista peltoon sekä ravinteiden ja orgaanisten aineiden kierrättämistä.

Myös EU:n lainsäädännössä käsittelyjäännös on nähty pikemmin jätteenä kuin arvokkaana tuotteena. RES-direktiivin mukaisessa päästölaskennassa päästöt biopolttoaineen ja prosessissa syntyvän sivutuotteen välillä tulee allokoida tuotteiden alempien lämpöarvojen perusteella. Käsittelyjäännöksen lämpöarvo on hyvin alhainen, sillä sen kosteuspitoisuus on korkea, jonka vuoksi lähes kaikki biokaasuketjun päästöt tulee allokoida biokaasulle.

Suomessa on tehty merkittävää kehitystyötä biokaasulaitosten käsittelyjäännösten tuotteistamiseksi. Tuotteistamisella pyritään mm. vähentämään tuotteiden vesipitoisuutta kuljetuskustannusten minimoimiseksi ja jakamaan typpi ja fosfori eri jakeisiin, mikä lisää tuotteiden käytettävyyttä sekä maataloudessa että teollisuuden sovelluksissa. Käsittelyjäännöksestä separoimalla erotetusta nestejakeesta tuotetaan Suomessa tällä hetkellä mm. konsentroitua ammoniumsulfaattiliuosta ja kuivajakeesta pellettejä.

Käsittelyjäännöksen ravinteiden tuotteistaminen nähdään tulevaisuudessa yhä tärkeämpänä osana biokaasulaitosten liiketoimintaa (Marttinen ym. 2013). Kierrätysravinteiden käytön lisäämiseksi tarvitaan tutkittua tietoa sekä tuotteiden käyttöominaisuuksista että niiden ympäristövaikutuksista suhteessa mineraalilannoitteisiin. Teknologisen kehitystyön rinnalle tarvitaan tietoa ravinnetuotteiden valmistamisen energiatehokkuudesta ja kokonaisketjun ympäristövaikutuksista.

Koska biokaasuteknologia yhdistää uusiutuvan energian tuotannon, ravinteiden kierrätyksen, biojätteiden käsittelyn sekä jätehuollon ja maatalouden lantojen päästöjen hallinnan, on vaikutusten tarkastelussakin tärkeää huomioida koko ketju raaka-aineista lopputuotteiden käyttöön. Biokaasuprosessin energiatehokkuutta eri syötteillä ja ketjun toteutustapojen ympäristövaikutuksia on arvioitu mm. energiatasetarkasteluilla (Börjesson & Berglund 2006, Berglund & Börjesson 2006) ja elinkaari-



risten ympäristövaikutusten arvioinnilla (LCA; mm. Pöschl ym. 2010, 2012a, 2012b). Näissä tarkaste- luissa on painotettu eri raaka-aineiden välisiä eroja ja energian hyödyntämisen vaihtoehtoja, mutta prosessissa tuotettavien ravinnetuotteiden tarkastelu on melko yleisellä tasolla. Muissa maissa teh- dyt elinkaaritarkastelut eivät myöskään ole suoraan sovellettavissa Suomeen erilaisten käytäntöjen ja sääolosuhteiden takia.

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella lantaa käsittelevän biokaasulaitoksen kokonaisketjua raa- ka-aineista lopputuotteiden käyttöön sekä tunnistaa ketjun energia- ja ravinnetaseiden sekä ympäris- tövaikutusten näkökulmasta parhaat toimintatavat. Tarkastelua varten valittiin erilaisia syöteseoksia, joille laadittiin prosessointiketju. Lähtökohtana oli, että laitosten toteuttaminen olisi taloudellisesti realistista nykytilanteessa. Tämän takia esim. pelkkää lietelantaa käsittelevää biokaasulaitosta ei tar- kasteltu.

Työ jakautuu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan lietelantaa ja erilaisia lisäsyöt- teitä käsittelevien laitosten kokonaisketjuja lannan varastoinnista maataloilla käsittelyjäännöksen peltokäyttöön. Lannan käsittelyn kokoluokaksi valittiin laitos, jonka käsittelykapasiteetti on noin 19 500 tonnia vuodessa. Ravinnetuotteiden valmistuksen nähtiin kuitenkin olevan taloudellisesti realis- tista vain tätä suuremmissa laitoksissa, minkä takia käsittelyjäännöksen jatkojalostusketjuja tarkastel- tiin erikseen esimerkklaitoksessa, jonka käsittelykapasiteetti on 100 000 tonnia vuodessa.

## 2. OSA 1: Biokaasulaitokset – syötteistä lopputuotteisiin

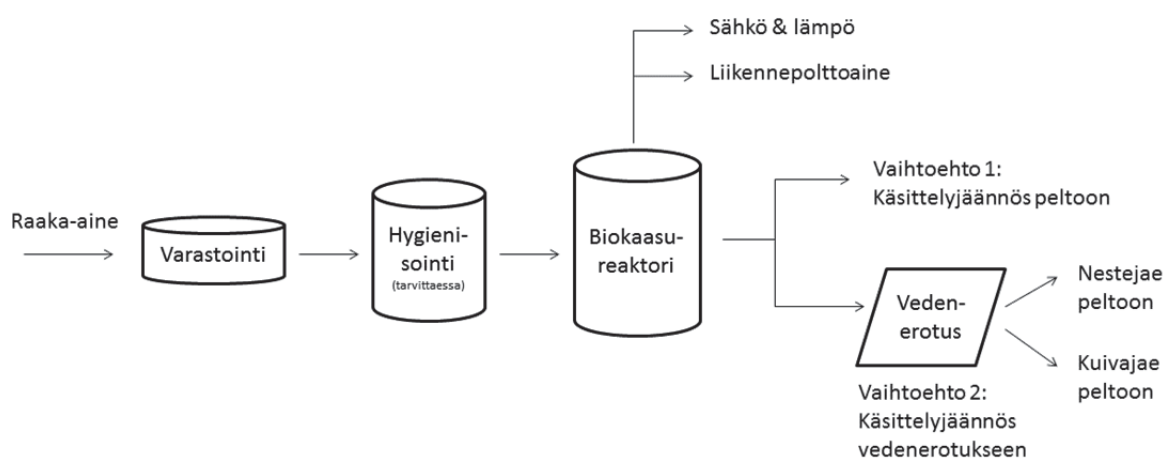
### 2.1. Tausta ja tavoitteet

Maatalouden biokaasulaitokset eivät ole pelkästään energiantuotantoyksiköjä, vaan osa maatalon energia- ja ravinnehuollon sekä päästöjen hallinnan kokonaisuutta. Tämän kokonaisuuden ymmärtämiseksi tarvitaan tutkimustietoa sen eri vaiheiden energia- ja ravinnevirroista sekä ympäristövaikutuksista. Lisätiedon myötä kehittämistyö voidaan jatkossa suunnata ketjun merkityksellisimpiin vaiheisiin.

Tässä työssä tarkastellaan erilaisia syötteitä käsittelevien biokaasulaitosten massa-, energia- ja ravinnetaseita sekä koko toimintaketjun ympäristövaikutuksia syötteiden varastoinnista/korjuusta käsittelyjäännöksen peltokäyttöön saakka (kuva 1). Lähtökohtana oli arvioida esimerkkiketjuja, joiden toteuttaminen olisi tällä hetkellä realistista. Pelkän lietelannan käsittelyä biokaasulaitoksessa pidetään nykyisin heikosti taloudellisesti kannattavana, mistä syystä esimerkkiketjuihin valittiin lannan lisäksi muita syötteitä. Lietelannasta separoitu kuivajae ja hoidettujen viljelemättömien peltojen nurmi (HVP-nurmi) lisäävät biokaasulaitoksen energiantuottoa ja niiden biokaasukäyttö on ollut yleisen mielenkiinnon kohteena viime aikoina. HVP-nurmilla tarkoitetaan viherkesantoja ja suojavyöhykenurmia, jotka olisi ravinnevalumien ehkäisemiseksi perusteltua niittää ja korjata pois pelloilta, mutta jotka toistaiseksi pääsääntöisesti jätetään pelloille, koska niille ei ole hyötykäyttöä. Elintarviketeollisuuden sivutuotteiden käsittelystä voidaan puolestaan saada porttimaksuja, jotka parantavat laitoksen taloudellista kannattavuutta.

Tarkasteltavaksi kokoluokaksi valittiin laitos, jonka käsittelykapasiteetti on 19 500 tonnia vuodessa. Tämä kokoluokka vastaa Suomen mittakaavassa usean eläintilan lantoja käsittelevää biokaasulaitosta. Se jää myös juuri alle 20 000 t/a kokoluokan, jota suuremmille laitoksille vaaditaan ympäristövaikutusten arviointi (YVA). Tilatason ja tilojen yhteiset biokaasulaitokset pyrkivät yleensä välttämään tätä prosessia sen työläyden ja kustannusten takia.

Tavoitteena oli esimerkkiketjujen avulla verrata eri syötteitä käsittelevien laitosten massa-, energia- ja ravinnetaseita ja ympäristövaikutuksia sekä keskenään että niitä vastaaviin referenssiketjuihin ilman biokaasuprosessia. Työssä tunnistetaan ketjun eri vaiheiden energiankulutukset, energiantuotantopotentiaalit, ravinnevirrat sekä ympäristövaikutukset.



**Kuva 1.** Tarkasteltujen ketjujen rajaus.



## 2.2. Aineisto ja menetelmät

### 2.2.1. Tarkasteltavien ketjujen kuvaukset

Työssä tarkasteltiin kolmea erilaista biokaasulaitoksen syöteseosta ja niiden käsittelystä koostuvia ketjuja (taulukko 1). Käsittelyketjut on pyritty määrittelemään niin, että ne vastaavat nykykäytäntöjä. Referenssiketjut eivät sisällä biokaasulaitosta, vaan kuvaavat ko. materiaalien tyypillisiä käsittelyprosesseja nykytilanteessa. Kaikissa biokaasuketjuissa käsitellään lähtökohtaisesti 16 000 tonnia vuodessa sian liettelantaa ja 3 500 tonnia lisäsyötettä. Biokaasu- ja referenssiketjujen 1 (BK1 ja REF1) tarkasteluissa liettelannan määrä on kuitenkin kokonaisuudessaan noin 36 000 tonnia (ks. ketjujen kuvaukset alla). Tämä johtuu siitä, että tarkastelu alkaa syötteiden varastoinnista syntypaikallaan, jolloin lisäsyötteenä olevan liettelannan kuivajakeen tarkastelu alkaa ennen separointia. Kuivajakeen määrä 3 500 tonnia vastaa noin 20 000 tonnia liettelantaa.

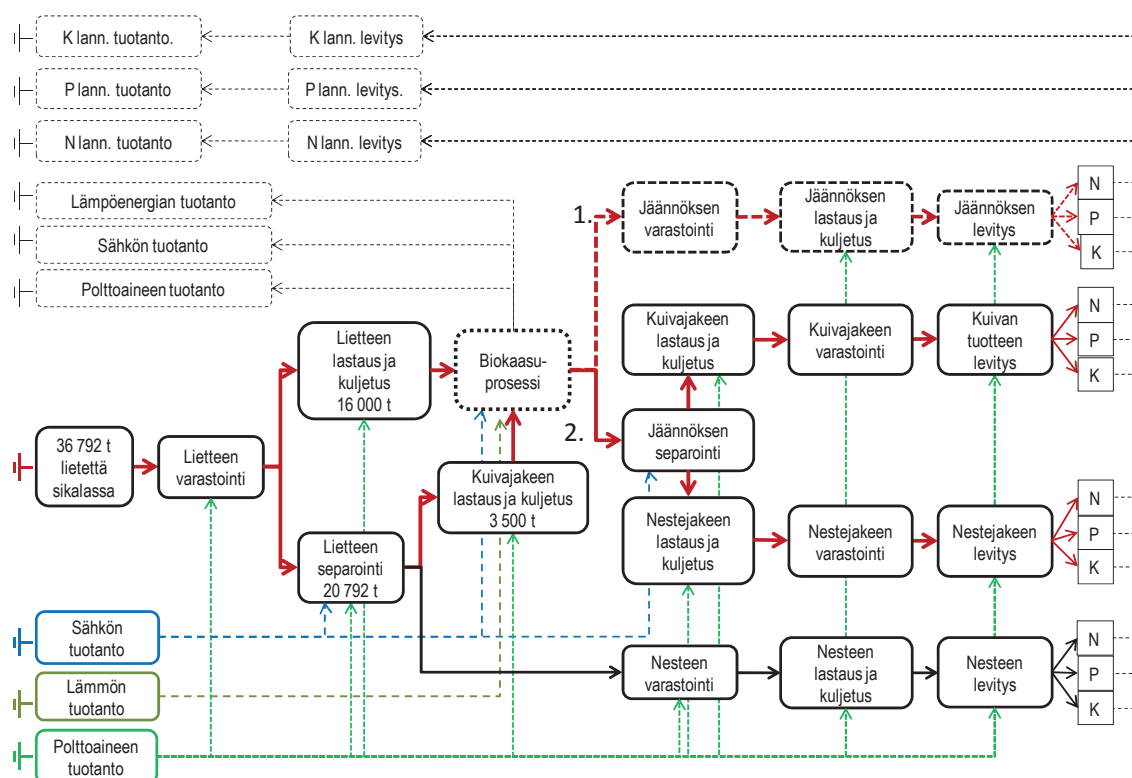
**Taulukko 1.** Tarkasteltavien ketjujen kuvaukset

Tarkasteltava ketju	Lyhenne	Syötteet
Biokaasuketju 1	BK1	Sian liettelanta 16 000 t/a Lietelannan kuivajae 3 500 t/a →yhteensä 36 792 t/a liettelantaa
Biokaasuketju 2	BK2	Sian liettelanta 16 000 t/a HVP-nurmi 3 500 t/a
Biokaasuketju 3	BK3	Sian liettelanta 16 000 t/a Elintarviketeollisuuden sivutuotteet 3 500 t/a
Referenssiketju 1	REF1	Sian liettelanta 36 792 t/a (ketju ei sisällä separointia, joten kuivajakeen määrä 3 500 t/a on muutettu liettelannaksi)
Referenssiketju 2	REF2	Sian liettelanta 16 000 t/a HVP-nurmi 3 500 t/a
Referenssiketju 3	REF3	Sian liettelanta 16 000 t/a Elintarviketeollisuuden sivutuotteet 3 500 t/a

#### *BK1 Biokaasuketju: Sian liettelanta + liettelannan kuivajae*

Sian liettelannan biokaasuketjussa (kuva 2) liettelantaa varastoidaan maataloilla. Sitä sekoitetaan lietteen siirron ja separoinnin yhteydessä. Lannasta 16 000 tonnia kuljetetaan sellaisenaan biokaasulaitokselle käsittelyyn (10 km). Lietelanta lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan biokaasulaitokselle.

Kauempana biokaasulaitoksesta oleva liettelanta separoidaan tiloilla sähkökäyttöisellä lingolla. Separoitavan lietteen yhteismäärä on 20 792 tonnia, josta muodostuu lingottaessa 3500 tonnia kuivajae ja 17 292 tonnia nestejae. Tiloilla separoiduista jakeista kuivajae lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla puoliperävaunurekkaan (25 t), jolla kuivajae kuljetetaan biokaasulaitokselle (20 km). Nestejae jää tiloille, jossa se varastoidaan maksimissaan 10–11 kuukauden ajan katetussa säiliössä ja käytetään lannoitteena pelloilla. Pelloille nestejae kuljetetaan (5 km) traktorilla 12 m<sup>3</sup> lietesäiliössä ja levitetään letkulevittimellä peltoon.



**Kuva 2.** Sian liettelanta + lannan kuivajae -biokaasuketjun kuvaus.

Biokaasulaitoksella liettelanta (16 000 t) varastoidaan lyhyen aikaa katetussa esisäiliössä (400 m<sup>3</sup>), josta se pumpataan biokaasureaktoriin (1 600 m<sup>3</sup>). Liettelannan kuivajae varastoidaan biokaasulaitoksella peitettynä lantalassa, josta se lastataan pyöräkuormaimella syöttölaitteeseen ja siitä edelleen reaktoriin. Reaktorissa muodostuva biokaasu johdetaan jälkikaasuuntumisaltaan yhteydessä olevaan kaasuvarastoon ja edelleen joko sähköä ja lämpöä tuottavaan CHP-yksikköön tai liikennepolttoaineen jalostusyksikköön, joka perustuu vesipesuritekniikkaan. Prosessissa muodostuva käsittelyjäännös (18 436 t) varastoidaan noin 20 vrk laitoksen jälkikaasualtaassa (1 000 m<sup>3</sup>), joka toimii myös kaasuväestönä.

Käsittelyjäännös hyödynnetään tiloilla lannoitteena joko sellaisenaan (vaihtoehto 1) tai separoituna neste- ja kuivajakeiksi (vaihtoehto 2). Vaihtoehdossa 1 käsittelyjäännös kuljetetaan takaisin tiloille ja käytetään sellaisenaan lannoitteena pelloille. Biokaasulaitoksella jäännös pumpataan traktorikäyttöisellä pumpulla puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan 10–20 km takaisin tilalle. Jäännös varastoidaan maksimissaan 10–11 kk tiloilla katetussa varastoaltaassa, jossa käytetään kelluvaa katetta. Varastoinnin jälkeen jäännös lastataan 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun traktorikäyttöisellä pumpulla ja kuljetetaan traktorilla pelloille (5 km). Jäännös levitetään peltoon letkulevitintä.

Käsittelyjäännöksen prosessointivaihtoehdossa 2 jäännös separoidaan biokaasulaitoksella neste- ja kuivajakeiksi. Kuivajakeita muodostuu 3 103 tonnia ja se kuljetetaan maansiirtoautolla (19 t) tiloille (10–20 km), joissa se varastoidaan aumassa maksimissaan n. 10–11 kk. Kuivajae lastataan traktorilla 12 m<sup>3</sup> perävaunuun, jolla se kuljetetaan pelloille (5 km). Levitys tapahtuu traktorilla ja kuivalannan levittimellä.

Separoinnissa muodostuva nestejake (15 333 t) kuljetetaan biokaasulaitokselta puoliperävaunurekalla (25 t) tiloille (10–20 km), joilla nestejake varastoidaan katetuissa säiliöissä. Nestejake kuljetetaan (5 km) pelloille traktorilla 12 m<sup>3</sup> lietevaunussa ja levitetään peltoon käyttäen letkulevitintä.

**BK2 Biokaasuketju: Sian lietalanta + HVP-nurmi**

Sian lietalantaa ja HVP-nurmea käsittelevässä biokaasuketjussa (kuva 3) lietalanta (16 000 t) varastoidaan lyhyen aikaa maatiloilla ja sekoitetaan lietteen siirron yhteydessä. Lanta kuljetetaan sellaisenaan biokaasulaitokselle käsittelyyn (10 km), jolloin lanta lastataan puoliperävaunurekkaan (25 t) traktorikäyttöisellä pumpulla. Biokaasulaitoksella lietalanta (16 000 t) varastoidaan katetussa esisäiliössä (400 m<sup>3</sup>), josta se pumpataan biokaasureaktoriin.

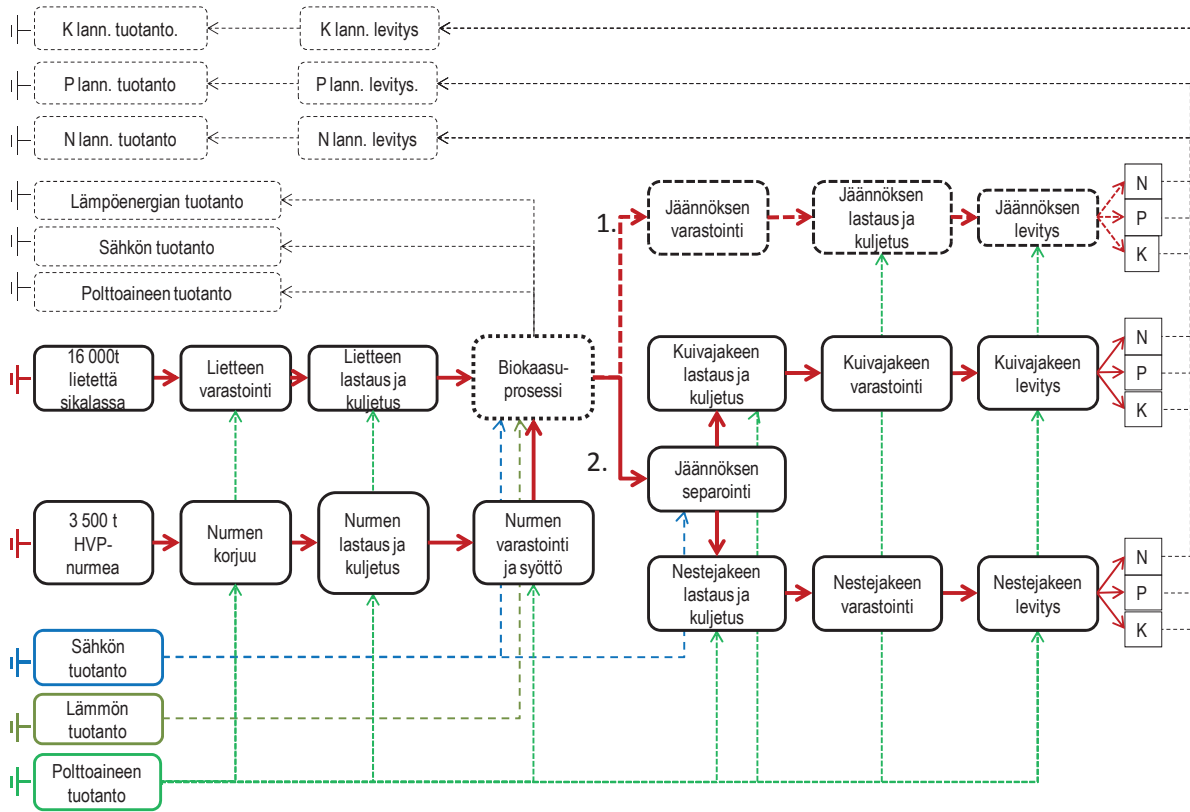
HVP-nurmi (3 500 t) korjataan kerran vuodessa ajosilppurilla. Korjuun jälkeen nurmi lastataan traktorilla puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan biokaasulaitokselle (10 km). Biokaasulaitoksella HVP-nurmi varastoidaan siiloissa, joista se siirretään pyöräkuormaimella syöttölaitteeseen ja edelleen reaktoriin.

Biokaasureaktorissa (1 600 m<sup>3</sup>) muodostuva biokaasu johdetaan jälkikaasuuntumisaltaan yhteydessä olevaan kaasuväylään ja edelleen joko sähköä ja lämpöä tuottavaan CHP-yksikköön tai vesipesuritekniikkaan perustuvaan liikennepolttoaineen jalostusyksikköön. Biokaasuprosessissa muodostuva jäännös (18 265 t) varastoidaan lyhyen aikaa (noin 20 vrk) laitoksen jälkikaasualtaassa (1 000 m<sup>3</sup>), joka toimii myös kaasuväylänä.

Käsittelyjäännös hyödynnetään tiloilla lannoitteena joko sellaisenaan (vaihtoehto 1) tai separoituna neste- ja kuivajakeiksi (vaihtoehto 2). Vaihtoehdossa 1 käsittelyjäännös kuljetetaan takaisin tiloille ja käytetään sellaisenaan lannoitteena pelloilla. Biokaasulaitoksella jäännös pumpataan traktorikäyttöisellä pumpulla puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan 10 km takaisin tilalle. Jäännös varastoidaan maksimissaan 10–11 kk tiloilla katetussa väyläaltaassa, jossa käytetään kelluvaa katetta. Varastoinnin jälkeen jäännös lastataan 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun traktorikäyttöisellä pumpulla ja kuljetetaan traktorilla pellolle (5 km). Jäännös levitetään peltoon letkulevitintillä.

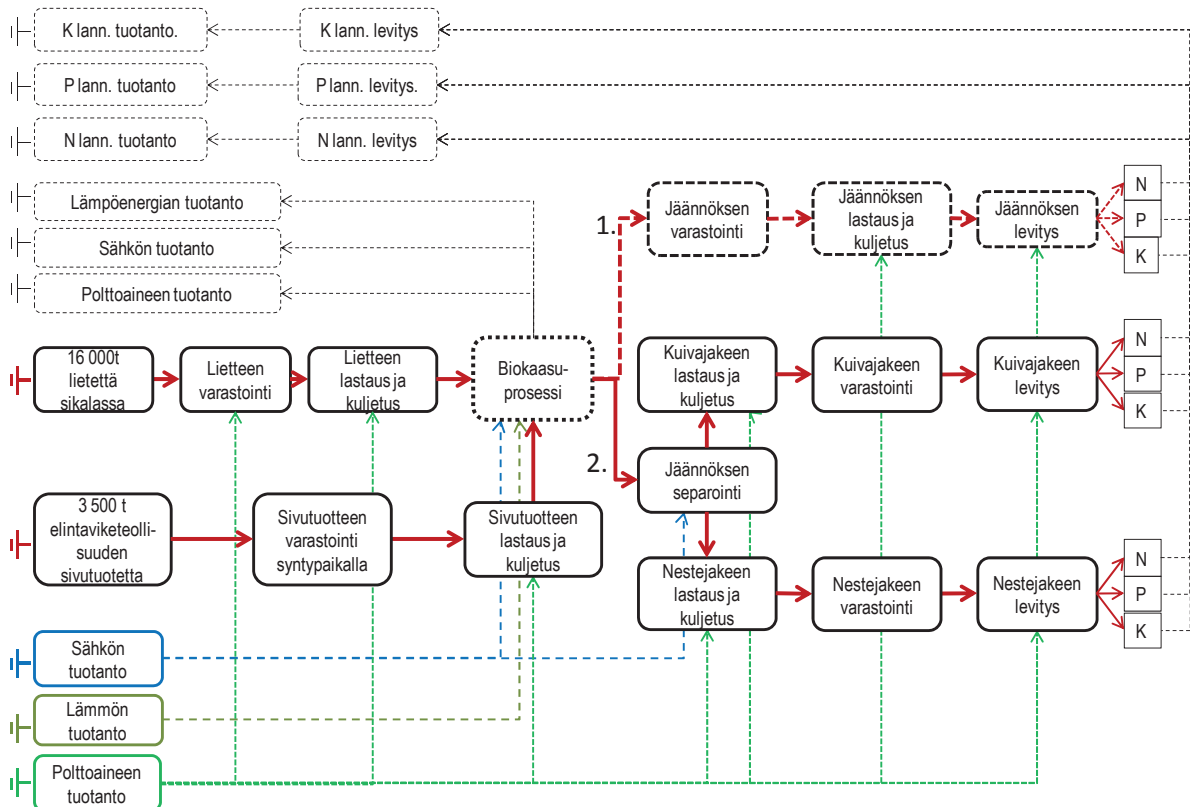
Käsittelyjäännöksen prosessointivaihtoehdossa 2 jäännös separoidaan biokaasulaitoksella neste- ja kuivajakeiksi. Kuivajakeita muodostuu 3 075 tonnia ja se kuljetetaan maansiirtoautolla (19 t) tiloille (10 km), joissa se varastoidaan aumassa maksimissaan n. 10–11 kk. Kuivajake lastataan traktorilla 12 m<sup>3</sup> perävaunuun, jolla se kuljetetaan pelloille (5 km). Levitys tapahtuu traktorilla ja kuivalannan levittimellä.

Separoinnissa muodostuva nestejäte (15 190 t) kuljetetaan biokaasulaitokselta puoliperävaunurekalla (25 t) tiloille (10 km), joilla nestejäte varastoidaan katetussa säiliössä. Nestejäte kuljetetaan 5 km pellolle traktorilla 12 m<sup>3</sup> lietevaunulla ja levitetään peltoon käyttäen letkulevitintä.



Kuva 3. Sian lietalanta + HVP-nurmi -biokaasuketjun kuvaus.

BK3 Biokaasuketju: Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet



Kuva 4. Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet -biokaasuketjun kuvaus.

Sian lietalantaa ja elintarviketeollisuuden sivutuotteita käsittelevässä biokaasuketjussa (kuva 4) lietalanta (16 000 t) varastoidaan lyhyen aikaa maatiiloilla ja sekoitetaan lietteen siirron yhteydessä. Lanta kuljetetaan sellaisenaan biokaasulaitokselle käsittelyyn (10 km), jolloin lanta lastataan puoliperävaunurekkaan (25 t) traktorikäyttöisellä pumpulla. Biokaasulaitoksella lietalanta (16 000 t) varastoidaan lyhyen aikaa (7–9 vrk) katetussa esisäiliössä (400 m<sup>3</sup>), josta se pumpataan biokaasureaktoriin.

Elintarviketeollisuuden sivutuotteet (3 500 t) varastoidaan lyhyen aikaa syntypaikalla katetussa säiliössä ennen kuljetusta biokaasulaitokselle. Materiaali lastataan puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan käsiteltäväksi biokaasulaitokselle (50 km). Laitoksella sivutuotteet varastoidaan erillisessä 20 m<sup>3</sup> säiliössä, josta materiaali siirretään hygienisointiyksikköön ja edelleen reaktoriin syöttölaitteella.

Biokaasureaktorissa (1 600 m<sup>3</sup>) muodostuva biokaasu johdetaan jälkikaasuuntumisaltaan yhteydessä olevaan kaasuväylään ja edelleen joko sähköä ja lämpöä tuottavaan CHP-yksikköön tai vesipesuritekniikkaan perustuvaan liikennepolttoaineen jalostusyksikköön. Biokaasuprosessissa muodostuva jäännös (18 575 t) varastoidaan lyhyen aikaa (noin 20 vrk) laitoksen jälkikaasualtaassa (1 000 m<sup>3</sup>), joka toimii myös kaasuväylänä.

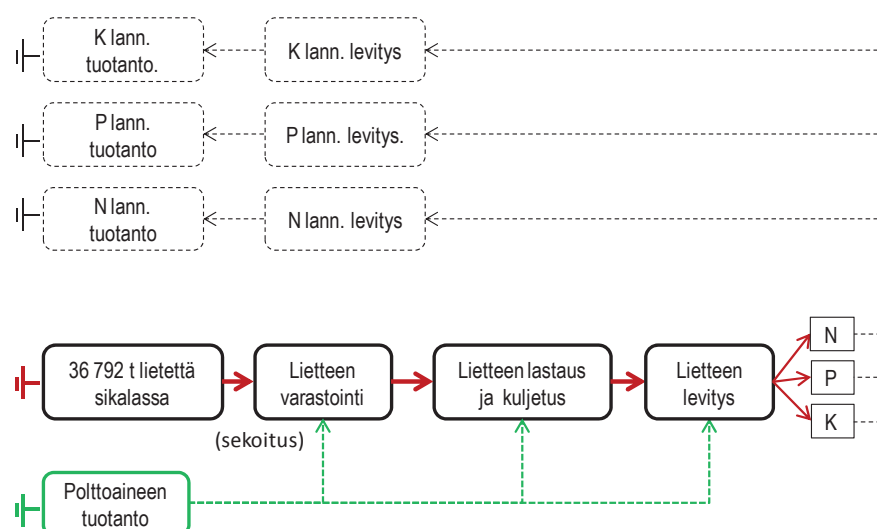
Käsittelyjäännös hyödynnetään tiloilla lannoitteena joko sellaisenaan (vaihtoehto 1) tai separoituuna neste- ja kuivajakeiksi (vaihtoehto 2). Vaihtoehdossa 1 käsittelyjäännös kuljetetaan takaisin tiloille ja käytetään sellaisenaan lannoitteena pelloille. Biokaasulaitoksella jäännös pumpataan traktorikäyttöisellä pumpulla puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan 10 km takaisin tilalle. Jäännös varastoidaan maksimissaan 10–11 kk tiloilla katetuissa varastoalustoissa, jossa käytetään kelluvaa katetta. Varastoinnin jälkeen jäännös lastataan 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun traktorikäyttöisellä pumpulla ja kuljetetaan traktorilla pellolle (5 km). Jäännös levitetään peltoon letkulevitintillä.

Käsittelyjäännöksen prosessointivaihtoehdossa 2 jäännös separoidaan biokaasulaitoksella neste- ja kuivajakeiksi. Kuivajakeita muodostuu 3 127 tonnia ja se kuljetetaan maansiirtoautolla (19 t) tiloille (10 km), joissa se varastoidaan aumassa maksimissaan n. 10–11 kk. Kuivajake lastataan traktorilla 12 m<sup>3</sup> perävaunuun, jolla se kuljetetaan pelloille (5 km). Levitys tapahtuu traktorilla ja kuivalannan levittimellä.

Separoinnissa muodostuva nestejake (15 449 t) kuljetetaan biokaasulaitokselta puoliperävaunurekalla (25 t) tiloille (10 km), joilla nestejake varastoidaan katetussa säiliössä. Nestejake kuljetetaan 5 km pellolle traktorilla 12 m<sup>3</sup> lietevaunulla ja levitetään peltoon käyttäen letkulevitintä.

### REF1 Referenssiketju: Sian lietalanta

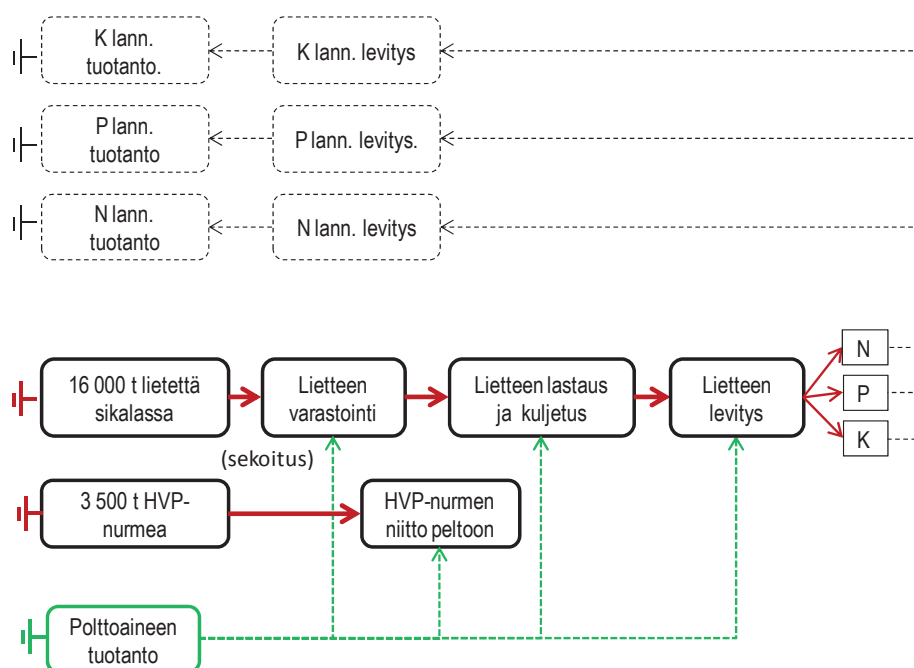
(Huom! kuivajake muutettu vastaavaksi määräksi lietalantaa)



**Kuva 5.** Sian lietalanta -referenssiketjun kuvaus.

Sian lietalannan käsittelyn referenssiketjussa (REF1) (kuva 5) lietalantaa ei separoida kuivajakeeksi kuten biokaasuketjussa 1, joten koko lantamäärää tarkastellaan lietalantana. Lietalanta (36 792 t) varastoidaan maatiloilla kelluvilla katteilla varustetuissa lietesäiliöissä. Säiliöiden sisällöt sekoitetaan tyhjennyksen yhteydessä. Lietalanta lastataan lietevaunuun (12 m<sup>3</sup>) traktorikäyttöisellä pumpulla ja kuljetetaan pellolle levitettäväksi (etäisyys 5 km). Lietteen levitys tapahtuu samalla kalustolla kuin kuljetus (letkulevitin). Lietteestä 80 % levitetään pääasiassa keväällä ja kesällä: mullokselle ennen kylvöä ja oraille kylvön jälkeen (suhteessa 50:50). Mullokselle levitetty liete mullataan maahan äestämällä 12 tunnin sisällä levityksestä. Syksyllä liete (20 %) levitetään sängelle ja mullataan kyntämällä 12 tunnin sisällä levityksestä.

