

**This is an electronic reprint of the original article.**

**This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.**

**Author(s):** Sari Luostarinen, Elina Tampio, Suvi Lehtoranta, Helena Valve, Johanna Laakso, Saija Rasi, Ville Pyykkönen, Jukka Markkanen, Jaakko Heikkinen, Hannu Haapala, Erika Winqvist, Kristiina Lång, Karetta Timonen & Tarja Silfver

**Title:** Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa

**Year:** 2023

**Version:** Published version

**Copyright:** Valtioneuvoston Kanslia 2023

**Rights:** CC BY-ND 4.0

**Rights url:** <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

**Please cite the original version:**

Luostarinen, S.; Tampio, E.; Lehtoranta, S.; Valve, H.; Laakso, J.; Rasi, S.; Pyykkönen, V.; Markkanen, J.; Heikkinen, J.; Haapala, H.; Winqvist, E.; Lång, K.; Timonen, K.; Silfver, T. (2023). Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.

# Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa

Sari Luostarinen, Elina Tampio, Suvi Lehtoranta, Helena Valve, Johanna Laakso, Saija Rasi, Ville Pyykkönen, Jukka Markkanen, Jaakko Heikkinen, Hannu Haapala, Erika Winquist, Kristiina Lång, Karetta Timonen & Tarja Silfver

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA  
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2023:32

[tietokayttoon.fi](https://tietokayttoon.fi)

# Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa

Sari Luostarinen, Elina Tampio, Suvi Lehtoranta,  
Helena Valve, Johanna Laakso, Saija Rasi, Ville Pyykkönen,  
Jukka Markkanen, Jaakko Heikkinen, Hannu Haapala,  
Erika Winquist, Kristiina Lång, Karetta Timonen &  
Tarja Silfver

**Julkaisujen jakelu**

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston  
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-  
arkivet Valto

[julkaisut.valtioneuvosto.fi](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi)

**Julkaisumyynti**

Beställningar av publikationer

**Valtioneuvoston  
verkkokirjakauppa**

Statsrådets  
nätbokhandel

[vnjulkaisumyynti.fi](http://vnjulkaisumyynti.fi)

**Publication distribution****Institutional Repository  
for the Government  
of Finland Valto**

[julkaisut.valtioneuvosto.fi](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi)

**Publication sale****Online bookstore  
of the Finnish  
Government**

[vnjulkaisumyynti.fi](http://vnjulkaisumyynti.fi)

Valtioneuvoston Kanslia  
CC BY-ND 4.0

ISBN pdf: 978-952-383-479-8  
ISSN pdf: 2342-6799

Taitto: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2023

## Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa

### Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32

**Kustantaja** Valtioneuvoston kanslia

**Tekijä/t** Sari Luostarinen, Elina Tampio, Suvi Lehtoranta, Helena Valve, Johanna Laakso, Saija Rasi, Ville Pyykkönen, Jukka Markkanen, Jaakko Heikkinen, Hannu Haapala, Erika Winquist, Kristiina Lång, Karetta Timonen & Tarja Silfver

**Kieli** suomi

**Sivumäärä** 176

**Tiivistelmä** Parhaimmillaan biokaasutuotanto on kiertotaloutta, ilmastotavoitteita, vesien- ja merensuojelua, huoltovarmuutta, omavaraisuutta ja maaseudun elinvoimaisuutta tukeva ratkaisu. Tavoitteiden saavuttaminen edellyttää kuitenkin päästöjen minimointia koko tuotantoketjussa syötemateriaaleista lopputuotteiden käyttöön. Biokaasulaitosten toteutuksella sekä käytön ja ylläpidon käytännöillä on huomattava vaikutus tuotannosta aiheutuviin kaasumaisiin päästöihin. Puutteelliset käytännöt johtavat etenkin biokaasutuotannon ilmastokestävyyden heikkenemiseen. Myös typen päästöt voivat olla suuret. Tarve päästöjä vähentäville käytännöille on merkittävä riippumatta laitospuolesta ja syötemateriaaleista. Kaasumaisiin päästöihin vaikuttaa eniten syötemateriaalien viipymä biokaasureaktorissa ja mädätteen tai sitä jalostettujen jakeiden varastointi. Myös laitoksen asianmukainen huolto, ehjät ja kestävät rakenteet sekä biokaasun energiakäytön päästöriskien minimointi ovat tärkeitä. Nykyiset ohjaukeinit eivät takaa biokaasutuotannon kestävyttä. Viipymäaika tarvitsee sääntelyä ja sekä ympäristöluvitusta että uusiutuvan energian direktiivin päästölaskenta ohjeita. Kestävien käytäntöjen huomiointia tulee edellyttää myös osana erilaisia tukia. Osaamista biokaasutuotannon kokonaisuuden ymmärtämiseksi ja kestävyden lisäämiseksi on lisättävä.

**Klausuuli** Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

**Asiasanat** tutkimus, tutkimustoiminta, biokaasu, kestävä maatalous, päästöt

**ISBN PDF** 978-952-383-479-8

**ISSN PDF** 2342-6799

**Julkaisun osoite** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>

## Hållbara metoder inom biogasproduktion

---

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2023:32

**Utgivare** Statrådets kansli

---

**Författare** Sari Luostarinen, Elina Tampio, Suvi Lehtoranta, Helena Valve, Johanna Laakso, Saija Rasi, Ville Pyykkönen, Jukka Markkanen, Jaakko Heikkinen, Hannu Haapala, Erika Winqvist, Kristiina Lång, Karetta Timonen & Tarja Silfver

**Språk** finska **Sidantal** 176

---

**Referat** När den är som bäst är biogasproduktion en lösning som stödjer cirkulär ekonomi, klimatmål, vatten- och havsskydd, försörjningstrygghet, självförsörjning och landsbygdens vitalitet. För att nå målen krävs dock minimering av utsläpp i hela produktionskedjan, från insatsmaterialer till användning av slutprodukter. Införandet av biogasanläggningar och praxis för drift och underhåll har en betydande inverkan på de gasformiga utsläppen från produktionen. Otillräcklig praxis leder särskilt till en försämring av biogasproduktionens klimatomstånd. Kväveutsläppen kan också vara höga. Behovet av utsläppsminskande metoder är betydande oavsett anläggningsstorlek och insatsmaterial. Gasformiga utsläpp påverkas mest av kvarhållandet av insatsmaterial i biogasreaktor och lagring av röstrest eller dess bearbetade fraktioner. Rätt underhåll av anläggningen, intakta och hållbara strukturer samt minimering av utsläppsriskerna vid energianvändning av biogas är också viktigt. De nuvarande kontrollmetoderna garanterar inte hållbarheten i biogasproduktionen. Uppehållstiden behöver regleras och såväl miljötillståndet som hållbarhetslagens anvisningar för utsläppsberäkning. Hänsyn till hållbar praxis bör också krävas som en del av olika subventioner. Kunskapen om att förstå hela biogasproduktionen och att öka hållbarheten måste ökas.

**Klausul** Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokaytoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

**Nyckelord** forskning, forskningsverksamhet, biogas, hållbart jordbruk, utsläpp

---

**ISBN PDF** 978-952-383-479-8

**ISSN PDF** 2342-6799

---

**URN-adress** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>

---

## Sustainable practices in biogas production

---

### Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2023:32

**Publisher** Prime Minister's Office

---

**Author(s)** Sari Luostarinen, Elina Tampio, Suvi Lehtoranta, Helena Valve, Johanna Laakso, Saija Rasi, Ville Pyykkönen, Jukka Markkanen, Jaakko Heikkinen, Hannu Haapala, Erika Winqvist, Kristiina Lång, Kareta Timonen & Tarja Silfver

**Language** Finnish **Pages** 176

---

**Abstract** At its best, biogas production is a solution that supports circular economy, climate goals, water and sea protection, security of supply, self-sufficiency, and rural vitality. Achieving the goals, however, requires minimization of emissions in the entire production chain, from feed materials to the use of end products. The implementation of biogas plants and the practices of operation and maintenance have a significant impact on the gaseous emissions resulting from the production. Inadequate practices lead especially to the deterioration of the climate impact of biogas production. Nitrogen emissions can also be high. The need for emission-reducing practices is significant regardless of plant size and feed materials. Gaseous emissions are most affected by the retention time of feed materials in the biogas reactor and the storage of digestate or its processed fractions. Proper maintenance of the facility, intact and durable structures, and minimizing the emission risks of biogas energy use are also important. The current steering instruments do not guarantee the sustainability of biogas production. The retention time needs regulation and both the environmental permitting and the emission calculation of the Sustainability Act instructions. Consideration of sustainable practices should also be required as part of various subsidies. The know-how to understand the entire biogas production chain and to increase its sustainability must be increased.

**Provision** This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.

**Keywords** research, research activities, biogas,emissions, sustainable agriculture

---

**ISBN PDF** 978-952-383-479-8

**ISSN PDF** 2342-6799

---

**URN-address** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>

---

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Kirjallisuuskatsaus biokaasutuotannon päästöistä .....</b>	<b>13</b>
2.1	Biokaasuprosessi .....	16
2.1.1	Biokaasutuotannon metaanin kokonaispäästöt .....	17
2.1.2	Eri prosessivaiheiden päästöt .....	19
2.2	Biokaasun hyödyntäminen .....	22
2.3	Mädätteen prosessointi .....	24
2.4	Mädätteen varastointi .....	26
2.4.1	Varastoinnin tekniset ratkaisut .....	29
2.4.2	Separoitujen jakeiden päästö .....	31
2.4.3	Mädätteen varastoinnin kokonaispäästöt .....	33
2.5	Mädätteen lannoitekäyttö .....	34
2.5.1	Levitystekniikan merkitys .....	35
2.5.2	Päästöt maaperästä levityksen jälkeen .....	37
<b>3</b>	<b>Päästömittaukset.....</b>	<b>48</b>
3.1	Mittauskohteiden kuvaus .....	48
3.2	Märkämädätyslaitos .....	49
3.2.1	Mittausmenetelmät .....	49
3.2.2	Päästön laskenta .....	53
3.2.3	Märkämädätyslaitoksen tulokset .....	53
3.2.4	Märkämädätyslaitoksen tulosten tarkastelu.....	59
3.3	Kuivämädätyslaitos .....	60
3.3.1	Mittausmenetelmät .....	60
3.3.2	Kuivämädätyslaitoksen tulokset .....	63
3.3.3	Kuivämädätyslaitoksen tulosten tarkastelu.....	66
3.4	Johtopäätökset päästömittauksista .....	68
3.5	Lietelannan levityksen aiheuttamat dityppioksidipäästöt.....	69
<b>4</b>	<b>Biokaasutuotannon vaikutus mädätteen hiileen ja sen pysyvyyteen maaperässä .....</b>	<b>73</b>
4.1	Kirjallisuuskatsaus.....	73



4.2	Mallinnus .....	76
<b>5</b>	<b>Lantabiokaasun sisällyttäminen kasvihuonekaasuinventarioon .....</b>	<b>80</b>
<b>6</b>	<b>Ohjauskeinotarkastelu .....</b>	<b>82</b>
6.1	Taloudelliset ohjauskeinot .....	83
6.1.1	Tukimuodot .....	83
6.1.2	Tuettavan toiminnan kestävyydelle asetetut ehdot .....	84
6.2	Ympäristölupa ja ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA) .....	86
6.2.1	Säädösten soveltaminen ja huomioitavat vaikutukset .....	86
6.3	Nitraattiasetus ja lannoitelainsäädäntö .....	88
6.4	Vapaaehtoiset keinot ja laatu järjestelmät .....	89
6.5	Haastateltavien näkemykset kestävyys vaarantavista sääntelyaukoista .....	90
<b>7</b>	<b>Laitosesimerkit .....</b>	<b>93</b>
7.1	Laitosesimerkkien kuvaus .....	93
7.2	Menetelmät .....	96
7.2.1	Massa-, ravinne- ja energiataseet .....	96
7.2.2	Ympäristövaikutukset .....	96
7.2.3	Uusiutuvan energian direktiivin mukainen päästölaskenta .....	99
7.3	Tulokset .....	101
7.3.1	Esimerkkilaitosten taselaskenta .....	101
7.3.1.1	Energiataseet .....	101
7.3.1.2	Massa- ja ravinnetaseet .....	105
7.3.2	Elinkaariset ympäristövaikutukset .....	109
7.3.2.1	Tilakohtainen märkämädätyslaitos .....	109
7.3.2.2	Usean tilan yhteinen märkämädätyslaitos .....	111
7.3.2.3	Keskitetty märkämädätyslaitos .....	113
7.3.2.4	Kuivamädätyslaitos .....	116
7.3.2.5	Esimerkkijärjestelmien tarkastelu .....	118
7.3.2.6	Erilaisten käytäntöjen vaikutukset ammoniakkipäästöihin .....	119
7.3.2.7	Tulosten tarkastelu ja epävarmuudet .....	121
7.3.2.8	Johtopäätökset .....	124

7.3.3	Uusiutuvan energian direktiivin mukaiset päästöt ja päästövähennykset .....	125
7.3.4	Esimerkkilaitosten taloustarkastelu .....	128
7.3.4.1	Tilakohtainen laitos .....	131
7.3.4.2	Usean tilan yhteinen laitos .....	132
7.3.4.3	Keskitetty laitos .....	133
7.3.4.4	Kuivämädätyslaitos .....	135
7.3.4.5	Johtopäätökset taloustarkastelulle .....	137

## **8 Kestävät käytännöt ja päästöjen hallinta biokaasutuotannossa..... 138**

## **9 Johtopäätökset..... 141**

9.1	Biokaasutuotannon kestävyden avainkysymykset .....	141
9.2	Tarvittavat muutokset julkisessa ohjauksessa .....	142
9.3	Lisätutkimustarpeet .....	144

## **Liitteet..... 146**

## ESIPUHE

Biokaasun tuotanto ja käyttö nousevat osaltaan ratkaisuksi uusiutuvaan energiaan, ilmastonmuutoksen hillintään, ruokajärjestelmän kestävyteen, ravinteiden kierrätykseen sekä muihin ympäristönäkökohtiin liittyviin kysymyksiin. Biokaasu nähdäänkin ratkaisuna moninaiisiin haasteisiin ja siihen kohdistuu isoja odotuksia. Jotta näihin haasteisiin pystytään vastaamaan ja odotuksia lunastamaan, tarvitaan tutkittua tietoa biokaasutuotannon ekologisen ja taloudellisen kestävyuden varmistamiseksi.

Tammikuussa 2020 valmistuneessa hallitusohjelman mukaisessa kansallisessa biokaasuohjelmassa todetaan, että biokaasun tuotannon ja kulutuksen ympäristö- ja ilmastovaikutukset tulee kartoittaa ja toiminnan kustannustehokkuus erityisesti ilmastoimena tulee arvioida.

Mittaustietoa tarvitaan erityisesti erilaisista biokaasulaitoksista sekä biokaasulaitoksen syötteiden ja mädätysjäännöksen varastoinnin, käsittelyn ja käytön päästöistä. Varastoinnin ohella myös lannoitekäytön levityksen päästöt voivat olla merkittävä osa biokaasuprosessin kokonaiskestävyyttä. Erittäin tärkeää on, että tuettavien biokaasuinvestointien/laitosten ympäristö- ja ilmastokestävyys varmistetaan, jotta ei tueta kestäättömiä toimintatapoja.

Edellä mainittuihin kysymyksiin löytyy vastauksia tästä ”Kestävät käytännöt biokaasutuotannon prosessiketjuissa (KEBIO)” -hankkeen loppuraportista. Hanke edesauttaa myös biokaasuun ja mädätteen prosessointiin ja käyttöön liittyvien ilmastovaikutusten nykyistä parempaan huomioimiseen kansallisessa ilmastopolitiikan suunnittelussa ja toimeenpanossa, kasvihuonekaasuinventaariossa sekä EU:lle ja kansainväliselle ilmastopöimökselle tehtävissä raportoinneissa.

Hankkeesta on jo julkaistu Policy Brief, jossa on yhteenveto toimenpide-ehdotuksista kestävämmän biokaasuketjun toteuttamiseksi. Lisäksi biokaasulaitustoimijoille on laadittu hyvien käytäntöjen ohjeet siitä, mitkä ovat kestävyuden kannalta parhaat toimitatavat koko prosessissa. Loppuraportti tullaan kääntämään myös soveltuvin osin englanniksi.

KEBIO- hankkeen ohjausryhmään kuuluivat Riikka Malila, Ville Laasonen ja Hanne Siikavirta ympäristöministeriöstä, Harri Haavisto työ- ja elinkeinoministeriöstä sekä Veli-Pekka Reskola, Marja-Liisa Tapio-Biström ja Sanna Tikander maa- ja metsätalousministeriöstä. Lisäksi ohjausryhmän asiantuntijajäseninä olivat Olli Mäki ja Mari Tenhovirta energiavirastosta ja Karoliina Pietiläinen maa- ja metsätalousministeriöstä. Lämpimät kiitokset ohjausryhmälle hyvästä ja rakentavasta yhteistyöstä hankkeen aikana.

Suuret kiitokset koko KEBIO-hankkeen tutkimusryhmälle tämän laajan ja haastavan hankkeen asiantuntevasta valmistelusta. Kävimme työn aikana useita mielenkiintoisia ja tietämystämme lisääviä keskusteluja kanssanne. Työnne on erittäin arvokas bio-kaasutoimialan eteenpäin viemiseksi ja kehittämiseksi niin Suomessa kuin myös muualla.

Birgitta Vainio-Mattila (maa- ja metsätalousministeriö), ohjausryhmän puheenjohtaja

# 1 Johdanto

Parhaimmillaan biokaasutuotanto tukee yhtäaikaisesti kiertotaloutta, ilmastotavoitteita, vesien- ja merensuojelua, huoltovarmuutta, omavaraisuutta ja maaseudun elinvoimaisuutta. Tavoitteiden saavuttaminen edellyttää kuitenkin päästöjen minimointia koko tuotantoketjussa.

Biokaasutuotantoa pyritään Suomessa lisäämään sen tarjoamien lukuisten etujen vuoksi. Biokaasu itsessään on monipuolinen uusiutuva energianlähde, jota voidaan hyödyntää tapauskohtaisesti lämmön, yhdistetyn sähkön ja lämmön tai teollisuuteen ja liikenteeseen soveltuvan biometaanin tuotannossa. Tuotannon toinen lopputuote, mädäte, puolestaan sisältää syötemateriaalien kaikki ravinteet ja loput orgaanisesta aineksesta. Niiden kierrätyksen tehostamista erityisesti ruuantuotannon käyttöön lannoitevalmisteina on tavoiteltu erilaisin keinoin jo vuosia.

Biokaasutuotannon lisääntyminen voikin edistää siirtymää, jossa erilaisten orgaanisten jätteiden ja sivuvirtojen hyödyntäminen vähentää sekä haitallisia ympäristövaikutuksia että riippuvuutta fossiilienergiasta ja mineraalisista lannoitevalmisteista. Samalla osallistutaan peltomaan sisältämän orgaanisen aineksen ylläpitoon ja vähennetään ravinteiden käyttöä kokonaisuudessaan.

Arvioiden mukaan biokaasutuotanto vähintään kaksinkertaistuu Suomessa lähivuosina. Tämä on osaltaan seurausta niistä huomattavista julkisista panoksista, joita osoitetaan niin tuotantoon investoimiseen kuin lopputuotteiden käytön ja siten markkinoiden rakentumisen tukemiseen.

Jotta yhteiskunnan panokset kohdentuisivat toivotusti ja kaikki tavoitellut edut toteutuisivat, tulisi koko biokaasun tuotantoketjun, raaka-aineista lopputuotteiden käyttöön, huomioida jokaisella askeleella päästöjen minimointi ilmaan ja vesiin. Toistaiseksi näin ei välttämättä ole. Esimerkiksi kustannustehokkuutta liiallisesti tavoiteltaessa voidaan päätyä investointeihin ja/tai toimintatapoihin, jotka eivät kiinnitä päästövähennyksiin huomiota, alentavat biokaasun tuotantomäärää ja tuottavat laadultaan ja/tai määrältään vaikeasti hyödynnettäviä ravinnevalmisteita. Päästöriski on erityisesti ilmastomuutosta kiihdyttävillä kasvihuonekaasupäästöille ja ilman laatua heikentäville ammoniakkipäästöille sekä mädätteen tai siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden käytön yhteydessä ravinnepäästöille vesistöihin. Päästöjen muodostumista myös seurataan, ja niille on asetettu päästövähennystavoitteita ja -velvoitteita.

Kestävien käytäntöjen varmistamisen tulisikin olla keskiössä jo biokaasulaitoksia suunniteltaessa. Sekä toiminnanharjoittajat, luvittavat ja valvovat viranomaiset että tukipäästösten tekijät tarvitsevat yhteiset ohjeet siihen, mihin asioihin tulee kiinnittää huomiota kestävimpien käytäntöjen käyttöönottamiseksi ja päästöjen minimoimiseksi.

Tämä raportti vastaa kansallisessa biokaasuohjelmassa<sup>1</sup> todettuihin biokaasutuotannon kestävyden varmistamisen tietotarpeisiin. Raportissa tarkastellaan biokaasun eri tuotantovaiheiden päästöriskejä ja päästöjen vähentämisessä tarpeellisia toimintatapoja keskittyen erityisesti kaasumaisiin päästöihin ilmakehään. Mädätteen ja siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden käytön ravinnepäästöriskiä vesistöihin sivutaan raportissa yleisluontoisemmin. Raportin toteuttivat yhteistyössä Luonnonvarakeskus, Suomen ympäristökeskus ja Agrinnotech.

---

<sup>1</sup> TEM 2020. Biokaasuohjelmaa valmistelevan työryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-482-2>

## 2 Kirjallisuuskatsaus biokaasutuotannon päästöistä

**Elina Tampio (Luke), Suvi Lehtoranta (Syke), Karetta Timonen (Luke), Johanna Laakso (Luke), Sari Luostarinen (Luke)**

Tässä luvussa esitetään tieteellisestä kirjallisuudesta kerätty tieto biokaasutuotannon yhteydessä sekä sen lopputuotteiden käsittelyn ja käytön aikana muodostuvista kaasumaisista päästöistä. Biokaasun tuotantoketjussa muodostuvia kasvihuonekaasujen (KHK) päästöjä ovat hiilidioksidi- ( $\text{CO}_2$ ), metaani- ( $\text{CH}_4$ ) ja dityppioksidipäästöt ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Lisäksi biokaasuprosessi vaikuttaa typen olomuotoon ja siten typen hävikkiin muun muassa ammoniakkinä ( $\text{NH}_3$ ). Tässä raportissa keskiössä ovat voimakkaat kasvihuonekaasut metaani ja dityppioksidi sekä ilman laatua heikentävä ammoniakki.

Biokaasuprosessissa osa mädätettävän biomassan sisältämästä orgaanisesta aineksesta hajoaa mikrobitoiminnan tuloksena reaktorissa muodostaen biokaasua, joka on pääasiassa metaanin ja hiilidioksidin seos. Reaktorin olosuhteet pyritään luomaan metaanintuotolle optimaaliseksi, jotta energia-arvoltaan korkea metaania muodostuisi mahdollisimman paljon. Samalla edesautetaan orgaanisten tyyppiyhdisteiden hajoamista ja siten kasveille välittömästi käyttökelpoisen ammoniumtypen osuutta lannoitteena ja maanparannusaineen peltoviljelyssä käytettävässä mädätteessä.

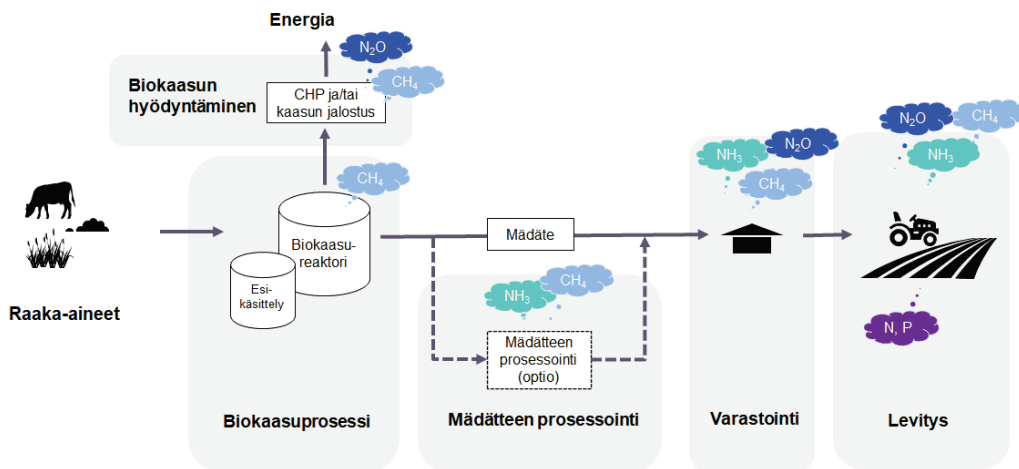
Kaasumaisia päästöjä voi muodostua biokaasun tuotantoketjun eri vaiheissa (Kuvio 1). Metaanipäästöt painottuvat varsinaisen biokaasuprosessin aikaisiin vuotoihin, biokaasun hyödyntämiseen ja mädätteen varastointiin. Ammoniakkipäästöt puolestaan painottuvat mädätteen varastointiin sekä levitykseen pelloille ja dityppioksidipäästöt mädätteen levityksen jälkeiseen maaperän toiminnan päästöihin. Lisäksi kaikissa biokaasun tuotantoketjun vaiheissa muodostuu hiilidioksidipäästöjä, jotka kuitenkin rajattiin tämän kirjallisuuskatsauksen ulkopuolelle.

Päästöjä ei voida biokaasutuotantoketjussa kokonaan estää, mutta niitä voidaan merkittävästi vähentää asiantuntevalla laitossuunnittelulla, toimivalla prosessitekniikalla ja sen osaavalla hallinnalla, laitoksen oikea-aikaisilla huoltotoimenpiteillä sekä lopputuotteiden käsittelyn ja hyödyntämisen hyvillä käytännöillä. Samalla, kun vähennetään tuotantoketjusta aiheutuvia päästöjä, voidaan saada enemmän korvaushyötyä muodostuvista tuotteista, kun biokaasua saadaan talteen enemmän ja ravinteet kiertoön tehokkaammin.

Biokaasuprosessien toteutuksen ratkaisut ovat laitoskohtaisia, minkä vuoksi yleispäteviä päästötietoja on vaikeaa sekä mitata että mallintaa. Näin ollen tutkimustieto biokaasun tuotantoketjussa aiheutuvista päästöistä on hajanaista ja vaikeasti tulkittavaa, eikä päästöjen muodostumisesta ja niihin vaikuttavista tekijöistä ole annettu kattavia kansainvälisiä laskentaohjeistuksia.

Tässä luvussa esitetään tiivistetty kirjallisuuskatsaus biokaasun tuotantoketjussa aiheutuvista päästöistä. Kirjallisuuskatsaus toteutettiin hakemalla pääasiassa 2000-luvulla julkaistuja tieteellisiä artikkeleita biokaasulaitosten ja sen eri osien mitatuista päästötiedoista. Biokaasun tuotantoketju jaettiin neljään osaan, jotka ovat biokaasuprosessi ja biokaasun hyödyntäminen sekä mädätteen (mahdollinen) prosessointi, varastointi ja levitys (Kuvio 1). Biokaasuprosessilla käsitellään tässä tarkastelussa biokaasulaitosta syötteiden vastaanotosta biokaasureaktoriin saakka.

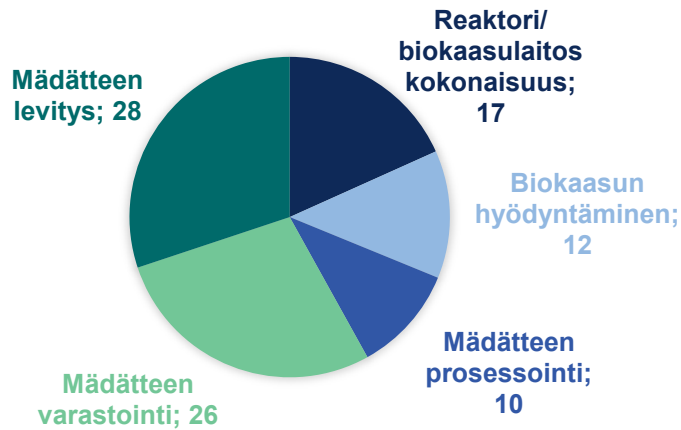
**Kuvio 1.** Biokaasun tuotantoketjun yksinkertaistettu prosessikaavio, johon on merkitty potentiaaliset päästöjen lähteet. Biokaasulaitoksen raaka-aineista aiheutuvia päästöjä syntypaikallaan ei kirjallisuudessa tarkasteltu.



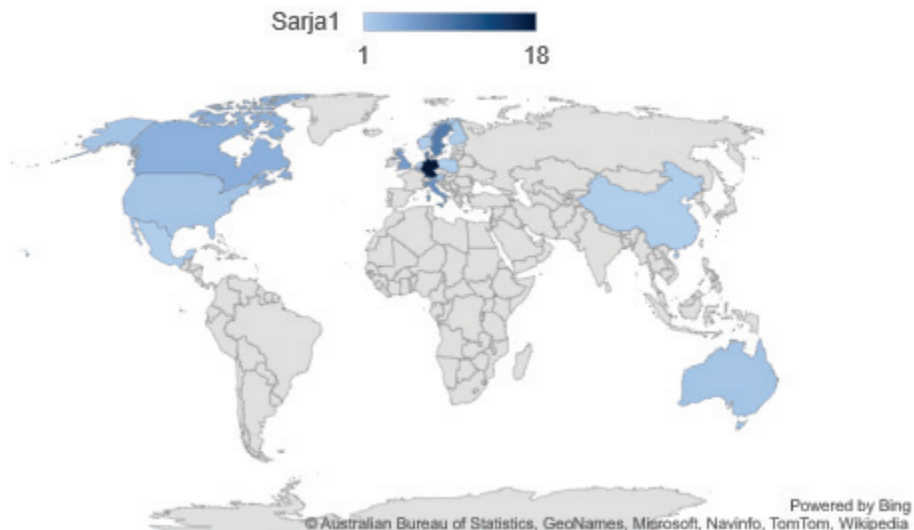
Kirjallisuuskatsauksen yhteydessä käytiin täsmällisesti läpi yhteensä 70 biokaasun tuotantoketjun päästöjen mittaukseen keskittyvää julkaisua. Julkaisuista noin neljäsosassa käsiteltiin biokaasuprosessin yhteydessä tapahtuvia päästöjä ja vuotoja. Määdätteen varastoinnin (26 kpl) ja levityksen (28 kpl) päästömittauksia käsitteleviä tutkimuksia aineistoissa oli eniten. Biokaasun energiasisällön hyödyntämisvaiheesta tai määdätteen (jatko)prosessoinnista eri tekniikoilla kirjallisuushaulla löytyi vähiten aineistoja, 10 julkaisua (Kuvio 2). Valtaosa kaikista tarkastelluista tutkimuksista oli eurooppalaisia, painottuen Saksaan, Ruotsiin ja Italiaan (Kuvio 3).



**Kuvio 2.** Kirjallisuuskatsaukseen kootun kaasumaisten päästöjen aineiston (yhteensä 70 artikkelia) jakautuminen biokaasun tuotantoketjun eri vaiheisiin.



**Kuvio 3.** Kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltujen päästömittaustutkimusten maantieteellinen toteutuspaikka valtioittain. Sinisen eri sävyt viittaavat tutkimuksiin eri maissa (vaalea: vähän mainintoja, tumma; useita mainintoja), harmaa väri: ei dataa.



Katsauksessa keskityttiin biokaasulaitoksilla tehtyihin päästömittauksiin, mutta määtteen prosessoinnin, varastoinnin ja levityksen osalta tarkasteltiin myös laboratoriokokeiden tuloksia, vaikka pääpaino olikin laitospäästöjen tutkimustuloksissa. Kirjallisuuskatsaus rajattiin maatalouden biomassoja hyödyntävien laitosten päästöihin, mutta myös muita biomassoja hyödyntäviä laitoksia tarkasteltiin, jos maatalousperäisiä biomassoja käsittelevien laitosten päästöistä ei ollut tietoja saatavilla.

## 2.1 Biokaasuprosessi

Biokaasuprosessit voidaan jakaa reaktorin sisällön kuiva-ainepitoisuuden perusteella kuiva- ja märkäprosesseihin ja/tai prosessilämpötilan perusteella meso- (37 °C) tai termofiilisiin (55 °C) prosesseihin. Märkämädätykseen soveltuvat lietemäiset, pumpattavissa olevat syötteen, kuten lietelanta ja puhdistamoliete, ja märkiin massoihin sekoitettuna tai erikseen laimennettuna myös kuivemmat biomassat. Yleensä reaktorisäilön kuiva-ainepitoisuus on korkeimmillaan luokkaa 12 %. Kuivaprosesseissa voidaan käsitellä korkeamman kuiva-ainepitoisuuden biomassoja, kuten kuivia lantoja tai erilliskerättyä biojätettä. Reaktoritekniikasta riippuen niiden kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 20–60 %.

Olenainen tekijä biokaasuprosessille on mädätettävän biomassan viipymä biokaasu-reaktorissa. Riittävä viipymä varmistaa biomassan optimaalisen hajoamisen, jolloin lopputuloksena muodostuu maksimaalinen määrä biokaasua ja mahdollisimman stabiili mädäte. Viipymä ei varsinaisesti kuitenkaan vaikuta kaasumaisiin päästöihin itse prosessin aikana, vaan mädätteen jatkokäsittelyssä, erityisesti sen päästöpotentiaaliin varastoinnissa. Viipymän merkitystä kestäväälle biokaasutuotannolle käsitellään täsmällisemmin luvussa 2.4.

Märkäprosessin lietemäinen mädäte voidaan ohjata varsinaisen biokaasureaktorin jälkeen joko varastoitavaksi sellaisenaan tai separoitavaksi kuiva- ja nestejakeeseen, jotka edelleen varastoidaan. Mädäte on myös mahdollista ohjata jälkikaasualtaaseen, jossa siitä vielä vapautuvaa jälkikaasua kerätään talteen hyödynnettäväksi reaktorissa muodostuneen biokaasun kanssa. Jälkikaasuallas voi toimia mädätteen varastona tai se ohjataan edelleen erilliseen varastointiin tai separoinnin kautta jakeiden varastointiin. Kuivaprosessissa jälkikaasutusta ei reaktoritekniikasta riippumatta käytetä, vaan mädäte päättyy reaktorin jälkeen sellaisenaan varastointiin ja joskus myös suoraan peltolevitykseen. Mikäli mädätteen kuiva-ainepitoisuus on riittävän alhainen, se saateetaan myös separoida.

Tarkastellun kirjallisuuden perusteella biokaasuprosessista on lähinnä mitattu metaanipäästöjä, ei muita mahdollisia kaasumaisia päästöjä. Päästöjä on mitattu pääsääntöisesti märkämädättämöistä ja vain yksittäisiä mittaustuloksia erilaisista kuivamädätyslaitoksista on raportoitu (Liebetrau ym. 2013). Biokaasuprosessin aikana biokaasua, mukaan lukien sen sisältämää metaania, voi karata ilmakehään laitoksen rakenteista sekä hallitusti että vuotoina. Hallittuja päästöjä ovat esimerkiksi biokaasu, joka vapautuu reaktorin (tai jälkikaasualtaan) kaasutilasta varoventtiilien kautta, sekä biokaasu, joka vapautuu huoltojen yhteydessä tarvittujen kaasutilan avaamisten yhteydessä. Myös vuodot laitosrakenteista ovat mahdollisia.

Metaanipäästöt raportoidaan yleensä yksikössä 'prosenttia tuotetusta metaanista' tarkoittaen mitatun päästön osuutta hallitusti kerätystä biokaasun metaanin määrästä. Eri tutkimusten tuloksia on silti vaikeaa vertailla tai yhtenäistää laitosten ja tutkimusmenetelmien tapauskohtaisuuden vuoksi. Mittausten raportointi on paikoin puutteellista, eikä laitoksia ja niiden operointitapoja, mitattuja prosessivaiheita tai mittausjaksoja kuvata riittävällä tarkkuudella. Käytetyt mittausmenetelmät, mittausjaksojen kesto ja toistot, mittausajan sääolosuhteet (Hrad ym. 2015) sekä laitoksen operointitavat (Reinelt ym. 2017) ja laitostekniikat vaihtelevat. Lisäksi mittausjakson päästöt voidaan raportoida suhteutettuna koko vuoden metaanintuottoon laskennallisin menetelmin tai ilmaista päästöjen osuutena tietyn mittausjakson metaanintuotannosta. Pistemäisiä päästölähteitä eli laitoksella esiintyviä yksittäisiä päästöpiikkejä ovat esimerkiksi laitoksen väliaikaisesta toimintahäiriöstä tai huollon aikaisista toimenpiteistä aiheutuvat päästöt. Kirjallisuudessa näiden pistemäisten päästöjen osuus raportoidaan suhteessa sen hetkiseen kaasun tuottoon. Näin ollen pistemäisten päästöjen vaikutukset laitoksen vuotuisiin päästöihin ovat riippuvaisia niiden toistuvuudesta, mitä harvoin on tutkimuksissa huomioitu.

## 2.1.1 Biokaasutuotannon metaanin kokonaispäästöt

Arviot koko laitosalueen metaanipäästöistä esitetään pääasiassa sisältäen biokaasuprosessin, biokaasun hyödyntämisen energiaksi ja mädätteen varastoinnin. Eri prosessivaiheiden päästöt on koko laitosalueen yhteenlasketusta tuloksesta usein lähes mahdotonta erotella ja täten arvioida niiden osuuksia laitoksen kokonaispäästöissä. Julkaisuissa on myös vaihtelevia käytäntöjä siitä, luetaanko mahdolliset jälkikaasutuksen aikana muodostuvat päästöt prosessin päästöihin vai mädätteen varastoinnin päästöihin. Tulosten käytössä esimerkiksi päästöarvioiden pohjana onkin syytä huomioida, mitä vaiheita tulos tosiasiallisesti sisältää, jottei päästölaskennassa epähuomiossa lasketa jotain vaiheita kahdesti tai jokin vaihe jäisi huomioitaksi. Tulosten suureen vaihteluun vaikuttavat myös mm. käytetyt mittausmenetelmät sekä mittaukseen sisällytetyt biokaasun tuotantoketjun toiminnot käytössä olevine rakenteineen ja toimintatapoineen.

Tämä huomioiden mitatut metaanin kokonaispäästöt laitosalueella vaihtelevat kirjallisuudessa välillä 0,02–23,8 % tuotetusta metaanista (Taulukko 1). Suurimmat metaanin päästölähteet ovat useiden tutkimusten mukaan mädätteen kattamaton varastointi ja yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon CHP-yksikössä tapahtuvat kaasuhiilikin (Reinelt ym. 2022; Vergote ym. 2020; Fredenslund ym. 2018; Reinelt ym. 2017; Liebetrau ym. 2013).

Suurin metaanipäästö, peräti 23,8 % tuotetusta metaanista raportoitiin biojätteen kuivamädätykselle panosreaktorissa 4–6 viikon viipymäajalla ja mädätteen 6–7 vrk laitostekompostoinnilla ja kahdeksan viikon jälkikypsytyksellä aumassa (Jensen ym. 2017). Tutkimuksen mukaan merkittävä osa laitosalueen metaanipäästöistä aiheutui mädätteen kompostoinnista. Jensenin ym. (2017) tulos on selvästi korkeampi kuin esimerkiksi kymmeneltä erilaiselta biokaasulaitokselta (sekä märkä- että kuivaprosesseja) mitattu päästö (4–18 % tuotetusta metaanista (Liebetrau ym. 2013)). Suurimmat päästöt aiheutuivat mädätteen varastoinnista laitoksilla (Liebetrau ym. 2013). Mitatuilla laitoksilla mädätettävän biomassan viipymäaika reaktorissa oli noin 23–41 vuorokautta. Reinelt ym. (2022) tutkimuksessa maatalousjätteitä (sian lietelanta, jäterehu) hyödyntävä mesofiilinen märkäprosessi aiheutti 10,5 % päästön tuotetusta metaanista 39 päivän viipymäajalla. Prosessin jälkeen mädäte separoitiin ja kuivajae kompostoitiin.

Biokaasulaitoksen eri vaiheiden yksittäisten metaanin päästölähteiden summan ja koko laitosalueen päästöjen mittaustuloksissa on todettu huomattavia eroja (Jensen ym. 2017; Fredenslund ym. 2018). Tutkimuksissa on havaittu, että koko laitosalueelta mitatut päästöt ovat huomattavasti yksittäisten päästölähteiden mittausten summaa suurempia. Tämän on arveltu johtuvan määrittämättömistä vuodoista ja tunnistamattomista päästölähteistä.

Kaiken kaikkiaan kirjallisuuskatsaus osoittaa, että tuoreemmissa tutkimuksissa biokaasulaitosten mitatut metaanipäästöt ovat huomattavasti suurempia kuin aiemmin on arvioitu (Scheutz & Fredenslund 2019; Bakkaloglu ym. 2021; Reinelt ym. 2022). Tutkimukset viittaavat myös siihen, että jätevesilietteen mädätyksen metaanipäästöt ovat keskimäärin suurempia (noin 7,5 % tuotetusta metaanista) verrattuna maatalouden sivuvirtoja hyödyntäviin laitoksiin (keskimäärin 2,4 % tuotetusta metaanista) (Scheutz & Fredenslund 2019). Syytä ei osata yksilöidä, mutta jätevesilietettä mädättävät laitokset ovat olleet maatalouden laitoksia vanhempia. Myös pienen ja suuren mittakaavan laitosten välillä on havaittu ero suurten laitosten hyväksi (Scheutz & Fredenslund 2019; Bakkaloglu ym. 2021). Suuremman laitoksen vähäisempien metaanipäästöjen on arvioitu johtuvan täsmällisemmistä operointitavoista, kuten paremmista resursseista huoltoon (Scheutz & Fredenslund 2019). Toisaalta aiheutuvat metaanipäästöt ja niiden suuruus eivät ole välttämättä verrannollisia tuotetun biokaasun määrään tai laitoksen kokoon, erityisesti jos päästöt aiheutuvat laitoksen rakenteista, kuten kaasukuvun repeämistä tai reaktorissa olevista halkeamista (Flesch ym. 2011).

## 2.1.2 Eri prosessivaiheiden päästöjä

Varsinaisen biokaasuprosessin metaanipäästöt voidaan jakaa syötemateriaalien esisekoituksesta ja syötöstä aiheutuviin päästöihin, rakenteista ja varoventtiileistä (paineensäätöventtiilit) aiheutuviin vuotoihin sekä huollon aikaisiin päästöihin. Mitattua tutkimustietoa näistä prosessivaiheista on kuitenkin rajallisesti saatavilla ja esitetyt tulokset ovat osin ristiriitaisia johtuen eroista laitostekniikoissa sekä mittausajankohdissa, -menetelmissä ja -jakoissa.

Biokaasuprosessin merkittävimmiksi metaanin päästölähteiksi on määritetty reaktorien katteina käytettyjen kalvokupujen kiinnitys, reiät betoniseinissä/rakenteissa, paineensäätöventtiilit, kaasuputket ja -kompressorit sekä sekoittajat (Fredenslund ym. 2018; Reinelt ym. 2017; Tauber ym. 2019; Reinelt ym. 2022).

Märkäprosessien yhteydessä mädätettävää biomassaa sekoitetaan ennen syöttöä reaktoriin tasalaatuisen syötemassan aikaansaamiseksi. Aiheutuvat metaanipäästöt riippuvat sekä syötteestä että sen sekoittamiseen käytettävästä tekniikasta ja sekoitussäiliön rakenteesta. Avoimissa sekoitussäiliöissä päästöjä aiheutuu suljettuja säiliöitä enemmän (Liebetau ym. 2010). Suljetusta sekoitussäiliöstä mitatut metaanipäästöt olivat kolmella laitoksella mitattuna keskimäärin noin 0,1 % tuotetusta metaanista, kun taas avoimissa säiliöissä päästöt vaihtelivat välillä 0,005–0,311 % tuotetusta metaanista (Liebetau ym. 2013). Samassa tutkimuksessa mädätettävän biomassan syöttöprosessiin aiheutti metaanipäästöjä 0,0005–0,16 % tuotetusta metaanista. Kaiken kaikkiaan päästöt biomassan sekoittamisesta ja syöttämisestä prosessiin vaihtelivat välillä 0,006–0,471 % tuotetusta metaanista aiheutuen pääasiassa massan sekoituksesta avoimissa järjestelmissä (Liebetau ym. 2013). Kahden muun tutkimuksen mukaan syötemassan esisekoitus ja syöttövaiheesta aiheutuvat metaanipäästöt olivat laitoksen operointipäästöinä merkittäviä (Flesch ym. 2011; Groth ym. 2015). Eryityisesti syöttösuppilosta aiheutuvat päästöt todettiin olennaisiksi. Tutkimuksessa kuitenkin todettiin, että syöttösuppilon säädöillä ja operointitavoilla voidaan huomattavasti vaikuttaa kaasujen karkaamiseen (Flesch ym. 2011). Tutkimuksista ei kuitenkaan selvinnyt, kuinka kauan ja missä olosuhteissa syöte viipyy syöttösäiliössä, joka on olennainen tieto päästöjen muodostumisen kannalta. Mikäli syötettä säilytetään pitkään ja lämpimissä olosuhteissa, biomassaa alkaa hajota ja tuottaa metaania enemmän kuin lyhyen aikaa viileässä säilyttäessä. Syöttösäiliön suljettu rakenne vähentää päästöjen karkaamista.

Myös biokaasulaitoksella tapahtuva syötteiden varastointi voi aiheuttaa päästöjä. Näistä päästöistä on kirjallisuudessa melko vähän tietoja, ja päästöt ovat riippuvaisia varastoitavan syötemateriaalin ominaisuuksista sekä varastointiajasta ja -olosuhteista. Aiemmissä tutkimuksissa reaktoria edeltävässä sekoitussäiliössä on mitattu metaanipäästöä 39 m<sup>3</sup>/h (Reinelt ym. 2022), syöttösäiliössä metaanipäästö on ollut 0,1–0,27 %

tuotetusta metaanista (Liebetrau ym. 2010). Syötemateriaalien hajoamisesta johtuvien, varastoinnin aikaisten, päästöjen minimoimiseksi syötteiden varastointiaika ennen syöttöä prosessiin tulisi minimoida, jolloin myös maksimoidaan syötteiden biokaasuntuotto reaktorissa.

Varsinaisen prosessin (reaktori) aikana metaanivuotoja voi tapahtua mm. laitoksen rakenteista. Vuodot on pääasiassa raportoitu vähäisiksi (0,006–0,17 % tuotetusta metaanista; Liebetrau ym. 2010; Liebetrau ym. 2013), eikä niitä havaittu esimerkiksi betonirakenteisten reaktorien mittausten yhteydessä lainkaan (Liebetrau ym. 2010). Reinelt ym. (2022) puolestaan raportoivat, että maatalouden sivutuotteita hyödyntävän biokaasulaitoksen metaanipäästöistä (yhteensä 10,5 % tuotetusta metaanista) noin 42 % aiheutui reaktorissa tapahtuvista vuodoista ja puolet mädätteen avoimista varastoista ja biokaasun hyödyntämisestä. Samassa tutkimuksessa paikannettiin kahden biokaasulaitoksen metaanipäästövuotoja kameran avulla. Laitoksista paikannettiin vuotoja yhteensä 28, joista suurin osa (12 kpl) aiheutui reaktorin kalvokuvun kiinnityksestä ja betonirakenteista (8 kpl). Loput päästövuodot aiheutuivat kalvokuvun halkeamista (4 kpl), paineensäätöventtiileistä (3 kpl) ja kompressorista (1 kpl).

Biokaasulaitoksen paineensäätöventtiilit (varoventtiilit) varmistavat laitoksen turvallisuuden tilanteissa, joissa biokaasun siirtyminen reaktorin kaasutilasta on häiriötilanteen vuoksi estynyt. Venttiilien avautuminen korkean paineen tai voimakkaiden tuulenpuuskien vuoksi voi aiheuttaa merkittäviä yksittäisiä päästötilanteita ja jopa nelinkertaistaa metaanipäästöt, mutta päästö on tilapäinen (Groth ym. 2015). Paineensäätöventtiileistä tapahtuvien vuotojen osuuden on mitattu olevan noin 0,04–16,2 % erilaisilla laitoksilla tuotetusta metaanista (Groth ym. 2015; Reinelt ym. 2016; Reinelt ym. 2017; Reinelt & Liebetrau 2020). Turvallisuuden kannalta välttämättömien venttiilien laukeamisen minimointi vähentää päästöjä. Se tapahtuu hyvällä laitoksen hallinnalla ja huollolla.

Mikäli biokaasua tuotetaan enemmän kuin sitä voidaan ohjata esimerkiksi CHP-yksikköön, voidaan laitoksella turvautua ylijäämäkaasun polttamiseen (soihdutus). Tässä yhteydessä mitatut metaanipäästöt on raportoitu huomattaviksi, jopa 13–25 % kaasun tuotannosta (Flesch ym. 2011). Mikäli kaasun varastointitilaa on riittävästi poikkeustilanteita varten, soihdutukseen turvaudutaan vain harvoin. Pienemmillä laitoksilla varajärjestelmänä voi olla soihdun sijaan myös lämpökattila. Laitoksilla onkin tärkeä kiinnittää huomiota kaasun hyödyntämisen kapasiteettiin suhteessa reaktorin tuottamaan kaasumäärään, jotta kaasun ylituotantoa ja siitä johtuvaa soihdutusta ja mahdollisia varoventtiilien laukeamisia pystyttäisiin minimoimaan.

Oikea-aikaisilla huoltotoimenpiteillä ja hyvällä laitoksen toiminnan seurannalla varmistetaan reaktorin toimivuus. Mikäli reaktori joudutaan avaamaan kesken prosessin

huoltotoimenpiteiden vuoksi, suurempia määriä metaania voi karata ilmakehään. Liebetraun ym. (2010) mittauksen mukaan 5,46 % tuotetusta metaanista karkasi ilmakehään reaktorin avaamisen yhteydessä. Vastaava tulos (5,05 % tuotetusta metaanista) saatiin myös toisessa tutkimuksessa (Liebetrau ym. 2013). Toisaalta taas Fleschin ym. (2011) tutkimuksessa huoltotoimenpiteiden aikana päästöt vähenivät noin kolmannekseen verrattuna tilanteeseen ennen huoltoa. Huoltotoimenpiteistä aiheutuvien päästöjen suuruus on riippuvainen siitä, missä vaiheessa prosessia toimenpide tehdään ja onko kyseessä suunniteltu vai akuutti huoltotoimenpide. Erityisesti reaktorin avaamista vaativiin huoltotoimiin on syytä varautua ajoissa ajamalla laitoksen syöttö ja siten biokaasuntuotto väliaikaisesti alas. Laitosoperaattori pystyy vaikuttamaan käytettyihin syötteisiin, niiden suhteisiin ja kokonaismäärään ja siten varmistamaan laitoksen hyvän toiminnan ja minimoimaan laitosalueen päästöt.

**Taulukko 1.** Biokaasureaktorin ja eri tuotantovaiheiden päästöt kirjallisuudessa.

Prosessin vaihe	CH <sub>4</sub> -päästö (% tuotettu CH <sub>4</sub> )	Mediaani	Keskiarvo	Tutkitut laitokset (lkm)	Mittauksia (lkm)	Lähteet
Syötteen sekoitus	0,005–0,311	0,031	0,09	13*	19*	1–2
Syöttö prosessiin	0,00052–0,16	0,004	0,04	4*	6*	1–2
Reaktorin huolto	5,04–5,46	5,04	5,04	2	2	1–2
Paineensäätöventtiilit	0,04–16,2	1,1	3,7	8	*	3–6
Vuodot reaktorirakenteista	0–4,41	0,006	0,33	13	54	1–2, 11
Laitosalueen päästöt yhteensä	0,02–23,8 **	2,85	4,38	52*	*	2, 3, 5, 7–15

\* Ei tarkkaa tietoa lukumääristä

\*\* Sisältää biokaasuprosessin lisäksi biokaasun hyödyntämisen ja mädätteen varastoinnin päästöjä

1) Liebetrau ym. 2010, 2) Liebetrau ym. 2013, 3) Groth ym. 2015, 4) Reinelt ym. 2016, 5) Reinelt ym. 2017, 6) Reinelt & Liebetrau 2020, 7) Hrad ym. 2015, 8) Fredenslund ym. 2018, 9) Jensen ym. 2017, 10) Flesch ym. 2011, 11) Reinelt ym. 2022, 12) Avfall Sverige 2016, 13) Holmgren 2012, 14) Bakkaloglu ym. 2021, 15) Scheutz & Fredenslund 2019.

## 2.2 Biokaasun hyödyntäminen

Biokaasuprosessissa tuotettu biokaasu johdetaan yleensä joko lämpökattilaan, sähköä ja lämpöä tuottavaan CHP-yksikköön tai liikennepolttoaineen jalostusyksikköön (jalostaminen biometaaniksi ja paineistus tai nesteytys liikennepolttoaineeksi), kun biokaasun sisältämää energiaa hyödynnetään. Tässä luvussa hyödyntämiseen sisällytetään biokaasun puhdistuksen, paineistuksen ja itse energiantuotantolaitteen metaani- ja dityppioksidipäästöt. Biometaanin nesteytyksen päästöihin ei puututa, kirjallisuutta nesteytyksestä biokaasulaitosten yhteydessä on toistaiseksi vähän ja päästömittauksia tämäntyyppisiltä laitoksilta ei ollut saatavilla.

Biokaasulaitoksella päästöjä muodostuu CHP- ja jalostusyksikön teknologiasta ja toimunnoista riippuen, mutta myös niissä hyödynnetyn biokaasun koostumus (johon puolestaan vaikuttaa syötteen koostumus) vaikuttaa päästöihin. Joidenkin tutkimusten mukaan kaasuhävikkejä CHP-yksikössä tai jalostamisen aikana pidetään toiseksi merkittävimpinä mädätteen varastoinnin jälkeen (Reinelt ym. 2017; Liebetrau ym. 2013). Kuitenkin tietoa mitatuista päästöistä biokaasun jalostuksen ja hyödyntämisen yhteydessä on suhteellisen vähän saatavilla. Biokaasun hyödyntämisen aikaiset metaanipäästöt raportoidaan tutkimuksissa yleensä yksikössä 'prosenttia tuotetusta metaanista'. Dityppioksidia muodostuu vain CHP-yksikössä kaasua poltettaessa, mutta ei jalostettaessa biokaasua liikennepolttoaineeksi. Lämpökattiloiden päästötietoja ei kirjallisuudesta löytynyt.

Arviot biokaasun metaanipäästöistä CHP-yksikössä vaihtelevat kirjallisuuskatsauksessa välillä 0,17–3,72 % tuotetusta metaanista. Saksalaisen Liebetraun ym. (2010) tutkimuksessa päästöjen mitattiin olevan keskimäärin 1,73 % tuotetusta metaanista ja ne vaihtelivat 0,17–3,72 % välillä eri biokaasulaitoksissa. Vastaavasti uudemmassa tutkimuksessa (Liebetrau ym. 2013) kahdeksan eri biokaasulaitoksen (erilaiset kapasiteetit, tekniikat, lämpötilat ja syöteseokset) CHP-yksikön kaasumooottorin metaanipäästöt olivat keskimäärin 1,74 % ja vaihtelevat epätäydellisestä palamisesta johtuen välillä 0,4–3,28 % tuotetusta metaanista.

CHP-yksikön metaanipäästöt laitoksen sähköntuotantoa kohti olivat eräissä tutkimuksissa keskimäärin 3,23 g CH<sub>4</sub>/kWh (Liebetrau ym. 2010) ja 3,11 g CH<sub>4</sub>/kWh (Liebetrau ym. 2013). Osa tutkimuksista esitti metaanipäästöt tuotettua kokonaisenergiaa kohden, jolloin päästöluvut tuotettua energiaa kohden (biokaasun alempi lämpöarvona ilmaistuna) vaihtelivat 125–600 g CH<sub>4</sub>/GJ (de Zwart ym. 2012) ja olivat keskimäärin 323 g CH<sub>4</sub>/GJ (Kristensen ym. 2004). Suoria syitä vaihteleviin päästölukuihin eri teknologioiden välillä oli vaikea löytää ja päätellä, koska raportoitujen laitosten toiminnassa (mm. syötteet, metaanintuotto, tekniikka) oli suuria eroja eikä CHP-yksiköiden



tietoja ollut tarkemmin raportoitu. CHP-yksiköissä metaanipäästö johtuu epätäydellisestä palamisesta ja sen myötä poistokaasuun päätyvästä palamattomasta biokaasusta. Liebetaun ym. (2010) tutkimuksen mukaan päästössä on eroja myös eri CHP-moottorien välillä.

Osassa tutkimuksia tarkasteltiin myös CHP-yksikössä muodostuvia dityppioksidin päästöjä. Liebetaun ym. (2013) mukaan  $N_2O$ -päästöt ovat seurausta reaktorin syötemateriaalien ja siten myös biokaasun sisältämästä korkeasta ammoniakkipitoisuudesta (Liebetaun ym. 2013).  $N_2O$ -päästöt sähköntuotantoon suhteutettuna vaihtelivat 0,006–0,345 g  $N_2O/kWh$  (Liebetaun ym. 2013) kahdeksalla erilaisella biokaasulaitoksella (Liebetaun ym. 2013). Tanskalaisessa tutkimuksessa saatiin mittausten perusteella CHP-yksikön (< 25 MW) dityppioksidin päästökseen 0,5 g  $N_2O/GJ$  tuotettua kokonaisenergiaa kohden (Kristensen ym. 2004).

Biokaasun jalostuksessa liikennepolttoaineeksi voidaan käyttää erilaisia tekniikoita biokaasun energiatiheyden kasvattamiseksi eli metaanipitoisuuden nostamiseksi, jolloin kaasusta poistetaan muut komponentit (mm. hiilidioksidi ja typpi). Yleisimpiä tekniikoita ovat erilaiset absorptioon perustuvat vesi- tai kemialliset pesurit (mm. amiinipesuri), paineenvaihteluadsorptio (pressure swing adsorption, PSA) sekä kalvotekniikkaan perustuvat pesurit, joille on kirjallisuudessa raportoitu vaihtelevia päästötietoja. Metaanipäästöt muodostuvat jalostuslaitteistojen vuodoista sekä poistokaasuun päätyvästä metaanista, jota ei tekniikoilla täysin saada talteen. Kaasun jalostamisen aikana ei muodostu dityppioksidipäästöjä.

Kahdella saksalaisella PSA- ja vesipesuritekniikkaa käyttävällä biokaasulaitoksella metaanipäästöjen suuruudeksi mitattiin 0,017–5,34 % tuotetusta metaanista (Liebetaun ym. 2013). Avfall Sverige'n (2016) raportin mukaan ruotsalaisilla biokaasun jalostuslaitoksilla mitatut metaanipäästöt olivat keskimäärin eri tekniikoilla (vesipesuri, PSA, kemiallinen pesuri) 0,9 % käsiteltävästä metaanista, ja tästä suurin osa (0,75 % käsiteltävästä metaanista) koostui poistokaasussa olevasta metaanista. Kemiallisia pesureita käyttävillä laitoksilla biokaasun jalostuksen metaanipäästö oli 0,17 %, PSA-laitoksilla 0,97 %, vesipesureilla 1,7 % ja poistokaasun hapetustekniikkaa käyttävillä PSA- ja vesipesurilaitoksilla 0,16 % käsiteltävästä metaanista. Myös tanskalaisen Kvist & Aryalin (2019) tutkimuksen mukaan yhdeksän erilaisen laitoksen (kolme vesipesuria, kolme amiinipesuria, kaksi kalvotekniikkaa) keskimääräiset metaanipäästöt biokaasua liikennekäyttöön jalostettaessa olivat 0,81 % käsiteltävästä metaanista siten, että käytetty jalostustekniikka vaikutti merkittävästi tulokseen. Amiinipesurit olivat tehokkaimpia (päästö 0,04–0,07 % käsiteltävästä metaanista), kalvopuhdistuksen päästöt 0,48–0,56 %, kun taas vesipesurien päästöt olivat selvästi korkeimmat (1,1–1,97 %). Toinen ruotsalainen tutkimus (Reinelt ym. 2017) mittasi kemiallisen pesurin metaanipäästöiksi vain 0,01 % tuotetusta metaanista.