### REF2 Referenssiketju: Sian lietalanta + HVP-nurmi

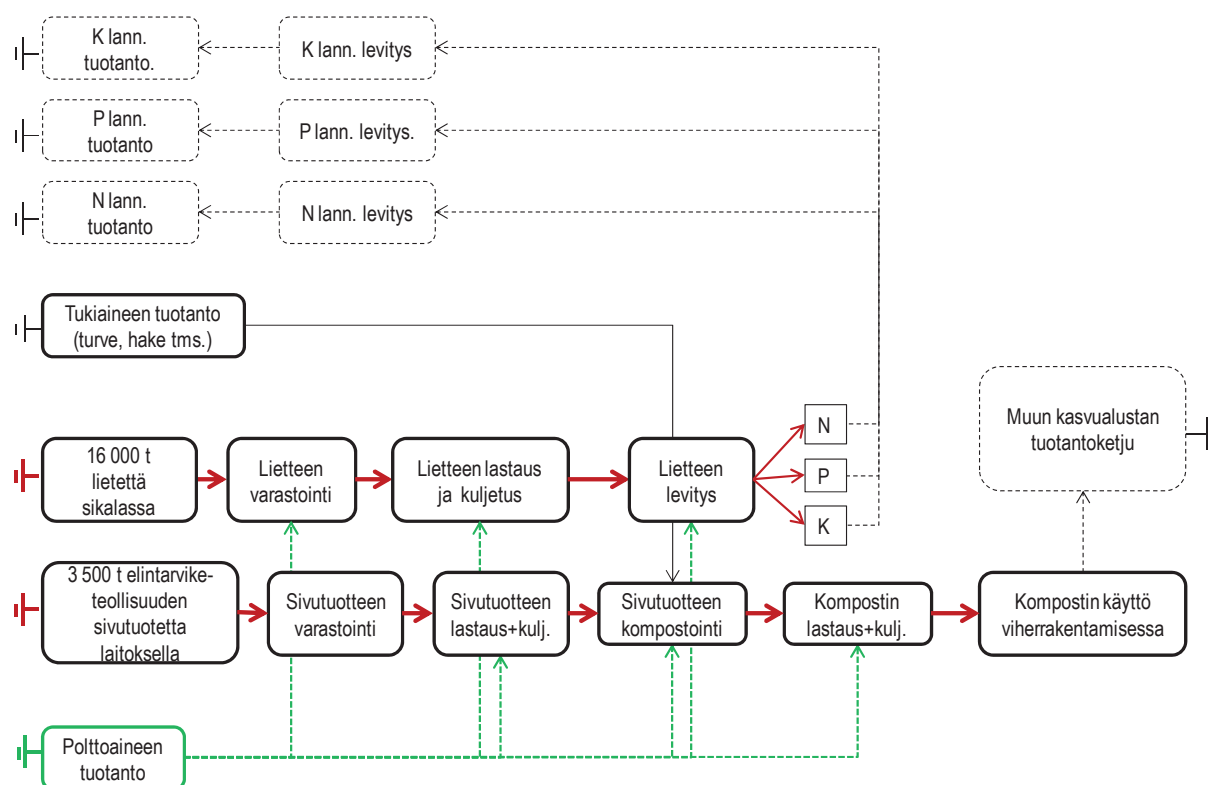


**Kuva 6.** Sian lietalanta + HVP-nurmi -referenssiketjun kuvaus.

Sian lietalannan ja HVP-nurmen referenssiketjun (REF2) kuvaus (kuva 6) on sian lietalannan osalta sama kuin REF1:ssä, mutta lietalannan määrä on 16 000 t. HVP-nurmen referenssiketjussa 3500 t nurmea niitetään ajosilppurilla kerran vuodessa peltoon (n. 220 ha, kun tuoresadoksi oletettiin 16 t/ha). HVP-nurmen tuotannossa lannoitus on vähäistä ja nurmi lannoitetaan esimerkiksi perustamisen yhteydessä. Niiton jälkeen sato jätetään peltoon.



## REF3 Referenssiketju: Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet



**Kuva 7.** Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet -referenssiketjun kuvaus.

Sian lietalannan sekä elintarviketeollisuuden referenssiketjun kuvaus (kuva 7) on sian lietalannan osalta sama kuin REF1:ssä, mutta lietalannan määrä on 16 000 t. Elintarviketeollisuuden sivutuotteiden referenssiketjussa sivutuotteet varastoidaan tuotantolaitoksella katetussa säiliössä, josta massat kuljetetaan puoliperävaunurekalla (25 t) kompostoitavaksi kompostointilaitokseen (etäisyys 50 km). Kompostointi tapahtuu aumassa, josta kompostoitunut massa lastataan pyöräkuormaajalla puoliperävaunurekkaan (25 t) ja kuljetetaan käytettäväksi viherrakentamisessa (etäisyys 50 km).

### 2.2.2. Tarkasteltujen biokaasu- ja referenssiketjujen rajaukset ja oletukset

Massa-, ravinne ja energiataseita tarkasteltiin biokaasuketjujen BK1, BK2 ja BK3 osalta, ympäristövaikutuksia myös referenssiketjujen REF1, REF2 ja REF3 osalta. Tarkasteltavat ketjut alkavat maatilalla tapahtuvasta lannan varastoinnista, HVP-nurmen niittämisestä tai elintarviketeollisuuden sivutuotteen varastoinnista syntypaikallaan ja päättyvät käsittelyjäännöksen käyttöön lannoitteena pelloilla joko sellaisenaan tai separoituna neste- ja kuivajakeiksi (kuva 1). Ympäristövaikutusten osalta referenssiketjuissa 2 ja 3 tarkasteluun otettiin myös näitä vastaavissa biokaasuketjuissa tapahtuva ravinnemäärän lisääntyminen, kun HVP-nurmesta ja elintarviketeollisuuden sivutuotteista saadaan lisää ravinteita peltojen lannoitukseen. Tämä otettiin huomioon laskemalla referenssiketjuille 2 ja 3 peltoikäytön päästöjä (ilmapäästöt ja huuhtoumat) myös HVP-nurmen ja elintarviketeollisuuden sivuvirtojen sisältämille ravinnemäärille. Referenssitapauksessahan sama määrä ravinteita olisi joka tapauksessa viety peltoon esim. mineraalilannoitteiden muodossa.

Ympäristövaikutusten laskennassa on huomioitava, että tarkastelluissa biokaasuprosesseissa hyödynnettävät raaka-aineet, lietalanta, HVP-nurmi ja elintarviketeollisuuden sivutuotteet, luokitellaan jätteiksi. Tällöin mm. sikalan sähkönkulutus ja lietalannan varastoinnin päästöt kohdennetaan allokointisääntöjen mukaisesti sianlihalle eikä biokaasuprosessille. Biokaasun tuotanto on tilalla täten

lietelannan eli jätteen hyödyntämistä eikä tilan pääasiallinen tuotantomuoto. Hankkeessa huomioitiin silti varastoinnin päästöt, sillä biokaasuprosessin myötä lyhenevä varastointiaika vähentää päästöjä. Referenssiketjuissa sian lietelantaa varastoidaan tilalla vuoden ympäri, mutta biokaasuketjuissa sitä kuljetetaan tasaisin väliajoin biokaasulaitokselle. Lannan varastointiaika tilalla on tällöin huomattavasti referenssiä lyhyempi ja päästöt biokaasulaitoksella paremmin hallittavissa. Tarkastelluissa biokaasuprosesseissa lanta kuljetetaan parin viikon välein tilalta biokaasulaitokselle, jolloin vuosittainen varastointiaika tilalla pienentyy jopa viidennekseen (-80 %).

Kuljetettaessa lietelantaa tilalta biokaasulaitokselle oletettiin laitokselta lähtevän samalla paluukuorma jäännöstä tilalle, jolloin vältetään tyhjää ajoa tilan ja laitoksen välillä, ts. kummallekaan kuljetukselle ei ole oletettu tyhjää paluukuljetusta. Sen sijaan pellolta lietesäiliö ajetaan levityksen jälkeen tyhjänä takaisin tilalle (5 km). Myös lannan ja jäännöksen pumppaukseen ja sekoitukseen tarvittava polttoaineen kulutus (maataloustraktori, diesel) on huomioitu tarkastelussa.

Biokaasuprosessi oletettiin tarkastelussa mesofiiliseksi (37 °C) täyssekoitteiseksi lieteprosesseiksi. Biokaasuprosessin aikana ravinteista vain liukoisen ammoniumtyypen osuuden oletettiin muuttuvan, jolloin sekä kokonaistypen, -fosforin ja -kaliumin että liukoisen fosforin ja kaliumin pitoisuudet pysyivät vakioina. Tarkasteltavista syötteistä ainoastaan elintarviketeollisuuden sivutuotteet hygienisoitiin (70 °C, 1 h) biokaasulaitoksella ennen prosessia. Ravinnepitoisuuksien ei oletettu muuttuvan hygienisoinnin aikana.

Käsittelyjäännöksen ja siitä erotettujen neste- ja kuivajakeiden levitystavat poikkeavat käytännössä hieman lietelannan levitystavoista. Tässä tarkastelussa on kuitenkin käytetty johdonmukaisuuden säilyttämiseksi samoja toimia jokaisen jakeen kohdalla (peltomaalle äestys alle 12 h kuluessa levityksestä, kesannolle sijoituslevitys, sängelle kyntö alle 12 h kuluessa levityksestä).

Lietelannan ja jäännöksen levitysmäärät pelloille arvioitiin lannan ja muiden raaka-aineiden sisältämän fosforin perusteella olettaen, että ne käytetään ohran viljelyyn savimaalla. Savimaiden keskimääräinen P-luku on 8,03 (Viljavuuspalvelu 2014), jolloin sallittu fosforin levitysmäärä on 14 kg/ha (Nummela & Tuononen 2009). Tämän perusteella laskettiin lannan ja jäännöksen levitykseen tarvittavat pinta-alat. Joidenkin jakeiden kohdalla typen määrä jäi alhaiseksi, jolloin joudutaan käyttämään tyypillisiä joko mineraalilannoitteista tai tekemään sopivia sekoitussuhteita eri jakeista. Lisätypen käyttöä ei kuitenkaan otettu tässä tutkimuksessa huomioon.

### 2.2.3. Laskentaperusteet

Biokaasu- ja referenssiketjut on kuvattu taulukossa 1. Syötteiden ominaisuudet perustuvat kirjallisuusarvoihin sekä asiantuntija-arvoihin (taulukko 2). Elintarviketeollisuuden sivutuotteiden ominaisuudet perustuvat arvioon keskimääräisestä eläin- ja kasviperäisen elintarviketeollisuuden jäte-/sivuvirtojen koostumuksesta (Kahiluoto & Kuisma 2010, Luostarinen ym. 2011, Rasi ym. 2012). Referenssiketjuissa sianlannan ominaisuudet poikkesivat hieman biokaasuketjun lannan ominaisuuksista referenssilannan pitemmän varastoinnin ja sen aikaisten pitoisuusmuutosten vuoksi. Sian lietelannasta separoidun kuivajakeen ominaisuudet laskettiin lietelannan ominaisuuksien ja lannan separointilaitteiston erotustehokkuuksien perusteella. Separaattoriksi oletettiin sähkökäyttöinen linko, jonka erotustehot olivat kuivajakeelle seuraavat: massa 17 %, TS 67 %, VS 67 %,  $N_{\text{kok}}$  30 %,  $NH_4\text{-N}$  19 %,  $P_{\text{kok}}$  74 % (Hjorth ym. 2010) ja  $K_{\text{kok}}$  12 %. Separaattorin energiankulutukseksi oletettiin 2,5 kWh/t käsiteltävää materiaalia (Møller ym. 2000).

**Taulukko 2.** Syötteiden ominaisuudet tuorepainossa.

	TS (%)	VS (%)	N <sub>kok</sub> (g/kg)	NH <sub>4</sub> -N (g/kg)	P <sub>kok</sub> (g/kg)	K <sub>kok</sub> (g/kg)	CH <sub>4</sub> - potentiaali (m <sup>3</sup> /tVS)	Lähteet
Sian lietalanta (biokaasuketjussa)	7,0	5,6	4,7	3,1	1,2	2,1	320	1
Sian lietalanta (referenssiketjussa)	6,0	4,7	4,0	2,6	1,2	2,0	320	1
Sian lietalannan kuivajae	28	23	8,3	3,5	5,5	1,5	300	1,2
Elintarviketeollisuuden sivutuote	20	16	8,0	4,0	1,0	1,0	300	3,4,5
HVP-nurmi	37	34	12	1,0	0,9	6,0	270	4,6

<sup>1</sup>Hamelin ym. 2013, <sup>2</sup>Laskennallinen, <sup>3</sup>Kahiluoto & Kuisma 2010, <sup>4</sup>Luostarinen ym. 2011, <sup>5</sup>Rasi ym. 2012, <sup>6</sup>Niemeläinen ym. 2014

#### 2.2.4. Massa-, ravinne- ja energiataseet

Massa- ja ravinnetaseet laskettiin syötteiden ominaisuuksien avulla (taulukko 2). Ravinnetaseissa huomioitiin lisäksi typen liukoistuminen prosessissa. Ammoniumtyyppipitoisuuden nousu biokaasuprosessin aikana oletettiin olevan 30 % sian lietalannalla ja sen kuivajakeella, kun taas elintarviketeollisuuden sivutuotteilla ja HVP-nurmella sen oletettiin olevan 50 %.

Biokaasulaitoksen tuottama energiamäärä laskettiin syötemateriaalien metaanintuottopotentiaalin ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuuden avulla huomioiden eri energiantuotantomuotojen hyötysuhteet. Biokaasuketjuissa syötteistä biokaasuksi muuttuva massamäärä laskettiin metaanin ja hiilidioksidin tiheyden sekä oletetun biokaasun koostumuksen avulla (60 % CH<sub>4</sub>, 40 % CO<sub>2</sub>). Käsittelyjäännöksen massa laskettiin syötteiden kokonaismäärän ja biokaasuun menevän massan määrän erotuksena.

Biokaasuprosessin lämpöenergian tarve arvioitiin syötteen lämmittämiseen kuluvan energian ja reaktorin lämpöhäviöiden avulla. Ketjuissa BK1 ja BK2 prosessiin ei sisällynyt hygienisointia, jolloin syötemateriaalia lämmitettiin 15 asteesta 40 asteeseen, ja lämpöenergian tarve laskettiin veden ominaislämpökapasiteetin avulla (kaava 1). Lämpöenergian tarpeeksi tuli 566 MWh/a. Ketjussa BK3 biokaasuprosessia edelsi hygienisointiyksikkö elintarviketeollisuuden sivutuotteille. Hygienisoinnin lämmöntarve laskettiin veden ominaislämpökapasiteetin avulla (kaava 1) olettaen lämmitystarpeen olevan 15 asteesta 75 asteeseen. Tällöin lämpöenergian tarve oli 244 MWh/a. Lisäksi lannan lämmitykseen kului 464 MWh/a. Käytännössä hygienisoidun materiaalin jäähtymisessä vapautuva lämpö vähentää lannan lämmitystarvetta, mutta sitä ei huomioitu tässä laskennassa.

$$\Delta E = c \times m \times \Delta t, \quad (\text{kaava 1})$$

missä

$\Delta E$  = lämmittämiseen tarvittava energia

$c$  = aineen ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg<sup>o</sup>C ( $c_{\text{vesi}} = 4,18$  kJ/kg<sup>o</sup>C)

$m$  = massa, kg

$\Delta t$  = lämpötilan muutos, <sup>o</sup>C

Reaktorin lämpöhäviöt laskettiin vuosittaisena keskiarvona käyttäen seuraavia oletuksia: reaktorin tilavuus 1290 m<sup>3</sup>, eristemateriaalin lämmönläpäisykerroin  $u=0,53$  W/m<sup>2</sup>K, reaktorin sisälämpötila 37 <sup>o</sup>C ja kuukausittainen ulkoilman keskilämpötila.

Hygienisoinnin sähkönkulutukseksi oletettiin 0,085 kWh/t käsiteltävää materiaalia (asiantuntija-arvio). Biokaasulaitoksen sähkönkulutuksen oletettiin olevan 3 % laitoksen tuottamasta energiasta (asiantuntija-arvio, Pöschl ym. 2010).

Käsittelyjäännöksen separoinnissa oletettiin käytettävän samanlaista sähkökäyttöistä linkoa kuin sian lietalannan separoinnissa, jolloin sekä energiankulutus että erotustehot olivat samat.

Biokaasulaitoksen tuottaman biokaasun energiakäyttöä ja jalostustarvetta tarkasteltiin kahdessa eri vaihtoehdossa: sähkön ja lämmön tuotanto CHP-yksikössä ja jalostus liikennepolttoaineeksi. Laskennassa käytetyt hyötysuhteet on esitetty taulukossa 3. CHP-vaihtoehdossa oletettiin, että biokaasulaitos pystyy korvaamaan omaa energiankulutustaan tuottamallaan energialla, jolloin ostosähkölle ja -lämmölle ei ole tarvetta. Liikennepolttoainevaihtoehdossa jalostustekniikaksi valittiin vesipesu, jonka energiankulutuksena käytettiin 0,75 kWh per tuotettu metaanikuutio sisältäen myös kaasun paineistuksen (Biokaasulaskuri 2014). Liikennepolttoainevaihtoehdossa oletuksena oli, että kaikki biokaasuprosessin tuottama energia ohjataan liikennepolttoaineen tuotantoon, jolloin sekä biokaasulaitoksen että kaasun jalostuksen kuluttama energia tuotettiin ostosähköllä ja -lämmöllä.

**Taulukko 3.** Laskennassa käytetyt energiantuotannon hyötysuhteet.

Energiantuotantomuoto	Hyötysuhde (%)
CHP, sähkö	35
CHP, lämpö	50
Liikennepolttoaine	95

### Kuljetukset

Sekä syötemassojen että jäännöksen ja siitä separoitujen neste- ja kuivajakeiden kuljetukset huomiointiin energiataseiden sekä ympäristövaikutusten laskennassa. Tarkastelussa käytetyt kuljetusetäisyydet on esitetty taulukossa 4 ja muut lähtöarvot taulukossa 5.

**Taulukko 4.** Oletetut kuljetusmatkat tarkastelluissa ketjuissa.

	BK1: Sian lietalanta + kuivajae	BK2: Sian lietalanta + HVP-nurmi	BK3: Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet
Referenssiketjut			
Tilalta peltoon (lietalanta)	5 km	5 km	5 km
Syntypaikalta käsittelyyn	-	0 km	50 km
Biokaasuketjut			
Tilalta bk-laitokseen	10 km (lietalanta) 20 km (lannan kuivajae)	10 km (lietalanta) 10 km (HVP-nurmi)	10 km (lietalanta) 50 km (sivutuote)
Tilalta peltoon	5 km	5 km	5 km

**Taulukko 5.** Kuljetusten ja massojen siirron laskennassa käytetyt lähtöarvot.

Kalusto	Kapasiteetti (m <sup>3</sup> )	Kulutus	Lähde
Traktori, ajo	12	0,2 l/tkm	Posio 2010
Traktori, sekoitus	-	0,32 l/m <sup>3</sup>	Asiantuntija-arvio
Traktori, kuormaus	-	0,06 l/m <sup>3</sup>	Asiantuntija-arvio
Traktori, levitys	12	10 l/ha	Asiantuntija-arvio
Traktori, ajo tyhjällä kuormalla		0,20 l/km	Asiantuntija-arvio
HVP-nurmen niitto		6 l/ha	Mikkola & Ahokas 2009
Puoliperävaunurekka, ajo	25	0,17 kWh/tkm <sup>1</sup>	VTT LIPASTO 2012
Maansiirtoauto, ajo	19	0,19 kWh/tkm <sup>1</sup>	VTT LIPASTO 2012
Pyöräkuormain, siirto	-	0,06 l/m <sup>3</sup>	Asiantuntija-arvio

<sup>1</sup> Maantieajo, EURO 5

### Ympäristövaikutusten arviointi

Hankkeessa arvioitiin biokaasuketjujen 1–3 elinkaarisia ympäristövaikutuksia verrattuna vastaavien referenssiketjujen ympäristövaikutuksiin (ks. 2.2.1) noudattaen kansainvälisiä elinkaariarviointimenetelmän standardeja (ISO 2006a, ISO 2006b) sekä soveltaen edellä esitettyjä rajauksia ja muita oletuksia. Ympäristövaikutukset on arvioitu kokonaisketjuille vuositasolla, jolloin eri tuotteille ei ole allokoitu päästöjä. Erilaisia allokointimahdollisuuksia ja niiden vaikutuksia tuloksiin pohditaan tulosten tarkastelussa.

Tarkastellut ympäristövaikutusluokat olivat ilmastonmuutos ja vesistöjen rehevöityminen. Ketjuissa syntyvät päästöt yhteismitallistettiin ympäristövaikutusluokkiin ekvivalenttikertoimilla (taulukko 6). Lisäksi NH<sub>3</sub>- ja NO<sub>x</sub>-päästöjen kulkeutumiskertoimena käytettiin 0,115 (Seppälä ym. 2004). Typpihuuhtoumien (N veteen) kulkeutumis- ja käytettävyyserkertoimena käytettiin 0,565 ja eroosiofosforin 0,16 (Saarinen ym. 2011). Huuhtoutuvan liuenneen fosforin on oletettu olevan kokonaan rehevöittävä, jolloin sen kerroin on yksi.

**Taulukko 6.** Käytetyt karakterisointikertoimet.

Päästömuuttuja	Ekvivalenttikerroin	Lähde
Ilmastonmuutos	kg CO <sub>2</sub> -ekv./kg	RES-direktiivi
CO <sub>2</sub>	1	
CH <sub>4</sub>	23	
N <sub>2</sub> O	296	
Rehevöityminen	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -ekv./kg	Seppälä ym., 2004
NH <sub>3</sub> ilmaan	0,35	
NO <sub>x</sub> ilmaan	0,13	
N veteen	0,42	
P veteen	3,06	

Tarkasteluun otettiin kaikki tarkasteltujen ketjujen ilmapäästöt ja huuhtoumat edellä esitettyjen systeemirajauksien mukaisesti (luvut 2.2.1 ja 2.2.2). Lietelannan varastoinnin ja peltokäytön ilmapäästöt perustuvat Grönroosin ym. (2009) kansalliseen ammoniakkipäästöinventaarioon, lukuun ottamatta varastoinnin metaanipäästöä, joka perustuu kansalliseen kasvihuonekaasuinventaarioon (Statistics Finland 2013). Käsittelyjäännöksen ja siitä separoitujen kuiva- ja nestejakeiden varastoinnin ja peltokäytön ammoniakki- ja dityppioksidipäästöt laskettiin käyttämällä liotelannan, kuivalannan ja virtsan kertoimia, jotka on esitetty Grönroosin ym. (2009) julkaisussa. Käsittelyjäännökselle jakeineen ei laskettu metaanipäästöjä varastoinnista, sillä metaanipäästöjen oletettiin olevan hyvin alhaiset biokaasuprosessin ja jälkikaasuuntumisaltaan jälkeen.

Lannan lastauksen ja levityksen päästöt laskettiin polttoaineen kulutuksen perusteella fossiilisen dieselin päästökertoimien mukaan. Polttoaineen kulutuksen lähteet on esitetty taulukossa 5. Kuljetusten päästökertoimet perustuvat VTT:n LIPASTO-tietokantaan. Myös itse biokaasulaitokselle laskettiin päästöjä CHP-tuotannosta perustuen tanskalaisiin mittaustuloksiin biokaasu-CHP-laitokselta (Kristensen ym. ei vuosilukua).

Rehevöittävien vaikutusten arvioinnissa typpihuuhtoumia arvioitiin ravinnetaseiden avulla, kun oletuksena oli, että jakeet levitetään savimaalle, jolla viljellään ohraa. Typpitaseen määrittämiseen käytettiin Suomen keskimääräistä ohran satotasoa. Fosforihuuhtouman laskennassa käytettiin Suomen savimaiden keskimääräistä P-lukua. Typpi- ja fosforihuuhtoumien laskentamallit on esitetty Saarisen ym. (2011) julkaisun liitteessä 4.

Biokaasulaitoksessa syntyvän nettoenergian oletettiin korvaavan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa, jolloin biokaasuketjulle laskettiin päästöhyvityksiä. Sähkön korvaushyöty laskettiin käyttämällä kivihillen ominaispäästökerrointa olettaen markkinoille tulevan uuden sähkön korvaavan marginaalienergiaa, jonka tässä tapauksessa oletettiin olevan kivihiltä. Myös lämpöenergian oletettiin korvaavan fossiilisia polttoaineita, siten tuottavan päästöhyvityksiä.

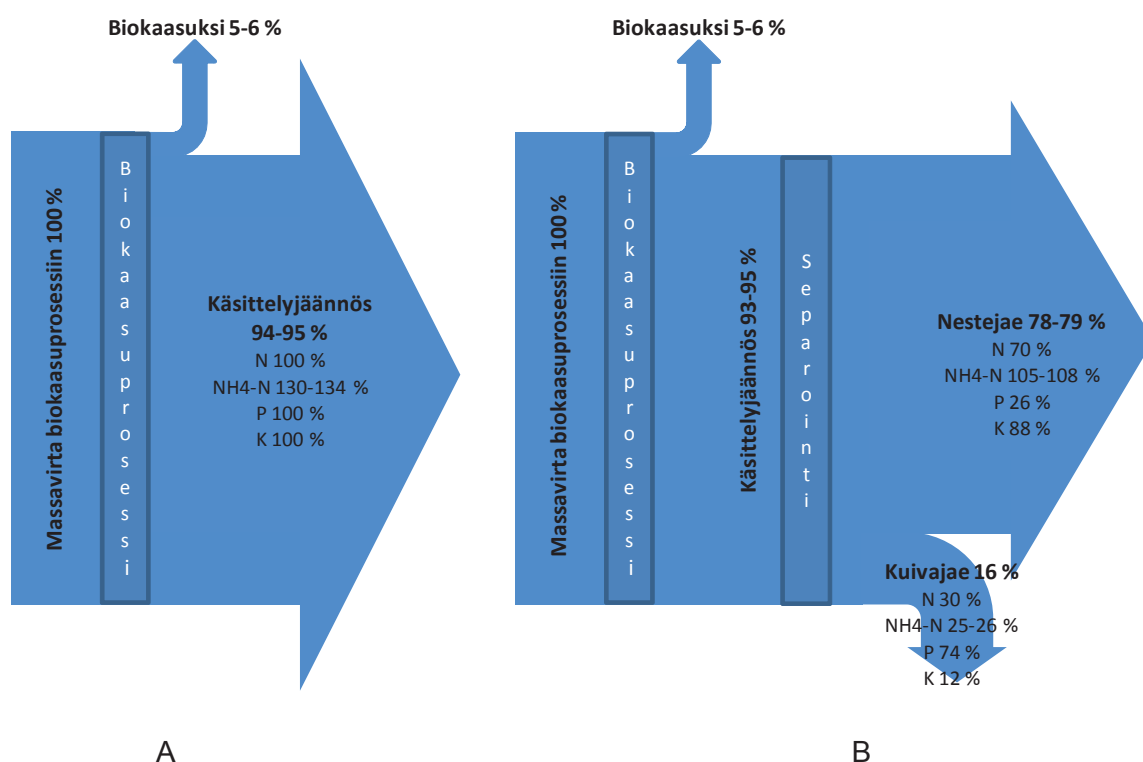
Päästöhyvityksiä syntyy myös käsittelyjäännöksen ja sen eri jakeiden lannoitekäytöstä niiden korvatesa mineraalilannoitteita, mikä vähentää mineraalilannoitteiden valmistuksessa muodostuvia päästöjä. Korvaushyödyn laskemiseen käytettiin Suomen keskimääräisen lannoitteen valmistuksen päästökertoimia 3,6 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N ilmastovaikutukselle sekä rehevöitymiselle käytetyimpien lannoitteiden rehevöittävien päästöjen keskiarvoa (Yara 2014).

## 2.3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

### 2.3.1. Massa ja ravinnetaseet

Biokaasuketjujen 1–3 massa- ja ravinnetasetarkasteluihin sisällytettiin ketju alkaen biokaasulaitoksen syötteistä ja päättyen joko prosessin lietemäiseen käsittelyjäännökseen tai käsittelyjäännöksen separoinnissa muodostuviin neste- ja kuivajakeisiin.

Biokaasuketjujen 1–3 massa- ja ravinnetaseissa oli melko vähän eroja, koska kaikki syötevaihtoehdot sisälsivät saman määrän, lähes 80 %, sian lietelantaa. Syötteiden kokonaismassa kaikissa kolmessa ketjussa oli 19 500 t/a ja syötesesten kuiva-ainepitoisuus 9–12 %. Biokaasuprosessin aikana massasta 5–6 % muuttui biokaasuksi mikrobitoiminnan vaikutuksesta (kuva 8, taulukko 7). Biokaasuprosessissa muodostuvaan käsittelyjäännökseen päätyi siten 94–95 % prosessiin syötetystä massasta ja sen kuiva-ainepitoisuus oli noin 5–7 %. Ravinteiden kokonaismäärät eivät muuttuneet prosessissa, mutta ammoniumtyypen osuus kokonaistypestä lisääntyi mikrobin hajotustoiminnan seurauksena. Näin ollen ravinteiden kokonaistypitoisuudet käsittelyjäännöksissä olivat 5,6–6,4 gN<sub>kok</sub>/kg, 3,8–4,4 gNH<sub>4</sub>-N/kg, 1,3–2,1 gP<sub>kok</sub>/kg ja 2,0–3,0 gK<sub>kok</sub>/kg (liite 1).



**Kuva 8.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen biokaasuketjuissa 1–3. A) Pelkkä biokaasuprosessi. B) Biokaasuprosessi ja separointi.

Käsittelyjäännöksen separoinnin sisältämässä ketjussa (kuva 8/B) kuivajakeeseen siirtyi käsittelyjäännöksen massasta 16 % (TS 19–26 %). Ravinteista kuivajakeeseen päätyi n. 30 % kokonaistypestä, yli 70 % fosforista ja noin 10 % kaliumista. Ammoniumtyypen määrä lisääntyi biokaasuprosessissa



tapahtuvan tyyppien liukoistumisen takia n. 32 % ja noin viidennes käsittelyjäännöksen ammoniumtyypistä päätyi kuivajakeeseen. Ravinteiden pitoisuudet kuivajakeessa olivat 9,8–11,3 gN/kg, 5,5–9,3 gP/kg, 1,4–2,1 gK/kg ja 4,3–5,2 gNH<sub>4</sub>-N/kg (liite 1).

Nestejakeeseen siirtyi 78–79 % käsittelyjäännöksen massasta (TS 19–25 g/kg), 70 % kokonaistyyppistä, 26 % kokonaisfosforista, ja lähes 90 % kokonaiskaliumista. Ammoniumtyyppipitoisuus oli nestejakeessa suurempi kuin syötteessä. Nestejakeen ravinnepitoisuudet olivat 4,7–5,4 gN/kg, 0,4–0,7 gP/kg, 2,1–3,2 gK/kg ja 3,7–4,4 gNH<sub>4</sub>-N/kg (liite 1).

Yleisesti ottaen erot eri syötemateriaalien välillä aiheuttivat vain vähäisiä eroja eri biokaasuprosessien massa- ja ravinnetaseisiin. BK2 ketjussa käsittelyjäännöksen kuiva-ainepitoisuus oli kuitenkin hieman korkeampi kuin muissa ketjuissa, johtuen HVP-nurmen korkeasta kuiva-ainepitoisuudesta (liite 1).

**Taulukko 7.** Massan ja ravinteiden jakautuminen biokaasuprosessissa ja separoinnissa biokaasuketjuissa 1–3.

% syötteen massa- ja ravinnevirrasta	Massavirta	TS	VS	N <sub>kok</sub>	NH <sub>4</sub> -N <sup>1</sup>	P <sub>kok</sub>	K <sub>kok</sub>
BK1: Sian lietelanta + kuivajae							
Käsittelyjäännös	95	49	37	100	130	100	100
Biokaasu	5	51	63	0	0	0	0
Nestejae	79	16	12	70	105	26	88
Kuivajae	16	33	25	30	25	74	12
BK2: Sian lietelanta + HVP-nurmi							
Käsittelyjäännös	94	49	41	100	131	100	100
Biokaasu	6	51	59	0	0	0	0
Nestejae	78	16	13	70	106	26	88
Kuivajae	16	33	28	30	25	74	12
BK3: Sian lietelanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet							
Käsittelyjäännös	95	49	37	100	134	100	100
Biokaasu	5	51	63	0	0	0	0
Nestejae	79	16	12	70	108	26	88
Kuivajae	16	33	25	30	26	74	12

<sup>1</sup>Käsittelyjäännöksen ammoniumtyyppipitoisuus nousee biokaasuprosessin aikana raaka-aineesta riippuen 30–50 %

### 2.3.2. Energiataseet

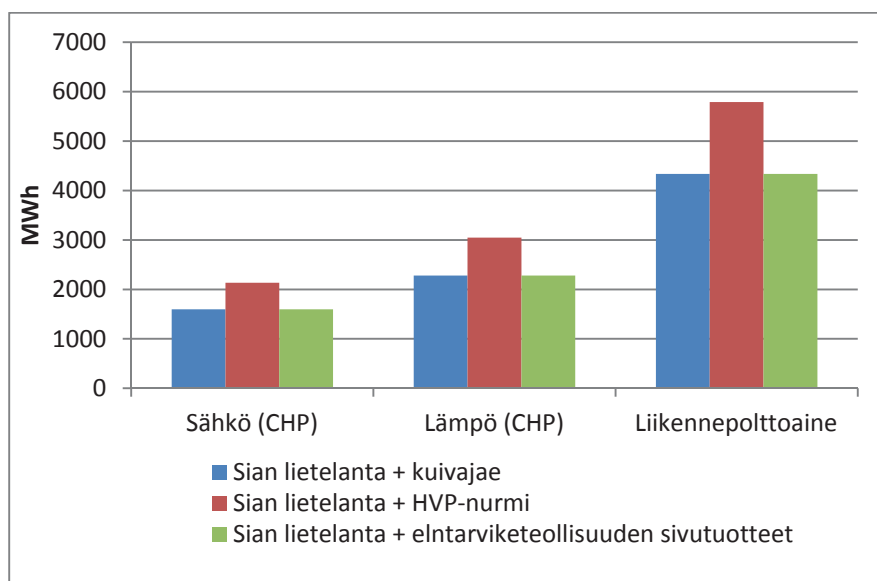
Biokaasuketjujen 1–3 energiataaseita tarkasteltiin erikseen biokaasulaitosten osalta sekä koko ketjun osalta, jolloin huomioitiin myös kuljetukset ja peltolevitys.