Kirjallisuuskatsauksessa kerätyt päästötiedot biokaasun hyödyntämisessä on koottu taulukkoon 2. Päästöjä on vaikeaa välttää kokonaan, koska biokaasun poltto CHP-yksikössä sekä jalostus on aina hieman epätäydellistä, jolloin poistokaasuun päätyy pieni määrä metaania. Laitteistojen säännöllisten huoltojen avulla esimerkiksi CHP-moottorien toimivuuteen voidaan kuitenkin vaikuttaa ja estää kaasuvuotoja jalostustekniikoiden yhteydessä. Lisäksi päästöjen määrään voitaisiin vaikuttaa esimerkiksi poistokaasun jälkikäsittelyllä (katalyyttinen tai terminen hapetus).

**Taulukko 2.** Päästöt biokaasun CHP-yksikössä ja jalostettaessa biokaasua biometaaniksi.

Tekniikka	Päästö	Minimi-maksimi	Lähteet
CHP	CH <sub>4</sub>	0,17–3,72 %	1,2
		3,11–3,23 g CH <sub>4</sub> /kWh	1,2
	N <sub>2</sub> O	125–600 g CH <sub>4</sub> /GJ	3,4
		0,006–0,345 g N <sub>2</sub> O/kWh	2
Jalostaminen	CH <sub>4</sub>	0,5 g N <sub>2</sub> O/GJ	4
		0,017–5,34 %	5–7
	N <sub>2</sub> O	ei päästöä	

1) Liebetrau ym. 2010, 2) Liebetrau ym. 2013, 2015 3) de Zwart ym. 2012, 4) Kristensen ym. 2004, 5) Reinelt ym. 2017, 6) Kvist & Aryal 2019, 7) Avfall Sverige 2016

## 2.3 Mädätteen prosessointi

Mädätteen prosessoinnilla tarkoitetaan sen jatkokäsittelyä jollain tekniikalla, jolla pyritään jakamaan mädättemassaa tai sen sisältämiä ravinteita ja orgaanista ainesta erillisiin jakeisiin ja/tai väkevöimään ravinnepitoisuuksia. Tavoite on yleensä tehostaa ravinteiden ja orgaanisen aineksen hyödyntämistä lannoituksessa ja maanparannuksessa muuttamalla niiden välisiä suhteita erilaisiin tavoitteisiin soveltuvammaksi ja/tai parantaa muodostuvien jakeiden kuljetettavuutta käyttökohteisiinsa.

Yleisimpiä mädätteen jatkoprosessin ratkaisuja on mekaaninen separointi, jossa mädätteestä muodostetaan erilliset neste- ja kuivajae puristamalla tai linkoamalla. Separoinnin tavoitteena on useimmiten nesteen erottaminen, jotta muodostuvaa kuivajae on helpompi kuljettaa kauemmas. Samalla voidaan erottaa fosforia ja typpeä

osin erillisiin jakeisiin, jolloin niiden käyttöä lannoitteina voidaan täsmentää ja kohdentaa jompaakumpaa ravinnetta tarvitseville lohkoille. Separointi on yleensä myös ensimmäinen prosessivaihe, kun pyritään jalostamaan vielä väkevempiä lannoitevalmisteita muilla prosessiteknologioilla, kuten kuivajakeen kuivaus ja pyrolyysi tai rakeistus sekä nestejakeen haihdutus, strippaus tai kalvosuodatus.

Mädätteen prosessointi on edelleen melko harvinaista separointia lukuun ottamatta ja monia jalostustekniikoita kehitetään edelleen toimivimmiksi. Näin ollen prosessoinnin aikaisia päästöjä on kirjallisuudessa harvoin vielä mitattu ja mittaustietoa on vähän saatavilla.

Separoitaessa esimerkiksi ruuvi- tai linkoseparaattoreilla mädätteestä pääsee karkaamaan pieniä määriä siihen sitoutuneita kaasumaisia yhdisteitä, koska laitteistot eivät ole kaasutiiviitä. Mädätteen viipymäaika separaattorilla on useimmiten kuitenkin lyhyt, ja separoinnissa muodostuvien metaanipäästöjen onkin raportoitu olevan välillä 0,001–0,1 % laitoksen metaanituotosta (Liebetau ym. 2013, 2010, Taulukko 3). Jätevedenpuhdistamolla mädätteen separoinnissa on raportoitu myös ammoniakki- ja di-typpioksidipäästöjä (Samuelsson ym. 2018), jotka käsiteltävää mädätetonna kohden vastaavat noin 0,0001 kgNH<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> ja 0,00002 kgN<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> päästöä. Tällöin lingon käsitteilytehoksi oletetaan noin 30 m<sup>3</sup>/h julkaisussa ilmoitettujen ja arvioitujen tietojen perusteella (lingottua kuivajaetta kuiva-aineena 14 846 t/v, kuivajakeen erotustehokkuuden oletus 20 % ja kuivajakeen kuiva-ainepitoisuuden oletus 25 %).

Muista mädätteen prosessointitekniikoista ainoastaan kuivaukselle löytyi mittaustietoja prosessoinnin päästöistä (Taulukko 3). Kovin märkiä mädätteitä ei korkean energiankulutuksen vuoksi kuivata, vaan kuivaukseen päätyy lähinnä separoitua kuivajaetta. Metaanipäästöjä ei ole raportoitu muodostuvan kuivauksesta (Awiszus ym. 2018a), mutta ammoniakkaa voi haihtua. Ammoniakkipäästön suuruus on riippuvainen mädätteen sisältämästä ammoniumtyypen määrästä sekä kuivausolosuhteista, pH:sta ja lämpötilasta. Korkea lämpötila lisää typen haihtumista, mutta toisaalta lyhentää merkittävästi kuivausaikaa (Pantelopoulos ym. 2016). Kirjallisuudessa raportoitujen tietojen mukaan kuivauksen aikana syötemateriaalin liukoisesta tyyppistä voi haihtua ammoniakkina olosuhteista riippuen 56–98 % (Maurer & Müller 2012; Pantelopoulos ym. 2016; Awiszus ym. 2018a, 2018b; Berg ym. 2021; Mustonen ym. 2018). Kuivattavaa massaa kohden ammoniakkaa voi haihtua 0,08–0,2 g/m<sup>3</sup> (Awiszus ym. 2018b). Typen haihtuminen kuivauksen aikana myös heikentää käsitellyn jakeen typpilannoitusvaikutusta.

Typpihävikin muodostumista kuivauksena aikana voidaan estää laskemalla kuivattavan materiaalin pH happamalle tasolle (pH 5,5–6,5) (Pantelopoulos ym. 2016). Lisäksi kuivausprosesseissa on usein integroituna kuivauskaasujen käsittely, jolloin ammoni-

akkityppi voidaan ottaa talteen esimerkiksi happopesurin avulla, välttää näin ammoniakkipäästöjä ja edistää typen kierrättämistä lannoitteeksi. On myös huomioitava, että pääosa mädätteen ammoniumtypestä on yleensä ennen kuivausta separoitu nestejakeeseen, jolloin kaikesta mädätteen alkuaan sisältämästä tyyppistä hävikki kuivauksen aikana on vähäisempi kuin koko mädätteen termisessä kuivaamisessa.

**Taulukko 3.** Mädätteen separoinnin ja termisen kuivauksen päästöt.

Tekniikka	Päästö	Minimi-maksimi	Mittauksia (lkm)	Lähteet
Separointi	CH <sub>4</sub>	0,001–0,13 % tuotettu CH <sub>4</sub>	3	1,2
	NH <sub>3</sub>	0,0043 kg/h	1	3
	N <sub>2</sub> O	0,0008 kg/h	1	3
Kuivaus	CH <sub>4</sub>	ei päästöä	1	4
		0,08–0,2 g/m <sup>3</sup>	3	4
	NH <sub>3</sub>	56–98 % syötteen liukoisesta tyyppistä	6	5–9

1) Liebetrau ym. 2013, 2) Liebetrau ym. 2010, 3) Samuelsson ym. 2018, 4) Awiszus ym. 2018b, 5) Awiszus ym. 2018a, 6) Berg ym. 2021, 7) Maurer & Müller 2012, 8) Mustonen ym. 2018, 9) Pantelopoulos ym. 2016

## 2.4 Mädätteen varastointi

Mädätteen varastoinnin aikana voi muodostua metaani-, ammoniakki- ja dityppioksidipäästöjä. Eri kaasujen päästöjen suuruuteen vaikuttavat varastoinnin olosuhteet, erityisesti lämpötila, mutta myös varastoinnin kesto sekä mädätteen tai siitä jalostettujen jakeiden ominaisuudet. Metaanipäästöjen muodostuminen varastoinnin aikana on seurausta mädätteen orgaanisen aineksen hajoamisen jatkumisesta varastointiolosuhteissa. Varastoinnin aikainen mädätteen hajoaminen lisää myös tyyppipäästöjen (NH<sub>3</sub> ja N<sub>2</sub>O) riskiä.

Suurin mädätteen varastoinnin päästöpotentiaaliin vaikuttava tekijä on mädätettävän biomassan viipymä biokaasureaktorissa (ja mahdollisessa jälkikaasualtaassa, ks. Luku 2.1). Kaikissa biokaasuprosesseissa tekniikasta riippumatta olennaista on varmistaa mädätettävän biomassan riittävän pitkä viipymä prosessin niissä vaiheissa,

jossa biokaasua kerätään talteen. Näin voidaan varmistaa biomassan riittävä hajoaminen ja siten mahdollisimman stabiili mädätteen laatu sekä maksimaalinen biokaasuntuotto. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että syötteen on oltava riittävän kauan joko reaktorissa tai reaktorin ja jälkikaasualtaan yhdistelmässä ennen sen poistamista mädätteenä varastointiin, jatkoprosessointiin tai suoraan käyttöön.

Biokaasureaktorin viipymäaika onkin mädätteen laadun kannalta kriittinen parametri (Vergote ym. 2019). Se on samalla sidottu reaktorin orgaanisen aineksen kuormitukseen, toisin sanoen reaktoriin syötettävän orgaanisen aineksen määrään reaktorin tilavuutta kohti vuorokaudessa. Lyhyt viipymäaika ja korkea kuormitus aiheuttavat sen, ettei mädätteen sisältämä orgaaninen aines ole riittävän pitkälle hajonnutta reaktorista poistettaessa. Mädäte voi sisältää vielä runsaasti helposti hajoavaa orgaanista ainesta, joka otollisissa olosuhteissa hajoaa varastoinnin aikana muodostaen metaanipäästöjä. Viipymän merkityksestä huolimatta sen vaikutuksia biokaasuprosessin päästöihin on tutkittu verrattain vähän. Tutkimuksissa on kuitenkin todettu mädätteen biohajoavuuden olevan varastointiolosuhteissa esimerkiksi raakalantaa vähäisempää (Vergote ym. 2019; Maldaner ym. 2018).

Mädäte sisältää lähtökohtaisesti enemmän ammoniumtyypeä kuin esimerkiksi raakalanta, sillä sitä vapautuu orgaanisten tyyppiyhdisteiden hajotessa prosessissa. Tyyppiyhdisteitä voi hajota edelleen myös mädätteen varastoinnin aikana. Tästä syystä riski sekä ammoniakki- että dityppioksidipäästöille mädätteestä on huomioitava. Erityisesti ammoniakkipäästöjen riski kohoaa lämpötilan noustessa, jolloin ammoniumtyypen ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) ja ammoniakikikaasun ( $\text{NH}_3$ ) tasapaino siirtyy kohti helposti haihtuvaa ammoniakia. Mädätteen jäähdyttäminen sen poistuessa reaktorista vähentää myös ammoniakkipäästöriskiä. Myös pH:n nousu vaikuttaa ammoniakkin muodostumiseen mädätteen varastoinnin aikana. Ammonium-ionin ja ammoniakkin kemiallisen tasapainon mukaan mädätteen ammoniumtyypestä jo 3,8 % on ammoniakkimuodossa lämpötilassa 20 °C ja pH:ssa 8. Lämpötilassa 5 °C ja pH:ssa 8 vastaava ammoniakkin osuus on vain 1,2 %. Mikäli myös pH nousee tasolle 9 lämpötilassa 20 °C, on ammoniakkin osuus jo 28 %. Mädätteiden pH on yleensä tasolla 7,5–8,0 (Maldaner ym. 2018; Rodhe ym. 2015). Dityppioksidipäästöt ovat puolestaan riippuvaisia varastoinnin olosuhteista, mutta myös mädätteen olomuodosta, erityisesti kuiva-ainepitoisuudesta.

Lietemäisen mädätteen varastoinnissa metaanipäästöjen on tutkittu olevan suurimmat kesällä, kun ilman lämpötila kohoaa yli 10–15 asteen (Ericsson ym. 2020; Maldaner ym. 2018). Myös vuorokaudenajalla on havaittu vaikutusta päästön määrään erityisesti lämpimään aikaan kesällä ja syksyllä. Näinä aikoina päästöjen muodostuminen seuraa osin ulkoilman lämpötilan päivittäisiä muutoksia ollen korkeimmillaan valoisaan aikaan (Hrad ym. 2015; Maldaner ym. 2018). Keväisin auringonvalon ja lämmön lisääntyessä mädätteen varastoinnin metaanipäästöjen on tutkittu olevan matalam-

malla tasolla verrattuna samanpituisen tarkastelujaksoon syksyllä. Syksyllä mädätteen lämpötila laskee hitaasti ulkoilman lämpötilan laskiessa ja metaanipäästöt voivat olla kevääseen verrattuna suurempia (Maldaner ym. 2018). Ulkoilman lämpötila ei sellaisenaan ole tarkka indikaattori päästöjen muodostamiselle, vaan tärkeämpää on seurata muutoksia mädätteen lämpötilassa.

Ruotsissa toteutetussa tutkimuksessa havaittiin, että mädätetty lietelanta voi olla jopa raakalantaa merkittävämpi metaanipäästöjen lähde kesäolosuhteissa (huhti-elokuun tarkastelujakson ulkoilman lämpötila välillä 5–35 °C, Rodhe ym. 2015). Syitä tähän tulokseen voi olla useita, esimerkiksi mädätteen sisältämä lantaa aktiivisempi mikrobipopulaatio tai mädätteen lämpötilaan vaikuttaneet toimenpiteet. Julkaisussa ei näitä tietoja kuitenkaan kattavasti esitetä.

Metaanipäästöä voi edelleen vähentää mikrobitoimintaa hidastavilla varastointiolosuhteilla. Reaktorista johdettavan mädätteen korkeaa lämpötilaa (prosessin lämpötilasta riippuen yleensä noin 37–42 tai 52–55 °C) voidaan laskea poistettavaa mädätettä jäädyttämällä. Lämmönvaihdinten avulla tätä lämpöä voidaan edelleen hyödyntää reaktorin tai sen syötteiden lämmitykseen. Myös mädätevaraston rakenteella voidaan hidastaa mädätteen lämpötilan muutoksia ja vaikuttaa päästöjen muodostumiseen. Esimerkiksi lietesäiliön sijoittaminen osin maan alle pitää mädätteen lämpötilan ulkoilmaa viileämpänä kesäisin ja toisaalta estää mädätteen jäätyksen talvella.

Myös mädätteen määrä varastointisäiliössä sekä varastointiaika vaikuttavat kaasumaisten päästöjen suuruuteen. Mitä suurempaa määrää varastoidaan, sitä suurempi metaani- ja dityypidioksidipäästö mädätetönnä kohden on todettu muodostuvan (Vergote ym. 2020). Tämä voi johtua suurempien mädätetilavuuksien vaikutuksesta lämpötilan muutoksiin ja sitä kautta metaanipäästöihin (lämmennyt mädäte jäähtyy hitaammin). Dityypidioksidipäästöjen muodostumiselle otollisia hapettomia alueita on myös enemmän, mitä suurempia määriä mädätettä varastoidaan. Kanadalaisessa tutkimuksessa Baldé ym. (2016) havaitsi, että samaan aikaan, kun varastojen mädätetilavuus oli lannoituskäytäntöjen ja aikataulujen vuoksi suurimmillaan, oli myös ulkoilman lämpötila korkeimmillaan, mikä lisäsi mädätevarastojen loppukesän sekä myöhäisen kevään metaanipäästöä. Pitkä varastointiaika lisää riskiä mädätteen määrän kertymiselle varastoihin sekä mädätteen hajoamiselle ja lämpötilan muutoksille, jotka lisäävät kaasumaisten päästöjen riskiä.

Mädätteen varastoinnissa myös esimerkiksi sateella ja mädätteen sekoituksella on vaikutusta päästöjen muodostumiseen. Lietemäisten mädätteiden pinta rikkoutuu sateen tai sekoituksen vaikutuksesta, mikä vapauttaa mädätepatjassa muodostuneen metaanin. Esimerkiksi sekoituksen aiheuttama hetkittäinen metaanipäästö voi olla korkea, mutta kokonaisuudessaan sateen ja säiliön sekoituksen vaikutus mädätteen

varastoinnin kokonaispäästöön on kuitenkin tutkittu olevan vähäinen (Baldé ym. 2016).

## 2.4.1 Varastoinnin tekniset ratkaisut

Varastoinnin rakenteelliset ratkaisut vaikuttavat merkittävästi mädätteen kaasumaisiin päästöihin. Lietemäisen mädätteen ja siitä erotettujen nestejakeiden varastointi avoimissa eli kattamattomissa säiliöissä lisää kaasumaisten päästöjen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>) riskiä, kun taas erilaiset varastojen katteet vähentävät niitä. Katteita voivat olla esimerkiksi telttamaiset katteet ja tiiviit betonikannet, jotka samalla estävät sadeveden pääsyn säiliöihin ja tasaavat säiliöiden lämpötilaa. Erityisesti naudun lietelantapohjaisien mädätteiden pintaan voi myös nousta kuitumaista ainesta, joka muodostaa kuorettuman. Pelkän lannan mädätyksessä kuorettuma on kuitenkin raakalannalle muodostuvaa vähäisempi kuitujen hajotessa biokaasureaktorissa. Sen sijaan kasvibiomassoja lannan kanssa mädätettäessä kuorettuma voi olla jälleen paksumpi. Myös esimerkiksi lisäämällä olkea säiliön pinnalle voidaan luoda kelluva kuorettumaa jäljittelevä kate mädätteen tai lannan pintaan. Kuorettuma ja kelluvat katteet ovat kuitenkin telttamaisia ja tiiviitä katteita huonompia päästöjen vähentäjiä.

Kuorettumalla on todettu erityisesti lannan varastoinnissa ammoniakki- ja metaanipäästöä vähentävä, mutta toisaalta dityppioksidin päästöä lisäävä vaikutus (Baldé ym. 2018; Petersen ym. 2013). Kuorettuma, kuten myös muut kateratkaisut, toimivat mekaanisena esteenä kaasujen pääsulle ilmakehään. Jos kuorettumassa on reikiä esim. sekoituksen vuoksi, pääsevät kaasut helposti karkaamaan ilmakehään (Baldé ym. 2016), joten kuorettuman kuntoon tulisi kiinnittää huomiota päästöjen minimoimiseksi. Kuorettumalla on biologisen luonteensa vuoksi myös muita vaikutuksia kaasumaisiin päästöihin. Kuorettuman pinta on alttiina hapellisille olosuhteille ja siinä on tutkittu olevan metaania hajottavia mikrobeita, jotka hapettavat vapautuvaa metaania hiilidioksidiksi (Petersen ym. 2005). Myös ammoniakkin on tutkittu hapettuvan kuorettuman pinnalla, mutta sen hapettumisen on todettu edistävän dityppioksidin muodostumista (Nielsen ym. 2010). Dityppioksidia muodostuu, koska kuorettuman pinta on kuivaa, mikä mahdollistaa hapelliset olosuhteet. Syvemmällä vallitsevat hapettomat olosuhteet taas edesauttavat nitrifikaatio-denitrifikaatioprosessia, jonka tuloksena dityppioksidia muodostuu. Dityppioksidipäästöjen estämiseksi varastoaltaat tulisi varustaa tiiviillä katteella, jonka ansiosta myös varastoinnin aikana muodostuva metaani voitaisiin ottaa talteen (Clemens ym. 2006).

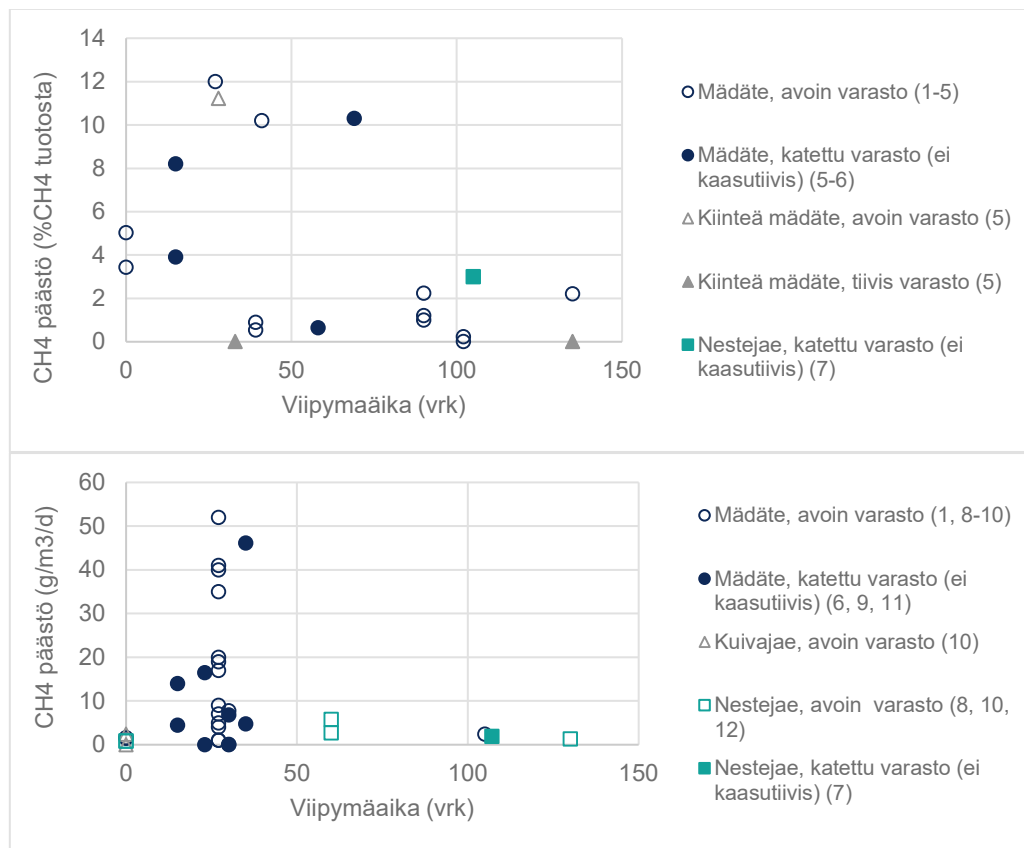
Kuivien mädätteiden tai separoitujen kuivajakeiden varastot ovat maatilamittakavassa yleensä kuivalantaloita muistuttavia laattoja, joilla on seinämät kolmella laidalla

(yksi laita avoin täyttämistä ja tyhjentämistä varten). Seinämät ja katto vähentävät tuulen lisäämää ammoniakkin haihtumista massan pinnalta sitä paremmin, mitä suljetumpi rakenne on. Samalla estyy sadeveden pääsy massaan, mikä edistää sen pysymistä ilmavana. Tämä vähentää metaanipäästöjen mahdollisuutta (Majumder ym. 2014) ja voi vähentää myös dityppioksidin muodostumiselle otollisten hapettomien olosuhteiden muodostumista.

Kuvioon 4 on koottu kirjallisuuskatsauksessa havaittujen varastoinnin metaanipäästöjen jakauma laitosten viipymääjan suhteen, ylä- ja alakuvassa on esitetty eri julkaisujen tulokset riippuen mittausyksiköstä. Kuvioon on myös sisällytetty tieto varastointitavasta (avoin tai katettu). Suurimmassa osassa kirjallisuuskatsauksen julkaisuista mitaustietoa on ainoastaan avoimista mädätteen varastosäiliöistä. Kuvion 4 perusteella voidaan havaita metaanipäästöjen laskevan viipymääjan pidentyessä, mutta kattavaa mitaustietoa aiheesta tarvitaan kuitenkin edelleen lisää.



**Kuvio 4.** Laitoksen viipymääjan vaikutus varastoinnin metaanipäästöön kirjallisuuskatsauksen perusteella. Yläkuva: päästöt tutkimuksissa, joissa tulokset yksikössä ”% CH<sub>4</sub>-tuotosta”. Alakuva: päästöt tutkimuksissa, joissa tulokset yksikössä päästö varastoitavaa tilavuutta kohti vuorokaudessa (g/m<sup>3</sup>/d). X-akselilla viipymäaika 0 vrk viittaa julkaisuihin, joissa reaktorin viipymää ei ilmoitettu. Mikäli julkaisussa on mainittu laitoksella olevan sekä reaktori että jälkikaasuallas, näiden viipymäaika on laskettu yhteen ja esitetty x-akselilla. 1) Baldé ym. 2016, 2) Hrad ym. 2015, 3) Reinelt ym. 2017, 4) Liebetrau ym. 2010, 5) Liebetrau ym. 2013, 6) Vergote ym. 2020, 7) Balsari ym. 2013, 8) Gioelli ym. 2011, 9) Rodhe ym. 2015, 10) Perazzolo ym. 2015, 11) Baral ym. 2018, 12) Maldaner ym. 2018.



## 2.4.2 Separoitujen jakeiden päästö

Eryteisesti separoitujen nestejakeiden varastoinnissa on korkea riski ammoniakkipäästöille (Holly ym. 2017; Zilio ym. 2020), koska suurin osa mädätteen liukoisesta tyypestä päätyy separoinnissa nestejakeeseen. Nestejäte sisältää usein myös mädätteen jääneen helposti hajoavan orgaanisen aineksen, mikä lisää riskiä metaanipäästöjen muodostumiselle (Holly ym. 2017). Suuri helposti hajoavan orgaanisen aineksen osuus myös saa aikaan sen, että päästö muodostuu nopeasti (VanderZaag ym.

2018), eikä näin ollen nestejakeen varastointiaikaa lyhentämällä saavuteta merkittävää metaanipäästöjen vähenemää. Nestejakeiden varastoinnin yhteydessä on myös havaittu metaanipäästöpiikkejä erityisesti varastoaltaiden sekoituksen yhteydessä (Hrad ym. 2015), kun massaansa sitoutuneet kaasukuplat pääsevät nousemaan pintaan. Separoidessa kiintoaines päätyy kuivajakeeseen, jolloin etenkin nautojen liete-lannalle tyypillistä luontaista kuorettumaa ei välttämättä muodostu mädätteen pintaan (Baldé ym. 2018). Kirjallisuuden perusteella voidaan kuitenkin todeta, että päästöjen vähentämisen toimenpiteitä tulisikin kohdentaa separoituista jakeista erityisesti nestejakeiden varastointiin. Varastojen kattaminen ja riittävän pitkä viipymä biokaasureaktorissa ovat nestejakeidenkin päästöpotentiaalin minimoinnin kannalta tärkeitä tekijöitä.

Mädätteestä separoituilla kuivajakeilla on todettu olevan pieni ammoniakki- ja metaanipäästöriski jakeen vähäisen liukoisen tyyppien ja korkean kuitumaisen ja hajoamattoman aineksen osuuden vuoksi (Amon ym. 2006; Holly ym. 2017). Ilmavasti varastoituna kuivajakeissa vallitsevat hapelliset olosuhteet minimoivat orgaanisen aineksen hajoamisesta johtuvan metaanin muodostuksen, lisäksi pinnan hapellisissa olosuhteissa voi tapahtua metaanin hapetusta hiilidioksidiksi (Majumder ym. 2014). Kuivajakeiden dityppioksidin päästöt voivat kuitenkin olla merkittäviä, koska niiden varastoiduissa kasoissa voi syntyä dityppioksidin muodostumiselle suotuisia hapettomia ja vähähappisia alueita. Kuivajakeiden varastointiajalla on myös merkitystä varastoinnin päästöjen määrään ja koostumukseen. Esimerkiksi australialaisessa tutkimuksessa tarkasteltiin separoitujen mädätteiden kuivajakeiden varastointia avoimissa aumoissa ja havaittiin kokonaispäästöjen laskevan ajan myötä. Nuorissa kuivajaeaumoissa dityppioksidipäästö oli suurin, kun taas vanhoissa varasto- aumoissa vallitseva päästökomponentti oli hiilidioksidi (Majumder ym. 2014), mikä on merkki aumojen kompostoitumisesta. Dityppioksidipäästöjen osalta tutkimuksessa ei havaittu korrelaatiota aumojen ammoniumtyyppipitoisuuksien välillä, jolloin olosuhteilla voidaan olettaa olevan suurin vaikutus näiden päästöjen syntyyn. Saman tutkimuksen mukaan aumojen kastuminen sateessa lisäsi hetkittäin metaanipäästöjä, koska sadevesi lisäsi hapettomien taskujen muodostumista ja orgaanista ainesta pääsi hajoamaan jälleen metaaniksi.

Kokonaisuudessaan mädätteen separoinnilla on tutkimusten mukaan päästöjen vähentämisen kannalta suotuisa vaikutus. Esimerkiksi Perazzolo ym. (2015) raportoivat separoitujen mädätejakeiden yhteenlasketun typpipäästön ( $N_2O + NH_3$ ) olevan matalampi kuin separoimattoman mädätteen. Koe toteutettiin avoimissa laboratoriomittakaavan 35 litran varastosäiliöissä. Myös metaanipäästöjen osalta mädätteen separointi on tutkimuksissa vaikuttanut varastoinnin kokonaismetaanipäästöä vähentävänä tekijänä (laboratoriomittakaavan 21 litran avoimet varastosäiliöt, Holly ym. 2017). Varastojen kattamisella olisi mahdollista entisestään minimoida typpipäästöjen muodostumista, erityisesti nestemäisen separoidun jakeen osalta.

### 2.4.3 Mädätteen varastoinnin kokonaispäästöt

Taulukkoon 4 on koottu kirjallisuudesta kerättyjä päästömittausten tuloksia mädätteen varastoinnista. Kirjallisuuskatsaukseen kootuissa julkaisuissa on käytetty erilaisia menetelmiä ja tapoja ilmoittaa mittaustulos. Tarvittujen tietojen puutteen vuoksi kaikkia tuloksia ei ole pystytty yhteismitallistamaan (esim. puuttuvat tiedot varastosäiliöiden koosta ja mitoista). Eri yksiköt tekevät tulosten vertailusta haastavaa, mutta kokonaisuudessaan voidaan todeta, että vaihtelu on suurta lukuisten päästöihin vaikuttavien tekijöiden vuoksi (mm. lämpötila, viipymäaika reaktorissa, mädätteen ominaisuudet, varastointitapa).

Kirjallisuuskatsaukseen sisällytetyt tutkimukset mädätteen varastoinnista on yleensä toteutettu tietynä vuodenaikana/ajanjaksona, mikä vaikeuttaa tulosten ekstrapolointia koko vuodelle. Eri vuodenaikoina saadut tulokset voivat olla hyvin erilaisia verrattuna koko vuoden keskiarvoon. Esimerkiksi Baldén ym. (2016) tutkimuksessa koko vuoden keskiarvo avoimen mädätevaraston metaanipäästöille oli  $19 \text{ g/m}^3/\text{d}$ , kun minimi ja maksimi olivat talvella  $1 \text{ g/m}^3/\text{d}$  ja kesällä  $52 \text{ g/m}^3/\text{d}$ . Varastoinnin osalta onkin selkeä tarve koko vuoden kestäville mittauksille ja erilaisten syötteiden ja prosessivaihtoehtojen vaikutuksen tutkimukselle.

Eri tutkimusten erilaisista tavoitteista johtuen osa tutkimuksista on keskittynyt ainoastaan kasvihuonekaasuihin ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) jättäen ammoniakkipäästöt täysin tarkastelujen ulkopuolelle. Mädätteen varastoinnin ja koko biokaasulaitoksen päästöjen tutkimuksessa olisi kuitenkin tärkeää huomioida kaikki päästökomponentit, koska päästöjen muodostumisella voi olla syy-seuraussuhteita (esim. ammoniakkin hapettumisen  $\text{N}_2\text{O}$ -päästöä lisäävä vaikutus varastojen pintakerroksessa sekä orgaanisen aineksen hajoamisen dynamiikka ja  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  päästöt). Lisäksi toimenpiteillä voi olla ristikkäisvaikutuksia, eli ne voivat vähentää tiettyä päästöä, mutta mahdollisesti lisätä toisen päästön riskiä. Esimerkiksi metaani- ja ammoniakkipäästöjä voidaan vähentää kuoretuman tai mädätteen separoinnin avulla, mutta näillä toimenpiteillä voi tutkimusten mukaan olla päinvastainen vaikutus dityppioksidipäästöön. Kokonaisuudessaan ilmasto- ja ympäristövaikutusten kannalta tulisi kaikkia päästökomponentteja tarkastella samanaikaisesti. Monet kirjallisuuskatsauksen tutkimuksista keskittyvät ainoastaan varastointivaiheeseen, jolloin biokaasulaitoksen operointiin liittyvät seikat (mm. viipymäaika ja kuormitus) tai mädätteen jäähdytys, eivät sisälly tutkimukseen tai niitä ei ole kuvattu. Tulosten tulkinta jää tällöin vajavaiseksi.

**Taulukko 4.** Mädätteen varastoinnin kaasumaiset päästöt kirjallisuudessa.

Päästö	Yksikkö	Minimi	Maksimi	Keskiarvo	Mediaani	Mittausjaksoja (lkm)	Lähteet
CH <sub>4</sub>	gCH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> /d	0	52,0	11,0	4,6	34	1–8
	%CH <sub>4</sub>	0,00013	12,0	3,8	2,2	20	1, 2, 8–12
	gCH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> /d	0,04	62,4	14,5	6	7	13, 14
N <sub>2</sub> O	gN <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> /d	0,004	2,7	0,4	0,1	10	6, 7, 8
	gN <sub>2</sub> O/m <sup>2</sup> /d	0,06	14,0	2,9	0,4	7	3, 7, 8
NH <sub>3</sub>	gNH <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> /d	0,0	96,3	20,9	6,7	27	6, 15–17
	gNH <sub>3</sub> /m <sup>2</sup> /d	0,02	80,0	16,8	11,1	22	3, 15, 17
	gNH <sub>3</sub> /m <sup>3</sup>	2,4	256,2	113,3	97,2	4	16, 18

1) Baldé ym. 2016, 2) Balsari ym. 2013, 3) Baral ym. 2018, 4) Gioelli ym. 2011, 5) Maldaner ym. 2018, 6) Perazzolo ym. 2015, 7) Rodhe ym. 2015, 8) Vergote ym. 2020, 9) Hrad ym. 2015, 10) Liebetrau ym. 2013, 11) Liebetrau ym. 2010, 12) Reinelt ym. 2017, 13) Majumder ym. 2014, 14) Reinelt ym. 2022, 15) Baldé ym. 2018, 16) Holly ym. 2017, 17) Zilio ym. 2020, 18) Amon ym. 2006

Mädätteen tai siitä prosessoitujen jakeiden varastoinnin päästöjen vähentämisessä tärkeää on pystyä ennakoimaan, millä toimenpiteillä on merkittävä vaikutus päästöjen muodostumiseen. Laitossuunnittelussa pystytään vaikuttamaan reaktorikokoon ja näin riittävän pitkään viipymään, joka varmistaa sekä maksimaalisen metaanintuoton että vähäisen päästöriskin mädätteen varastoinnissa. Laitossuunnittelussa tulisi myös huomioida varastojen rakenteet, ml. kattaminen, mikä entisestään vähentää kaasumaisia päästöjä. Samalla vähennetään laitoksesta aiheutuvia hajupäästöjä. Lisäksi varastokapasiteetti on oltava riittävä mädätteen tai siitä jalostettujen jakeiden kuljetuksen ja käytön tarpeisiin. Laitoksen operaattori taas voi vaikuttaa varastointisäiliöiden täyttämisen- ja tyhjentymsyrytmiin, ja näin myös varastoinninaikaisten päästöjen muodostumiseen laitosalueella.

## 2.5 Mädätteen lannoitekäyttö

Mädätteen lannoitekäytöllä voidaan saavuttaa useita positiivisia vaikutuksia peltoon rakenteeseen ja kasvinravitsemukseen. Mädätyksessä syötemateriaalin ravinteiden kokonaispitoisuus säilyy ennallaan, mutta prosessi muuntaa orgaanisia ravinteita, kuten typpeä, kasveille paremmin käyttökelpoiseen liukoiseen muotoon (esim. Clemens ym. 2006). Mädätteen korkeampi pH, matalampi viskositeetti, suurempi liu-

koisen typen määrä ja matalampi orgaanisen typen määrä verrattuna esimerkiksi käsittelemättömään lietelantaan ovat ominaisuuksia, jotka parantavat mädätteen lannoitearvoa (Anderson-Glenna & Morken 2013). Erityisesti arvokkaan typen säilyttämiseen mädätteessä kannattaa kiinnittää huomiota jo levitystä edeltävissä toimintavaiheissa. Erityisesti varastoinnissa typpihävikin minimointi varmistaa korkeimman mahdollisen typen määrän lannoitukseen. Myös levitystekniikassa ja -ajoituksessa typpitappioiden ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) ja metaanipäästöjen minimointi on tärkeää.

## 2.5.1 Levitystekniikan merkitys

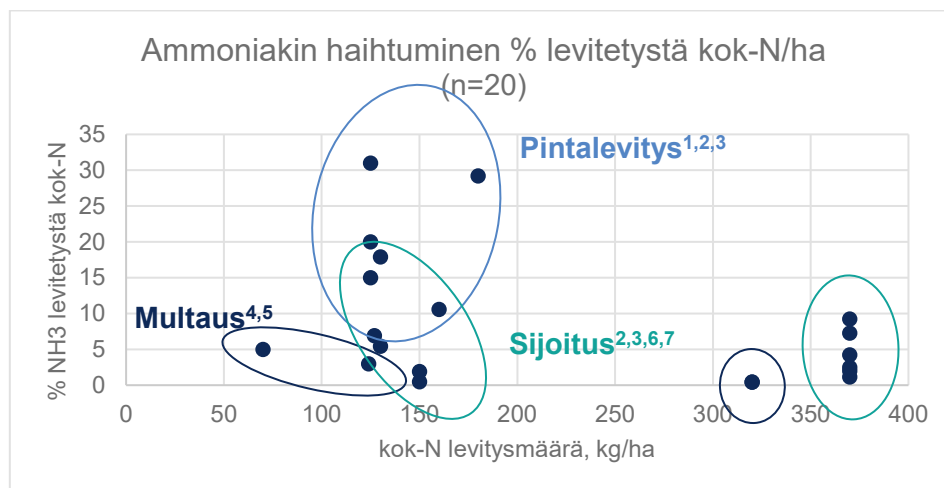
Mädätteen levityksessä käytetään samoja kalustoja kuin raakalannan levitykseenkin, ja samat periaatteet kaasumaisten päästöjen vähennysten kannalta pätevät molempiin. Parhaiten soveltuvat ja vähäpäästöisimmät tekniikat pyrkivät minimoimaan mädätteen ja ilman kosketuksen (ajan ja pinta-alan suhteen) sekä varmistamaan suoran kontaktin pintamaan kanssa (esim. Möller & Stinner 2009). Useissa tutkimuksissa pienimmät mitatut metaani- ja dityppioksidipäästöt on saavutettu mädätteen letkulevityksellä lähelle maan pintaa ja välittömällä multauksella 3–5 cm syvyyteen (esim. Wulf ym. 2002; Häfner ym. 2021). Mädätteen sijoituksella on myös etunsa, mutta toisaalta sen on havaittu edistävän anaerobisten mikro-olosuhteiden syntyä maaperässä ja lisäävän dityppioksidin päästöä verrattuna letkulevitykseen ja multaukseen (Severin ym. 2016). Vähiten suositeltava levitystekniikka on hajalevitys, jossa mädätteen suuri ilmakosketus ja epätasainen levitystulos kasvattavat huomattavasti KHK-päästöriskiä ja ravinteiden hävikkiä haihdunnan ( $\text{NH}_3$ ) ja valunnan myötä, sekä lisäävät levityksen hajuhaittoja (Crolla ym. 2013).

Mädätteen levityksen aikana ja välittömästi sen jälkeen typpi haihtuu suoraan ammoniakina ( $\text{NH}_3$ ). Myöhemmin haihdunutta tapahtuu epäsuorasti maamikrobien vaikutuksesta dityppioksidina ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Ammoniakin haihtumisen mädätteestä on havaittu olevan suurempaa kuin käsittelemättömästä lannasta mädätteen korkeamman pH:n ja suuremman ammoniumtypen osuuden vuoksi (esim. Möller & Stinner 2009). Ammoniakin haihtuminen on suurinta pintaan levitettäessä (hajalevitys tai pelkkä letkulevitys ilman multautusta), jolloin jopa 30 % mädätteen sisältämästä kokonaistypestä voi haihtua. Tämä heikentää huomattavasti mädätteen lannoitusvaikutusta (Riva ym. 2016) (Kuvio 5). Sijoituslevityksellä saavutettiin yli 69 % pienempi ammoniakin päästö (Riva ym. 2016; Zilio ym. 2021), koska levitystekniikka minimoi mädätteen kosketuksen ilman kanssa ja lisäsi levitetyn mädätteen maakontaktia. Sijoittaminen vähentää myös ympäristön levitysolosuhteiden vaikutusta, kuten korkean lämpötilan, kosteuden, aurinkon säteilyn ja tuulen vaikutusta, jotka lisäävät ammoniakin haihtumista (esim. Amon ym. 2006; Zilio ym. 2021).

Multauksella saavutetaan myös hyötyjä pintaan levitettäessä, mutta multauksen tulee tapahtua välittömästi, sillä ammoniakkin haihtuminen on suurinta ensimmäisten 4 tunnin aikana jatkuen noin 80 tuntia levityksen jälkeen (Sommer & Olesen 2000). Herr'n ym. (2019) tutkimuksen mukaan multaus kahden tunnin sisällä levityksestä vähensi ammoniakkin haihtumista lietalannasta merkittävästi (11,6 % levitetystä  $\text{NH}_4\text{-N}$  haihtui) verrattuna multaamatta levitettyyn lietteeseen (45,7 % haihtui), mutta hyöty pieni huomattavasti, jos multauksen viive ylitti kolme tuntia (15 % haihtui).

Samat periaatteet pätevät myös mädätteestä separoituihin neste- ja kuivajakeisiin. Mekaaninen separointi erottaa kuivajakeeseen vaikeammin hajotettavissa olevaa hiiltä, kun taas nestejakeeseen erottuva hiilijae on helpommin hajoavaa, vaikkakin sen osuus kokonaishiilestä on huomattavasti pienempi (Amon ym. 2006). Tämä saattaa silti lisätä levityksen jälkeistä nestejakeen metaanipäästöä verrattuna kuivajakeeseen. Märkään maahan levitetynä metaanipäästön riski on suurempi kuin kuivaan maahan levitetynä. Myös nestejakeen päästöriski levitysvaiheen ammoniakkina ja maaperän diityppioksidina on kuivajaetta korkeampi, koska mädätteen separoinnissa pääosa liukoisesta tyypeistä päättyy nestejakeeseen. Kuivajakeen ammoniakkipitoisuus on lähtökohtaisesti hyvin pieni, jolloin myös levitettäessä ammoniakkin päästöriski on huomattavasti pienempi kuin nestejakeella (esim. Holly ym. 2017).

**Kuvio 5.** Ammoniakin haihtuminen mädätteen levitystekniikasta riippuen. 1) Amon ym. 2016, 2) Nicholson ym. 2018, 3) Riva ym. 2016, 4) Holly ym. 2017, 5) Möller & Stinner 2009, 6) Verdi ym. 2019, 7) Zilio ym. 2021.



## 2.5.2 Päästöt maaperästä levityksen jälkeen

Mädätteen ja muiden orgaanista ainesta sisältävien lannoitevalmisteiden käyttö typen lähteenä lisää maan mikrobiaktiivisuutta verrattuna mineraalilannoitteisiin, koska samalla maahan lisätään myös hiiltä, mikä vähentää maahuokosten happipitoisuutta ja saattaa johtaa anaerobisiin olosuhteisiin (Giles ym. 2012). Tällaiset olosuhteet lisäävät riskiä N<sub>2</sub>O-päästöjen muodostumiselle. Levitystekniikoista erityisesti sijoituksen on todettu kasvattavan N<sub>2</sub>O-päästöä verrattuna pintalevitykseen (Wulf ym. 2002; Severin ym. 2016). Sijoituskohtaan muodostuva anaerobinen mikroympäristö on suotuisa denitrifikaatiolle, jonka yläpuolisen maakerroksen on osoitettu olevan dityppioksidin tuoton hotspot-alue (Dittert ym. 2001). Toisaalta orgaanisen aineksen lisääminen maaperään on välttämätöntä sen hyvän rakenteen ja hiilipitoisuuden ylläpitämiseksi (ks. Luku 4).

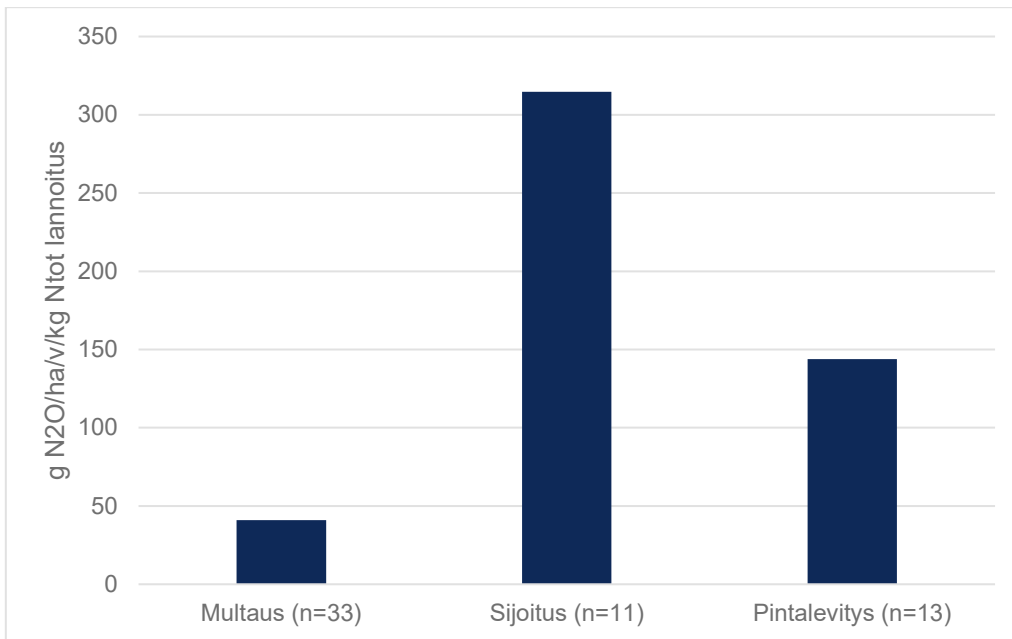
Häfner ym. (2021) tutkivat dityppioksidityypin alkuperää maaperässä mädätteen levityksen ja multauksen (5 cm) jälkeen kaksivuotisessa kokeessa. Tutkimus käsitteli myös mädätyksen eri syötteiden (mm. nurmi, maissi, sokerijuurikkaan naatit, naudan lietelanta, ruokajäte) vaikutusta levityksen KHK-päästöihin. Mädätteen <sup>15</sup>N-leimaus<sup>2</sup> osoitti, että vain 16–38 % N<sub>2</sub>O-päästöstä oli peräisin mädätteestä ja pääosa N<sub>2</sub>O:n alkuperästä oli maaperän typpivaroja, joiden denitrifikaation mädätteen levitys käynnisti. Päästö oli suurin välittömästi levityksen jälkeen. Samanaikaisesti havaittu CO<sub>2</sub>-pitoisuuden nousu viittasi mikrobiaktiivisuuden kasvuun ja denitrifikaatioon. Myös sääolosuhteet vaikuttivat merkittävästi, sillä sateisempina vuotena kumulatiivinen N<sub>2</sub>O-päästö oli lähes kaksinkertainen kuivempaan vuoteen verrattuna. Syötemateriaalilla ei tässä tutkimuksessa havaittu olevan vaikutusta N<sub>2</sub>O-päästöön, koska suurin osa päästön tyyppistä oli maaperälähtöistä.

Levitystekniikan valinnalla ei ole yksiselitteistä vaikutusta dityppioksidipäästöön. Kaasun diffuusioon maahuokosissa, hengitykseen ja helposti hajotettavan hiilen ja typen saatavuuteen vaikuttavat tekijät riippuvat levitystekniikasta, mutta myös maalajilla ja olosuhteilla (maan kosteus, lämpötila) on suuri merkitys. Pintalevityksen suuri N<sub>2</sub>O-päästö raportoiduissa tutkimuksissa ei aina riippunut yksin levitystekniikasta, vaan kohonneeseen päästöön liittyivät usein sateet ja maan lämpötilan vaihtelu (esim. Wulf ym. 2002, Kuvio 6). Vaikka sijoituksen on osoitettu lisäävän anaerobisia olosuhteita maassa, myös multauksen muokkausvaikutus saattaa lisätä maamuruista vapautuvaa, helposti mikrobien hajotettavissa olevaa hiiltä ja typpeä, ja näin lisätä maahengi-

<sup>2</sup> Isotooppileimauksella voidaan seurata leimattujen atomien reaktioita ja kulkeutumista luonnollisissa prosesseissa, tässä tapauksessa denitrifikaation tuotteena.

tystä ja vähentää happipitoisuutta. Multauksella saavutetaan mädätteen suurempi sekoittuminen maatilavuuteen ja erityisesti karkeammilla mailla tämän on havaittu vähentävän N<sub>2</sub>O-päästöjä verrattuna sijoitukseen (Severin ym. 2016).

**Kuvio 6.** Levitystekniikan vaikutus dityppioksidipäästöön levitettyä typpilannoitusta (kg N<sub>tot</sub>/ha/v) kohden.



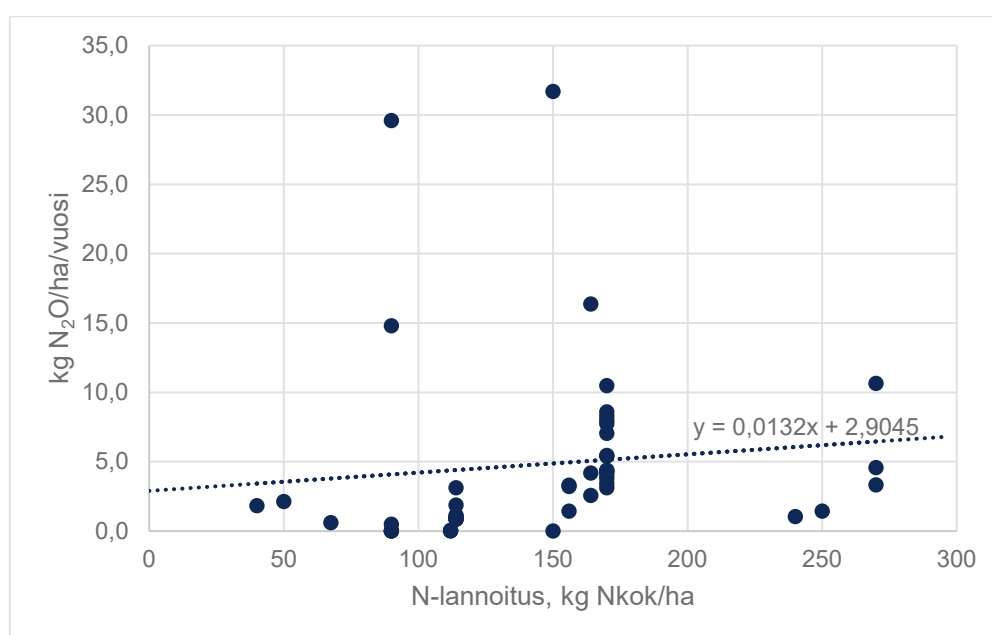
Hallitusten välinen ilmastonmuutospaneeli (IPCC) on esittänyt dityppioksidipäästön tausta-arvoksi viljelymailta 1 kg N<sub>2</sub>O-N/ha vuodessa sekä typpilannoituksesta johtuvan päästökertoimen 0,01 eli 1 % kokonaistyppilannoituksesta (IPCC 2019). Tässä kirjallisuuskatsauksessa laskettiin tarkastellun aineiston perusteella vastaavasti mädätteen typpilannoitusvaikutukselle päästökerroin 0,0132 eli 1,32 % mädätteen sisältämästä kokonaistypestä (Kaava 1, Kuvio 7). Tausta-arvoa ei voitu määrittää, sillä kirjallisuuskatsauksen aineistossa nollalannoituksen mittaustuloksia ei ollut kattavasti saatavilla. IPCC:n päästökerrointa suurempi arvo saattaa johtua aineiston pienuudesta (n=48 mittausta) ja kirjallisuuskatsauksen tutkimusten maantieteellisestä sijoittumisesta pääosin Eurooppaan, kun IPCC:n luvut on annettu globaalilla tasolla. Pohjoisissa olosuhteissa talviaikaiset dityppioksidipäästöt voivat kattaa 41 % vuosipäästöstä (Regina ym. 2013). Useissa tämän katsauksen tutkimuksissa on myös esitetty vuotta lyhyemmän mittausjakson tuloksia, mikä suurentaa raportoitua päästöä, koska välittömästi levityksen jälkeen päästö on suurimmillaan laskien myöhemmin kohti taustapitoisuutta. On kuitenkin huomioitavaa, että jotkut mädätteen ominaisuuksista, kuten korkeampi pH, matalampi viskositeetti ja suurempi liukoisien typen määrä voivat lisätä



sen päästövaikutusta typpilannoitteena verrattuna esimerkiksi käsittelemättömään lietalantaan. Myös edellä keskustellut asiat, kuten levitystekniikka, sääolosuhteet ja maaperän ominaisuudet tuovat laskennalliseen tausta-arvoon ja päästökertoimeen epävarmuutta.

$$\text{N}_2\text{O-N} = 0,0132 \cdot \text{N-lannoitus (kg N}_{\text{kok}}/\text{ha/v)} \quad (1)$$

**Kuvio 7.** Dityppioksidin päästökertoimen määrittäminen mädätteen käytölle typpilannoitteena.



Hiilidioksidin (CO<sub>2</sub>) kohonnut pitoisuus mädätteen levityksen jälkeen johtuu sekä maan mekaanisen muokkaamisen (esim. Severin ym. 2016) että mädätteen matalan C/N-suhteen laukaisemasta mineralisaation kiihtymisestä, mikä saattaa aiheuttaa myös maan luontaisen hiilivaraston hajoamista (eng. priming effect) (esim. Häfner ym. 2021; Czubaszek & Wysocka-Czubaszek 2018). Mädätteen levittämisen jälkeen hiilidioksidin vapautumisen on havaittu olevan suurempi mailta, joihin on aikaisempina vuosina levitetty lantaa tai muuta orgaanista materiaalia tai jätetty kasvinjäänteitä, joiden tiedetään kasvattavan maan mikrobien määrää (Collins ym. 2011; Rosace ym. 2020).

Metaanin (CH<sub>4</sub>) päästöriski on suurin mädätteen varastoinnin aikana ja itse levityksen vaikutuksen on todettu olevan vähäinen, eikä levityksen jälkeinen metaanipäästö juurikaan eroa mädätteen tai käsittelemättömän lannan välillä (Holly ym. 2017). Kuitenkin olosuhteiden vaikutus on metaanille merkittävä, ja märkään maahan sijoittamalla levitetty mädäte lisäsi metaanipäästöä huomattavasti verrattuna kuiviin olosuhteisiin

(Wulf ym. 2002). Samassa tutkimuksessa käsittelemätön lietelanta aiheutti kuitenkin mädätettä suuremman metaanipäästön, sillä se sisälsi enemmän helposti mikrobien toimesta hajoavaa orgaanista ainesta. Severin ym. (2016) raportoivat korkeammasta metaanipitoisuudesta päästömittauksessa mädätteen suuremmissa sijoitusyvytyksessä, kun matalammalle sijoitetun mädätteen päästö oli pienempi. Edellä mainitut tutkimukset vahvistavat maan hyvän rakenteen edesauttavan hapellisten olosuhteiden säilymistä KHK-päästöjen hillitsemisessä.

Taulukossa 5 on esitetty kirjallisuudesta koottuja mädätteen levityksen kaasumaisten päästöjen mittauksia. Erilaisten tutkimusten yhteenveto on vaikeaa, sillä osa kirjallisuuskatsauksen tutkimuksista oli toteutettu laboratorio-olosuhteissa ja osa kentällä. Suuri vaihteluväli päästömittausten tuloksissa saattaa johtua erilaisista koeolosuhteista eikä lukuarvoja voi suoraan verrata perehtymättä taustalla olevaan tutkimukseen.

**Taulukko 5.** Mädätteen levityksen kaasumaiset päästöt kirjallisuudessa.

Päästö	Yksikkö	Minimi	Maksimi	Keski-arvo	Mediaani	Mittaus-jaksoja (lkm)	Lähteet
CH <sub>4</sub>	mg/ha/h/kg kuiva-ainetta	0,0	3,8	0,44	0,0004	19	1–11
N <sub>2</sub> O	g/ha/vuosi/kg typpilannoitusta	0,003	1119	120	25	62	1,3,4,5,8–24
NH <sub>3</sub>	% kok. typpilannoituksesta	0,4	31	9	5	20	6,13,18,24–27

1) Collins ym. 2011, 2) Czubaszek & Wysocka-Czubaszek 2018, 3) Dietrich ym. 2020, 4) Eickenscheidt ym. 2014, 5) Heintze ym. 2017, 6) Holly ym. 2017, 7) Odlare ym. 2012, 8) Pampillon-Gonzales ym. 2017, 9) Pezzolla ym. 2012, 10) Rosace ym. 2020, 11) Wulf ym. 2002, 12) Abubaker ym. 2013, 13) Amon ym. 2006, 14) Häfner ym. 2021, 15) Johansen ym. 2013, 16) Köster ym. 2011, 17) Köster ym. 2015, 18) Möller & Stinner 2009, 19) Rodhe ym. 2015, 20) Senbayram ym. 2009, 21) Severin ym. 2016, 22) Sängler ym. 2011, 23) van Nguyen ym. 2017, 24) Verdi ym. 2019, 25) Nicholson ym. 2018, 26) Riva ym. 2016, 27) Zilio ym. 2021, 28) Chen ym. 2011

## Lähteet

- Abubaker, J., Odlare, M. & Pell, M. 2013. Nitrous oxide production from soils amended with biogas residues and cattle slurry. *Journal of Environmental Quality*, 42(4): 1046-1058. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0247>
- Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T. & Zechmeister-Boltenstern, S. 2006. Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems &*

- Environment, Mitigation of Greenhouse Gas Emissions from Livestock Production 112: 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.030>
- Anderson-Glenna M. & Morken J. 2013. Greenhouse gas emissions from on-farm digestate storage facilities. Tel-Tek report no. 2213040-1, Norway.
- Auburger, S., Jacobs, A., Märlander, B. & Bahrs, E. 2016 Economic optimization of feedstock mix for energy production with biogas technology in Germany with a special focus on sugar beets – Effects on greenhouse gas emissions and energy balances. *Renewable Energy* 89: 1–11.
- Avfall Sverige 2016. Rapportering av data från metanmätningar enligt egenkontroll metanutsläpp – frivilligt åtagande 2007–2015. Rapport 2016:18. Avfall Sverige Utveckling. <https://www.svenskvatten.se/globalassets/avlopp-och-miljo/uppstomsarbete-och-kretslopp/biogas/2016-18-rapportering-av-data-fran-metanmatningar-enligt-egenkontroll-metanutslapp--frivilligt-atagande-2007-2015.pdf>
- Awiszus, S., Meissner, K., Reyer, S. & Müller, J. 2018a. Utilization of digestate in a convective hot air dryer with integrated nitrogen recovery. *Landtechnik* 73, 106–114. <https://doi.org/10.1515/lt.2018.3187>
- Awiszus, S., Meissner, K., Reyer, S. & Müller, J. 2018b. Ammonia and methane emissions during drying of dewatered biogas digestate in a two-belt conveyor dryer. *Bioresource Technology* 247, 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.099>
- Bakkaloglu, S., Lowry, D., Fisher, R.E., France, J.L., Brunner, D., Chen, H. & Nisbet, E.G. 2021. Quantification of methane emissions from UK biogas plants. *Waste Management* 124: 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.011>
- Baldé, H., VanderZaag, A.C., Burt, S.D., Wagner-Riddle, C., Crolla, A., Desjardins, R.L. & MacDonald, D.J. 2016. Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology* 216: 914–922. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.031>
- Baldé, H., VanderZaag, A.C., Burt, S.D., Wagner-Riddle, C., Evans, L., Gordon, R., Desjardins, R.L. & MacDonald, J.D. 2018. Ammonia emissions from liquid manure storages are affected by anaerobic digestion and solid-liquid separation. *Agricultural and Forest Meteorology* 258: 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.036>
- Balsari, P., Dinuccio, E. & Gioelli, F. 2013. A floating coverage system for digestate liquid fraction storage. *Bioresource Technology* 134: 285–289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.021>
- Baral, K.R., Jégo, G., Amon, B., Bol, R., Chantigny, M.H., Olesen, J.E. & Petersen, S.O. 2018. Greenhouse gas emissions during storage of manure and digestates: Key role of methane for prediction and mitigation. *Agricultural Systems* 166: 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.009>
- Berg, W., Salamat, R., Scaar, H. & Mellmann, J. 2021. Investigation of nitrogen loss during laboratory scale fixed-bed drying of digestate. *Waste Management* 129: 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.003>
- Chen, R., Senbayram, M., Lin, X. & Dittert, K. 2011. Origin of positive  $\delta^{13}\text{C}$  of emitted  $\text{CO}_2$  from soils after application of biogas residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(10): 2194–2199. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.07.003>
- Clemens, J., Trimborn M., Weiland, P. & Amon, B. 2006. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112: 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.016>
- Collins, H.P., Alva, A.K., Streubel, J.D., Fransen, S.F., Frear, C., Chen, S., Kruger, C. & Granatstein, D. 2011. Greenhouse gas emissions from an irrigated silt loam soil

- amended with anaerobically digested dairy manure. *Soil Science Society of America Journal* 75: 2206–2216. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0360>
- Crolla, A., Kinsley, C. & Pattey, E. 2013. Land application of digestate. in: *The biogas handbook. Science, production and application. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52.*
- Czubaszek, R. & Wysocka-Czubaszek, A. 2018. Emissions of carbon dioxide and methane from fields fertilized with digestate from an agricultural biogas plant. *International Agrophysics* 32(1): 29. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0087>
- Dietrich, M., Fongen, M. & Foereid, B. 2020. Greenhouse gas emissions from digestate in soil. *International journal of recycling organic waste in agriculture* 9(1): 1–19. <https://dx.doi.org/10.30486/ijrowa.2020.1885341.1005>
- Dittert, K., Bol, R., King, R., Chadwick, D. & Hatch, D. 2001. Use of a novel nitrification inhibitor to reduce nitrous oxide emission from 15N-labelled dairy slurry injected into soil. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 15: 1291–1296. <https://doi.org/10.1002/rcm.335>
- Eickenscheidt, T., Freibauer, A., Heinichen, J., Augustin, J. & Drösler, M. 2014. Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions affected by N availability from grasslands on drained fen peatlands and associated organic soils. *Biogeosciences*, 11(22): 6187-6207. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6187-2014>
- Ericsson, N., Nordberg, Å. & Berglund, M. 2020. Biogas plant management decision support – A temperature and time-dependent dynamic methane emission model for digestate storages. *Bioresource Technology Reports* 11: 100454. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100454>
- Flesch, K., Desjardins, R.L. & Worth, D. 2011. Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester. *Biomass & Bioenergy* 35: 3927–3935, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.009>
- Fredenslund A.M., Hinge, K., Holmgren, M.A., Rasmussen, S.G. & Scheutz, C. 2018. On-site and ground-based remote sensing measurements of methane emissions from four biogas plants: A comparison study. *Bioresource Technology* 270: 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.080>
- Giles, M., Morley, N., Baggs, E.M. & Daniell, T.J. 2012. Soil nitrate reducing processes—drivers, mechanisms for spatial variation, and significance for nitrous oxide production. *Frontiers in Microbiology*. 3. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00407>
- Gioelli, F., Dinuccio, E. & Balsari, P. 2011. Residual biogas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction. *Bioresource Technology* 102, 10248–10251. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.076>
- Groth, A., Maurer, C., Reiser, M. & Kranert, M. 2015. Determination of methane emission rates on a biogas plant using data from laser absorption spectrometry. *Bioresource Technology* 178: 359–361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.112>
- Heintze, G., Eickenscheidt, T., Schmidhalter, U. & Drosler, M. 2017. Influence of soil organic carbon on greenhouse gas emission potential after application of biogas residues or cattle slurry: results from a pot experiment. *Pedosphere* 27(5): 807–821. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60388-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60388-6)
- Herr, C., Mannheim, T., Müller, T. & Ruser, R. 2019. Effect of cattle slurry application techniques on N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions from a loamy soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 182(6): 964–979. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800376>

- Holly, M.A., Larson, R.A., Powell, J.M., Ruark, M.D. & Aguirre-Villegas, H. 2017. Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239: 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
- Holmgren, M.A. 2012. Sammanställning av mätningar inom frivilligt åtagande 2007–2012. Avfall Sverige, Rapport U2012:15. Avfall Sverige Utveckling. [https://www.avfall sverige.se/aktuellt/nyhetsarkiv/artikel/sammanstallning-av-matningar-inom-frivilligt-atagande-2007-2012/index.php?eID=tx\\_securedownloads&p=42&u=0&g=0&t=1646483757&hash=230870a7df0e319abe1373eecf4ec7b429dc7c43&file=/fileadmin/user\\_upload/Rapporter/2012/U2012-15.pdf](https://www.avfall sverige.se/aktuellt/nyhetsarkiv/artikel/sammanstallning-av-matningar-inom-frivilligt-atagande-2007-2012/index.php?eID=tx_securedownloads&p=42&u=0&g=0&t=1646483757&hash=230870a7df0e319abe1373eecf4ec7b429dc7c43&file=/fileadmin/user_upload/Rapporter/2012/U2012-15.pdf)
- Hrad, M., Piringur, M. & Huber-Humer, M. 2015. *Bioresource Technology* 191: 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.016>.
- Häfner, F., Ruser, R., Claß-Mahler, I. & Möller, K. 2021. Field application of organic fertilizers triggers N<sub>2</sub>O emissions from the soil N pool as indicated by <sup>15</sup>N-labeled digestates. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4: 297. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.614349>
- IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Jacobs, A., Auburger, S., Bahrs, E., Brauer-Siebrecht, W., Christen, O., Götze, P., Koch, H.-J., Rücknagel, J. & Märländer, B. 2017. Greenhouse gas emission of biogas production out of silage maize and sugar beet – An assessment along the entire production chain. *Applied Energy* 190: 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.117>
- Jensen, M.B., Møller, J., Mønster, J. & Scheutz, C. 2017. Quantification of greenhouse gas emissions from a biological waste treatment facility. *Waste Management* 67: 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.033>
- Johansen, A., Carter, M.S., Jensen, E.S., Hauggard-Nielsen, H. & Ambus, P. 2013. Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O. *Applied Soil Ecology* 63: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.09.003>
- Kristensen, P.G., Jensen, J.K., Nielsen, M. & Illerup, J.B. 2004. Emission factors for gas fired CHP units < 25 MW. [http://www.neri.dk/1\\_viden/2\\_Miljoetilstand/3\\_luft/4\\_adaei/doc/EmissionfactorsforgasfiredCHPunits.pdf](http://www.neri.dk/1_viden/2_Miljoetilstand/3_luft/4_adaei/doc/EmissionfactorsforgasfiredCHPunits.pdf)
- Kvist, T. & Aryal, N. 2019. Methane loss from commercially operating biogas upgrading plants. *Waste Management* 87: 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.023>
- Köster, J.R., Cardenas, L.M., Bol, R., Lewicka-Szczebak, D., Senbayram, M., Well, R., Giesemann, A. & Dittert, K. 2015. Anaerobic digestates lower N<sub>2</sub>O emissions compared to cattle slurry by affecting rate and product stoichiometry of denitrification—An N<sub>2</sub>O isotopomer case study. *Soil Biology and Biochemistry* 84: 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.021>
- Köster, J.R., Cárdenas, L., Senbayram, M., Bol, R., Well, R., Butler, M., Mühling, K.H. & Dittert, K. 2011. Rapid shift from denitrification to nitrification in soil after biogas residue application as indicated by nitrous oxide isotopomers. *Soil Biology and Biochemistry* 43(8): 1671–1677. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.004>
- Liebetrau, J., Clemens, J., Cuhls, C., Hafermann, C., Firehe, J., Weiland, P. & Daniel-Gromke, J. 2010. Methane emissions from biogas-producing facilities within the

- agricultural sector. *Engineering in Life Sciences* 10: 595–599.  
<https://doi.org/10.1002/elsc.201000070>
- Liebetrau, J., Reinelt, T., Clemens, J., Hafermann, C., Friehe J. & Weiland, P. 2013. Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. *Water science and technology* 67(6):1370–1379.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2013.005>
- Majumder, R., Livesley, S.J., Gregory, D. & Arndt, S.K. 2014. Biosolid stockpiles are a significant point source for greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management* 143: 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.016>
- Maldaner, L., Wagner-Riddle, C., VanderZaag, A.C., Gordon, R. & Duke, C. 2018. Methane emissions from storage of digestate at a dairy manure biogas facility. *Agricultural and Forest Meteorology, Greenhouse gas and ammonia emissions from livestock production* 258: 96–107.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.184>
- Maurer, C. & Müller, J. 2012. Ammonia (NH<sub>3</sub>) emissions during drying of untreated and dewatered biogas digestate in a hybrid waste-heat/solar dryer. *Engineering in Life Sciences* 12: 321–326. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100113>
- Mustonen, K., Deviatkin, I., Havukainen, J. & Horttanainen, M. 2018. Nitrogen behaviour during thermal drying of mechanically dewatered biosludge from pulp and paper industry. *Environmental Technology* 39: 1052–1060.  
<https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1319879>
- Möller, K. & Stinner, W. 2009. Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European Journal of Agronomy* 30: 1–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.06.003>
- van Nguyen, Q., Jensen, L.S., Bol, R., Wu, D., Triolo, J.M., Vazifekhoran, A.H. & Bruun, S. 2017. Biogas digester hydraulic retention time affects oxygen consumption patterns and greenhouse gas emissions after application of digestate to soil. *Journal of Environmental Quality* 46(5): 1114–1122.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2017.03.0117>
- Nicholson, F.A., Bhogal, A., Rollett, A., Taylor, M. & Williams, J.R. 2018. Precision application techniques reduce ammonia emissions following food-based digestate applications to grassland. *Nutr Cycl Agroecosyst* 110: 151–159.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-017-9884-4>
- Nielsen, D.Aa., Nielsen, L.P., Schramm, A. & Revsbech, N.P. 2010. Oxygen distribution and potential ammonia oxidation in floating, liquid manure crusts. *Journal of Environmental Quality* 39: 1813–1820.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2009.0382>
- Odlare, M., Abubaker, J., Lindmark, J., Pell, M., Thorin, E. & Nehrenheim, E. 2012. Emissions of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from agricultural soils amended with two types of biogas residues. *biomass and bioenergy* 44: 112–116.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.006>
- Pampillon-Gonzalez, L., Marco, L.G., Ruíz-Valdiviezo, V.M., Franco-Hernandez, O., Fernandez-Luqueno, F., Paredes-Lopez, O., Hernández, G. & Dendooven, L. 2017. Greenhouse gas emissions and growth of wheat cultivated in soil amended with digestate from biogas production. *Pedosphere* 27(2): 318–327.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60319-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60319-9)
- Pantelopoulos, A., Magid, J. & Jensen, L.S. 2016. Thermal drying of the solid fraction from biogas digestate: Effects of acidification, temperature and ventilation on nitrogen content. *Waste Management* 48: 218–226.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.008>



- Perazzolo, F., Mattachini, G., Tambone, F., Misselbrook, T. & Provolò, G. 2015. Effect of mechanical separation on emissions during storage of two anaerobically codigested animal slurries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 207: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.023>
- Petersen, S.O., Amon, B. & Gattinger, A. 2005. Methane oxidation in slurry storage surface crusts. *Journal of Environmental Quality* 34: 455–461. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.455>
- Petersen, S.O., Dorno, N., Lindholm, S., Feilberg, A. & Eriksen, J. 2013. Emissions of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> and odorants from pig slurry during winter and summer storage. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 95: 103–113. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9551-3>
- Pezzolla, D., Bol, R., Gigliotti, G., Sawamoto, T., López, A. L., Cardenas, L. & Chadwick, D. 2012. Greenhouse gas (GHG) emissions from soils amended with digestate derived from anaerobic treatment of food waste. *Rapid communications in mass spectrometry* 26(20): 2422–2430. <https://doi.org/10.1002/rcm.6362>
- Regina, K., Kaseva, J. & Esala, M. 2013. Emissions of nitrous oxide from boreal agricultural mineral soils—statistical models based on measurements. *Agriculture, ecosystems & environment* 164: 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.09.013>
- Reinelt, T., Delre, A., Westerkamp, T., Holmgren, M. & Liebetrau, J. 2017. Comparative use of different emission measurements to determine emissions from a biogas plant. *Waste Management* 68: 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.053>
- Reinelt, T. & Liebetrau, J. 2020. Monitoring and mitigation of methane emissions from pressure relief valves of a biogas plant. *Chemical Engineering & Technology* 43(1): 7–18. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900180>
- Reinelt, T., Liebetrau, J. & Nelles, M. 2016. Analysis of operational methane emissions from pressure relief valves from biogas storages of biogas plants. *Bioresource technology*, 217, 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.073>
- Reinelt, T., McCabe, B.K., Hill, A., Harris, P., Baillie, C. & Liebetrau, J. 2022. Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities. *Waste Management* 137: 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.012>
- Riva, C., Orzi, V., Carozzi, M., Acutis, M., Boccasile, G., Lonati, S., Tambone, F., D'Imporzano, G. & Adani, F. 2016. Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of the Total Environment* 547: 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156>
- Rodhe, L.K.K., Ascue, J., Willén, A., Persson, B.V. & Nordberg, Å. 2015. Greenhouse gas emissions from storage and field application of anaerobically digested and non-digested cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199: 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.004>
- Rosace, M.C., Veronesi, F., Briggs, S., Cardenas, L.M. & Jeffery, S. 2020. Legacy effects override soil properties for CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O but not CH<sub>4</sub> emissions following digestate application to soil. *GCB Bioenergy* 12: 445–457. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12688>
- Samuelsson, J., Delre, A., Tumlin, S., Hadi, S., Offerle, B. & Scheutz, C. 2018. Optical technologies applied alongside on-site and remote approaches for climate gas emission quantification at a wastewater treatment plant. *Water Research* 131: 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.018>

- Scheutz, C. & Fredenslund, A.M. 2019. Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. *Waste Management* 97: 38–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>
- Senbayram, M., Chen, R., Mühling, K.H. & Dittert, K. 2009. Contribution of nitrification and denitrification to nitrous oxide emissions from soils after application of biogas waste and other fertilizers. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry* 23(16): 2489–2498.  
<https://doi.org/10.1002/rcm.4067>
- Severin, M., Fuß, R., Well, R., Hähndel, R. & Van den Weghe, H. 2016. Greenhouse gas emissions after application of digestate: short-term effects of nitrification inhibitor and application technique effects. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62(7): 1007–1020. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1110575>
- Sommer, S.G. & Olesen, J.E. 2000. Modelling ammonia volatilization from animal slurry applied with trail hoses to cereals. *Atmospheric Environment* 34(15): 2361–2372. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00442-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00442-2)
- Sänger, A., Geisseler, D. & Ludwig, B. 2011. Effects of moisture and temperature on greenhouse gas emissions and C and N leaching losses in soil treated with biogas slurry. *Biology and Fertility of Soils* 47(3): 249–259.  
<https://doi.org/10.1007/s00374-010-0528-y>
- Tauber, J., Parravicini, V., Svardal, K. & Krampe, J. 2019. Quantifying methane emissions from anaerobic digesters. *Water Science & Technology* 80(9): 1654–1661. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.415>
- VanderZaag, A.C., Baldé, H., Crolla, A., Gordon, R.J., Ngwabie, N.M., Wagner-Riddle, C., Desjardins, R. & MacDonald, J.D. 2018. Potential methane emission reductions for two manure treatment technologies. *Environmental Technology* 39: 851–858. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1313317>
- Verdi, L., Kuikman, P.J., Orlandini, S., Mancini, M., Napoli, M. & Dalla Marta, A. 2019. Does the use of digestate to replace mineral fertilizers have less emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>?. *Agricultural and Forest Meteorology* 269: 112–118.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.004>
- Vergote, T.L.I., Vanrolleghem, W.J.C., Van der Heyden, C., De Dobbelaere, A.E.J., Buysse, J., Meers, E. & Volcke, E.I.P. 2019. Model-based analysis of greenhouse gas emission reduction potential through farm-scale digestion. *Biosystems Engineering* 181: 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.005>
- Vergote, T.L.I., Bodé, S., De Dobbelaere, A.E.J., Buysse, J., Meers, E. & Volcke, E.I.P. 2020. Monitoring methane and nitrous oxide emissions from digestate storage following manure mono-digestion. *Biosystems Engineering* 196: 159–171.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.011>
- Wulf, S., Maeting, M. & Clemens, J. 2002. Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: II. Greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Quality* 31(6): 1795–1801. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1795>
- Zilio, M., Orzi, V., Chiodini, M.E., Riva, C., Acutis, M., Boccasile, G. & Adani, F. 2020. Evaluation of ammonia and odour emissions from animal slurry and digestate storage in the Po Valley (Italy). *Waste Management* 103: 296–304.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.038>
- Zilio, M., Pigoli, A., Rizzi, B., Geromel, G., Meers, E., Schoumans, O., Giordano, A. & Adani, F. 2021. Measuring ammonia and odours emissions during full field digestate use in agriculture. *Science of The Total Environment* 782: 146882.  
<https://doi.org/10.2134/jeq2002.1795>



de Zwart, M., van Dijk, G. & Klimstra, J. 2012. Methane emissions from gas engines driving combined heat and power installations. *Journal of Integrative Environmental Sciences* 9: 113-125.  
<https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.691885>

## 3 Päästömittaukset

Hannu Haapala (Agrinnotech), Kristiina Lång (Luke), Erika Winqvist (Luke) & Johanna Laakso (Luke)

### 3.1 Mittauskohteiden kuvaus

Päästömittauksia tehtiin kahdella maatilojen biokaasulaitoksella vuosina 2021 ja 2022. Toinen tutkituista laitoksista käyttää märkämädätysteknologiaa ja toinen kuivämädätystä.

Tutkittu märkämädätyslaitos toimii lypsykarjan pihattonavetan yhteydessä. Laitoksella käsitellään syötemateriaaleja noin 7 000 tonnia vuodessa. Lypsykarjapihatossa muodostuvaa lietelantaa syötetään päivittäin noin 20 t/vrk sekä nuorkarjan olkikuivittettua kuivikelantaa noin 1 t/vrk ja ylijäämärehua 200–300 kg/vrk. Reaktoritilavuus on 600 m<sup>3</sup> ja viipymäaika 30 vrk. Reaktorin jälkeen mädäte ohjataan ruuvipuristimelle, jossa se separoidaan neste- ja kuivajakeiksi (Taulukko 6). Nestejäte (6400 t/v) pumpataan avoimeen, pinta-alaltaan 2000 m<sup>2</sup> varastosäiliöön ja käytetään lannoitteena. Kuivajäte (500 t/v) ajetaan katettuun varastoamaan, josta se käytetään navetassa kuivikkeena. Maatila käyttää itse laitoksen tuottaman energian sähköinä (365 MWh) ja lämpönä (750 MWh), yhteensä 1250 MWh vuonna 2021.

Tutkittu kuivämädätykseen perustuva biokaasulaitos koostuu kahdesta 1000 m<sup>3</sup> reaktorisiilosta, varastointialueesta, suotonestesäiliöstä, kahdesta kaasuvälikammarista, teknisen tilan kontista ja kaasun vesipesulaitteistosta. Laitos käyttää pääsyötteenä viherlannoitusnurmia noin 1800 t ja lisäsyötteenä hevosen lantaa noin 220 t ja kananlantaa 120 t vuodessa. Syötteiden kuiva-ainepitoisuus vaihtelee välillä 25–35 %. Tutkitun laitoksen kahden reaktorin viipymä on 4–5 kuukautta. Panokset vaihdetaan vuorottelevassa syklissä, jotta biokaasuntuotto olisi tasaista, ja vuosittain panoksia on 3–4 riippuen biokaasun menekistä. Laitoksen vuosituotanto vuonna 2021 oli 930 MWh. Osa raakakaasusta johdetaan puolen kilometrin päähän tilakeskukseen, jossa sitä käytetään tuotantorakennusten lämmitykseen. Biokaasun energialla lämmitetään myös biokaasuprosessia. Suurin osa biokaasusta puhdistetaan laitoksella ja johdetaan paineistusyksikön kautta julkiselle tankkausasemalle tilan yhteyteen. Biometaania liikenteeseen tuotettiin noin 770 MWh vuonna 2021.

**Taulukko 6.** Päästömittaushuoneiden toimineiden biokaasulaitosten biokaasun tuotto (v. 2021) ja mädätteiden ominaisuuksia.

Laitos	Biokaasun tuotto, MWh		Kuiva-aine, %	Org. aines, g/kg ka	NH <sub>4</sub> -N, kg/tn	Kok-N, kg/tn	Kok-N, %
Märkämädätys	1250	Mädätteen kuivajae	46,3	406	1,0	9,7	0,97
		Mädätteen nestejake	2,5	16	1,5	2,5	0,25
Kuivämädätys	930	Mädäte	24,8	208	1,4	7,4	0,74

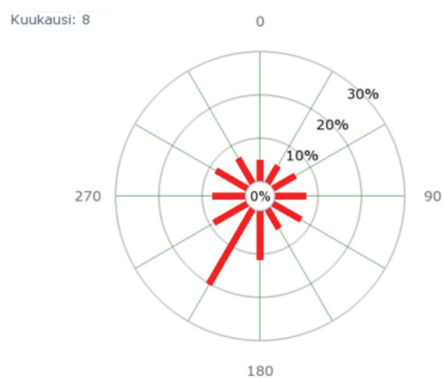
## 3.2 Märkämädätyslaitos

Märkämädätyslaitoksen päästöjä mitattiin laitoksen yhteydessä sijaitsevan mädätteen separoidun nestejakeen varastosäiliöstä sekä kesällä (23.8.2021) että talvella (4.-6.3.2022). Kesämittauksen keskilämpötila oli 10,7 °C ja talvimittauksen -1,3 °C.

### 3.2.1 Mittausmenetelmät

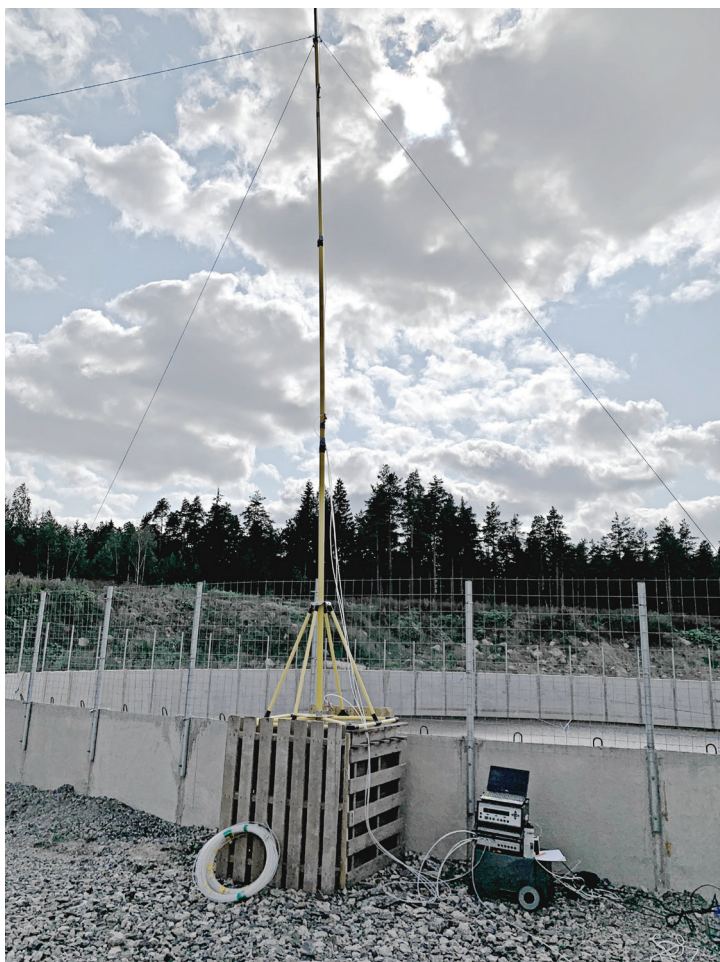
Märkämädätyskokeen päästö mitattiin varastosäiliön vierestä mittausmastolla (Haapala & Hellstedt 2019), joka sijoitettiin tuulen alapuolelle. Mittausmaston sijoitus valittiin tilastollisen tuuliruusun (Kuvio 8) avulla ja varmistettiin jakson sääennusteen mukaisesti. Lisäksi tuulen suuntaa mitattiin paikan päällä.

**Kuvio 8.** Mittauskohteen tuuliruusu, jonka perusteella masto sijoitettiin tuulen alle pohjoiskoilliseen mitattavasta säiliöstä (tähti).



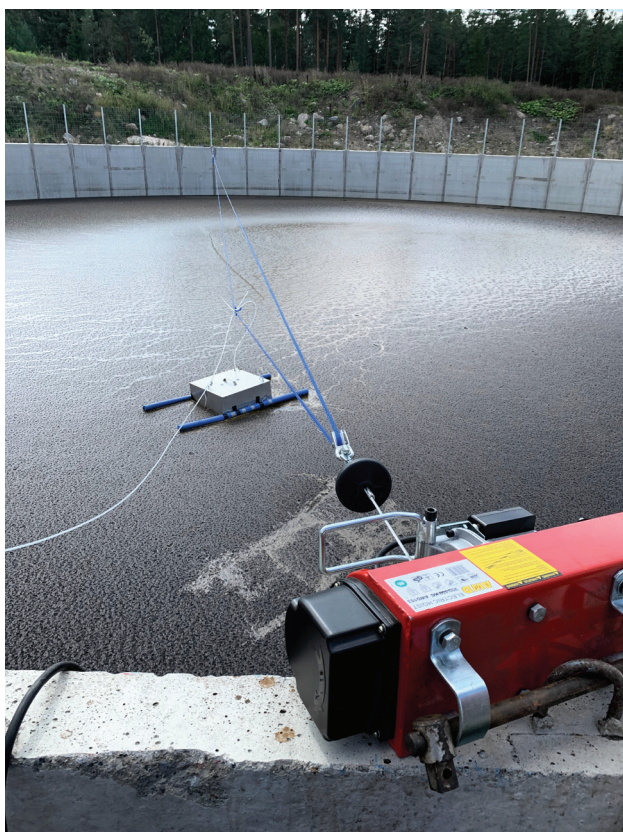
Mastoon kiinnitettiin fotoakustisen päästöanalysaattorin (Innova 1412 Gas Monitor, Innova 1409 Multipoint Sampler, LumaSense Technologies, DK) imuletkut neljälle korkeudelle. Menetelmässä mittauspisteiden korkeudet lasketaan säiliön koon ja maston etäisyyden perusteella siten, että kukin piste edustaa yhtä suurta ilmatilavuutta. Tässä tapauksessa korkeudet olivat 128, 386, 781 ja 1319 cm maanpinnan tasosta. Letkut liitettiin kukin omaan analysaattorin kanavaansa (Kuvio 9).

**Kuvio 9.** Mittausmasto sijoitettuna mittauskohteeseen nähden tuulen alapuolelle. Mastossa on neljä mittauspistettä, joiden korkeudet riippuvat kohteen koosta ja etäisyydestä. Mittauspisteisiin asetetut mittausletkut liitettiin fotoakustiseen analysaattoriin.



Mastomittauksen lisäksi kokeiltiin kammion menetelmää, jossa mittauskammio laskettiin säiliöön nestejakeen pinnalle kahdeksaan mittauspisteeseen ja kammion kautta johdettiin myös imuletku samalle analysaattorille (Kuvio 10). Kammion menetelmässä kukin mittauspiste edustaa tiettyä pinta-alaa, joten tulos lasketaan painotettuna keskiarvona (Taulukko 7).

**Kuvio 10.** Mittauskammiomenetelmä, jossa kammiolaskettiin säiliön kellukkeiden varaan kahdeksaan mittauspisteeseen. Kammiosta johdettiin imuletku analysaattoriin.



**Taulukko 7.** Kammiomittauspisteiden sijainti nestejakeen varastosäiliössä (Ø 26 m).

Mittauspiste	Reunasta, m	Edustaa, m <sup>2</sup>	%
1	1,63	116	21,9
2	4,88	83	15,6
3	8,13	50	9,4
4	11,38	17	3,1
5	14,63	17	3,1
6	17,88	50	9,4
7	21,13	83	15,6
8	24,38	116	21,9
Yhteensä	-	531	100,0



### 3.2.2 Päästön laskenta

Analysaattorin antama tulos on pitoisuus, joka ilmaistaan yksikössä ppm. Päästö halutaan kuitenkin saada painoyksikköinä. Kun tiedetään laitoksen biokaasun ja metaanin tuotto, voidaan päästö laskea edelleen prosentteina tuotetusta metaanimäärästä.

Pitoisuuden lisäksi päästöön vaikuttavat aika (havaintojakson pituus), kaasun moolipaino sekä vallitseva lämpötila, ilmanpaine ja tuulen nopeus.

Kaasun moolitilavuus ( $V_m$ ) lasketaan seuraavan yhtälön mukaan, jossa  $R$  on yleinen kaasuvakio ( $\approx 8,314 \text{ J/(mol K)}$ ),  $T$  = lämpötila ja  $p$  = paine:

$$V_m = \frac{RT}{p}$$

Kun tiedetään pitoisuus (ppm) ja moolitilavuus, saadaan kuutiometrin sisältämä moolimäärä. Tästä päästään moolimassan avulla kaasun massa kuutiometrissä. Tuulen nopeuden kautta päästään edelleen virtausmäärään ja päästön määrään.

Saadut päästömittaus tulokset laskettiin painoyksikköinä (g/h, g). Näin saatiin mittausjakson päästö. Siitä ja kaasun tuotosta laskettiin prosessin kokonaispäästö.

Olosuhdetekijöistä seurattiin em. tuulen suunnan ja nopeuden lisäksi ilman lämpötilaa ja ilmanpainetta, jotka vaikuttavat päästön laskentaan. Tiedot kerättiin ilmatieteen laitoksen lähimmältä viralliselta mittausasemalta. Tuulen nopeutta ja suuntaa seurattiin lisäksi paikan päällä.

### 3.2.3 Märkämädätyslaitoksen tulokset

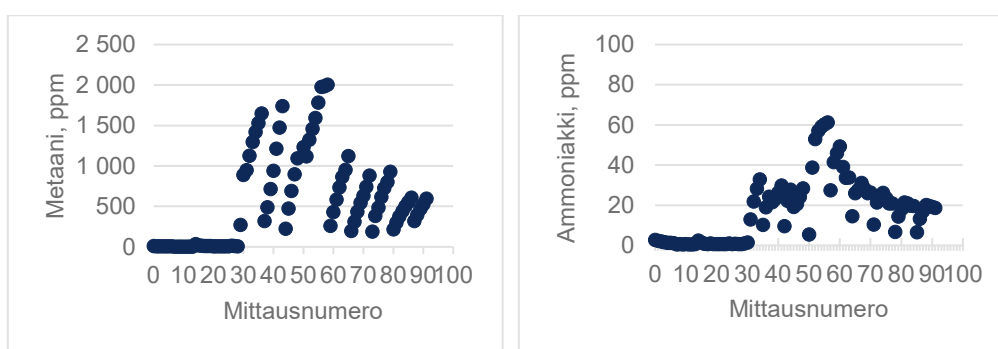
#### Elokuun mittaukset

Kammion lasku nestejakeen pinnalle nosti selvästi mitattuja päästöpitouksia. Tämä nähtiin kammioista (Kuvio 11) ja samanaikaisesti tehdystä mastomenetelmällä tehdystä mittauksesta (Kuvio 12).

Mastosta mitatut metaanipitoisuudet olivat aluksi tasoa 4–5 ppm, mutta kun kammio laskettiin pinnalle, kammioista mitatut arvot nousivat radikaalisti (tasolle 1000–2000 ppm). Mastossa tämä muutos näkyi voimakkaimmin aivan alimassa mittauspisteessä, joissa pitoisuus nousi nelinkertaiseksi. Ylemmissä mittauskorkeuksissa, jotka olivat myös

kauempana kohteesta, tämä ei juurikaan näkynyt. Sama ilmiö oli havaittavissa ammoniakkin suhteen. Tämä merkitsee sitä, että kammion lasku rikkoi lietteen pinnan ja aiheutti päästöpursekeen. Vaikka kammiota pyrittiin laskemaan mahdollisimman varovasti pinnalle, näkyi lasku joka kerta tuloksissa.

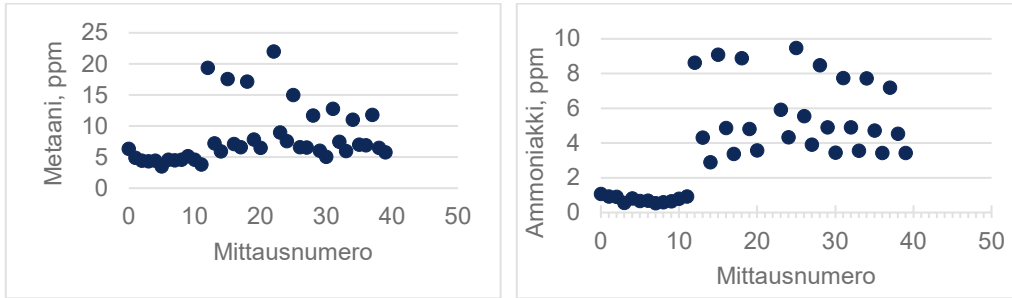
**Kuvio 11.** Kammiomenetelmällä saadut metaani- ja ammoniakkipitoisuudet havaintopisteissä (N=92) peräkkäisissä mittauksissa (mittausnumero) aikavälillä klo 11:00-17:00, 23.8.2021. Mittaukset tehtiin kahdeksasta pisteestä.



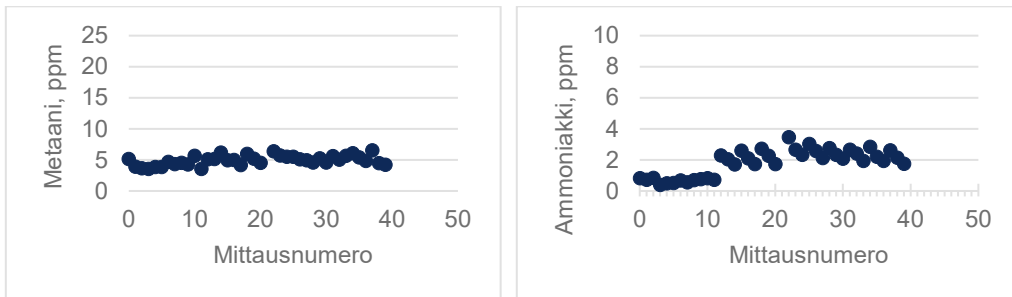


**Kuvio 12.** Mastomenetelmällä saadut metaani- ja ammoniakkipitoisuudet (ppm) elokuun mitausjakson aikana (N=40) peräkkäisissä mittauksissa (mittausnumero) aikavälillä klo 11.30-17:00, 23.8.2021. Mittauspisteet olivat a) 128, b) 386, c) 781 ja d) 1319 cm maapinnan tasosta.

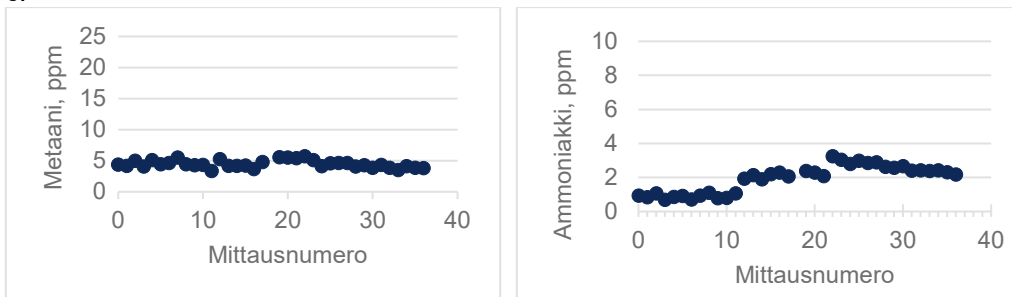
a.



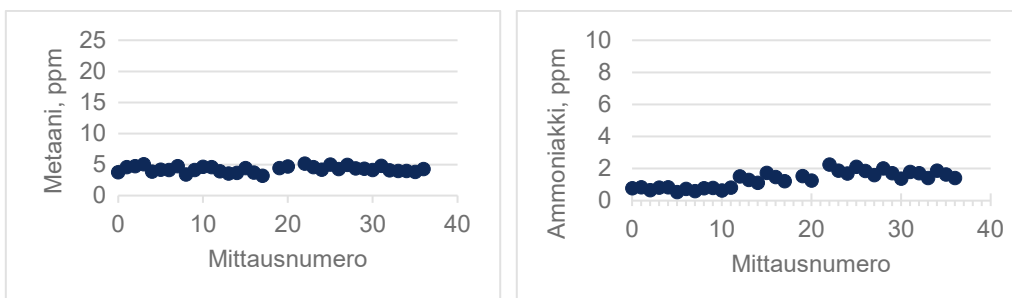
b.



c.



d.



Koska kammionmittaus häiritsi päästömittausta rikkomalla nestejakeen pinnan, luotettavaksi mittaustulokseksi valittiin mastomittauksesta ennen kammion laskua saadut arvot (Taulukko 8).

**Taulukko 8.** Metaani- ja ammoniakkipitoisuudet (ppm) (N=10) elokuun mittauksissa. Mittauspisteet 1–4 olivat 128, 386, 781 ja 1319 cm maapinnan tasosta.

Mittauspiste	1	2	3	4	keskiarvo
Metaani	4,6	4,25	4,46	4,30	4,405
Ammoniakki	0,77	0,67	0,89	0,72	0,763

Päästölaskennassa tarvittavat lämpötila (10,7 °C) ja tuulen nopeus (2,6 m/s) laskettiin mittaussjakson keskiarvoina läheisen lentokentän mittausarvoista. Ilmanpaineena laskennassa käytettiin normaali-ilmanpaineen arvoa 760 mmHg.

Saadut tulokset, metaani 4,405 ppm ja ammoniakki 0,763 ppm, tarkoittavat, että mittaussjaksolla (5,3 h) metaanipäästö nestejakeen varastosta oli 698 g/h ja ammoniakkipäästö 177 g/h. Metaanipäästö varastosta vallinneissa mittausolosuhteissa olisi siten 6 112 kg/v ja ammoniakkipäästö 1 551 kg/v, jos päästö olisi tasainen. Vuositasolla biokaasulaitos tuottaa 255 000 m<sup>3</sup> biokaasua, jossa on 69 % metaania, joten metaanipäästökseen nestejakeen varastosta saadaan kesämittauksen yhteydessä 5,02 % tuotetusta metaanista (Taulukot 8 ja 9).

**Taulukko 9.** Metaani- ja ammoniakkipäästöt elokuun mittauksissa.

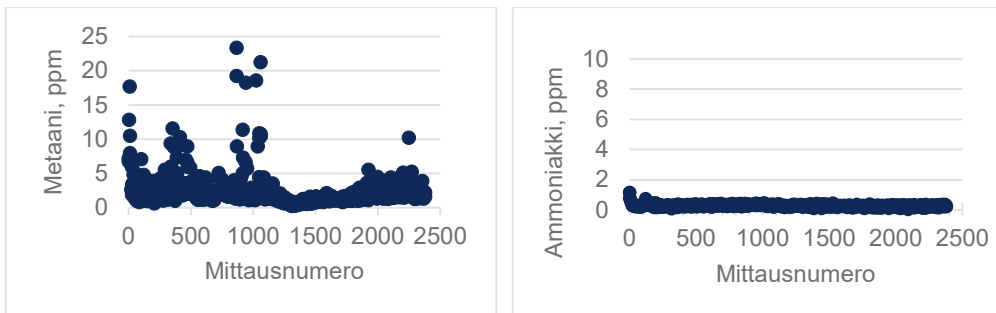
Biokaasun tuotto, m <sup>3</sup> /v	255 000
Biokaasun metaanipitoisuus, %	69
Ominaispaino, kg/m <sup>3</sup>	0,657
Metaanin tuotto, kg/v	115 599
Metaanipäästö, kg/v	6112
Metaanipäästö, % tuotetusta metaanista	5,02
Ammoniakkipäästö, kg/v	1551

## Maaliskuun mittaukset

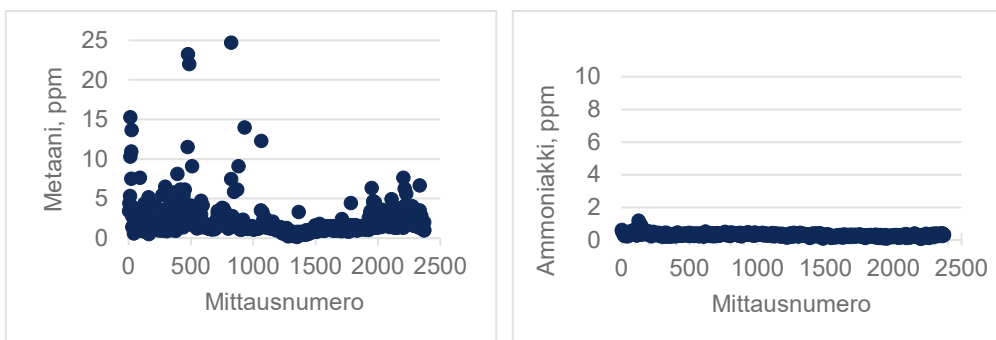
Mittaukset toistettiin samassa kohteessa talviolosuhteissa maaliskuussa 4.–6.3.2021. Kammiomenetelmää ei enää käytetty, koska se oli todettu prosessia häiritsevänä soveltumattomaksi kohteeseen. Aiempaa pidempi mittausjakso paljasti metaanipäästöissä hetkellisiä suurempia arvoja, jotka näkyivät parhaiten maston alimmissa mittauspisteissä. Keskimääräinen metaanipitoisuus (2,095 ppm) ja ammoniakkipitoisuus (0,299 ppm) olivat merkittävästi alhaisempia kuin elokuun mittausjaksolla (Kuvio 13, Taulukko 10).

**Kuvio 13.** Mastomenetelmällä saadut metaani- ja ammoniakkipitoisuudet (ppm) maaliskuun mittausjakson aikana (N=2376) peräkkäisissä mitauksissa (mittausnumero) aikavälillä 4.3.2022 klo 11:00 - 6.3.2022 klo 12:00. Mittauspisteet olivat a) 128, b) 386, c) 781 ja d) 1319 cm maapinnan tasosta.

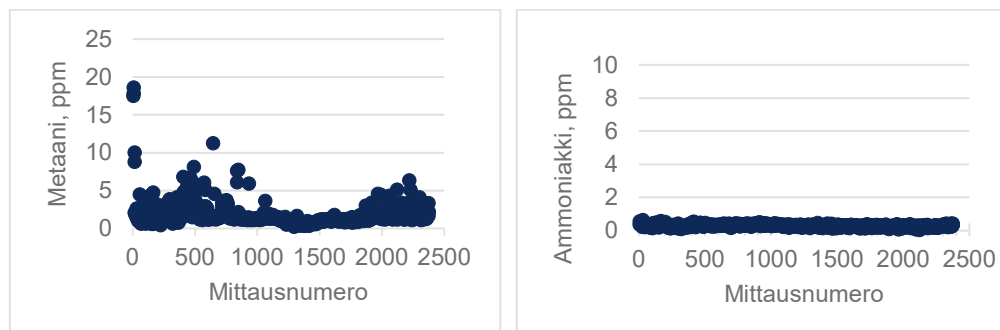
a.



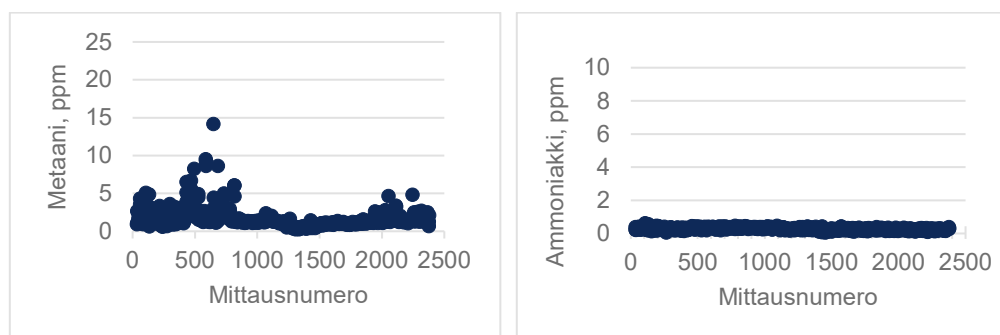
b.



c.



d.



**Taulukko 10.** Metaani- ja ammoniakkipitoisuus (ppm) prosessin aikana (N=594) maaliskuun mittauksissa. Mittauspisteet 1–4 olivat 128, 386, 781 ja 1319 cm maapinnan tasosta.

Mittauspiste	1	2	3	4	keskiarvo
Metaani	2,59	2,27	1,86	1,65	2,095
Ammoniakki	0,30	0,31	0,30	0,29	0,299

Saadut tulokset, metaani 2,095 ppm ja ammoniakki 0,299 ppm, tarkoittavat, että mittausjakson (49,3 h) aikainen metaanipäästö nestejakeen varastosäiliöstä oli 10,48 kg/vrk ja ammoniakkipäästö 2,58 kg/vrk. Metaanipäästö vallinneissa mittausolosuhteissa olisi siten 3 826 kg/v ja ammoniakkipäästö 940 kg/v, jos päästö olisi tasainen. Vuositasolla biokaasulaitos tuottaa 255 000 m<sup>3</sup> biokaasua, jossa on 69 % metaania, joten nestejakeen varastosäiliön metaanipäästökseen saadaan talvimittauksen yhteydessä 3,2 % tuotetusta metaanista (Taulukot 10 ja 11).

**Taulukko 11.** Metaani- ja ammoniakkipäästöt maaliskuun mittauksissa.

Kaasun tuotto, m <sup>3</sup> /v	255 000
Tuoton metaanipitoisuus, %	69
Ominaispaino, kg/m <sup>3</sup>	0,657
Metaanin tuotto, kg/v	115 599
Metaanipäästö, kg/v	3 826
Metaanipäästö, % tuotetusta metaanista	3,20
Ammoniakkipäästö, kg	940

### 3.2.4 Märkämädätyslaitoksen tulosten tarkastelu

Kesä- ja talvimittaukset osoittivat lämpötilan olevan merkittävä mädätteen varastoinnin päästöön vaikuttava tekijä. Kesämittaus ei osunut kovin lämpimään aikaan ja lisäksi mittausjakso oli lyhyt, mutta siinä oli silti selvästi korkeampi päästötaso kuin talvella. Talvitulokset ovat yhdenmukaiset aiempiin lietelantasäiliöiden mittauksiin (Haapala & Hellstedt 2019), joissa säiliöstä mitatut kaasujen pitoisuudet olivat talvella minimaalisia. On siis selvää, että kesäaikainen päästö on talviaikaa korkeampi, mutta kattavamman vuosittaisen tuloksen saamiseksi tarvittaisiin mittauksia eri säätiloilla (kuumempi kesä, kylmempi talvi).

Mittauksen aikana tuulen suunta oli ennusteen mukainen. Masto oli siten koko ajan tuulen alapuolella, joten tuulen suunnan vaihtelut eivät merkittävästi vaikuttaneet tuloksiin. Kohteesta peräisin oleva päästö kulkeutui odotetusti lähellä maata, jolloin mastossa alinna olevat mittauspisteet havaitsivat suurimman osan siitä. Tulevaisuudessa pidempiaikaisessa mittauksessa olisi tarpeellista käyttää useampaa mastoa, jotta päästö saataisiin tarkasti mitatuksi mahdollisista tuulen suunnan muutoksista huolimatta.

Elokuun käyttökelpoinen mittausjakso jäi lyhyeksi, mutta sen tulokset ovat biokaasulaitoksen jatkuvatoimisuuden takia varsin edustavia. Suositeltava mittausjakso on kuitenkin pidempi. Pidempään mitattaessa havaittiin hetkellisiä päästöpiikkejä, jotka viittaavat siihen, että nestejakeen säiliössä tapahtuu silloin tällöin päästöpurkauksia.

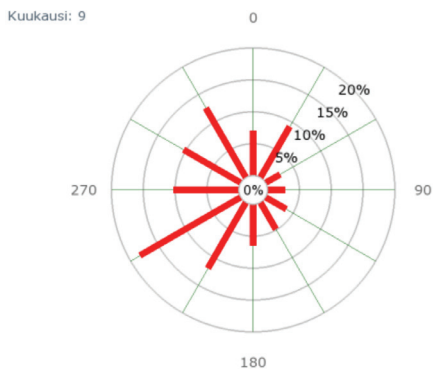
## 3.3 Kuivamädätyslaitos

Kuivamädätyslaitoksen päästöjä mitattiin vain kerran syyskuussa 2021 (3. – 8.9.2021). Mittausaikana lämpötila vaihteli välillä 8–15 °C.

### 3.3.1 Mittausmenetelmät

Kuivamädätyskohteen päästö mitattiin, kuten märkämädätyskokeessakin, mittausmastolla (Haapala & Hellstedt 2019), joka sijoitettiin tuulen alapuolelle (Kuvio 14). Mittausjakson aikana vallinnut tuulen suunta ja nopeus mitattiin. Fotoakustisen päästöanalysointilaitteen imuletkut kiinnitettiin neljälle korkeudelle, jotka olivat kohteen koon ja etäisyyden takia 87, 268, 541 ja 914 cm maapinnan tasosta (Kuvio 14).

**Kuvio 14.** Mittauskohteen tuuliruusu ja siitä päätelty mittausmaston sijoitus (tähti) vallitsevan tuulen suunnan alapuolelle. Kuivamädätyslaitoksen kaksi reaktori siloa sijaitsevat keltaisen nuolen ja tähden välissä. Sekä raaka-aineiden että mädätteen lyhytaikaiseen varastointiin käytetty varastolaatta sijaitsee puolestaan kuvassa keltaisen nuolen yläpuolella ja reaktori silojen viistosti alavasemmalla puolella. Pelto, johon mädäte levitettiin silon tyhjennyksen jälkeen, näkyy myös kuvassa vasemmassa alakulmassa.



**Kuvio 15.** Mittausmasto sijoitettuna mittauskohteeseen nähden tuulen alapuolelle. Mastossa on neljä mittauspistettä, joiden korkeudet riippuvat kohteen etäisyydestä.



Kuivamädätyslaitoksen panostyyppisen luonteen takia mittaus tehtiin märkämädätyslaitosta pidempänä jaksana. Mittausjakso oli 108 tuntia (4,5 vuorokautta), jona aikana toisen reaktorisiilon panos lopetettiin, purettiin ja täytettiin uudestaan, mutta ei vielä peitetty pressulla eikä aloitettu uudestaan biokaasun keruuta. Toinen siiloista puolestaan oli koko ajan tuotantovaiheessa. Mittausjakso ajoitettiin ensimmäisen siilon perusteella, jossa panos vaihdettiin siten, että mittauksesta 48 % oli prosessin aikaista, 20 % aktiivista purkuvaihetta ja 32 % purun jälkeistä aikaa. Näin saatiin talteen prosessin eri vaiheita kuvaavaa dataa (n. 100 havaintoa vuorokaudessa). Mittaustapahtumaa ei kuitenkaan pystytty kohdentamaan vain ensimmäiseen siiloon, vaan molempien siilojen sekä tuulen yläpuolella olevan varastolaatan mahdolliset päästöt vaikuttivat päästömittaukseen.



Mittauksessa keskityttiin erityisesti purkuvaiheeseen. Se aloitettiin ennen panoksen lopetusta tuotantovaiheen loppupuolella, ja se lopetettiin, kun reaktori-siilo oli tyhjä ja odotti uutta täyttöä. Mittausjakso ei siis kattanut koko panosprosessia, mutta mittaus-datan perusteella arvioitiin myös yhden siilon tyypillisen, noin 4 kk (120 vrk) kestävän kokonaisprosessin päästö. Laskennassa otettiin huomioon se, että mittauksen aikana kummatkin reaktori-siilot olivat käytössä. Koska toisen reaktori-siilon panos oli koko mit-tauksen ajan tuotantovaiheessa, korjaus tehtiin siten, että tuloksista vähennettiin puo-let tuotantovaiheen aikana mitatusta päästöstä.

Päästölaskennassa tarvittavat lämpötila ja tuulen nopeus laskettiin kullekin vaiheelle keskiarvoina (Taulukko 12). Ilmanpaineena laskennassa käytettiin normaali-ilmanpai-neen arvoa 760 mmHg.

**Taulukko 12.** Lämpötilan ja tuulen nopeuden keskiarvot prosessin aikana, purun aikana ja pu-run jälkeen (N=455).

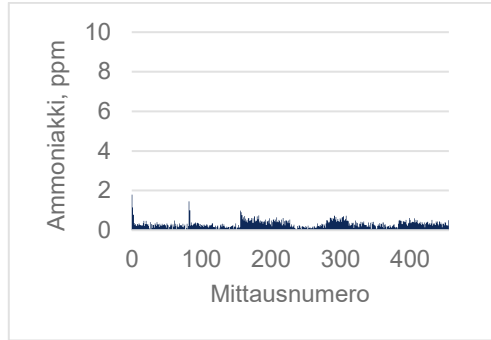
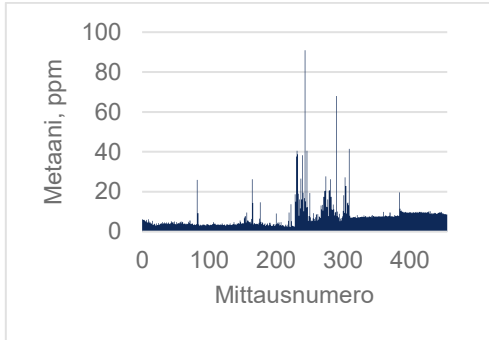
	Lämpötila, °C	Tuulen nopeus, m/s
Prosessin aikana	7,9	4,1
Purun aikana	11,5	2,7
Purun jälkeen	14,7	3,6

### 3.3.2 Kuivamädätyslaitoksen tulokset

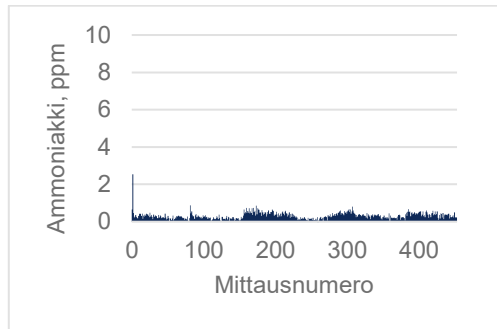
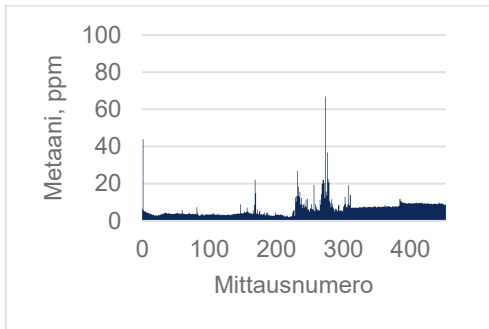
Mitatut metaanipitoisuudet (ppm) kuivamädätyslaitoksella nousivat selvästi toisen sii-lon purkuvaiheessa (havaintopisteet 200–300) ja säilyivät korkeammalla tasolla sen jälkeen. Metaanipitoisuus oli korkein alimmassa mittauspisteessä ja väheni sitä mu-kaa, mitä korkeammalla mittauspiste oli. Ammoniakilla ei ollut havaittavissa vastaavaa muutosta, vaan sen pitoisuus pysyi alhaisella tasolla koko mittausjakson (Kuvio 16, Taulukot 13 ja 14).

**Kuvio 16.** Metaani- ja ammoniakkipitoisuus (ppm) mittausjakson aikana (havaintopisteet, N=455) peräkkäisissä mittauksissa (mittausnumero), 4,5 vuorokautta aikavälillä 3.9.2021 (alkaen klo 14:00) – 8.9.2021. Mittauspisteet olivat a) 87, b) 268, c) 541 ja d) 914 cm maapinnan tasosta.

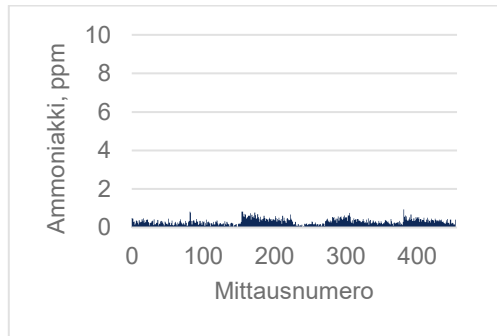
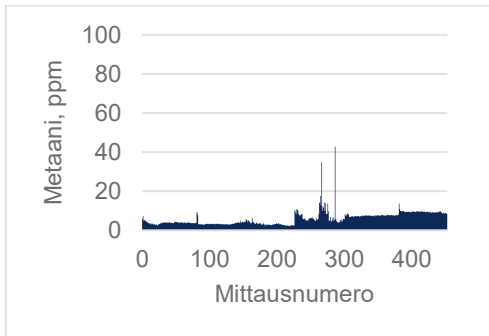
a.