#### *Biokaasulaitoksen energiataase*

Biokaasuketjujen 1–3 energiataaseissa huomioitiin yksikköprosessien energiankulutus ja tuotetun biokaasun energiamäärä sekä energiantuotantomuotojen hyötysuhteet ja niihin liittyvät häviöt. Tuotetun biokaasun energiasisältö määritettiin laskennallisesti syötemateriaalien metaanintuottopotentiaalien avulla. Se oli suurin ketjussa BK2 (6 100 MWh/a) johtuen HVP-nurmen korkeasta orgaanisen aineen (VS) pitoisuudesta. Ketjussa BK1 biokaasun energiasisältö oli 5 300 MWh/a ja ketjussa BK3 4600 MWh/a.

Suurin energiahyöty biokaasusta saadaan liikennepolttoaineen tuotannossa, jossa energiantuotannon hyötysuhde on korkea (tässä oletuksena 95 %). Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa (CHP) sähköntuotannon hyötysuhteena käytettiin 35 % ja lämmöntuotannon hyötysuhteena 50 %. Eri

ketjuissa tuotettavissa olevat energiamäärät olivat CHP-sähkönä 1 600–2 100 MWh/a, CHP-lämpönä 2 300–3 000 MWh/a ja liikennepolttoaineeksi jalostettuna biometaanina 4 300–5 800 MWh/a (kuva 9).



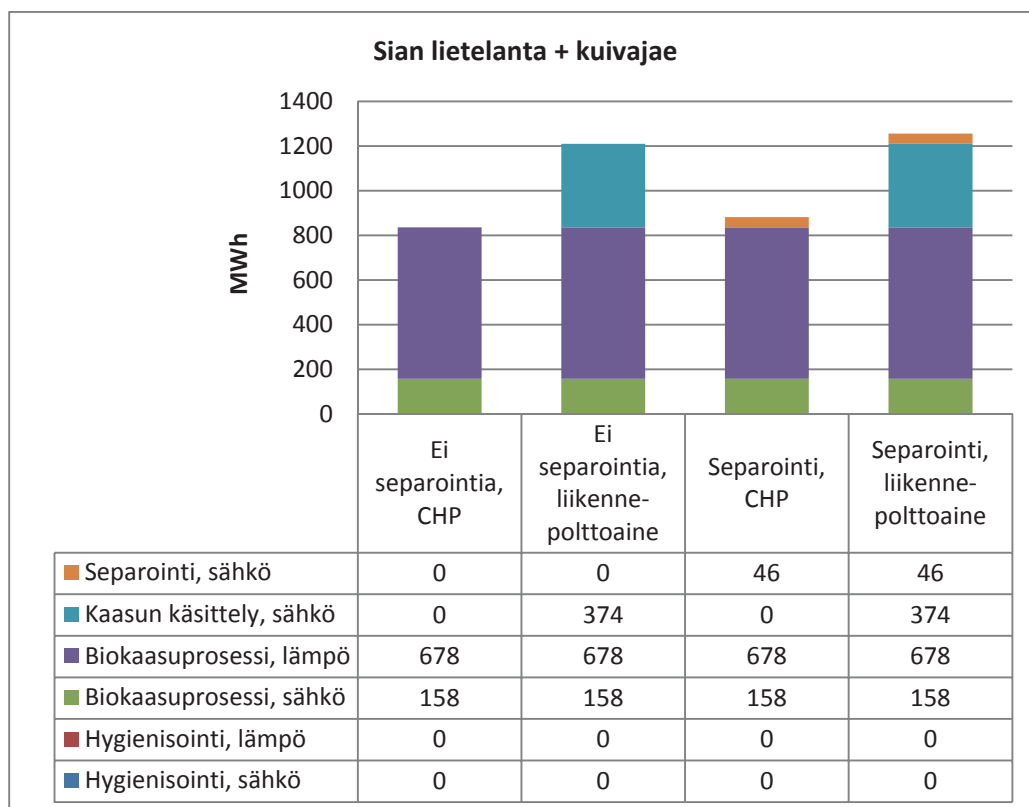
**Kuva 9.** Biokaasuketjujen 1–3 tuottamat energiamäärät CHP sähkönä ja lämpönä sekä liikennepolttoaineena (laitoksen omaa kulutusta ei huomioitu).

Biokaasulaitoksen energiatasotarkasteluihin sisällytettiin ketju alkaen syötteistä ja päättyen kaasun osalta energiantuotantoon sekä massan osalta joko prosessin lietemäiseen käsittelyjäännökseen tai käsittelyjäännöksen separointiin. Energiankulutuksessa huomioitiin seuraavat yksikköprosessit: hygienisointi (vain ketju BK3), biokaasuprosessi, mahdollinen separointi sekä mahdollinen kaasun käsittely ja jalostus biometaaniksi.

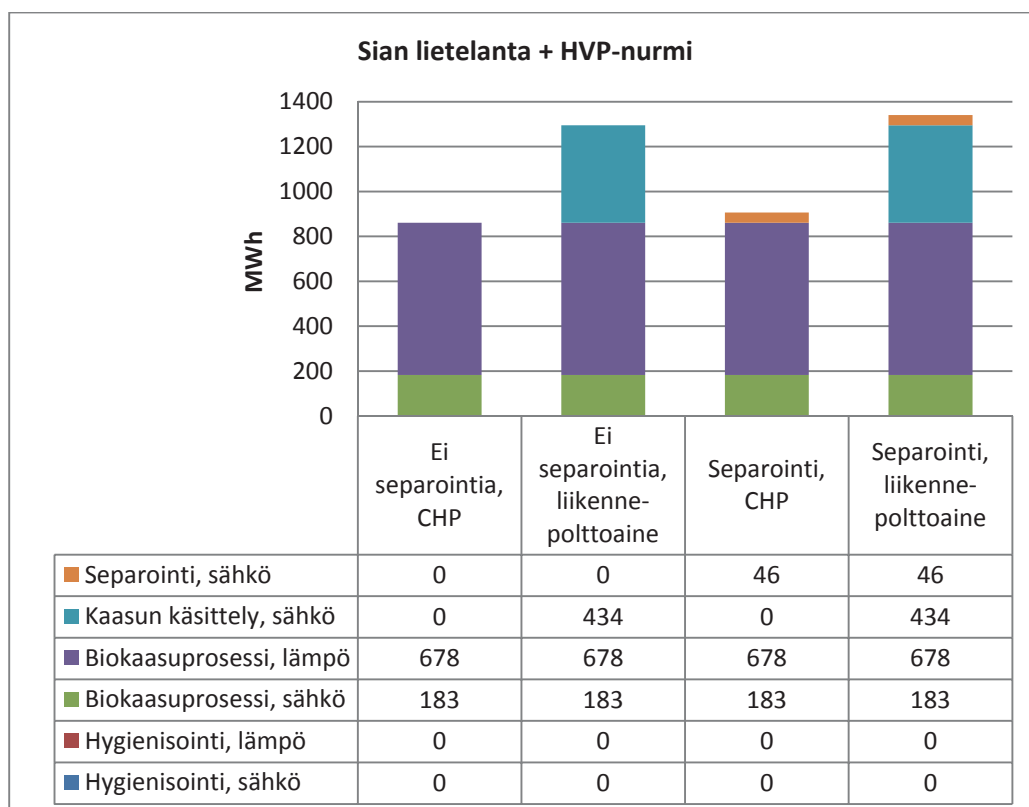
Koska eri ketjuissa oli kaksi vaihtoehtoista lopputuotetta sekä massalle (lietemäinen käsittelyjäännös ja sen separoidut jakeet) että kaasulle (CHP sähkö ja lämpö sekä liikennepolttoaine), oli jokaisessa ketjussa neljä vaihtoehtoista toimintastrategiaa energiankulutuksen näkökulmasta. Eri vaiheiden energiankulutus eri ketjuissa ja eri toimintastrategioilla on esitetty kuvissa 10, 11 ja 12.

Suurin kokonaisenergiankulutus oli biokaasulaitoksissa, joissa käsiteltiin lannan lisäsyötteenä HVP-nurmea (BK2). Energiankulutuksesta suurin osa aiheutui syötteiden lämmityksestä. BK3:ssa sivutuotteiden hygienisoinnin vaatima energia nosti prosessin kokonaisenergiankulutusta jonkin verran, vaikka se suhteessa laskikin biokaasuprosessin lämmittämiseen tarvittavan energian määrää. Käsittelyjäännöksen separoinnin osuus oli pieni suhteessa biokaasulaitoksen muuhun energiankulutukseen ja CHP-yksikön oma energiankulutus oletettiin tässä nollassi.

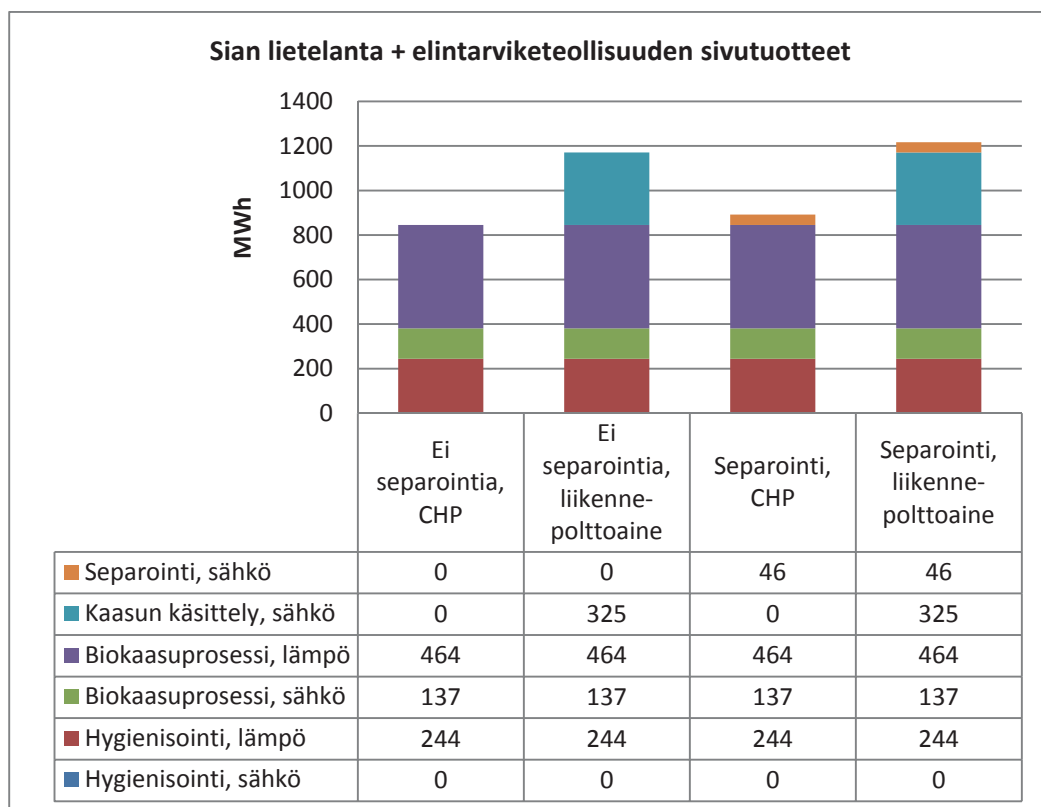
Kaasun jalostus liikennepolttoaineeksi lisää biokaasulaitoksen energiankulutusta. Liikennepolttoaineen tuotannon vaihtoehdossa oletettiin, että koko biokaasulaitoksen tuottama energia jalostetaan biometaaniksi. Tällöin laitoksen oman toiminnan vaatima energia tulee ostaa ulkopuolelta. Tuotettavan liikennepolttoaineen energiamäärä vuosittain oli 4 300–5 800 MWh (kuva 9, liite 2). Tällöin laitosten ostosähkön tarve vaihteli eri ketjuissa ja jäännöksen käsittelytavasta riippuen 460–660 MWh välillä ja tarvittavan lämmön määrä 680–710 MWh välillä (liite 2).



Kuva 10. BK1 -ketjun energiankulutuksen jakauma.



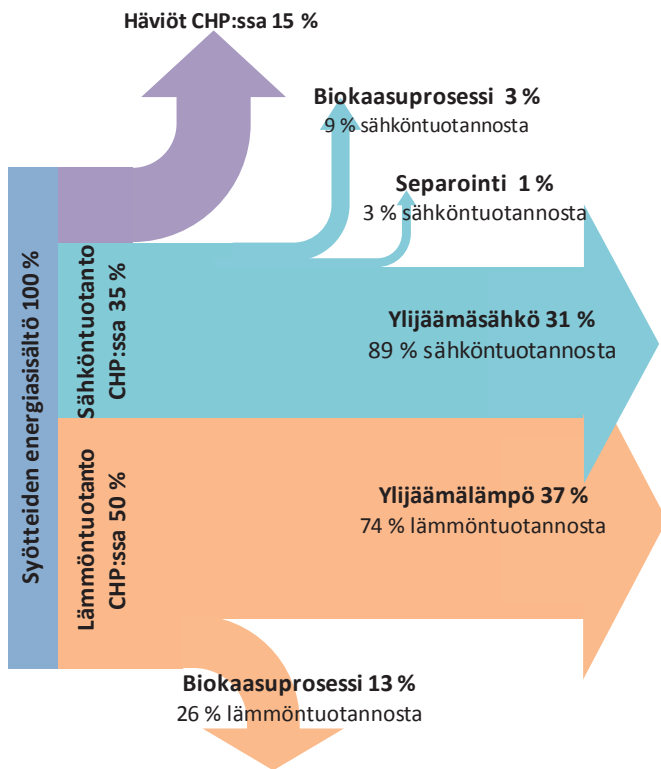
Kuva 11. BK2 -ketjun energiankulutuksen jakauma.



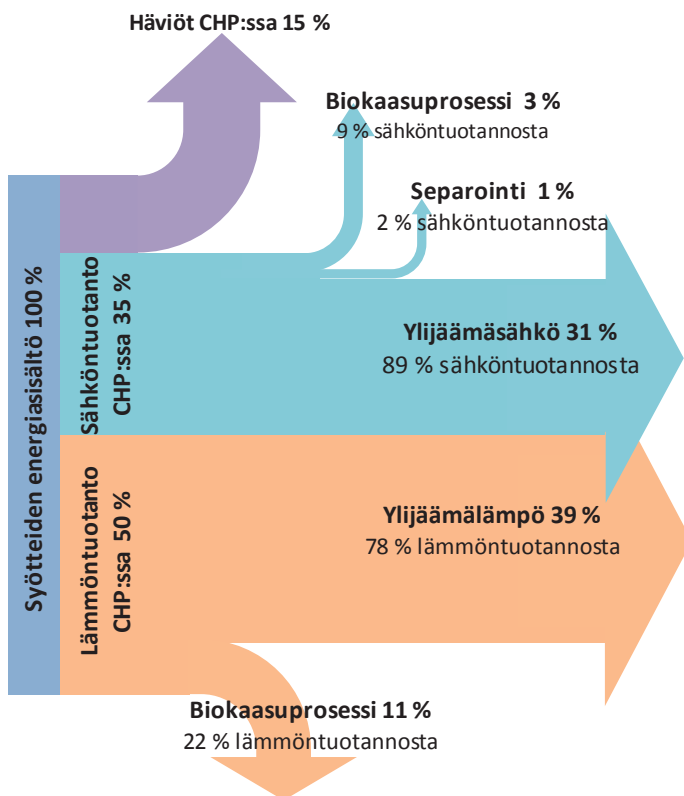
**Kuva 12.** BK3 -ketjun energiankulutuksen jakauma.

Syötteiden energiasisällön jakautuminen CHP-yksikön sisältävässä biokaasuprosessissa on esitetty kuvassa 13 sisältäen tuotetun sähkön ja lämmön, häviöt, energiankulutuksen jakautumisen sekä ylijäämänsähkö- ja -lämmön osuudet. Biokaasulaitoksen oman kulutuksen ja mahdollisen jäännöksen separoinnin jälkeen kaikissa tarkastelluissa ketjuissa jäi sähkö- ja lämpöenergiaa yli oman tarpeen (liite 2, kuva 13).

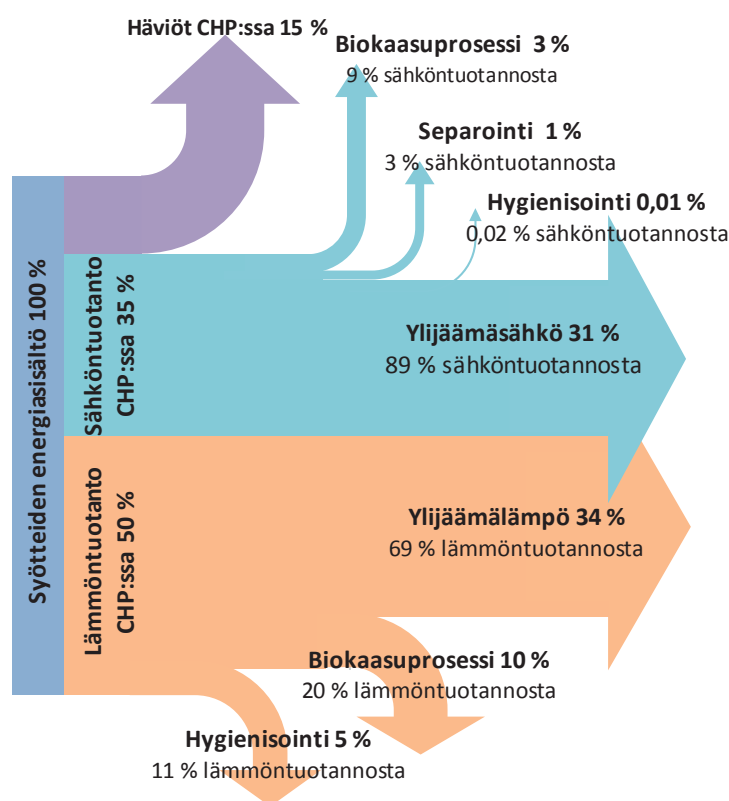
CHP:n tuottamasta sähköstä biokaasulaitos kulutti noin 9 % ja lämmöstä 22–31 % (kuva 13). Hygienisointi nosti hieman biokaasuprosessin lämmönkulutusta ketjussa BK3. Käytännössä hygienisoidusta materiaalista vapautuva lämpö voidaan hyödyntää muiden syötteiden lämmityksessä, mikä parantaa ketjun energiatasetta. Myös syötteen orgaanisen aineen pitoisuus vaikuttaa suhteelliseen lämmönkulutukseen. Karkeasti voidaan todeta, että mitä pienempi orgaanisen aineen pitoisuus on syötteessä, sitä pienempi on syötteen energiasisältö ja sitä suurempi osuus tuotetusta lämmöstä kuluu syötteiden lämmittämiseen. Kaikki ketjut kuitenkin tuottivat sähköä ja lämpöä yli oman tarpeen. Eniten ylijäämäenergiaa muodostui ketjussa BK2, jossa lannan lisäsyötteenä oli HVP-nurmi. Ketjuissa, joissa ei käytetty separointia, ylijäämänsähkön määrä oli 1 400–1 900 MWh/a, separoinnin kuluttaessa tästä 46 MWh (liite 2). Ylijäämälämpöä muodostui ketjuissa 1 600–2 400 MWh/a.



a) BK1



b) BK2



## c) BK3

**Kuva 13.** Kokonaisenergian tuotanto CHP:n sisältävässä biokaasuprosessissa eri biokaasuketjuissa ja sen jakautuminen kulutuksen mukaan sekä sähkön- että lämmön suhteen. a) BK1: Sian lietelanta + lannan kuivajae, b) BK2: Sian lietelanta + HVP-nurmi, c) BK3: Sian lietelanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet.

*Kokonaisketjun energiatase*

Kokonaisketjujen tarkastelussa huomioitiin itse biokaasuprosessin lisäksi syötemateriaalien hankinnan, kuljetusten sekä käsittelyjäännöksen peltolevityksen energiankulutus (kuva 14). Kuvan ketjuja ei voi verrata keskenään, koska pelkkää lantaa käsittelevässä ketjussa BK1 tarkasteltava lantamäärä (36 792 t) on suurempi kuin ketjuissa BK2 ja BK3 (16 000 t; ks. luku 2.2.1).

Syötemateriaalien hankinnassa huomioitiin BK1 -ketjussa lietelannan sekoituksen kulutus, lannan separointi sekä lietelannan nestejakeen kuljetuksen ja peltolevityksen kulutus. Ketjussa BK2 huomioitiin lietelannan sekoituksen ja HVP-nurmen niiton energiankulutus, kun taas ketjussa BK3 syötemateriaalien hankintaan sisällytettiin ainoastaan lietelannan sekoitus.

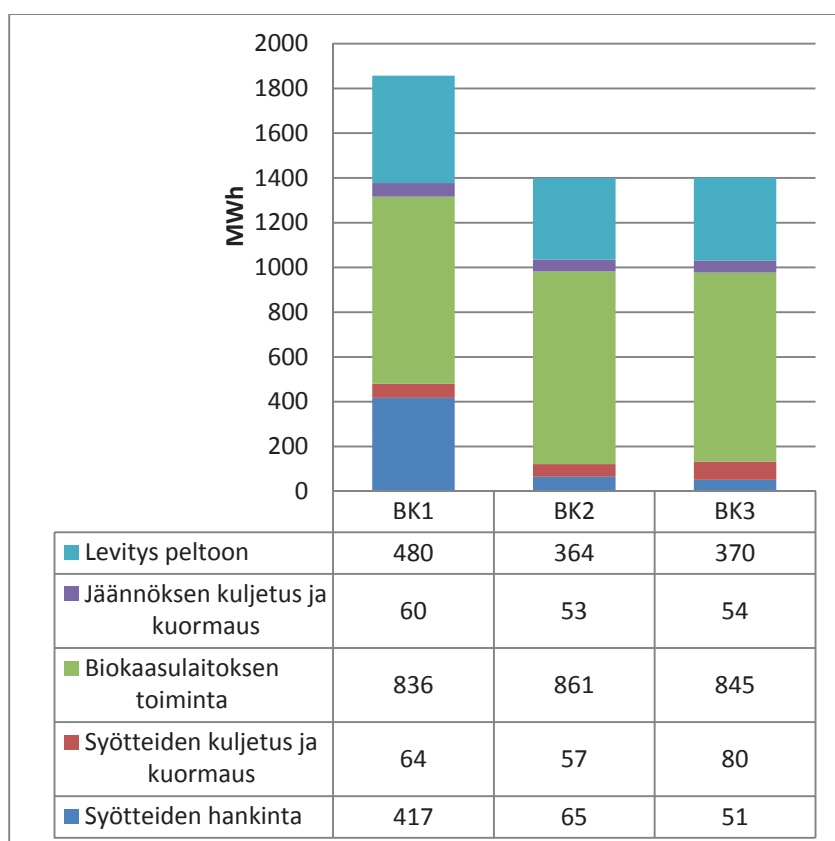
Syötemateriaalien kuljetuksiin sisällytettiin kuljetukset syntypaikalta biokaasulaitokselle sekä tarvittavat lastaukset ja niiden energiankulutus. Jäännöksen kuljetukseen ja kuormaukseen sisällytettiin jäännöksen kuljetus biokaasulaitokselta tilalle sekä tarvittavat lastaukset. Jäännöksen peltolevitykseen laskettiin sekä jäännöksen kuljetus tilalta peltoon (5 km) sekä levitys letkulevittimen avulla. Koska sekä separoimattoman että neste- ja kuivajakeeksi separoidun jäännöksen kuljetusten energiankulutukset olivat hyvin lähellä toisiaan (ero alle 0,6 MWh), tarkasteltiin laskennassa ainoastaan ketjua, jossa käsittelyjäännöstä ei separoida. Laskennassa ei myöskään huomioitu kaasun jalostusta esimerkiksi liikennebiokaasuksi ja sen aiheuttamaa energiankulutusta. Syötemateriaalien hankinnan, kuljetusten ja peltolevityksen energiankulutukset laskettiin prosessikuvauksissa määriteltyjen välimatkojen sekä ajoneuvojen kulustietojen perusteella (ks. kpl 2.2.3, taulukot 4 ja 5).

Koska ketjuissa BK2 ja BK3 massamäärät olivat samansuuruisia, olivat myös materiaalien käsittelyn ja kuljetusten energiankulutukset samaa suuruusluokkaa. Näissä ketjuissa biokaasulaitoksen toi-



mintu muodosti noin 60 % ja käsittelyjäännöksen peltolevitys 26 % ketjun kokonaisenergiankulutuksesta (kuva 14). Syötemateriaalien hankinnan ja kuljetusten energiankulutuksen osuus oli näihin verrattuna pieni.

Ketjussa BK1 tarkastelussa oli mukana suurempi lantamäärä, koska biokaasulaitokselle toimitettavan kuivajakeen lisäksi huomioitiin separoinnissa muodostuvan nestejakeen kuljetus ja levitys peltoon. Tämän ketjun energiatasetta ei siten voida suoraan verrata ketjujen BK2 ja BK3 taseisiin. Ketjussa BK1 biokaasulaitos muodosti noin 45 %, lannan separointi 20 % ja käsittelyjäännöksen sekä tilalle jääneen nestejakeen peltolevitys 26 % ketjun kokonaisenergiankulutuksesta.



**Kuva 14.** Biokaasuketjujen BK1-BK3 massojen hankinnan, kuljetuksen ja peltolevityksen energiankulutus. Pelkkää lantaa käsittelevässä ketjussa päästöjä lisää suurempi lantamäärä (36 792 t) kuin kahdessa muussa ketjussa (16 000 t).

Tarkastelluissa biokaasuketjuissa kokonaisketjun energiankulutus oli 23–35 % biokaasun energiasisällöstä (taulukko 8). Energiankulutusten osalta on syytä huomioida, että biokaasulaitoksen toimintaa lukuun ottamatta valtaosa syötteiden hankintaan ja kuljetuksiin sekä käsittelyjäännöksen kuljetuksiin ja peltolevitykseen liittyvistä energiankulutuksista toteutuisi myös referenssiketjussa, joka ei sisällä biokaasulaitosta.

**Taulukko 8.** Kokonaisketjujen energiatase. Jäännöksen separointia tai kaasun jalostuksen energiankulutusta ei huomioitu.

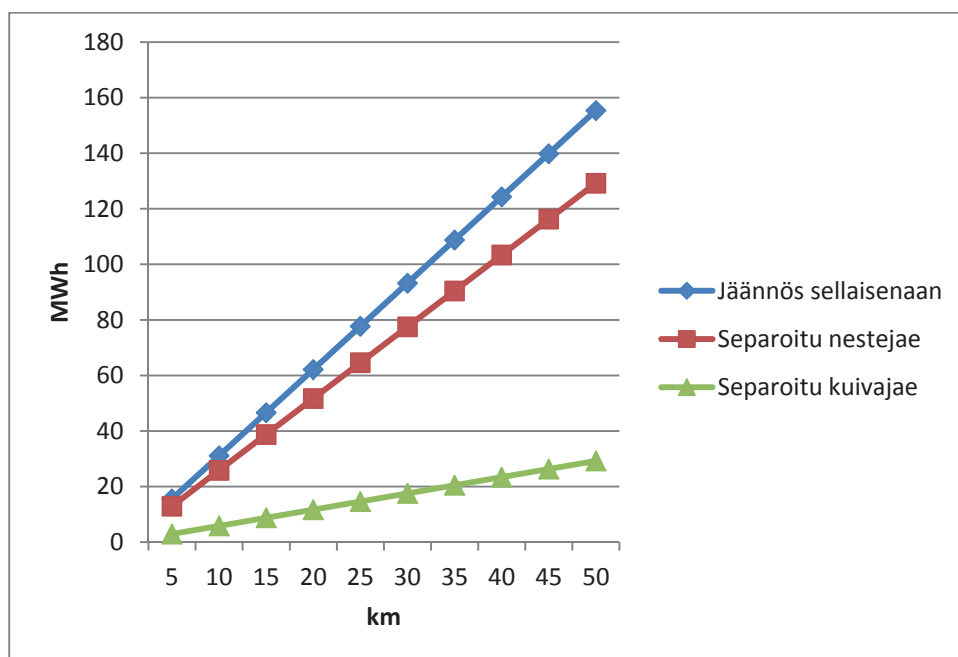
Ketju	Biokaasun energiasisältö MWh	Kokonaisketjun energi- ankulutus	Ylijäämäenergia
BK1	5300	1900	3400
BK2	6100	1400	4700
BK3	4600	1400	3200

### Käsittelyjäännöksen kuljetusmatkan vaikutus kuljetuksen energiankulutukseen

Käsittelyjäännöksen kuljetusmatkan vaikutusta kuljetuksen energiankulutukseen tarkasteltiin ketjussa BK1 sekä lietemäisen käsittelyjäännöksen että siitä separoitujen neste- ja kuivajakeiden osalta. Lähtökohtana oli käsittelyjäännöksen 5 km kuljetus biokaasulaitokselta tilalle. Kuljetusten energiankulutusta tarkasteltiin kuljetusetäisyyden funktiona 50 km:iin saakka.

Kuljetettavan massan määrä vaikuttaa suoraan kuljetuksen energiankulutukseen. Kuivajakeen kuljetusetäisyyden kasvattaminen 5 kilometristä 50 kilometriin lisäsi energiankulutusta vain noin 30 MWh:lla, kun lietemäisen käsittelyjäännöksen ja nestejakeen kuljetusten energiankulutus nousi yli 100 MWh vastaavalla matkalla (kuva 15).

Jos lantaa käsittelevä biokaasulaitos sijaitsee alueella, joilla peltojen fosforiluku on korkea, on fosforia tarpeen kuljettaa kauemmas fosforilannoitusta tarvitseville pelloille. Separoinnissa fosfori yleensä konsentroituu kuivajakeeseen, minkä kuljetus kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa kuin lietemäisen käsittelyjäännöksen kuljetus. Separoinnin energiankulutus ketjussa BK1 oli 46 MWh. Lietemäisen käsittelyjäännöksen kuljetus 15 km kulutti saman verran energiaa. Karkeasti voidaan todeta, että separointi on energiataseen kannalta järkevää, jos fosforia on tarpeen kuljettaa yli 15 km ja typpi voidaan hyödyntää lähipeltoilla. Koska kuljetusten energiankulutus ja kustannukset ovat suoraan verrannollisia, on kuivajakeen kuljettaminen huomattavasti edullisempaa kuin lietemäisen käsittelyjäännöksen.

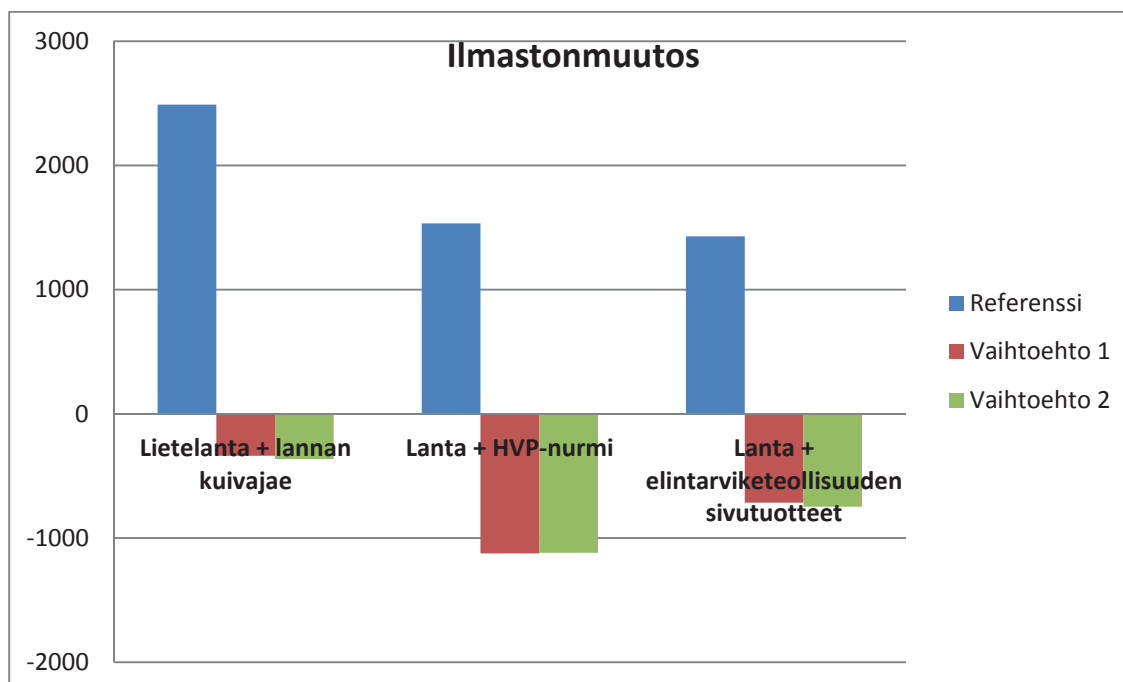


**Kuva 15.** Kuljetusetäisyyden vaikutus ketjussa BK1 käsittelyjäännöksen ja separoitujen neste- ja kuivajakeen kuljetuksen energiankulutukseen. Ainoastaan massojen kuljetus biokaasulaitokselta tilalle huomioitiin.

### 2.3.3. Ympäristövaikutukset

Biokaasuketjujen ympäristövaikutuksia (ilmastonmuutos ja rehevöityminen) verrattiin referenssiketjuihin vuositasolla. Kaikkien tarkasteltujen biokaasuketjujen ilmastovaikutukset olivat huomattavasti alhaisemmat kuin vastaavat referenssinsä (kuva 16). Biokaasuketjujen ilmastovaikutukset olivat peräti negatiiviset, eli ketjussa syntyvät päästöt olivat pienemmät kuin korvattavien tuotteiden (mineraalilannoitteet ja fossiilinen energia) päästöt. Myös rehevöitymisvaikutukset olivat alhaisemmat kaikilla biokaasuketjuilla verrattuna referenssiketjuihin, vaikka erot eivät olekaan yhtä suuret kuin ilmastovaikutuksen kohdalla (kuva 15).

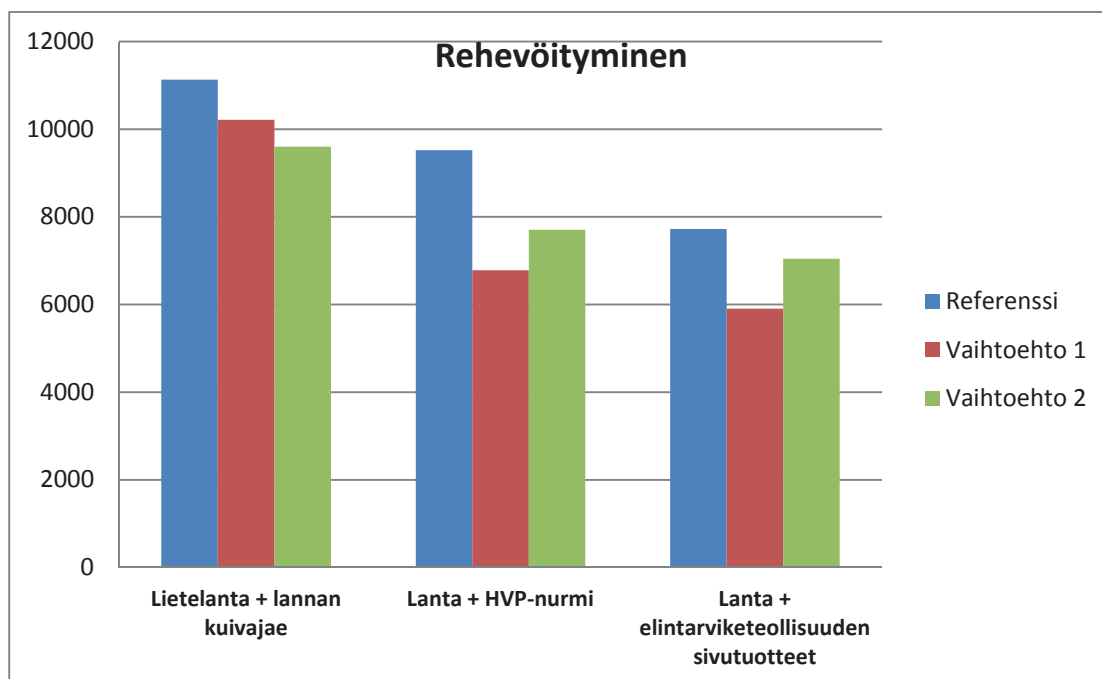
Pienin ilmastovaikutus on biokaasuketjulla, joka käyttää raaka-aineena sian lietelantaa ja HVP-nurmea (BK2) (kuva 16). Tämä johtuu siitä, että laitos tuottaa eniten energiaa, jolloin korvaushyöty vältetystä fossiilisesta energiasta on suurin. Kun verrataan biokaasuketjuja referenssiketjuihin, niin suurin ilmastovaikutuksen vähentyminen saavutetaan lietelantaa ja lannan kuivajetta käyttävällä biokaasuketjulla (BK1), sillä tässä tapauksessa referenssiketjun päästöt ovat selvästi muita referenssiketjuja korkeammat. Syynä tähän on suuri lantamäärä, jota biokaasuketju tarvitsee raaka-aineenaan, sillä päästöt on laskettu koko lietelantamäärälle, josta osa separoidaan ja vain kuivajae käytetään biokaasun raaka-aineeksi. Ilmastonmuutoksen kannalta ei ole merkittävää eroa käytetäänkö jäännös sellaisenaan vai separoituna, sillä separointiin kuuluva energiamäärä on pieni.



**Kuva 16.** Biokaasuketjujen ilmastovaikutukset verrattuna referenssiketjuihin (t CO<sub>2</sub>-ekv./vuosi). Vaihtoehdossa 1 käsittelyjäännös hyödynnetään sellaisenaan ja vaihtoehdossa 2 se separoidaan ennen lannoitekäyttöä. Pelkkää lantaa käsittelevässä ketjussa päästöjä lisää suurempi lantamäärä (36 792 t) kuin kahdessa muussa ketjussa (16 000 t).

Alhaisin rehevöittävä vaikutus on lantaa ja elintarviketeollisuuden sivutuotteita käsittelevällä laitoksella (BK3), kun käsittelyjäännöstä ei separoida ennen peltokäyttöä (kuva 17). Suurin rehevöittävä vaikutus puolestaan on pelkkää lantaa käyttävällä biokaasuketjulla (BK1). Tämä aiheutuu siitä, että käytetty lantamäärä on muita ketjuja suurempi, sillä myös lietelannasta ennen biokaasuprosessia separoitu nestejake käytetään lannoitteena ja sen lannoitekäytöstä aiheutuvat päästöt on laskettu mukaan ketjun päästöihin.

Kun verrataan biokaasuketjuja referenssiketjuihin, huomataan, että rehevöitymisvaikutus verrattuna referenssiin on alhaisin lantaa ja HVP-nurmea käsittelevällä laitoksella (BK2). Myös tässä tapauksessa alhaisemmat vaikutukset aiheutuvat vaihtoehdosta 1, jossa jäännöstä ei separoida ennen peltokäyttöä. Syynä tähän on, että separoidun jäännöksen kuivajae sisältää paljon fosforia, jonka vuoksi levitykseen tarvittava pinta-ala on suurempi kuin separoimattoman jäännöksen tapauksessa, ja typpi- ja fosforihuuhtoumat on laskettu levityspinta-alan perusteella. Todellisuudessa jakeista voitaisiin kuitenkin muodostaa sopivia yhdistelmiä, jolloin tarvittava levityspinta-ala ei välttämättä ole niin suuri kuin tässä on oletettu.

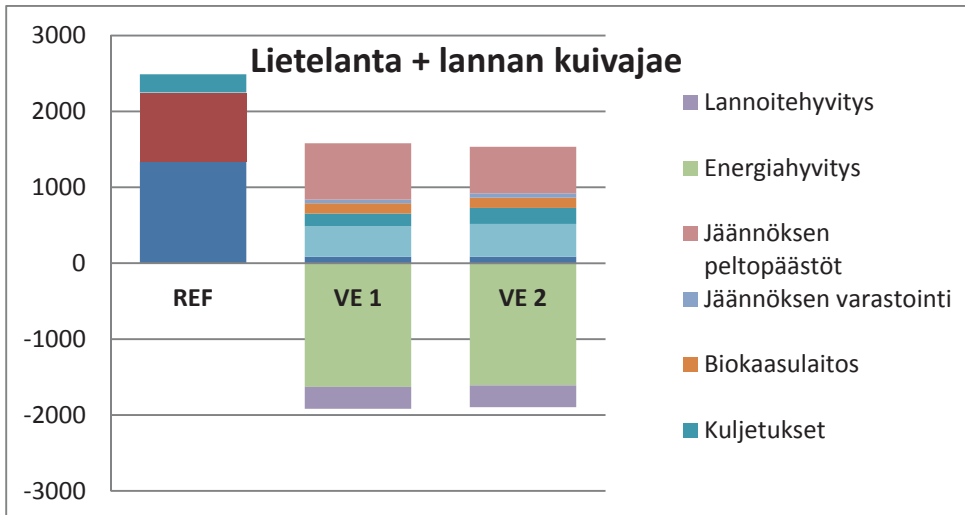


**Kuva 17.** Biokaasuketjujen rehevöittävä vaikutus verrattuna referenssiketjuihin (kg PO<sub>4</sub>-ekv./vuosi). Vaihtoehdossa 1 käsittelyjäännös hyödynnetään sellaisenaan ja vaihtoehdossa 2 se separoidaan ennen lannoitekäyttöä. Pelkkää lantaa käsittelevässä ketjussa päästöjä lisää suurempi lantamäärä (36 792 t) kuin kahdessa muussa ketjussa (16 000 t).

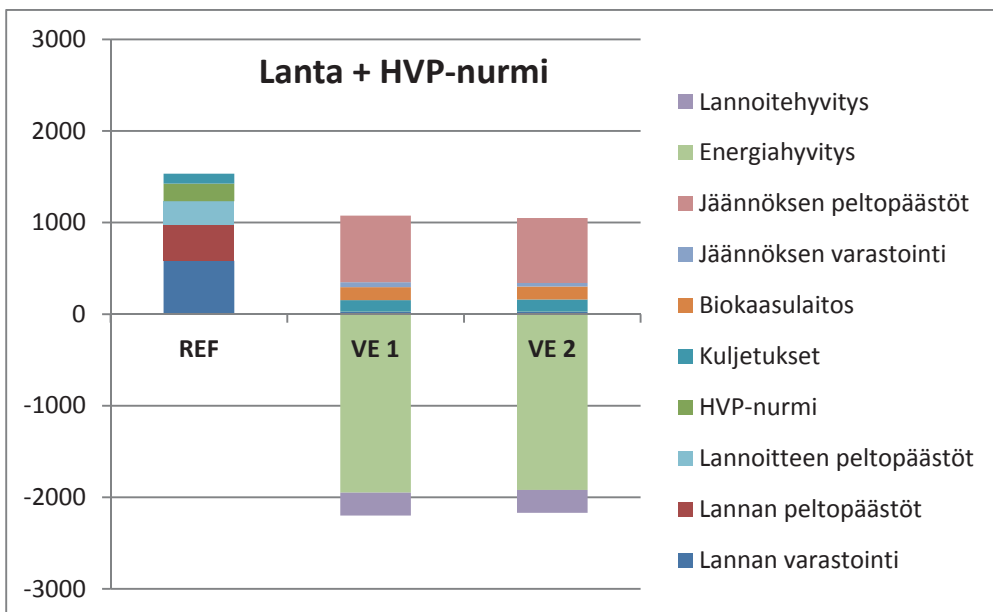
Kuvissa 18, 19 ja 20 on esitetty eri biokaasuketjujen ja niiden referenssiketjujen ilmastovaikutusten jakautuminen ketjun eri vaiheisiin. Referenssiketjuissa suurin osa päästöistä aiheutuu lannan varastoinnista ja peltokäytöstä. Myös HVP-nurmi aiheuttaa referenssissä hieman ilmastovaikutusta N<sub>2</sub>O-päästöinä, kun niitetty nurmi hajoaa jäädessään peltoon (kuva 19). Elintarviketeollisuuden sivutuotteet puolestaan aiheuttavat päästöjä BK3:n referenssiketjussa kompostoinnin aikana sekä kompostin käytöstä viherrakentamisessa (kuva 20).

Biokaasuketjuissa suurin yksittäinen päästölähde on jäännöksen peltokäyttö joko sellaisenaan (vaihtoehto 1) tai separoituna (vaihtoehto 2). Nämä päästöt on kuitenkin laskettu lannan päästökertoimilla, sillä jäännökselle ei tiettävästi ole olemassa päästökertoimia. Pelkkää lantaa käsittelevässä biokaasuketjussa (BK1) päästöjä aiheutuu myös lietelannasta separoidun nestejakeen peltokäytöstä, kun biokaasulaitokselle menee vain lietelannasta separoitu kuivajae (kuva 18).

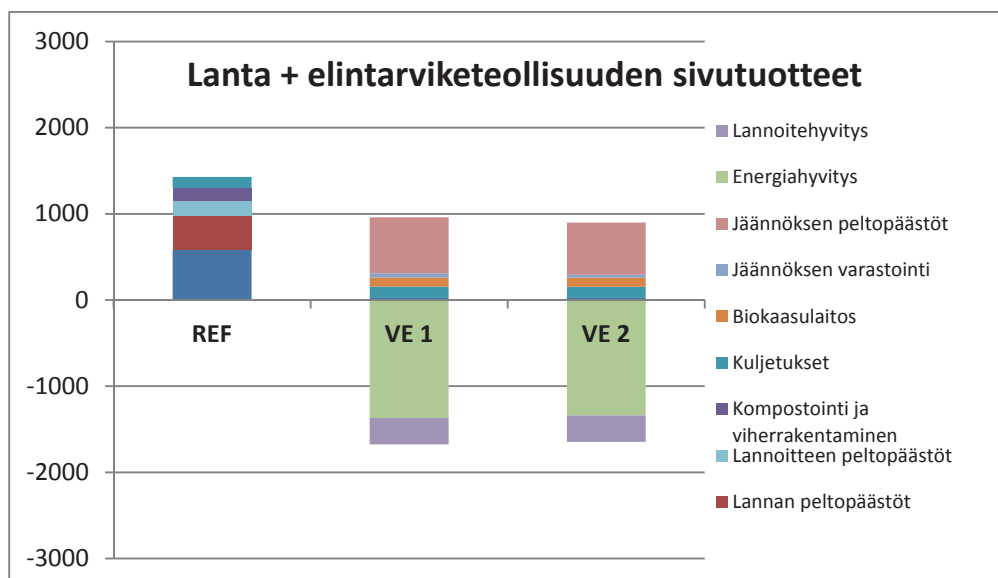
Biokaasuketjujen ilmastovaikutuksessa hyvityksillä on merkittävä vaikutus lopputulokseen. Energiahyvityksessä merkittävä tekijä on, kuinka paljon biokaasulaitos tuottaa energiaa yli oman tarpeen, kuinka suuri osa tästä energiasta saadaan hyötykäyttöön ja mitä energiaa sillä korvataan. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että korvataan kivihieillä tuotettua energiaa, jolloin myös korvaushyödyt ovat suuret. Lantaa ja HVP-nurmea käsittelevässä biokaasuketjussa (BK2) on suurin energiahyvitys, mikä tarkoittaa että tämän ketjun energiantuotto on suurin, sillä energian tarpeet laitoksilla ovat lähes yhtä suuret.



**Kuva 18.** Sian lietelantaa ja lietelannan separoitua kuivajaeetta käsittelevän biokaasuketjun ja referenssiketjun ilmastovaikutuksen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (t CO<sub>2</sub>-ekv./vuosi). REF = referenssi, VE1 = jäätös peltoon sellaisenaan, VE2 = jäätös separoidaan ennen lannoitekäyttöä.



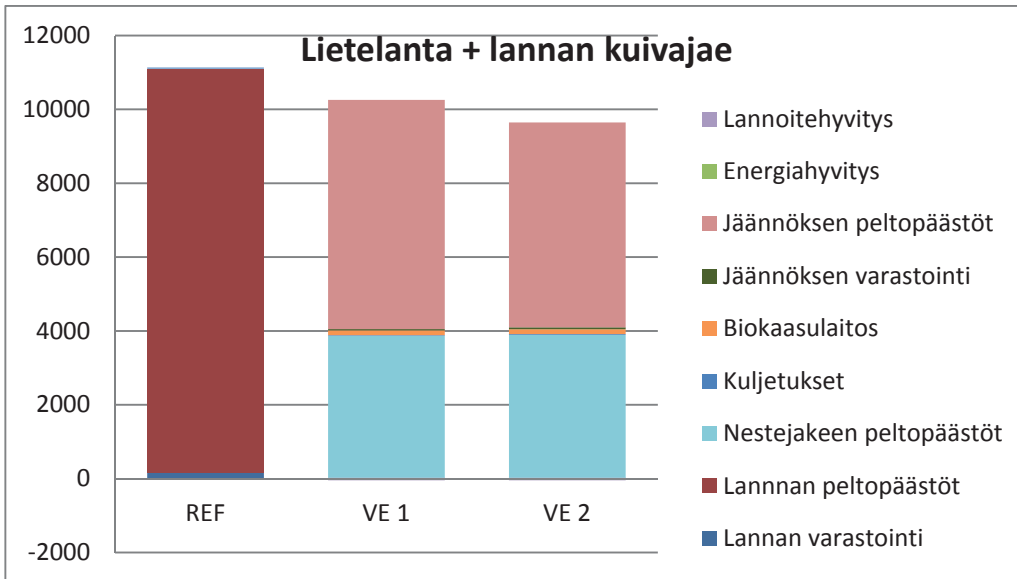
**Kuva 19.** Sian lietelantaa ja HVP-nurmea käsittelevän biokaasuketjun ja referenssiketjun ilmastovaikutuksen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (t CO<sub>2</sub>-ekv./vuosi). REF = referenssi, VE1 = jäätös peltoon sellaisenaan, VE2 = jäätös separoidaan ennen lannoitekäyttöä.



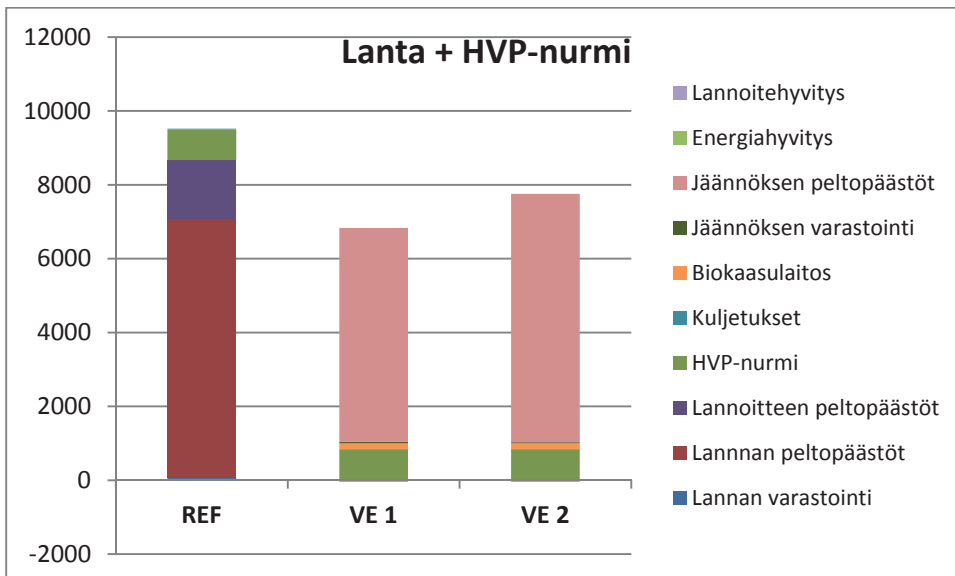
**Kuva 20.** Sian lietalantaa ja elintarviketeollisuuden sivutuotteita käsittelevän biokaasuketjun ja referenssiketjun ilmastovaikutuksen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (t CO<sub>2</sub>-ekv./vuosi). REF = referenssi, VE1 = jäänös peltoon sellaisenaan, VE2 = jäänös separoidaan ennen lannoitekäyttöä.

Kuvissa 21, 22 ja 23 on esitetty biokaasu- ja referenssiketjujen rehevöittävien vaikutusten jakautuminen ketjun eri vaiheisiin. Referenssiketjuissa lähes kaikki rehevöittävät päästöt aiheutuvat lannan peltokäytöstä. Myös HVP-nurmi ja elintarviketeollisuuden sivuvirrat aiheuttavat hieman rehevöittäviä päästöjä, sillä HVP-nurmi peltoon jäädessään ja kompostin käyttö viherrakentamisessa aiheuttavat ravinnehuuhtoumia. Referenssiketjuille 2 ja 3 laskettiin rehevöittäviä päästöjä myös sille ravinnemäärälle, joka biokaasulaitosten ansiosta saadaan HVP-nurmesta ja elintarviketeollisuuden sivuvirroista lannoitekäyttöön (ks. luku 2.2.2).

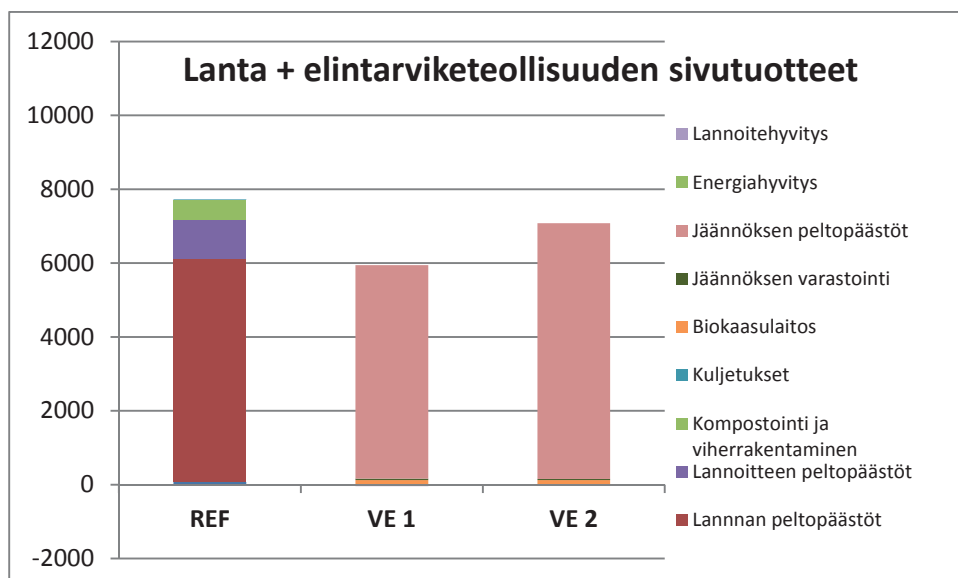
Biokaasuketjuissa suurin rehevöitymisvaikutus muodostuu jäännöksen peltokäytöstä joko sellaisenaan tai separoituna. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin huomattava, että jäännöksen peltokäytöstä aiheutuvat rehevöittävät päästöt on arvioitu samoilla laskentamalleilla kuin lannan rehevöittävät päästöt, sillä jäännökselle ei ole olemassa omia rehevöitymisen laskentamalleja tai päästökertoimia. Lietelantaa ja lannan kuivajaetta käsittelevässä biokaasuketjussa (BK1) rehevöittäviä päästöjä aiheutuu myös lannan separoinnista syntyvän nestejakeen peltokäytöstä. Nämä muodostavat lähes 40 % koko ketjun rehevöittäivistä päästöistä. Lantaa ja HVP-nurmea käsittelevän biokaasuketjun tapauksessa (BK2) rehevöittäviä päästöjä syntyy myös HVP-nurmesta, sillä pelloilta syntyy aina taustahuuhtoumaa, vaikka niitä ei lannoitettaisi ja nurmimassa korjataan pois. Tämä muodostaa kuitenkin vain noin 10 % koko ketjun rehevöittäivistä päästöistä.



**Kuva 21.** Sian lietelantaa ja lannan separoinnista saatavaa kuivajaeetta käsittelevän biokaasuketjun ja referenssiketjun rehevöittävien päästöjen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (kg PO<sub>4</sub>-ekv./vuosi). REF = referenssi, VE1 = jäännös sellaisenaan peltoon, VE2 = jäännös separoidaan ennen lannoitekäyttöä.



**Kuva 22.** Sian lietelantaa ja HVP-nurmea käsittelevän biokaasuketjun ja referenssiketjun rehevöittävien päästöjen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (kg PO<sub>4</sub>-ekv./vuosi). REF = referenssi, VE1 = jäännös sellaisenaan peltoon, VE2 = jäännös separoidaan ennen lannoitekäyttöä.



**Kuva 23.** Sian lietalantaa ja elintarviketeollisuuden sivutuotteita käsittelevän biokaasuketjun ja referenssiketjun rehevöittävien päästöjen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (kg PO<sub>4</sub>-ekv./vuosi). REF = referenssi, VE1 = jäännös sellaisenaan peltoon, VE2 = jäännös separoidaan ennen lannoitekäyttöä.

### Allokointitarkastelu

Edellä esitetyt tulokset sisältävät koko biokaasuketjun elinkaaren aikaiset päästöt raaka-aineen varastoinnista jäännöksen peltokäyttöön vuositasolla. Biokaasuketjun elinkaaren aikaisia ympäristövaihtokuituksia voidaan myös jakaa siinä syntyville päätuotteille, eli energialle ja ravinteille erilaisten allokointitapojen avulla.

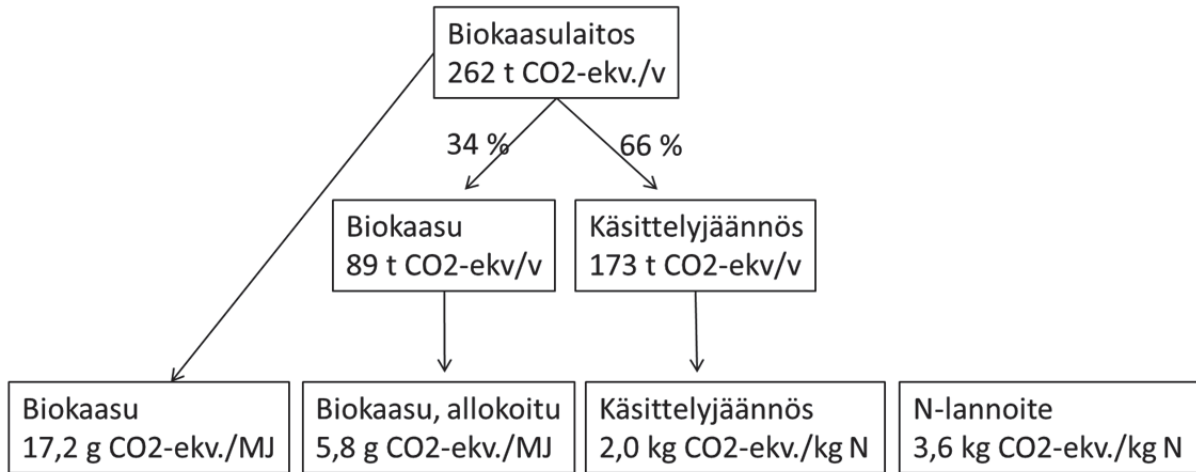
Tässä työssä tehtiin teoreettinen allokointikokeilu taloudellisella ja massa-allokoinnilla, jolloin biokaasuketjun alkupään päästöt, ennen jäännöksen kuljetusta, varastointia ja käyttöä, allokointiin tuotetulle energialle (tässä tapauksessa sähkö ja lämpö) ja lannoitevalmisteille. Myöskään edellä esitettyjä korvaushyötyjä ei otettu mukaan tarkasteluun. Tarkasteluun valittiin biokaasuketju 3, joka käyttää raaka-aineena lantaa ja elintarviketeollisuuden sivutuotteita ja jonka käsittelyjäännös hyödynnettiin sellaisenaan pellolla.

Taloudellisen allokoinnin tapauksessa biokaasulaitoksella tuotetun sähkön ja lämmön sekä ravinteiden taloudellinen arvo määritettiin biokaasulaskurilla ([www.biokaasulaskuri.fi](http://www.biokaasulaskuri.fi)), joka arvioi ravinteiden arvon kaupallisten lannoitteiden hintatietojen perusteella. Todellisuudessa jäännöksen ravinteiden arvoon vaikuttavat monet seikat, kuten varastoinnista, kuljetuksista ja levityksistä aiheutuvat kustannukset.

Laskurin antamien arvojen perusteella allokointisuhteeksi muodostui 34 % energialle ja 66 % ravinteille. Biokaasuketjun alkupään vuosipäästöt jaettiin näissä suhteissa biokaasulle ja jäännökselle, minkä jälkeen vuosipäästöt laskettiin vuodessa tuotettua energiayksikköä ja typpimäärää kohden.

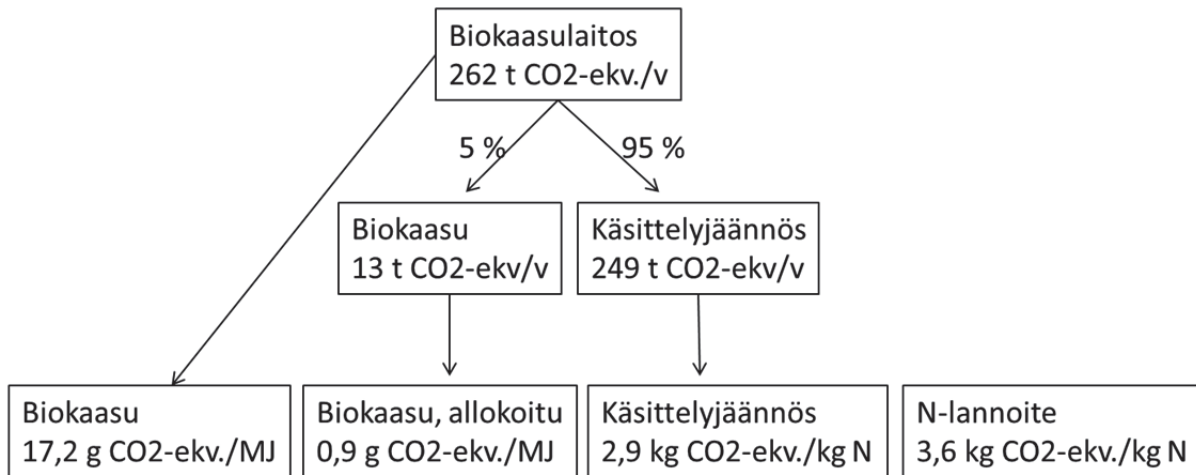
Biokaasulla tuotetun energian allokoiduksi ilmastovaikutukseksi saatiin 5,8 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ, kun ilman allokointia päästöt olivat 17,2 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ (kuva 24). Käsittelyjäännöksen päästöt puolestaan olivat 2,0 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N ennen jäännöksen kuljetusta, varastointia ja peltokäyttöä, kun päästöt laskettiin jäännöksen typpimäärää kohden. Yaran ilmoittaman takuuarvon mukaan Suomessa valmistettujen mineraalityypilannoitteiden valmistuksen päästöt ovat korkeintaan 3,6 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N (Yara 2014). Myöskään tämä luku ei pidä sisällään lannoitteen kuljetusta, varastointia ja peltokäyttöä.





**Kuva 24.** Biokaasulaitoksen päästöjen jakautuminen biokaasulaitoksella tuotetun energian ja ravinteiden kesken taloudellisella allokoinnilla. Vertailun vuoksi kuvassa mukana biokaasulla tuotetun energian päästöt ilman allokoointia sekä mineraalityypilannoitteen valmistuksen päästöt (N-lannoite).

Massa-allokoinnin suhteiksi muodostui 5 % biokaasulle ja 95 % jäännökselle, jolloin biokaasulla tuotetun energian päästöiksi jää ainoastaan 0,9 g CO<sub>2</sub>-ekv./MJ (kuva 25). Käsittelyjäännöksen päästöt puolestaan olisivat 2,9 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg N ennen jäännöksen kuljetusta, varastointia ja peltokäyttöä.



**Kuva 25.** Biokaasulaitoksen päästöjen jakautuminen biokaasulaitoksella tuotetun energian ja ravinteiden kesken massa-allokoinnilla. Vertailun vuoksi kuvassa mukana biokaasulla tuotetun energian päästöt ilman allokoointia sekä mineraalityypilannoitteen valmistuksen päästöt (N-lannoite).

Tulosten perusteella suuri osa biokaasuketjun päästöistä voidaan allokoida syntyville ravinteille, jolloin tuotetun energian päästöt jäävät hyvin alhaisiksi. Tästä huolimatta ravinteille kohdistetut päästöt tuotettua tyyppikiloa kohden ovat molemmissa tapauksissa alhaisemmat kuin mineraalityypilannoitteiden valmistuksen päästöt. Tämä vertailu ei kuitenkaan ota huomioon valmistuksen jälkeen syntyviä päästöjä, joissa voi olla suuriakin eroja. Esimerkiksi mineraalityypilannoitteiden varastoinnista ei synny päästöjä, mutta jäännöksen varastoinnista voi syntyä, riippuen varastointitavasta. Myös kuljetuksista aiheutuviissa päästöissä voi olla eroa, sillä jäännös sisältää paljon vettä, jolloin samalla kuljetusmatkalla päästöt ovat jäännökselle mineraalilannoitteita korkeammat.

## 2.4. Yhteenveto

Työn tavoitteena oli tarkastella lantaa käsittelevän biokaasulaitoksen kokonaisketjua raaka-aineista lopputuotteiden käyttöön sekä tunnistaa ketjun energia- ja ravinnetaseiden sekä ympäristövaikutusten näkökulmasta parhaat toimintatavat. Tarkastelua varten valittiin kolme erilaista syöteseosta, joille laadittiin prosessointiketjut. Kaikissa ketjuissa käsiteltiin lähtökohtaisesti 16 000 tonnia vuodessa sian lietalantaa ja 3 500 tonnia lisäsyötettä, jotka olivat lietalannasta erotettu kuivajae, HVP-nurmi ja elintarviketeollisuuden sivutuotteet. Lähtökohtana oli, että laitosten toteuttaminen olisi taloudellisesti realistista nykytilanteessa. Referenssiketjut kuvaavat samojen materiaalien tyypillisiä käsittelyprosesseja nykytilanteessa, ja niitä käytettiin ympäristövaikutusten arvioinnissa vertailukohtana biokaasuketjuissa muodostuville päästöille.

Tarkasteltava ketju alkoi maatilalla tapahtuvasta lannan varastoinnista, HVP-nurmen niitosta tai elintarviketeollisuuden sivutuotteen varastoinnista syntypaikallaan. Ketju päättyi energian osalta sähköön ja lämmön tuotantoon CHP-yksikössä tai liikennepolttoaineen tuotantoon. Käsittelyjäännöksen osalta ketju päättyi jäännöksen peltokäyttöön sellaisenaan tai separoituna neste- ja kuivajakeisiin.

Massa- ja ravinnetaseista nähtiin, että lisäsyötteen vaikutus biokaasuprosessin käsittelyjäännöksen määrään ja ominaisuuksiin oli tarkastelluissa ketjuissa vähäinen, koska lietalantaa oli syötteenä huomattavasti suurempi määrä. Syötteen massasta noin 8 % muodosti biokaasua lopun päätyessä käsittelyjäännökseen ja separoinnissa edelleen nestejakeeseen (78 %) ja kuivajakeeseen (16 %).

Käsittelyjäännös sisältää kaikki syötteen ravinteet. Separoinnissa kuivajakeeseen siirtyi noin 30 % kokonaistypestä, yli 70 % kokonaisfosforista ja noin 10 % kaliumista loppujen päätyessä nestejakeeseen. Ammoniumtyypen määrä lisääntyi biokaasuprosessissa orgaanisen tyyppien liukoistumisen seurauksena n. 32 %. Noin viidennes ammoniumtyypistä päätyi separoinnissa kuivajakeeseen ja loput nestejakeeseen.

Biokaasulaitoksen energiantuottopotentiaali riippuu syötteen ominaisuuksista. Ketjuissa tuotetun biokaasun laskennallinen energiasisältö oli 4 600–6 100 MWh/a. Suurin energiahyöty biokaasusta saadaan liikennepolttoaineen tuotannossa, jossa energiantuotannon hyötysuhde on korkea, luokkaa 95 %. CHP-yksikössä sähköä voidaan tuottaa n. 35 % hyötysuhteella, jolloin muodostuu lämpöenergiaa n. 50 % hyötysuhteella. Biokaasuketjuissa tuotettavissa olevat energiamäärät olivat 1 600–2 100 MWh/a sähköä ja 2 300–3 000 MWh/a lämpöä CHP:ssä tai 4 300–5 800 MWh/a biometaanina, jota voidaan hyödyntää liikennepolttoaineena.