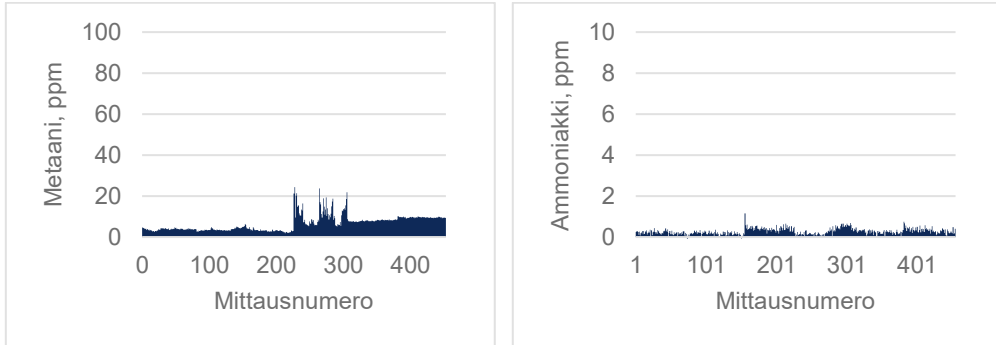
b.



c.



d.



**Taulukko 13.** Metaanipitoisuus (ppm) prosessin aikana, purun aikana ja purun jälkeen (N=455). Mittauspisteet 1–4 olivat 87, 268, 541 ja 914 cm maapinnan tasosta.

Mittauspiste	1	2	3	4	keskiarvo
Prosessin aikana	4,40	4,02	3,56	3,57	3,888
Purun aikana	14,84	10,47	10,47	7,69	10,869
Purun jälkeen	8,64	9,23	9,45	8,18	8,876

**Taulukko 14.** Ammoniakkipitoisuus (ppm) prosessin aikana, purun aikana ja purun jälkeen (N=455). Mittauspisteet 1–4 olivat 87, 268, 541 ja 914 cm maapinnan tasosta.

Mittauspiste	1	2	3	4	keskiarvo
Prosessin aikana	0,32	0,30	0,26	0,31	0,296
Purun aikana	0,33	0,32	0,31	0,33	0,321
Purun jälkeen	0,31	0,33	0,30	0,33	0,316

Mittausjakson aikainen mitattu metaanipäästö kuivamädätyslaitoksesta oli yhteensä 276 kg (Taulukko 15). Mittausjakso painottui puruvaiheeseen, mutta tulosten perusteella arvioitiin suuruusluokkaa myös koko panoksen aikaiselle päästölle. Prosessin loppuvaiheen aikainen mittausjakso oli runsas 2 vrk. Kun tiedetään koko panoksen prosessivaiheen kesto (120 vrk) ja oletetaan päästön pysyvän vakiona, voidaan arvioida koko prosessin aikaista päästöä. Suhteutettuna koko panosprosessin ajalle arvioitiin 94 % kokonaismetaanipäästöstä aiheutuvan prosessin aikana, 2 % purun aikana ja 4 % purun jälkeen, jolloin reaktorisiilo täytetään uudestaan. Vastaavasti ammoniak-

kipäästökseksi saatiin mittausjaksolla yht. 25 kg (Taulukko 16). Suhteutettuna koko panosprosessin ajalle, arvioitiin 89 % kokonaisammoniakkipäästöstä aiheutuvan prosessin aikana, 1 % purun aikana ja 10 % purun jälkeen.

**Taulukko 15.** Mittausjakson (4,5 vrk) aikana mitattu keskimääräinen (mg/s) ja kumulatiivinen (kg) metaanipäästö panoksen eri vaiheissa.

<b>Mittausjaksolla</b>		
	mg/s	kg CH <sub>4</sub>
Prosessin aikana	1 802	76
Purun aikana	4 148	70
Purun jälkeen	4 790	130
Yhteensä	-	276

**Taulukko 16.** Mittausjakson (4,5 vrk) aikana mitattu keskimääräinen (mg/s) ja kumulatiivinen (kg) ammoniakkipäästö panoksen eri vaiheissa.

<b>Mittausjaksolla</b>		
	mg/s	kg NH <sub>3</sub>
Prosessin aikana	235	4
Purun aikana	104	3
Purun jälkeen	211	18
Yhteensä	-	25

### 3.3.3 Kuivämädätyslaitoksen tulosten tarkastelu

Kuivämädätyslaitoksen päästömittausten aikana tuulen suunta oli ennustetusti länsilounaasta itä-kaakkoon. Masto oli siten koko ajan tuulen alapuolella eivätkä tuulen suunnan vaihtelut merkittävästi vaikuttaneet tuloksiin.

Kokonaispäästöarvion laskennassa on virhemahdollisuus, koska mittausjakso kattoi vain osan kohteena olleen panoksen syklistä. Mittaus kohdistui ko. panoksen tuotan-

toivaiheen loppuosaan ja purkuun eikä tätä edeltävien vaiheiden päästöä mitattu. Oletettavaa on, että yksittäisen panoksen päästö ei ole tuotantovaiheessa vakio, kuten laskennassa oletettiin, vaan aluksi se kasvaa ja loppuvaiheessa hiipuu biokaasutuoton kasvun ja hiipumisen mukaisesti. Mittauskohteessa oli kuitenkin kaksi rinnakkaista, yhtä aikaa käytössä olevaa reaktori-siiloa, joiden panokset olivat keskenään eri vaiheessa eikä päästömittausta voitu kohdentaa pelkästään toiseen siiloista. Mitatun päästön voi siten olettaa olevan edustava ja kuvaavan kohteena ollutta tuotantoyksikköä kokonaisuutena. Tämä tulisi kuitenkin todentaa pitempiaikaisella päästömittauksella.

Lopetettavan siilon biokaasuntuotto ei laitostoimijan mukaan ollut ehtinyt vielä täysin hiipua vaan tuottoa olisi ehkä riittänyt vielä noin kahdeksi viikoksi. Panos kuitenkin lopetettiin, jotta saatiin porrastettua panosten vaihto sopivasti siten, että kaasuntankkausajan kaasutarve varmistettiin.

Kokonaisprosessin eri vaiheiden osuus päästöistä painottuu selvästi panosten tuotantovaiheeseen, joka edustaa yli 90 % kokonaispäästöstä. Kuivamädätyslaitoksen metaanipäästöjen vähentämisessä tulisikin kiinnittää huomiota erityisesti tuotannon aikaiseen päästöön ja selvittää päästölähde. Kyseessä voi olla tasainen vuoto tai jokin erityinen vuotokohta, joka tulisi tiivistää. Panoksen kokonaispäästöön verrattuna purun aikainen ja sen jälkeinen päästö jäi sen sijaan vähäiseksi, vaikka silloin esiintyi selviä päästöpiikkejä. Tämä johtuu siitä, että lopetus on ajallisesti lyhyt vaihe. Lisäksi lopetuksen aikaisia päästöjä pyritään laitoksella hallitsemaan imemällä pressun sisällä oleva biokaasu pois puhdistimelle ennen pressun avaamista.

Mittauksen aikana tuulen suunta oli varastolaatan suunnasta. Sinne oli ennen uuden panoksen aloitusta tuotu hevosen ja kanan lantaa odottamaan siilon täyttöä. Vastavasti aiemman panoksen mädäte levitettiin läheiselle pellolle myös tuulen suunnan yläpuolelle. Näiden ympäristöolosuhteiden merkitystä päästömittauksiin on vaikea arvioida.

Jotta panosprosessin päästöistä saisi tarkemman kuvan, tulisi panosta seurata koko panoksen ajan. Lisäksi tulisi varmistaa, että syötteenä käytettävien lantojen tai prosessista poistetun mädätteen välivarastointi ei häiritse itse laitoksen päästömittausta. Mittauksia tulisi tehdä myös talviaikaan, koska lämpötilan on todettu vaikuttavan päästöihin. Lisäksi tulisi vertailla tilannetta, jossa lopetetaan panos, jonka biokaasuntuotto on jo hiipunut verrattuna nyt tehtyyn mittaukseen, jossa panos vielä tuotti biokaasua lopetusvaiheessa. Laitoksen päästöä olisi hyvä seurata myös kannettavalla mittauslaitteella sen selvittämiseksi löytyykö laitokselta jokin erityinen vuotokohta.

## 3.4 Johtopäätökset päästömittauksista

Mittausteknisesti mastomittaus onnistui hyvin ja käytetty mittausmenetelmä antoi luotettavaa tietoa päästön määrästä.

Märkämädätyslaitoksen nestejakeen varastosäiliön mittauksissa kammiomenetelmä vaikutti mittauskohteeseen rikkomalla nestejakeen pinnan eikä sen käyttö ole jatkossa suositeltavaa. Kammion lasku pinnalle pitäisi tehdä erittäin varovasti, mikä on käytännössä erittäin vaikea toteuttaa.

Kuivamädätyslaitoksen mittauksissa oli selvää, että panoksen purkuvaiheessa metaanipäästö lisääntyy hetkellisesti merkittävästi. Peitteen poisto ja mädätteen kuormaus vapauttavat metaania. Purkuvaiheen osuus kokonaispäästöstä jää kuitenkin vähäiseksi verrattuna mädätysprosessin aikaiseen päästöön sen lyhyen keston vuoksi. Prosessin kokonaispäästön arviota voitaisiin tarkentaa, mikäli mittausjakso kohdistuisi enemmän biokaasun tuotantovaiheen aikaiseen tilanteeseen ja käynnistysvaihekin otettaisiin mukaan mittaukseen.

Mittausjakson sää, erityisesti lämpötila, vaikuttaa merkittävästi päästöön. Kylmässä päästö on merkittävästi pienempää. Mittausjaksoille ei osunut yli 20 asteen lämpötiloja, jolloin päästö olisi todennäköisesti ollut mitattua suurempi. Kattavamman tuloksen saamiseksi tarvittaisiin mittauksia eri säätiloissa (kuumempi kesä, kylmempi talvi). Myös tuulen nopeus vaikuttaa merkittävästi pitoisuuksien (ppm) mittaustuloksiin, joten sen mittaus on tehtävä huolellisesti. Mittausteknisesti tuulen nopeuden tarkempi paikallinen mittaaminen parantaisi resoluutiota ja dynamiikka, ts. saataisiin tarkempi kuva hetkellisistä päästöistä.

### Lähteet

Haapala, H. & Hellstedt, M. 2019. Measurement of Ammonia Emission in Practical Dairy Farm Environment. In: Sustainable agriculture: An opportunity for innovation in machinery and systems. 3rd Rendez-Vous Techniques Axema - 2019 edition. Axema, Paris. ISBN 978-2-491070-01-4. p. 168–173.

### 3.5 Lietelannan levityksen aiheuttamat dityppioksidipäästöt

Lietelannan levityksen aiheuttamia dityppioksidipäästöjä tarkasteltiin hyödyntämällä vuosina 2005–2007 tehtyjen kenttämittausten aineistoa (julkaisematon aineisto). Tulokset ovat kahdelta pellolta: savimaa Jokioisissa nurmella, jolle levitettiin naudan lietalantaa, ja hietamaa Ypäjällä viljalla (ohra), johon levitettiin sian lietalantaa. Lietelannoista oli käytettävissä raakalietteen lisäksi vastaava mädäte sekä ohrakokeella myös sen kuiva- ja nestejakeet. Levitysmenetelmänä olivat joko pintalevitys tai sijoituslannoitus tavanomaisella kalustolla tai siipivantailla. Dityppioksidipäästöjä mitattiin kylvön yhteydessä lannoitetuista koeruuduista kammiomenetelmällä noin kaksi kertaa kuussa 7 kk ajan. Analyysiin oli käytettävissä 147 mittauspisteen summatulosta 7 kuukauden ajalta yli vuosien, ja ne on käsitelty erikseen nurmelle ja viljalle.

Viljakokeen tuloksista ei ollut havaittavissa johdonmukaista eroa raakalietteen ja mädätteen välillä tai levitysmenetelmien välillä (Taulukko 17). Vuonna 2005 käsittelyjen välillä ei ollut tilastollisia eroja, mutta vuonna 2006 sijoitetusta raakalietteestä tuli suurimmat päästöt, kun taas pintalevitetyn mädätteestä separoidun nestejakeen päästöt olivat alle kolmasosan siitä. Samansuuntaisia tuloksia saatiin vuonna 2007, kun kahdessa nestejakeen levityksessä saatiin pienemmät päästöt kuin raakalietteen sijoituksessa. Erot vaikuttavat kuitenkin satunnaisilta vuosien ja käsittelyjen välillä.

**Taulukko 17.** Dityppioksidin päästöt viljakokeelta (ohra), jossa lantana sianlietelanta sellaisenaan, mädätteenä ja mädätteestä separoituina jakeina. Koe toteutettiin vuosina 2005–2007.

Lannoite	Levitystapa	N <sub>2</sub> O-N (kg ha <sup>-1</sup> 7 kk <sup>-1</sup> )		
		2005	2006	2007
Väkilannoite	Pintalevitys	1,4±0,3 <sup>a</sup>	2,4±1,0 <sup>ab</sup>	0,8±0,1 <sup>d</sup>
Raakalielanta	Pintalevitys	1,7±0,3 <sup>a</sup>	3,0±0,7 <sup>ab</sup>	1,1±0,3 <sup>cd</sup>
	Sijoitus	2,1±0,4 <sup>a</sup>	2,5±0,9 <sup>ab</sup>	2,8±0,1 <sup>b</sup>
	Siipivannas	2,6±0,4 <sup>a</sup>	3,6±1,8 <sup>a</sup>	-
Mädäte	Pintalevitys	2,4±0,9 <sup>a</sup>	1,5±0,6 <sup>abc</sup>	1,6±0,6 <sup>bcd</sup>
	Sijoitus	2,4±0,4 <sup>a</sup>	1,5±0,1 <sup>abc</sup>	2,8±0,9 <sup>bc</sup>
	Siipivannas	2,5±0,7 <sup>a</sup>	1,5±0,2 <sup>abc</sup>	-
Mädätteen neste- jake	Pintalevitys	2,0±0,8 <sup>a</sup>	0,9±0,5 <sup>bc</sup>	1,0±0,1 <sup>cd</sup>
	Sijoitus	1,6±0,7 <sup>a</sup>	1,2±0,4 <sup>abc</sup>	1,0±0,1 <sup>d</sup>
	Siipivannas	1,6±0,6 <sup>a</sup>	0,9±0,3 <sup>abc</sup>	-
Mädätteen kuiva- jake	Multaus välittömästi	-	1,8±0,8 <sup>abc</sup>	-
	Multaus 1 h kuluttua	-	1,7±0,6 <sup>abc</sup>	1,4±0,5 <sup>bcd</sup>
Mädätteen kuiva- jake	Multaus välittömästi	-	1,8±0,8 <sup>abc</sup>	-

Yläindeksin kirjaimet osoittavat tilastollisesti merkitsevää eroa käsittelyjen välillä vuoden sisällä.

Nurmikokeella dityppioksidin päästöt olivat vuonna 2005 pienemmät naudan lietelantan mädätteen levityksestä kuin naudan raakalietteen levityksestä (Taulukko 18). Muina vuosina käsittelyjen välillä ei ollut tilastollisia eroja.



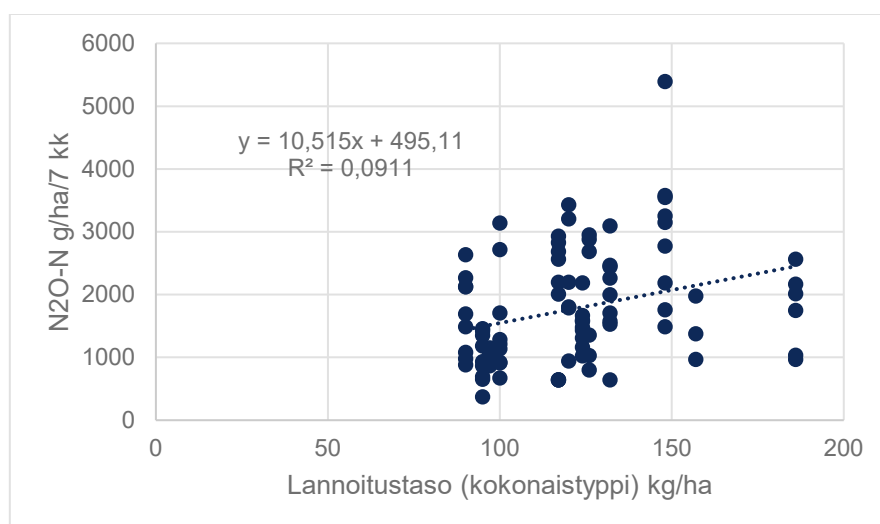
**Taulukko 18.** Dityppioksidin päästöt nurmikokeelta, jossa lantana naudana lietelanta sellaisenaan ja mädätteenä. Koe toteutettiin vuosina 2005–2007.

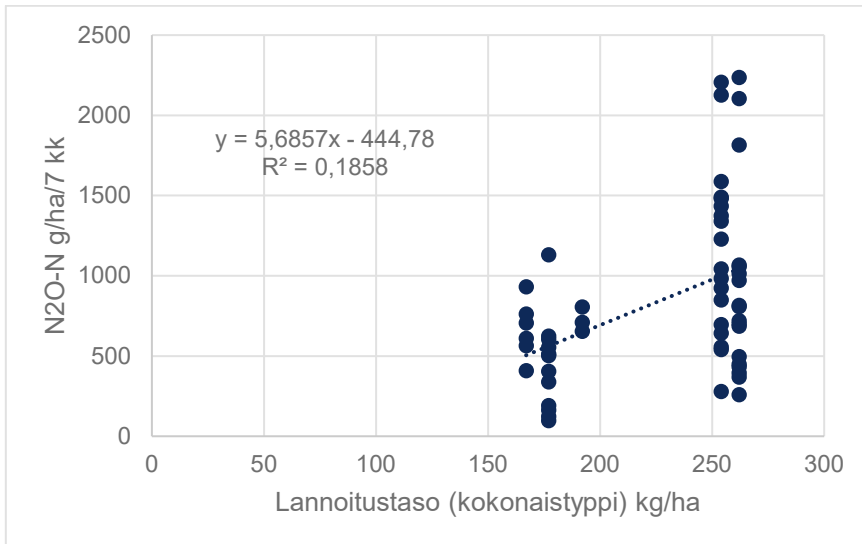
Lannoite	Levitystapa	N <sub>2</sub> O-N (kg ha <sup>-1</sup> 7 kk <sup>-1</sup> )		
		2005	2006	2007
Väkilannoite		0,7±0,1 <sup>ab</sup>	0,5±0,1	0,8±0,1
Raakalietelanta	Pintalevitys	1,2±0,8 <sup>a</sup>	0,5±0,2	1,7±0,5
	Sijoitus	1,3±0,3 <sup>a</sup>	0,8±0,2	1,4±0,2
Mädäte	Pintalevitys	0,5±0,2 <sup>b</sup>	0,5±0,3	1,6±0,6
	Sijoitus	0,7±0,2 <sup>ab</sup>	0,6±0,3	1,2±1,0

Yläindeksin kirjaimet osoittavat tilastollisesti merkitsevää eroa käsittelyjen välillä vuoden sisällä.

Dityppioksidin päästön havaittiin kasvavan lannoitustason noustessa, mutta yhteys ei ole tilastollisesti kovin selkeä (Kuviot 17 ja 18). Nurmen suuremmista lannoitustasoista huolimatta nurmikokeen päästöt olivat kuitenkin alhaisemmat kuin viljakokeen.

**Kuvio 17.** Lannoitustason vaikutus dityppioksidin päästöön viljakokeella.



**Kuvio 18.** Lannoitustason vaikutus dityppioksidin päästöön nurmikokeella.

Viljakokeelta 7 kk aikana mitatut päästöt vaihtelivat välillä 0,8–3,6 kg N<sub>2</sub>O-N (keskiarvo 1,8). Nurmella tulokset vaihtelivat puolestaan välillä 0,1–2,2 kg N<sub>2</sub>O-N/ha/vuosi (keskiarvo 0,85). Koska talviaikaiset N<sub>2</sub>O-päästöt ovat noin puolet koko vuoden päästöistä, nämä tulokset ovat linjassa keskimääräisten viljapelloilta Suomessa mitattujen vuositulosten kanssa (3,5 kg N/ha/vuosi yksivuotisilta viljelykasveilta ja 1,8 kg N/ha/vuosi nurmikasveilta; Regina ym. 2013). Tulokset vastaavat myös suhteellisen hyvin kirjallisuuskatsauksen (ks. Luku 2.5) aineiston perusteella laskettua mädätteen levityksen dityppioksidin päästökerrointa ja sen avulla edelleen laskettua päästöä. Esimerkiksi lannoitustasolla 170 kg N/ha saadaan kirjallisuuskatsauksen kerrointa käyttämällä päästökseksi 2,2 kg N<sub>2</sub>O-N/vuosi. Olosuhteilla (mm. maalaji, sääolosuhteet, levitystekniikka) on hyvin tärkeä merkitys päästön muodostumiselle.

Mädätettyjen ja raakalietelantojen välisiä eroja ei pystytty luotettavasti vertaamaan yli vuosien (yhdistämällä koko mitatun aineiston), koska lannoitustasot vaihtelevat käsittelyjen välillä ja keskimääräiset lannoitustasot painottuvat eri tavoin raakalietteilä ja mädätetyillä lietteillä. Vuosien sisällä tehtyjen vertailujen tulokset kuitenkin viittaavat siihen, että mädätys ei kovin merkittävästi muuta lietelannan levityksestä aiheutuvan N<sub>2</sub>O-päästön tasoa.

## Lähteet

Regina, K., Kaseva, J. & Esala, M. 2013. Emissions of nitrous oxide from boreal agricultural mineral soils – statistical models based on measurements. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 131–136.

## 4 Biokaasutuotannon vaikutus mädätteen hiileen ja sen pysyvyyteen maaperässä

**Jaakko Heikkinen (Luke)**

Biokaasutuotannon vaikutusta syötemateriaalien sisältämään hiileen ja siten sen vaikutukseen maaperän hiileen mädätteen lannoituskäytössä tarkasteltiin kirjallisuuskatsauksen ja mallintamisen avulla.

### 4.1 Kirjallisuuskatsaus

Mädätteen pysyvyys maaperässä riippuu mädätteen kemiallisesta laadusta, ilmasto-olosuhteista sekä maaperän ominaisuuksista peltolohkolla, jonne mädätettä levitetään. Biokaasutuotannolla voi myös olla epäsuoria vaikutuksia maaperän hiilitaseeseen, jos se vaikuttaa viljelykäytössä olevan maan pinta-alaan tai viljelykiertoihin ja sitä kautta kasvintähteinä maahan päätyvän hiilen määrään ja laatuun.

Biokaasutuotannon seurauksena mädätteeseen jäävä hiili on kemiallisesti kestävämmässä muodossa kuin alkuperäisessä syötemateriaalissa. Biokaasuprosessissa pääosa biomassan helposti hajoavien rasvahappojen, selluloosan, hemiselluloosan ja proteiinien hiilestä muuntuu biokaasun hiiliyhdisteiksi, kun taas hitaasti hajoavan ligniinin määrä pysyy prosessissa muuttumattomana. Möller (2015) arvioi, että biokaasutuotannon seurauksena biomassan stabiilisuus lisääntyy 29–625 % verrattuna prosessoimattomaan biomassaan. Vaikutus riippuu syötteenä käytetyn biomassan laadusta ja valitusta prosessitekniikasta, mutta myös stabiilisuutta mittaavalla määritysmenetelmällä on havaittu olevan vaikuttavan tuloksiin. Osa mädätettävän biomassan orgaanisesta aineksesta (20–95 %) hajoaa prosessissa metaaniksi ja hiilidioksidiksi vähentäen samalla mädätteen sisältämää helposti hajoavan hiilen määrää. Maanparannuskäyttöön palautuva mädätteen hiili sisältää vaikeammin hajoavaa hiiltä ja on siten stabiilimpaa, mutta hiiltä on määrällisesti vähemmän kuin prosessoimattomassa biomassassa.

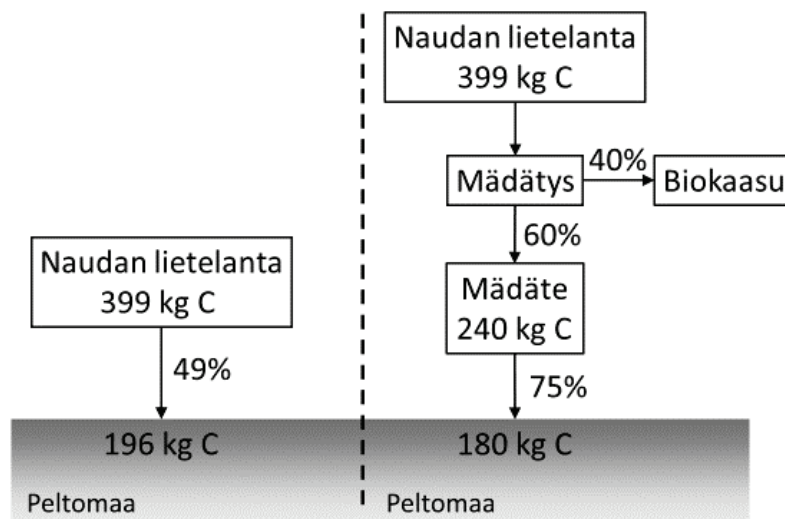
Mädätteen käytön vaikutuksia maan hiilitaseen ovat tutkineet mm. Bachmann ym. (2014), Möller (2009), Nilsson ym. (2020) ja Thomsen ym. (2013). Möllerin (2015) ja Insam'n ym. (2015) tekemien yhteenvetotutkimusten perusteella mädätyksellä ei ole merkittävää maan hiiltä lisäävää tai vähentävää vaikutusta. Tämä on johdonmukaista

siinä mielessä, että suhteellisen lyhytaikaisessa biokaasuprosessissa häviää vain nopeasti hajoavia hiilen ositteita, jotka hajoavat helposti myös maaperän omissa hajottamisprosesseissa, kun taas biokaasuprosessilla ei välttämättä ole vaikutusta maaperän hiilitaseen kannalta merkityksellisempiin, vaikeasti hajoaviin ositteisiin. Hiilen pysyvyyttä maassa voi mahdollisesti parantaa jalostamalla mädätettä esimerkiksi kompostoimalla, neste- ja kuivajakeiden erotuksella tai biohiileksi pyrolysoimalla (De la Fuente ym. 2013; Insam ym. 2015).

Suomen olosuhteissa mädätteen hajoamista maaperässä on selvitetty Luonnonvarakeskuksen Mahtava-hankkeessa (MMM Makera 2016–2018), missä eri maanparannusaineiden hiilen pysyvyyttä maaperässä tutkittiin karikepussikokeen, muhituksen ja kemiallisen fraktiionin avulla. Tuloksia myös verrattiin Yasso07-mallinnuksen antamiin tuloksiin. Tulosten perusteella mädätteessä on biokaasuprosessin seurauksena enemmän kemiallisesti pysyvämpää hiiltä prosessoimattomaan biomassaan verrattuna (Heikkinen ym. 2021). Karikepussikokeen perusteella pysyvän hiilen osuus oli raakabiomassalla 49 % ja mädätteellä vastaavasti 75 %. Maaperän hiilivarastoon biokaasuprosessilla ei kuitenkaan havaittu olevan vaikutusta (Kuvio 19), kun biokaasuprosessin aiheuttama hiilen muuntuminen biokaasuksi huomioidaan. Tulos on linjassa Möllerin (2015) ja Insam'n ym. (2015) esittämien arvioiden kanssa.

**Kuvio 19.** Hiilen kertyminen maahan, kun levitetään joko prosessoimatonta tai mädätettyä lietelantaa perustuen Mahtava-hankkeen karikepussituloksiin. Esimerkkilaskelmassa on oletettu, että biokaasuprosessissa 40 % mädätteen sisältämästä hiilestä muuttuu biokaasuksi. Kuva on muokattu Heikkinen ym. (2021) julkaistusta kuvasta.

Lietelannan mädätys (1000 kg kuiva-ainetta)



Hiilen pysyvyyttä maaperässä edesauttaa hiilen sitoutuminen maan hienoainekseen ja mururakenteisiin (Six ym. 2002; Kögel-Knabner ym. 2008), jotka määrittävät maan maksimaalisen hiilensidontapotentiaalin. Hiilen määrän ylittäessä maksimaalisen hiilensidontapotentiaalin kertynyt hiili ei ole sitoutunut mineraaliainekseen ja on siten alttiimpi hajotukselle (Poeplau ym. 2018; Cotrufo ym. 2019). Hiilen pysyvyyden ja saavutettavien ilmastovaikutusten kannalta olisi edullista, jos mädäte sijoitettaisiin peltolohkoille, joilla hiilen määrä suhteessa hienoainekseen määrään olisi pieni. Maan ominaisuuksien vaikutusta hiilensidontapotentiaaliin tutkitaan tarkemmin kirjoitushetkellä meillä olevassa Luonnonvarakeskuksen Hiiletin-hankkeessa.

Möllerin (2015) mukaan biokaasutuotannon seurannaisvaikutukset voivat olla maaperän kannalta tärkeämpiä kuin mädätteen levityksen suorat vaikutukset maassa. Yksi-puolisesti viljellyillä alueilla biokaasutuotanto voi monipuolistaa viljelykiertoja sekä lisätä monivuotisten nurmien osuutta viljelykierrossa tarjoamalla niille käyttökohteen biokaasutuotannon syötteenä. Monipuolisilla ja nurmea sisältävillä viljelykierroilla on havaittu olevan maan hiilivarastoa kerryttävä vaikutus (Bolinder ym. 2010; Heikkinen ym. 2022; King & Blesh 2018). Yhtä lailla mädätteen (tai muun orgaanisen aineksen) käyttö maanparannusaineena voi parantaa maan kasvukuntoa (maan rakenne, vesitalous, ravinnetila) lisäten biomassan ja sitä kautta myös maahan päätyvää hiilen määrää. Ainakin luonnonmukaisessa viljelyssä mädätteen käytön on havaittu lisäävän maanpäällisen biomassan ja sadon tuottoa (Stinner ym. 2008), mutta esimerkiksi Norjassa tehdyssä kenttäkokeessa vaikutusta tuottavuuteen ei puolestaan havaittu (Løes ym. 2013).

## Lähteet

- Bachmann, S., Gropp, M. & Eichler-Löbermann, B. 2014. Phosphorus availability and soil microbial activity in a 3-year field experiment amended with digested dairy slurry. *Biomass and Bioenergy* 70: 429–439.
- Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andrén, O., Ericson, L., Parent, L.E. & Kirchmann, H. 2010. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics in forage-based crop rotations in Northern Sweden (63–64 N). *Agriculture, ecosystems & environment* 138(3-4): 335–342.
- Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J. & Lugato, E. 2019. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 12(12): 989–994.
- De la Fuente, C., Albuquerque, J.A., Clemente, R. & Bernal, M.P. 2013. Soil C and N mineralisation and agricultural value of the products of an anaerobic digestion system. *Biology and Fertility of Soils* 49(3): 313–322.
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Hanajik, P. & Regina, K. 2021. Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils. *Carbon Management* 12(4): 359–376.
- Heikkinen, J., Keskinen, R., Kostensalo, J. & Nuutinen, V. 2022. Climate change induces carbon loss of arable mineral soils in boreal conditions. *Global Change Biology* 28(12): 3960–3973.

- Insam, H., Gómez-Brandón, M. & Ascher, J. 2015. Manure-based biogas fermentation residues—Friend or foe of soil fertility? *Soil Biology and Biochemistry* 84: 1–14.
- King, A.E. & Blesh, J. 2018. Crop rotation for increased soil carbon: perennality as a guiding principle. *Ecological Applications* 28(1): 249–261.
- Kögel-Knabner, I., Guggenberger, G., Kleber, M., Kandeler, E., Kalbitz, K., Scheu, S., Eusterhues, K. & Leinweber, P. 2008. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(1): 61–82.
- Løes, A.K., Johansen, A., Pommeresche, R. & Riley, H. 2013. Anaerobic digestion of manure—consequences for plant production. *Organic farming systems as a driver for change* 117–118.
- Möller, K. 2009. Effects of biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84: 179–202.
- Möller, K. 2015. Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review. *Agronomy for sustainable development* 35(3): 1021–1041.
- Nilsson, J., Sundberg, C., Tidåker, P. & Hansson, P.A. 2020. Regional variation in climate impact of grass-based biogas production: A Swedish case study. *Journal of Cleaner Production* 275: 122778.
- Poeplau, C., Don, A., Six, J., Kaiser, M., Benbi, D., Chenu, C., Cotrufo, M.F., Derrien, D., Giaocchini, P., Grand, S., Gregorich, E., Griepentrog, M., Gunina, A., Haddix, M., Kuzyakov, Y., Kühnel, A., Macdonald, L.M., Soong, J., Trigalet, S., Vermeire L.-M. & Nieder, R. 2018. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils—A comprehensive method comparison. *Soil Biology and Biochemistry* 125: 10–26.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and soil* 241(2): 155–176.
- Stinner, W., Möller, K. & Leithold, G. 2008. Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *European Journal of Agronomy* 29(2–3): 125–134.
- Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P. & Christensen, B.T. 2013. Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology and Biochemistry* 58: 82–87.

## 4.2 Mallinnus

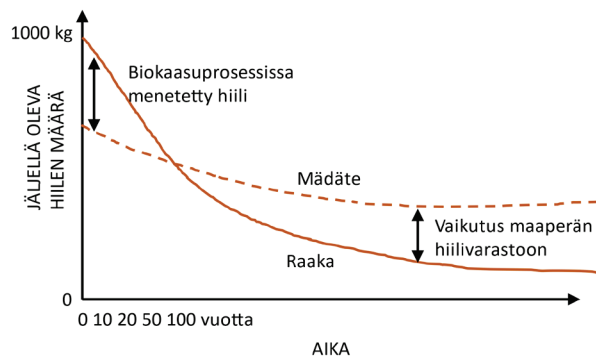
Toteutetun mallinnuksen tavoitteena oli arvioida naudon ja sian lietalan biokaasutuksen ja sen viipymääjän vaikutuksia maaperän hiilitaseeseen mädätteen lannoituskäytössä. Mallinnus tehtiin Yasso07 maaperän hiilimallin avulla. Yasso07-mallissa maaperän hiili on jaettu viiteen hajoamisnopeudeltaan erilaiseen ositteeseen. Ilmasto-olosuhteet, lämpötila ja sademäärä, säätelevät ositteiden hajoamisnopeutta. Yasso07-mallilla voidaan arvioida biokaasuprosessin aiheuttamaa vaikutusta kasvimassojen ja lannan kemialliseen pysyvyyteen maassa. Mallin on todettu ennustavan maanparannusaineiden hajoamista maaperässä suhteellisen hyvin (Heikkinen ym.

2021). Yasso07-mallissa ei kuitenkaan ole mukana maaperän ominaisuuksia kuvaavia tekijöitä, eikä mallilla siis voida huomioida maaperästä johtuvia vaikutuksia mädätteen sisältämän hiilen pysyvyyteen. Yasso07-mallia käytetään laskettaessa maaperän hiilivarastomuutoksia kansallisessa kasviuonekaasuinventaariorissa (Tilastokeskus 2020; Statistics Finland 2021; Tuomi ym. 2009). Mallinnus pyrittiin tekemään mahdollisimman yhdenmukaisesti kansallisessa kasviuonekaasuinventaariorissa käytettyjen laskentamenetelmien kanssa niin, että laskenta olisi siirrettävissä osaksi inventaariorin laskelmia.

Mallinnuksen avulla arvioitiin prosessoimattoman lietalannan ja mädätetyn lietalannan hajoamisnopeutta maaperässä, minkä perusteella laskettiin biokaasutuotuksen vaikutus maaperän hiileen. Laskennan periaate on kuvattu kuviossa 20. Biokaasuprosessissa osa lantaan sitoutuneesta hiilestä muuntuu orgaanisen aineksen hajotessa biokaasuksi, mistä syystä maahan päätyy mädätteenä vähemmän hiiltä verrattuna raakalannan käyttöön. Toisaalta lannasta mädätteeseen jäävä hiili on hitaammin hajoavaa riippuen lannan alkuperäisistä ominaisuuksista ja prosessin toteutustavasta. Tässä työssä biokaasuprosessissa lietalannan hiilestä oletettiin muuntuvan biokaasuksi joko 40 % tai 60 %. Pienempi osuus kuvaa arviota lyhyestä viipymästä ja suurempi osuus pidemmästä viipymästä. Vaikutus maaperän hiilivarastoon on mädätteen ja raakalannan jäljellä olevien osuuksien erotus, mikä riippuu tarkasteltavasta ajanjaksosta (ks. Kuvio 20).

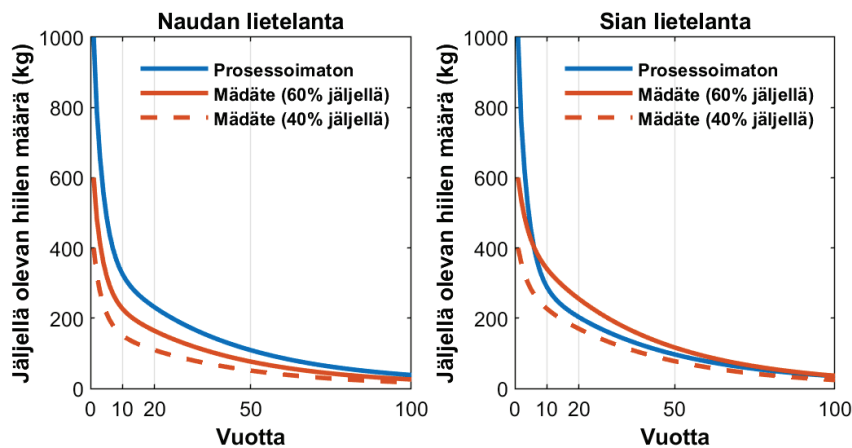
Mallinnukset tehtiin käyttäen keskimääräisiä (2000–2020) Etelä-Suomen lämpötiloja ja sademääriä. Mädätteen ja raakalannan kemialliset laadut poimittiin Mahtava-hankkeen tuloksista (Heikkinen ym. 2021). Mallinnukset tehtiin erikseen sian ja naudan lietalannalle. Laskennassa huomioitiin lannan lisäksi syötemateriaalina olevan nurmibio-massan vaikutus.

**Kuvio 20.** Biokaasutuotannon mädätteen lannoituskäytön maaperän hiilivaikutusten arvioinnissa käytetty laskentaperiaate.



Sekä raakalannan että mädätteen hajoaminen maaperässä on nopeinta hajoamisen alkuvaiheessa ja hidastuu ajan kuluessa (Kuvio 21). Alkuvaiheessa raakalannan hajoaminen on selvästi nopeampaa kuin mädätteen. Naudan raakalietelannasta on vielä sadan vuoden jälkeenkin hieman enemmän hiiltä jäljellä kuin mädätetyistä lietalannoista. Erot tosin ovat hyvin pieniä. Sian lietalannalla raakalanta hajoaa aluksi sen verran nopeasti, että jo kymmenen vuoden kohdalla mädätteen hiilestä (60 %) on enemmän jäljellä. Sian lietalannallakin pitempää ajanjaksoa tarkasteltaessa erot ovat pieniä raakalannan ja mädätteen välillä. Vaikutukset hiilivarastoon on esitetty taulukossa 19.

**Kuvio 21.** Naudan ja sian lietalannan mädätteen hajoaminen maaperässä olettaen, että prosessin aikana biokaasuksi muuntuvan hiilen osuus on 40 tai 60 %.



**Taulukko 19.** Biokaasuprosessin vaikutus maaperän hiilivarastoon tarkasteltaessa 0, 10, 20, 50 ja 100 vuoden ajanjaksoa. Tulokset on laskettu 1000 kg prosessoimatonta lietalantaa kohti (hiilenä). Negatiivinen lukuarvo tarkoittaa, että maassa vähemmän hiiltä verrattuna prosessoimattoman lannan levitykseen. Yksikkö on kg.

Ajanjakso	Sika (40 % hiilestä biokaasuun)	Sika (60 % hiilestä biokaasuun)	Nauta (40 % hiilestä biokaasuun)	Nauta (60 % hiilestä biokaasuun)
0	-600	-400	-600	-400
10	-55	55	-165	-93
20	-32	51	-119	-65
50	-19	19	-57	-32
100	-11	1	-21	-12



Mallinnustulokset vahvistavat kirjallisuuskatsauksen johtopäätelmää, ettei biokaasutuotannolla ole pitkää aikaväliä tarkasteltaessa selvää vaikutusta maaperän hiilen määrään. Tulos on linjassa Heikkinen ym. (2021) esitetyn laskelman kanssa, joka perustui kärkepussikokeessa havaittuun raakalannan ja mädätteen hajoamiseen. Tutkimustiedon ja soveltuvien menetelmien puutteen vuoksi helposti hajoavan hiilen epäsuoria vaikutuksia maaperän pysyvän hiilen määrään ei arvioitu tässä yhteydessä.

Kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariorissa kivennäismaiden hiilivarastomuutokset arvioidaan käyttäen Yasso07 maaperän hiilimallia. Kasvihuonekaasuinventaariorissa kasvintähteistä maahan päätyvä hiilen määrä arvioidaan viljelykasvien satotietojen ja viljelypinta-alojen perusteella. Lannasta peräisin oleva hiili arvioidaan puolestaan kotieläinten määrien perusteella. Kirjoitushetkellä mädätteen vaikutusta ei ole huomioitu kasvihuonekaasuinventaariorissa. Teknisesti mädätteen sisällyttäminen kasvihuonekaasuinventaariorin laskentoihin vaatisi lähinnä tietoa siitä, missä määrin mädätteitä käytetään maanparannusaineina. Kirjallisuuskatsauksen sekä tässä selvityksessä tehtyjen mallinnusten perusteella nykyistä laskentaa voidaan pitää perusteltuna. Nykyinen laskenta vastaa tilannetta, jossa maataloudesta peräisin olevien biomassojen käytöllä biokaasutuotantoon ole maaperän hiiltä lisäävää tai vähentävää vaikutusta. Nykyisessäkin kasvihuonekaasulaskennassa, joka perustuu eri viljelykasvien pinta-aloihin sekä satotasoista johdettuihin maaperän hiilisyötteisiin, tulee huomioitua biokaasutuotannon seurannaisvaikutukset esimerkiksi viljelykiertoihin ja sadontuottoon.

## Lähteet

- Heikkinen, J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Hanajik, P. & Regina, K. 2021. Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils. *Carbon Management* 1–18.
- Statistics Finland 2021. Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2019. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 580 pp. Available at <https://unfccc.int/documents/271571>
- Tilastokeskus 2020. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2018. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. 9 April 2020.
- Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J.A., Sevanto, S. & Liski, J. 2009. Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling* 220(23): 3362–3371.

## 5 Lantabiokaasun sisällyttäminen kasvihuonekaasuinventaarioon

**Tarja Silfver (Luke)**

Vuonna 2021 suurin osa suomalaisesta biokaasusta tuotettiin biojätteestä ja puhdistamolietteestä. Maatalouden syötemateriaaleihin, kuten lantaan ja erilaisiin nurmiin, perustuva tuotanto on kuitenkin ollut kasvusuunnassa läpi 2010-luvun, ja tavoitteet biokaasutuotannon lisäämiseksi nojaavat vahvasti maatalouden biomassojen käyttöön. Vuoteen 2011 verrattuna maatilalaitosten lukumäärä on kasvanut kymmenestä toiminnassa olevasta laitoksesta (Huttunen & Kuittinen 2012) kaikkiaan 25 laitokseen vuonna 2021 (\*ennakkotieto, SVT 2021). Maatilakohtaisten laitosten lisäksi maataloussyötteitä prosessoidaan yhteiskäyttölaitoksissa ja käsittelymäärien odotetaan edelleen kasvavan tämän vuosikymmenen aikana.

Kasvihuonekaasuinventaarion päästölaskenta perustuu hallitusten välisen ilmastopaneelin ohjeisiin, joiden uusimmassa 2019 päivityksessä annetaan ohjeet ja valikoima päästökertoimia lantabiokaasutuotannon sisällyttämiseksi osaksi lannankäsittelyn päästöjen laskentaa (IPCC 2019). Lannan hyödyntäminen biokaasutuotannossa voi vähentää lannankäsittelyn metaani- ja dityppioksidipäästöjä perinteisiin lannankäsittelytapoihin verrattuna, mutta päästöt riippuvat voimakkaasti laitosten teknisestä toteutuksesta ja mädätteen varastointitavoista (IPCC 2019; Miettinen ym. 2022). Laskentaa varten tarvitaan aiempaa tarkempia arvioita siitä, missä määrin lantaa ohjautuu biokaasulaitoksiin, sillä Suomen biokaasurekisterin tiedot ovat syötemateriaalien osalta usein hyvin puutteelliset. Lisäksi tarvitaan tarkempaa tietoa toiminnassa olevien lantaa käsittelevien biokaasulaitosten toimintatavoista ja käytännöistä, jotta IPCC-ohjeista pystytään valitsemaan kansalliseen laskentaan parhaiten soveltuvat päästökertoimet. Päästöjä vähentävien käytäntöjen päästökertoimet ovat ohjeissa selvästi pienemmät kuin heikompien käytäntöjen. Päästökertoimet vaihtelevat parhaimpien käytäntöjen (paras mahdollinen teknologia, vähäiset prosessin aikaiset vuodot ja kaasutiivis mädätteen varastointi) yhdestä prosentista aina heikoimpien käytänteiden (heikko-laatuinen teknologia, runsaat prosessin aikaiset vuodot ja mädätteen avovarastointi) reiluun kahteentoista prosenttiin (IPCC 2019).

Koko ajan kasvavan merkityksensä vuoksi lantabiokaasun sisällyttämistä kansalliseen kasvihuonekaasuinventaarioon on alettu valmistella. Edellä mainittuihin tietotarpeisiin ollaan saamassa lisävalaistusta mm. Tilastokeskuksen toteuttamasta biokaasukyselystä, maataloilille tehdyistä lannankäsittelyyn liittyvistä kyselyistä sekä Luonnonvarakeskuksen omasta lantabiokaasuun liittyvästä tiedonkeruusta. Mädätteen levityksen

sisällyttäminen kasvihuonekaasuinventarioon ei ole nykytietämyksen valossa tarkoituksenmukaista, sillä mädätteen levityksen päästöt ja sen vaikutukset maaperän hiilivarastoon eivät juuri eroa tavanomaisesta lannasta, kuten luvuissa 2.5.2. ja 4.1. todettiin.

Kun lannan käyttö biokaasutuotannossa kasvaa ja se sisällytetään osaksi kansallista kasvihuonekaasuinventariota, myös tuotannon käytännön toteutuksen päästövaikutukset tulevat näkyville. Tämä on hyvä toimialalla ja sen ohjauksessa huomata ja panna nostaa laitosten toteutuksen päästöjä minimoiviin käytäntöihin.

## Lähteet

- Huttunen, M.J. & Kuittinen, V. (toim.) 2012. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 15 – tiedot vuodelta 2011. Publications of the University of Eastern Finland. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences, 8. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-0867-4>
- IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland
- Miettinen, A., Aakkula, J., Koikkalainen, K., Lehtonen, H., Luostarinen, S., Myllykangas, J.-P., Sairanen, A. & Silfver, T. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035: Maatalouden lisätoimenpiteiden ja ruokavaliomuutoksen päästövähennysvaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 73/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 60 s.
- Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkkójulkaisu]. Viiteajankohta: 2021. ISSN=1799-795X. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 17.1.2023]. <https://www.stat.fi/julkaisu/cku5etybc1n3x0b0507rdlg21>

## 6 Ohjauskeinotarkastelu

### Helena Valve (Syke)

Yhteiskunnallista sääntelyä koskevassa tarkastelussa kartoitettiin ne kirjoitushetkellä voimassa ja valmistelussa olevat ohjauskeinot, joilla pyritään takaamaan biokaasutuotannon ympäristökestävyys. Tavoitteena oli tuottaa arvio olemassa olevien oikeudellisten, taloudellisten ja vapaaehtoisuuteen perustuvien ohjauskeinojen kattavuudesta ja toimivuudesta suhteessa tunnistettuihin päästölähteisiin ja kestävyystavoitteiden saavuttamisen ehtoihin. Analyysissä jäsenettiin myös sääntelyn toteutettavuuteen ja oikeusvarmuuteen liittyviä näkökohtia. Tilannekuvan pohjalta määriteltiin ohjauksen kehittämistarpeita.

Ohjauskeinotarkastelussa pyrittiin vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Millä ohjauskeinoilla vaikutetaan biokaasun tuotantoketjun kestävyteen ja päästövähennysten muotoutumiseen?
- Miten ohjauskeinot ottavat huomioon biokaasun tuotantoketjun (Kuvio 1) erilaiset kestävyysnäkökohdat? Mitkä tuotantoketjun vaiheet ovat ohjauksen piirissä ja mitä jää ulkopuolelle?

Selvitys perustui dokumentti- ja haastatteluaineiston analyysiin. Säädöstekstien sekä tutkimus- ja selvitysraporttien avulla kartoitettiin sääntelyinstrumentteja. Tässä työssä oletuksena oli, että ympäristöministeriön hallinnonalan piiriin kuuluvan ympäristösääntelyn (esimerkiksi ympäristönsuojelulaki) ohella biokaasutuotantoa ohjataan tukimutoihin sisältyvin ehdoin sekä epäsuorasti esimerkiksi mädätteen levitystä sääntelemällä.

Dokumenttiaineistoa täydennettiin teemahaastatteluin, jotka toteutettiin marraskuun 2021 ja maaliskuun 2022 välisenä aikana. Kaikki neljä haastateltua henkilöä olivat jo pitkään biokaasutuotannon ja sen kehittämisen kanssa toimineita yksityisen sektorin toimijoita. Heillä on laaja näkökulma toimialaan ja sen sääntelyyn asiakaskontaktien ja alan edunvalvonnan kautta. Kaksi haastatelluista toimii yrityksissä, jotka toimittavat laitosratkaisuja hajautettuun ja/tai keskitettyyn biokaasutuotantoon. Lisäksi haastatelimme toimialalla monipuolisesti toimivaa konsulttia sekä biokaasuinvestointia suunnittelevan yrityksen edustajaa. Etäyhteydellä toteutetut haastattelut kestivät 1–1,5 tuntia. Haastattelut tallennettiin, tallenteet aukikirjoitettiin ja dokumentit analysoitiin NVivo-ohjelman avulla niin, että huomiot biokaasutuotannon kestävyden kannalta oleellista kysymyksistä ja niiden sääntelystä saatiin ryhmiteltyä yhteen.

Seuraavissa alaluvuissa esitellään ohjauskeinotarkastelun tulokset ensin ohjausmuodoittain ja tämän jälkeen eri ohjauskeinoja kokonaisuutena arvioiden.

## 6.1 Taloudelliset ohjauskeinot

### 6.1.1 Tukimuodot

TEM:n energiatukea on myönnetty teollisen mittakaavan biokaasulaitoksille 20–30 % kustannuksista (Alm 2022). Suomen elpymis- ja palautumissuunnitelman mukaisia energiainvestointitukia voidaan myöntää myös biokaasuhankkeisiin (Valtioneuvoston asetus 1112/2021 Suomen elpymis- ja palautumissuunnitelman mukaisia energiainvestointeja vuosina 2022–2026 koskevasta tuesta). Ensimmäisellä tukikierroksella (2021–2022) rahoitettiin energiainvestointeja, joiden investointikustannukset ylittivät 5 miljoonaa euroa.

Maa- ja metsätalousministeriön vuoden 2022 lopussa päättynyt Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma (maaseutuohjelma) ja 2023 alusta voimaan tullut Suomen CAP-suunnitelma sisältävät investointitukia sekä maataloille että maaseutuyrityksille. Maatalouden investointitukea on toukokuusta 2021 lähtien voitu myöntää enintään puolet biokaasulaitoksen tukikelpoisista investointikustannuksista, ja tuki jatkuu uudessa CAP-suunnitelmassa. Tuen saanti edellyttää, että tuettava energia kulutetaan tilalla. Energiainvestointien valintakriteereissä painottuvat hankkeen vaikutukset ympäristöön ja ilmastoon. Investointeihin voi myös saada valtioneuvoston tuesta.

EU-osarahoitteista maaseudun yritystukea on myönnetty biokaasulaitoksille maaseutuohjelmasta 2014–2020 sekä sen siirtymäkaudella 2021–2022. Lisäksi siirtymäkaudella oli käytössä EU:n maaseuturahaston elpymisrahoitusta biokaasulaitoksille. Suomen CAP-suunnitelmasta 2023–2027 voidaan edelleen tukea biokaasulaitosten investointeja (50 % tukikelpoisista kustannuksista). Tukea voivat hakea maaseutualueilla toimivat mikro- ja pienyritykset. Lisäksi rahoituskaudella 2023–2027 on käytössä kokonaan kansallista rahoitusta energiainvestointeihin, kuten biokaasuntuotantoon.

Huoltovarmuuspaketista osoitetaan vuosina 2022–2026 tukea vaihtoehtoisin energialähteisiin ja muihin huoltovarmuuteen liittyviin investointeihin ja kokeiluihin.<sup>3</sup> Maa- ja metsätalousministeriön hallinnonalla tuesta on korvamerkitty 14,5 miljoonaa euroa ja

---

<sup>3</sup> <https://valtioneuvosto.fi/-/1410837/varautumisen-ministeriryoryhman-paatti-toimista-maatalouden-huoltovarmuuden-turvaamiseksi>

ympäristöministeriön hallinnonalalla 25 miljoonaa euroa ravinteiden kierrätyksen investoinneille. Lisäksi maa- ja metsätalousministeriön hallinnonalalla on tulossa kilpailutuksen kautta jaettava ravinnekiertotuki, joka kannustaa biokaasulaitoksia vastaanottamaan lantaa ja jalostamaan mädätettä lannoitevalmisteeksi.

Liikennebiokaasun tuotantoa tuetaan myös vuonna 2021 uudistetun biopolttoaineiden jakeluelvoitteen kautta. Jakeluelvoitteen myötä voi esimerkiksi lantaa syötteenä käyttävä liikennebiokaasua jakeleva yksikkö myydä muille liikennepolttoaineen jakelijoille ns. tikettiosuutta jakeluosuuden täyttämiseksi.

## 6.1.2 Tuettavan toiminnan kestävyydelle asetetut ehdot

### Kestävyyslaki

Tukijärjestelmiin sisältyvät kestävyys ehdot ja -arviointit pyrkivät takaamaan sen, että julkisia panostuksia käytetään kokonaiskestävien ja hiilineutraalisuustavoitteita tukevien hankkeiden rahoitukseen. Kestävyyslaki (393/2013), joka toimeenpanee uusituvan energian direktiivin (2018/2001, RED II) kestävyyskriteerit, määrää, että valtion tukea biokaasutuotannolle voidaan myöntää vain, jos tuotanto perustuu kestäväksi määriteltyihin raaka-aineisiin ja bioenergialla saadaan riittävästi kasvihuonekaasujen päästövähennyksiä. Ehdot ovat alkuaan koskeneet biokaasulaitoksia, joiden kokonaisteho on yli 2 MW (muutos valmisteilla kirjoitushetkellä). Jos valtionavustus on myönnetty liikenteessä käytettävän biokaasun tuottamiseen, tulee tuensaajan osoittaa käytettyjen raaka-aineiden kestävyys hankkeen koosta riippumatta (Energiavirasto 2021). Lisäksi vain hyväksytyin kestävyysjärjestelmän puitteissa tuotettu liikennebiokaasu voidaan laskea jakeluelvoitetta täyttäväksi polttoaineeksi.

Biokaasutuotannon kestävyys osoitetaan pääsääntöisesti toiminnanharjoittajan laatiman ja puolueettoman tahon todentaman kestävyysjärjestelmän perusteella. Energiavirasto vastaa kansallisen kestävyysjärjestelmän hyväksynnästä. Toiminnanharjoittajan tulee tarkistuttaa kestävyysjärjestelmän noudattaminen säännöllisesti ja antaa kestävyyskriteerien täyttymisestä vuosittain selvitys Energiavirastolle (Energiavirasto 2021). Biokaasutuotanto määritellään kestäväksi, jos siinä hyödynnettävät syötemateriaalit ovat määritelmällisesti alkuperältään kestäviä ja jos prosessi tuottaa ennakkolaskennan mukaisesti riittävän määrän päästövähennyksiä. Laskentaan vaikuttaa biokaasutuotannossa käytettävät syötteen. Esimerkiksi silloin, kun prosessissa käytetään syötteenä lantaa, voi tuotanto saada negatiivisen arvon eli sen arvioidaan synnyttävän päästövähennyksiä (lantabonus), kun taas ylijäämänurmiin perustuva tuotanto ei aikaansaa laskennallisia vähennyksiä.

Kestävyyslain mukaisen kestävyuden osoittamisen ulkopuolelle jäävät muun muassa näkökohdat liittyen laitoksen operointiin ja mädätteen hyödyntämiseen. Päästövähennysten laskennassa ei huomioida biokaasun tuotantoketjusta aiheutuvia metaanivuotoja ja -päästöjä. Todentaminen tapahtuu laskennallisten ainetasetarkastelujen puitteissa ilman, että toimintatapoihin ja vuotomahdollisuuksiin kiinnitettäisiin huomiota. Haastattelujen perusteella tarkastelulla voi kuitenkin olla merkittävä rooli toiminnan suunnittelulle.

*"En oo sitä todentamista joutunu kertaakaan tekemään. Mutta nehän on kohtuukovat vaatimukset. Että kyllä siinä joutuu oikeesti, ainakin noin niin kun paperilla kattomaan sen homman aika tarkkaan. Mutta se, että pystytäänkö, tuskin, ei sielläkään varmaan mitään semmosta todentamista tai jotain tsekkausta oo, että jos sulla sit on vaikka jotain vuotoja siellä laitoksella, et se on kuitenkin sit paperilla todentamista että."* (Toiminnanharjoittaja)

*"Mutta tossa mä yhen toimijan kanssa kesällä juttelin ja he totes sen, että heille se kestävyys löi silmille siinä vaiheessa kun he ite lähtivät Energiavirastolle tekemään niitä selvityksiä ja laskelmia. Ja purkamaan sitä läpi. Että siinä vaiheessa se heille konkretisoitu se asia, että mitä se ihan oikeesti käytännössä tarkoittaa."* (Konsultti)

Kestävyyslain mukaiset KHK-vähennemien laskentasäännöt kannustavat lannan käyttöön biokaasutuotannon syötteenä. Lannan määrittely nollapäästöiseksi tukee lannan energiapotentiaalin nykyistä parempaa hyödyntämistä ja luo perustaa myös lannan sisältämien ravinteiden prosessoinnille sekä ravinteiden kierrätyksen edistämiseksi. Lannan sisällyttäminen syötevalikoimaan tuottaa lisäksi Energiavirastolle toimitettavaan päästövähennyslaskentaan laskennallista päästövähennystä verrattuna fossiiliseen vertailuarvoon (Rasi ym. 2019).