CHP:n tuottamasta sähköstä biokaasulaitoksen toimintaan kului noin 9 % ja lämmöstä 22–31 %. Sähköä kuluu mm. pumppujen ja sekoittimien käyttöön ja lämpöä syötteen lämmitykseen ja reaktorin lämpöhäviöiden kattamiseen. Syötteen orgaanisen aineen pitoisuus vaikuttaa suhteelliseen lämmönkulutukseen. Karkeasti voidaan todeta, että mitä pienempi orgaanisen aineen pitoisuus on syötteenä, sitä pienempi on syötteen energiasisältö ja sitä suurempi osuus tuotetusta lämmöstä kuluu syötteen lämmittämiseen. Hygienisointi lisää prosessin lämmönkulutusta, mutta käytännössä hygienisoidusta materiaalista vapautuva lämpö voidaan hyödyntää laitoksella esim. lämmönvaihdintekniikan avulla. CHP:n oma energiankulutus on pieni. Käsittelyjäännöksen separointi kulutti 2–3 % tuotetusta sähköstä.

Kaikki ketjut tuottivat sähköä ja lämpöä yli oman tarpeen. Eniten hyödynnettävää ylijäämäenergiaa tuotti tarkastelluista tapauksista lantaa ja HVP-nurmea käsittelevä biokaasulaitos, jossa CHP:ssä tuotetusta sähköstä jäi laitoksen oman kulutuksen jälkeen hyödynnettäväksi 89 % (1 900 MWh) ja lämmöstä 78 % (2 400 MWh).

Jos laitos tuottaa liikennepolttoainetta, kuluu sen valmistukseen noin 5 % biokaasun energiasisällöstä. Mikäli kaikki biokaasu jalostetaan biometaaniksi, on laitoksen toimintaan tarvittava sähkö ja lämpö ostettava ulkopuolelta.

Tarkasteltaessa koko ketjuja kuljetukset ja käsittelyjäännöksen peltolevitys mukaan lukien, oli ketjujen kokonaisenergiankulutus 23–35 % biokaasun energiasisällöstä. Energiankulutusten osalta on

syitä huomioida, että biokaasulaitoksen toimintaa lukuun ottamatta valtaosa syötteiden hankintaan ja kuljetuksiin sekä käsittelyjäännöksen kuljetuksiin ja peltolevitykseen liittyvistä energiankulutuksista toteutuisi myös referenssiketjussa, joka ei sisällä biokaasulaitosta. Tässä tarkastelussa ei huomioitu HVP-nurmen viljelyyn kuluva energia, koska nurmea ei viljelty biokaasulaitosta varten, vaan ympäristöhoidollisin perustein.

Jos lantaa käsittelevä biokaasulaitos sijaitsee alueella, joilla peltojen fosforiluku on korkea, on fosforia tarpeen kuljettaa kauemmas fosforilannoitusta tarvitseville pelloille. Separoinnilla voidaan konsentroida fosfori kuivajakeeseen, minkä kuljetus kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa, kuin lietemäisen käsittelyjäännöksen kuljetus. Esimerkkiketjussa separointi oli energiataseen kannalta perusteltua, kun kuivajakeen kuljetusetäisyys oli vähintään 15 km.

Ympäristövaikutusten kannalta kaikki tarkastellut biokaasuketjut ovat parempia verrattuna referenssitilanteeseen. Biokaasuketjujen ilmastovaikutukset olivat negatiiviset, eli ketjussa syntyvät päästöt olivat pienemmät kuin korvattavien tuotteiden (mineraalilannoitteet ja fossiilinen energia) päästöt. Korvattavan energiamuodon valinnalla suuri merkitys ilmastovaikutuksen lopputulokseen, koska eri energiamuotojen päästökertoimet poikkeavat toisistaan suuresti.

Sekä ilmastonmuutos- että rehevöitymistarkastelussa suurin ympäristövaikutuksen aiheuttaja oli ravinteiden peltokäyttö. Siten pellolle menevien ravinteiden määrällä on suuri vaikutus. Esim. rehevöityminen lasketaan hehtaari-perusteisesti, jolloin rehevöittävä vaikutus on suurempi, kun pellolle menevä ravinnemäärä ja täten tarvittu pinta-ala on suurempi. Ketjujen ympäristövaikutuksia ei voi verrata keskenään suoraan, koska ketjussa 1 on huomioitu lannan kuivajakeen lisäksi sen separoinnista tilalla muodostuva nestejäte, jolloin tähän ketjuun sisältyy mm. huomattavasti enemmän tyypeä kuin muihin ketjuihin.

Tässä työssä käytettiin RES-direktiivin mukaista päästöjen allokointia, jolloin kaikki biokaasuketjun päästöt allokointiin biokaasulle. Ympäristövaikutuksia voidaan myös jakaa ketjussa syntyville päätuotteille, eli energialle ja ravinteille erilaisten allokointitapojen avulla. Tässä työssä tehtiin allokointikokeilu taloudellisella ja massa-allokoinnilla, jolloin raaka-aineiden kuljetuksen ja biokaasulaitoksen päästöt allokointiin tuotetulle energialle ja lannoitevalmisteille. Korvaushyötyjä ei otettu mukaan tarkasteluun. Taloudellisen allokoinnin tapauksessa yli puolet biokaasuketjun päästöistä voidaan allokoida syntyville ravinteille, jolloin tuotetun energian päästöt jäävät huomattavasti alhaisemmaksi kuin ilman allokointia. Massa-allokoinnin tapauksessa lähes kaikki päästöt (95 %) voidaan allokoida jäännökselle. Tästä huolimatta jäännöksen "valmistuksen" päästöt ovat alhaisemmat kuin mineraalilannoitteiden valmistuksen päästöt. Tämä vertailu ei ota huomioon valmistuksen jälkeen syntyviä päästöjä, joissa voi olla suuriakin eroja.

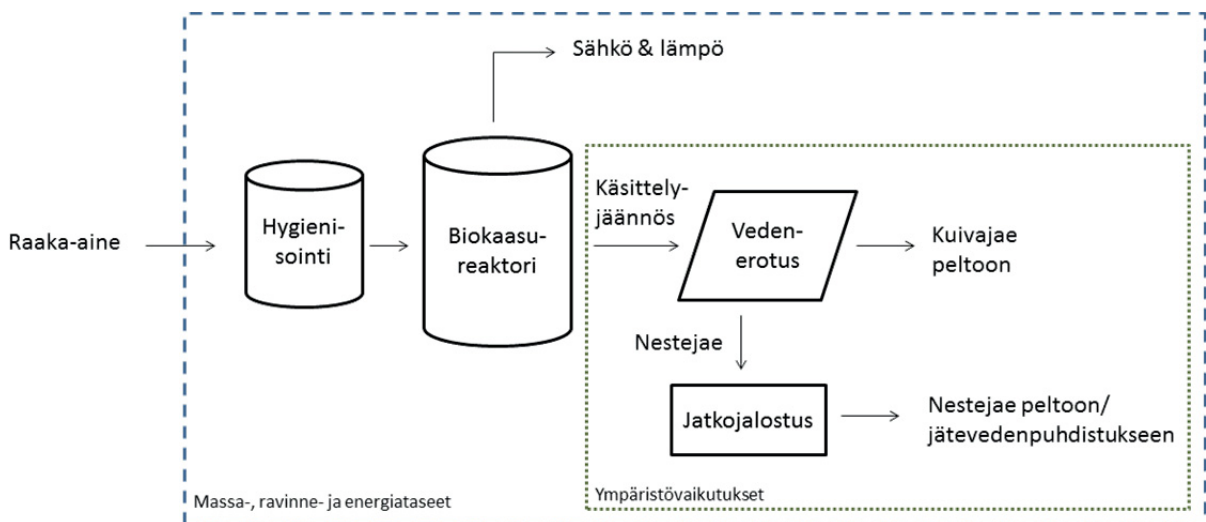
Ympäristövaikutusten laskennassa jouduttiin käyttämään useita oletuksia mittaustiedon puuttuessa. Mittauksia tulisi jatkossa tehdä mm. käsittelyjäännöksen ja siitä erotettujen jakeiden peltokäytöstä aiheutuvista päästöistä, minkä avulla näille voitaisiin määrittää omat päästökertoimet.

## 3. OSA 2: Biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen jatkojalostus

### 3.1. Tausta ja tavoitteet

Biokaasulaitoksen käsittelyjäännös sisältää kaikki käytettyjen raaka-aineiden ravinteet, mikä tekee jäännöksestä arvokkaan ravinneresurssin. Jäännös voidaan separoida neste- ja kuivajakeisiin ennen peltokäyttöä, mutta suurimmilla laitoksilla voi olla myös tarve pidemmälle vietyyn jakeiden jalostukseen. Jatkojalostuksella voidaan pyrkiä esim. ravinteiden konsentroituihin ja tuotteiden vesipitoisuuden pienentämiseen, jolloin säästetään kuljetuskustannuksissa ja saadaan ravinteet sijoitettua tehokkaammin laajemmalle alueelle. Tuotteiden käytettävyyttä puolestaan parantaa ravinteiden fraktiointi eri jakeisiin. Puhtailla ravinnelajakeilla on kasviraavinnekäytön lisäksi sovelluksia myös esim. teollisuudessa.

Tämän työn tavoitteena oli tunnistaa energia- ja ravinnetaseiltaan sekä ympäristövaikutuksiltaan parhaat jatkojalostusketjut ja löytää kriittisiä kohtia, joiden kehittämiseen tulisi panostaa. Työ tehtiin vertaamalla keskenään erilaisten jatkojalostusvaihtoehtojen massa-, energia- ja ravinnetaseita sekä ympäristövaikutuksia. Työssä tarkasteltiin nestejakeen jalostusketjuja, joista oli saatavissa laskentaa varten lähtötietoja täyden mittakaavan laitoksilta (kuva 26).



Kuva 26. Jatkojalostusketjujen tarkastelun raja.

### 3.2. Aineisto ja menetelmät

#### 3.2.1. Tarkasteltujen jatkojalostusketjujen kuvaus

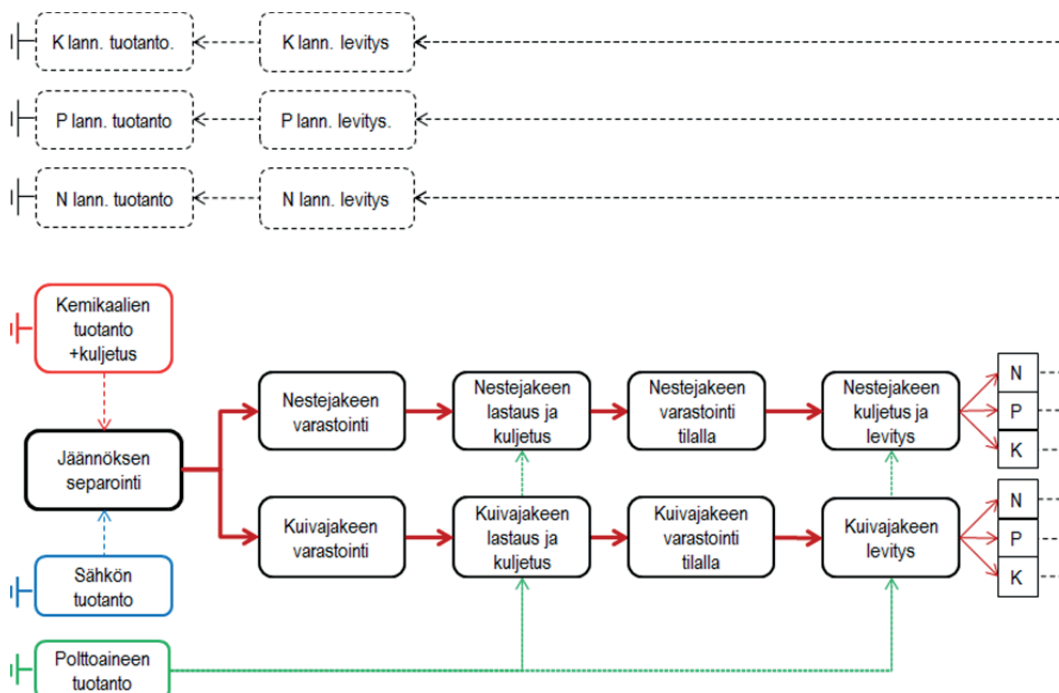
Biokaasulaitosten käsittelyjäännöksiä jatkojalostetaan tällä hetkellä vain suurissa laitoksissa käsitte-lystä aiheutuvien korkeiden investointi- ja käyttökustannusten takia. Siksi tässä työssä tarkasteltiin jatkojalostusketjuja biokaasulaitoksessa, jonka vuosittainen käsittelykapasiteetti oli 100 000 t. Syöte koostui sian lietalannasta (60 000 t/a), yhdyskuntien biojätteistä (20 000 t/a) sekä jätevedenpuhdistamon lietteistä (20 000 t/a). Biokaasuprosessi ja jäännöksen separointi mallinnettiin laskennallisesti (ks. kpl 2.2.3), jotta saatiin selville laitoksen vuotuinen energiantuotto ja -kulutus, energiankulutuksesta aiheutuvat ympäristövaikutukset, sekä muodostuvan käsittelyjäännöksen määrä ja separoinnissa muodostuvien neste- ja kuivajakeen osuudet.

Jatkojalostuksen tarkastelemiseksi rakennettiin neljä vaihtoehtoista käsittelyketjua nestejakeelle (taulukko 9, kuvat 27–31). Vertailuna tarkasteltiin biokaasuketjua, jossa käsittelyjäännöksen jatkojalostusta ei toteutettu. Oletuksena oli, että muodostuvat jakeet hyödynnettiin lannoitteena pelloilla, poikkeuksena ketju, jossa yksi jae johdettiin jätevedenpuhdistamolle. Käytännössä joitain jakeita voitaisiin hyödyntää myös teollisuuden sovelluksissa. Lähtökohtana oli, että kaikki ketjut ovat tällä hetkellä jossain muodossa käytössä Suomessa, jolloin niistä oli saatavilla tarvittavia lähtötietoja. Kuivajakeen jatkojalostusta ei tarkasteltu, vaan se oletettiin levitettävän peltoon sellaisenaan.

**Taulukko 9.** Tarkasteltavien ketjujen kuvaukset

Tarkasteltava jatkojalostusketju	Lyhenne	Tuotteet
Neste- ja kuivajakeen peltokäyttö	JJ0	Nestejake 73 734 t Kuivajake 18 461 t
Nestejakeen strippaus: ammoniumsulfaatin ja kuivajakeen peltokäyttö, strippausjännös jätevedenpuhdistamolle	JJ1	Ammoniumsulfaatti 13 470 t Strippausjännös (puhdistamolle) 66 825 t Kuivajake 18 461 t
Nestejakeen strippaus, haihdutus ja kalvopuhdistus: ravinnetuotteiden ja kuivajakeen peltokäyttö	JJ2	Ammoniumsulfaatti 13 471 t Konsentraatti 14 033 t Puhdistettu vesi 45 509 t Retentaatti (kiertoon) 8 031 t Kuivajake 18 461 t
Nestejakeen haihdutus: konsentraatin ja kuivajakeen peltokäyttö	JJ3	Konsentraatti 15 484 t Puhdistettu vesi 50 214 t Retentaatti (kiertoon) 8 861 t Kuivajake 18 461 t
Nestejakeen strippaus: ravinnetuotteiden ja kuivajakeen peltokäyttö	JJ4	Ammoniumsulfaatti 13 470 t Strippausjännös 66 825 t Kuivajake 18 461 t

### JJ0 Neste- ja kuivajakeen peltokäyttö

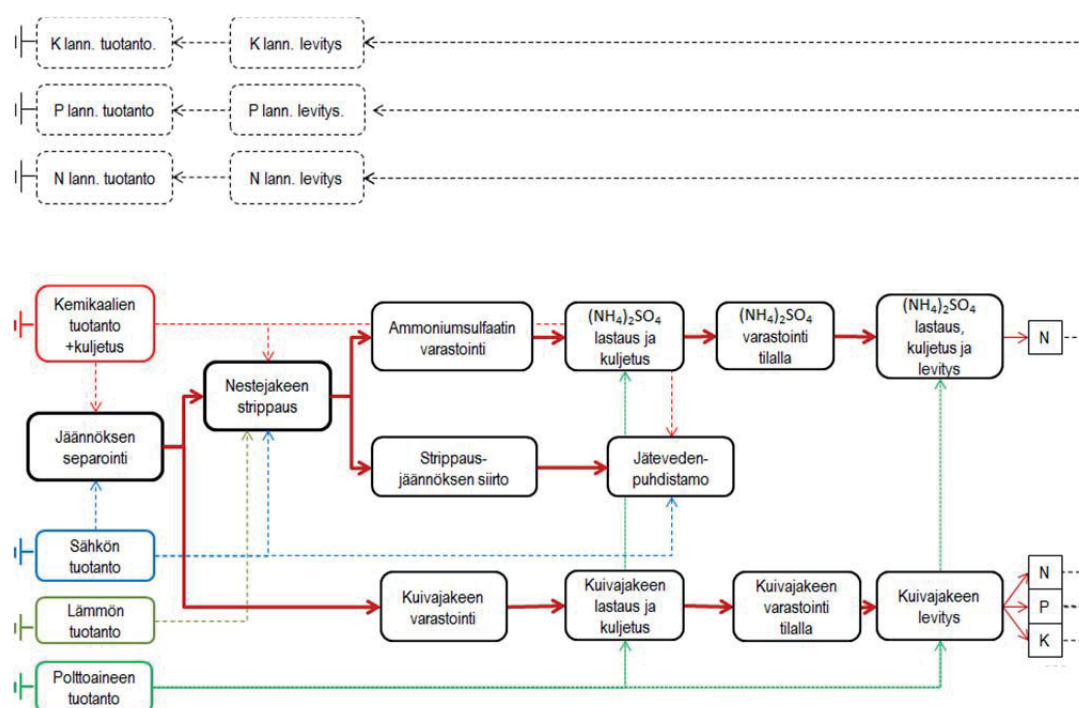


**Kuva 27.** JJ0 jatkojalostusketjun kuvaus; neste- ja kuivajake sellaisenaan peltokäyttöön.

Biokaasulaitoksen käsittelyjäänös (92 167 t) separoidaan sähkökäyttöisellä lingolla polymeerin avulla, jolloin muodostuu nestejakeetta (77 733 t) ja kuivajakeetta (18 461 t). Kuivajakeetta varastoidaan biokaasulaitoksella katetussa hallissa 1–2 kuukauden ajan, minkä jälkeen jae kuljetetaan maansiirtoautolla (19 t) tiloille (50 km). Kuivajae varastoidaan tilalla peltopatterissa, josta se levitetään peltoon kuivalannan levittimen ja traktorin avulla.

Nestejae varastoidaan lyhyen aikaa biokaasulaitoksella tiiviissä varastosäiliöissä, minkä jälkeen se lastataan pumppaamalla puoliperävaunurekkaan (25 t). Reikka kuljettaa nestejakeen tiloille (etäisyys 50 km), jossa jae varastoidaan katetussa säiliössä maksimissaan 10–11 kuukauden ajan. Ennen levitystä pellolle nestejae lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun. Nestejae levitetään pellolle traktorin ja letkulevittimen avulla (kuva 27).

### JJ1 Nestejakeen strippaus, ammoniumsulfaatin ja kuivajakeen peltokäyttö, strippausjäännöksen siirto jätevedenpuhdistamolle



**Kuva 28.** JJ1 jatkojalostusketjun kuvaus; nestejakeen strippaus ja ammoniumsulfaatin ja kuivajakeen peltokäyttö, strippausjäännöksen johtaminen jätevedenpuhdistamolle.

Biokaasulaitoksen käsittelyjäänös (92 167 t) separoidaan sähkökäyttöisellä lingolla polymeerin avulla, jolloin muodostuu nestejakeetta (73 733 t) ja kuivajakeetta (18 461 t). Kuivajakeetta varastoidaan biokaasulaitoksella katetussa hallissa 1–2 kuukauden ajan, minkä jälkeen jae kuljetetaan maansiirtoautolla (19 t) tiloille (50 km). Kuivajae varastoidaan tilalla peltopatterissa, josta se levitetään peltoon kuivalannan levittimen ja traktorin avulla.

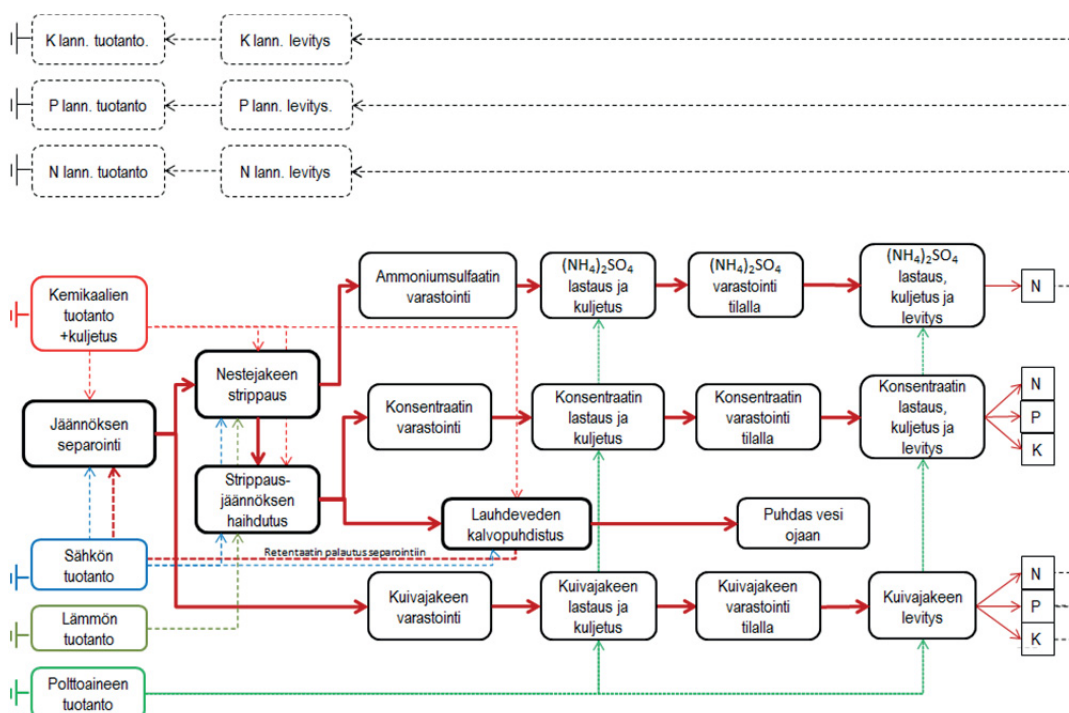
Separoinnin jälkeen nestejae siirretään strippausyksikköön. Nesteen pH nostetaan NaOH:n avulla arvoon 10–11. Strippaustornissa neste kuumennetaan 80 asteeseen ja tuodaan kontaktiin ilman kanssa, jolloin ammoniumtyppi siirtyy kaasumaiseen olomuotoon ammoniakiksi. Ammoniakkipitoinen kaasu johdetaan pesuprosessiin, jossa se muodostaa rikkihapon kanssa ammoniumsulfaattia. Muodostunut ammoniumsulfaatti (13 470 t) varastoidaan lyhyen aikaa biokaasulaitoksella, minkä jälkeen se lastataan pumppaamalla puoliperävaunurekkaan (25 t). Reikka kuljettaa ammoniumsulfaatin tiloille (etäisyys 50 km), jossa jae varastoidaan katetussa säiliössä maksimissaan 10–11 kuukauden



ajan. Ennen levitystä pellolle ammoniumsulfaatti lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun. Ammoniumsulfaatti levitetään pellolle traktorin ja letkulevittimen avulla.

Strippauksessa syntyvä strippausjäännös (66 825 t) johdetaan putkistoa pitkin jätevedenpuhdistamolle käsiteltäväksi (kuva 28).

## JJ2 Nestejakeen strippaus, haihdutus ja kalvopuhdistus, ravinnetuotteiden ja kuivajakeen peltokäyttö



**Kuva 29.** JJ2 jatkojalostusketjun kuvaus; nestejakeen strippaus ja haihdutus, ravinnetuotteiden peltokäyttö.

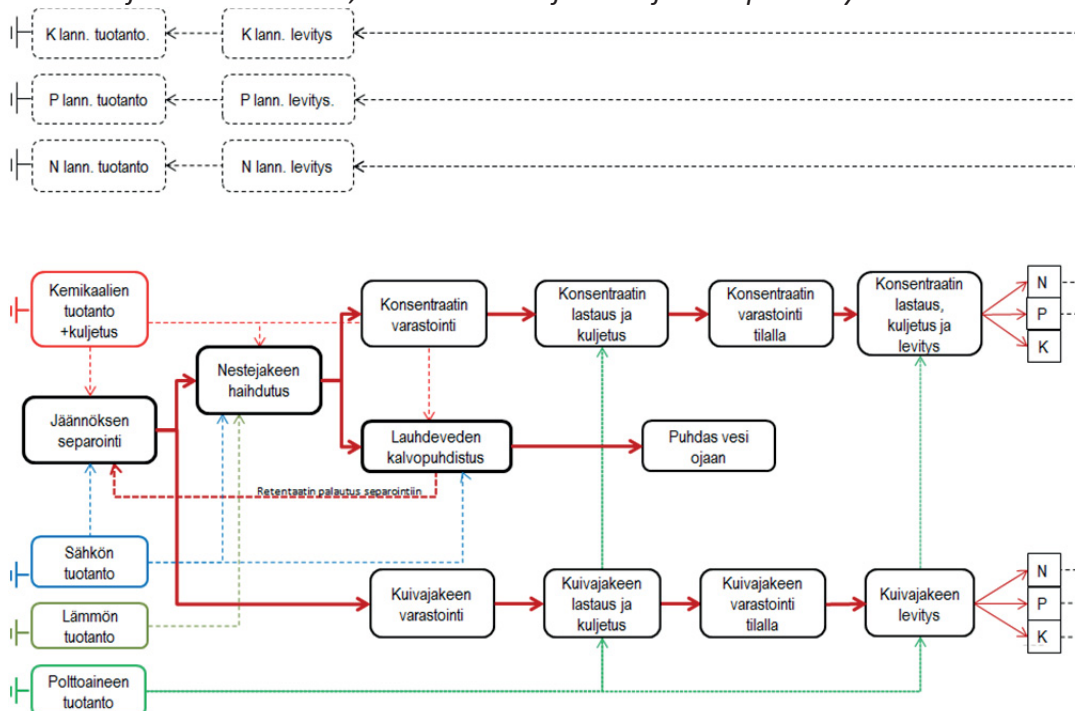
Biokaasulaitoksen käsittelyjäännös (92 167 t) separoidaan sähkökäyttöisellä lingolla polymeerin avulla, jolloin muodostuu nestejakeetta (77 733 t) ja kuivajakeetta (18 461 t). Kuivajakeetta varastoidaan biokaasulaitoksella katetussa hallissa 1–2 kuukauden ajan, minkä jälkeen jae kuljetetaan maansiirtotautolla (19 t) tiloille (50 km). Kuivajakeetta varastoidaan tilalla peltopatterissa, josta se levitetään peltoon kuivalannan levittimen ja traktorin avulla.

Separoinnin jälkeen nestejakee siirretään strippausyksikköön. Nesteen pH nostetaan NaOH:n avulla arvoon 10–11. Strippaustornissa neste kuumennetaan 80 asteeseen ja tuodaan kontaktiin ilman kanssa, jolloin ammoniumtyppi siirtyy kaasumaiseen olomuotoon ammoniakiksi. Ammoniakkipitoinen kaasu johdetaan pesuprosessiin, jossa se muodostaa rikkihapon kanssa ammoniumsulfaattia. Muodostunut ammoniumsulfaatti (13 470 t) varastoidaan lyhyen aikaa biokaasulaitoksella, minkä jälkeen se lastataan pumppaamalla puoliperävaunurekkaan (25 t). Rekka kuljettaa ammoniumsulfaatin tiloille (etäisyys 50 km), jossa jae varastoidaan katetussa säiliössä maksimissaan 10–11 kuukauden ajan. Ennen levitystä pellolle ammoniumsulfaatti lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun. Ammoniumsulfaatti levitetään pellolle traktorin ja letkulevittimen avulla.

Strippauksessa syntyvä strippausjäännös (66 825 t) johdetaan edelleen haihdutusyksikköön. Haihdutuksessa hyödynnetään strippauksen lämpöenergiaa. Haihdutusprosessissa strippausjäännöksen pH lasketaan happamalle alueelle. Konsentraatti (14 033 t) varastoidaan, kuljetetaan tiloille ja levitetään pelloille samaan tapaan kuin ammoniumsulfaatti.

Haihdutuksessa syntyvä höyry lauhdutetaan, jolloin syntyy lauhdetta. Lauhde ohjataan käänteisosmoosiin perustuvaan kalvopuhdistukseen ja prosessin optimoimiseksi pH säädetään NaOH:lla. Kalvolta tuleva puhdas vesi (45 509 t) ohjataan painovoimaisesti putkea pitkin ojaan ja kalvolle jäävä retentaatti (8 031 t) palautetaan pumppaamalla jalostusketjun alkuun käsittelyjäännöksen separointiin (kuva 29).

### JJ3 Nestejakeen haihdutus, konsentraatin ja kuivajakeen peltokäyttö



**Kuva 30.** JJ3 jatkojalostusketjun kuvaus; nestejakeen haihdutus, konsentraatin ja kuivajakeen peltokäyttö.

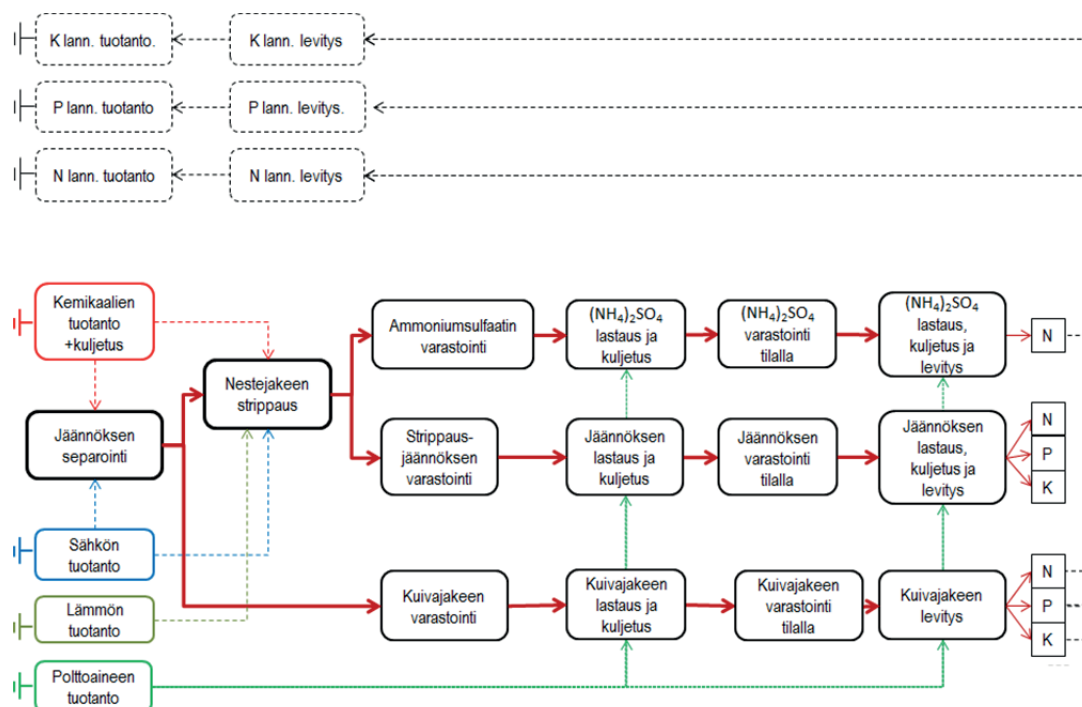
Biokaasulaitoksen käsittelyjännös (92 167 t) separoidaan sähkökäyttöisellä lingolla polymeerin avulla, jolloin muodostuu nestejakeetta (77 733 t) ja kuivajakeetta (18 461 t). Kuivajakeetta varastoidaan biokaasulaitoksella katetussa hallissa 1–2 kuukauden ajan, minkä jälkeen jae kuljetetaan maansiirtautolla (19 t) tiloille (50 km). Kuivajakeetta varastoidaan tilalla peltopatterissa, josta se levitetään peltoon kuivalannan levittimen ja traktorin avulla.

Nestejakee johdetaan haihdutusyksikköön, jossa nestettä haihdutetaan 80 asteen lämpötilassa. Haihdutusprosessissa nestejakeen pH lasketaan happamalle alueelle rikkihapon avulla. Konsentraatti (15 484 t) varastoidaan lyhyen aikaa biokaasulaitoksella, minkä jälkeen se lastataan pumppaamalla puoliperävaunurekkaan (25 t). Reikka kuljettaa konsentraatin tiloille (etäisyys 50 km), jossa jae varastoidaan katetussa säiliössä maksimissaan 10–11 kuukauden ajan. Ennen levitystä pellolle konsentraatti lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun. Konsentraatti levitetään pellolle traktorin ja letkulevittimen avulla.

Haihdutuksessa syntyvä höyry lauhdutetaan, jolloin syntyy lauhdetta. Lauhde ohjataan käänteisosmoosiin perustuvaan kalvopuhdistukseen ja prosessin optimoimiseksi pH säädetään NaOH:lla. Kalvolta tuleva puhdas vesi (50 214 t) ohjataan painovoimaisesti putkea pitkin ojaan ja kalvolle jäävä retentaatti (8 861 t) palautetaan pumppaamalla jalostusketjun alkuun käsittelyjäännöksen separointiin (kuva 30).



## JJ4 Nestejakeen strippaus, ravinnetuotteiden ja kuivajakeen peltokäyttö



**Kuva 31.** JJ4 jatkojalostusketjun kuvaus: nestejakeen strippaus, ravinnetuotteiden peltokäyttö.

Biokaasulaitoksen käsittelyjäännös (92 167 t) separoidaan sähkökäyttöisellä lingolla polymeerin avulla, jolloin muodostuu nestejakea (77 733 t) ja kuivajakea (18 461 t). Kuivajakea varastoidaan biokaasulaitoksella katetussa hallissa 1–2 kuukauden ajan, minkä jälkeen jae kuljetetaan maansiirtoautolla (19 t) tiloille (50 km). Kuivajakea varastoidaan tilalla peltopatterissa, josta se levitetään peltoon kuivalannan levittimen ja traktorin avulla.