Uusiutuvan energian direktiivin lantabonuksella voi kuitenkin olla myös ei-toivottuja sivuvaikutuksia. Laitoksilla, joilla syötteenä käytetään energiapitoisia kasvibiomassoja kuten ylijäämänurmia, voi olla houkutus täydentää syötevalikoimaa lannalla laskennallisen päästövähennemän saavuttamiseksi. Lopputuloksena voi syntyä tilanne, jossa syötemateriaaleja vastaanotetaan paljon suhteessa laitoksen mädätyskapasiteettiin. Yhtälöä voidaan pyrkiä ratkaisemaan reaktoriviipymää lyhentämällä, jolloin riski metaanipäästöille kasvaa (ks. Luku 2).

## Ei merkittävää haittaa -periaate

Elpymis- ja palautumissuunnitelmasta tuettavien hankkeiden tulee olla "ei merkittävää haittaa" (do no significant harm, DNSH) -periaatetta koskevien teknisten ohjeiden

(2021/C58/01) mukaisia (Forsius ym. 2022).<sup>4</sup> DNSH-arviossa voidaan huomioida prosessiketju perusteellisesti ja laaja-alaisesti (Forsius ym. 2022). Esimerkiksi häiriöpäästöjen riskit sekä mädätteen levityksestä aiheutuvat vaikutukset tulisi periaatteessa ottaa huomioon. Itsearviointin toteuttaa rahoitusta hakeva toiminnanharjoittaja. Rahoittaja tekee myös oman arvion vaikutuksista ja ottaa kantaa hakijan itsearviointiin. DNSH-arvioinnin osalta on kuitenkin epäselvää, kuinka yksityiskohtainen arviointi biokaasuhankkeilta edellytetään ja miten arvioinnit vaikuttavat tuotantoprosessia koskeviin ratkaisuihin. Todettakoon, että maa- ja metsätalousministeriön tai Ruokaviraston tukiohjeistuksessa DNSH-arvioinnista ei ole mainintaa.

## 6.2 Ympäristölupa ja ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA)

### 6.2.1 Säädösten soveltaminen ja huomioitavat vaikutukset

Biokaasuinvestoinnit edellyttävät ympäristösuojelulain mukaista ympäristölupaa. Jos biomassoja prosessoidaan yli 20 000 t/v, haetaan lupa aluehallintoviranomaiselta (AVI). Tätä pienimpien yksiköiden toimintaan luvan myöntää kunta. Maatilojen biokaasulaitokset voidaan liittää jo toimivan eläinsuojan ympäristölupaan. Jos eläinsuojan luvan on myöntänyt AVI, myös biokaasulaitokseen haetaan lupa AVI:stä. Uudelle eläinsuojalle ja biokaasulaitokselle haetaan yhteinen lupa (Kotieläintalouden ympäristönsuojeluohje 2021). Lupakäytännöissä on kuitenkin vaihtelua maan eri osissa.

Ympäristöluvassa arvioidaan biokaasulaitoksen luvanvaraisuutta sekä annetaan sen rakentamista ja operointia koskevia määräyksiä. Lupa toiminnalle voidaan myöntää, jos laitoksen ei katsota aiheuttavan uhkaa ympäristön pilaantumiselle. Luvan myöntäminen perustuu oikeuslähteisiin, kuten lakeihin, säädöksiin ja tuomioistuinten ennakkoratkaisuihin. Lupaviranomaisen on harkinnassaan huomioitava se, miten luvanmyöntämisperusteet täyttyvät tietyssä tapauksessa ja suhteessa ympäristön erikoispiirteisiin. Vihreän siirtymän kannalta tärkeiden investointihankkeiden lupahakemukset voivat vuosina 2023–2026 saada etusijan ympäristönsuojelulain ja vesilain mukaisessa lupakäsittelyssä.

---

<sup>4</sup> Elpymis- ja palautumissuunnitelmasta tarkemmin: <https://vm.fi/suomen-elpymis-ja-palautumissuunnitelma>



Biokaasulaitosten ympäristölupakäytäntöjä ei ole järjestelmällisesti tutkittu, mutta uusimpien luparatkaisujen perusteella voidaan alustavasti hahmottaa ympäristöluvan roolia biokaasun tuotantoketjujen sääntelyssä. Esimerkiksi Valion Nivalaan aikanaan suunnitteleman biokaasulaitosinvestoinnin sijainti suhteellisen lähellä asutusta herätti kysymyksen sen mahdollisesti aiheuttamista hajuhaitoista (Maaseudun Tulevaisuus 27.04.2018). Haastatteluissa ympäristöluvan katsottiinkin palvelevan nimenomaan naapuristolle aiheutuvien haittojen minimointia. Luvanhakijoita avustavan henkilön näkökulmasta prosessien mielekkyys on kohentunut viime vuosina:

*"Ympäristöluvitukset on ollut se kaikista, ehkä haastavin asia siinä, laitosten, tai hitain aina se sieltä jossain vaiheessa tulee se lupa mutta se on ollut semmonen jarru, kun muuten ois saattanut asiat edetä nopeammin ja, nousta laitoksia enemmän pystyyyn mutta, se on muuttunut parempaan suuntaan koko ajan. Edelleen näyttää että se on koko ajan menossa parempaan suuntaan ja se on, sanotaanko näin että järkipäisempää se, mitä siellä odotetaan ja vaaditaan niiltä, niissä luvituksissa mutta, edelleen siinä ois, syytä ehkä sitä katsantoa yrittää saada käännettyä siihen suuntaan että se, biokaasu on hyvä asia, eikä ympäristörikos..."* (Laitetoimittaja)

Ympäristöluvuissa annetaan määräyksiä muun muassa sallituista biokaasutuotannon raaka-aineista ja niiden määristä; energian ja mädätteen hyödyntämisestä, häiriötilanteisiin varautumisesta ja jätevesien käsittelystä (Pajala 2022). Jos kyseessä on yli 100 000 tonnia vuodessa käsittelevä ns. direktiivilaitos, annetaan luvassa määräyksiä parhaan käyttökelpoisen teknologian soveltamisesta (Best Available Technology, BAT).

Huomionarvoista on, että KHK-päästöt eivät ole oikeudellinen peruste ympäristöluvan epäämiselle eikä luvassa voida asettaa määräyksiä luvitettavan toiminnan KHK-päästöjen minimointiin (Silvo ym. 2021). Näin ollen metaanipäästöjen todennäköisyyteen vaikuttavista tekijöistä ei voida antaa lupamääräyksiä. Viipymän pituus on kuitenkin ilmoitettava lupahakemuksessa (Pajala 2022). KHK-päästöjen merkityksettömyys aiheutti haastateltavissa ihmetystä: yleisesti oletus oli, että kasvihuonekaasuja koskevilla laskelmilla ja mädätysprosessin mitoituksella olisi ollut vaikutusta siihen, voidaanko lupa myöntää vai ei.

Ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA) tuottaa tietoa ympäristölupaharkinnan perustaksi. YVA-menettely on toteutettava, jos suunniteltavalla biokaasulaitoksella käsitellään syötemateriaaleja yli 35 000 tn/v tai jos hankkeella on todennäköisesti merkittäviä ympäristövaikutuksia. YVA-menettelyssä ympäristövaikutuksen määritelmä on laaja kattaen hankkeen suorat ja epäsuorat vaikutukset ympäristöön ja ihmisten terveyteen. Toiminnanharjoittajan on lisäksi osoitettava ja arvioitava erilaisia hankevaihtoehtoja sekä huolehdittava kansalaisten osallistamisesta arviointiprosessiin. Jälkimmäinen tehtävä nähtiin vaikeaksi:

*“Siin periaatteessa kolmen kertaan samat asiat, jos mietitään se luvitus, yvaaminen ja kaavotus, niin kolmeen kertaan samat asiat. Niin ehkä siinä YVA-hommassa, mä en nyt oo kokenu sitä niin raskaana sen takia, kun käytännössä se YVA tuottaa sitten hyvin suurelta osin sen ympäristöluvan edellyttämät matskut. Että sää voit melkein kun sä saat YVAn tehtyä, niin pistää jo ympäristöluvan sisään ja sul on ne matskut siinä valmiina sen taustaksi. Että melkein saman työn siinä varmaan joutus tekemään isojen hankkeiden kohdalla ilman sitä YVAakin. Mutta toki siel on sitten se oma aikansa, mitä siihen menee. Mutta että se on ehkä surullisinta siinä YVAssa, että ei niihin tahdo niihin tilaisuuksiin tulla ketään. Ne on turhia. On vähän semmonen olo, että ne on aika turhia. Että sitten herätään valittamaan vasta siinä lupavaiheessa, kun sitä ympäristölupaa ollaan hakemassa. Vaikka sen YVAn tarkoitus olis ehkä tavallaan taklata tätä ongelmaa myöskin. Et kyl siinä kehittämistä siinä hommassa on.” (Toiminnanharjoittaja)*

## 6.3 Nitraattiasetus ja lannoitelainsäädäntö

Nitraattiasetus (1250/2014) sääntelee biokaasutuotantoa vaatimuksilla lannan (myös tilalla prosessoidun) ja virtsan varastoinnista sekä orgaanisten lannoitevalmisteiden, kuten mädätteen, levityksestä. Asetus määrittää orgaanisten lannoitevalmisteiden vuosittaisessa käytössä noudatettavat kokonaistypen enimmäismäärät (170 kg/ha) sekä erikseen liukoisen typen enimmäismäärät kasvilajikkeista ja maaperätyypeistä riippuen (30–250 kg/ha).

Lannoitelain (711/2022) perusteella annettu Valtioneuvoston asetus fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä (64/2023) määrittelee kaikkia viljelijöitä koskevat rajat fosforilannoituksen enimmäismäärille. Fosforiasetuksen myötä vapaaehtoisen maatalouden ympäristökorvauksen ehdoiksi asetetut lannoitusrajat poistuvat.

Lannoittamisen typpi- ja fosforikohtaiset enimmäismäärät ovat hyvin tärkeitä biokaasutuotannon kestävyuden varmistamiselle. Rajoitukset pyrkivät varmistamaan, ettei mädätettä tai siitä prosessoituja ravinnetuotteita levitetä pelloille yli kasvien ravinnetarpeen. Tämä on välttämätöntä vesiä rehevöittävän ravinnekuormituksen ehkäisemiseksi.

Ravinteiden käytölle asetetut rajoitukset ovat tärkeitä myös siksi, että ne kannustavat lannan prosessointiin silloin, kun lantaa syntyy enemmän kuin sitä tarvitaan lannoitteeksi tilan omassa tai lähialueen kasvintuotannossa. Prosessoimatonta lantaa ei yleensä kannata kuljettaa kauas. Kun lantaa käytetään biokaasuprosessin syötteenä ja syntynyt mädäte prosessoidaan helpommin kuljetettaviksi ravinnejakeiksi, saadaan

lannoitevalmisteita, joiden käyttö voidaan räätälöidä kasvien tarpeen mukaan. Lannoitusmäärien sovittaminen kasvien tarpeen mukaiseksi vähentää ajan kuluessa vesiin päätyvää ravinnekuormitusta. Mädäte ja sen prosessoinnin lopputuotteet voivat puolestaan korvata teollisten mineraalilannoitteiden käyttöä ravinneköyhillä pelloilla.

Lannoitelainsäädäntö ohjaa fosforilannoitusta, mutta asettaa vaatimuksia myös orgaanisten lannoitevalmisteiden laadulle. Valmisteilla olevassa laatuasetuksessa voidaan asettaa vaatimuksia biokaasuprosessille edellyttämällä, että syntyvä määdäte on stabiili. Näin on silloin, kun metaani on otettu biokaasutuotannon aikana talteen, eikä sitä ole jäänyt merkittävästi mädätteeseen. Mädätteelle asetettavien vaatimusten kautta voitaisiin näin ollen säätää epäsuorasti biokaasuprosessin viipymän pituudesta. Epäselvää kuitenkin kirjoitushetkellä on, kuinka laajasti vaatimus koskisi erilaisia biokaasulaitoksia ja liiketoimintamalleja.

## 6.4 Vapaaehtoiset keinot ja laatujärjestelmät

Ruotsissa on käytössä vapaaehtoinen järjestelmä biokaasulaitosten metaanipäästöjen mittaukseen (Egenkontroll metanemissioner), jota koordinoivat Avfall Sverige ja Svenskt Vatten. Järjestelmän puitteissa seurataan syötteiden varastointia, esikäsitteilyä, sekoitusta, mädätystä- ja jälkimädätystä sekä mädätteen varastointia laitoksella. Mittaus- ja havainnointikohteet valitaan laitospaikoista inventointien perusteella. Laitokset tarkkailevat mahdollisia vuotoja ulkopuolisen konsultin tarkistaman menettelyn perusteella. Jos vuotoja havaitaan, ne tulee korjata välittömästi. Lisäksi ulkopuolinen konsultti mittaa laitoksilla päästöt kolmen vuoden välein.

Biokaasutoimialan edustajien haastatteluissa vapaaehtoisuuteen perustuva toimintamalli sai varsin niukasti kannatusta. Malli olisi todennäköisesti kuormittava eikä siten soveltuisi etenkin pienten yksiköiden itsesääntelyyn ilman lisäkannustinta. Isot yritykset tai esimerkiksi kunnat voisivat toisaalta hyödyntää vapaaehtoista järjestelmää yritys- ja yhteiskuntavastuunsa toteuttamisessa. Vapaaehtoisuus tarkoittaa kuitenkin sitä, että järjestelmän ulkopuolelle jäisivät juuri ne laitokset, joiden toiminta vaatisi kriittistä tarkastelua.

*” No siis periaatteessa hyvä [ajatus]. Vapaaehtoisuudessa monesti vaan aina tulee se et varmasti ne laitostoimijat, ne nopeesti ajattelee et todennäköisesti ne isot kunnalliset varmaan siihen tulee, mut varmaan moni laitostoimija heti mieltii et no pitäähän siitä jotain hyötyä mulle olla tai ainakin että pitää välttää joku haitta [naurahtaa], jos ei oo hyötyä. Et se ehkä vähän siinä tulee ensimmäisenä. Mut tosiaan niin kuin sanoin, niin se ei ole-, sellaiselle laitokselle mikä sen hoitaa hyvin niin se ei ole välttämättä*

*työmääränä ja kustannuksena suuri jos sieltä otetaan, kerran tai kaks vuodessa tehään tällainen analyysi. Mut se haaste tulee varmasti just näillä porttimaksupohjaisilla laitoksilla, ketkä tietävät että se mädätysjäännös tuottaa paljon kaasua, niin siellä varmasti se haastepuoli tulee ja silloin jos se on vapaaehtoinen, niin ne laitokset kenelle se on haaste, tuskin lähtee sitä vapaaehtoisesti tekemään, ja sit siinä ei ole oikein enää sitä mitään pointtia, jos sitä tekee vaan ne ketkä jo hoitaa asiat hyvin.” (Laitetoimittaja)*

Mittausjärjestelmien sijaan laitetoimittajilla on käytössään omia laatujärjestelmiä. Jotkut ulkomaiset laitevalmistajat tarjoavat laaduntarkkailupalveluja asiakkailleen. Heille voi toimittaa näytteen analysoitavaksi. Tuloksen perusteella laitevalmistaja antaa toimenpideohjeita.

*”Meil on keskitetty valvomo elikkä et jos aatellaan että, rakennetaan isompia laitoksia tai joku, tehas on pystyssä jossa tehään tuotantotoimintaa, niin siellähän on yleensä joku valvomo, jossa istuu mies sitten kolmessa vuorossa tai vähintään kahessa vuorossa niin meillä se valvonta on etänä noille pienille laitoksille ja, se yks valvoja seuraa kaikkia laitoksia.” (Laitetoimittaja)*

## 6.5 Haastateltavien näkemykset kestävyiden vaarantavista sääntelyaukoista

Tehdyissä toimialan edustajien haastatteluissa pyydettiin haastateltavilta näkemyksiä siitä, millaiset seikat voivat vaarantaa biokaasutuotannon kestävyyttä ja näin aiheuttaa mainehaittaa koko toimialalle. Haastatellut muistuttivat tässä yhteydessä syötteiden kuljetusmatkojen huomioinnin tärkeydestä sekä mädätteen kestävä käytön ehdoista. Lisäksi keskustelua käytiin biokaasuprosessien operoinnista ja erityisesti laitosratkaisujen mitoituksesta ja prosessin viipymästä.

Metaanipäästöjen minimointi edellyttää koko biokaasun tuotantoketjun huolellista suunnittelua ja operointia, mutta ennen kaikkea sitä, että syötemateriaaleja mädätetään biokaasureaktorissa tarpeeksi pitkään (riittävä viipymä). Näin syötteistä saadaan mahdollisimman suuri osa metaanista talteen ja hyötykäyttöön ja vähennetään metaanipäästöjen riskiä mädätteen varastoinnin aikana. Yrittäjän näkökulmasta tämä on kannattavaa lukuun ottamatta niitä tilanteita, joissa investointi pienempään reaktoriin on selvästi edullisempaa tai yritys saa huomattavan osan tuloistaan jätemateriaalien vastaanotosta. Näissä tapauksissa voi olla houkuttelevaa pitää mädätyksen viipymä-

aika lyhyenä sen sijaan, että investoitaisiin tarpeeksi suureen reaktoriin tai vähennettäisiin vastaanotettavia biomassoja. Myös panostoimisissa kuivamädätysprosesseissa kaasuntuoton tasaamisen tavoite voi ajaa lyhentämään panosten viipymäaikaa.

*K: Jos mennään tähän kestävästi tuotettuun biokaasuun ja alotetaan tälle laajalla maalailevalla kysymyksellä, niin mitä sä nostaisit et mitkä on biokaasun tuotannon kestävyyskannalta ne avainkysymykset?*

*V: "No sitä vähän mietin ennakkoon et mitkä ois sellasia ehkä isompia niin oikeestaan toi sun edellinen kysymys tossa porttimaksupohjasista syötteistä, niin se vie jo sinne puolelle et kyl se varmaan sen mädätysjäännöksen käyttö ja sen kaasuntuottopotentiaalain maksimoiminen tavallaan... et kun on kuitenkin ihan selkee asia et porttimaksupohjasissa niin pyritään maksimoimaan vaan se läpi menevä massan määrä ja sinne mädätysjäännökseen jää sillon-, ensinnäkään sitä ei välttämättä haluta jatkojalostaa, et siitä vaan halutaan mahdollisesti päästä eroon mahdollisimman nopeesti." "...Ja jos nyt vertaa esimerkiksi muutamat reissut mitä on tos Keski-Euroopassa biokaasulaitoksilla käynyt, nii on se aika selkee ero että ei siellä kukaan aja biokaasulaitoksia niin lyhyillä viipymillä kun miten paljon Suomessa tehdään kuitenkin tällä hetkellä. Et kyl se varmaan on yks sellanen selkee se mädätysjäännöksen sitten, sen tarkkailu varmaan siellä kestävyyspuolella on sellanen aika suuri." (Laitetoimittaja)*

Vaikka porttimaksullisia syötteitä vastaanotetaan etenkin keskitetyissä laitoksissa, on kysymys laitosinvestointien koosta asia, josta konsultin mukaan neuvotellaan asiakkaiden kanssa riippumatta siitä, mikä kokoluokan laitosinvestointia ollaan suunnittelemassa:

*"Tehään liian pieniä reaktoreita, viipymäaika on liian lyhyt. Jolloin taas sitten siinä menetetään sen kestävyysnäkökulmasta. Ja miksi näin on tehty, sen takia että siinä investointivaiheessa on säästetty jotakin..." (Konsultti)*

Haastattelujen ja säädöstarkastelun perusteella vaikuttaa selvältä, että biokaasutuotannon viipymää säädellään puutteellisesti. Nykyiset ohjauskeinot eivät ota kantaa viipymääjan pituuteen. Yritysten näkökulmasta laitosinvestointien pieni koko suhteessa biokaasutuotantoon ohjautuvien biomassojen määrään – tai vastaanotettavien massojen ylimitoitus suhteessa laitoksen kokoon – voi olla kannattavaa etenkin lyhyellä aikavälillä. Epäsuhta voi johtaa viipymääjan lyhenemiseen ja metaanipäästöjen syntymiseen.

Täsmällisemmät johtopäätökset ohjauskeinotarkastelusta ja suositukset jatkotoimiksi on koottu raportin johtopäätöslukuun.

## Lähteet

- Alm, M. 2022. Uusiutuva energia– biokaasulla kohti hiilineutraalia tulevaisuutta. TEM toimialaraportit 2022:1. Työ- ja elinkeinoministeriö.
- Energiavirasto 2021. Biopolttoaineita, bionesteitä ja biomassapolttoaineita koskeva toiminnanharjoittajan kestävyyskriteeriohje. Diaarinro 1321/702/2017, 16.6.2021.
- Forsius K., Silvo, K., Jouttijärvi, T., Marttunen, M., Mustajoki, J., Karppinen, T., Kostamo, K., Salo, P., Romppanen, S., Kautto, P. & Toivanen, R. 2022. Ei merkittävää haittaa -periaatteen (DNSH) soveltaminen Suomen elpymis- ja palautumissuunnitelman hankkeissa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 3/2022.
- Kotieläintalouden ympäristölupaohje 2021. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:17.
- Pajala, H. 2022. Biokaasulaitoksen luvat. Esitys tilaisuudessa "Biokaasulaitos – mitä pitäisi huomioida luvituksessa?". Uusiutuvan energian yhteyspisteviranomaisen tietoisku 25.5.2022.
- Rasi S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Pulkkinen, H., Tampio, E., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2019. Nurmi biokaasun raaka-aineena. RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2019. Luonnonvarakeskus.
- Silvo, K., Belinskij, A., Attila, M., Honkonen, T., Horn, S., Huhta, K., Romppanen, S., Saastamoinen, U., Seppälä, J. & Soimakallio, S. 2021. Ilmastovaikutukset ja ympäristölupamenettely. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:43.

## 7 Laitosesimerkit

**Elina Tampio (Luke), Suvi Lehtoranta (Syke), Saija Rasi (Luke), Karetta Timonen (Luke), Ville Pyykkönen (Luke), Jukka Markkanen (Luke), Sari Luostarinen (Luke)**

### 7.1 Laitosesimerkkien kuvaus

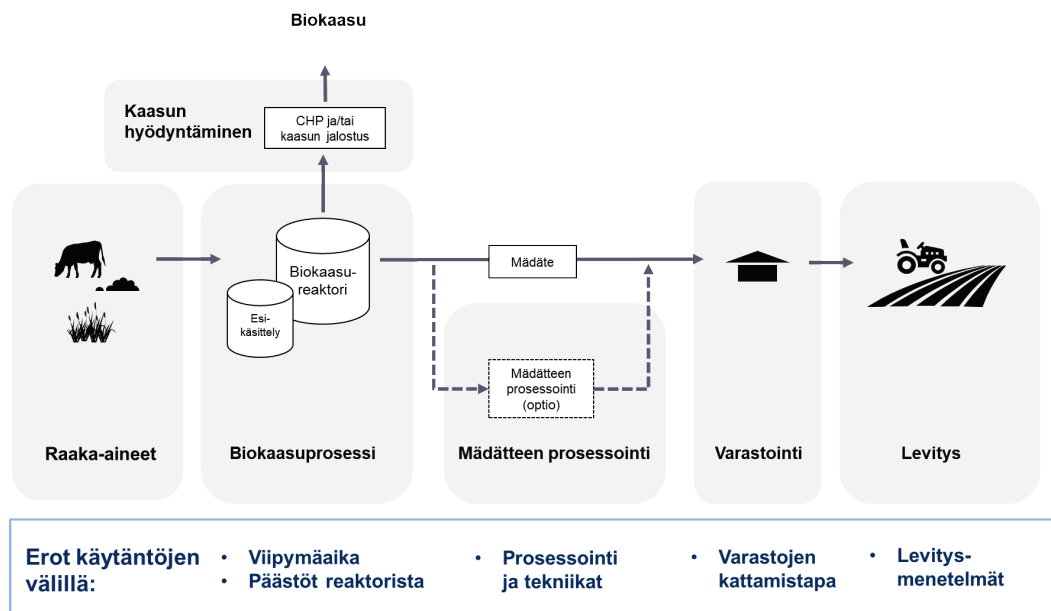
Biokaasun tuotantoketjun päästöjen ja niiden minimoinnin ympäristö- ja talousvaikutusten laskemiseksi muodostettiin neljä teoreettista biokaasulaitosesimerkkiä (Taulukko 20). Kunkin esimerkkilaitoksen mittakaava, syöteseos, toiminta sekä mädätteen käsittely asetettiin kuvaamaan tyypillisiä suomalaisia biokaasulaitoksia. Tavoitteena oli tuottaa esimerkkejä erilaisiin laitos- ja syötevaihtoehtoihin. Esimerkkilaitosten määrittelyyn osallistui Suomen Biokaasu ja Biokierto ry.

**Taulukko 20.** Esimerkkilaitokset ja niiden kapasiteetti syötemateriaaleineen.

Mittakaava	Tekniikka	Käsittely- kapasiteetti (t/v)	Syötemateriaalit
Tilamittakaavan laitos		10 000	Naudan lietelanta (90 %) Säilörehunurmi (10 %)
Usean tilan laitos		30 000	Sian lietelanta (100 %)
	Märkämädätys		Sian lietelanta (40 %) Siipikarjan lanta (15 %)
Keskitetty laitos		200 000	Sian ja naudan lietelannan kuivajae (15 %) HVP-nurmi (10 %) Elintarviketeollisuuden sivuvirta (20 %)
Tilan/usean tilan laitos	Kuivamädätys	2 000	Säilörehunurmi (25 %) HVP-nurmi (50 %) Hevosen lanta (15 %) Siipikarjan lanta (10 %)

Erilaisten käytäntöjen vaikutusta biokaasulaitoksen päästöjen hallintaan tarkasteltiin esimerkkilaitosten avulla (Kuvio 22). Toimintatavat jaettiin kahteen luokkaan, joita kutsutaan tässä a) tavanomaisen ja b) edistyneen toimintatavan mukaisiksi käytännöiksi (Taulukko 21). Pyrkimyksenä oli tuoda esiin merkittävimmät erot biokaasun tuotantoketjun päästöissä keskittyen biokaasureaktorien operoimiseen, mädätteen prosessointiin, mädätteen varastointiin sekä levityksen ratkaisuihin. Käytäntöjen vaikutusta laitosesimerkkien toimintaan tarkasteltiin näiden massa- ja energiataseiden sekä ympäristövaikutusten ja kustannusvaikutusten kautta.

**Kuvio 22.** Biokaasun tuotantoketjun eri vaiheissa huomioitavat kaasumaisiin päästöihin vaikuttavat toimenpiteet ja käytännöt.



Biokaasulaitoksilla on vaihtelevia käytäntöjä, joilla on vaikutusta laitoksen toiminnasta aiheutuviin päästöihin (ks. Luku 2). Esimerkkilaitoksissa tarkasteltiin viipymäajan, reaktorin operoimiseen (ml. syötteiden käsittelyn päästö, vuodot, huollot) ja mädätteen varastoinnin vaikutusta kaasumaisiin päästöihin. Koska mädätteen prosessoinnilla voidaan myös vaikuttaa tuotantoketjun päästöihin (ja mädätteen ravinteiden hyödyntämiseen), sisällytettiin separointi laitosmittakaavasta riippuen ruuvipuristimella tai lingolla edistyneiden toimintatapojen mukaisiin käytäntöihin. Lisäksi suurella keskitetyllä mitta-kaavan laitoksella huomioitiin edistyneenä käytäntönä myös separoitujen jakeiden jatkojalostus edelleen kuivauksen ja haihdutuksen avulla, jolloin jakeiden ravinteet ovat tiiviimmässä muodossa ja näin paremmin kuljetettavissa hyödynnettäväksi. Keskitetyssä laitoksessa mädätteen prosessoinnissa muodostuvia nestejakeita hyödynnettiin myös laitoksen syöteseoksen laimennukseen märkämädätystekniikalle sopivaksi.



Tiloilla tai tilojen yhteydessä sijaitsevilla esimerkkilaitoksissa biokaasusta tuotettiin sähköä ja lämpöä CHP-yksikössä joko tilan omaan käyttöön tai myös myyntiin (tilakohtainen ja usean tilan yhteinen märkämädätyslaitos, kuivämädätyslaitos). Keskitetyllä laitoksella tarkasteltiin pääsääntöisesti vaihtoehtoa, jossa biokaasu puhdistettiin ja paineistettiin kokonaisuudessaan biometaaniksi liikenteen käyttöön. Tällöin laitos osti prosessissa tarvitsemansa sähkön ja lämmön muualta. Ympäristövaikutusten arvioinnissa (Luku 7.3.2.3) keskitetylle laitokselle tarkasteltiin myös vaihtoehtoa, jossa keskitetty laitos tuotti sähköä ja lämpöä CHP-yksikön avulla.

**Taulukko 21.** Kullekin esimerkkilaitokselle määritellyt tavanomaiset ja edistyneet käytännöt. Tuotantoketjun metaanipäästöt on esitetty liitteen 1 taulukossa 1.4.

Esimerkkilaitos	Käytäntö	Viipymäaika	Mädätteen prosessointi	Mädätteen varastointi
Tilakohtainen (märkämädätys)	Tavanomainen	20 vrk	Ei prosessointia	Avoin varasto
	Edistynyt	50 vrk	Separointi ruuvipuristimella	Nestejakeen varasto: suljettu Kuivajakeen varasto: katettu
Usean tilan yhteinen (märkämädätys)	Tavanomainen	20 vrk	Ei prosessointia	Avoin varasto
	Edistynyt	50 vrk	Separointi ruuvipuristimella	Nestejakeen varasto: Kelluva kate Kuivajakeen varasto: katettu
Keskitetty laitos (märkämädätys)	Tavanomainen	20 vrk	Separointi lingolla	Nestejae: avoin Kuivajae: avoin
	Edistynyt	50 vrk	Separointi lingolla, nestejakeen haihdutus, kuivajakeen terminen kuivaus	Tiivistetty nestejae: suljettu Termisesti kuivattu kuivajae: katettu
Tilakohtainen (kuivämädätys)	Tavanomainen	2 kk	-	Avoin varasto
	Edistynyt	4 kk	-	2/3 suora peltolevitys, 1/3 varastointi peitettyssä aumassa

## 7.2 Menetelmät

### 7.2.1 Massa-, ravinne- ja energiataseet

Esimerkkilaitosten massa-, ravinne- ja energiataseet laskettiin ympäristö- ja talousvai-  
kutusten laskennan pohjaksi sekä tavanomaisille että edistyneille käytännöille. Yh-  
teensä tarkasteltiin näin ollen kahdeksaa eri tapausta. Taseiden avulla kuvattiin ku-  
hunkin laitokseen syötetyn biomassan, sen orgaanisen aineksen ja ravinteiden muun-  
tumista biokaasuprosessin ja mädätteen jatkojalostuksen aikana. Samalla huomioitiin  
tavanomaisten ja edistyneiden toimintatapojen vaikutus biokaasun ja mädätteen tuo-  
tantomuotoon. Menetelmät taselaskentaan on kuvattu liitteessä 1.

Energiataseiden laskennassa otettiin huomioon myös tuotantoketjun metaanivähi-  
vikit. Arviot metaanipäästöille asetettiin kirjallisuuskatsauksen (ks. Luku 2) sekä asiantun-  
tija-arvioiden perusteella. Koska kirjallisuuskatsauksessa päästöjen vaihtelu osoit-  
tanut suureksi ja niiden arviointiin kohdistuu merkittävää epävarmuutta, määritettiin me-  
taanipäästöille vaihteluvälit. Metaanipäästöt prosessin eri vaiheille on kuvattu liitteen 1  
taulukossa 1.4. Metaanivuodot huomioitiin taselaskennassa siten, että tuotetun bio-  
kaasun määrästä vähennettiin oletetut prosessin aikaiset vuodot, paineilman säätö-  
venttiilien kautta tapahtuvat vuodot (PRV) sekä huollosta aiheutuvat päästöt. Lisäksi  
liikennepolttoaineen valmistuksessa huomioitiin prosessin metaanivähi-  
vikit. CHP-yksi-  
köiden metaanivähi-  
vikit ei huomioitu sellaisenaan taselaskennassa, koska sen oletet-  
tiin sisältyvän CHP-tuotannon hyötysuhteeseen.

### 7.2.2 Ympäristövaikutukset

Biokaasun tuotantoketjun elinkaarisia ilmastovaikutuksia tarkasteltiin elinkaariarvioin-  
tiin (Life Cycle Assessment, LCA) perustuvalla standardoidulla menetelmällä (ISO  
14040). Sen avulla voidaan eritellä biokaasun tuotantoketjun eri vaiheiden ilmastovai-  
kutuksia sekä tunnistaa tekijöitä, joiden ilmastovaikutukset ovat toiminnan elinkaaren  
aikana merkittävimpiä. Työn tavoitteena oli arvioida operointikäytäntöjen vaikutuksia  
ilmastoon esimerkkilaitoksiin perustuvien järjestelmien avulla. Elinkaariset ilmastovai-  
kutukset arvioitiin kaikille neljälle esimerkkilaitokselle sekä niiden tavanomaisille ja  
edistyneille käytännöille.

Ilmaston lämpeneminen aiheutuu kasvihuonekaasujen pitoisuuden noususta ilmakehässä, jonka seurauksena lämpösäteilyn poistuminen ilmakehästä heikkenee. Kasvihuonekaasuista tyypillisimmät ovat hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja dityppioksidi (N<sub>2</sub>O). Kasvihuonekaasujen ominaislämmitysvaikutus ja elinikä ilmakehässä vaihtelevat. Biokaasutuotannon kannalta keskeinen kasvihuonekaasu on metaani, joka on hiilidioksidia lyhytikäisempi, mutta voimakkaampi kasvihuonekaasu. Ilmastovaikutuksia mitataan elinkaariarvioinnissa tyypillisesti GWP-menetelmällä (Global Warming Potential). Menetelmä muuntaa eri kasvihuonekaasujen yksikköpäästöjen lämmitysvaikutuksen hiilidioksidiekvivalentiksi ottaen huomioon lämmitysvaikutuksen valitun ajanjakson aikana. Menetelmän epävarmuus kasvaa, mitä pidempi tarkastelujakso on. Tyypillisesti tarkastellaan 100 vuoden (GWP100) ajanjaksoa, koska se on yhdenmukainen YK:n ilmastosopimuksen ja sen alaisen Kioton pöytäkirjan kanssa. Tässä tutkimuksessa päästöjen karakterisoinnissa käytettiin kasvihuonekaasuinventaarion raportointi- ja menetelmäohjeiden (SVT 2020) mukaisesti IPCC:n neljännen arviointiraportin (IPCC 2007) GWP-kertoimia 100 vuoden aikajänteelle.

Ilmastovaikutukset laskettiin kullekin esimerkkilaitokselle yhden vuoden toiminta-aikaa kohden. Laskennan tavoitteena oli arvioida laitoksen operointikäytäntöjen vaikutuksia ilmastoon eri mittakaavoissa ja erilaisilla biomassasyötteillä. Laskennassa käytetyt lähtötiedot on esitetty liitteessä 4. Lähtötietoihin liittyvien epävarmuuksien vuoksi ja erilaisten käytäntöjen päästövähennyspotentiaalin selvittämiseksi laskenta tehtiin minimi- ja maksimiarvoja käyttäen sekä tavanomaisille että edistyneille käytännöille. Laskennan tulokset esitetään edistyneiden käytäntöjen minimiarvojen ja tavanomaisien käytäntöjen maksimiarvojen vaihteluvälinä kaaviokuvissa. Lisäksi tarkasteltiin edistyneiden käytäntöjen päästövähennyspotentiaalia elinkaarivaiheittain.

Käytetty laskentarajaus on esitetty kuviossa 23. Laskennassa huomioitiin eri elinkaarivaiheiden suorat (siniset laatikot) ja epäsuorat päästöt (harmaat laatikot). Kaikkien biokaasulaitosten syötemateriaalien oletettiin olevan maatalouden ja elintarviketeollisuuden sivuvirtoja ja jätteitä. Näin ollen niiden tuotannosta aiheutuvia päästöjä ei sisällytetty laskentaan. Mädätteen loppukäytöstä huomioitiin vain siitä peltolevityksessä vapautuvat kasvihuonekaasupäästöt. Operointikäytäntöjen vaikutuksia mädätteiden tai siitä jalostettujen jakeiden levitystä ja kuljetusta koskeviin konetyön päästöihin ei arvioitu. Myöskään laitosten rakentamisesta ja rakentamisessa käytettyjen tarvikkeiden tuotannosta aiheutuvia päästöjä ei sisällytetty tarkasteluun.

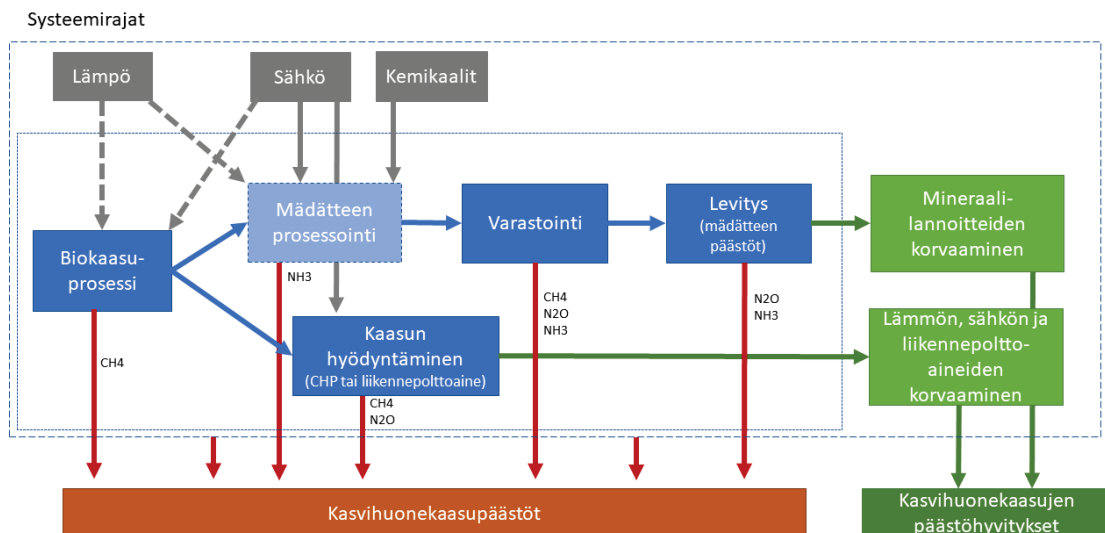
Jotta erilaisten käytäntöjen vaikutuksia voitiin arvioida mahdolliset seurausvaikutukset huomioiden, sisällytettiin arviointiin myös mahdolliset päästöhyvitykset, substituutiot, prosessissa muodostuville tuotteille (vihreät laatikot). Näitä ovat tuotettu energia ja mädätteen sisältämät ravinteet (fosfori ja typpi). Kaikilla esimerkkilaitoksilla tuotettujen

lopputuotteiden oletettiin korvaavan olemassa olevaa sähkön ja lämmön tai liikenne- polttoaineiden sekä epäorgaanisten lannoitteiden tuotantoa ja käyttöä täysimääräi- sesti. Lisäksi tuloksia tarkasteltiin ilman mahdollisia päästöhyvityksiä.

Biokaasulaitosten erilaisten operointikäytäntöjen lisäksi tarkasteltiin kunkin esimerkki- järjestelmän syötemateriaaleina olevien biomassojen perinteistä käsittelyä ja hyödyn- tämistä, eli vertailutilannetta ilman biokaasutuotantoa. Myös vertailutilanteelle lasket- tiin elinkaariset ilmastovaikutukset. Vertailutilanne toimii samalla ns. mittatikkuna bio- kaasulaitoksen erilaisten operointikäytäntöjen vaikutusten arvioinnissa. Vertailutilan- teeseen sisällytettiin biomassojen mahdollinen varastointi, kompostointi, hyödyntämi- sestä aiheutuvat kasviuonekaasupäästöt sekä ravinteiden substituutiot biomassasta riippuen.

Esimerkkilaitosten elinkaarisia ympäristövaikutuksia arvioitiin sekä kasviuonekaa- suille että ammoniakkipäästöille. Koska erilaisten käytäntöjen vaikutukset ammoniak- kipäästöihin eroavat käytetyllä rajauksella lähinnä vain varastoinnin ja levityksen suh- teen toisistaan, tarkasteltiin ammoniakkipäästöjä pääasiassa sanallisesti.

**Kuvio 23.** Elinkaariarvioinnin systeemirajat. Siniset laatikot: tarkasteltujen vaiheiden suorat päästöt. Harmaat laatikot: elinkaarivaiheiden epäsuorat päästöt. Vihreät laatikot: hyvitykset.



### Lähteet:

IPCC 2007. AR4 Climate change 2007: Synthesis Report.

ISO 14040 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.

SVT (Suomen virallinen tilasto) 2020. Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu].

ISSN=1797-6049. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 7.3.2022].

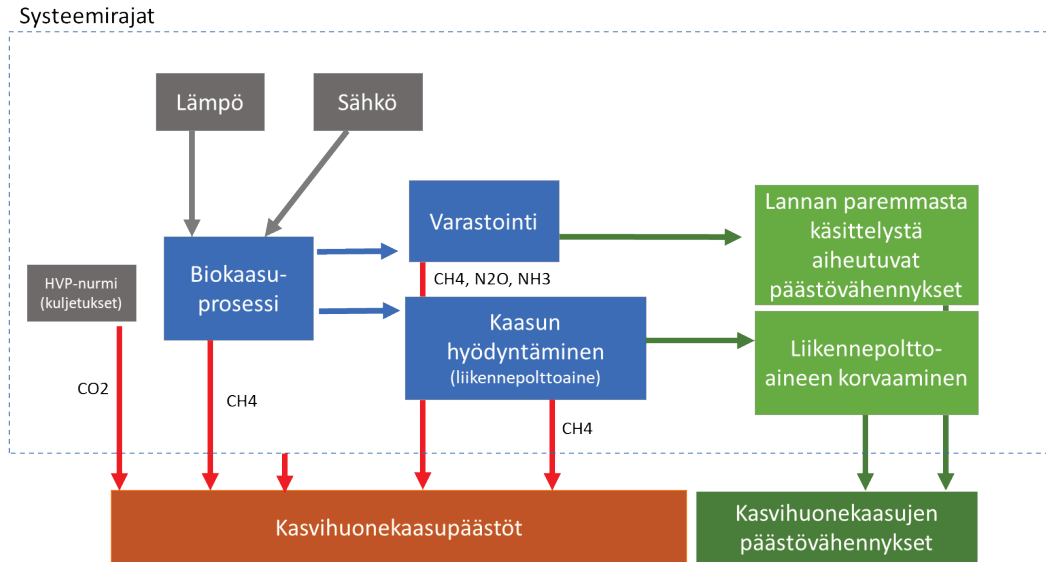
[http://www.stat.fi/til/khki/khki\\_2019\\_2020-05-28\\_men\\_001.html](http://www.stat.fi/til/khki/khki_2019_2020-05-28_men_001.html)

## 7.2.3 Uusiutuvan energian direktiivin mukainen päästölaskenta

Keskitetylle esimerkkilaitokselle laskettiin uusiutuvan energian direktiivin (EU 2018) mukainen päästövähennyslaskenta (Energiavirasto 2022), kun tuotettu biokaasu jalostetaan liikennepolttoaineeksi. Laskenta tehtiin vain isoimmalle esimerkille, sillä muut esimerkkilaitokset eivät raportin kirjoitushetkellä ole mittaluokaltaan tarpeeksi suuria, jotta kestävyys tulisi todentaa (min. 2 MW kokonaislämpöteho, kun biokaasu käytetään sähkön ja lämmöntuotantoon). Laitoskoon rajaan voi tulla muutoksia, sillä polttoaineiden valmisteverolain mukaan (Laki sähkön ja eräiden polttoaineiden valmisteverosta annetun lain muuttamisesta, 958/2022) biokaasun tuottaja on valmisteverovelvollinen, jos biokaasun tuotanto on yli 1 GWh/v (ml. lämmityskäyttö, joka muuttui veronalaiseksi vuoden 2023 alussa).

Laskennan raja-alue eroaa hieman tässä työssä tehdystä LCA-laskennan rajauksesta (Luku 7.2.2), sillä direktiivin mukaisessa päästölaskennassa ei huomioida mädätteen käsittelyä tai käyttöä, mutta biokaasutuotannon oletetulle lannan KHK-päästövähennemä huomioidaan (Kuvio 24). Hoidetun, viljelemättömän (HVP) nurmen korjuu ja kuljetus taas kuuluu laskentaan mukaan, toisin kuin LCA-laskennassa.

**Kuvio 24.** Systeimirajaus keskitetyn esimerkkilaitoksen uusiutuvan energian direktiivin mukaisessa päästölaskennassa. Lanta ja elintarviketeollisuuden sivuvirta ovat laskennassa nollapäästöisiä eivätkä siksi näy kuvassa.



Laskennan lähtökohtana käytettiin LCA-laskennasta (Luku 7.3.2) saatuja tuotantoketjun eri vaiheiden päästöjä (laskenta 1). Lisäksi laskennassa käytettiin uusiutuvan energian direktiivissä annettuja kasvihuonekaasupäästöjen oletusarvoja tuotantoketjun eri vaiheille (laskenta 2 ja 3) päästötietojen vertaamiseksi. Direktiivissä annetaan päästöjen oletusarvot muutamille syötemateriaaleille (lietelanta, maissi, biojäte) vaiheittain sekä neljälle eri teknologiavaihtoehdolle, joissa huomioidaan mädätteen varaston kattaminen ja kaasunjalostuksen poistokaasun metaanin käsittely (esim. polttamalla). Näistä edistyneeksi käytännöksi tässä hankkeessa valittiin mädätteen varaston kattaminen ja jalostuksen poistokaasun käsittely sekä tavanomaiseksi käytännöksi avoin varastosäiliö sekä kaasunjalostuksen poistokaasun käsittelemättä jättäminen. Päästöjen lisäksi direktiivi antaa myös oletusarvot lietelannasta tehtäville päästöhyviksille. Laskenta kuvattu tarkemmin liitteessä 2.

## Lähteet

- EU 2001. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU) 2018/2001, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>
- Energiavirasto 2022. Biopolttoaineita, bionesteitä ja biomassapolttoaineita koskeva toiminnanharjoittajan kestävyyskriteeriohje. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12778928/OHJE-Toiminnanharjoittajan-kest%C3%A4vyyskriteeriohje.pdf/6eafa3a2-4c7e-adea-c955-4959a54a8b6d>

## 7.3 Tulokset

### 7.3.1 Esimerkkilaitosten taselaskenta

Massa-, ravinne- ja energiatase laskettiin neljälle esimerkkilaitokselle, joille kullekin huomioitiin kaasumaisten päästöjen kannalta edistyneet ja tavanomaiset käytännöt. Esimerkkilaitosten tuloksia ei ole tarkoitus vertailla keskenään, vaan vertailu on mahdollista kunkin esimerkkilaitoksen tavanomaisen ja edistyneen toimintatavan kesken.

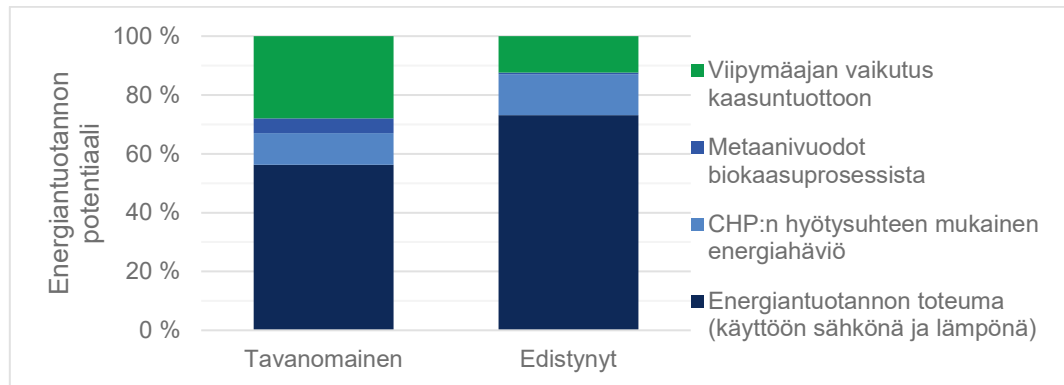
#### 7.3.1.1 Energiataseet

Biokaasulaitoksen energiantuotanto perustuu laitoksen syötemateriaalien energiasisältöön, joka määrittää biokaasun tuotantopotentiaalin. Laitoksen syötön jatkuvatoimisuus ja syötemassan viipymäaika reaktorissa kuitenkin vaikuttavat siihen, ettei teoreettista potentiaalia saavuteta kokonaisuudessaan, vaan siitä toteutuu vain osa. Mitä pidempi viipymäaika on, sitä enemmän potentiaalista saavutetaan, kun syötemateriaalilla on enemmän aikaa hajota reaktorin mikrobitoiminnan vaikutuksesta.

Kuvioon 25 on koottu huomioitujen tekijöiden vaikutukset energiatuotannon potentiaalin saavuttamiseen tilamittakaavan märkämädätyslaitoksella. Tulos on samansuuntainen esimerkkilaitoksesta riippumatta.

Edistyneiden käytäntöjen pidempi viipymäaika mahdollistaa sen, että syötemateriaalien energiasisällöstä saadaan enemmän talteen. Biokaasun tai tarkemmin metaanin tuoton toteumaan vaikuttavat lisäksi metaanivuodot eli se biokaasu, joka vapautuu ilmakehään esimerkiksi laitoksen operoinnin yhteydessä (vuodot, varoventtiilit) tai huoltotoimenpiteiden ja laiterikkojen seurauksena. Tavanomaisen käytännön laitoksille oletettiin edistynyttä suuremmat laitoksen metaanivuodot. Mikäli laitos jalostaa biokaasun CHP-yksikön avulla sähköksi ja lämmöksi, on myös huomioitava CHP-tuotannon hyötysuhde ja sen vaikutus energiantuotannon toteumaan. Hyötysuhde on usein noin 90 % CHP-yksikön tehokkuudesta riippuen. Myös liikennepolttoaineen jalostuksessa huomioidaan hyötysuhde, joka on kuitenkin CHP-yksikön hyötysuhdetta korkeampi, noin 98 %. Kokonaisuudessaan tilakokoluokan märkämädätyslaitoksen esimerkissä (Kuvio 25) edistyneillä käytännöillä (pidempi viipymäaika ja metaanivuojojen minimointi) energiantuotannon potentiaalista realisoitui 73 %, kun tavanomaisilla käytännöillä vastaava luku oli 56 %.

**Kuvio 25.** Päästöjen ja hävikkien vaikutus energiantuotannon toteumaan, esimerkkinä tilamittakaavan märkämädätyslaitos. Energiantuotannon toteumassa huomioitu reaktorin viipymääjan vaikutus, metaanivuodot prosessin aikana sekä CHP-yksikön hyötysuhde. Tulos on samansuuntainen kaikille esimerkkilaitoksille.



Laitoksen viipymäaika oli merkittävin energiataseisiin vaikuttava tekijä. Kuitenkin myös metaanivuotojen määrällä on merkitystä. Esimerkkilaitosten energiantuotantoa tarkasteltiin huomioimalla vuodoille vaihteluväli (minimi ja maksimi), jotta pystyttiin kuvaamaan metaanivuotojen merkitystä laitospäätöksessä. LCA-laskennassa (Luku 7.3.2) huomioitiin metaanivälikin vaihteluväli, mutta talouslaskelmissa (7.3.4) käytettiin välikin minimi- ja maksimiarvojen keskiarvoa, kun tarkasteltiin esimerkkilaitosten energiantuottoa (Taulukko 22).

**Taulukko 22.** Tuotetun biokaasun energiasisältö esimerkklaitoksissa tavanomaisen sekä edistyneen käytännön mukaisissa tilanteissa. Minimi/maksimi huomioi metaanipäästön vaihteluvälin ja sen vaikutuksen kunkin laitoksen energiantuotantoon. Vaihteluväli huomioitiin LCA-laskennassa, kun taas kustannustarkastelussa hyödynnettiin metaanivälikin keskiarvolla laskettua energiantuottoa eri laitosesimerkeissä.

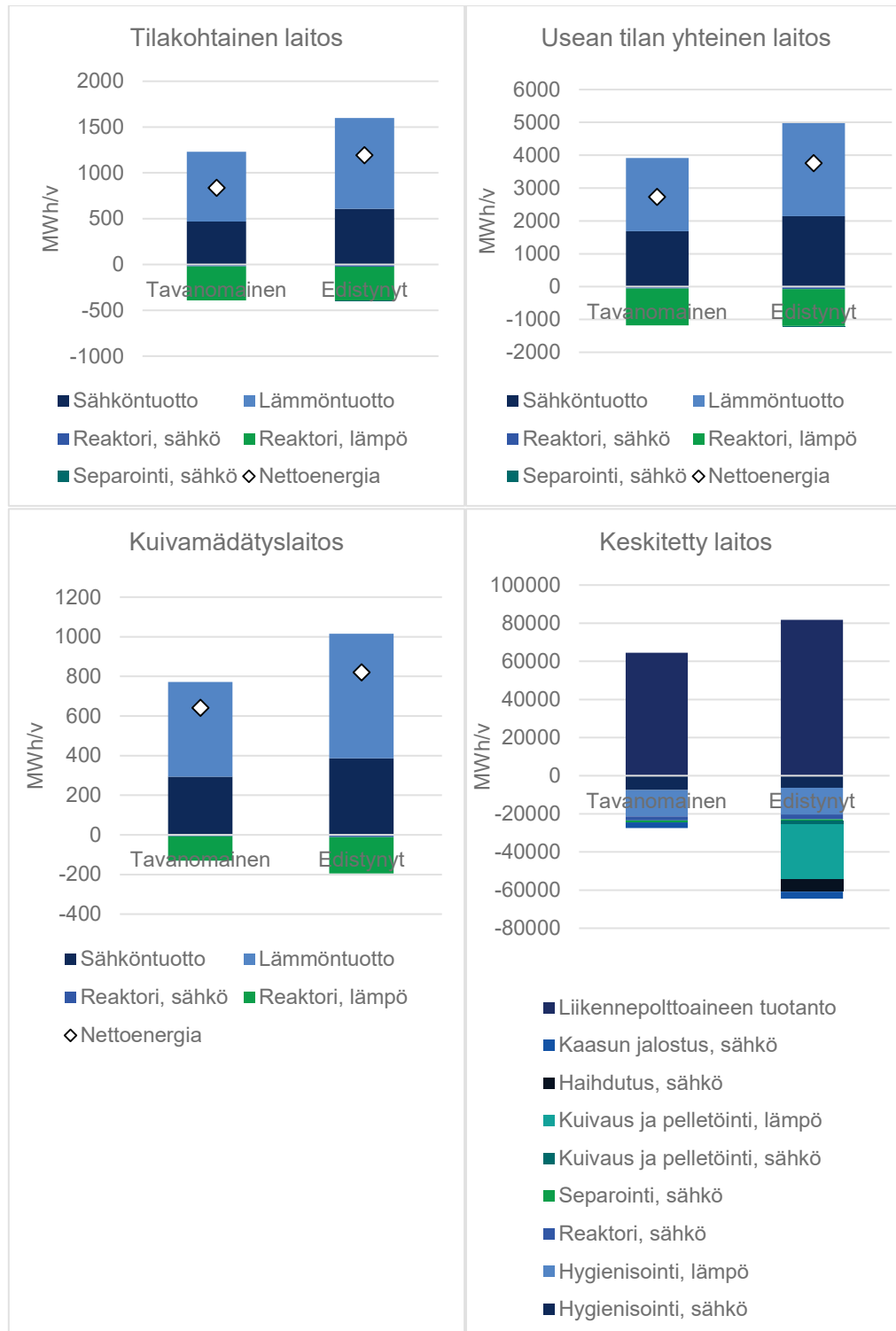
Esimerkkilaitos	Käytäntö	Energiantuoton min-max (MWh/v)	Energiantuoton keskiarvo (MWh/v)
Tila	Tavanomainen	1 466–1 521	1 494
	Edistynyt	1 883–1 904	1 893
Usean tilan	Tavanomainen	4 554–4 705	4 630
	Edistynyt	5 722–5 786	5 754
Keskitetty	Tavanomainen	66 566–68 478	67 522
	Edistynyt	81 038–81 862	81 450
Kuivämädätys	Tavanomainen	919–966	942
	Edistynyt	1 183–1 209	1 196



Esimerkkilaitoksissa tuotettu biokaasu hyödynnettiin eri tavoin. Pienemmät laitokset (tila, usean tilan ja kuivamädätyslaitos) tuottivat biokaasustaan CHP-yksikössä sähköä ja lämpöä. Sähkö ja lämpö hyödynnettiin pääasiassa laitoksen oman kulutuksen kattamiseen. Laitoksen kulutuksen jälkeen jäljelle jäävää energiaa (ns. nettoenergia) pystyttäisiin hyödyntämään esimerkiksi maatilan muuhun käyttöön tai sitä voidaan myydä ulkopuolelle. Keskitetty esimerkkilaitos jalosti tuottamastaan biokaasusta biometaanina liikennepolttoaineeksi. Oletus oli, että koko biokaasuvolyymi käytettiin liikennepolttoaineen tuotantoon ja laitoksen oma sähkön- ja lämmöntarve katettiin osatoenergialla. Kuvioon 26 on koottu eri esimerkkilaitosten energiantuotto sekä laitoksen oma kulutus sähköinä ja lämpönä. Lisäksi laitoilla, joissa omaa energiankulutusta katettiin laitoksen tuottamalla energialla, esitetään nettoenergian määrä. Keskitetyn laitoksen osalta energiatas tarkastelu tilanteessa, jossa laitos hyödyntää tuottamansa biokaasun täysimääräisesti CHP-yksikössä sähköksi ja lämmöksi, on esitetty liitteessä 3.

Kuvion 26 perusteella voidaan todeta, että edistyneiden käytäntöjen mukaisissa esimerkkilaitoksissa energiankulutusta nostaa mädätteen prosessoinnin menetelmät verrattuna tavanomaiseen käytäntöön. Tilan ja usean tilan märkämädätyslaitoksilla mädätettä separoitiin neste- ja kuivajakeiksi, mikä hieman lisäsi kokonaissähkökulutusta. Keskitetyssä laitoksessa separointi kuului myös tavanomaiseen käytäntöön, kun taas edistynyt käytäntö sisälsi laajamittaisemman mädätteen prosessoinnin, joka koostui separoidun kuivajakeen kuivauksesta ja pelletöinnistä sekä nestejakeen väkevöinnistä haihduttamalla. Mädätteen kuivajakeen kuivaukseen oletettiin hyödynnettävän lämpöenergiaa, kun taas haihdutus sekä pelletöinti olivat sähkötoimisia prosesseja. Mädätteen laajempi prosessointi lisäsi energiankulutusta, mutta hyötynä ovat entistä väkevämät lannoitevalmisteet, joiden kuljetuskustannus ravinnetonnia kohden on matala.

**Kuvio 26.** Esimerkkilaitosten energiantuotanto sekä -kulutus. X-akselin yläpuolella on esitetty tuotettu sähkö/lämpö tai liikennepolttoaineen energiasisältö. X-akselin alapuolella negatiiviset luvut kuvaavat kulutusta, joka on jaettu eri vaiheisiin.



### 7.3.1.2 Massa- ja ravinnetaseet

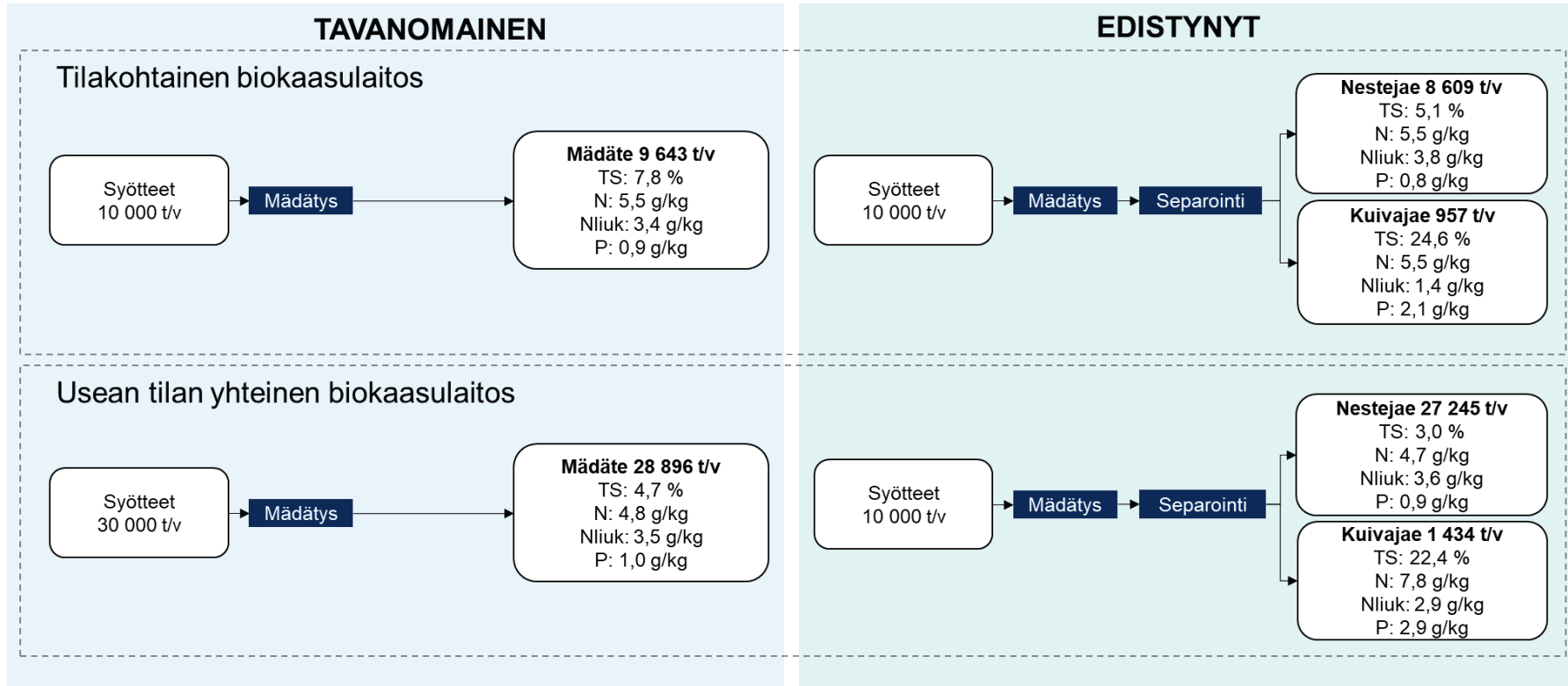
Syötemateriaalin viipymäaika biokaasuprosessissa vaikuttaa sen hajoamisen tehokkuuteen; mitä pidempi viipymäaika on, sitä paremmin orgaaninen aines hajoaa biokaasuksi. Hajoamisella on vaikutusta myös massa- ja ravinteisiin, minkä vuoksi mädätteen määrä on hieman syötteiden yhteenlaskettua määrää matalampi. Biokaasuprosessissa lisäksi liukoisen typen suhteellinen osuus kasvaa, mikä johtuu typpipitoisen orgaanisen aineksen hajoamisesta ja typen mineralisoitumisesta. Typen liukoistuminen on riippuvaista orgaanisen aineksen hajoamisen asteesta ja näin ollen pidempi viipymäaika vaikuttaa myös liukoisen typen määrään mädätteessä. Koska esimerkkilaitosten edistyneissä käytännöissä huomioitiin pidempi viipymäaika, oli edistyneen käytännön mukaisessa mädätteessä liukoisen typen määrä tavanomaista käytäntöä korkeampi (Kuvio 27). Korkeampi liukoisen typen osuus on eduksi mädätteen lannoituskäytössä. Kokonaistyyppi ja kokonaisfosfori säilyvät ennallaan mädätteessä biokaasuprosessin aikana, mutta myös näiden ravinteiden pitoisuus (g/kg) hieman nousee, koska mädätteen massa on hieman alkuperäistä syötemassaa pienempi orgaanisen aineksen hajoamisen, ts. biokaasun muodostumisen vuoksi.

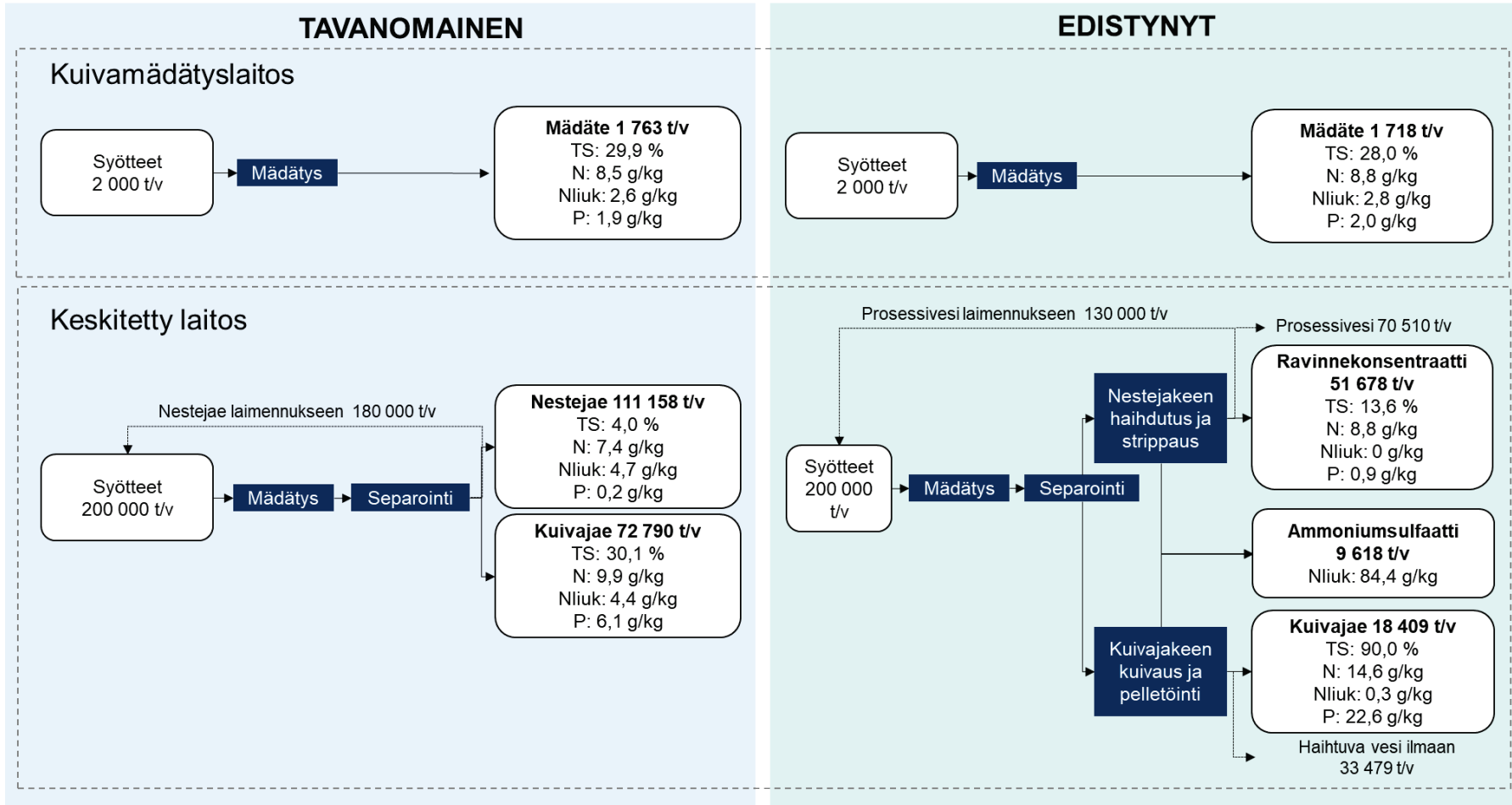
Tilan ja usean tilan märkämädätyslaitoksissa oli edistyneessä käytännössä mukana mädätteen prosessointi ruuviseparaattorin avulla. Separointi jakaa mädätteen kahteen fraktioon, neste- ja kuivajakeeseen. Vesiliukoista tyyppiä päätyy runsaasti nestejakeeseen ja orgaanisen ainekseen kiinnittynyttä fosforia kuivajakeeseen. Separointi näin ollen mahdollistaa fosforin erottamisen osittain kuivajakeeseen, jota on helpompaa ja kannattavampaa kuljettaa. Typen ja fosforin erottuminen eri jakeisiin ja N/P suhteiden muuttuminen voi myös helpottaa jakeiden lannoitekäyttöä ja ravinteiden jakautumista tilalla. Separointi kuitenkin kuluttaa sähköenergiaa, mutta tällä ei havaittu vaikutusta laitosten kokonaisenergiataseeseen tavanomaisen käytännön tilanteeseen verrattuna, koska edistyneen käytännön mukaisilla esimerkkilaitoksilla energiantuotto oli korkeampi.

Keskitettyyn esimerkkilaitokseen sisällytettiin edistyneenä käytäntönä pitkälle viety mädätteen jatkojalostusketju, jossa mädäte separoitiin lingolla ja muodostuneita jakeita jalostettiin vielä eteenpäin. Lingottu kuivajae kuivattiin ja pelletöitiin, jolloin tuotteena oli kuiva pellettimuotoinen tuote, jossa oli korkea kokonaistypen ja fosforin pitoisuus (14 gN/kg, 23 gP/kg; Kuvio 27). Tuote on tehokas kuljettaa pitkiä matkoja ja sen tuottaminen edesauttaa alueellisen fosforiylijäämän tasaamista. Lingottu nestejake väkevöitiin haihduttamalla ravinekonsentraatiksi sekä strippaamalla liukoinen typi ammoniumsulfaatiksi. Väkevöinti poistaa tuotteista vettä, mikä mahdollistaa myös näiden tuotteiden kuljetettavuuden. Ravinekonsentraatti sisälsi suurimman osan mädätteen tyyppistä, mutta myös pienen määrän fosforia (9 gN/kg, 1 gP/kg). Ammoniumsulfaatissa liukoisen typen pitoisuus oli korkea (84 gNH<sub>4</sub>-N/kg). Mädätteen jatkojalostus kulutti merkittävästi energiaa, mutta myös keskitetyssä laitoksessa edistyneistä käytännöistä

(pitkä viipymä, päästöjen minimointi prosessista) johtuen energiantuotanto oli tavanomaista käytäntöä merkittävästi korkeampi, jolloin edistyneen käytännön mukainen laitos tuotti enemmän liikennepolttoainetta myyntiin. Mädätteen käsittelyn energiankulutuksen vuoksi edistyneen käytännön mukainen laitos osti enemmän sähköä ja lämpöä omaan käyttöönsä, mutta laitoksen kokonaisenergian nettotase oli positiivinen (Kuvio 27).

**Kuvio 27.** Esimerkkilaitosten mädätteen käsittelyketjun massatase ja muodostuvat tuotteet ominaisuuksineen.





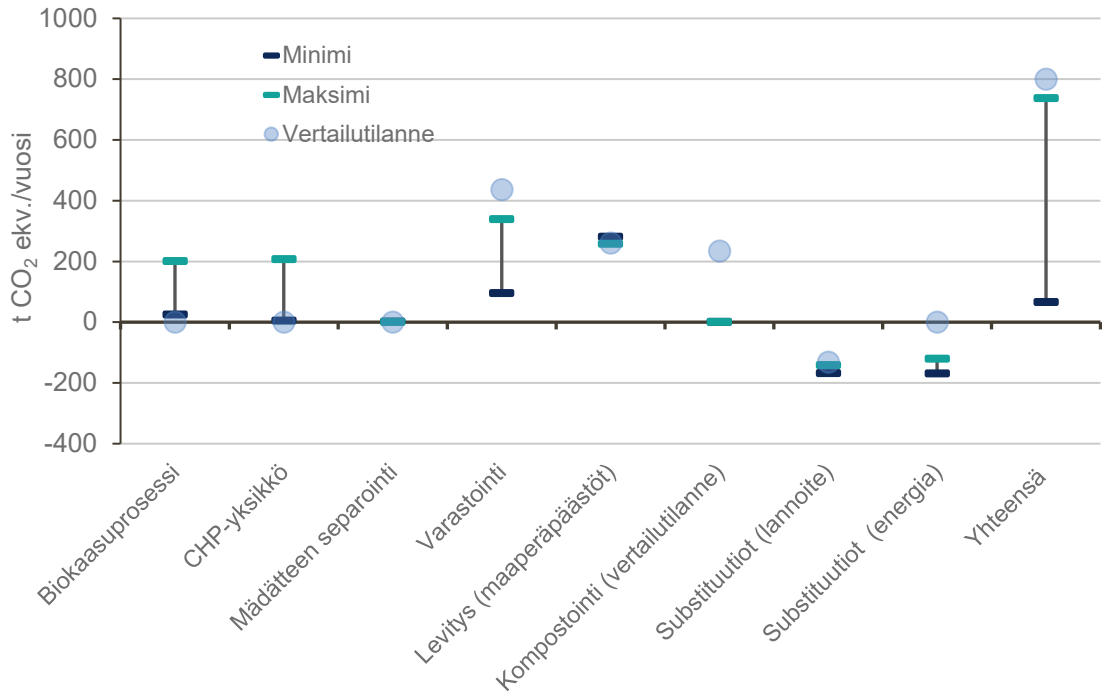
## 7.3.2 Elinkaariset ympäristövaikutukset

### 7.3.2.1 Tilakohtainen märkämädätyslaitos

Operointikäytäntöjen vaikutukset naudan lietalantaa ja säilörehunurmea käyttävän tilamittakaavan esimerkkijärjestelmän nettomääräisiin yhteenlaskettuihin elinkaariin kasvihuonekaasupäästöihin vaihtelevat suuresti (65–737 t CO<sub>2</sub>-ekv/v), kun energian ja ravinteiden korvaamisesta muodostuvat päästövähennykset (substituutiot) huomioidaan. Mikäli substituutiovaikutuksia ei huomioida, laitoksen elinkaariset nettomääräiset yhteenlasketut kasvihuonekaasupäästöt ovat suuremmat ja vaihtelevat välillä 404–1001 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Suurin osa päästöistä aiheutuu biokaasuprosessin operoinnista, CHP-yksiköstä, mädätteen varastoinnista ja levityksestä (Kuvio 28). Edistyneillä käytännöillä biokaasun tuotantoketjun päästöt ovat pienemmät kuin tavanomaisilla käytännöillä. Tulosten mukaan edistyneet käytännöt voivat vähentää operoinnista aiheutuvia päästöjä noin 76–91 %, kun substituutiot huomioidaan (Taulukko 23). Ilman substituutioiden huomioimista, edistyneet käytännöt voivat vähentää operoinnista aiheutuvia päästöjä noin 44–60 %.

Vertailutilanteessa perinteiseen lannankäsittelyyn ilman biokaasulaitosta oletettiin, että syötemateriaaleista lietalanta varastoidaan ja levitetään peltoon ja säilörehu kompostoidaan. Kaiken kaikkiaan biokaasuprosessi pienentää esimerkkilaitoksen syöteenä olevien biomassojen käsittelyn ilmastovaikutuksia operointikäytännöistä riippuen 63–735 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, kun substituutiovaikutukset huomioidaan. Mikäli laskennassa oletetut substituutiot eivät toteudu sellaisenaan tai tuotetut tuotteet korvaavat vähäpäästöisempiä tuotteita, saavutettava hyöty vertailutilanteeseen nähden pienenee. Jos substituutioita ei huomioida, biokaasuprosessi vähentää syötemateriaalien käsittelyn päästöjä edistyneillä käytännöillä 527 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, mutta lisää niitä tavanomaisilla käytännöillä 70 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Tällöin syötemateriaalien käsittelyn ilmastovaikutus pienenee biokaasuprosessilla edistyneillä käytännöillä noin 57 %, mutta tavanomaisia käytäntöjä noudattaen ilmastovaikutus voi kasvaa 7 % perinteiseen lannankäsittelyyn nähden. Jos substituutiot huomioidaan, ilmastovaikutus pienenee 8–92 %.

**Kuvio 28.** Elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen vaihtelu (t CO<sub>2</sub>-ekv/vuosi) tilamittakaavan esimerkkilaitoksen mukaisessa järjestelmässä elinkaarivaiheittain. Tulokset on esitetty edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen vaihteluvälinä (minimi, maksimi). Lisäksi kaaviossa esitetään arvio vertailutilanteen päästöistä, eli syötemateriaalien käsittelystä ilman biokaasuprosessia.





**Taulukko 23.** Edistyneiden käytäntöjen vaikutus kasviuonekaasupäästöihin tilakohtaisessa märkämädätyslaitoksessa suhteessa tavanomaisiin käytäntöihin elinkaarivaiheittain. Negatiiviset luvut kuvaavat päästöjen vähenemistä ja positiiviset päästöjen lisääntymistä.

**Edistyneiden käytäntöjen  
vaikutus päästöihin  
elinkaarivaiheittain**

Biokaasuprosessi	-37 % ... -88 %
CHP-yksikkö	-80 % ... -98 %
Mädätteen separointi	+100 %*
Varastointi	-71 % ... -72 %
Levitys (maaperäpäästöt)	+9 %
Lannoitesubstituutiot	-18 %
Energiasubstituutiot	-30 % ... -40 %
Yhteensä (ilman substituutioita)	-44 % ... -60 %
Yhteensä (substituutiot mukaan lukien)	-76 % ... -91 %

\*Tavanomaisessa käytännössä mädätettä ei separoida

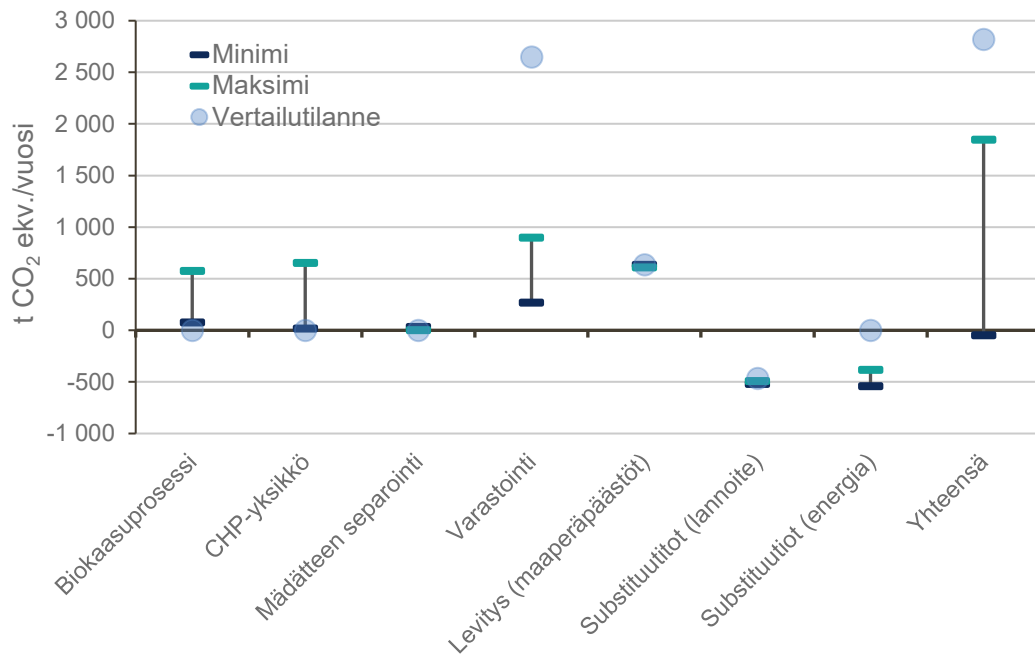
### 7.3.2.2 Usean tilan yhteinen märkämädätyslaitos

Biokaasulaitoksen operointikäytäntöjen vaikutukset usean sikatilan yhteisen esimerkkilaitoksen nettomääräisiin yhteenlaskettuihin kasviuonekaasupäästöihin vaihtelevat suuresti (-52 ... +1 845 t CO<sub>2</sub>-ekv/v), kun substituutiot otetaan huomioon. Mikäli substituutiovaikutuksia ei huomioida, laitoksen elinkaariset nettomääräiset yhteenlasketut kasviuonekaasupäästöt ovat suuremmat ja vaihtelevat välillä 1013–2 726 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Suurin vaikutus muodostuviin päästöihin on biokaasuprosessin operoinnilla, CHP-yksiköllä sekä mädätteen varastoinnilla ja levityksellä (Kuvio 29). Edistyneillä käytännöillä biokaasun tuotantoketjun kasviuonekaasupäästöt ovat pienemmät kuin tavanomaisilla käytännöillä. Edistyneet käytännöt voivat vähentää operoinnista aiheutuvia nettopäästöjä tavanomaisiin käytäntöihin verrattuna noin 89–103 %, kun substituutiot huomioidaan (Taulukko 24). Ilman substituutioiden huomioimista edistyneet käytännöt voivat vähentää operoinnista aiheutuvia päästöjä noin 48–63 %.

Vertailutilanteessa ilman biokaasulaitosta oletettiin, että sian lietelanta varastoidaan ja levitetään peltoon sellaisenaan. Esimerkkilaitoksella biokaasuprosessi vähentää lietelannan käsittelyn ilmastovaikutuksia sekä edistyneillä että tavanomaisilla käytännöillä

toteutettuna 974–2871 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, kun substituuot huomioidaan. Mikäli laskennassa oletetut substituuot eivät toteudu sellaisenaan tai tuotteet korvaavat vähäpäästöisempiä tuotteita, saavutettava hyöty vertailutilanteeseen nähden pienenee. Toisin sanoen hyöty on suurin korvattaessa fossiilista energiaa. Jos puolestaan substituuotia ei huomioida lainkaan, biokaasuprosessi vähentää lietalannan käsittelyn päästöjä 560–2 273 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Tällöin lietalannan käsittelyn ilmastovaikutus vähenee laitoksen käytännöistä riippuen noin 17–69 %. Jos substituuot huomioidaan, ilmastovaikutus on noin 35–102 %.

**Kuvio 29.** Elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen vaihtelu (t CO<sub>2</sub>-ekv/vuosi) usean tilan yhteiseen esimerkkilaitoksessa elinkaarivaiheittain. Tulokset on esitetty edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen vaihteluvälinä (minimi, maksimi). Lisäksi kaaviossa esitetään arvio vertailutilanteen päästöistä, eli syötemateriaalien käsittelystä ilman biokaasuprosessia.



**Taulukko 24.** Edistyneiden käytäntöjen vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin usean tilan märkämädätyslaitoksessa suhteessa tavanomaisiin käytäntöihin elinkaarivaiheittain. Negatiiviset luvut kuvaavat päästöjen vähenemistä ja positiiviset päästöjen lisääntymistä.

**Edistyneiden käytäntöjen vaikutus  
päästöihin elinkaarivaiheittain**

Biokaasuprosessi	-37 % ... -87 %
CHP-yksikkö	-80 % ... 98 %
Mädätteen separointi *	+ 100 %
Varastointi	-70 %
Levitys (maaperäpäästöt)	+4 %
Lannoitesubstituutiot	-6 %
Energiasubstituutiot	-32 % ... -41 %
Yhteensä (ilman substituutioita)	-48 % ... -63 %
Yhteensä (substituutiot mukaan lukien)	-89 % ... -103 %

\*Tavanomaisessa käytännössä mädätettä ei separoida

### 7.3.2.3 Keskitetty märkämädätyslaitos

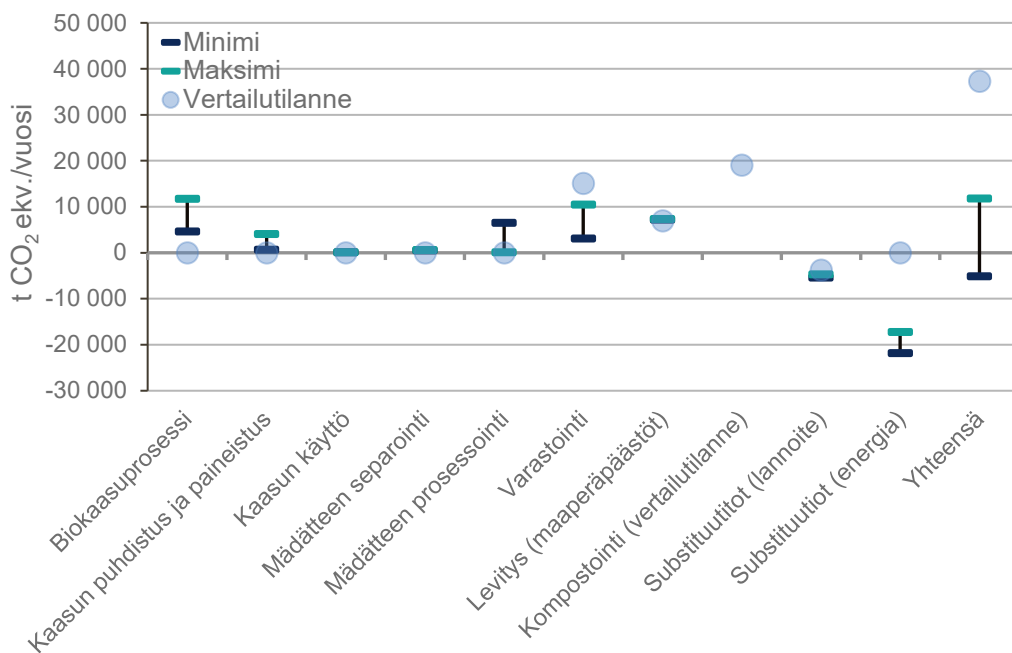
Keskitetyn esimerkkilaitoksen syötteenä käytettiin lietelantaa, lietelannoista separoitua kuivajaetta, siipikarjan lantaa, suojavyojhyke- ja luonnonhoitopeltojen nurmia sekä elintarviketeollisuuden sivuvirtaa. Ilmastovaikutusten laskenta tehtiin kahdelle tapaukselle, joista toisessa biokaasu hyödynnetään liikennepolttoaineena (A) ja toisessa tuotetaan sähköä ja lämpöä (B). Edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen eroavaisuuksien seurauksena muodostui myös vastaavasti erilaisia lopputuotteita (lisätietoa laitostokuvauksista, Luku 7.1).

Kun biokaasu jalostetaan täysmääräisesti liikennepolttoaineeksi ja mädätteen jatkojalostukseen käytettävä energia ostetaan laitoksen ulkopuolelta (A), käytäntöjen vaikutukset järjestelmän yhteenlaskettuihin nettomääräisiin kasvihuonekaasupäästöihin vaihtelevat suuresti (noin -5 229 t ... +11 705 t CO<sub>2</sub>-ekv/v), kun substituutiovaikutukset otetaan huomioon. Mikäli substituutiovaikutuksia ei huomioida, vastaavat kasvihuonekaasupäästöt ovat suuremmat ja vaihtelevat välillä 22 136–33 762 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Suurimmat vaikutukset päästöihin on biokaasuprosessin operoinnilla, biokaasun puh-

distuksella ja paineistuksella sekä mädätteen prosessoinnilla ja muodostuvien lannoitevalmisteiden varastoinnilla ja levityksellä (Kuvio 30). Edistyneillä operointikäytännöillä biokaasun tuotantoketjun päästöt ovat pienemmät kuin tavanomaisilla käytännöillä. Edistyneet käytännöt voivat vähentää päästöjä noin 145–168 %, kun substituuotit huomioidaan (Taulukko 25). Ilman substituuotien huomioimista, edistyneet käytännöt voivat vähentää päästöjä noin 16–34 %.

Vertailutilanteessa huomioitiin eri syötemateriaalien käsittelyketju ilman biokaasulaitosta (lisätietoa liitteessä 4). Biokaasuprosessin käyttö vähentää syötemateriaalin käsittelystä aiheutuvia ilmastovaikutuksia keskitetyllä esimerkkilaitoksella noin 25 603–42 536 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, eli 69–114 %, mikäli substituuotit otetaan huomioon. Mikäli laskennassa oletetut substituuotit eivät toteudu sellaisenaan tai tuotteet korvaavat vähäpäästöisempiä tuotteita, biokaasuprosessilla saavutettava hyöty vertailutilanteeseen nähden pienenee. Jos substituuotivaikutuksia ei huomioida lainkaan, biokaasuprosessi vähentää syötemateriaalien käsittelyn päästöjä käytännöistä riippuen noin 7 335–18 961 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, eli noin 18–46 %.

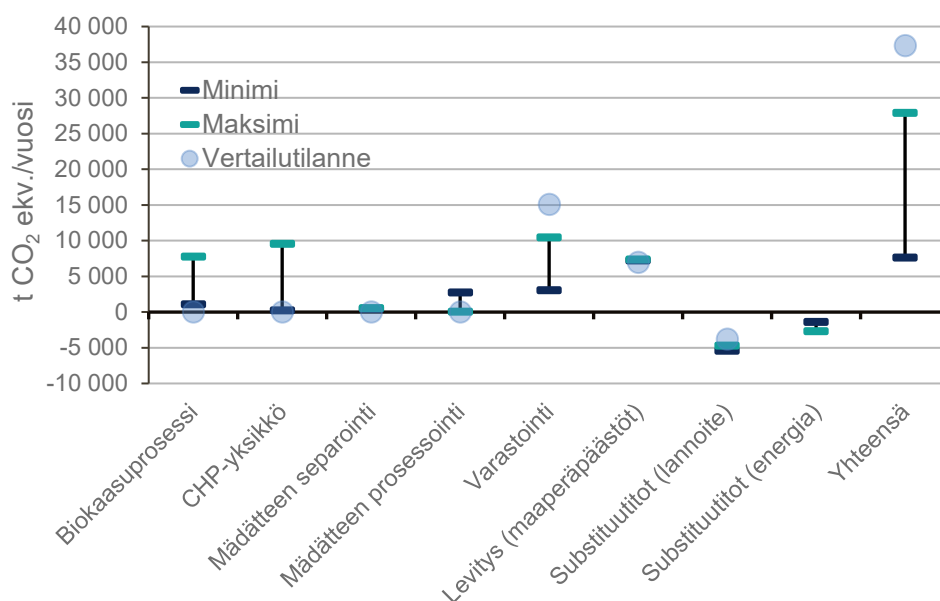
**Kuvio 30.** Elinkaaristen kasviuonekaasupäästöjen vaihtelu (t CO<sub>2</sub>-ekv/vuosi) keskitetyssä märkämädätyslaitoksessa elinkaarivaiheittain, kun biokaasusta tuotetaan liikennepoltoainetta ja kun tarvittava energia laitoksen toimintaan ja mädätteen jalostukseen ostetaan laitoksen ulkopuolelta. Tulokset on esitetty edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen vaihteluvälinä (minimi, maksimi). Lisäksi kaaviossa esitetään arvio vertailutilanteen päästöistä, eli syötemateriaalien käsittelystä ilman biokaasuprosessia.



Kun biokaasusta tuotetaan liikennepolttoaineen sijaan sähköä ja lämpöä (B) ja osa energiasta hyödynnetään laitoksen omiin tarpeisiin, erilaisten käytäntöjen vaikutukset järjestelmän nettomääräisiin yhteenlaskettuihin kasviuonekaasupäästöihin vaihtelevat välillä 7 586–27 822 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Mikäli substituutiovaikutuksia ei huomioida, vastaavat päästöt vaihtelevat välillä 14 492–35 355 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Suurin vaikutus päästöihin on biokaasuprosessin ja CHP-yksikön operoinnilla, mädätteen prosessoinnilla sekä muodostuvien lannoitevalmisteiden varastoinnilla ja levityksellä (Kuvio 31). Edistyneillä käytännöillä biokaasun tuotantoketjun päästöt ovat pienemmät kuin tavanomaisilla käytännöillä. Edistyneillä käytännöillä päästöjä voidaan vähentää noin 54–73 %, kun substituutiot huomioidaan (Taulukko 25). Ilman substituutioiden huomioimista, edistyneet käytännöt voivat vähentää päästöjä noin 43–59 %.

Biokaasuprosessi vähentää syötemateriaalien käsittelyn ilmastovaikutuksia laskennassa käytetyillä oletuksilla vähintään noin 9 485–29 721 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, eli 25–80 %, jos substituutiovaikutukset otetaan huomioon. Mikäli laskennassa oletetut substituutiot eivät toteudu sellaisenaan tai tuotteet korvaavat vähäpäästöisempiä tuotteita, saavutettava hyöty vertailutilanteeseen nähden pienenee. Jos substituutiovaikutuksia ei huomioida lainkaan, biokaasuprosessi vähentää ilmastovaikutuksia noin 5 742–26 605 t CO<sub>2</sub>-ekv/v, eli 14–65 % operointikäytännöistä riippuen.

**Kuvio 31.** Elinkaaristen kasviuonekaasupäästöjen vaihtelu (t CO<sub>2</sub>-ekv/vuosi) keskitetyllä märkämädätyslaitoksella elinkaarivaiheittain, kun biokaasusta tuotetaan sähköä ja lämpöä. Tulokset on esitetty edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen vaihteluvälinä (minimi, maksimi). Lisäksi kaaviossa esitetään arvio vertailutilanteen päästöistä, eli syötemateriaalien käsittelystä ilman biokaasuprosessia.



**Taulukko 25.** Edistyneiden käytäntöjen vaikutus keskitetyn laitoksen kasvihuonekaasupäästöihin suhteessa tavanomaisiin käytäntöihin biokaasun tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöihin keskitettyyn esimerkkilaitokseen perustuvassa järjestelmässä elinkaarivaiheittain tapauksissa A (liikennepolttoaine) ja B (CHP). Negatiiviset luvut kuvaavat päästöjen vähenemistä ja positiiviset päästöjen lisääntymistä.

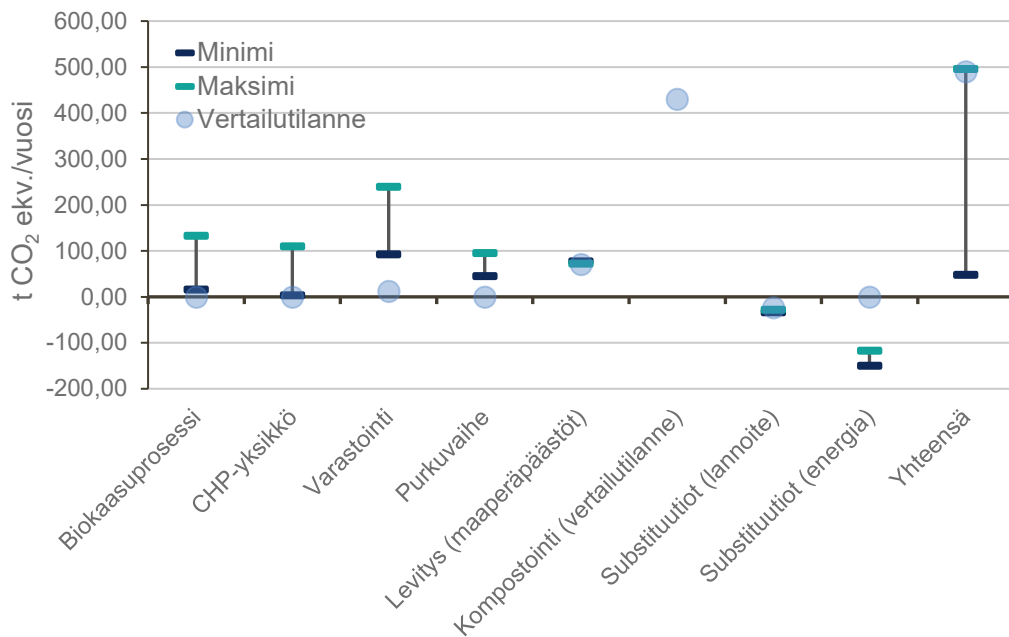
	<b>Tapaus A: Edistyneiden käytäntöjen vaikutus päästöihin elinkaarivaiheittain</b>	<b>Tapaus B: Edistyneiden käytäntöjen vaikutus päästöihin elinkaarivaiheittain</b>
Biokaasuprosessi	-26 % ... -61 %	-40 % ... -86 %
Kaasun puhdistus ja paineistus/CHP	-64 % ... 85 %	-81 % ... -98 %
Liikennekaasun käyttö	-19 % ... - 27 %	-
Mädätteen separointi	-15 %	-15 %
Mädätteen prosessointi	+100 %	+100 %
Varastointi	-71 %	-71 %
Levitys (maaperäpäästöt)	-2 %	-2 %
Lannoitesubstituutiot	-15 %	-15 %
Energiasubstituutiot	-19 % ... -27 %	-48 % ... -50 %
Yhteensä (ilman substituutioita)	-16 % ... -34 %	-43 % ... -59 %
Yhteensä (substituutiot mukaan lukien)	-145 % ...-168 %	-54 % ... -73 %

### 7.3.2.4 Kuivämädätyslaitos

Erilaisten käytäntöjen vaikutukset kuivämädätyksen esimerkkilaitoksen nettomääräisiin yhteenlaskettuihin kasvihuonekaasupäästöihin vaihtelevat suuresti (47–496 t CO<sub>2</sub>-ekv/v), kun substituutiot otetaan huomioon. Mikäli substituutiovaikutuksia ei huomioida, vastaavat päästöt ovat suuremmat ja vaihtelevat välillä 232–642 t CO<sub>2</sub>-ekv/v. Suurin vaikutus muodostuviin päästöihin on reaktorisiilon purkuvaiheen toimintatavoilla sekä mädätteen varastoinnilla ja levityksellä (Kuva 32). Edistyneillä käytännöillä biokaasun tuotantoketjun päästöt ovat pienemmät kuin tavanomaisilla käytännöillä. Edistyneillä käytännöillä toiminnasta aiheutuvia päästöjä voidaan vähentää noin 72–90 %, kun substituutiot huomioidaan (Taulukko 26). Ilman substituutioiden huomioimista edistyneet käytännöt voivat vähentää päästöjä noin 47–64 %.

Myös kuivamädätyslaitoksen syötemateriaaleille luotiin vertailuksi käsittely ilman biokaasulaitosta (syötemateriaalien kompostointi ja varastointi). Biokaasulaitoksen toiminta tavanomaisin käytännöin voi aiheuttaa 1 % (5,5 t CO<sub>2</sub>-ekv/v) suuremman ilmastovaikutuksen kuin vertailutilanteessa ilman biokaasulaitosta, kun substituutiovaikutukset otetaan huomioon. Edistyneitä käytäntöjä noudattaen ilmastovaikutus voi pienentyä 90 % (443 t CO<sub>2</sub>-ekv/v). Mikäli laskennassa oletetut substituutiot eivät toteudu sellaisenaan tai tuotteet korvaavat vähäpäästöisempiä tuotteita, saavutettava hyöty vertailutilanteeseen nähden vähenee. Jos substituutiovaikutuksia ei huomioida lainkaan, biokaasuprosessi lisää syötemateriaalien käsittelyn ilmastovaikutusta tavanomaisilla käytännöillä noin 25 % (128 t CO<sub>2</sub>-ekv/v). Edistyneillä käytännöillä ilmastovaikutus vähenee, eli noin 45 % (281 t CO<sub>2</sub>-ekv/v).

**Kuvio 32.** Elinkaaristen kasvihuonekaasupäästöjen vaihtelu (t CO<sub>2</sub>-ekv/vuosi) kuivamädätyslaitoksella elinkaarivaiheittain. Tulokset on esitetty edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen vaihteluvälinä (minimi, maksimi). Lisäksi kaaviossa esitetään arvio vertailutilanteen päästöistä, eli syötemateriaalien käsittelystä ilman biokaasuprosessia.



**Taulukko 26.** Edistyneiden käytäntöjen vaikutus kuivämädätyslaitoksen kasvihuonekaasupäästöihin suhteessa tavanomaisiin käytäntöihin elinkaarivaiheittain. Negatiiviset luvut kuvaavat päästöjen vähenemistä ja positiiviset päästöjen lisääntymistä.

#### Edistyneiden käytäntöjen vaikutus päästöihin elinkaarivaiheittain

Biokaasuprosessi	-39 % ... -88 %
CHP-yksikkö	-80 % ...-97 %
Purkuvaihe	-11 % ... -52 %
Varastointi	-61 %
Levitys (maaperäpäästöt)	-7 %
Lannoitesubstituutiot	-20 %
Energiasubstituutiot	-23 % ... -28 %
Yhteensä (ilman substituutioita)	-47 % ... -64 %
Yhteensä (substituutiot mukaan lukien)	-72 % ...-90 %

#### 7.3.2.5 Esimerkkijärjestelmien tarkastelu

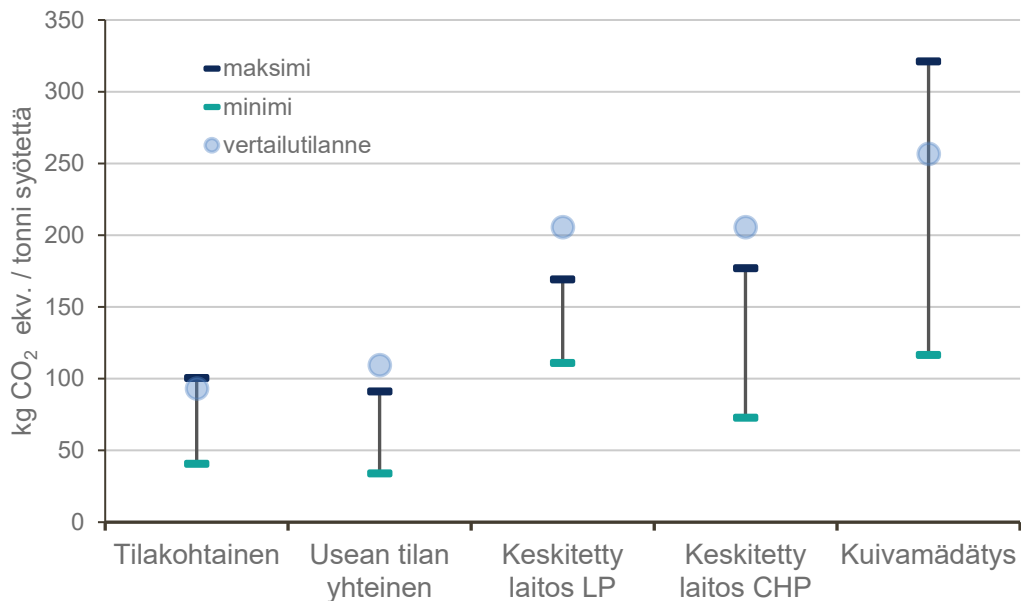
Lähes kaikissa tarkastelluissa märkämädätyslaitosten esimerkeissä biokaasuprosessi pienentää sekä tavanomaisilla että edistyneillä käytännöillä kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna niiden käsittelylle määriteltyyn vertailutilanteeseen (Kuvio 33). Tilakohtaisella märkämädätyslaitoksella kasvihuonekaasupäästöt saattavat nousta vertailutilanteen tasolle tai sitä suuremmaksi tavanomaisilla käytännöillä ja tilanteessa, jossa substituutioita ei huomioida. Myös kuivämädätyslaitos voi nostaa syötemateriaalien käsittelystä aiheutuvia päästöjä vertailutilanteeseen nähden, jos laitosta operoidaan tavanomaisilla käytännöillä. Vertailutilanteen ja biokaasuprosessin välinen päästöero kapeenee, mikäli substituutiot huomioidaan. Vertailutilannetta suuremmat päästöt johtuvat pääasiassa siitä, että vertailutilanteessa syötemateriaalien kompostoinnista ja varastoinnista aiheutuvat päästöt ovat pienemmät kuin kuivämädätyslaitoksen tuotantoketjusta arvioitiin muodostuvan tavanomaisia käytäntöjä noudattamalla. Kuivämädätyksessä mädätteeseen voi esimerkiksi jäädä metaania sisältäviä taskuja, joista metaani karkaa reaktorisiilon purun yhteydessä ilmakehään. Koska kuivämädätyslaitoksen syötemateriaalina on pääasiassa suojavyöhyke- ja luonnonhoitopeltojen nurmea sekä säilörehunurmea ja vain pieni määrä lantaa, muodostuu suurin osa vertailutilanteen päästöistä nurmien vaihtoehtoiseksi käsittelyksi valitusta kompostoinnista. Käytän-



nössä ko. nurmien käsittelytavat ja niistä aiheutuvat päästöt tiloilla vaihtelevat. Kompostoinnista aiheutuviin päästöihin liittyy myös epävarmuuksia, ja päästöihin vaikuttavat myös vallitsevat olosuhteet.

Tilakohtaisessa ja usean tilan yhteisessä märkämädätyslaitoksessa metaanituottopotentiaali syötetonna kohden on noin puolet keskitetyn märkämädätyslaitoksen ja kuivämädätyslaitoksen metaanintuottopotentiaalista. Tämä heijastuu syötetonna kohden laskettuihin tuloksiin, eikä siten johdu laitoksen koosta vaan käytetyistä syötemateriaaleista.

**Kuvio 33.** Esimerkkilaitosten sekä vertailutilanteiden kasvihuonekaasupäästöt syötemateriaaltonnia kohden ilman tuotetun energian ja lannoitteiden korvaamishyötyä (ilman substituutioita). Tulokset on esitetty edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen minimi- ja maksimiarvojen vaihteluvälinä. Keskitetyllä märkämädätyslaitoksella LP tarkoittaa biokaasun hyödyntämistä liikennepolttoaineena (tapaus A) ja CHP biokaasun hyödyntämistä yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa.



### 7.3.2.6 Erialaisten käytäntöjen vaikutukset ammoniakkipäästöihin

Biokaasulaitoksen prosessivaiheesta ammoniakkipäästöjä voi vapautua pääsääntöisesti vain häiriö- ja huoltotilanteiden yhteydessä, jos reaktori joudutaan avaamaan. Suurin ammoniakkipäästöjen riski biokaasulaitoksissa liittyykin syötemateriaalien ja mädätteen varastointiin sekä mädätteen mahdolliseen jatkojalostukseen prosessoi-

malla. Biokaasutuotanto myös lisää ammoniakkipäästöriskiä peltolevityksen yhteydessä. Mädätteen sisältämästä ammoniumtypestä suuri osa voi haihtua sopivissa olosuhteissa ilmakehään ammoniakkina. Haihtumiseen vaikuttavat muun muassa mädätteen käsittelytoimet ja pH sekä sääolosuhteet.

Biokaasuprosessi lisää mädätteen ammoniumtypen pitoisuutta verrattuna alkuperäiseen syötemateriaaliin. Biokaasutuotanto siten sekä lisää ammoniakkipäästöjen muodostumisen riskiä että tehostaa typen käyttöä lannoitteena. Edistyneillä mädätteen käsittely-, varastointi- ja levityskäytännöillä ammoniakkin haihtuminen voidaan kuitenkin minimoida ja samalla ylläpitää mädätteen tai siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden lannoitusarvoa.

Biokaasulaitoksella muodostuva mädäte voidaan varastoida sellaisenaan, separoituna neste- ja kuivajakeena tai prosessoituina lannoitevalmisteina. Mädätteen separoinnissa suurin osa liukoisesta ammoniumtypestä päättyy nestejakeeseen. Kuivajakeen orgaaninen tyyppi voi hajota spontaanin kompostoitumisen myötä varastoinnin aikana, jolloin muodostuu ammoniakkipäästöjä. Mädätteen prosessointi lannoitevalmisteiksi on suositeltavaa toteuttaa ilman välivarastointia typen haihdunnan minimoimiseksi. Väkevöidyt lannoitevalmisteet tulee varastoida tiiviissä varastoissa, jotta lannoitusvaikutus ei heikkene typen haihtumisen myötä. Niiden ominaisuudet, esimerkiksi alhainen pH, voi myös estää typen haihdunnan.

Ilman epäpuhtauksien päästölaskentaohjeissa (IPCC 2006; EMEP/EEA 2019; Grönroos ym. 2017) ei kirjoitushetkellä ole eroteltuna erilaisten käytäntöjen vaikutuksia mädätteestä aiheutuviin ammoniakkipäästöihin. Päästöjen arvioinnissa voidaan kuitenkin käyttää lannankäsittelystä johdettuja kertoimia, sillä ne perustuvat lannan sisältämään ammoniumtypen pitoisuuteen. Niiden mukaan avoimissa varastoissa varastoituna lannan (ja siten mädätteen) sisältämästä ammoniumtypestä voi haihtua noin 30 %. Kuivajakeen varastointi katetussa varastossa vähentää ammoniakkin haihduntaa noin 10 %. Tiiviimmät katto- ja seinärakenteet sekä telttamaiset katteet että tiivis varasto voivat vähentää lietemäisen ja nestemäisen jakeen haihduntaa huomattavasti, 60–95 % (EMEP/EEA 2019; Grönroos ym. 2017).

Mädätteen ja siitä jalostettujen lannoitevalmisteiden peltolevityksessä ammoniakkipäästöjen riski riippuu sekä levitettävän valmisteiden ammoniumtyypin pitoisuudesta että käytetystä levitysmenetelmästä ja sääolosuhteista. Lietemäisen ja nestemäisen mädätteen levityksessä noin 30–60 % ammoniumtypestä voi haihtua ammoniakkina. Siirtolevityksellä haihduntaa voidaan vähentää noin 80 % ja letkulevityksellä noin 35 %. Kuivajakeen levityksessä ammoniumtypestä voi haihtua noin 80 %. Levityksestä aiheutuvia typpihävikkejä voi vähentää multaamalla mädäte nopeasti levityksen jälkeen

joko kyntämällä tai äestämällä. Jos multaus tapahtuu alle neljän tunnin kuluttua levityksestä, voidaan typen hävikkiä vähentää jopa 50–70 % (EMEP/EEA 2019; Grönroos ym. 2017).

### 7.3.2.7 Tulosten tarkastelu ja epävarmuudet

Biokaasun tuotantoketjun käytännöillä on huomattava vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin kaikilla esimerkkijärjestelmillä. Edistyneet käytännöt voivat vähentää merkittävästi koko tuotantoketjun elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä ja parhaimmillaan biokaasutuotannolla voidaan saavuttaa huomattavia ilmastohyötyjä. Tämä edellyttää, että koko tuotantoketjussa noudatetaan hyviä (tässä edistyneiksi kutsuttuja) käytäntöjä ja sitä, että prosessissa tuotettu energia vähentää fossiilisten energialähteiden käyttöä ja mädätteen ravinteet hyödynnetään vähentäen mineraalilannoitteiden käyttöä. Tavanomaisiksi tässä nimetyt, päästöjen kannalta heikot käytännöt saattavat joissakin tapauksissa johtaa siihen, että tuotantoketjun kasvihuonekaasupäästöt ovat lähes yhtä suuret, ellei jopa suuremmat, kuin syötemateriaalien käsittelystä muodostuisi ilman biokaasutuotantoa.

Laitostekniikka, käytetyt syötemateriaalit sekä biokaasun hyödyntämismuoto ja mädätteen mahdollinen jatkojalostus vaikuttavat tuotantoketjujen käytäntöjen ohella esimerkkilaitosten kasvihuonekaasupäästöihin. Koska nämä eroavat esimerkkilaitosten kesken, eivät laitosten päästöt ole keskenään vertailukelpoisia eikä laitosten elinkaarivaiheiden päästöjen osuuksia tule verrata toisiinsa. Tulosten tulkinnassa tulee ottaa myös huomioon, että eri elinkaarivaiheiden päästöt ovat osin kytköksissä toisiinsa ja riippuvaisia järjestelmille tehdyille oletuksille. Näin ollen yhden käytännön muutos voi vaikuttaa myös muiden elinkaarivaiheiden aikaisiin päästöihin.

Kaikissa tarkastelluissa esimerkkilaitoksissa biokaasuprosessista aiheutuvien metaanipäästöjen vaikutus oli tavanomaisilla käytännöillä huomattava. Päästöistä suurin osa arvioitiin muodostuvan PRV-venttiileistä. Lisäksi kasvihuonekaasupäästöjä muodostui huollon aikaisista metaanipäästöistä sekä prosessirakenteista karkaavista metaanivuodoista. Käytännössä biokaasuprosessin päästölähteiden määrä ja osuudet ovat kuitenkin aina tapauskohtaisia ja niissä esiintyy huomattavaa, vuosienkin välistä, vaihtelua.

Kuivamädätyslaitoksella metaanipäästöjä arvioitiin muodostuvan myös prosessin jälkeen reaktorisiilon purun yhteydessä mädättemassan kaasutaskujen metaanin vapautuessa ilmaan. Muodostuvan päästön suuruus on riippuvainen mädätteen ominaisuuksista sekä siilon täyttämisen ja purkamisen käytännöistä. Metaanintuotannon mahdollistavien taskujen muodostumista voi olla vaikea täysin estää tässä laitostyyppissä. Päästöjen suuruus vaihtelee ja niiden arviointi on haasteellista, sillä tutkimustietoa

kuivamädätyksen siilon purkuvaiheen päästöistä on vähän saatavilla. Tässä hankkeessa todellisella kuivamädätyslaitoksella tehtyjen päästömittausten yhteydessä (Luku 3.3) purkuvaiheessa metaania havaittiin vapautuvan, joskin suuremmaksi päästöjen lähteeksi arvioitiin panoksen varsinainen prosessivaihe vuotoineen.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että mädätteen varastoinnista aiheutuvat päästöt voivat olla huomattavia kaikissa esimerkkilaitoksissa silloin, kun viipymä prosessissa jää lyhyeksi. Koska biokaasuprosessissa olosuhteet on optimoitu biokaasun tuottamiseksi, biokaasun tuotto voi jatkua vielä varastoinnin aikana, mikäli mädätteessä on metaanintuottopotentiaalia jäljellä lyhyen viipymän seurauksena ja olosuhteet, kuten lämpötila, ovat suotuisat metaanin tuotolle. Tämän vuoksi esimerkiksi lämmöntalteenotto mädätteestä on suositeltavaa, sillä mikrobitoiminta ja siten metaanipäästöjen riski laskee lämpötilan laskiessa.

Mädätteen varastoinnista muodostuviin päästöihin vaikuttaa viipymän lisäksi myös varastointiaika sekä mädätteen mahdollinen separointi ja jatkojalostus. Tietopuutteiden vuoksi mädätteen separoinnin sekä jatkoprosessoinnin vaikutuksia varastoinnissa muodostuviin kasvihuonekaasuihin ei kuitenkaan ollut mahdollista sisällyttää laskentaan. Käytännössä varastoinnin päästöihin vaikuttavat tarkasteltujen operointikäytäntöjen lisäksi myös varastoinnin olosuhteet, kuten lämpötila, varastointitapa- ja kesto, sekä varastoitavan mädätteen tai siitä jalostettujen jakeiden tai lannoitevalmisteiden laatu.

Esimerkkilaitosten taselaskennassa ja tarkasteltavien järjestelmien päästövaikutusten arvioinnissa ei tarkasteltu syötemateriaalien mahdollisen esivarastoinnin ja sen keston vaikutuksia. Syötemateriaalien varastoinnin aikana voi muodostua kasvihuonekaasupäästöjä, joiden myötä myös voidaan menettää osa niiden metaanintuottopotentiaalista prosessissa. Biokaasulaitosten kestävyys kannalta on tärkeää, että syötemateriaalit ohjataan mahdollisimman pian muodostuttuaan prosessiin.

Liikennepolttoaineen tuotanto keskitetyn laitoksen tarkastelussa on ilmastonäkökulmasta suotavampaa kuin sähkön ja lämmön yhteistuotanto, jos tuotetun liikennepolttoaineen avulla voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä liikenteessä. Saa-vutettavaan hyötyyn vaikuttaa kuitenkin se, millä tavoin tuotettua sähköä ja lämpöä laitos ostaa biokaasuprosessin ja mädätteen jatkojalostamisen tarpeisiin. Tässä työssä herkkyystarkastelua ei siltä osin tehty. Jos puolestaan substituutiovaikutuksia ei huomioida, on sähkön ja lämmön tuotanto esimerkkilaitoksen ilmastovaikutusten kannalta liikennepolttoaineen tuotantoa kannattavampaa, koska mädätteen jalostamiseen ei tarvitse ostaa laitoksen ulkopuolista energiaa.

Ilmastovaikutusten arvioinnissa oletettiin, että biokaasusta tuotettu liikennepolttoaine tai sähkö ja lämpö korvaavat täysimääräisesti liikennepolttoaineen tai sähkön ja lämmön tuotantoa ja käyttöä kaikissa esimerkkijärjestelmissä. Myös kierrätysravinteiden oletettiin korvaavan täysimääräisesti mineraalilannoitteita. Käytännössä substituutiohyöty ei välttämättä toteudu oletetun kaltaisesti, sillä kulutuksen ja päästöjen sääntely ja siinä tapahtuvat muutokset vaikuttavat saavutettavaan substituutiohyötyyn. Mikäli laskennassa oletettu korvaushyöty toteutuisi pienempänä, nettoilmastovaikutus olisi esitettyä tulosta suurempi (lisätietoa esimerkiksi IPCC 2014). Esimerkiksi lannan ravinteet päätyvät pääasiassa peltoon ilman biokaasutustakin ja vähentävät näin mineraalilannoitteiden tarvetta jo nykyisinkin. Toisaalta ravinteita ei välttämättä levitetä kasvin tarpeen mukaisesti, mikä hankaloittaa kierrätysravinteiden substituutiovaikutusten arviointia erityisesti vertailutilanteessa.

Esimerkkilaitosten kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa painopiste oli erilaisten käytäntöjen vaikutusten vertailussa. Niiden rinnalle laskettu vertailutilanne kuvaa syötämateriaaleina käytettävien biomassojen kasvihuonekaasupäästöjä ilman biokaasuprosessia. Vertailutilanteen kasvihuonekaasupäästöjen suuruus vaikuttaa biokaasuprosessilla tavoiteltavaan ilmastohyötyyn. Käytännössä myös vertailutilanteessa on erilaisia käytäntöjä ja olosuhteita, jotka vaikuttavat muodostuvien päästöjen määrään. Tässä selvityksessä vertailutilanteelle ei tehty herkkystarkastelua.

Kasvihuonekaasupäästöjen ja -nielujen ajallinen esiintyminen on keskeinen tekijä, kun arvioidaan erilaisten biomassojen käsittelyn ja hyödyntämisen ilmastovaikutuksia. Ilmaston lämpenemisen kannalta on merkitystä, milloin päästö ajallisesti tapahtuu. Biokaasun tuotantoketjun elinkaareissa hitaasti vapautuvia päästöjä tapahtuu mädätteen peltolevityksen jälkeen, mädätteen eloperäisen aineksen vähitellen hajotessa maaperässä. Itse syötämateriaalien ominaisuuksien (organisen aineksen hajoavuus) lisäksi niiden viipymä prosessissa sekä prosessin jälkeinen varastointijakso vaikuttavat peltoon levitettävän mädätteen hiilen määrään ja koostumukseen. Biokaasun tuotantoketjun kestävyys kannalta on olennaista tarkastella sitä, miten hiilitase ja päästöt muuttuvat tarkasteltavan ajanjakson sisällä, kun biomassa päättyy jonkin muun käsittelyvaihtoehdon sijaan biokaasuprosessiin käsiteltäväksi, ja miten erilaiset biokaasun tuotantoketjun käytännöt vaikuttavat hiilen kiertoon.