Separoinnin jälkeen nestejake siirretään strippausyksikköön. Nesteen pH nostetaan NaOH:n avulla arvoon 10–11. Strippaustornissa neste kuumennetaan 80 asteeseen ja tuodaan kontaktiin ilman kanssa, jolloin ammoniumtyppi siirtyy kaasumaiseen olomuotoon ammoniakiksi. Ammoniakkipitoinen kaasu johdetaan pesuprosessiin, jossa se muodostaa rikkihapon kanssa ammoniumsulfaattia. Muodostunut ammoniumsulfaatti (13 470 t) varastoidaan lyhyen aikaa biokaasulaitoksella, minkä jälkeen se lastataan pumpaamalla puoliperävaunurekkaan (25 t). Rekka kuljettaa ammoniumsulfaatin tiloille (etäisyys 50 km), jossa jae varastoidaan katetussa säiliössä maksimissaan 10–11 kuukauden ajan. Ennen levitystä pellolle ammoniumsulfaatti lastataan traktorikäyttöisellä pumpulla 12 m<sup>3</sup> lietevaunuun. Ammoniumsulfaatti levitetään pellolle traktorin ja letkulevittimen avulla.

Strippauksessa syntyvä strippausjäännös (66 825 t) varastoidaan lyhyen aikaa biokaasulaitoksella tiiviissä varastosäiliössä, minkä jälkeen nestejake lastataan pumpaamalla puoliperävaunurekkaan (25 t). Rekka kuljettaa nestejakeen tiloille (etäisyys 50 km), jossa jae varastoidaan katetussa säiliössä 10–11 kuukauden ajan ja levitetään traktorilla peltoon ammoniumsulfaatin tapaan (kuva 31).

### 3.2.2. Tarkasteltujen jatkojalostusketjujen rajaukset ja oletukset

Jatkojalostusketjuissa kaikkien vertailtavien ketjujen syöteseos, syötteisiin liittyvät käsittelyt ja itse biokaasuprosessi ovat samat. Ketjut eroavat toisistaan ainoastaan käsittelyjäännöksen jatko-prosessoinnin osalta, mistä syystä prosessikuvauksissa ei ole esitetty ketjun alkupäätä (kpl 3.2.1).

Tarkasteluissa on oletettu, että jatkojalostusprosessi käyttää biokaasulaitoksen tuottamaa energiaa. Lisäksi on huomioitu, että jatkojalostusketjuissa käytetään myös kemikaaleja (mm. NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Kuljetusten osalta on oletettu, että tyhjä paluukuljetus tapahtuu vain sen jälkeen kun jae (käsittämätön/käsitelty) on kuljetettu ja levitetty pellolle.

Jatkojalostuksessa syntyneiden jakeiden levitysmenetelminä on johdonmukaisuuden säilyttämiseksi käytetty samoja menetelmiä kuin jakeilla raportin 1-osassa, jotka ovat peltomaalle äestys alle 12 h, kasvipeitteiselle maalle sijoituslannoitus ja sängelle kyntö alle 12 h. Myös jakeiden levitysmäärät määritettiin pääsääntöisesti samoin perustein kuin kokonaisketjutarkasteluissa (kpl 2.2.2), ts. perustuen niiden fosforipitoisuuteen. Jatkojalostuksessa syntyvien jakeiden osalta fosforiperusteinen levitysmäärä ei kuitenkaan aina ollut mahdollinen, sillä esimerkiksi ammoniumsulfaatti ei sisällä ollenkaan fosforia. Tällöin levitysmäärä määritettiin kokonaistypen perusteella. Ammoniumsulfaattia voidaan käyttää lisätyypinä sellaisissa tapauksissa, joissa jakeen fosforipitoisuus on korkea ja typpipitoisuus alhainen (esim. kuivajae). Tämän vuoksi ammoniumsulfaatin levitysmäärä laskettiin siten, että oletettiin pellon typpilannoituksen olevan 115 kg/ha, josta 100 kg/ha tulee ammoniumsulfaatista ja 15 kg/ha kuivajakeesta. Myös tapauksessa JJ0, jossa nestejake menee sellaisenaan peltoon, on nestejakeen fosforipitoisuus niin alhainen suhteessa typpipitoisuuteen, että levitysmäärä täytyi laskea kokonaistypen perusteella.

### 3.2.3. Laskentaperusteet

#### *Massa-, ravinne ja energiataseet*

Jatkojalostusketjuja tarkasteltiin yhdistettynä biokaasulaitokseen, jonka vuotuinen käsittelykapasiteetti oli 100 000 t. Syöte koostui sian lietelannasta (60 000 t/a), yhdyskuntien biojätteistä (20 000 t/a) sekä jätevesilietteistä (20 000 t/a). Syötemateriaalien ominaisuudet määritettiin kirjallisuuden perusteella (taulukko 10).

**Taulukko 10.** Jatkojalostusketjuissa tarkastellun biokaasulaitoksen syötteiden ominaisuudet tuorepainossa.

	TS (%)	VS (%)	N <sub>kok</sub> (g/kg)	NH <sub>4</sub> -N (g/kg)	P <sub>kok</sub> (g/kg)	K <sub>kok</sub> (g/kg)	CH <sub>4</sub> -potentiaali (m <sup>3</sup> /tVS)	Lähteet
Sian lietelanta	7,0	5,6	4,7	3,1	1,2	2,1	320	1
Yhdyskuntien biojäte	27	24	5,4	0,5	1,1	2,7	400	2,3
Jätevesiliete	20	14	9,4	1,1	3,8	1,5	300	2,4
Syötteet yhteensä	22	17	7,0	1,2	2,2	2,1	350	

<sup>1</sup>Hamelin ym. 2013, <sup>2</sup>Rasi ym. 2012, <sup>3</sup>Valorgas 2010, Biokaasulaskuri 2014

Syötteiden ominaisuustietojen avulla laskettiin käsittelyjäännöksen massa ja ravinnepitoisuudet sekä laitoksen tuottaman biokaasun määrä. Massan jakautuminen biokaasuksi (60 % CH<sub>4</sub>, 40 % CO<sub>2</sub>) ja käsittelyjäännökseksi laskettiin samoin kuin luvussa 2.3.1. Ammoniumtyppipitoisuuden lisäykseksi biokaasuprosessin aikana oletettiin sian lietelannalle 30 %, yhdyskuntien biojätteille 1000 % (Tampio ym. 2014) ja puhdistamolieteille 250 % (asiantuntija-arvio). Suuret prosenttiluvut biojätteellä ja puhdistamolietteellä johtuvat ammoniumtyypin alhaisesta määrästä syötteessä ja suuresta liukoisuusasteesta prosessissa.

Tarkastelussa oletettiin, että kaikki syötemateriaalit laitoksella hygienisoidaan. Hygienisoinnin lämmöntarve laskettiin veden ominaislämpökapasiteetin avulla, kuten luvussa 2.2.3. Biokaasureaktorille lämmitystarvetta ei laskettu erikseen, koska hygienisoidun massan lämpö riittää ylläpitämään n. 38 asteen lämpötilan reaktorissa. Reaktorille ei myöskään huomioitu lämpöhäviöitä, jotka oletettiin korvattavan hygienisoinnin tuottamalla lämmöllä. Biokaasulaitoksen sähkönkulutukseksi oletettiin 3 % laitoksen tuottamasta energiasta (Biovakka Suomi Oy 2014, Pöschl ym. 2010) ja kaasun käsittelyn energiankulutuksena käytettiin arvoa 0,96 % tuotetusta energiasta (Biovakka Suomi Oy 2014).

Biokaasuprosessin jälkeen käsittelyjäännös separoitiin sähkökäyttöisellä lingolla, jonka erotustehot kuivajakeeseen olivat massa 20 % (Biovakka Suomi Oy 2014), TS 90 %, VS 90 %, N<sub>kok</sub> 30 %, NH<sub>4</sub>-N 19 %, P<sub>kok</sub> 90 % ja K<sub>kok</sub> 12 % (asiantuntija-arvio, Hjorth ym. 2010). Separattorin sähkönkulutuksena käytettiin 2,5 kWh/t käsiteltävää materiaalia (asiantuntija-arvio).

Separoimalla erotetun käsittelyjäänöksen nestejake jatkojalostettiin erilaisiksi ravinnetuotteiksi valituilla teknologioilla ja niiden yhdistelmillä (strippaus, haihdutus, kalvopuhdistus) (kpl 3.2.1). Jatkojalostusteknologioiden ravinteiden erotustehokkuuksina käytettiin kirjallisuusarvoja ja asiantuntija-arvioita (taulukko 11).

**Taulukko 11.** Jatkojalostusketjujen massa- ja ravinnetaselaskennassa käytetyt massan ja ravinteiden erotustehokkuudet.

	Massa (%)	N <sub>kok</sub> (%)	NH <sub>4</sub> -N (%)	Lähteet
Strippaus, ammoniumsulfaatti	-	-	80	Ervasti ym. 2011, Guštin & Marinšec-Logar 2011
Haihdutus, konsentraatti	20	80	80	Arvio, Ervasti ym. 2011, Chiumenti ym. 2013, Bonmatí & Flotats 2003
Kalvopuhdistus, retentaatti	15	-	90	Arvio, Biovakka Suomi Oy 2014

Taulukoiden 10 ja 11 arvojen avulla laskettiin käsittelyjäänöksen jatkojalostuksessa muodostuvien jakeiden ominaisuudet. Ammoniumsulfaatin osalta lähtöoletuksena myös oli, että muodostuvan ammoniumsulfaatin NH<sub>4</sub>-N pitoisuus on 40 g/kg.

Käsittelyjäänöksestä erotetun nestejakeen jalostusvaihtoehtojen lämmönkulutus laskettiin veden ominaislämpökapasiteetin avulla (kaava 1) olettaen, että lämpötila sekä strippauksessa että haihdutuksessa on 80 °C (Biovakka Suomi Oy 2014), jolloin nestejakeen ja prosessoidun tuotteen lämpötilaero oli noin 40 astetta. Skenaariossa JJ2 (strippaus + haihdutus + kalvopuhdistus) oletettiin, että strippaukseen tuotu lämpöenergia riittää myös haihdutukseen, jolloin erillistä lämmönkulutusta haihdutukselle ei laskettu. Strippauksen, haihdutuksen ja kalvopuhdistuksen energiankulutuksina sovellettiin Biovakan Vehmaan laitoksella toteutuneita arvoja.

Laitoksen tuottama biokaasu muunnettiin CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi. Sähköntuotannon hyötysuhteena käytettiin arvoa 38 % ja lämmöntuotannon hyötysuhteena arvoa 47 %.

### *Kemikaalien käyttö*

Nestejakeen jatkojalostuksessa käytetään eri teknologioissa ja vaiheissa erilaisia kemikaaleja, joiden kulutus otettiin massavirtojen tarkastelussa sekä ympäristövaikutusten laskennassa huomioon (taulukko 12). Kemikaalien kulutus on kuitenkin prosessiolosuhteista riippuvainen, ja eri laitoksilla kemikaalien kulutus voi vaihdella keskenään. Tässä raportissa kemikaalien kulutusta arvioitiin perustuen Biovakka Suomi Oy:n tietoihin sekä laskennallisiin arvoihin.

**Taulukko 12.** Jatkojalostusketjujen kemikaalinkulutus.

Jatkojalostusketju	Kemikaali	Prosessi	Kulutus (m <sup>3</sup> /a)
JJ0 Separointi	Polymeeri	Jäänöksen separointi	28
JJ1, JJ4 Strippaus	Polymeeri	Jäänöksen separointi	28
	NaOH (50 %)	Strippaus	660
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (93 %)	Strippaus	5900
JJ2 Strippaus + haihdutus + kalvosuodatus	Polymeeri	Jäänöksen separointi	28
	NaOH (50 %)	Strippaus	660
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (93 %)	Strippaus	5900
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (93 %)	Haihdutus	670
	Vaahdonestoaine	Haihdutus	0,7
	NaOH (50 %)	Kalvopuhdistus	80
JJ3 Haihdutus + kalvosuodatus	Polymeeri	Jäänöksen separointi	28
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (93 %)	Haihdutus	740
	Vaahdonestoaine	Haihdutus	0,8
	NaOH (50 %)	Kalvopuhdistus	89

### Kuljetukset

Kuljetusten tarkastelussa käytettiin samoja lähtöarvoja kuin raportin 1-osassa (luku 2.2.3., taulukko 5). Kuljetusetäisyyksiksi oletettiin 50 km biokaasulaitokselta tilalle ja 5 km tilalta pellolle.

### Ympäristövaikutusten arviointi

Työssä arvioitiin jatkojalostusketjujen JJ0-JJ4 elinkaarisia ympäristövaikutuksia (ilmastonmuutos ja vesien rehevöityminen) ja vertailtiin ketjuja keskenään. Ympäristövaikutusten arviointi toteutettiin elinkaariarvioinnilla (ISO 2006a ja ISO 2006b) soveltaen edellä esitettyjä rajauksia (luku 3.2.2), kemikaalien käyttöä (taulukko 12) ja laskennallisia massa-, ravinne- ja energiataseita. Ympäristövaikutusten arvioinnissa käytetyt ekvivalenttikertoimet sekä kulkeutumis- ja käytettävyykertoimet on esitetty luvussa 2.2.3. Myös rehevöittävien vaikutusten arvioinnissa käytetyt oletukset on esitetty luvussa 2.2.3.

Jatkojalostusprosesseissa käytävän energian päästöt arvioitiin karkeasti biokaasulaitoksen raaka-aineiden kuljetuksista ja biokaasulaitokselta syntyvien päästöjen perusteella. Jatkojalostusketjuissa käytettävien kemikaalien (NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) valmistuksen päästöt huomioitiin Ecolnvent-tietokannan tietojen perusteella. Kuljetusten päästöt on arvioitu VTT:n LIPASTO-tietokannan tietojen perusteella. Myös mahdollisten tyhjien paluukuljetusten päästöt otettiin huomioon.

Eri jakeiden peltokäytön päästöt arvioitiin hyödyntämällä sellaisten jakeiden päästökertoimia, jotka olisivat ominaisuuksiltaan ja siten päästökertoimiltaan mahdollisimman samankaltaisia jatkojalostusketjujen tuottamien jakeiden kanssa. Tällöin nestejakeelle sovellettiin virtsan peltokäytön päästökertoimia ja kuivajakeelle kuivikelannan peltokäytön päästökertoimia. Ammoniakki- ja dietyyppioksidipäästöjä laskettaessa ammoniumsulfaatile sovellettiin virtsan kertoimia ja konsentraatille lietelannan kertoimia, jotka perustuvat Grönroosin ym. (2009) julkaisuun.

Myös jatkojalostustuotteiden mineraalilannoitteita korvaava vaikutus otettiin huomioon hyvityksenä Suomen keskimääräisen lannoitteiden valmistuksen päästökertoimen mukaisesti, kuten kokonaisketjujen tarkastelussa (ks. luku 2.2.3).

## 3.3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

### 3.3.1. Massa- ja ravinnetaseet

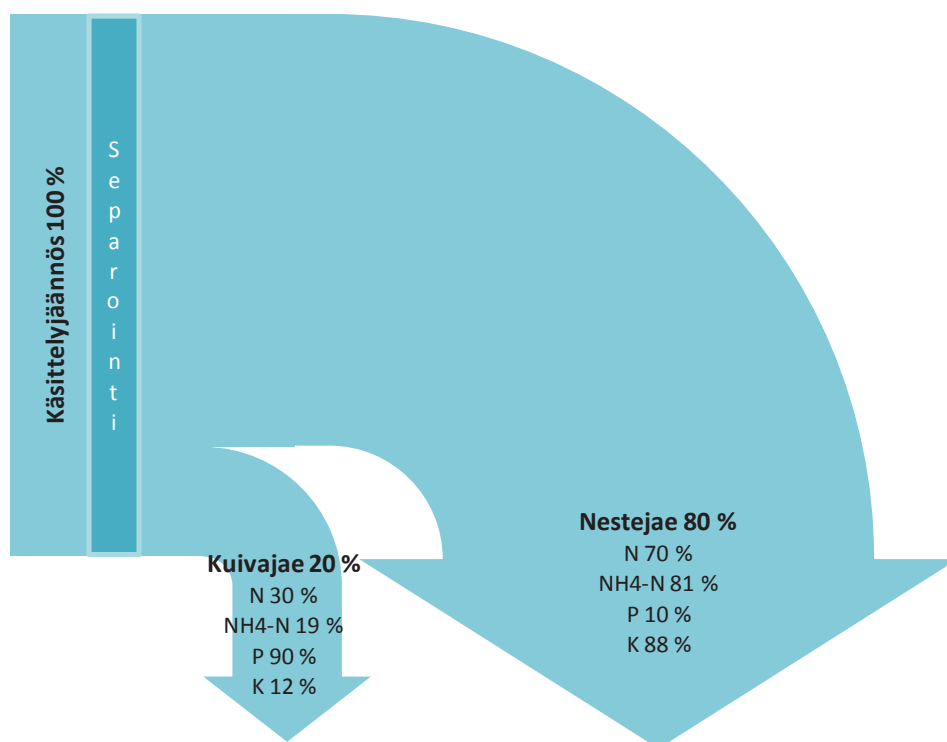
Massan ja ravinteiden jakautumista eri tuotteisiin vertailtiin viiden erilaisen jäännöksen käsittelymenetelmän tai -menetelmien muodostamassa prosessointiketjussa. Kaikissa tarkastelluissa ketjuissa biokaasuprosessin syötteen ja itse biokaasuprosessi olivat samat, joten myös prosessissa syntyvä käsittelyjäännös oli samanlainen. Käsittelyjäännöksen ominaisuudet määritettiin laskennallisesti (taulukko 13). Biokaasulaitoksen käsittelemä syötteen kokonaismäärä oli 100 000 t/a, josta 8 % päätyi biokaasuun ja 92 % käsittelyjäännökseen.

**Taulukko 13.** Käsittelyjäännöksen massa- ja ravinnevirrat sekä ravinnepitoisuudet.

	Massavirta	TS	VS	N <sub>kok</sub>	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>kok</sub>	K <sub>kok</sub>
Käsittelyjäännös (t/a)	92167	5749	3205	580	427	172	211
(g/kg)		62	35	6,3	4,6	1,9	2,3

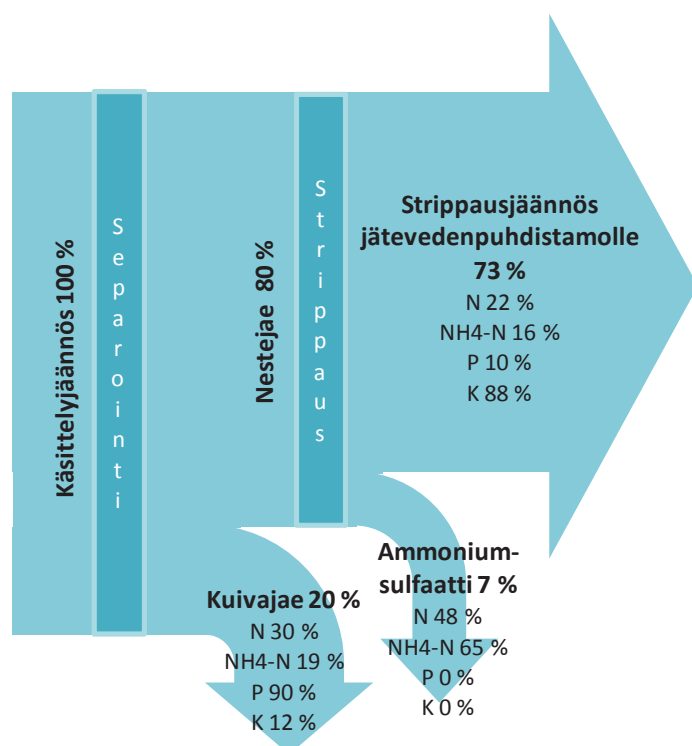
Kaikissa jatkojalostusketjuissa biokaasuprosessissa muodostunut jäännös separoitiin sähkökäyttöisellä lingolla, josta muodostui neste- ja kuivajakeita (liite 3). Nestejakeen osalta tarkasteltiin vaihtoehtoja, jossa se ohjattiin sellaisenaan peltokäyttöön tai sitä jatkojalostettiin strippauksen ja/tai haihdutuksen sekä kalvopuhdistuksen avulla. Kuivajakeen jatkojalostusta ei tarkasteltu, koska tähän soveltuvista menetelmistä (esim. pyrolyysi, terminen kuivaus ja pelletointi) on melko vähän käytännön mittakaavan tietoa saatavilla.

Ketjussa JJ0 varsinaista jatkojalostusta ei tehty, vaan biokaasuprosessissa muodostunut käsittelyjäännös separoitiin ja jakeet käytettiin sellaisenaan pelloilla. Tällöin nestejakeeseen päätyi 80 % käsittelyjäännöksen massasta ja kuivajakeeseen 20 %. Separoinnissa 70 % kokonaistypestä ja 80 % kokonaiskaliumista päätyi nestejakeeseen, kun taas jäännöksen fosforista ainoastaan 10 % siirtyy nestejakeeseen (kuva 32, taulukko 14).



**Kuva 32.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ0: neste- ja kuivajae pelto-  
lannoitteeksi sellaisenaan. Kemikaalilisäyksiä ei ole huomioitu.

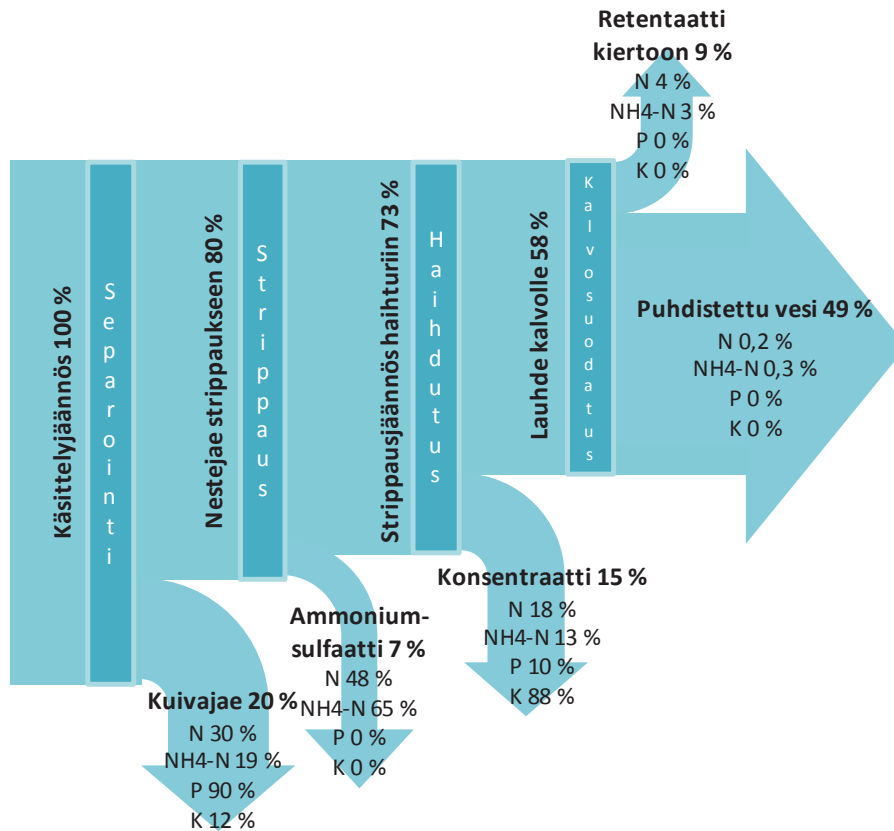
Jatkojalostusketjussa JJ1 nestejake johdettiin strippausyksikköön ja kuivajake käytettiin sellaisenaan lannoitteena pelloilla. Strippauksessa nestejakeen pH nostettiin NaOH:n avulla ja korkeassa lämpötilassa kaasufaasiin siirtynyt ammoniakki pestiin rikkihappoliuokseen. Strippauksen tuotteita olivat ammoniumsulfaatti ja strippausjäännös. Ammoniumsulfaatti sisälsi 65 % käsittelyjäännöksen ammoniumtyyppistä konsentroituneena 40 g/kg typpipitoisuudeksi, mutta ei muita ravinteita. Ammoniumsulfaattiin päätyi 7 % käsittelyjäännöksen massavirrasta. Strippausjäännökseen jäi 16 % käsittelyjäännöksen ammoniumtyyppistä sekä nestejakeen kalium ja fosfori kokonaisuudessaan. Ammoniumsulfaatin kuiva-ainepitoisuudeksi oletettiin 0 %, jolloin kaikki strippausyksikköön johdettu nestejakeen kuiva-aine sekä orgaaninen aines jäivät strippausjäännökseen. Ammoniumsulfaatti ohjattiin sellaisenaan peltokäyttöön, jossa se korvaa muita epäorgaanisia lannoitteita. Strippausjäännös ohjattiin jätevedenpuhdistamolle käsiteltäväksi (kuva 33, taulukko 14).



**Kuva 33.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ1: nestejakeen strippaus, ammoniumsulfaatti peltolannoitteeksi, strippausjäännös jätevedenpuhdistamolle, kuivajaepeltolannoitteeksi. Kemikaalilisäyksiä ei ole huomioitu.

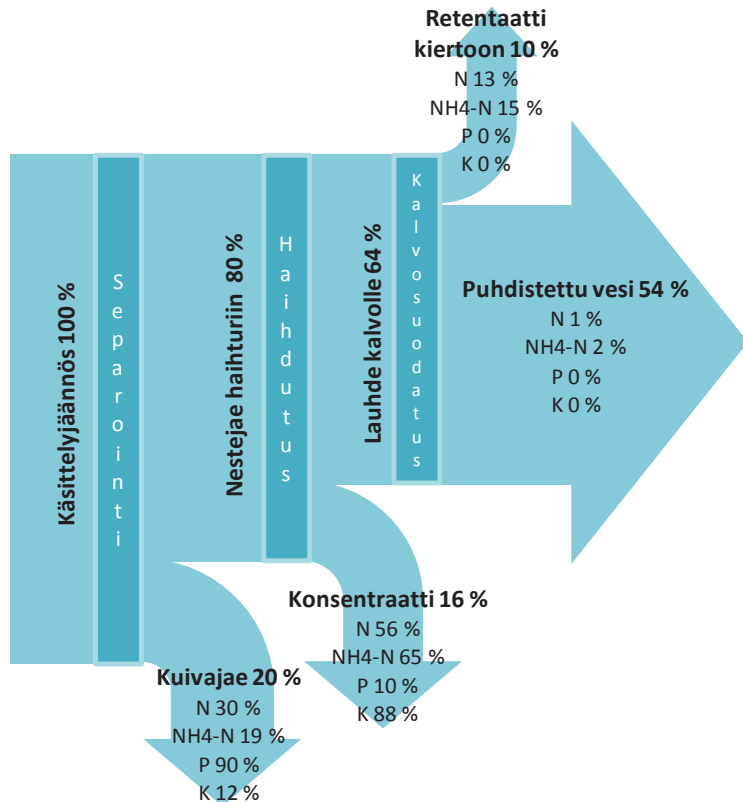
Jatkojalostusketjussa JJ2 nestejakeen strippausyksikköön yhdistettiin haihdutus ja kuivajäte käytettiin sellaisenaan lannoitteena pelloilla. Strippaus tuotti massamäärältään ja ominaisuuksiltaan saman ammoniumsulfaattijakeen kuin jatkojalostusketju JJ1. JJ2:ssa muodostunut strippausjäännös ohjattiin edelleen käsiteltäväksi haihdutusyksikköön. Haihdutuksessa konsentroitunutta nestejätettä, konsentraattia, muodostui 15 % käsittelyjäännöksen massasta. Höyrystynyt osa lauhdutettiin, jolloin muodostui lauhdetta, joka edelleen käsiteltiin kalvopuhdistusyksikössä. Kalvopuhdistuksesta muodostui puhdistettua vettä 49 % käsittelyjäännöksen massasta ja 9 % retentaattia, joka ohjattiin takaisin biokaasuprosessiin käsiteltäväksi (kuva 34, taulukko 14).

Kaiken kaikkiaan JJ2:ssa tuotettiin kolme eri peltokäyttöön soveltuvaa ravinnejätettä: separoinnin kuivajäte, ammoniumsulfaatti ja haihdutuksen konsentraatti. Kuivajäte sisälsi 90 % käsittelyjäännöksen fosforista, ammoniumsulfaatti 65 % ammoniumtyyppistä ja konsentraatti 88 % kaliumista (kuva 34, taulukko 14). Kalvopuhdistettu vesi sisälsi alle 0,5 % käsittelyjäännöksen tyyppistä ja 0 % fosforista sekä kaliumista.



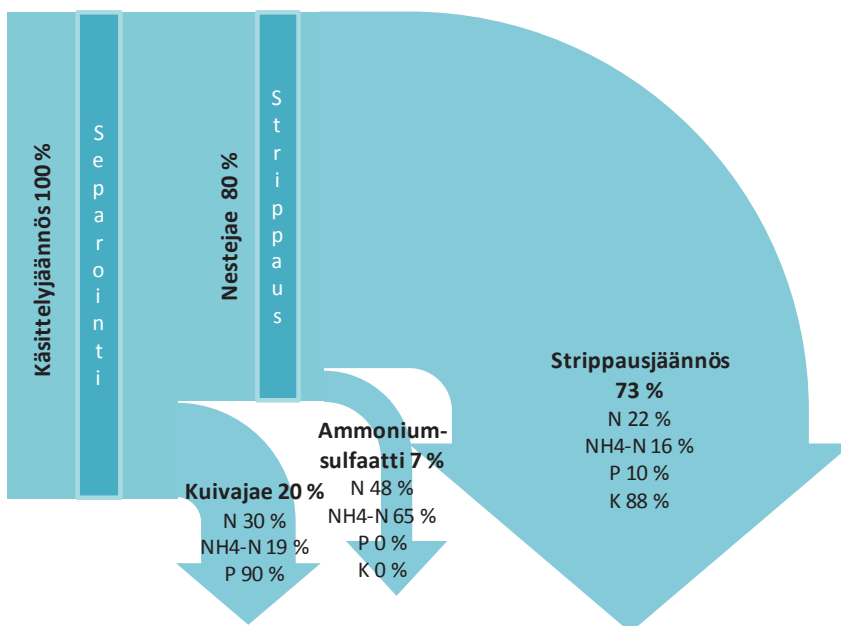
**Kuva 34.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ2: nestejakeen strippaus, haihdutus ja kalvopuhdistus, ammoniumsulfaatti, konsentraatti ja kuivajae peltolannoitteeksi, puhdistettu vesi vesistöön. Kemikaalisäyksiä ei ole huomioitu.

Jatkojalostusketjussa JJ3 nestejäte käsiteltiin haihdutusyksikössä ja kuivajae käytettiin sellaisenaan lannoitteena pelloilla. Haihdutuksessa muodostui peltokäyttöön soveltuvaa konsentraattia 16 % käsitelyjäännöksen massasta. Konsentraattiin siirtyi käsitelyjäännöksen kokonaistypestä 56 %, ammoniumtypestä 65 % ja kaliumista 88 %. Fosforista 90 % päätyi kuivajakeeseen. Haihdutuksesta muodostuvan lauhteen kalvopuhdistuksessa syntyi 54 % puhdistettua vettä suhteessa käsitelyjäännöksen massaan. Vesi sisälsi 1 % jäännöksen kokonaistypestä. Retentaatin mukana biokaasulaitoksen kiertoon palautettiin 10 % jäännöksen massasta ja 13 % kokonaistypestä (kuva 35, taulukko 14).



**Kuva 35.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ3: nestejakeen haihdutus ja kalvopuhdistus, konsentraatti ja kuivajäte peltolannoitteeksi, puhdistettu vesi vesistöön. Kemikaalilisiä ei ole huomioitu.

Jatkojalostusketjussa JJ4 kuivajäte käytettiin sellaisenaan pelloilla ja nestejäte johdettiin strippaukseen samaan tapaan kuin JJ2:ssa. Massa- ja ravinnevirrat olivat myös samat kuin JJ2:ssa, jolloin peltokäyttöön päätyi strippauksen jälkeen ammoniumsulfaattina 7 % ja strippausjäännöksenä 73 % käsittelyjäännöksen massasta (kuva 36, taulukko 14).



**Kuva 36.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ4: nestejakeen strippaus, ammoniumsulfaatti, strippausjäännös ja kuivajäte peltolannoitteeksi. Kemikaalilisiä ei ole huomioitu.



**Taulukko 14.** Massavirran ja ravinteiden jakautuminen jatkojalostusketjuissa suhteutettuna biokaasu-prosessissa muodostuvan käsittelyjäännöksen määrään. Kemikaalilisäyksiä ei ole huomioitu.

% käsittelyjäännöksen massa- tai ravinnemääristä	Massavirta	TS	VS	N <sub>kok</sub>	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>kok</sub>	K <sub>kok</sub>
<i>Kaikissa ketjuissa:</i>							
Kuivajae	20	90	90	30	19	90	12
<i>Nestejakeen jatkojalostusketjut:</i>							
<i>JJ0 Nestejae sellaisenaan pellolle</i>							
Nestejae	80	10	10	70	81	10	88
<i>JJ1, JJ4 Strippaus</i>							
Ammoniumsulfaatti	7	0	0	48	65	0	0
Jäännös	73	10	10	22	16	10	88
<i>JJ2 Strippaus + haihdutus + kalvopuhdistus</i>							
Ammoniumsulfaatti	7	0	0	48	65	0	0
Konsentraatti	15	10	10	18	13	10	88
Puhdas vesi	49	0	0	0	0	0	0
Retentaatti (kiertoon)	9	0	0	4	3	0	0
<i>JJ3 Haihdutus + kalvopuhdistus</i>							
Konsentraatti	16	10	10	56	65	10	88
Puhdas vesi	54	0	0	1	2	0	0
Retentaatti (kiertoon)	10	0	0	13	15	0	0

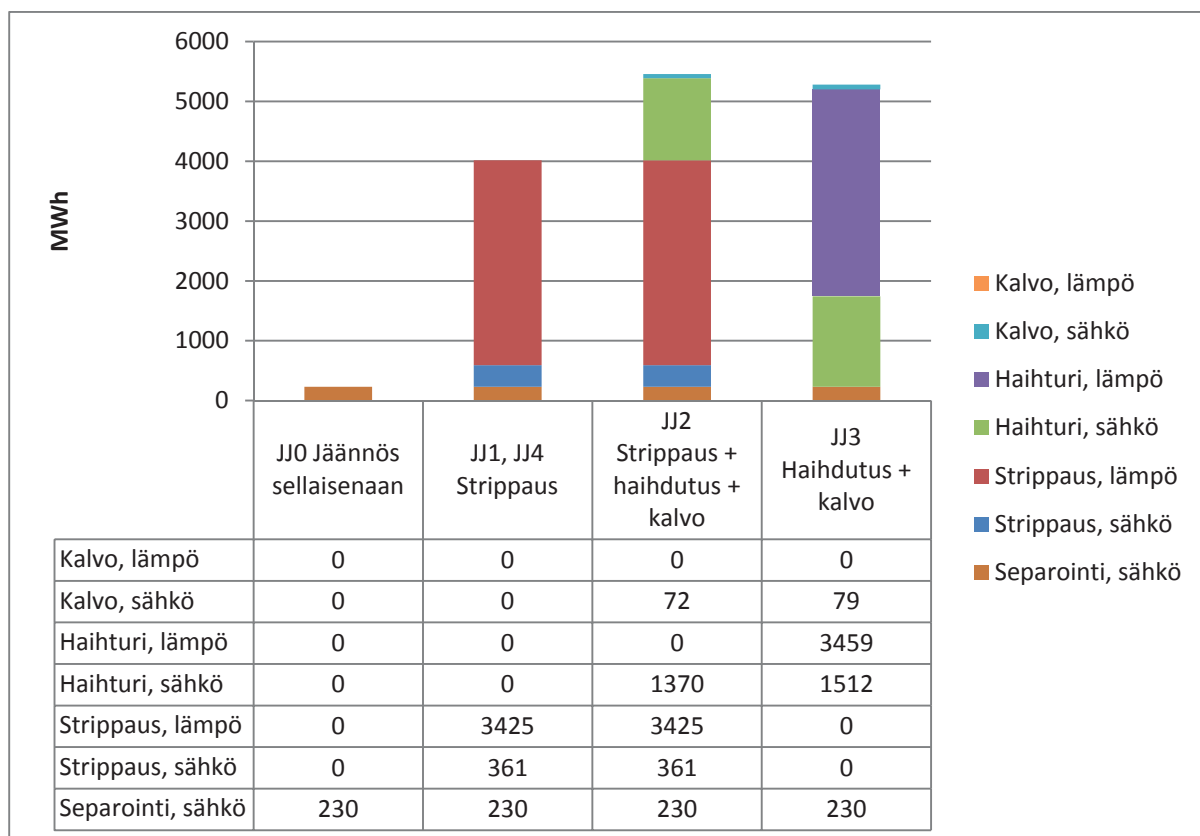
### 3.3.2. Energiataseet

Energiataseita tarkasteltiin biokaasuprosessin ja jatkojalostusketjujen osalta lähtien biokaasulaitoksen syötteiden energiasisällöstä ja päättyen käsittelyjäännöksen nestejakeen käsittelyn jälkeen jäljelle jäävään ylijäämäenergian määrään. Lisäksi tarkasteltiin kokonaisketjujen energiatasetta, joka sisälsi käsittelyjäännöksen ja siitä jalostettujen tuotteiden kuljetusten ja peltolevitysten energiankulutukset. Tarkastellun biokaasuprosessin raaka-aineet ovat jättemateriaaleja, joten niiden hankinnan energiankulutus oletetaan koostuvan ainoastaan kuljetusten energiankulutuksesta, joiden suuruus on tapauskohtaista, minkä takia niitä ei huomioitu.

#### *Biokaasuprosessin ja jatkojalostusketjujen energiataase*

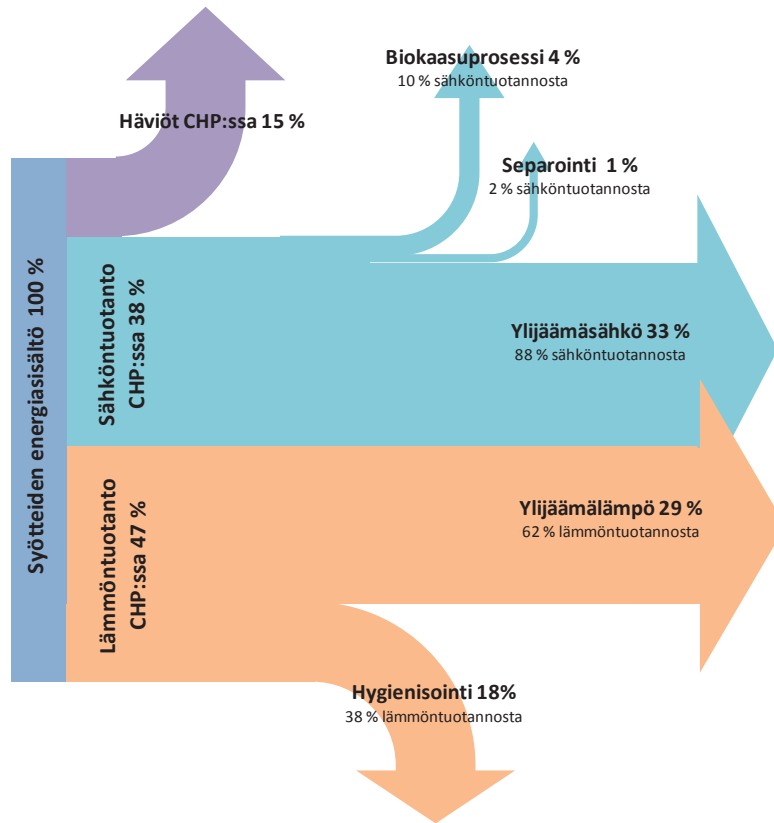
Kaikissa tarkastelluissa jatkojalostusketjuissa varsinainen biokaasuprosessi oli sama. Tarkastellun biokaasulaitoksen (käsittelykapasiteetti 100 000 t/a) syötteiden laskennallinen energiasisältö oli 38 650 MWh/a. Oletuksena oli, että muodostuvasta biokaasusta tuotetaan CHP-yksikössä sähköä ja lämpöä laitoksen omiin tarpeisiin, käsittelyjäännöksen jatkojalostuksen tarpeisiin ja muualla hyödynnettäväksi. CHP:ssä tuotettiin sähköä 14 690 MWh ja lämpöenergiaa 18 170 MWh. Laitoksen biokaasuprosessin ja hygienisoinnin vuosittainen energiankulutus oli yhteensä 1 170 MWh sähköä ja 6 970 MWh lämpöenergiaa, eli 8 % tuotetusta sähköstä ja 38 % tuotetusta lämmöstä (liite 4).

Jatkojalostuksen energiankulutuksia tarkasteltiin kunkin jatkojalostusketjun osalta erikseen (kuva 37). Ketjussa JJ0 ainoastaan separaattorin energiankulutus laskettiin mukaan, kun taas muissa vaihtoehtoisissa huomioitiin lisäksi strippauksen ja/tai haihdutuksen sekä kalvopuhdistuksen energiankulutus. Sekä strippaus että haihdutus ovat lämpöä kuluttavia prosesseja, joissa lämpötilan nosto parantaa ravinteiden konsentroitteihokkuutta. Tässä käytettiin molemmissa prosesseissa lämpötilaa 80 °C. JJ2:ssa, jossa strippaus ja haihdutusprosessit yhdistettiin, ei lämmönkulutus kuitenkaan nousut verrattuna pelkkään strippaukseen, koska strippausyksikön lämpö pystyttiin hyödyntämään suoraan haihdutuksessa. Haihdutus kulutti strippausta enemmän sähköä käytettävien pumppujen suuren tehon vuoksi. Haihdutuksen sähkönkulutukseen on mahdollista vaikuttaa jonkin verran energia- tehokkailla pumppaustekniikoilla.

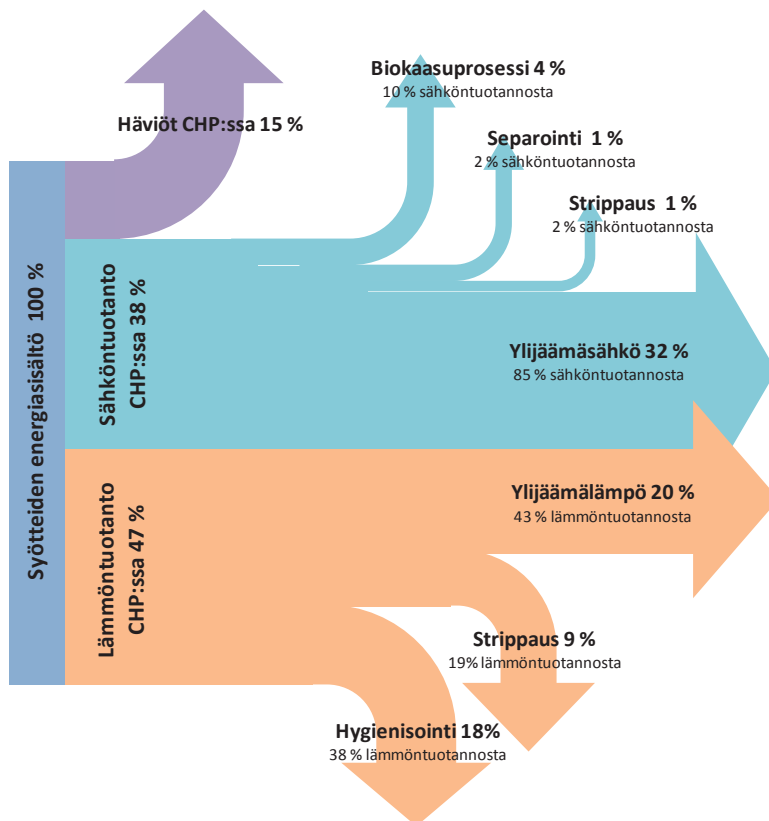


**Kuva 37.** Biokaasulaitoksen käsittelyjäännöksen nestejakeen jatkojalostusketjujen energiankulutus.

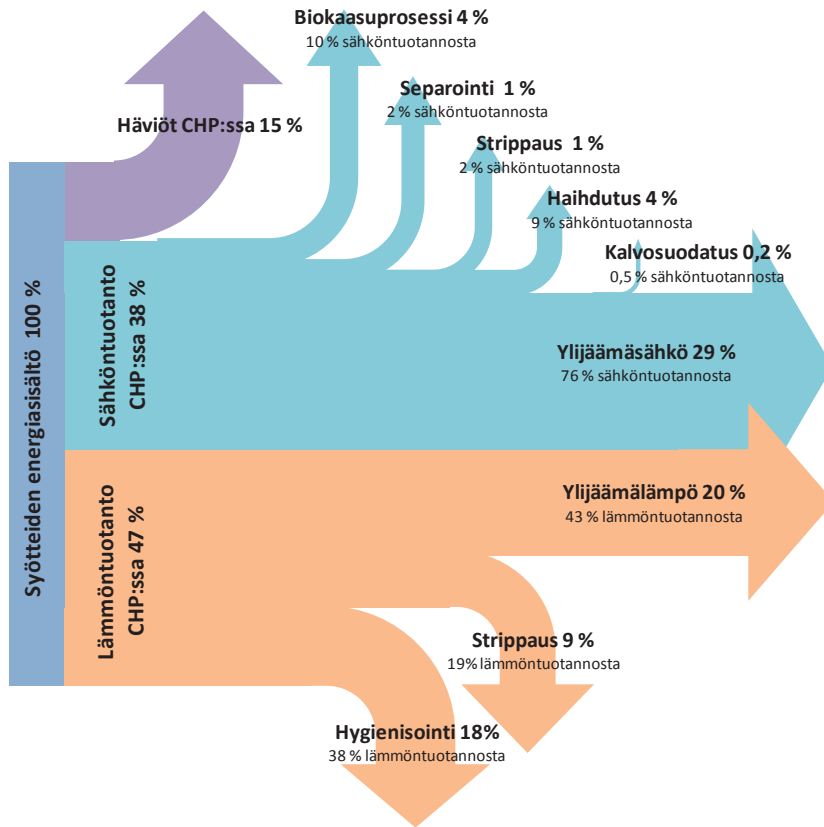
Biokaasuprosessin ja jatkojalostusketjujen energiataseet laskettiin suhteuttamalla osaprosessien kulutukset biokaasulaitoksen syötteiden energiasisältöön sekä CHP-yksikön sähkön ja lämmön tuotantoon (kuvat 38–41). Jatkojalostusketjussa JJ0, jossa käsittelyjäännös ainoastaan separoitiin, jäi laitoksen oman kulutuksen jälkeen ylijäämä sähköä 88 % (12 900 MWh/a) tuotetusta sähköstä ja ylijäämä lämpöä 62 % (11 200 MWh/a) tuotetusta lämpöenergiasta. Varsinaisten jatkojalostusprosessien kuluttama energia vähentää laitoksen ylijäämä sähköä ja -lämmön määrää ketjuissa JJ1–JJ4. JJ1:n ja JJ4:n mukaisen strippauksen jälkeen ylijäämä sähköä jää 85 % (12 600 MWh) tuotetusta sähköstä ja ylijäämä lämpöä 43 % (7 800 MWh) tuotetusta lämpöenergiasta. Haihdutus (JJ2 ja JJ3) lisää laitoksen energiankulutusta vähentäen laitoksen ylijäämä sähköä osuutta hieman. Näissä ketjuissa ylijäämä sähköä muodostuu 76 ja 77 % (11 100 ja 11 300 MWh) tuotetusta sähköstä. Ylijäämä lämmön osuus näissä ketjuissa on 43 % tuotetusta lämmöstä (noin 7 700 MWh).



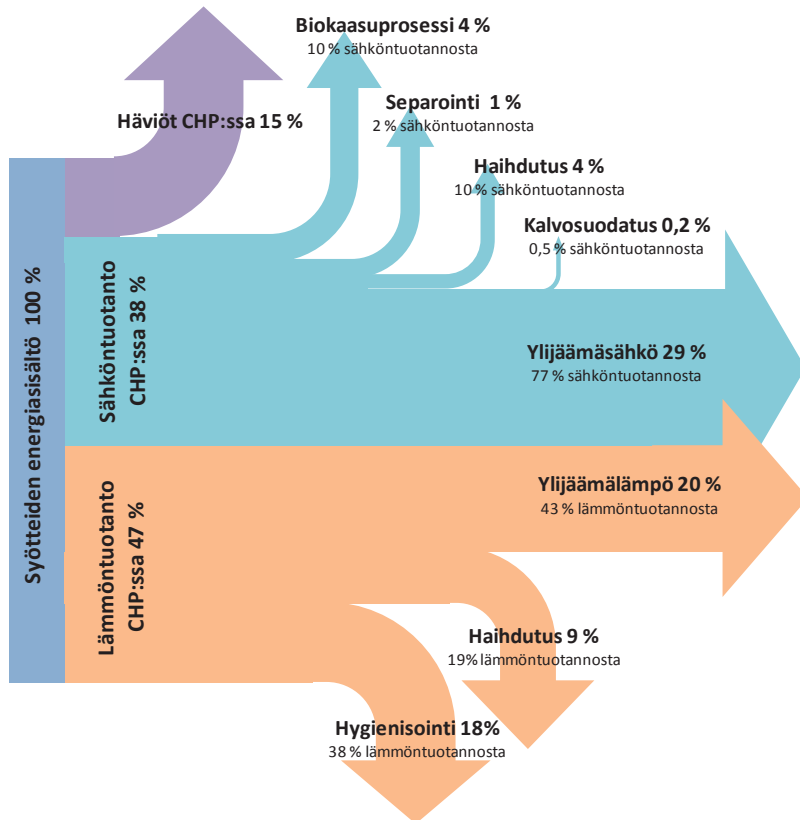
**Kuva 38.** Sähkö- ja lämpöenergian jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ0 suhteutettuna syötteiden energiasisältöön sekä CHP-yksikön sähkön ja lämmön tuotantoon.



**Kuva 39.** Sähkö- ja lämpöenergian jakautuminen jatkojalostusketjuissa JJ1 ja JJ4 suhteutettuna syötteiden energiasisältöön sekä CHP-yksikön sähkön ja lämmön tuotantoon.



**Kuva 40.** Sähkö- ja lämpöenergian jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ2 suhteutettuna syötteiden energiasältöön sekä CHP-yksikön sähkön ja lämmön tuotantoon.



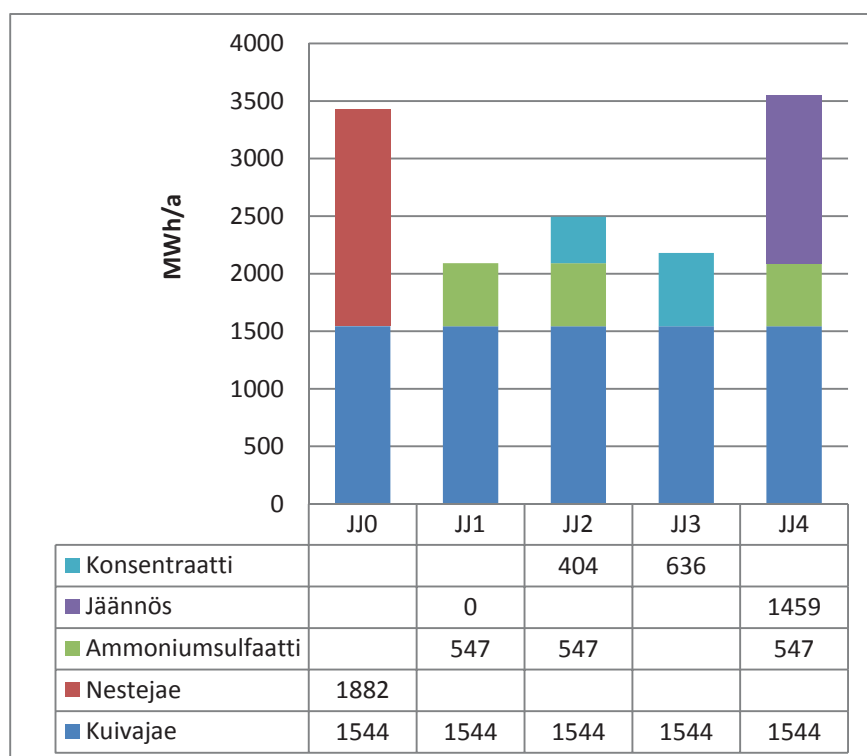
**Kuva 41.** Sähkö- ja lämpöenergian jakautuminen jatkojalostusketjussa JJ3 suhteutettuna syötteiden energiasältöön sekä CHP-yksikön sähkön ja lämmön tuotantoon.

### Kokonaisketjun energiatase

Kokonaisketjun energiatasetarkastelussa huomioitiin yllä esitettyjen biokaasuprosessin ja jatkojalostusprosessien energiankulutusten lisäksi tuotteiden kuljetukset. Käsittelyjäännöksen ja siitä jatkojalostettujen jakeiden kuljetusmatkoina käytettiin 50 km biokaasulaitokselta tilalle 5 km tilalta peltoon (5 km). Myös materiaalin lastauksen ja peltolevityksen energiankulutus huomioitiin. Biokaasulaitokselta tilalle tapahtuva nestemäisten jakeiden kuljetusten energiankulutus arvioitiin puoliperävaunun kulutuksen perusteella ja kuivajakeen kuljetuksen energiankulutus maansiirtoauton kulutuksen perusteella. Tilalta peltoon tapahtuvan kuljetuksen osalta käytettiin traktorin päästötietoja.

Kuljetettaessa tuotteita biokaasulaitokselta tilalle, oletettiin tilalta lähtevän samalla paluukuorma lietelantaa biokaasulaitokselle, jolloin vältetään tyhjää ajoa laitoksen ja tilan välillä, ts. kuljetuksille ei ole oletettu tyhjää paluukuljetusta. Sen sijaan pellolta lietesäiliö ajetaan levityksen jälkeen tyhjänä takaisin tilalle (5 km) (ks. kpl 2.2.3, taulukko 5).

Kuljetusten ja peltolevitysten yhteenlaskettu energiankulutus oli sitä korkeampi, mitä suurempi oli kuljetettava ja levitettävä massamäärä. Ketjussa JJ0, jossa käsittelyjäännöksestä separoidut neste ja kuivajae kuljetettiin sellaisenaan peltokäyttöön, oli kuljetusten energiankulutus lähes 3 500 MWh (kuva 42). Ketjussa JJ4, joka sisälsi strippauksen ja kaikkien jakeiden kuljetuksen peltokäyttöön, kuljetettava massamäärä ja siten kuljetusten energiankulutus olivat hieman suurempia kuin ketjussa JJ0. Käytännössä tämäntyyppinen ketju voisi olla mahdollinen esim. jos ammoniumsulfaattijakeen myynnistä saataisiin riittävästi tuloja kattamaan strippauksen kustannukset. Ketjussa JJ1 kuljetettavaa massamäärää pienensi nestejakeen johtaminen jätevedenpuhdistamolle, mille ei laskettu kuljetuskustannuksia, ja ketjuissa JJ2 ja JJ3 prosessissa muodostuva puhdistettu vesi, joka johdettiin suoraan vesistöön. Näissä kolmessa ketjussa kuljetusten energiankulutus oli noin 2 100–2 500 MWh



**Kuva 42.** Käsittelyjäännöksestä jatkojalostettujen jakeiden kuljetuksen, lastauksen ja peltolevityksen energiankulutus vuosittain eri jatkojalostusketjuissa.

### Kokonaisketjun energiatase

Biokaasulaitoksen syötteiden energiasisällöstä noin 23 % kului varsinaisen biokaasuprosessin toimintaan, energiantuotantoon ja separointiin (taulukko 15, liite 3). Jatkojalostusprosessit kuluttivat ener-

giaa 10–14 % ja tuotteiden kuljetukset ja peltolevitys 5–9 % syötteiden energiasisällöstä. Ylijäämäenergian osuus (69 %) oli suurin ketjussa JJ0, jossa varsinaista jatkojalostusta ei tehty, kun se muissa ketjuissa oli 58–62 %.

**Taulukko 15.** Kokonaisenergiatase jatkojalostusketjuissa, kun huomioidaan sekä biokaasulaitoksen toiminta, jatkojalostus sekä tuotteiden kuljetus ja peltolevitys (MWh).

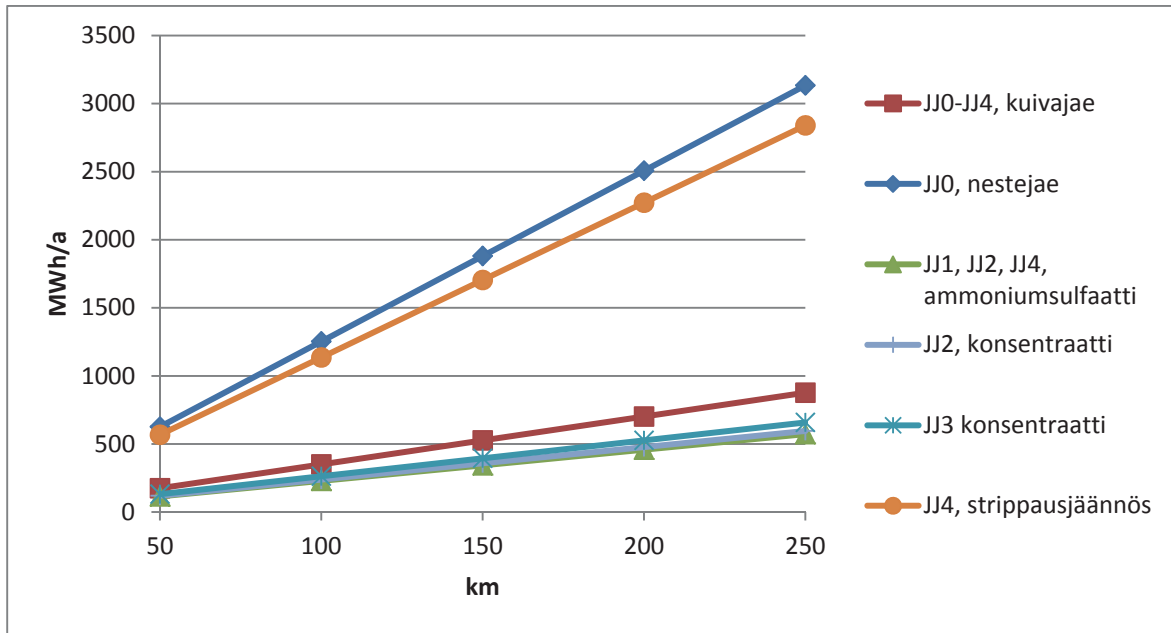
Ketju	Biokaasun energiasisältö	Hygienisoinnin, biokaasuprosessin, CHP:n ja separoinnin energiankulutus	Jatkojalostusprosessin energiankulutus	Tuotteiden kuljetusten ja peltolevityksen energiankulutus	Ylijäämäenergia
JJ0	38 600	8 740	0	3 430	26 500
JJ1			3 790	2 090	24 000
JJ2			5 230	2 500	22 200
JJ3			5 050	2 180	22 700
JJ4			3 790	3 550	22 600

#### *Tuotteiden kuljetusmatkan vaikutus kuljetuksen energiankulutukseen*

Suurilla biokaasulaitoksilla muodostuvan käsittelyjäänneksen sisältämä ravinnemäärä on yleensä niin suuri, että maatalouskäyttöön päätyviä ravinteita joudutaan kuljettamaan pitkiäkin matkoja. Käsittelyjäänneksestä jatkojalostettujen tuotteiden kuljetusmatkan vaikutusta kuljetuksen energiankulutukseen mallinnettiin etäisyyksillä 50–250 km (kuva 43).

Kuljetettavan massan määrä vaikuttaa suoraan kuljetuksen energiankulutukseen. Jos käsittelyjäänneksestä erotettu nestejäte kuljetettiin sellaisenaan peltoille, nousi kuljetusten energiankulutus noin 2 500 MWh:lla, kun kuljetusetäisyys kasvoi 50 km:sta 250 km:iin. Vastaavalla matkalla massan ja ravinteiden suhteen konsentroitujen jakeiden, kuten ammoniumsulfaatin (JJ1, JJ2, JJ4) ja haihdutuksen konsentraatin (JJ2, JJ3), energiankulutus kasvoi vain noin 500 MWh:lla.

Ravinteiden konsentroiduksi käsittelyjäänneksestä esim. strippaamalla ja haihduttamalla kuluttaa enemmän energiaa kuin kuljetuksissa säästetään (taulukko 15, kuva 43). Jatkojalostusta ei siten voida suoraan perustella energiataseella. Suurten massamäärien kuljetuskustannukset ovat kuitenkin niin korkeat, että jatkojalostuksen toteuttaminen voi olla kannattavaa. Erityisesti biokaasulaitoksilla, joilla ylijäämälämmölle ei ole ympärivuotista hyötykäyttöä, lämpöenergian hyödyntäminen käsittelyjäänneksen jatkojalostusprosessissa voi olla perusteltua. Ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta jatkojalostusprosessit mahdollistavat ravinteiden konsentroiduksi ja jakamisen eri fraktioihin, mikä edistää niiden käytettävyyttä.

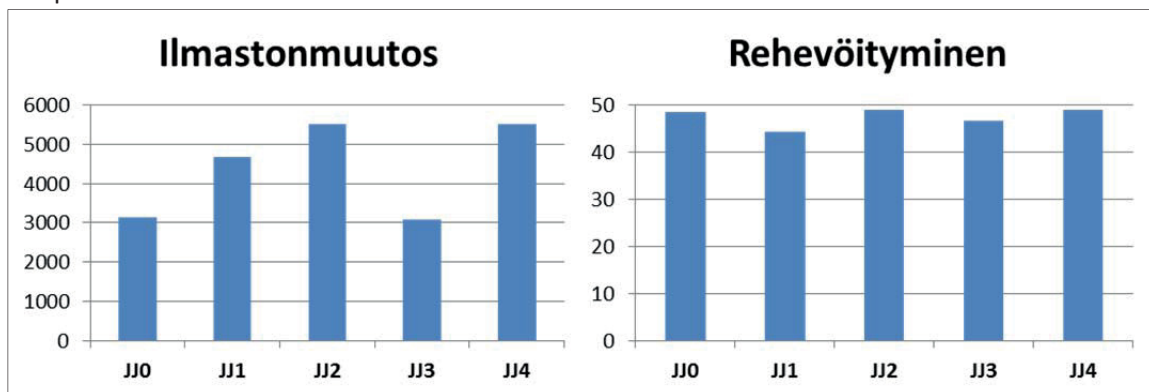


**Kuva 43.** Kuljetusetäisyyden vaikutus jatkojalostusketjuissa JJ0-JJ4 muodostuvien tuotteiden kuljetusten energiankulutukseen.

### 3.3.3. Ympäristövaikutukset

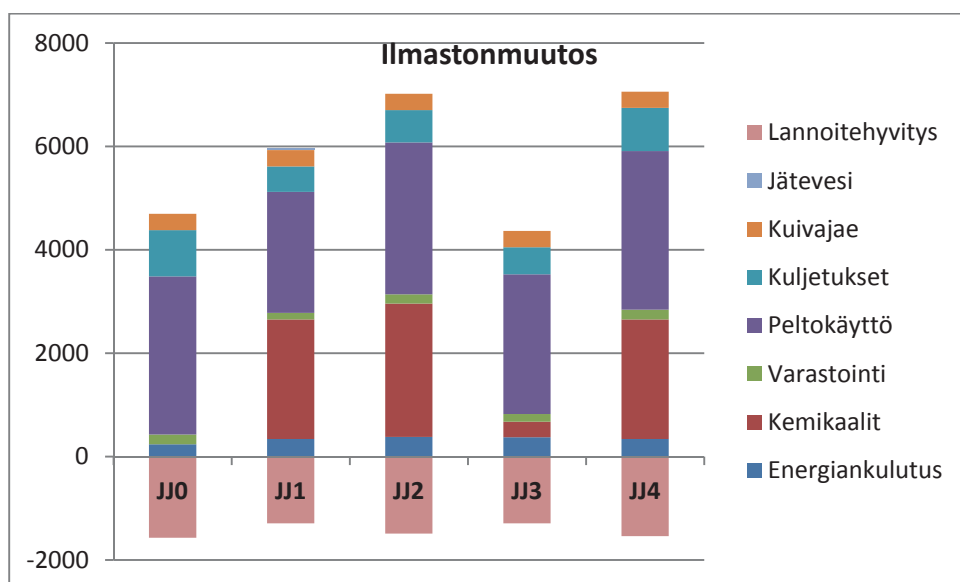
Käsittelyjäännöksen jatkojalostusketjujen ympäristövaikutuksista tarkasteltiin ilmastomuutosta ja rehevöittävä vaikutusta (kuva 44). Vähiten ilmastovaikutuksia aiheuttaa pelkkä nestejakeen haihdutus (JJ3), kun taas suurin ilmastovaikutus on nestejakeen yhdistetyllä strippauksella, haihdutuksella ja kalvopuhdistuksella (JJ2). Vaihtoehdon JJ3 alhainen ilmastovaikutus johtuu siitä, että tässä ketjussa kemikaalien kulutus on todella alhainen verrattuna muihin jatkojalostusketjuihin, joissa kemikaalien valmistuksen päästöt muodostavat huomattavan osan päästöistä. Myös tapauksen JJ0, jossa nestejake käytetään sellaisenaan lannoitteena, ilmastovaikutus on lähes yhtä alhainen kuin nestejakeen haihdutuksessa (JJ3).

Rehevöitymisvaikutuksessa ketjujen väliset erot eivät ole yhtä selkeitä kuin ilmastovaikutuksessa, mutta vähiten rehevöitymistä aiheuttaa nestejakeen strippaus ja strippausjäännöksen johtaminen jätevedenpuhdistamolle (JJ1), jolloin kaikki ravinteet eivät palaudu peltoon. Tämä tarkoittaa sitä, että ravinteiden levitykseen tarvittava pinta-ala on pienempi, jolloin myös rehevöittävä vaikutus on alhaisempi.



**Kuva 44.** Jatkojalostusketjujen ilmastovaikutus (t CO<sub>2</sub>-ekv./vuosi) ja rehevöittävät vaikutukset (t PO<sub>4</sub>-ekv./vuosi) (varsinaista biokaasuprosessia ja energiahyvitystä ei ole huomioitu). Taulukossa 9 on esitetty ketjujen kuvaukset.

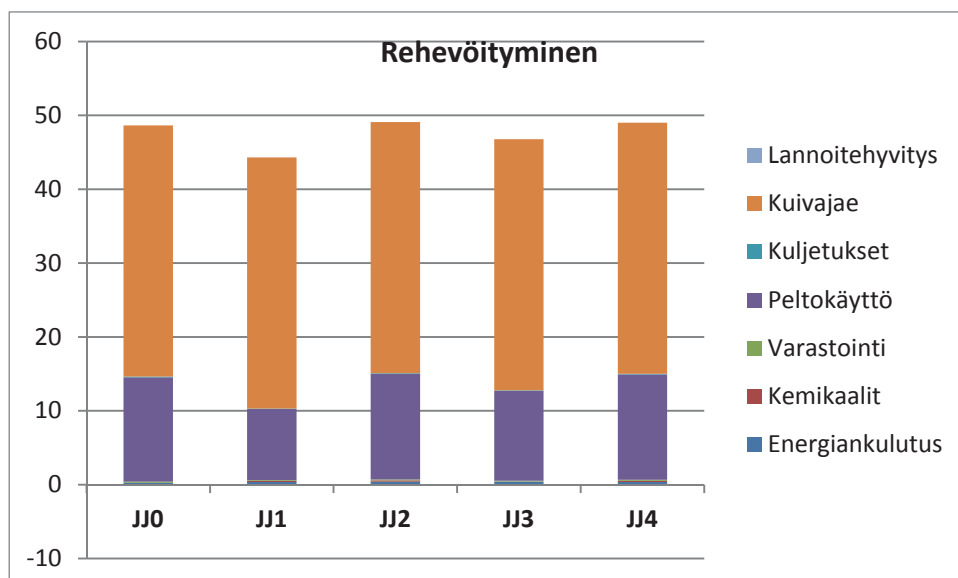
Ilmastovaikutuksia aiheutuu eniten nestejakeesta jalostettujen tuotteiden peltokäytöstä ja prosessissa käytettävien kemikaalien valmistuksesta (kuva 45). Kuivajakeen peltokäytöstä aiheutuvat ilmastovaikutukset ovat alhaiset, sillä kuivajakeen typpipitoisuus on alhainen. Jatkojalostusketjujen energiankulutus muodostaa vain pienen osan ketjun ilmastovaikutuksesta, sillä biokaasulla tuotetun energian ympäristövaikutukset ovat alhaiset. Energiankulutuksen merkitys olisi suurempi, jos jatkojalostus tehtäisiin fossiilisella energialla. Biokaasulaitoksen tuottaman energian käyttö on kuitenkin realistinen vaihtoehto erityisesti lämmön osalta, jolle voi olla vaikea löytää muuta hyötykäyttöä. Päästöhyvitystä saadaan mineraalilannoitteiden korvaamisesta. Päästöhyvityksen suuruuteen vaikuttaa ketjusta saatavan liukoisen typen määrä, joka käytetään lannoitteena. Tämän vuoksi alhaisimman päästöhyvityksen saa JJ1, jossa strippausjäännös menee jätevedenpuhdistukseen, jolloin kaikkea typpeä ei käytetä lannoitteena. Myös ketjuissa JJ2 ja JJ3 kaikkea typpeä ei käytetä lannoitteena, sillä kalvolle jäävä retentaatti palautetaan jatkojalostusketjun alkuun käsittelyjäännöksen separointiin. Energiahyvitystä ei ole huomioitu, koska tarkastelun kohteena oli ainoastaan käsittelyjäännöksen jatkojalostusketju.



**Kuva 45.** Jatkojalostusketjujen ilmastovaikutuksen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (t CO<sub>2</sub>-ekv./vuosi). Taulukossa 9 on esitetty ketjujen kuvaukset (varsinaista biokaasuprosessia ja energiahyvitystä ei ole huomioitu).