Biokaasuprosessissa syötämateriaalien biomassan sisältämän hiilen määrää ja koostumus muuttuvat vähentäen maaperään tulevaa hiilisyötettä alkuperäiseen massaansa nähden. Biokaasuprosessissa suurin osa materiaalin helposti hajoavasta hiilestä vapautuu biokaasuna, kun ilman biokaasutusta hiiltä voisi vapautua kaasumaisina yhdisteinä esimerkiksi lannasta osin varastoinnin aikana ja osin levityksen jälkeen maaperän mikrobiston toiminnan myötä lyhyen ajan kuluessa (ks. Luku 4). Maaperän hiilisyötteiden muutokset vaikuttavat hiilitaseisiin myös maaperän mikrobiston kautta.

Maaperän mikrobiston on havaittu olevan tärkeä tekijä maaperän hiilen muodostajana. Mikrobisto hyödyntää helposti hajoavaa hiiltä muuttaen sitä osaksi maaperän pysyvää hiilivarastoa muodostaen ns. hiilipumpun (Liang ym. 2017). Maaperän prosessien vaikutukset hiilen kiertoon tunnetaan kuitenkin vielä puutteellisesti (Liang ym. 2017; Chenu ym. 2019).

Biokaasuprosessin viipymä vaikuttaa mädätteen hiilipitoisuuteen ja erityisesti nopean ja hitaasti hajoavan hiilen suhteeseen. Kokonaisvaikutus on kuitenkin oletettavasti pieni. Jos varastoinnin aikana metaanintuotto mädätteestä jatkuu, eroa ei välttämättä juurikaan muodostu. Käytännössä kuitenkin suurempi merkitys maaperän mikrobien muodostaman hiilipumpun kannalta on todennäköisesti sillä, levitetäänkö maahan lantaa vai mädätettä. Myös esimerkiksi suojavyöhyke- ja luonnonhoitopeltojen nurmien korjuu vaikuttaa pellon hiilitaseisiin, vaikka nurmien sisältämä hiili palautuisikin muualle peltomaahan hyödynnettäväksi biokaasutuksen jälkeen. Tutkimustieto ja menetelmät erilaisten mädätteiden hajoamisen arvioimiseksi erilaisilla viipymäajoilla ja syötteillä todettiin hankkeen asiantuntija-arvioissa puutteelliseksi ja niihin kohdistuvat epävarmuudet huomattavaksi, jotta riittävän luotettavia arvioita olisi ollut mahdollista tehdä tässä hankkeessa. Näin ollen vaikutuksia maaperän hiileen ei arvioitu elinkaarinäkökulmasta.

### 7.3.2.8 Johtopäätökset

Biokaasun tuotantoketjujen käytännön toteutuksella on LCA-tarkastelunkin vahvistamana suuri vaikutus biokaasulaitoksista aiheutuviin kasvihuonekaasupäästöihin ja toiminnalla tavoiteltaviin ilmastohyötyihin. Tulokset olivat samansuuntaiset kaikilla tarkasteluilla esimerkkilaitoksilla huolimatta niiden erilaisesta mittakaavasta (laitoskoosta) ja toteutustavasta käytäntöineen. Kasvihuonekaasupäästöt voivat vaihdella huomattavasti eri käytäntöjen välillä. Puutteellisesti päästöt huomioivat käytännöt johtavat biokaasun tuotantoketjun ilmastokestävyuden heikkenemiseen eikä biokaasun tuotannolla tavoiteltavia ilmastohyötyjä tarkastelluissa maatalouden sivuvirtojen käsittelyssä välttämättä saavuteta. Ilmastokestävä biokaasutuotanto edellyttää, että koko tuotantoketju toteutetaan ja operoidaan huolellisesti kaikissa sen vaiheissa. Lisäksi mädätteen varastoinnin ja levityksen ratkaisulla voidaan minimoida ammoniakkipäästöt ja varmistaa typen päätyminen kasvien käyttöön. Kaasumaisten päästöjen vähentämisessä erityishuomiota tulee kiinnittää viipymäaikaan biokaasureaktorissa, laitosten mitoittamiseen ja asianmukaiseen huoltoon, mädätteen varastointitapoihin, ehjiin laitosrakenteisiin ja edistyneisiin menetelmiin biokaasun hyödyntämisessä.

Maatalouden sivuvirtojen käsittely biokaasulaitoksessa tuottaa hyviä käytäntöjä noudattaen ilmastohyötyjä käsittelyn valittuihin vertailutilanteisiin nähden. Tulevaisuudessa on kuitenkin tärkeää sisällyttää arviointiin myös vaikutukset maaperään päätyvään hiilisyötteeseen ja sitä kautta muodostuvaan hiilivarastoon.

## Lähteet

- Chenu, C., Angers, D.A., Barre, P., Derrien, D., Arrouays, D. & Balesdent, J. 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* 188: 41–52.
- EMEP/EEA (2016). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016. 3.B Manure Management. European Environment Agency.
- Grönroos, J., Munther, J. & Luostarinen, S. 2017. Calculation of Atmospheric Nitrogen and NMVOC Emissions from Finnish Agriculture. Description of the Revised Model. Reports of the Finnish Environment Institute, 37.
- IPCC 2014. Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Intergovernmental panel on climate change. WGIII. Working group III contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press 2014.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Editors H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara & K. Tanabe (Japan: IGES).
- Liang, C., Schimel, J.P. & Jastrow, J.D. 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature microbiology* 2: 17105.

### 7.3.3 Uusiutuvan energian direktiivin mukaiset päästöt ja päästövähennemät

Kestävyysslain mukaiset ja uusiutuvan energian direktiivin laskentaan pohjautuvat päästöt ja päästövähennykset laskettiin keskitetylle esimerkkilaitokselle huomioiden vastaavat tavanomaiset ja edistyneet käytännöt kuin LCA-laskennassa. Kun laskenta toteutetaan edellä esitetyn LCA-laskennan päästötiedoilla (Taulukko 27, laskenta 1) keskitetyssä laitoksessa liikennepolttoaineeksi tuotettu biometaani tuottaa merkittävät päästövähennykset fossiiliseen vertailuarvoon verrattuna edistyneillä (123 % vähennys) käytännöillä, mutta tavanomaisilla jäädyään lain edellyttämistä päästövähennystavoitteista (65 % vähennys fossiiliseen vertailuarvoon verrattuna), vaikka päästövähennyksiä saavutetaankin (52 % vähennys).

Kun laskennassa käytetään direktiivin oletusarvoja (Taulukko 27, laskenta 2) lietalannalle ja elintarviketeollisuuden sivuvirralla ja muille syötemateriaaleille LCA-laskentaa, saadaan edistyneillä käytännöillä päästökseen 23 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ (myyntiin päätyvää energiaa), mikä ei eroa merkittävästi LCA-laskennan kertoimia käyttämällä saadusta tuloksesta (28 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ). Oletusarvoja käyttäen tulee hieman eroa lietalannan saamista laskennallisesta hyvityksestä (direktiivin hyvitys naudon lietalannalle -111,9 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ; hyvitys LCA-laskennan kautta sian lietalannalle -149,6 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ), minkä syynä on todennäköisesti tämän hankkeen laskennassa tehty erilainen oletus lannasta saatavasta ja myyntiin päätyvästä energiamäärästä kuin direktiivin taustalaskennassa. Biokaasutuotannolla saavutettava päästövähennys edisty-

neillä käytännöillä on kuitenkin edelleen merkittävä, 121 %. Tavanomaisilla käytännöillä päästöjen määrä nousee merkittävästi (104 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ) ja saavutettava päästövähennys jää 41 %:iin.

Jos kaikille käytetyille syötemateriaaleille käytetään direktiivin oletusarvoja (Taulukko 27, laskenta 3), päästöt ovat edistyneillä käytännöillä merkittävästi alhaisemmat kuin muissa laskentatavoissa (17 gCO<sub>2</sub>-ekv/MJ). Myös lannasta saatavien laskennallisten hyvitysten määrä nousee ja päästövähennys verrattuna fossiiliseen polttoaineeseen nousee 159 %:iin. Suuremmat lannasta saatavat hyvitykset johtuvat sian lietelannasta separoidun kuivajakeen ja siipikarjan lannan suurista laskennallisista hyvityksistä (Liite 5), kun direktiivin oletusarvo perustuu lietelannan metaanintuottoon. Kiinteillä lannoilla hyvityksen suhteellinen osuus tällöin kasvaa, koska niiden energiasisältöön perustuva suhteellinen osuus kokonaisenergiämäärästä on suurempi. Samasta syystä tavanomaisilla käytännöillä erityisesti kiinteiden lantojen osuuksista aiheutuvat päästöt tuotantoketjun eri vaiheissa (Liite 5) ovat niin suuret, että lannasta saatavan hyvityksen jälkeenkin päästövähennys jää 55 %:iin eikä direktiivin päästövähennystavoite (65 %) täyty.

Samassa laskennassa (3) maissin oletusarvojen käyttäminen nurmen päästöjen laskennassa ei muuttanut merkittävästi lopputulosta. Tarkemmassa tarkastelussa (Liite 5) nähdään, että maissin oletusarvot eri ketjuvaiheissa eroavat hieman tämän raportin LCA-laskennan arvoista, mutta yhteenlasketut ketjuvaiheiden päästöt ovat lähes yhtä suuret sekä edistyneissä että tavanomaisissa käytännöissä. On myös huomioitava, että nurmen määrä tässä esimerkissä oli hyvin pieni (syötemateriaalien 9 % energiasisällöstä) eikä viljelyn aikaisia päästöjä huomioitu, joten kokonaisuuden kannalta nurmen käytön päästöt jäivät pieniksi.

Tulokset laskentaesimerkeistä osoittavat, että uusiutuvan energian direktiivin lantahyvityksen taustaoletusten kanssa täytyy olla huolellinen. Verrattuna tässä raportoituun LCA-laskentaan lannan varastoinnin päästöihin ilman biokaasuprosessia (15 100 tCO<sub>2</sub>-ekv) voidaan todeta, että direktiivin mukainen, laskennallinen lantahyvitys biokaasuprosessin kanssa on maltillinen (8 100 tCO<sub>2</sub>-ekv). Erityisesti lietelantaa tarkasteltaessa direktiivin oletusarvojen käyttäminen voi vähentää laitosten laskentataakkaa, mutta kiinteille lannoille oletusarvot eivät sovellu sellaisenaan. Lantahyvitys saadaan kuitenkin laskettua kiinteillekin lannoille, kun huomioidaan lannan kuiva-ainepitoisuus ja metaanintuottopotentiaali (Liite 2). Laskennassa on myös tärkeää selkeästi osoittaa käytetyt lähtöarvot, sillä laskentaohjeissa (Energiavirasto 2022) annetut, direktiiviin perustuvat vakiokertoimet soveltuvat vain lietelannalle, maissille ja biojätteelle. Energiaviraston toiminnanharjoittajan ohjeisiin tulisi liittää Suomessa yleisesti käytetyille raaka-aineille vakiokertoimia (esimerkiksi vakiokosteus), joiden avulla mahdollistetaan



toimijoiden yhdenmukainen kohtelu laskentojen vertailussa. Lisäksi ohjeistuksessa tulisi selkeämmin käydä ilmi, millaiselle reaktoriteknikalle ja operointitavalle direktiivin oletuskertoimet on laskettu.

Direktiivin oletusarvot edistyneiden käytäntöjen prosessoinnin päästöille ovat pienemmät kuin tämän hankkeen LCA-laskennan antamat päästöt. Toisaalta tavanomaisilla käytännöissä päästöarvot erityisesti biokaasun jalostukselle ovat LCA-laskennassa käytetyt suuremmat. Yhtenä merkittävänä erona LCA-laskennan edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen välillä on prosessin viipymäaika, jonka mukaan esimerkkilaitoksille laskettiin biokaasuntuottomäärät. Uusiutuvan energian direktiivin päästöjen oletusarvojen laskenta perustuu siihen, että metaanintuotto tietyille raaka-aineille ei muutu, oli kyse sitten edistyneistä tai tavanomaisista käytännöistä. Laskenta kuitenkin huomioi, että kaasutiivistä varastosta otetaan talteen syntyvää biokaasua (varasto on tällöin käytännössä jälkikaasuallas). Tällöin edistyneissä käytännöissä myyntiin tuotettu metaanimäärä on suurempi kuin tavanomaisessa käytännössä ilman kaasutiivistä varastoa, jossa varastosta syntyvän biokaasun oletetaan pääsevän ilmaan. Tämän hankkeen LCA-laskennassa oletettiin reaktorin pitkän viipymän riittävän direktiivin edistyneitä käytäntöjä vastaavan metaanintuoton saavuttamisen. Lisäksi mädätteen lämpötilan laskemisen esimerkiksi lämmöntalteenotolla oletettiin laskevan mikrobitoimintaa ja siten mahdollista metaanintuottoa varastoinnin aikana. Tällöin varastoinnin ei tarvitse olla metaanin talteenoton piirissä, vaikka sieltä vähäisiä määriä metaania ilmakehään lopulta päätyisi. Tämä mädätteen varastoinnista aiheutuvista metaanipäästöistä johtuva eroavaisuus selittää, miksi direktiivin oletusarvot prosessoinnin päästöille ovat merkittävästi pienemmät kuin tässä työssä arvioidut päästöt edistyneissä käytännöissä (Liite 5, Taulukot 5.1 ja 5.3). Tavanomaisissa käytännöissä erot laskennassa ovat pienempiä.

On siis tärkeää tarkastella direktiivin oletusarvojen taustaoletuksia tarkasti. Oletusarvoja ei kannata käyttää, jos käytännöt biokaasulaitoksella eroavat oletusarvojen taustaoletuksista. Esimerkiksi, jos laitoksessa reaktorin viipymä on lyhyt eikä kaasua oteta varastoinnissa tai jälkikaasualtaan kautta talteen, oletettua päästövähennemää ei saavuteta (vaikka varasto olisikin katettu). Näin ollen oletuskertoimia ei tulisi käyttää.

**Taulukko 27.** Kasvihuonekaasupäästöt ja päästövähennykset keskitetyn biokaasulaitoksen esimerkissä eri laskentatavoilla (tarkemmat ketjukohtaiset päästöt liitteessä 5).

Lasku- tapa	Edistyneet käytännöt			Tavanomaiset käytännöt		
	KHK- päästö yhteensä ilman lanta- hyvitystä [gCO <sub>2</sub> - ekv/MJ]	KHK- päästö yhteensä lantahyvi- tyksen jälkeen [gCO <sub>2</sub> - ekv/MJ]	Päästö- vähennys verrattuna fossiiliseen vertailu- arvoon [%]	KHK- päästö yhteensä ilman lanta- hyvitystä [gCO <sub>2</sub> - ekv/MJ]	KHK- päästö yhteensä lantahyvi- tyksen jälkeen [gCO <sub>2</sub> - ekv/MJ]	Päästö- vähennys verrattuna fossiiliseen vertailu- arvoon [%]
1	28	-22	123	103	45	52
2	23	-20	121	104	55	41
3	17	-55	159	123	42	55

1 Hankkeessa tehdyn LCA-laskennan mukaiset päästöt kaikille syötemateriaaleille

2 Direktiivin oletusarvot lietelannalle ja elintarvikesivuvirralla, muille jakeille hankkeen LCA-laskennan mukaiset päästöt, HVP-nurmen viljelyn päästö Rasi ym. (2019) mukaan sekä LCA-laskenna mukainen hyvitys kiinteille lannoille

3 Direktiivin oletuskertoimet kaikille syötemateriaaleille (paitsi HVP-nurmen viljely Rasi ym. 2019)

## 7.3.4 Esimerkkilaitosten taloustarkastelu

Esimerkkilaitosten kannattavuutta tarkasteltiin laitosten tuloksen ja investoinnin takaisinmaksuajan kautta. Täsmälliset tiedot laskennasta ovat liitteessä 6. Tilakohtaisen ja usean tilan yhteisen märkämädätyslaitoksen taustalaskelmia tehtiin myös Biokaasulaskurilla (<https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>) tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi, mutta varsinaisten tutkimuksessa raportoitujen laskelmien tekemiseen käytettiin Lukessa kehitettyä laskentapohjaa. Kuivämädätyslaitoksen ja keskitetyn märkämädätyslaitoksen laskennassa käytettiin Luken laskentapohjaa. On tärkeää huomata, että eri laitostokojen kannattavuutta ei tule vertailla keskenään. Vertailua voidaan tehdä laitosten edistyneiden ja tavanomaisten käytäntöjen taloudellisen kannattavuuden välillä.

Laskelmien taustaoletuksena oli, että tilakohtaisen, usean tilan yhteisen ja kuivämädätyslaitoksen CHP-yksiköllä tuottama nettosähkö ja -lämpö myydään täysimääräisesti laitosten ulkopuolelle eikä esimerkiksi lauhduteta osaa lämmöstä, mitä käytännössä voi tapahtua. Oletus vaikutti esimerkkilaitosten kannattavuuteen positiivisesti. Oleellista kuitenkin on, että edistyneen ja tavanomaisen käytännön kannattavuuden

vertailu tehtiin muuten samoista lähtökohdista, mutta edistyneen käytännön biokaasulaitosten investointikustannus on korkeampi sen vaatimien lisäinvestointien vuoksi. Keskitetyn laitoksen osalta oletettiin, että laitoksen tuottama raakakaasu jalostetaan ja paineistetaan laitoksessa ja myydään biometaanina liikennepolttoaineeksi laitoksen yhteydessä sijaitsevalta tankkausasemalta.

Edistyneen käytännön laitosten investointikustannukset olivat tavanomaisen käytännön laitoksia 15–93 % korkeammat päästöjen minimoinnin vaatimien rakenteiden ja toimintojen takia. Niihin saatava euromääräisesti korkeampi investointituki kuitenkin paransi vuotuista tulosta suhteessa tavanomaisen käytännön laitoksiin. Edistyneellä käytännöllä myös reaktorin pitkä viipymäaika lisäsi biokaasuntuottoa, jonka ansiosta nettoenergiantuotto ja tulot olivat kaikissa tapauksissa korkeampia. Edistyneen käytännön vuotuinen tulos oli tavanomaista käytäntöä parempi kuivamädätyksessä ja usean tilan märkämädätyslaitoksessa. Kuitenkin vain kuivamädätyksessä edistyneen käytännön laitoksen takaisinmaksuaika oli tavanomaista käytäntöä lyhyempi (Taulukko 28).

**Taulukko 28.** Yhteenveto kannattavuuslaskelmista. Laitos 1 = tilakohtainen märkämädätyslaitos, laitos 2 = usean tilan yhteinen märkämädätyslaitos, laitos 3 = keskitetty märkämädätyslaitos ja laitos 4 = kuivämädätyslaitos. E = edistyneet käytännöt, T = tavanomaiset käytännöt.

	Laitos 1 E	Laitos 1 T	Laitos 2 E	Laitos 2 T	Laitos 3 E	Laitos 3 T	Laitos 4 E	Laitos 4 T
Investointi (€)	1 387 000	747 000	1 623 000	1 057 000	21 135 000	10 964 000	955 000	832 000
Investointituki (%)	50 %	50 %	50 %	50 %	30 %	30 %	50 %	50 %
Tuettu investointi (€)	694 000	373 000	811 000	529 000	14 795 000	7 675 000	477 000	416 000
Tulot yhteensä (€/v)	129 000	97 000	400 000	310 000	11 123 000	9 593 000	94 000	74 000
Kulut yhteensä (€/v)	63 000	49 000	66 000	47 000	9 206 000	7 270 000	45 000	41 000
Kate (€/v)	66 000	49 000	334 000	263 000	1 918 000	2 323 000	48 000	33 000
Investoinnin annuiteetti (€/v)	65 000	37 000	79 000	53 000	1 314 000	657 000	45 000	39 000
Tulos (€/v)	1 000	12 000	256 000	210 000	603 000	1 666 000	4 000	-6 000
Takaisinmaksuaika (v)	10,5	7,6	2,4	2,0	7,7	3,3	9,9	12,8

### 7.3.4.1 Tilakohtainen laitos

Edistyneellä käytännöllä tilakohtaisen esimerkkilaitoksen investointikustannus oli 86 % kalliimpi kuin tavanomaisella käytännöllä (1,4 vs. 0,75 milj €). Hintaa nosti pidemmän viipymän edellyttämä suurempi reaktorikoko (274 000 € kalliimpi) sekä mädätteen separointiin ja jakeiden varastointiin liittyvät investoinnit: ruuviseparaattori, kuivajakeen varasto sekä nestejakeen varastosäiliön telttamainen kate maksoivat yhteensä 366 000 € (itse lietesäiliön oletettiin kuuluvan maatilalle, ei biokaasulaitosinvestointiin).

Edistyneellä käytännöllä laitos sai tuloja sähkön myynnistä 69 000 € (12 snt/kWh alv 0 %) ja lämmön myynnistä 43 000 € (7 snt/kWh) vuodessa. Kuluja aiheutui molemmilla käytännöillä rehun tuotannosta 20 000 €/v (20 €/t), rehun lastauksesta murskaimeen 2000 €/v (2 €/t), laitoksen ylläpidosta, päivittäisestä työstä ja vakuutuksista (ks. Liite 6). Prosessissa mineralisoituva typi laskettiin myös biokaasulaitoksen tuloksi (17 000 €/v, 2,35 €/kg). Tavanomaisella käytännöllä laitoksen kokonaistulo jäi neljänneksen pienemmäksi (tulot: sähkö 55 000 €/v, lämpö 28 000 €/v ja typpi 14 000 €/v).

Edistyneellä käytännöllä laitoksen tulokseksi muodostui 1000 €/v ja takaisinmaksuajaksi 10,5 vuotta. Tavanomaisella käytännöllä tulos oli parempi, 12 000 €/v, ja takaisinmaksuaika 7,6 vuotta (Taulukko 29).

**Taulukko 29.** Tilakohtaisen märkämädätyslaitoksen kannattavuus edistyneillä ja tavanomaisilla käytännöillä.

Tilakohtainen laitos	Edistyneet käytännöt	Tavanomaiset käytännöt
Biokaasulaitos ilman mädätteeseen liittyviä investointeja	1 021 000	747 000
Ruuvipuristinseparaattori (€)	50 000	-
Telttamainen kate nestejakeen varastosäiliöön (€)	127 000	-
Kuivajakeen varasto (€)	189 000	-
Investointi yhteensä ilman tukea (€)	1 387 000	747 000
Tuettu investointi (€) (investointituki 50 %)	694 000	373 000
Tulot yhteensä (€/v)	129 000	97 000
Kulut yhteensä (€/v)	63 000	49 000
Kate (€/v)	66 000	49 000
Investoinnin annuiteetti (€/v)	65 000	37 000
Tulos (€/v)	1 000	12 000
Takaisinmaksuaika (v)	10,5	7,6

#### 7.3.4.2 Usean tilan yhteinen laitos

Edistyneellä käytännöllä usean tilan yhteisen märkämädätyslaitoksen investointikustannus on 54 % kalliimpi kuin tavanomaisella käytännöllä (1,6 vs. 1,1 milj. €). Hintaa nostaa lähinnä pidemmän viipymän edellyttämä suurempi reaktorikoko, mädätteen separaattori, laitoksen yhteydessä sijaitsevat kuivajakeen varasto ja nestejakeen varastosäiliön kattaminen. Edistyneellä käytännöllä laitos sai tuloja sähkön myynnistä 244 000 € (0,12 €/kWh alv 0 %) ja lämmön myynnistä 119 000 € (0,07 €/kWh) vuodessa. Prosessissa mineralisoituva typi laskettiin biokaasulaitoksen tuloksi (37 000 €/v, 2,35 €/kg). Tavanomaisella käytännöllä laitoksen kokonaistulo jäi 23 % pienemmäksi (tulot: sähkö 198 000 €/v, lämpö 80 000 €/v ja typi 31 000 €/v).

Edistyneellä käytännöllä laitoksen tulos oli korkeamman energiantuoton ansiosta 22 % parempi, mutta takaisinmaksuaika oli suuremman investointikustannuksen vuoksi 20 % pidempi kuin tavanomaisella käytännöllä (2,4 vs. 2,0 vuotta; Taulukko 30). Laskelmassa ei huomioitu biokaasulaitoksen ja tilojen välisiä syötemateriaalien ja mädätteen kuljetuskustannuksia.

**Taulukko 30.** Usean tilan yhteisen märkämädätyslaitoksen kannattavuus edistyneillä ja tavanomaisilla käytännöillä.

Usean tilan yhteinen laitos	Edistyneet käytännöt	Tavanomaiset käytännöt
Biokaasulaitos ilman mädätteeseen liittyviä investointeja	1 455 000	1 008 000
Ruuvipuristin	75 000	-
Nestejakeen varastosäiliö (edistynyt) / mädätteen varastosäiliö (tavanomainen)	48 000	49 000
Nestejakeen varastosäiliön kelluva kate	3 000	-
Kuivajakkeen varasto	42 000	-
Investointi yhteensä ilman tukea (€)	1 623 000	1 057 000
Tuettu investointi (€) (investointituki 50 %)	811 000	529 000
Tulot yhteensä (€/v)	400 000	310 000
Kulut yhteensä (€/v)	66 000	47 000
Kate (€/v)	334 000	263 000
Investoinnin annuiteetti (€/v)	79 000	53 000
Tulos (€/v)	256 000	210 000
Takaisinmaksuaika (v)	2,4	2,0

### 7.3.4.3 Keskitetty laitos

Edistyneellä käytännöllä keskitetyn märkämädätyslaitoksen investointikustannus oli noin kaksinkertainen tavanomaiseen käytäntöön verrattuna (21 milj. vs. 11 milj. €; Taulukko 31). Edistyneen käytännön laitoksessa hintaa nosti pitemmän viipymän vaatiman suuremman reaktorikoon ja suuremman biokaasutuoton aiheuttamien lisäkustannusten (4 milj. €) lisäksi erityisesti panostukset mädätteen ravinteiden kierrätykseen jatkojalostuksena (6 milj. €).

Keskitetty laitos sai molemmilla käytännöillä porttimaksutuloa elintarviketeollisuuden sivuvirrasta 2 milj. € vuodessa (50 €/t). HVP-nurmelle ja lannoille ei laskettu hintaa. Lisäksi edistyneen käytännön laitos sai tuloa biometaanin myynnistä 8,47 milj. € (1,452 €/kg, alv 0 %) ja biokaasuprosessissa mineralisoituvasta typestä 649 000 €

(2,35 €/kg) vuodessa. Edistyneen käytännön laitos myös maksoi laitoksen tarvitsemasta sähköstä 2,6 milj. € (12 snt/kWh) ja lämmöstä 3,1 milj. € (7 snt/kWh) vuodessa. Molempien laitosten syötteiden kuljetusetäisyydeksi oletettiin 20 km. Lietelantasyötteiden kuljetus laitoksille maksoi 219 000 €/v (2,43 €/t, tiheys 1 t/m<sup>3</sup>). Kiinteiden syötteiden kuljetus maksoi 341 000 € (2,43 €/t, tiheys 0,5 t/m<sup>3</sup>) ja niiden lastaus murskaus- ja syöttölaitteelle 220 000 €/v (2 €/t). Kustannuksia aiheuttavat myös laitoksen ylläpito, päivittäinen työ ja vakuutukset (ks. liite 6). Mädätteestä jalostetuille lannoitevalmisteille ei määritelty hintaa, mutta kuljetuksen kustannukset huomioitiin. Tavanomaisilla käytännöillä laitos sai pienemmät kokonaistulot (biometaani 6,9 milj. €/v ja typpi 677 000 €/v), mutta myös sähkön (1,6 milj. €/v) ja lämmön (1,1 milj. €/v) hankintameno-ot olivat pienemmät kuin edistyneitä käytäntöjä käytettäessä.

Edistyneen käytännön mädätteen jalostus väkevöidyiksi lannoitevalmisteiksi aiheutti huomattavat säästöt kuljetuksissa, koska haihduttamalla ja kuivaamalla tuotettujen lannoitevalmisteiden massa (80 000 t/v) on huomattavasti pienempi kuin tavanomaisen toimintatavan vesipitoisten mädätteen separoinnista muodostuneiden jakeiden massa (364 000 t/v). Edistyneessä käytännössä säästettiin kuljetuksissa 1,9 milj. € vuodessa, kun molemmilla käytännöillä nestemäisten lannoitteiden kuljetusetäisyydeksi oletettiin 25 km ja kiinteiden kuljetusetäisyydeksi 125 km.

Edistyneen käytännön laitoksen suurempi biometaanin myynti ja lannoitekuljetuksesta saatava säästö eivät kuitenkaan riitä kompensoimaan kalliita investointeja, jos lannoitevalmisteista ei ole saatavissa tuloa. Valituilla lähtöarvoilla laskettuna edistyneen käytännön takaisinmaksuaika on yli kaksinkertainen (7,7 vs. 3,3 vuotta) ja tulos jää 1,06 milj. €/v huonommiksi kuin tavanomaisella käytännöllä (Taulukko 31). Saman vuotuisen tuloksen saavuttamiseksi edistyneen käytännön lannoitevalmisteista pitäisi saada tuloa noin 13 €/t (alv 0 %), jos oletetaan, että tavanomaisen käytännön separoituista jakeista ei saada ollenkaan tuloa (edistyneellä käytännöllä tulos 1,06 milj. € huonompi / lannoitevalmisteita tuotetaan 80 000 t vuodessa = 13 €/t).



**Taulukko 31.** Keskitetyn märkämädätyslaitoksen kannattavuus edistyneillä ja tavanomaisilla käytännöillä.

Keskitetty laitos	Edistyneet käytännöt	Tavanomaiset käytännöt
Biokaasulaitos ilman mädätteeseen liittyviä investointeja	13 855 000	9 647 000
Dekantterilinko	600 000	600 000
Nestejakeen tiivistys haihduttamalla	4 600 000	-
Kuivajakeen terminen kuivaus	1 500 000	-
Kuivauksen ammoniakkipesuri	150 000	-
Varastot ammoniumsulfaatile ja ravinnekon- sentraille (edistynyt) / Nestejakeen varastosäiliö (tavanomainen)	100 000	182 000
Telttamainen kate em. varastoihin (edistynyt)	44 000	-
Kuivajakeen varasto	286 000	535 000
Investointi yhteensä ilman tukea (€)	21 135 000	10 964 000
Tuettu investointi (€) (investointituki 30 %)	14 795 000	7 675 000
Tulot yhteensä (€/v)	11 123 000	9 593 000
Kulut yhteensä (€/v)	9 206 000	7 270 000
Kate (€/v)	1 918 000	2 323 000
Investoinnin annuiteetti (€/v)	1 314 000	657 000
Tulos (€/v)	603 000	1 666 000
Takaisinmaksuaika (v)	7,7	3,3

#### 7.3.4.4 Kuivämädätyslaitos

Kuivämädätyksessä edistyneen käytännön tukematon investointihinta mädätevaraston kanssa on 955 000 € ja tavanomaisen käytännön 832 000 €. Edistyneen käytännön laitoksen hinta on 15 % kalliimpi, koska syötepanoksen pitempi viipymäaika vaatii suuremmat reaktorisiiilot. Poikkeuksena mädätevarasto (betonilaatta), joka on tavan-

omaisessa käytännössä 32 000 € kalliimpi, koska siinä varastoidaan koko vuoden aikana syntyvä mädäte. Edistyneessä käytännössä varastoidaan betonilaatalla vain kolmasosa mädätteestä, kun loput 2/3 menee suoraan peltolevitykseen.

Edistyneellä käytännöllä laitos sai tuloja sähkön myynnistä 45 000 € (12 snt/kWh alv 0 %) ja lämmön myynnistä 43 000 € (7 snt/kWh) vuodessa. Prosessissa mineralisoituva tyyppi laskettiin myös biokaasulaitoksen tuloksi (5 300 €/v, 2,35 €/kg). Tavanomaisella käytännöllä laitoksen kokonaistulo jäi 21 % pienemmäksi (tulot: sähkö 35 000 €/v, lämpö 34 000 €/v ja tyyppi 4 500 €/v). Kuluja aiheutui molemmilla käytännöillä rehun tuotannosta 10 000 €/v (20 €/t), syötteiden lastauksesta reaktoreihin ja mädätteen poistosta reaktoreista yhteensä 8 000 €/v (4 €/t syötettä) sekä laitoksen ylläpidosta, päivittäisestä työstä ja vakuutuksista (ks. Liite 6). Edistyneellä toimintatavalla oli lisäkustannuksena mädäteaman peittäminen (500 €/v).

Edistyneen käytännön laitoksen kannattavuus on suuremman energiantuoton ansiosta parempi: tulos on +4 000 €/v ja takaisinmaksuaika 9,9 vuotta. Tavanomaisen käytännön laitos on kannattamaton (tulos -6 000 €/v) ja takaisinmaksuaika 12,8 vuotta (Taulukko 32).

**Taulukko 32.** Kuivamädätyslaitoksen kannattavuus edistyneillä ja tavanomaisilla käytännöillä.

<b>Kuivamädätys</b>	<b>Edistyneet käytännöt</b>	<b>Tavanomaiset käytännöt</b>
Biokaasulaitos ilman mädätevarastoa (€)	939 000	785 000
Mädätevarasto (€)	15 000	47 000
Investointi yhteensä ilman tukea (€)	955 000	832 000
Investointituki (%)	50	50
Tuettu investointi (€)	477 000	416 000
Tulot yhteensä (€/v)	94 000	74 000
Kulut yhteensä (€/v)	45 000	41 000
Kate (€/v)	48 000	33 000
Investoinnin annuiteetti (€/v)	45 000	39 000
Tulos (€/v)	4 000	-6 000
Takaisinmaksuaika (v)	9,9	12,8

#### 7.3.4.5 Johtopäätökset taloustarkastelulle

Päästöjen minimointi biokaasulaitoksilla nostaa investointikustannuksia ja laitoksen koosta ja lopputuotteiden käytöstä riippuen myös käyttökustannuksia. Ne kuitenkin myös nostavat tuotetun biokaasun ja siten energian määrää sekä liukoisen typen osuutta mädätteessä, mikä lisää laitosten tuloja energiassa ja ravinteissa. Yksinkertainen mekaaninen mädätteen separointi on edullisten laitteiden ansiosta mahdollista suhteellisen pienessäkin mittakaavassa nykyisellä tukitasolla. Mädätteen jalostuksen kustannusta kompensoi osin myös kuljetuskustannusten lasku, mikä tässä sisällytettiin laskentaan keskitetylle laitokselle, mutta voisi koskea myös muita laitoskokoja.

Mädätteen pitkälle viety jalostus lannoitevalmisteiksi (kuivaus, haihdutus, ammoniak-kistrippaus jne.) vaatii nykyisten investointitukien lisäksi muuta tukea. Tämä tulee huomioida kannustimia kehitettäessä. Valmisteilla olevaa ravinnekiertotukea tarvitaan ja sen tulisi olla pitkäjänteisesti tarjolla, jotta toiminnanharjoittajat uskaltaisivat investoida jalostuslaitteistoihin. Myös muut mahdolliset ravinteiden kierrätykseen ja vesiensuojeluun ohjaavat kannustimet ja sääntely voivat olla tarpeellisia.

## 8 Kestävät käytännöt ja päästöjen hallinta biokaasutuotannossa

Biokaasun tuotantoketjussa toteutettavilla kestäville käytännöillä voidaan merkittävästi vaikuttaa koko tuotantoketjun päästöihin ja päästöriskiin sekä kaasumaisina päästöinä ilmaan että ravinnehuuhtoumana vesiin. Tämän vuoksi ne tulisi huomioida jo biokaasulaitosten suunnitteluvaiheessa ja edellyttää niitä laitosten luvituksessa sekä investointitukipäätöksissä. Näin edistetään siirtymää kestävimpiin ratkaisuihin. Vaikka tässä raportissa keskitytään erityisesti kaasumaisiin päästöihin, on biokaasulaitoksilla huomioitava myös erilaisten syötemateriaalien ominaisuuksien ja alkuperän vaikutus esimerkiksi hygienisointitarpeeseen, mutta myös lopputuotteiden jatkokäytön mahdollisuuksille. Kestäville käytännöillä lisätään myös biokaasutuotannon turvallisuutta, kun mahdollisia kaasuvuotoja seurataan ja estetään tehokkaasti.

Kestävien käytäntöjen huomiointi biokaasulaitosten suunnittelun, toteutuksen ja käytön aikana vaatii laaja-alaista osaamista niin toiminnanharjoittajilta kuin luvittavilta, valvoilta ja tukipäätöksiä arvioivilta viranomaisilta. Koska aiheen kattavaa, selkeää ohjetta ei kirjoitushetkellä ole olemassa, on tähän lukuun koottu lyhyt opas huomioita viiin tekijöihin muistilistaksi (Taulukko 33).

Merkittävimmät päästöt tuotantoketjussa aiheutuvat usein mädätteen varastoinnista sekä biokaasun hyödyntämisestä energiaksi. Varastoinnin päästöt puolestaan kytkeytyvät syötemateriaalien viipymäaikaan biokaasuprosessissa. Kuitenkin myös muista tuotantoketjun vaiheista syntyy päästöjä, jotka ovat paitsi riippuvaisia laitoksen suunnittelusta ja operoinnista, myös rakenteiden ja laitteistojen huollosta ja käyttäjästä. Toiminnanharjoittaja pystyy vaikuttamaan toiminnallaan mm. syötemateriaalien laatuun, syöttösuhteisiin ja määrään laitoksen kapasiteetin rajoissa. Laitoksen suunnitteluvaiheessa reaktorin koko tulisi valita niin, että se on riittävän suuri myös, mikäli laitoksen syöteseoksessa tapahtuu muutoksia. Myös biokaasun varastointi- ja hyödyntämiskapasiteetin huomiointi suunnitteluvaiheessa on tärkeää, jotta vältetään sen tarpeeton soihdutus (tai muu poltto) ja siitä aiheutuvat päästöt. Määdtevarastojen koko on niin ikään oleellinen tieto jo suunnitteluvaiheessa. Päästöjen kannalta määdtevarastojen tyhjennysrytmillä voitaisiin minimoida päästöjä, mutta käytännössä tyhjennysrytmi on usein riippuvaista viljelyn tarpeista ja aikatauluista. Varastojen kattaminen vähentää merkittävästi ammoniakkipäästöjä.

**Taulukko 33.** Toimenpiteitä, joilla hallitaan ja minimoidaan biokaasun tuotantoketjun aikaisia päästöjä.

Vaihe	Toimenpiteet ja vaikutukset
Laitoksen mitoitus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reaktorikoko suhteessa syötemateriaalien määrään: riittävän pitkän viipymän varmistaminen vähentää mädätteen varastoinnin aikaisia päästöjä merkittävästi</li> <li>Oikeanlainen mitoitus auttaa minimoimaan ylipaineuotojen riskejä</li> <li>Riittävän suuri kaasugarasto vähentää biokaasun soihdutuksen tarvetta</li> </ul>
Huolto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prosessin huoltotoimenpiteiden suunnittelu ja säännöllisyys päästöjen hallinnan kannalta olennaista</li> <li>Rakenteiden säännöllinen tarkastaminen, päästöuotojen paikallistaminen ja korjaaminen (mm. kaasukuvun kiinnikkeet tiiviiksi, repeämien ja reikien tukkiminen) osana huoltotoimenpiteitä</li> <li>Paineensäätöventtiilien toimintakunnon tarkistaminen, turhan avautumisen välttäminen</li> <li>Kaasun käsittely kaasunkäsittelylaitteistojen huollon aikana, onko riittävästi kaasun varastointikapasiteettia</li> </ul>
Biokaasun hyödyntäminen	<ul style="list-style-type: none"> <li>CHP-yksikön ja kaasunjalostusyksikköjen poistokaasun käsittely (esim. hapetustekniikka) metaanipäästöjen minimoimiseksi</li> <li>Biokaasun soihdutuksen välttäminen epätäydellisestä palamisesta aiheutuvien päästöjen ehkäisemiseksi</li> </ul>
Syötemateriaalien hallinta	<ul style="list-style-type: none"> <li>Syötemateriaalien varastointiajan minimointi mikrobiologisen hajoamisen estämiseksi</li> <li>Suljettu järjestelmä syötemateriaalien vastaanotosta, varastoinnista ja siirrosta reaktoriin aiheutuvien päästöjen hallitsemiseksi. Varastojen kattaminen ja/tai poistoilman käsittely.</li> <li>Syötemateriaalien alkuperän vaatimat toimet käsittelyssä, kuten hygienisointivaateen huomiointi</li> </ul>

Vaihe	Toimenpiteet ja vaikutukset
Mädätteen ja siitä jalostettujen jakeiden käsittely ja varastointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mädätteen jäädytys ennen varastointia vähentää hajoamista varastossa ja varastoinnin päästöjä</li> <li>• Mädätteen käsittely suljetussa tilassa, jossa poistoilman käsittely päästöjen minimoimiseksi</li> <li>• Varastointiajan minimointi (esim. mädätteen välitön separointi)</li> <li>• Neste-/lietelmäisten varastojen kattaminen (tiivis kate tehokkain)</li> <li>• Mädätteen separointi voi vähentää kokonaispäästöä. Edellyttää separoidun nestejakeen katettua varastointia.</li> <li>• Mikäli mädäte prosessoidaan termisesti kuivaamalla, minimoidaan typpipäästöt ilmaan kuivauskaasujen typen talteenotolla</li> </ul>
Mädätteen tai siitä jalostettujen jakeiden peltokäyttö	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Multaavien menetelmien käyttö levityksessä tai mahdollisimman pian levityksen jälkeen typpipäästöjen minimoimiseksi</li> <li>• Oikea-aikainen lannoitus lannoitusvaikutuksen maksimoimiseksi ja päästöjen minimoimiseksi</li> <li>• Mädätteelle tai siitä jalostetuille jakeille käyttökohde, jossa ravinteille ja orgaaniselle ainekselle todellinen tarve</li> </ul>

## 9 Johtopäätökset

### 9.1 Biokaasutuotannon kestävyys- ja avainkysymykset

Biokaasulaitosten rakenteilla sekä käytön ja ylläpidon käytännöillä on huomattava vaikutus tuotannosta aiheutuviin kaasumaisiin päästöihin, joita ovat ilmastonmuutosta kiihdyttävät kasvihuonekaasut (metaani, dityppioksidi) ja ilman laatua heikentävä ammoniakki. Puutteelliset käytännöt johtavat etenkin biokaasutuotannon ilmastokestävyyden heikkenemiseen.

Kirjallisuudessa raportoidut metaanipäästöt vaihtelevat vähäisistä jopa 20 prosenttiin koko laitoksen metaanintuotosta. Myös typen päästöt etenkin ammoniakkinä voivat olla suuret. Dityppioksidin päästöjä tapahtuu lähinnä mädätteen tai sen jakeiden peltolevityksen jälkeen maaperän mikrobitoiminnan seurauksena. Dityppioksidin päästöjä muodostuu kaikkien typpilannoitteiden käyttämisestä ja päästöjen vähentäminen on vaikeaa. Maatalouden sivuvirtojen, kuten lannan, käsittely biokaasulaitoksessa tuottaa merkittävimmät ilmastohyödyt tavanomaiseen käsittelyyn nähden, kun päästöjen hallintaan kiinnitetään huomiota. Päästöjen vähetessä myös arvokasta typpeä päätyy enemmän kasvien käyttöön. Tarve päästöjä vähentävillä käytännöillä biokaasulaitoksissa on merkittävä riippumatta laitoskoosta ja syötemateriaaleista.

Tärkeimmät biokaasutuotannon kaasumaisiin päästöihin vaikuttavat toimenpiteet ovat syötemateriaalien viipymä biokaasureaktorissa sekä mädätteen tai siitä prosessoitujen jakeiden varastointi. Myös laitoksen asianmukainen ja oikein ajoitettu huolto, ehjät ja kestävät rakenteet sekä biokaasun energiakäytön päästöriskien minimointi ovat tärkeitä tuotantoketjun päästöjen hallinnalle. Sen sijaan mädätteen jalostamisen vaikutuksista kaasumaisiin päästöihin on niukalti tietoa. Mädätteen levityksen yhteydessä on käytettävä ammoniakkipäästöt minimoivia levitysmenetelmiä, mutta mädätteen käyttö ei esimerkiksi nosta dityppioksidin päästöjä prosessoimattomaan lantaan verrattuna.

Biokaasulaitokset on mitoitettava siten, että syötemateriaaleista saadaan biokaasu tehokkaasti talteen. Käytännössä syötemateriaalien määrä täytyy suhteuttaa biokaasureaktorin kokoon siten, että syötteiden viipymä prosessissa mahdollistaa orgaanisen aineksen hyvän hajoamisen ja siten biokaasun tuotannon ja talteenoton. Mikäli viipymä jää lyhyeksi, ei kaikkea saatavilla olevaa biokaasua (metaania) saada prosessin aikana talteen, vaan mädätteeseen jää helposti hajoavaa orgaanista ainesta. Se voi

vapautua prosessin jälkeen varastoinnin aikana ja aiheuttaa merkittävän päästöriskin. Riittävän viipymän voi varmistaa kahdella tavalla. Mikäli reaktori on syötemateriaalien määrään nähden pieni ja viipymä siten lyhyt, reaktoria tulee seurata kaasun talteenotolla varustettu jälkikaasuallas. Vaihtoehtoisesti reaktorin tulee yksinään olla riittävän suuri, jotta varmistetaan pitkä viipymä ja siten syötemateriaalien hyvä hajoaminen.

## 9.2 Tarvittavat muutokset julkisessa ohjauksessa

Kestävien käytäntöjen huomioiminen nostaa biokaasulaitosten investointihintaa ja mahdollisesti myös käyttökustannuksia. Niiden aiheuttama kustannus voi kuitenkin osin korvautua lisätulona suuremman biokaasutuoton ja kasville käyttökelpoisen liukoisen tyypin määrän noustessa. Suurissa, keskitetyissä laitoksissa mädätteen jatkojalostaminen nostaa laitoskustannuksia merkittävästi, mutta vähentää väkevöinnin myötä lannoitevalmisteiden kuljetuskustannuksia. Jalostaminen on usein edellytys mädätteeseen päätyvien ravinteiden kestäväälle hyödyntämiselle lannoitevalmisteina. Näin on etenkin alueilla, joilla ravinteiden tarve on laitoksen läheisyydessä vähäinen ja vaaditaan pidempää kuljetusmatkaa. Kestävät käytännöt tulee olla investointitukipäätösten ehto ja kustannuslaskennan lähtöoletus. Lisäksi laitokseen kasvaessa myös mädätteen edistyneemmälle jalostamiselle tarvitaan tukea etenkin niillä alueilla, joilla kierrätettäviä ravinteita muodostuu runsaasti.

Hankkeessa tehdyn ohjauskeinotarkastelun johtopäätös on selkeä: nykyiset säädökset ja kannustimet eivät takaa biokaasutuotannon kestävyttä. Investointien ohjatun vauhdittamisen ohella tarvitaan siten myös sääntelymuutoksia. Lisäksi on varmistettava, että sääntely on ennustettavaa, pitkäjänteistä ja selkeästi ohjeistettua.

Nykyiset ohjauskeinot eivät ota kantaa biokaasulaitoksen viipymääjan pituuteen, vaikka se on tärkeimpiä päästöihin vaikuttavia tekijöitä. Tämä on selvä puute, sillä yritysten näkökulmasta laitosinvestointien pieni koko suhteessa syötemateriaalien määrään – tai vastaanotettavien syötemateriaalien ylimitoitus suhteessa laitoksen kokoon – voi olla kannattavaa etenkin lyhyellä aikavälillä. Epäsuhta voi johtaa viipymääjan lyhenemiseen ja metaanipäästöjen syntymiseen. Siksi minimiajan tai vastaavan kriteerin asettaminen biokaasuprosessin viipymälle on välttämätöntä. Em. velvoitteen sääntämisessä voidaan edetä vaihtoehtoisia reittejä. Epäsuora ohjaus voisi tapahtua joko lannoitelainsäädännön laatuasetuksen kautta (stabiilisuusvaateena mädätteen jälkikaasuntuoton maksimiraja) tai esimerkiksi osana kestävyyslain käytäntöjen laajentamista. Lannoitelaki ja kestävyyslaki eivät kuitenkaan koske kaikkia laitoksia. Suora ohjaus ympäristöluvassa tarjoaisi siksi selkeän välineen viipymän pituuden sääntelylle



laitoskoosta riippumatta, mutta sen käyttö edellyttäisi lainsäädännön muuttamista. Päällekkäisyyttä tulee joka tapauksessa välttää.

Uusiutuvan energian direktiivin oletuspäästökertoimet ovat tarjolla vain harvoille syötemateriaaleille. Lisäksi niiden laskenta perustuu keskieurooppalaiseen olosuhteisiin ja oletuksiin reaktoriteknikasta sekä operointitavoista, mikä ei välttämättä vastaa suomalaista toteutusta. Suomalaiset toimintatavat ja syötemateriaalien ominaisuudet tuleekin huomioida nykyistä paremmin. Energiaviraston kestävyyskriteeriohjetta toiminnanharjoittajille tulisikin päivittää, jotta toiminnanharjoittajille olisi selkeää, milloin direktiivin oletusarvoja voidaan käyttää. Lisäksi päästölaskentaohjeissa tulisi laajemmin huomioida tyypillisten Suomessa käytettyjen syötemateriaalien ominaisuudet. Vain ohjeistuksen avulla voidaan taata, että toiminnanharjoittajia kohdellaan mahdollisimman tasavertaisesti ja että sääntely on ennustettavaa.

Myös tarve biokaasulaitosten ympäristöluvitushyöntejen uudistamiselle on selvä. Aiempi ohje on vanhentunut eikä palvele luvanhakijoita tai luvittajia eikä takaa tasavertaista kohtelua. Ympäristölupakäytännöt kaipaavat yhtenäistämistä, minkä vuoksi luvitusohjeen uudistamistyöhön on ympäristöhallinnossa ryhdyttävä viipymättä.

Kestävyysnäkökohtien huomiointiin kannustavaa sääntelyä on runsaasti. Osin velvoitteet ja tukiehdot ovat kuitenkin tuoreita tai vasta valmistelussa, eikä niiden merkityksestä biokaasulaitosten suunnittelulle ja toteutukselle ole selvyyttä. Jossain määrin epäselvyydet ovat seurausta velvoitteiden oikeudellisen aseman epämääräisyydestä. Selvityksen aikana ei esimerkiksi kirkastunut ”Do No Significant Harm” (DNSH) -periaatteen rooli elvytysvarojen myöntämistä koskevalle harkinnalle. Harmillisin tilanne syntyy silloin, kun säädökset aiheuttavat sääntelytaakkaa, mutta eivät merkittävästi tue biokaasutuotannon kestävyden varmistamista.

Myös investointitukien hyväksyttävien kustannusten perusteissa tulee huomioida päästöjen hallinnan ratkaisut, jotta kriteerit kannustavat kestäviin käytäntöihin. Lisäksi ravinteiden kierrätystä tukevia kannustimia tarvitaan edelleen mädätteestä tuotettujen kierrätyslannoitevalmisteiden markkinoiden kehittymiseksi.

Lupamenettelyiden ja tukitoimenpiteiden kohdentuminen siten, että ne kannustavat kestävien käytäntöjen omaksumiseen biokaasulaitoksilla vaatii lupaviranomaisilta ja tukihakemusten arvioitsijoilta laaja-alaista osaamista ja ymmärrystä biokaasulaitosten toiminnasta. Puutteelliset ja epäselvät ohjeistukset haittaavat myös toiminnanharjoittajia. Koulutus ja osaamisen lisääminen niin tukipäätösten tekijöille, viranomaisille että toiminnanharjoittajille on tarpeen. Myös neuvontaa on lisättävä.

## Yhteenveto toimenpide-ehdotuksista

- Biokaasutuotannon kestävyteen tulee kannustaa sääntelymuutoksin sekä korjaamalla että yhtenäistämällä sääntelykäytäntöjä. Vain siten tuotantoon liittyvä kasvihuonekaasujen ja ammoniakkin päästöriski voidaan minimoida ja kestävyysshyötyjen saavuttaminen maksimoida.
- Hallitusohjelmaan tulee tehdä kirjaus biokaasutuotannon viipymääjan sääntelystä. Asiassa voi hyödyntää eri sääntelyreittejä, joiden toimivuus tulee erikseen selvittää. Selkeintä olisi säädellä sitä osana ympäristölupaa, mikä vaatii lainsäädännön muutosta. Pelkkä lannoitelain laatuasetuksen stabiilisuusvaade tai kestävyyslain käytäntöjen laajentaminen eivät riittäne, sillä ne eivät koske kaikkia biokaasulaitoksia.
- Oikeusvarmuuden vuoksi ohjeistukset sääntelyn ja tukien toimeenpanoon on oltava selkeät, yhtenäiset ja kattavat.
- Energiaviraston on huolehdittava siitä, että uusiutuvan energian direktiivin mukaisen päästölaskennan ja etenkin laskennassa käytettävien päästöjen oletusarvojen käytön ohjeistus on selkeää.
- Ympäristöhallinnon vastuulla on ympäristölupaprosessien sujumuuden ja ennustettavuuden parantaminen. Toiminnanharjoittajia sekä lupa- ja valvontaviranomaisia palvelevan ympäristöluvitusohje on uudistettava viipymättä.
- Biokaasun tukimuotojen tulee huomioida kestävien käytäntöjen aiheuttama kustannuslisä. Tarvittaessa tukikelpoiset kustannuserät tulee määritellä niin, että kestävätkäytännöt ovat järjestelmässä lähtöoletuksena.
- Eri osapuolien riittävän osaamisen ja biokaasutuotannon kokonaisuuden ymmärtämiseksi tarvitaan koulutusta. Myös neuvontaa on parannettava. Laitostoimittajien ja alan konsulttien sitoutuminen kestävyden edistämiseen on tärkeää.

## 9.3 Lisätutkimustarpeet

Mädätteiden tai siitä erotettujen jakeiden varastot tulee kattaa erityisesti ilmanlaatua heikentävien ammoniakkipäästöjen vähentämiseksi. Samalla säilytetään mädätteen lannoitearvo, sillä haihtuva ammoniakki vähentää arvokkaan typen pitoisuutta. Varastojen kattaminen estää myös sadeveden pääsyn mädätteeseen tai sen jakeisiin ja siten niiden turhan laimenemisen. Lisäksi lämmöntalteenotto mädätteestä sen poistuksessa reaktorista vähentää ammoniakkin haihtumisriskiä ja hidastaa metaanipäästöjä aiheuttavaa mikrobitoimintaa. Samalla se parantaa laitoksen energiatasetta.

Hankkeessa toteutetut päästömittaukset maatalojen märkämädätyslaitoksen nestejakeen varastosäiliöstä ja kuivamädätyslaitoksen reaktorisilosta vahvistavat kirjallisuudesta koottua tietoa. Mädätteen tai siitä jalostettujen jakeiden lämpötila varastoinnin

aikana vaikuttaa päästömäärään, ja erityisesti kuivamädätysten koko panosprosessin aikaisista päästöistä tarvitaan lisätietoa. Päästömittauksia tulisikin tehdä lisää.

Mädätteen lannoituskäyttö lisää orgaanista ainesta maaperään. Tehdyn kirjallisuuskatsauksen ja mallinnuksen perusteella biokaasuprosessilla ei ole pitkällä aikavälillä vaikutusta pysyvämmän hiilen osuuteen, kun verrataan prosessoimattoman lannan lannoituskäyttöön. Nopeammin hajoavan hiilen vaikutuksista maaperän pysyvämpään hiileen tarvitaan kuitenkin lisää tutkimustietoa, myös elinkaarinäkökulmasta.

## Liitteet

### Liite 1. Esimerkkilaitosten massa-, ravinne- ja energiataseiden laskenta

Biokaasutuotannon päästövaikutusten hahmottamisen apuna käytettyjen esimerkkilaitosten syötemateriaalien ominaisuustiedot koottiin kirjallisuudesta (Taulukko 1.1), ja niiden avulla laskettiin esimerkkilaitosten vuotuinen syötemäärä ominaisuuksineen.

**Taulukko 1.1.** Esimerkkilaitosten syötemateriaalien ominaisuudet. Lannat (Ravinnelaskuri ja Normilanta-järjestelmä: lanta eläinsuojasta, Luostarinen ym. 2017a, Luostarinen ym. 2017b), säilörehunurmi (Luken satotilasto ja Mavi 2008) elintarviketeollisuuden sivuvirta (keskimääräinen jätejäte Ravinnelaskuri-hankkeen laajan kirjallisuuskatsauksen mukaisesti, Luostarinen ym. 2019), metaanintuottopotentiaalit (lannat: Luostarinen ym. 2019; separoidut lannat: Biokaasulaskuri 2020; nurmet ja elintarviketeollisuuden sivuvirta: TEM 2020).

Syötemateriaalien lähtötiedot		TS (%)	VS (%)	Ntot (g/kg)	NH4-N (g/kg)	Ptot (g/kg)	CH <sub>4</sub> - potentiaali (m <sup>3</sup> /t <sub>vs</sub> )
Lannat	Nauta, lietelanta	9,0	6,9	5,0	2,9	0,9	200
	Nauta, separoitu lietelannan kuivajae <sup>1</sup>	22,4	11,5	4,5	1,4	1,0	190
	Sika, lietelanta	8,2	6,9	4,6	2,9	1,0	320
	Sika, separoitu lietelannan kuivajae <sup>2</sup>	22,2	18,5	3,7	1,2	1,4	305
	Hevoset ja ponit	34,7	25,0	4,2	1,7	0,8	150
	Siipikarjan lanta, keskimääräinen	54,7	44,9	23,8	7,8	9,6	201
Muut	Säilörehunurmi	30,0	27,0	7,7	0,3	0,9	350
	Suojavyöhyke- ja luonnonhoitonurmi	40,0	27,0	5,2	0,4	0,8	280
	Elintarviketeollisuuden sivuvirta	20,0	17	6,0	0,3	1,0	350

<sup>1</sup> Naudan lietelannan separointi ruuvipuristimella, erotustehokkuudet kuivajakeessa: massa 20 %, TS 50 %, VS 33 %, N 18 %, NH<sub>4</sub>-N 18 %, P 22 % (Biokaasulaskuri 2020, Pyykkönen 2019)

<sup>2</sup> Sian lietelannan separointi ruuvipuristimella, erotustehokkuudet kuivajakeessa: massa 10 %, TS 27 %, VS 27 %, N 8 %, NH<sub>4</sub>-N 4 %, P 14 % (Møller ym. 2000, Paavola ym. 2016)

## Massa- ja ravinnetaseiden laskenta

Syötemateriaalien lisäksi keskitetyn märkämädätyslaitoksen (kapasiteetti 200 000 t/v) laskennassa oletettiin laitokseen syöteseokseen lisättävän laimennusvettä (Taulukko 1.2), jotta sen kuiva-ainepitoisuus pysyisi märkämädätykselle soveltuvalla tasolla (noin 12–13 %). Laimennusveden ominaisuudet riippuivat laitoksen käytännöistä. Edistyneiden käytäntöjen mukaisessa keskitetyssä laitoksessa oli mukana pitkälle viety mädätteen jatkojalostus, jossa mädätteen linkoseparoitua nestejaetta väkevöitiin haihduttamalla. Haihdutuksesta saatavaa, lähes kiintoainevapaata prosessivettä käytettiin tällöin laimennusvetenä (130 000 t/v). Tavanomaisen käytännön mukaisessa keskitetyssä laitoksessa taas mädätettä ainoastaan linkoseparoitiin ja lingolta muodostuvaa nestejaetta käytettiin laimennuksessa (180 000 t/v). Laimennukseen käytettyjen vesijakeiden ominaisuudet laskettiin olettamalla ensimmäisen vuoden massatase laskettavaksi täysin puhtaalla vedellä (ravinne- ja kuiva-ainepitoisuudet 0 g/kg). Tästä laskennasta muodostuvaa prosessivettä käytettiin seuraavalla laskentakierroksella prosessivetenä, ja laskentaa toistettiin niin kauan, että saavutettiin tasapaino eli prosessiveden ominaisuudet eivät enää muuttuneet.