Rehevöittävästä vaikutuksista lähes kaikki aiheutuu kuivajakeen ja nestejakeesta jalostettujen lopputuotteiden peltokäytöstä (kuva 46). Muista vaiheista aiheutuvat vaikutukset ovat ainoastaan parin prosentin luokkaa kokonaisvaikutuksista. Erityisesti kuivajakeen peltokäyttö aiheuttaa suuren rehevöitymisvaikutuksen, sillä kuivajae sisältää paljon fosforia, jolloin sen levitykseen tarvittava peltopinta-ala on suuri. Rehevöittävästä vaikutuksesta osalta päästöhyvitykset korvattavista mineraalilannoitteista ovat alhaiset, sillä lannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat rehevöittävät päästöt ovat pieniä.





**Kuva 46.** Jatkojalostusketjujen rehevöittävä vaikutuksen jakautuminen ketjun eri vaiheisiin (t PO<sub>4</sub>-ekv./vuosi). Taulukossa 9 on esitetty ketjujen kuvaukset.

### 3.4. Yhteenveto

Tarkastellun biokaasulaitoksen käsittelemä syötteen kokonaismäärä oli 100 000 t/a, jonka massasta muodostui 8 % biokaasua ja 92 % käsittelyjäännöstä. Käsittelyjäännöksen separoinnin jälkeen 80 % jäännöksen massasta oli nestejakeessa. Nestejakeen suuri määrä lisää varastointikapasiteetin tarvetta ja kuljetuksen päästöjä sekä kustannuksia. Nestejakeen jatkojalostustekniikoilla pyritään konsentroidaan nestejakeen ravinteita ja fraktioimaan niitä eri jakeisiin, mikä lisää tuotteiden kuljetettavuutta ja käytettävyyttä.

Ravinteiden suhteen konsentroiduimmat jakeet valmistettiin yhdistetyn strippauksen ja haihdutuksen (JJ2) sekä pelkän haihdutuksen (JJ3) avulla. Näissä ketjuissa jatkojalostukseen kuului myös kalvopuhdistus, jonka tuottama puhdistettu vesijae voitiin johtaa ympäristöön. Samalla kuljetettavan massan määrä väheni merkittävästi.

Jatkojalostustekniikoista strippaus ja haihdutus ovat lämpöenergiaa vaativia prosesseja, joissa käsiteltävän massan lämpötila nostetaan 80 asteeseen mahdollisimman tehokkaan ravinteiden erottamisen saavuttamiseksi. Prosessista vapautuva lämpö voidaan ottaa talteen lämmönvaihtimien avulla ja hyödyntää uudestaan biokaasuketjussa. Lämmönvaihtimien käyttö parantaa siten laitoksen energiatasetta ja pienentää ilmastovaikutuksia. Tätä mahdollisuutta ei ole huomioitu tässä työssä, jossa prosessia on yksinkertaistettu.

Tarkastellussa biokaasulaitoksessa biokaasu johdettiin CHP-yksikköön, joka tuotti sähkö- ja lämpöenergiaa biokaasuprosessin ja käsittelyjäännöksen jatkojalostuksen tarpeisiin sekä muualla hyödynnettäväksi. Biokaasuprosessin ja jatkojalostuksen oman kulutuksen jälkeen kaikissa ketjuissa ylijäämäenergiaa jäi vähintään 76 % tuotetusta sähköstä. Pelkän separoinnin sisältävässä JJ0 -ketjussa CHP:n tuottamaa lämpöenergiaa jäi yli oman tarpeen 62 %, ja ketjuissa JJ1–JJ4 tuotetusta lämpöenergiasta jäi jäännöksen jatkojalostuksen jälkeen käytettäväksi 43 %.

Kokonaisketjua tarkasteltaessa biokaasulaitoksen syötteiden energiasisällöstä noin 23 % kului varsinaisen biokaasuprosessin toimintaan, energiantuotantoon ja separointiin. Jatkojalostusprosessit kuluttivat energiaa 10–14 % ja tuotteiden kuljetukset ja peltolevitys 5–9 % syötteiden energiasisällöstä. Ylijäämäenergian osuus (69 %) oli suurin ketjussa JJ0, jossa varsinaista jatkojalostusta ei tehty, kun se muissa ketjuissa oli 58–62 %.

Ravinteiden konsentroiduista käsittelyjäännöksestä esim. strippaamalla ja haihduttamalla kuluttaa enemmän energiaa kuin kuljetuksissa säästetään. Jatkojalostusta ei siten voida helposti perustella

kuljetusten energiankulutuksella. Suurten massamäärien kuljetuskustannukset ovat kuitenkin niin korkeat, että jatkojalostuksen toteuttaminen voi olla kannattavaa. Erityisesti biokaasulaitoksilla, joilla ylijäämälämmölle ei ole ympärivuotista hyötykäyttöä, lämpöenergian hyödyntäminen käsittelyjäännöksen jatkojalostusprosessissa voi olla perusteltua. Ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta jatkojalostusprosessit mahdollistavat ravinteiden konsentroinnin ja jakamisen eri fraktioihin, mikä edistää niiden käytettävyyttä.

Käsittelyjäännöksen jatkojalostusketjujen ympäristövaikutuksista tarkasteltiin ilmastonmuutosta ja rehevöittävää vaikutusta. Merkittävin päästöjen aiheuttaja molemmissa vaikutustarkasteluissa on jakeiden peltokäyttö. Jalostettujen tuotteiden peltokäytölle ei tietyvästi ole olemassa omia päästökertoimia, joten arvioinnissa käytettiin ominaisuuksiltaan samankaltaisten lantajakeiden kertoimia, mikä heikentää tulosten tarkkuutta. Todellisten, mittauksiin perustuvien päästökerrointen määrittäminen huomioitiinkin tärkeänä tulevaisuuden tutkimuskohteena.

Myös kemikaalien osuus ketjujen ilmastovaikutuksesta oli suuri. Tässä työssä tarkastellut jatkojalostusprosessit olivat esimerkkiprosesseja, joissa pyrittiin tyyppillisiin toimintatapoihin. Siten esim. strippausprosessissa käytettiin typen erotuksen ja talteenoton tehostamiseksi kemikaaleja, mikä lisäsi jatkojalostusketjun ilmastovaikutuksia. Strippausprosessi voitaisiin kuitenkin toteuttaa toisella tekniikalla huomattavasti vähemmällä kemikaalimäärillä. Toisaalta strippauksessa ammoniakkin talteenottoliuoksena käytettävän rikkihapon rikki voidaan hyödyntää hivenravinteena kasveille käytämällä tuotetta pelloilla, joilla on tarvetta rikkilannoitukseen. Tätä ei huomioitu tarkastelussa päästöhyvityksenä. Jatkojalostusketjuista nestejakeen haihdutuksessa kemikaalien käyttö on vähäisempää kuin strippausprosessissa, mikä näkyi ilmastovaikutuksissa.

Rehevöittävä vaikutus lasketaan pelloille päätyvän ravinnemäärän perusteella. Siten rehevöittävä vaikutus oli alhaisin ketjussa, jossa käsittelyjäännöksen nestejake jalostetaan strippausprosessissa ja strippausjäännös viedään jätevedenpuhdistamolle, sillä tässä vaihtoehdossa viedään vähiten ravinteita pelloille. Toisaalta tässä ketjussa ravinteiden kierrätyksestä saatava korvaushyöty vähentyneinä mineraalilannoitteiden valmistuksen päästöinä on pieni.

Tarkastelluissa ketjuissa oli oletuksena, että jatkojalostukseen käytetään biokaasulaitoksen tuottamaa energiaa. Jalostuksen energiankulutuksella oli vähäinen merkitys ympäristövaikutuksiin, koska biokaasulla tuotetun energian ympäristövaikutukset ovat alhaiset. Vaikutus olisi luonnollisesti suurempi, jos käytettäisiin fossiilista energiaa. Biokaasulaitoksen tuottaman energian käyttö jatkojalostukseen on kuitenkin hyvin realistinen vaihtoehto erityisesti lämpöenergian osalta, jolle usein on vaikea löytää muuta hyötykäyttöä.

## 4. Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli tarkastella lantaa käsittelevän biokaasulaitoksen kokonaisketjua raaka-aineista lopputuotteiden käyttöön sekä tunnistaa ketjun energia- ja ravinnetaseiden sekä ympäristövaikutusten näkökulmasta parhaat toimintatavat. Tarkastelua varten valittiin erilaisia syöteseoksia, joille laadittiin prosessointiketju. Lähtökohtana oli, että laitosten toteuttaminen olisi taloudellisesti realistista nykytilanteessa. Tässä työssä tarkastellut laitokset ovat esimerkkilaitoksia, eivätkä suoraan vastaa mitään todellista laitosta. Biokaasulaitoksen taseet ja ympäristövaikutukset riippuvat käytetyistä syötteistä ja prosesseista, joten tämän työn tuloksia ei voi suoraan yleistää koskemaan yksittäisiä laitoksia. Tulokset osoittavat kuitenkin eri osaprosessien suhteellista merkitystä taseiden ja ympäristövaikutusten kannalta.

Pääasiassa lantaa käsittelevien, kapasiteetiltaan 19 500 t/a laitosten lisäsyötteillä oli vain pieni vaikutus käsittelyjäännöksen ominaisuuksiin, kun lisäsyötteen määrä oli alle 20 % kokonaismäärästä. Suuremmilla laitoksilla lannan osuus syötteiden kokonaismäärästä on yleensä taloudellisista syistä pienempi. Erityyppisistä lisämateriaaleista johtuen käsittelyjäännöksen ravinnepitoisuudet ja muut ominaisuudet voivat siten olla hyvinkin erilaisia. Käsittelyjäännöksessä ravinteiden kokonaispitoisuudet ovat samat kuin syötteissä, mutta ammoniumtyypen osuus kokonaistypestä kasvaa, mikä parantaa typen käytettävyyttä kasveille.

Syötteiden massasta noin 92 % muodostaa käsittelyjäännöstä ja noin 8 % biokaasua. Käsittelyjäännös voidaan käyttää sellaisenaan maanparannusaineena pelloilla, mutta usein se separoidaan neste- ja kuivajakeiksi tuotteen kuljetettavuuden ja käytettävyyden parantamiseksi. Käsittelyjäännöksen separoinnissa noin 80 % massasta päätyy nestejakeeseen ja 20 % kuivajakeeseen. Ravinteista noin 70 % kokonaistypestä päätyy nestejakeeseen ja 70 % fosforista kuivajakeeseen.

Biokaasulaitoksen energiantuottopotentiaali riippuu syötteiden ominaisuuksista. Lietelannan oma energiantuotto tuorepainoa kohti on melko pieni johtuen sen suuresta vesipitoisuudesta. Lisäsyötteinä käytetyt lietalannan kuivajae, HVP-nurmi, ja elintarviketeollisuuden sivutuotteet tuottivat 37–53 % biokaasulaitoksella muodostuvasta metaanin kokonaismäärästä, vaikka niiden osuus oli vain alle 20 % syötteiden kokonaismassasta. HVP-nurmen energiantuotto oli hieman suurempi kuin muiden lisäsyötteiden.

Suurin energiahyöty biokaasusta saadaan jalostamalla se liikennepolttoaineeksi, jossa energiaa voidaan tuottaa noin 95 %:n hyötysuhteella. CHP-laitoksessa sähköä voidaan tuottaa noin 35 %:n ja lämpöenergiaa noin 50 %:n hyötysuhteella, kokonaishyötysuhteen ollessa siten luokkaa 85 %. Liikennepolttoaineen tuotantoa rajoittaa tällä hetkellä kaasukäyttöisten ajoneuvojen määrän vähyys sekä energian tuotannon ja jakelun kustannukset. CHP-tuotannossa haasteena on sähköstä saatava alhainen hinta verkkoon myytäessä ja ympärivuotinen lämmön hyödyntäminen. Tarkastelluissa 19 500 t/a kokoluokan laitoksissa voitiin tuottaa sähköä noin 1 600–2 100 MWh/a ja lämpöä 2 300–3 000 MWh/a tai liikennepolttoainetta 4 300–5 800 MWh/a.

Ketjuissa, joissa lannan lisäsyötteenä oli HVP-nurmi tai elintarviketeollisuuden sivutuotteet, koko ketjun energiankulutus oli 23–30 % tuotetun biokaasun energiasisällöstä, jolloin ylijäämäenergiaa jäi 70–77 %. Suurimmat energiankuluttajat olivat itse biokaasuprosessi (mm. laitteiden sähkönkulutus ja syötteiden lämmitys) sekä käsittelyjäännöksen levitys peltoon. Syötteiden hankinnan sekä syötteiden ja tuotteiden kuljetusten osuus koko ketjun energiankulutuksesta oli melko pieni. Elintarviketeollisuuden sivutuotteiden hygienisointi lisäsi hieman prosessin energiankulutusta, mutta käytännössä hygienisoidusta materiaalista vapautuva lämpö voidaan hyödyntää tehokkaasti lämmönvaihtimien avulla. Lietelannan kuivajakeen ollessa lisäsyötteenä syötteiden hankinnan energiankulutusta lisäsi lannan separointi. Jos laitos tuotti liikennepolttoainetta, kului sen valmistukseen noin 5 % biokaasun energiasisällöstä. Tällöin laitoksen tarvitsema sähkö ja lämpö jouduttiin ostamaan ulkopuolelta.

Ympäristövaikutusten kannalta kaikki tarkastellut biokaasuketjut olivat parempia verrattuna referenssitilanteeseen. Biokaasuketjujen ilmastovaikutukset olivat negatiiviset, eli ketjussa syntyvät päästöt olivat pienemmät kuin korvattavien tuotteiden (mineraalilannoitteet ja fossiilinen energia)

päästöt. Suurin korvaushyöty saadaan kun biokaasusta tuotetulla energialla korvataan fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa. Sekä ilmastonmuutos- että rehevöitymistarkastelussa suurin ympäristövaikutusten aiheuttaja oli ravinteiden peltokäyttö. Peltokäytön päästöihin voidaan vaikuttaa käsittelyjäännöksen levitystavoilla. Ravinteiden peltokäytön päästöt lasketaan käytetyn ravinnemäärän perusteella, joten mineraalilannoitteiden käyttö aiheuttaa samansuuruiset päästöt kuin käsittelyjäännöksen käyttö. Kierrätysravinteiden käyttö vähentää kuitenkin mineraalilannoitteiden tarvetta, jolloin mineraalilannoitteiden valmistuksen päästö lasketaan hyvitykseksi biokaasuketjulle. Ilmasto-vaikutuksesta ravinteiden peltokäyttö aiheutti yli 60 % kokonaisvaikutuksesta, kun itse biokaasuprosessin ja kuljetusten osuudet olivat luokkaa 10 %.

Jos lantaa käsittelevä biokaasulaitos sijaitsee alueella, joilla peltojen fosforiluku on korkea, on fosforia tarpeen kuljettaa kauemmas fosforilannoitusta tarvitseville pelloille. Separoinnilla voidaan konsentroida fosfori kuivajakeeseen, minkä kuljetus kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa, kuin lietemäisen käsittelyjäännöksen kuljetus. Esimerkkiketjussa separointi oli energiataseen kannalta perusteltua, kun kuivajakeen kuljetusetäisyys oli vähintään 15 km.

Suurilla biokaasulaitoksilla voidaan separoituja jakeita edelleen jatkojalostaa. Työssä tarkastelluilla nestejakeen jatkojalostusmenetelmillä voitiin merkittävästi vähentää kuljetettavan massan määrää sekä konsentroida ravinteita ja erottaa tyypeä puhtaaksi ammoniumsulfaattijakeeksi.

Kokoluokaltaan 100 000 t/a laitoksen kokonaisketjussa tuotetun biokaasun energiasisällöstä noin 23 % kului varsinaisen biokaasuprosessin toimintaan ja käsittelyjäännöksen separointiin. Nestejakeen jatkojalostusprosessit kuluttivat energiaa 10–14 % ja tuotteiden kuljetukset ja peltolevitys 5–9 % syötteiden energiasisällöstä. Ylijäämäenergian osuus oli 58–62 %.

Ravinteiden konsentroida käsittelyjäännöksestä esim. strippaamalla ja haihduttamalla kuluttaa enemmän energiaa kuin konsentroitujen tuotteiden kuljetuksissa säästetään pitkähkölläkin kuljetusmatkalla. Jatkojalostusta ei siten voida helposti perustella kuljetusten energiankulutuksella. Suurten massamäärien kuljetuskustannukset ovat kuitenkin niin korkeat, että jatkojalostuksen toteuttaminen voi olla kannattavaa. Erityisesti biokaasulaitoksilla, joilla ylijäämälämmölle ei ole ympärivuotista hyötykäyttöä, lämpöenergian hyödyntäminen käsittelyjäännöksen jatkojalostusprosessissa voi olla perusteltua. Ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta jatkojalostusprosessit mahdollistavat ravinteiden konsentroidin ja jakamisen eri fraktioihin, mikä edistää niiden käytettävyyttä.

Jatkojalostuksen osalta merkittävin päästöjen aiheuttaja oli sekä ilmasto-vaikutuksen että rehevöittävän vaikutuksen osalta jakeiden peltokäyttö. Jalostettujen tuotteiden peltokäytölle ei tietävästi ole olemassa omia päästökertoimia, joten arvioinnissa käytettiin ominaisuuksiltaan samankaltaisten lantajakeiden kertoimia, mikä heikentää tulosten tarkkuutta. Todellisten, mittauksiin perustuvien päästökertoimien määrittäminen huomioitiinkin tärkeänä tulevaisuuden tutkimuskohteena. Ilmasto-vaikutusten osalta myös kemikaalien käytöllä on suuri merkitys. Kemikaalien määrään voidaan vaikuttaa merkittävästi prosessiteknisillä ratkaisuilla.

## Kirjallisuus

- Berglund, M. & Börjesson, P. 2006. Assessment of energy performance in the life cycle of biogas production. *Biomass & Bioenergy* 30, 254-266.
- Biokaasulaskuri 2014. [http://portal.mtt.fi/portal/pls/portal/gas\\_mtt.gas\\_mtt\\_laskuri](http://portal.mtt.fi/portal/pls/portal/gas_mtt.gas_mtt_laskuri)
- Biovakka Suomi Oy 2014. Henkilökohtainen tiedonanto.
- Bonmati, A., Flotats, X. 2003. Pig slurry concentration by vacuum evaporation: Influence of previous mesophilic anaerobic digestion process. *Journal of the Air & Waste Management Association* 53:1, 21-31.
- Börjesson, P. & Berglund, M. 2006. Environmental system analysis of biogas systems – Part I: Fuel-cycle emissions. *Biomass & Bioenergy* 30, 469-485.
- Chiumenti, A., da Borso, F., Chiumenti, R., Teri, F., Segantin, P. 2013. Treatment of digestate from a co-digestion biogas plant by means of vacuum evaporation: Tests for process optimization and environmental sustainability. *Waste Manage.* 33, 1339-1344.
- Ervasti, S., Paavola, T., Rintala, J. 2011. Recovery of nitrogen and phosphorus from biogas plant digestate with combined ammonia stripping and water evaporation. *International IWA-Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, August 28 – September 01, 2011, Vienna, Austria.*
- Grönroos, J., Mattila, P., Regina, K., Nousiainen, J., Perälä, P., Saarinen, K. & Mikkola-Pusa, J. 2009. Development of the ammonia emission inventory in Finland. Revised model for agriculture. *The Finnish Environment* 8/2009.
- Guštin, S., Marinšec-Logar, R. 2011. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent. *Process Safety and Environmental Protection* 89, 61-66.
- Hamelin, L., Baky, A., Cano-Bernal, Grönroos, J., Kuligowski, K., Pehme, S., Rankinen, K., Skura, D., Wenzel, H., Wesnæs, M., Ziolkowsky, M. 2013. Reference life cycle assessment scenarios for manure management in the Balti Sea regions. Knowledge report. Baltic Manure WP5 Assessing Sustainability of Manure Technology Chains. December 2013. [http://www.balticmanure.eu/download/Reports/lcareference\\_report\\_wp5\\_web.pdf](http://www.balticmanure.eu/download/Reports/lcareference_report_wp5_web.pdf)
- 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.
- Kahiluoto, H., Kuisma, M. 2010. Elintarvikeketjun jätteet ja sivuvirrat energiaksi ja lannoitteiksi. JaloJäte-tutkimushankkeen synteesiraportti. MTT Kasvu 12. <http://www.mtt.fi/mttkasvu/pdf/mttkasvu12b.pdf>
- ISO (International Organization for Standardization) 2006a. ISO 14040. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. International Organization for Standardization, Brussels.
- ISO (International Organization for Standardization) 2006b. ISO 14044. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Brussels.
- Kristensen, P.G., Jensen, J.K., Nielsen, M. & Illerup, J.B. Emission factors for gas fired CHP units < 25 MW. Saatavissa: [http://www.neri.dk/1\\_viden/2\\_Miljoe-tilstand/3\\_luft/4\\_adaei/doc/EmissionfactorsforgasfiredCHPunits.pdf](http://www.neri.dk/1_viden/2_Miljoe-tilstand/3_luft/4_adaei/doc/EmissionfactorsforgasfiredCHPunits.pdf)
- Luostarinen, S. 2013. Biokaasuteknologiaa maataloilla I. Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatalakohtaiselta laitokselta. MTT Raportti 113. <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti113.pdf>
- Luostarinen, S., Logrén J., Grönroos, J., Lehtonen, H., Paavola, T., Rankinen, K., Rintala, J., Salo, T., Ylivainio, K., Järvenpää, M. 2011. Lannan kestävä hyödyntäminen. HYÖTYLANTA-tutkimusohjelman loppuraportti. MTT Raportti 21. <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti21.pdf>
- Marttinen, S., Lehtonen, H., Luostarinen, S., Rasi, S.. 2013. Biokaasuyrittäjän toimintaympäristö Suomessa : Kokemuksia MMM:n investointiavustusjärjestelmästä 2008–2010. MTT Raportti 103: 44 p.
- Mikkola, H. & Ahokas, J. 2009. Energy ratios in Finnish agricultural production. *Agricultural and Food Science* 18, 332-346.
- Møller, H.B., Lund, I., Sommer, S.G. 2009. Solid-liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresour. Technol.* 74, 223-229.

- Niemeläinen, O., Hyvönen, T., Jauhiainen, L., Lötjönen, T., Virkkunen, E., Uusi-Kämpä, J. 2014. Hoidettu viljelemätön pelto biokaasuksi - biomassan sopivuus syötteenä ja korjuun vaikutukset tutkimusohjelmien muiden tavoitteiden saavuttamiseen. Loppuraportti.
- Nummela, P., Tuononen, M. 2009. Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2007-2013. Maaseutuviraston julkaisusarja; Hakuoppaita ja ohjeita. <http://www.mavi.fi/fi/oppaat-ja-lomakkeet/viljelijä/Documents/Opas%20ymp%C3%A4rist%C3%B6tuen%20ehtojen%20mukaiseen%20lannoitukseen%202007-2013.pdf>
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P. 2012a. Environmental impacts of biogas deployment – part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *Journal of Cleaner Production* 24, 168-183.
- Poeschl, M., Ward, S., Owende, P. 2012b. Environmental impacts of biogas deployment – part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *Journal of Cleaner Production* 24, 184-201.
- Posio, M. 2010. Kotieläintilojen energiankulutus. Pro gradu -tutkielma. Maataloustieteiden laitos. 12.5.2010.
- Pöschl, M., Ward, S., Owende, P. 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy* 87, 3305-3321.
- Rasi, S., Lehtonen, E., Aro-Heinilä, E., Höhn, J., Ojanen, H., Havukainen, J., Uusitalo, V., Manninen, K., Heino, E., Teerioja, N., Anderson, R., Pyykkönen, V., Ahonen, S., Marttinen, S., Pitkänen, S., Hellstedt, M., Rintala, J. 2012. From Waste to Traffic Fuel –projects. Final report. MTT Report 50. <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti50.pdf>
- Saarinen, M., Kurppa, S., Nissinen, A. & Mäkelä, J. (toim.). 2011. Aterioiden ja asumisen valinnat kulutuksen ympäristövaikutusten ytimessä. ConsEnv-hankkeen loppuraportti. Suomen Ympäristö 14/2011. Ympäristöministeriö.
- Seppälä, J., Knuuttila, S. & Silvo, K. 2004. Eutrophication of aquatic ecosystems. A new method for calculating the potential contributions of nitrogen and phosphorus. *International journal of life cycle assessment* 9(2): 90-100.
- Statistics Finland. 2013. Greenhouse gas emissions in Finland 1990-2011. Draft. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Submission to the European Union. 15 January 2013.
- Tampio, E., Ervasti, S., Paavola, T., Rintala, J. 2014. Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste. *Waste Management* 34, 370-377.
- Valorgas 2010. Compositional analysis of food waste from study sites in geographically distinct regions of Europe. Deliverable D2.1. Valorgas -project. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus MTT. [http://www.valorgas.soton.ac.uk/Deliverables/VALORGAS\\_241334\\_D2-1\\_rev\[1\]\\_130106.pdf](http://www.valorgas.soton.ac.uk/Deliverables/VALORGAS_241334_D2-1_rev[1]_130106.pdf)
- Valtioneuvoston selonteko 2008. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008.
- Valtioneuvoston selonteko 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle, 20.3.2013. VNS 2/2013 vp. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto. 8/2013.
- Viljavuuspalvelu. 2014. Viljavuuspalvelun tilastot. Saatavissa: <http://viljavuuspalvelu.fi/fi/tilastot>
- VTT LIPASTO 2012. Lipasto liikenteen päästöt. Liikennevälineiden yksikköpäästöt, tieliikenteen tavarankuljetukset, autokohtaiset kertoimet. [http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/tavara\\_tie.htm](http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/tavara_tie.htm)
- Yara. 2014. Hiilijalanjälkitakuu. Saatavissa: <http://www.yara.fi/tietoa-yarasta/kestava-kehitys/hiilijalanjalki/>

## Liitteet

### Liite 1. Massa- ja ravinnevirrat sekä ravinnepitoisuudet ketjuissa BK1, BK2 ja BK3.

	Massavirta	TS	VS	N <sub>kok</sub>	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>kok</sub>	K <sub>kok</sub>
<i>BK1, Sian lietalanta + kuivajae</i>							
Käsittelyjäännös (t/a)	<b>18436</b>	<b>1028</b>	<b>626</b>	<b>105</b>	<b>80</b>	<b>39</b>	<b>39</b>
(g/kg)		55,8	34,0	5,7	4,3	2,1	2,1
Nestejae (t/a)	<b>15333</b>	<b>335</b>	<b>204</b>	<b>74</b>	<b>64</b>	<b>10</b>	<b>34</b>
(g/kg)		21,8	13,3	4,8	4,2	0,7	2,2
Kuivajae (t/a)	<b>3103</b>	<b>693</b>	<b>422</b>	<b>31</b>	<b>15</b>	<b>29</b>	<b>5</b>
(g/kg)		223,4	136,0	10,0	5,0	9,3	1,5
<i>BK2, Sian lietalanta + HVP-nurmi</i>							
Käsittelyjäännös (t/a)	<b>18265</b>	<b>1175</b>	<b>855</b>	<b>117</b>	<b>69</b>	<b>23</b>	<b>55</b>
(g/kg)		64,3	46,8	6,4	3,8	1,3	3,0
Nestejae (t/a)	<b>15190</b>	<b>383</b>	<b>279</b>	<b>82</b>	<b>56</b>	<b>6</b>	<b>48</b>
(g/kg)		25,2	18,3	5,4	3,7	0,4	3,2
Kuivajae (t/a)	<b>3075</b>	<b>792</b>	<b>577</b>	<b>35</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>7</b>
(g/kg)		257,7	187,6	11,3	4,3	5,5	2,1
<i>BK3, Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet</i>							
Käsittelyjäännös (t/a)	<b>18575</b>	<b>891</b>	<b>536</b>	<b>104</b>	<b>85</b>	<b>23</b>	<b>37</b>
(g/kg)		47,9	28,9	5,6	4,6	1,3	2,0
Nestejae (t/a)	<b>15448</b>	<b>290</b>	<b>175</b>	<b>73</b>	<b>68</b>	<b>6</b>	<b>33</b>
(g/kg)		18,8	11,3	4,7	4,4	0,4	2,1
Kuivajae (t/a)	<b>3127</b>	<b>600</b>	<b>361</b>	<b>31</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>4</b>
(g/kg)		192,0	115,6	9,8	5,2	5,5	1,4



**Liite 2. Kokonaisketjujen energiatase ketjuissa BK1, BK2 ja BK3 (MWh/a).**

	BK1, Sian lietalanta + kuivajae				BK2, Sian lietalanta + HVP-nurmi				BK3, Sian lietalanta + elintarviketeollisuuden sivuvirta			
	Ei separointia, CHP	Ei separointia, liikenne-polttoaine	Separointi, CHP	Separointi, liikenne-polttoaine	Ei separointia, CHP	Ei separointia, liikenne-polttoaine	Separointi, CHP	Separointi, liikenne-polttoaine	Ei separointia, CHP	Ei separointia, liikenne-polttoaine	Separointi, CHP	Separointi, liikenne-polttoaine
<i>Energian tuotanto</i>												
Syötteiden energiasäilytys	5251	5251	5251	5251	6096	6096	6096	6096	4563	4563	4563	4563
<i>Energia CHP:lle</i>												
CHP:lla sähköä	1838		1838		2133		2133		1597		1597	
CHP:lla lämpöä	2625		2625		3048		3048		2281		2281	
<i>Energia liikennepolttoaineeksi</i>												
Biometaania		4988		4988		5791		5791		4334		4334
<i>Energiankulutus biokaasuprosessissa</i>												
Sähkö (biokaasuprosessi, hygienisointi, kaasun käsittely)	158	532	158	532	183	617	183	617	137	462	137	462
Lämpö (biokaasuprosessi, hygienisointi, kaasun käsittely)	678	678	678	678	678	678	678	678	708	708	708	708
Separointi			46	46			46	46			46	46
<i>Ylijäämäenergia oman kulutuksen jälkeen</i>												
Sähkö	1680		1634		1951		1905		1460		1414	
Lämpö	1947		1947		2370		2370		1573		1573	
Biometaani		4988		4988		5791		5791		4334		4334
<i>Ostoenergian tarve (jos jalostus liikennepolttoaineeksi)</i>												
Sähkö		532		578		617		663		462		508
Lämpö		678		678		678		678		708		708
<i>Kuljetuksen, lastauksen ja peltoleivityksen energiankulutus</i>												
Syötemateriaalien hankinta	481	481	481	481	121	121	121	121	132	132	132	132
Jäännöksen kuljetus ja levitys	541	541	540	540	417	417	418	418	424	424	424	424



**Liite 3.** Massa- ja ravinnevirrat sekä ravinnepitoisuudet ketjuissa JJ0, JJ1, JJ2, JJ3 ja JJ4. Kemikaalien lisäys huomioitu massavirrassa sekä ominaisuuksissa.

	Massavirta	TS	VS	N <sub>kok</sub>	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>kok</sub>	K <sub>kok</sub>
<i>Kaikissa skenaarioissa:</i>							
Kuivajae (t/a)	<b>18461</b>	<b>5174</b>	<b>2885</b>	<b>174</b>	<b>81</b>	<b>155</b>	<b>25</b>
(g/kg)		280,7	156,5	9,4	4,4	8,4	1,4
<i>Nestejakeen jatkojalostusvaihtoehdot:</i>							
<i>JJ0 Nestejae sellaisenaan</i>							
Nestejae (t/a)	<b>73734</b>	<b>575</b>	<b>321</b>	<b>406</b>	<b>345</b>	<b>17</b>	<b>185</b>
(g/kg)		7,8	4,3	5,5	4,7	0,2	2,5
<i>JJ1, JJ4 Strippaus</i>							
Ammoniumsulfaatti (t/a)	<b>13471</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>276</b>	<b>276</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
(g/kg)		0,0	0,0	40,0	40,0	0,0	0,0
Jäännös (t/a)	<b>66825</b>	<b>575</b>	<b>321</b>	<b>130</b>	<b>69</b>	<b>17</b>	<b>185</b>
(g/kg)		8,6	4,8	1,9	1,0	0,3	2,8
<i>JJ2 Strippaus + haihdutus + kalvopuhdistus</i>							
Ammoniumsulfaatti (t/a)	<b>13471</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>276</b>	<b>276</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
(g/kg)		0,0	0,0	40,0	40,0	0,0	0,0
Konsentraatti (t/a)	<b>14033</b>	<b>575</b>	<b>321</b>	<b>104</b>	<b>55</b>	<b>17</b>	<b>185</b>
(g/kg)		41,0	22,8	7,4	3,9	1,2	13,2
Puhdas vesi (t/a)	<b>45509</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
(g/kg)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Retentaatti (kiertoon) (t/a)	<b>8031</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
(g/kg)		0,0	0,0	3,1	1,5	0,0	0,0
<i>JJ3 Haihdutus + kalvopuhdistus</i>							
Konsentraatti (t/a)	<b>15484</b>	<b>575</b>	<b>321</b>	<b>325</b>	<b>276</b>	<b>17</b>	<b>185</b>
(g/kg)		37,1	20,7	21,0	17,8	1,1	12,0
Puhdas vesi (t/a)	<b>50214</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
(g/kg)		0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
Retentaatti (kiertoon) (t/a)	<b>8861</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>74</b>	<b>62</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
(g/kg)		0,0	0,0	8,4	7,0	0,0	0,0

**Liite 4. Kokonaisketjun energiatase ketjuissa JJ0, JJ1, JJ2, JJ3 ja JJ4 (MWh/a).**

MWh/a	JJ0 Jäännös sellaisenaan	JJ1, JJ4 Strip- paus	JJ2, Strippaus + haihdutus + kalvo	JJ3, Haihdutus + kalvo
<i>Energiantuotanto</i>				
Syötteiden energiasisältö	38 650	38 650	38 650	38 650
Energiantuotanto CHP:lla yhteensä	32 852	32 852	32 852	32 852
Sähkö CHP:lla	14 687	14 687	14 687	14 687
Lämpö CHP:lla	18 165	18 165	18 165	18 165
<i>Energiankulutus</i>				
<i>Biokaasuprosessin kulutus (sis. hygienisointi, biokaasuprosessi, kaasun käsittely)</i>				
Sähkö	1 539	1 539	1 539	1 539
Lämpö	6 967	6 967	6 967	6 967
<i>Jatkojalostuksen energiankulutus</i>				
Sähkö	230	592	2 034	1 821
Lämpö	0	3 425	3 425	3 459
<i>Kulutus yhteensä</i>				
Sähkö	1 769	2 131	3 573	3 360
Lämpö	6 967	10 391	10 391	10 425
<i>Energiaa myyntiin</i>				
Sähkö	12 917	12 556	11 114	11 326
Lämpö	11 199	7 774	7 774	7 740
<i>Jäännöksen ja jatkojalostettujen jakeiden kuljetuksen, lastauksen ja peltolevityksen energiankulutus</i>				
Polttoaineenkulutus	3 426	JJ1: 2 091 JJ4: 3 550	2 495	2 180



luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Viikinkaari 4  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000