**Taulukko 1.2.** Keskitetyn esimerkkilaitoksen (kapasiteetti 200 000 t/v) syöteseoksen laimennukseen käytettyjen prosessivesien ominaisuudet. Prosessivesi on peräisin laitoksen mädätteen käsittelystä. TS = kuiva-aine, VS = orgaaninen aines.

	TS (%)	VS (%)	Ntot (g/kg)	NH <sub>4</sub> -N (g/kg)	Ptot (g/kg)
Keskitetty laitos, edistynyt käytäntö	0,07	0,07	0,03	0,03	0,00
Keskitetty laitos, tavanomainen käytäntö	4,38	3,09	7,32	4,39	0,17

Esimerkkilaitosten syötemateriaalien (Taulukko 1.1) perusteella laskettiin myös kunkin laitoksen metaanintuottopotentiali. Potentiali kuvaa kuitenkin optimiolosuhteissa saavutettavaa tulosta eikä vastaa täysin jatkuvatoimisen reaktorin kaasuntuottoa. Metaanintuoton toteumaa mallinnettiin kirjallisuudessa esitetyn yksinkertaisen matemaattisen kaavan avulla, jota on alun perin sovellettu eläinperäisten materiaalien, kuten lantojen mädätyksessä (Chen & Hashimoto 1978; Hill 1983). Mallissa metaanintuoton toteumaan vaikuttaa syötemateriaalien orgaanisen aineksen määrä, syöttönopeus sekä laitoksen viipymäaika. Mitä pidempi viipymäaika on, sitä paremmin orgaaninen aines hajoaa, ja suurempi osuus metaanintuottopotentialista voidaan saavuttaa. Mallinnuksessa haettiin eroja eri viipymäaikojen välille, jotta eri käytäntöjen merkitystä metaanintuotolle voitiin vertailla. Mallinnuksessa ei kuitenkaan huomioitu syötemateri-

aaleja erikseen, vaan laskentaa yksinkertaistettiin käyttämällä kasvunopeuden ja kineettisen parametrin laskennassa samoja kaavoja ja kertoimia kaikille syötemateriaaleille.

Metaanintuottonopeus  $G$  ( $m^3_{CH_4}/d/m^3$ ) laskettiin kaavalla:

$$G = B_0 * L * (1 - K / (\mu_m * \theta - 1 + K)), \quad (\text{Kaava 1})$$

missä  $B_0$  = metaanintuottopotentiaali ( $m^3/t_{VS}$ )

$L$  = kuormitus ( $kg_{VS}/m^3d$ )

$K$  = kineettinen parametri

$\mu_m$  = maksimi kasvunopeus

$\theta$  = viipymäaika (vrk)

Mikrobien maksimi kasvunopeus perustui kirjallisuudessa aiemmin raportoituun kaavaan  $\mu_m = 0,013 * T - 0,129$ , jossa  $T$  on lämpötila Celsius-asteina ( $35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Hashimoto ym. 1981). Arvoksi saadaan tällä kaavalla 0,326.

Kineettisen parametrin ( $K$ ) laskennassa käytettiin märkämädätysprosessille kaavoja 1 (tilakohtainen ja usean tilan yhteinen laitos) ja 2 (keskitetty laitos) sekä kuivamädätykselle kaavaa 3.

$$K = 2 + (0,0016)^{(0,06 * S)} \quad (\text{Kaava 1})$$

$$K = 1 + (0,0016)^{(0,06 * S)} \quad (\text{Kaava 2})$$

$$K = 0,88 + (0,0016)^{(0,06 * S)} \quad (\text{Kaava 3})$$

missä  $S$  = orgaanisen aineksen syöttö ( $kg_{VS}/m^3$ )

Laitoksen päivittäinen metaanintuotto ( $m^3_{CH_4}/d$ ) laskettiin kertomalla metaanintuottonopeus  $G$  ( $m^3_{CH_4}/d/m^3$ ) reaktorin nestetilavuudella ( $m^3$ ). Metaanintuoton toteuma (%) saatiin edelleen jakamalla päivittäinen metaanintuotto ( $m^3_{CH_4}/d$ ) päivittäisen metaanintuottopotentiaalin kanssa ( $m^3_{CH_4}/d$ ). Päivittäinen metaanintuottopotentiaali ratkaistiin jakamalla syöteseoksen metaanintuottopotentiaali ( $m^3_{CH_4}/t_{VS}$ ) laitokseen päivittäin syötettävällä orgaanisen aineksen määrällä ( $kg_{VS}/m^3/d$ ).

Syötemateriaaleista biokaasuksi muuttuva massamäärä sekä kuiva-aineen ja orgaanisen aineksen määrät laskettiin metaanin ja hiilidioksidin tiheyden (0,72 ja 1,96 kg/m<sup>3</sup>, NTP olosuhteet) sekä oletetun biokaasun koostumuksen avulla (56 % CH<sub>4</sub>, 44 % CO<sub>2</sub>). Mädätteen massa laskettiin syötteiden kokonaismäärän ja biokaasuun menevän massan määrän erotuksena.

Ravinnetaseiden laskennassa oletettiin syötemateriaalien kokonaisravinteiden säilyvän täysmääräisesti mädätteessä. Orgaaniseen ainekseen sitoutuneen typen liukoistuminen biokaasuprosessin aikana laskettiin huomioimalla orgaanisen aineksen hajoaminen. Oletuksena oli, että typen liukoistuminen seuraa orgaanisen aineksen hajoamista. Tilakohtaiselle naudan lietelantaan painottuneelle laitokselle orgaanisen typen ja orgaanisen aineksen hajoamisen suhdelukuna käytettiin arvoa 0,73 (Frost & Gilkinsonin 2011), kun taas sian lietelantaan painottuneen usean tilan yhteisen laitoksen sekä keskitetyn laitoksen suhdeluvuksi asetettiin 0,63 perustuen sian lietelannan orgaanisen aineksen hajoamiseen (Marcato ym. 2008). Nurmipainotteiselle kuivämädätyslaitokselle arvoksi asetettiin 0,60 perustuen Luken aiempiin kokeisiin.

Mädätteen jatkojalostuksen massa- ja ravinnetaseiden laskennassa hyödynnettiin kirjallisuuteen perustuvia erotustehokkuuksia, jotka on koottu taulukkoon 1.3. Erotustehokkuus tarkoittaa sitä osuutta, mikä alkuperäisestä käsiteltävästä massasta siirtyy tuotteeseen. Kuivauksessa massan ja kuiva-aineen erottuminen laskettiin olettamalla, että kuivatun jakeen kuiva-ainepitoisuus on 90 %, jolloin se vastaa Ruokaviraston ohjeita tuotteistetun lannan käsittelystä (Ruokavirasto 2019). Keskitetyn laitoksen mädätteen käsittelyketjussa oli mukana myös kuivatun kuivajakeen pelletöinti, mutta sen ei oletettu vaikuttavan jakeen massa- tai ravinnetaseeseen.

**Taulukko 1.3.** Mädätteen jatkojalostustekniikoiden erotustehokkuudet. Ruuvipuristimen erotusteho perustuen kirjallisuuteen (Møller ym. 2000; Frost & Gilkinson 2011; Hjort ym. 2010; Luostarinen ym. 2011) sekä naudan lietelantaperäisen mädätteen osalta Pyykkönen (2019) ja sian lietelantamädätteen separoinnin osalta Paavola ym. (2016). Lingon ja haihdutuksen erotustehokkuus perustuen aiempaan kirjallisuuskatsaukseen (Tampio ym. 2016). Kuivauksessa erotustehokkuudet perustuivat laitevalmistajien tietoihin.

		Erotustehokkuus, % käsiteltävästä					
		Massa	TS	VS	Ntot	NH <sub>4</sub> -N	Ptot
Tilakohtainen laitos	Ruuvipuristin (kuivajakeessa)	10	35	35	10	4	22
Usean tilan yhteinen laitos	Ruuvipuristin (kuivajakeessa)	5	28	28	8	4	14
	Linkous (kuivajakeessa) <sup>1</sup>	17	70	70	25	15	90
	Linkous (kuivajakeessa) <sup>2</sup>	20	65	65	25	15	90
	Haihdutus (konsentraatissa)	20	98	97	-	0	100
Keskitetty laitos	NH <sub>4</sub> -N strippaus (ammoniumsulfaatissa)	3	0	0	-	99	0
	Kuivaus (kuivassa jakeessa)	-	-	98	-	5	100
	Kuivauskaasun käsittely (ammoniumsulfaatissa)	-	-	-	-	98	-

<sup>1</sup> Edistyneiden käytäntöjen mukainen laitos

<sup>2</sup> Tavanomaisten käytäntöjen laitos

Sekä haihdutusprosessin että kuivauksen yhteydessä oleva ammoniakki talteenotto kuluttaa rikkihappoa, jolloin ammoniakki otetaan talteen ammoniumsulfaattina. Rikkihapon (93 %) kulutus laskettiin rikkihapon ja ammoniumsulfaatin moolimassojen suhteessa.

Metaanivuodot huomioitiin taselaskennassa siten, että tuotetun biokaasun määrästä vähennettiin prosessin aikaiset vuodot, paineilman säätöventtiilien vuodot (PRV) sekä huollosta aiheutuvat päästöt. Lisäksi liikennepolttoaineen valmistuksessa huomioitiin prosessin metaanihävikki. CHP-yksiköiden tai liikennepolttoaineen tuotannon osalta metaanihävikkiä ei huomioitu sellaisenaan taselaskennassa, vaan ne oletettiin sisältyvän tekniikoiden hyötysuhteeseen. Taulukon 1.4 mukaiset CHP-yksikön ja liikennepolttoaineen metaanihävikit sisällytettiin LCA-tarkasteluun.



**Taulukko 1.4.** Edistyneitä ja tavanomaisia käytäntöjä kuvaavat maksimi- ja minimiarvot metaanivuodoilla biokaasun tuotantoketjun eri vaiheissa.

	<b>Tavanomainen (% tuotetusta metaanista)</b>	<b>Edistynyt (% tuotetusta metaanista)</b>
<b>Tilakohtainen laitos</b>		
Prosessipäästö	0,5–2	0,1–0,3
PRV	2–3	0,5–1
Huolto	1–2	0,1–0,5
CHP	1,5–3	0,1–1
<b>Yhteensä</b>	<b>5–10</b>	<b>0,8–2,8</b>
<b>Usean tilan yhteinen laitos</b>		
Prosessipäästö	0,4–1,5	0,1–0,3
PRV	2–3	0,5–1
Huolto	1–2	0,1–0,5
CHP	1,5–3	0,1–1
<b>Yhteensä</b>	<b>4,9–9,5</b>	<b>0,8–2,8</b>
<b>Keskitetty laitos</b>		
Prosessipäästö	0,31	0,1–0,2
PRV	2–3	0,5–1
Huolto	1–2	0,1–0,5
Liikennepolttoaine	1–3	0,1–0,8
<b>Yhteensä (LP)</b>	<b>4,3–9</b>	<b>0,8–2,5</b>
<b>Kuivamädätyslaitos</b>		
Prosessipäästö	0,5–2	0,1–0,3
PRV	2–3	0,5–1
Huolto	1–2	0,1–0,5
Purkuvaihe	4–5	2–3
CHP	1,5–3	0,1–1
<b>Yhteensä</b>	<b>9–15</b>	<b>2,8–5,8</b>

## Energiataseiden laskenta

Metaanikaasun muutoksessa kilowattitunneiksi käytettiin muunnosta  $1 \text{ m}^3\text{CH}_4=9,97 \text{ kWh}$ .

Esimerkkilaitosten energiankulutuksen laskennassa huomioitiin lämmitykseen tarvittava energia sekä sähkönkulutus tuotantoketjun eri vaiheissa. Biokaasuprosessin lämpöenergian tarve arvioitiin märkämädätyslaitoksissa syötteen lämmittämiseen kuluvan energian avulla (Tampio ym. 2016, kaava 4), kun taas kuivämädätyslaitoksessa lämmönkulutus laskettiin kertoimen avulla (Taulukko 1.5). Laskennallisesti massaa lämmitettiin hieman yli tavoitelämmön (reaktorissa noin  $37 \text{ }^\circ\text{C}$ , hygienisointi  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ja näin lämpötilan oletettiin pysyvän tavoitteessa käsittelyn ajan.

Märkämädätyksen lämmöntarve laskettiin veden ominaislämpökapasiteetin avulla (kaava 4).

$$\Delta E = c \times m \times \Delta t, \quad (\text{Kaava 4})$$

missä  $\Delta E =$  lämmittämiseen tarvittava energia

$c =$  aineen ominaislämpökapasiteetti ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ ) ( $c_{\text{vesi}} = 4,18 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$ )

$m =$  massa ( $\text{kg}$ )

$\Delta t =$  lämpötilan muutos ( $^\circ\text{C}$ )

Lämpötilan muutos ( $\Delta t$ ) oletettiin olevan  $12 \rightarrow 40 \text{ }^\circ\text{C}$  niissä laitoksissa, joissa ei ollut mukana syötemateriaalien hygienisointia (tilakohtainen laitos, usean tilan yhteinen laitos). Märkämädätysprosessien lämpöhäviön suuruudeksi oletettiin 15 % lämmitystarpeesta aiempien tutkimusten (mm. Tampio ym. 2020, Tampio ym. 2016) ja kirjallisuuden (Smyth 2009, Rapport 2011) perusteella, kuivämädätyksessä lämpöhäviön osuus oletettiin pienemmäksi (5 %), jolloin häviöt muodostuisivat lähinnä perkolaattinestesäiliön häviöistä.

Keskitetyssä esimerkkilaitoksessa huomioitiin myös syötteiden hygienisointi. Hygienisoinnin vaatima lämmitystarve laskettiin kuten yllä, mutta lämpötilan muutos laskettiin välille  $12 \rightarrow 72 \text{ }^\circ\text{C}$ . Prosessissa kierrätettävälle vedelle ei huomioitu erillistä lämmitystarvetta, vaan hygienisoinnin lämmön oletettiin riittävän myös prosessiveden lämmitykseen. Lämmönvaihtimien käyttöä ja niiden vaikutusta lämpötaseeseen ei huomioitu.

Biokaasun tuotantoketjun eri vaiheiden sähkönkulutus ja mädätteen jatkojalostuksen lämmönkulutus perustuivat kirjallisuuteen ja käytetyt kertoimet on koottu taulukkoon 1.5.

**Taulukko 1.5.** Esimerkkilaitosten energiankulutuksen laskennassa käytetyt lähtöarvot.

Vaihe	Arvo	Yksikkö tai selite	Lähde
Reaktorin sähkönkulutus, pieni laitos (märkämädätys)	1,3	% tuotetusta biokaasusta	Pöschl ym. 2010
Reaktorin lämmönkulutus, pieni laitos (märkämädätys)	Lasketaan veden ominaislämpökapasiteetin avulla	lämpötilaero 12→40 °C	
Reaktorin sähkönkulutus, iso laitos (märkämädätys)	3	% tuotetusta biokaasusta	Pöschl ym. 2010
	Lasketaan veden ominaislämpökapasiteetin avulla	lämpötilaero 12→70 °C	
Reaktorin sähkönkulutus, pieni laitos (kuivämädätys)	1	kW/1000 m <sup>3</sup>	Biokaasulaskuri (2021) taustaineisto
Reaktorin lämmönkulutus, pieni laitos (kuivämädätys)	0,4	kWh/vrk/m <sup>3</sup> reaktori kapasiteetti	
Hygienisoinnin ja muun esikäsitelyn (murskaus, sekoitus) sähkönkulutus	150	kWh/tTS	Pöschl ym. 2010
Ruuviseparaattorin sähkönkulutus	0,6	kWh/t mädätettä	Chuda & Ziemiński 2021, Pyykkönen & Ervasti 2019
Lingon sähkönkulutus	3	kWh/t mädätettä	Chuda & Ziemiński 2022, Duan ym. 2020
Haihdutuksen sähkönkulutus	25	kWh/t käsiteltävää	Vondra ym. 2019
Haihdutuksen lämmönkulutus	Valittu tekniikka ei kuluta lämpöä		
Kuivauksen sähkönkulutus	0,0375	kWh/kg vettä	Huber Technology 2022
Kuivauksen lämmönkulutus	0,8	kWh/kg vettä	Awiszus ym. 2018, Huber Technology 2022
Kuivauksen typen talteenoton sähkönkulutus	2,5	kWh/kgNH <sub>3</sub>	Hadlocon ym. 2015, Havukainen ym. 2022

Vaihe	Arvo	Yksikkö tai selite	Lähde
Pelletöinnin sähkönkulutus	0,1	kWh/kg	Czekala 2021, Kratzeisen ym. 2010, Cathcart ym. 2021
Kaasun jalostuksen (paineistus, puhdistus) kulutus	0,45	m <sub>3</sub> /m <sub>3</sub> biokaasua	Biomethane Regions 2012

Esimerkkilaitosten energiantuotannon laskennassa huomioitiin energiantuotantomuotojen hyötysuhteet taulukon 1.6 mukaisesti. Liikennepolttoaineen tuotannossa huomioitiin prosessin metaanivuotojen vaikutus tuotettavaan liikennepolttoaineen määrään (ks. Taulukko 1.4).

**Taulukko 1.6.** CHP:n ja biometaanin tuotannon hyötysuhteet.

Vaihe	Hyötysuhde	Yksikkö	Lähde
CHP, sähkö <sup>1</sup>	32	%	IET Energy 2021
CHP, lämpö <sup>1</sup>	52	%	
CHP, sähkö <sup>2</sup>	37	%	
CHP, lämpö <sup>2</sup>	49	%	

<sup>1</sup> Laitoksille, joissa kaasua <30 m<sup>3</sup>/h → tilakohtainen laitos, kuivamädätyslaitos

<sup>2</sup> Laitoksille, joissa kaasua (>30 m<sup>3</sup>/h) → usean tilan yhteinen laitos, keskitetty laitos

## Lähteet:

- Awiszus, S., Meissner, K., Reyer, S. & Müller, J. 2018a. Utilization of digestate in a convective hot air dryer with integrated nitrogen recovery. *Landtechnik* 73: 106–114.
- Biokaasulaskuri 2021. Maatalousinfo, biokaasulaskuri. v0.3.0. Luonnonvarakeskus. <https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>
- Cathcart, A., Smyth, B.M., Lyons, G., Murray, S.T., Rooney, D. & Johnston, C.R. 2021. An economic analysis of anaerobic digestate fuel pellet production: can digestate fuel pellets add value to existing operations? *Cleaner Engineering and Technology* 3, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100098>
- Chen, Y.R. & Hashimoto, A.G. 1978. Kinetics of methane fermentation (No. CONF-780549-8). Symposium on biotechnology in energy production, Gatlinburg, TN, USA, 10 May 1978.
- Chuda, A. & Ziemiński, K. 2021. Digestate mechanical separation in industrial conditions: Efficiency profiles and fertilising potential. *Waste Management* 128: 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.049>
- Czekala, W. 2021. Solid Fraction of Digestate from Biogas Plant as a Material for Pellets Production. *Energies* 14: 5034. <https://doi.org/10.3390/en14165034>

- Duan, N., Khoshnevisan, B., Lin, C., Liu, Z. & Liu, H. 2020. Life cycle assessment of anaerobic digestion of pig manure coupled with different digestate treatment technologies. *Environment International* 137: 105522. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105522>
- Frost, P. & Gilkinson, S. 2011. 27 months performance summary for anaerobic digestion of dairy cow slurry at AFBI Hillsborough. Interim technical report.
- Hadlocon, L.J.S., Manuzon, R.B. & Zhao, L. 2015. Development and evaluation of a full-scale spray scrubber for ammonia recovery and production of nitrogen fertilizer at poultry facilities. *Environmental Technology* 36(4): 405–416. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.950346>
- Hashimoto, A.G., Chen, Y.R. & Varel, V.H. 1981. Theoretical aspects of methane production: state-of-the-art. In: *Livestock wastes: A renewable resource*. ASAE, St. Joseph, MI, pp. 86–91.
- Havukainen, J., Saud, A., Fruergaard Astrup, T., Peltola, P. & Horttanainen, M. 2022. Environmental performance of dewatered sewage sludge digestate utilization based on life cycle assessment. *Waste Management* 137: 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.005>
- Hill, D.T. 1983. Simplified monod kinetics of methane fermentation of animal wastes. *Agricultural Wastes* 5: 1–16. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(83\)90009-4](https://doi.org/10.1016/0141-4607(83)90009-4)
- Hjorth, M., Christensen, K.V., Christensen, M.L. & Sommer, S.G. 2010. Solid—liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 153–180. <https://doi.org/10.1051/agro/2009010>
- Huber Technology 2022. Energy-efficient sewage sludge drying at Innsbruck with HUBER Belt Dryer BT. <https://www.huber.de/huber-report/ablage-berichte/sludge-treatment/energy-efficient-sewage-sludge-drying-at-innsbruck-with-huber-belt-dryer-bt.html>
- IET Energy 2021. IET Energy / Höyrytys Oy. Toimitusohjelma BIOKAASU, kaatopaikka- ja mädättämökaasu. [https://hoyrytys.fi/wp-content/uploads/2019/08/iet\\_toimitusohjelmaesite.pdf](https://hoyrytys.fi/wp-content/uploads/2019/08/iet_toimitusohjelmaesite.pdf)
- Kratzeisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C. & Müller, J. 2010. Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel* 89: 2544–2548. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.02.008>
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017a. Suomen normilanta –laskentajärjestelmän kuvaus ja ensimmäiset tulokset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47. Luonnonvarakeskus, Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-441-0>
- Luostarinen, S., Logrén, J., Grönroos, J., Lehtonen, H. & Paavola, T. 2011. Lannan kestävä hyödyntäminen. HYÖTYLANTA-tutkimusohjelman loppuraportti. MTT Raportti 21. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-322-2>
- Luostarinen, S., Perttilä, S., Nousiainen, J., Hellstedt, M., Joki-Tokola, E. & Grönroos, J. 2017b. Turkiseläinten lannan määrä ja ominaisuudet. Tilaseurannan ja lantalaskennan tulokset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-439-7>
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. & Ylivainio, K. 2019. Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 75 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-777-0>
- Marcato, C.E., Pinelli, E., Pouech, P., Winterton, P. & Guirese, M. 2008. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry. *Bioresource Technology* 99: 2340–2348. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.013>

- Mavi 2008. Ravinnetaseet. Ympäristötuen lisätoimenpide lannoituksen ja sadon ravinnemäärien seurantaan. Maaseutuvirasto. 13 p.
- Møller, H.B., Lund, I. & Sommer, S.G. 2000. Solid–liquid separation of livestock slurry: efficiency and cost. *Bioresource technology* 74: 223–229.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00016-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00016-X)
- Paavola, T., Winquist, E., Pyykkönen, V., Luostarinen, S., Grönroos, J. & Manninen, K., Rankinen, K. 2016. Lantaravinteiden kestävä hyödyntäminen tiloilla ja keskitetyssä biokaasulaitoksessa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 33/2016. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-258-4>
- Pöschl, M., Ward, S. & Owende, P. 2010. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy* 87: 3305–3321.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>
- Pyykkönen, V. 2019. Separoinnin kuivajae biokaasulaitoksen syötteenä. Teoksessa: Lanta liikkeelle ja ravinteet kiertoon. Ravinnerenki ja Lantalogistiikka -hankkeiden tulosjulkaisu. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 3/2019.  
<https://ravinnerenki.savonia.fi/julkaisut/raportit>
- Pyykkönen, V. & Ervasti, S. 2019. Separoinnin mahdollisuudet ja kannattavuustekijät. Teoksessa: Lanta liikkeelle ja ravinteet kiertoon. Ravinnerenki ja Lantalogistiikka -hankkeiden tulosjulkaisu. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja 3/2019.  
<https://ravinnerenki.savonia.fi/julkaisut/raportit>
- Rapport, J.L., Zhang, R., Jenkins, B.M., Hartsough, B.R. & Tomich, T.P. 2011. Modeling the performance of the anaerobic phased solids digester system for biogas energy production. *Biomass Bioenergy* 35: 1263–1272.
- Ruokavirasto 2021. Lannan käyttö ja käsittely.  
<https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/lannan-kaytto-ja-kasittely/>
- Smyth, B.M., Murphy, J.D. & O'Brien, C.M. 2009. What is the energy balance of grass biomethane in Ireland and other temperate northern European climates *Renew Sust Energ Rev* 13: 2349–2360.
- Tampio, E., Laakso, J., Winquist, E. & Luostarinen, S. 2021. Turkiseläinten lannan käsittely biokaasulaitoksessa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 53/2021. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 74 p. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-249-0>
- Tampio, E., Marttinen, S. & Rintala, J. 2016. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production* 125: 22–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.127>
- TEM 2020. Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki.  
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-482-2>
- Vondra, M., Touš, M. & Teng, S.Y. 2019. Digestate evaporation treatment in biogas plants: A techno-economic assessment by Monte Carlo, neural networks and decision trees. *Journal of Cleaner Production* 238: 117870.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117870>

## Liite 2. Uusiutuvan energian direktiivin mukainen päästöjen taustalaskenta

Päästöt ja päästövähennykset laskettiin keskitetyille esimerkkilaitokselle edistyneen ja tavanomaisen käytännön mukaisina ensisijaisesti käyttämällä hankkeessa toteutusta LCA-laskennasta saatuja tuotantoketjun eri vaiheiden päästöjä, joista vähennettiin lannan paremmasta käsittelystä saatava päästöhyvitys (laskenta 1). Päästövähennys lannalle laskettiin huomioiden lannan metaanintuottopotentiaali sekä kuiva-ainepitoisuus (kaavat 1 ja 2).

Lannasta tehtävän päästöhyvityksen laskeminen:

$$e_{sca} = \frac{L_h}{P_n * \frac{BMP_{toteuma}}{100}} \quad (1)$$

jossa  $e_{sca}$  [gCO<sub>2ekv</sub>/MJ] on lantabonus substraatista n,  $L_h$  on uusiutuvan energian direktiivissä määritelty, hyvistä lannankäsittelyn käytännöistä laskettu vakio (-54,06 kgCO<sub>2ekv</sub>/t<sub>ww</sub>),  $P_n$  substraatin n energiantuotto [MJ/kg<sub>ww</sub>] ja  $BMP_{toteuma}$  metaanintuottopotentiaalista oletettu todellinen toteutumisprosentti (tässä työssä 90 % edistyneissä ja 78 % tavanomaisissa käytännöissä).

Substraatin (syötemateriaali) energiantuoton laskeminen:

$$P_n = BMP * VS * LHV_{biokaasu} \quad (2)$$

jossa BMP on substraatin metaanintuottopotentiaali [m<sup>3</sup>biokaasu/kg<sub>vs</sub>], VS orgaanisen aineen määrä [kg<sub>vs</sub>/kg<sub>ww</sub>] ja LHV<sub>biokaasu</sub> on biokaasun lämpöarvo (18,30 MJ/m<sup>3</sup>biokaasu; JRC 2017).

Laskenta tehtiin myös käyttämällä uusiutuvan energian direktiivin oletusarvoja. Koska oletusarvot on annettu vain lietelannalle, maissille ja biojätteelle, tehtiin kaksi eri laskelmaa, jossa ensimmäisessä oletusarvoja käytettiin vain sian lietelannalle (lietelannan oletusarvot) ja elintarviketeollisuuden sivuvirrälle (biojätteen oletusarvot), muille jakeille käytettiin LCA-laskennasta saatuja päästöarvoja (laskenta 2). Lisäksi haluttiin nähdä, voidaanko oletusarvoja käyttää laajemmin eri raaka-aineille (laskenta 3), joten kaikille lannoille (sian lietelanta, naudanalannan kuivajae, sianlannan kuivajae ja siipikarjan lanta) käytettiin sekä lietelannan oletusarvoja että oletusarvoa lannasta tehtäville päästöhyvityksille (huomioiden eri lantajakeiden erilaiset kuiva-ainepitoisuudet), elintarviketeollisuuden sivujakeille biojätteen oletusarvoja sekä HVP-nurmille maissin oletusarvoja sillä erotuksella, että maissin viljelyn aikaiset päästöt korvattiin Luken aikaisemmin tehdyn laskennan mukaisiksi (Rasi ym. 2019) huomioiden viljelyn osalta vain nurmen keräämisen ja kuljetuksen päästöt biokaasulaitokselle (Taulukko 2.1).

Biometaanin kuljetuksen päästöjä ei huomioitu, sillä jalostetun biometaanin jakelupisteen oletettiin sijaitsevan laitoksen yhteydessä.

**Taulukko 2.1.** Uusiutuvan energian direktiivin mukaisessa päästölaskennassa käytetyt oletusarvot [gCO<sub>2ekv</sub>/MJ] (EU 2018).

Raaka-aine	Katettu varasto, jalostuksen poistokaasun käsittely					Avoin varasto, jalostuksen poistokaasua ei käsitelty				
	Viljely	Prosesointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset	Viljely	Prosesointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset
Lietelanta	0,0	4,4	6,3	4,6	-111,9	0,0	117,9	27,3	4,6	-124,4
Maissi	7,6*	6,0	6,3	4,6	-	8,6*	28,1	27,3	4,6	-
Biojäte	0,0	7,2	6,3	4,6	-	0,0	42,8	27,3	4,6	-

\*HVP-nurmen päästö Rasi ym. 2019.

Kaikissa edellä esitetyissä laskelmissa päästöjen ja hyvitysten jakautuminen eri syötemateriaaleille laskettiin niiden energiasisältöjen mukaan, Energiaviraston Biopolttoaineita, bionesteitä ja biomassapolttoaineita koskevaa toiminnanharjoittajan kestävyyskriteeriohjeen mukaisesti (Energiavirasto 2022). Substraatin painokerroin kuivalannoille ja nurmelle (W<sub>n</sub>) laskettiin olettamalla, että substraatin n vuotuinen keskimääräinen kosteus (AM<sub>n</sub>) (laskettuna kuiva-aineesta, Taulukko 1.1, Liite 1) on sama kuin substraatin n vakiokosteus (SM<sub>n</sub>), sillä direktiivin ohjeissa vakiokosteuspitoisuus on annettu vain lietelannalle, maissille ja biojätteelle.

Laskettuja päästöjä verrattiin direktiivissä annettuun fossiilisen polttoaineen päästöön 94 gCO<sub>2ekv</sub>/MJ. Direktiivin mukaan tuotettu liikennepolttoaine on uusiutuvaa, mikäli päästövähennys fossiiliseen liikennepolttoaineeseen verrattuna on yli 65 %.

### Lähteet:

- Energiavirasto 2022. Biopolttoaineita, bionesteitä ja biomassapolttoaineita koskeva toiminnanharjoittajan kestävyyskriteeriohje.  
<https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12778928/OHJE-Toiminnanharjoittajan-kest%C3%A4vyyskriteeriohje.pdf/6eafa3a2-4c7e-adea-c955-4959a54a8b6d>
- JRC 2017. European Commission, Joint Research Centre, Agostini, A., Marelli, L., Edwards, R., et al., Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions: calculated according to the methodology set in COM(2016) 767, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2790/27486>
- Rasi, S., Timonen, K., Joensuu, K., Regina, K., Virkajärvi, P., Pulkkinen, H., Tampio, E., Pyykkönen, V. & Luostarinen, S. 2019. Nurmi biokaasun raaka-aineena - RED II direktiivin mukainen kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 46/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 29 s.

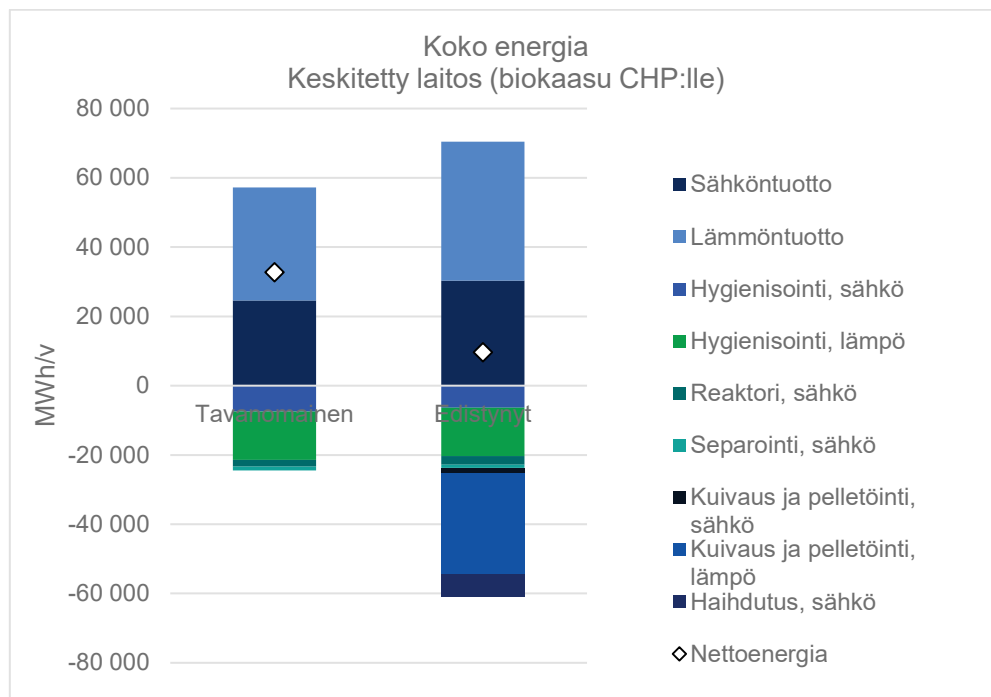


### Liite 3. Keskitetyn märkämädätyslaitoksen energiatase, kun biokaasu muunnetaan sähköksi ja lämmöksi.

LCA-laskentaa varten keskitetylle esimerkkilaitokselle laskettiin energiatase myös tilanteessa, jossa laitos muuntaa kaiken tuottamansa biokaasun sähköksi ja lämmöksi CHP-yksikön avulla. Laitos kattaa oman energiantarpeensa tuotetuista lämmöstä ja sähköstä. Luvussa 6 on esitetty tilanne, jossa laitoksen tuottama biokaasu jalostetaan biometaaniksi liikennekäyttöön.

Mikäli keskitetty laitos ohjaa kaiken tuottamansa biokaasun CHP-yksikköön, vaikuttaa CHP-tuotannon hyötysuhde tuotettavan sähkö- ja lämpöenergian määrään. Hyötysuhde on kuitenkin liikennepolttoaineen tuotantoon verrattuna heikompi, minkä vuoksi kokonaisenergiantuotanto on CHP-tuotannon tapauksessa matalampi (yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto CHP:n tapauksessa 70 400 MWh/v vs. tuotetun liikennepolttoaineen energiasisältö 81 800 MWh/v). Kuten liikennepolttoaineen tuotannon tapauksessa (ks. Luku 6), myös CHP-tuotannossa edistyneessä käytännössä energiankulutus on mädätteen jatkojalostuksesta johtuen suurempi kuin tavanomaisen käytännön mukainen kulutus. Kun sähkö- ja lämmöntuotanto lasketaan yhteen, on energian nettotase kuitenkin positiivinen, jolloin laitos tuottaa enemmän energiaa, kuin mitä se omassa prosessointiketjussaan hyödyntää (Kuvio 3.1).

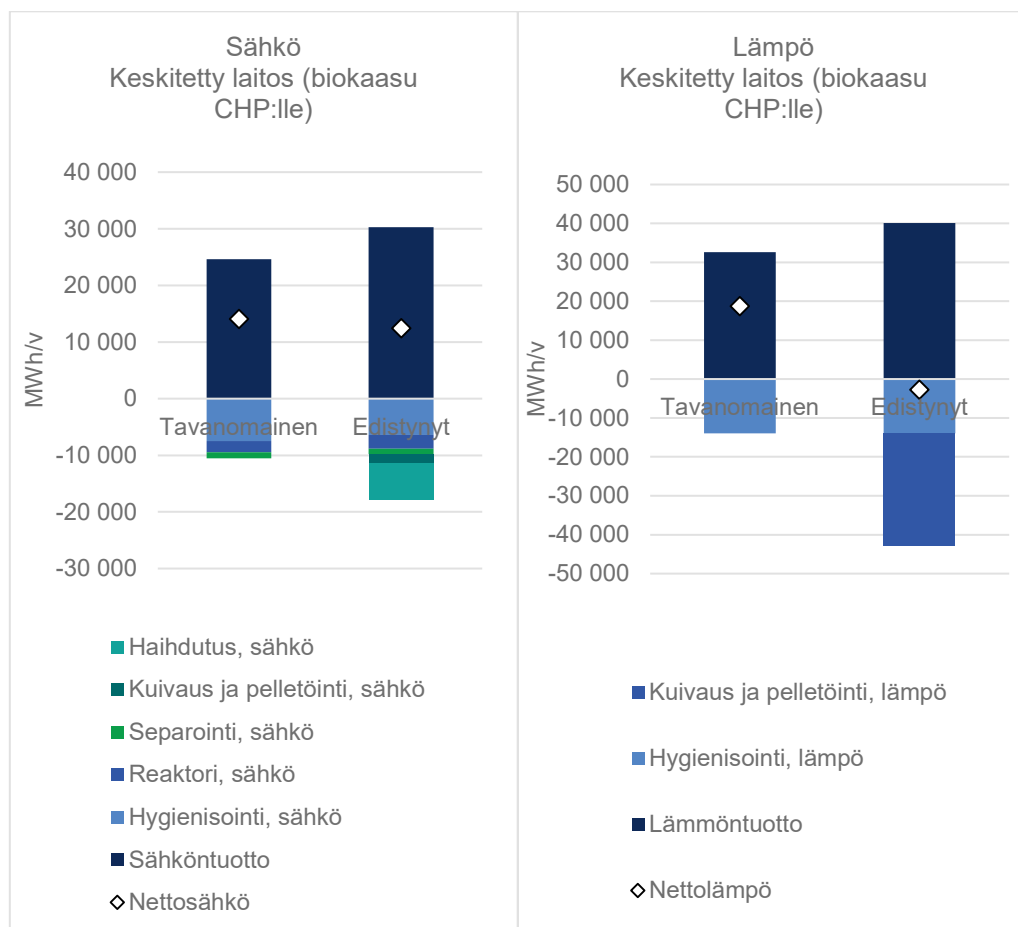
**Kuvio 3.1.** Keskitetyn esimerkkilaitoksen energiatase tilanteessa, jossa laitos tuottaa sähköä ja lämpöä CHP-yksikön avulla.



Kun sähkön ja lämmön tuotantoa ja kulutusta tarkastellaan lähemmin (Kuvio 3.2), havaitaan, että sähköntuotannon ja -kulutuksen erotus (ns. nettosähkön tuotanto) on positiivinen, kun taas lämmön nettotase on negatiivinen. Laitoksen lämmönkulutus onkin mädätteen jatkojalostuksen vaatimasta lämpöenergiatarpeesta johtuen suuri, minkä vuoksi laitos ei pysty omalla lämmöntuotannollaan kattamaan tarvetta kokonaan. Käytännössä laitos ostaa tällöin lämpöenergiaa ulkopuolelta.

Tässä esimerkissä mädätteen käsittelyyn valittiin terminen kuivaus, joka hyödyntää lämpöenergiaa. Markkinoilla kuitenkin on myös sähköön perustuvia kuivausmenetelmiä, jolloin laitoksen lämmöntarve laskisi. Vastaavasti tämä kuitenkin lisäisi laitoksen sähköntarvetta. Kokonaisuudessaan laitoksen lämpötaseeseen pystytään vaikuttamaan myös lämmönvaihtimien käytöllä, mitä ei tässä laskentaesimerkissä huomioitu.

**Kuvio 3.2.** Sähkön ja lämmön tuotanto ja kulutus keskitetyssä esimerkkilaitoksessa, jossa käytössä CHP-yksikkö.



## Liite 4. Tarkasteltavat elinkaarivaiheet ja LCA-laskennassa käytetyt lähtötiedot

Tässä liitteessä kuvataan elinkaarivaiheittain LCA-laskennassa käytetyt lähtötiedot ja oletukset pääpiirteissään. Tarkat esimerkkilaitosten kuvaukset, syötemateriaalien ominaisuudet, biokaasun tuotto sekä laitosten käytäntöihin liittyvät oletukset on esitetty yksityiskohtaisesti luvussa 6.1 sekä liitteessä 1.

### Biokaasuprosessi ja biokaasun hyödyntäminen

Biokaasulaitoksilta tapahtuvat metaanivuodot ja -päästöt arvioitiin kirjallisuuskatsauksen (Luku 2) sekä asiantuntija-arvioiden perusteella. Metaanivuotoihin- ja päästöihin kohdistuvan vaihtelun havainnollistamiseksi määritettiin vaihteluvälit, jotka ottavat huomioon eri laitostyyppit sekä käytäntöjen vaihtelun. Metaanivuodot ja -päästöt prosessin aikana huomioitiin tuotetun biokaasun määrää vähentävästi taselaskennassa (Luku 7.2.1). Lisäksi kuivamädätykselle huomioitiin siilon purkuvaiheen aikana aiheutuvat päästöt. Laskennassa käytetyt päästöjen vaihteluvälit laitosesimerkeille on esitetty liitteessä 1 (Taulukko 1.4).

Biokaasun hyödyntäminen yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa (CHP-yksikkö) tuottaa metaani- ja dityppioksidipäästöjä (Luku 2.2). Liikennepolttoaineen puhdistuksessa ja paineistuksessa muodostuu myös metaanihävikkejä, mutta ei dityppioksidipäästöjä. Kirjallisuuskatsauksessa esitettyjä minimi- ja maksimiarvoja hyödynnettiin elinkaarilaskennassa. Metaanipäästöille käytetyt oletusarvot kaasun käsittelyyn liittyen on esitetty esimerkkilaitoksittain liitteen 1 taulukossa 1.4. CHP-tuotannossa dityppioksidipäästöiksi oletettiin olevan edistyneillä käytännöillä 0,002 g/kWh kaasun alhaisen ammoniakkipitoisuuden vuoksi ja tavanomaisilla käytännöillä 0,345 g/kWh korkeasta ammoniakkipitoisuudesta johtuen (Liebetrau ym. 2013).

### Mädätteen prosessointi

Mädätteen prosessoinnin, eli separoinnin ja mahdollisen jatkojalostuksen (kuivaus ja haihdutus), energiankulutus arvioitiin esimerkkilaitokselle tehtyjen taselaskelmien mukaisesti (Luku 6.2.1, Liite 1). Separoinnissa käytettävät polymeerit ja jatkojalostuksessa käytetty rikkihappo huomioitiin liitteen 1 mukaisesti. Lisäksi laskennassa huomioitiin jatkojalostuksesta muodostuvat ammoniakkipäästöt, jotka vähentävät lopputuotteen päätyvää liukoista tyyppiä. Keskitetyn laitoksen mädätteen jakeiden jatkojalostuksessa ei huomioitu metaani- eikä dityppioksidipäästöjä mittausta- ja tutkimustiedon puutteen vuoksi.

## Mädätteen tai siitä prosessoitujen jakeiden varastointi ja levitys

Mädätteen ja siitä separoitujen ja jalostettujen jakeiden varastoinnista aiheutuvat metaanipäästöt arvioitiin huomioiden syötemateriaalien viipymäaika prosessissa ja sen vaikutus mädätteen metaanintuottopotentiaaliin. Laskennassa oletettiin, että lyhyemmän viipymän laitoksilla mädätteessä on enemmän helpommin metaanina haihtuvaa hiiltä kuin stabiilimmassa, pidempään prosessissa viipyneessä mädätteessä. Varsinaiset päästökertoimet johdettiin mädätteen metaanintuottopotentiaalista sekä IPCC:n (2019) laskentakaavasta siten, että päästöjen suuruus vastaa kirjallisuuskatsauksessa (Luku 2) esiintyvää vaihteluväliä. Varastointikäytäntöjen eroja ei kuitenkaan huomioitu tutkimustiedon puutteen vuoksi metaanipäästöjen osalta, vaan saman metaanipäästön oletettiin tapahtuvan riippumatta valitusta varastointikäytännöstä. Näin ollen tilakohtaisen märkämädätyksen laitosesimerkissä varastoinnissa metaanina oletettiin haihtuvan 1–4 % laitoksella tuotetusta metaanista, usean tilan yhteisellä märkämädätyslaitoksella 2–10 % tuotetusta metaanista, keskitetyllä märkämädätyslaitoksella 2–8 % ja kuivämädätyslaitoksella 4–13 % tuotetusta metaanista.

Mädätteen ja siitä jalostettujen jakeiden varastoinnissa ja levityksessä muodostuvat suorat ja epäsuorat dityppioksidipäästöt laskettiin lantaa koskeviin kansainvälisiin laskentaohjeisiin sekä kansalliseen laskentamalliin perustuen (IPCC 2006, EMEP/EEA 2019, Grönroos ym. 2017). Laskennassa oletetut levityskäytännöt on esitetty taulukossa 4.1.

**Taulukko 4.1.** Levityskäytännöt esimerkkilaitoksilla.

	<b>Tavanomainen käytäntö</b>	<b>Edistynyt käytäntö</b>
Tilakohtainen märkämädätyslaitos	Mädätteen letkulevitys, multaus >12 h	Kuivajakeen hajalevitys, multaus <4 h Nestejakeen sijoituslevitys
Usean tilan yhteinen märkämädätyslaitos	Mädätteen letkulevitys, multaus >12 h	Kuivajakeen hajalevitys, multaus <4 h Nestejakeen sijoituslevitys
Keskitetty märkämädätyslaitos	Kuivajakeen hajalevitys, multaus >12 h Nestejakeen letkulevitys, multaus >12 h	Kuivatun kuivajakeen hajalevitys, multaus <4 h Väkevöidyn typpituotteen (ammoniumsulfaatti, ravinnekonstraatti) sijoituslevitys
Kuivämädätyslaitos	Mädätteen hajalevitys, multaus >12 h	Mädätteen hajalevitys, multaus <4 h

## Substituutiot

Biokaasulaitoksen mädätteen sisältämille typelle ja fosforille laskettiin substituutiovaikutukset (mineraalilannoitteiden korvaaminen) täysimääräisesti huomioiden mädätteen varastoinnissa tapahtuvat typpihävikit. Mineraalifosforin valmistuksen päästökerron perustui ecoinvent-tietokantaan (ecoinvent v3) ja mineraalityypen valmistuksen kerroin kirjallisuuteen (Brentrop ym. 2016). Mineraalityypilannoitteen korvaamisessa huomioitiin vain mädätteen tai siitä prosessoidun jakeen peltoon päätyvän liukoisen typen osuus. Lisäksi huomioitiin mineraalilannoitteiden levityksestä vältetyt dityppioksidipäästöt (IPCC 2006, EMEP/EEA 2019; Grönroos ym. 2017).

Esimerkkilaitosten tuottaman energian oletettiin korvaavan joko muuta sähköä ja lämpöä tai liikennepolttoainetta (katso esimerkkilaitosten laitoskuvaukset, Luku 6.1). Kulutussähkön ja -lämmön päästökertoimina käytettiin Suomen ympäristökeskuksen kuntien päästölaskentaan kehitetyn A-Las-mallin aineistoa vuodelta 2018 (Lounasheimo ym. 2020). Lämmön päästökertoimena käytettiin Pohjois-Pohjanmaan, Etelä-Pohjanmaan ja Varsinais-Suomen kunnille laskettua keskiarvoa. Liikennepolttoaineen korvaamisessa huomioitiin vuosien 2018–2020 tieliikenteen energiankulutuksen fossiilisten polttoaineiden (diesel, moottoribensiini, maakaasu) suhteet (Tilastokeskus 2022b) sekä niille asetetut päästökertoimet polttoaineluokituksessa (Tilastokeskus 2022a) sekä polttoaineiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt (ecoinvent v3).

## Vertailutilanteiden (ei biokaasulaitosta) laskentaoletukset

Ilmastovaikutusten arvioinnissa oletettiin, että vertailutilanteessa (syötemateriaalien käsittelyssä ei biokaasulaitosta) lietelantojen varastoissa on kelluva kate ja kiinteiden lantojen varastoinnissa avoin lantala. Kiinteät lannat levitetään peltoon hajalevityksenä ja lietelannat letkulevityksenä. Ylijäämänä muodostuneen tai muutoin rehuksi kelpaamattoman säilörehunurmen oletettiin päätyvän aumakompostoinnin kautta maahan levitettäväksi. Suojavyöhyke- ja luonnonhoitonurmet oletettiin kompostoitavan. Elintarviketeollisuuden sivuvirran oletettiin päätyvän laitospoistointiin ja sen jälkeen hyödynnettäväksi viherrakentamiseen.

Kompostoinnissa huomioitiin materiaalien hajoamisesta aiheutuvat kaasumaiset päästöt, konetyö sekä tukiaineet. Lantojen varastoinnissa ja elintarviketeollisuuden sivuvirran kompostoinnissa vapautuvat kaasumaiset päästöt arvioitiin kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion mukaisesti (Statistics Finland 2021, IPCC 2006). Kompostoinnin ammoniakkipäästöjen arviointi perustui Ravinnelaskuri-hankkeessa tehtyyn kirjallisuuskatsaukseen (Luostarinen ym. 2019). Säilörehun ja suojavyöhyke- ja luonnonhoitonurmien kompostointia ei huomioida kansallisessa kasvihuonekaasuinventariossa, joten muodostuvat metaani- ja dityppioksidipäästöt arvioitiin kirjallisuuden avulla (Zhu-Barker ym. 2017). Kompostoinnin kestoksi arvioitiin 3 kk. Kompostoinnin konetyön ja

tukiaineiden määrät ja kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin perustuen Lehtoranta ym. (2020) sekä Manninen ym. (2016) julkaisuihin.

Biomassojen sisältämästä typestä oletettiin haihtuvan maaperälevityksen yhteydessä dityppioksidina 1 % IPCC:n (2006) laskentaohjeistuksen mukaisesti. Lantojen ravinteille substituutiovaikutukset laskettiin vastaavasti kuin mädätteille. Säilörehunurmen, suojavyyhyke- ja luonnonhoitonurmien sekä elintarviketeollisuuden sivuvirran sisältämille ravinteille ei laskettu substituutiovaikutuksia vertailutilanteessa.

### Lähteet:

- Brentrup, F., Hoxha, A. & Christensen, B. 2016. "Carbon Footprint Analysis of mineral Fertilizer Production in Europe and Other World Regions," in Conference paper. The 10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCA Food 2016) (College Dublin, Ireland: University).
- Ecoinvent v3 database. Version 3.8 2021
- EMEP/EEA 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2019. 3.B Manure management.
- Grönroos, J., Munther, J. & Luostarinen, S. 2017. Calculation of atmospheric nitrogen and NMVOC emissions from Finnish agriculture – description of the revised model. Reports of the Finnish Environment 37/2017. Suomen ympäristökeskus. Helsinki.
- IPCC 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. & Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Lehtoranta, S., Johansson, A., Malila, R., Rankinen, K., Grönroos, J., Luostarinen, S. & Kaistila, K. 2020. Vaihtoehtoja kestävämpään turkiseläinten lannan hyödyntämiseen. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35/2020.
- Liebetrau, J., Reinelt, T., Clemens, J., Hafermann, C., Friehe J. & Weiland, P. 2013. Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. Water science and technology 67(6): 1370–1379. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.005>
- Lounasheimo, J., Karhinen, S., Grönroos, J., Savolainen, H., Forsberg, T., Munther, J., Petäjä, J. & Pesu, J. 2020. Suomen kuntien kasvihuonekaasupäästöjen laskenta. ALas-mallin menetelmäkuvaus ja laskentojen tuloksia 2005–2018. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 25/2020. Suomen ympäristökeskus. Helsinki.
- Luostarinen, S., Grönroos, J., Lemola, R., Lehtonen, E., Lehtoranta, S., Tampio, E., Turtola, E. & Uusitalo, R. 2019. Ravinlaskuri – Alueellisen ravinnekierron suunnittelun työkalu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 2019 (julkaisematon tausta-aineisto osana viranomaiskäyttöön luotua Ravinlaskuri-työkalua). <https://www.luke.fi/projektit/ravinlaskuri/>
- Manninen, K., Grönroos, J., Luostarinen, S. & Saastamoinen, M. 2016. Hevosenlannan energiakäytön ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 30/2016. Luonnonvarakeskus

Statistics Finland. 2021. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2020. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Submission to the European Union. 15 March 2022.

Tilastokeskus. 2022a. Polttoaineluokitus 2022. Saatavilla osoitteesta:

[https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)

Tilastokeskus 2022b. Liikenteen energiankulutus 2018–2020. Saatavilla osoitteesta:

[https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ehk/statfin\\_ehk\\_pxt\\_12sz.px](https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12sz.px)

Zhu-Barker, X., Bailey, S., Paw, K., Burger, M. & Horwath, W. 2017. Greenhouse gas emissions from green waste composting windrow. Waste management 59: 70-79.

## Liite 5. Uusiutuvan energian direktiivin mukaisen päästölaskennan kasvihuonekaasupäästöt ja päästövähennykset prosessivaiheittain

**Taulukko 5.1.** Kasvihuonekaasupäästöt ja päästövähennykset [gCO<sub>2ekv</sub>/MJ] jaettuna eri syötemateriaaleille niiden energiasisällön mukaisesti. Hankkeessa toteutetun LCA-laskennan päästötiedot (laskenta 1).

Syötemateriaali	Edistyneet käytännöt					Tavanomaiset käytännöt				
	Viljely	Prosessointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset	Viljely	Prosessointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset
Sian lietelanta	0,00	4,72	0,19	0,17	-27,65	0,00	15,96	1,52	1,35	-31,91
Naudan lannan separoitu kuivajae	0,00	0,63	0,03	0,02	-3,74	0,00	2,14	0,20	0,18	-4,31
Sianlannan separoitu kuivajae	0,00	3,28	0,13	0,12	-7,47	0,00	11,10	1,06	0,94	-8,62
Siipikarjan lanta	0,00	7,84	0,32	0,28	-11,21	0,00	26,53	2,53	2,24	-12,93
HVP-nurmet	0,68	2,28	0,09	0,08		0,77	7,72	0,74	0,65	
Elintarviketeollisuuden sivuvirta	0,00	6,77	0,27	0,24		0,00	22,90	2,18	1,94	
<b>Yhteensä</b>	<b>0,68</b>	<b>25,52</b>	<b>1,03</b>	<b>0,91</b>	<b>-50,07</b>	<b>0,77</b>	<b>86,35</b>	<b>8,24</b>	<b>7,30</b>	<b>-57,77</b>



**Taulukko 5.2.** Kasvihuonekaasupäästöt ja päästövähennykset [gCO<sub>2ekv</sub>/MJ] jaettuna eri syötemateriaaleille niiden energiasisällön mukaisesti. Uusiutuvan energian direktiivin oletuskertoimet lietalannalle ja elintarviketeollisuuden sivuvirrälle, muille hankkeessa toteutetun LCA-laskennan päästötiedot (laskenta 2).

Syötemateriaali	Edistyneet käytännöt					Tavanomaiset käytännöt				
	Viljely	Prosessointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset	Viljely	Prosessointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset
Sian lietalanta	0,00	0,81	1,16	0,85	-20,68	0,00	21,79	5,05	0,85	-22,99
Naudan lannan separoitu kuivajae	0,00	0,63	0,03	0,02	-3,74	0,00	2,14	0,20	0,18	-4,31
Sianlannan separoitu kuivajae	0,00	3,28	0,13	0,12	-7,47	0,00	11,10	1,06	0,94	-8,62
Siipikarjan lanta	0,00	7,84	0,32	0,28	-11,21	0,00	26,53	2,53	2,24	-12,93
HVP-nurmet	0,68	2,28	0,09	0,08	0,00	0,77	7,72	0,74	0,65	0,00
Elintarviketeollisuuden sivuvirta	0,00	1,91	1,67	1,22	0,00	0,00	11,35	7,24	1,22	0,00
<b>Yhteensä</b>	<b>0,68</b>	<b>16,76</b>	<b>3,40</b>	<b>2,57</b>	<b>-43,10</b>	<b>0,77</b>	<b>80,63</b>	<b>16,82</b>	<b>6,09</b>	<b>-48,86</b>

**Taulukko 5.3.** Kasvihuonekaasupäästöt ja päästövähennykset [gCO<sub>2ekv</sub>/MJ] jaettuna eri syötemateriaaleille niiden energiasisällön mukaisesti. Uusiutuvan energian direktiivin oletuskertoimet (laskenta 3).

Syötemateriaali	Edistyneet käytännöt					Tavanomaiset käytännöt				
	Viljely	Prosessointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset	Viljely	Prosessointi	Jalostus	Paineistaminen	Lannasta tehtävät hyvitykset
Sian lietelanta	0,00	0,81	1,16	0,85	-20,68	0,00	21,79	5,05	0,85	-22,99
Naudan lannan separoitu kuivajae	0,00	0,11	0,16	0,11	-2,77	0,00	2,92	0,68	0,11	-3,08
Sianlannan separoitu kuivajae	0,00	0,57	0,81	0,59	-14,38	0,00	15,16	3,51	0,59	-15,99
Siipikarjan lanta	0,00	1,35	1,94	1,41	-34,38	0,00	36,23	8,39	1,41	-38,22
HVP-nurmet	0,68	0,54	0,56	0,41	0,00	0,77	2,51	2,44	0,41	0,00
Elintarviketeollisuuden sivuvirta	0,00	1,91	1,67	1,22	0,00	0,00	11,35	7,24	1,22	0,00
Yhteensä	0,68	5,29	6,30	4,60	-72,22	0,77	89,96	27,30	4,60	-80,29

## Liite 6. Talouslaskennan oletukset ja menetelmät

### Energian ja typen hinta

Sähkön arvoksi myytäessä/itse käytettäessä (maatila ja usean tilan) sekä ostettaessa keskitetty laitokselle arvioitiin 0,12 €/kWh ja lämmön arvoksi 0,07 €/kWh alv 0 %. Bio-metaanin myyntihinnaksi omalta asemalta oletettiin 0,1045 €/kWh alv 0 %, joka puhtaana metaanina vastaa hintaa 1,45 €/kg alv 0 % ja 1,8 €/kg alv 24 % (Mustankorkea 2023). Määdätteistä ja niistä tuotetuista lannoitevalmisteista saatavaksi tuloksi laskettiin pelkästään biokaasuprosessissa mineralisoituneen typen arvo, jonka arvioitiin olevan 2,35 €/kg alv 0 % (Rasi ym. 2022).

### Kuljetuskustannusten laskenta

Kuljetuskustannukset huomioitiin vain keskitetylle laitokselle, jonne syötteiden kuljetusetäisyyden laitokseen oletettiin olevan 20 km sekä lietemäisten ja nestemäisten lannoitevalmisteiden kuljetusetäisyyden laitokselta 25 km ja kiinteiden lannoitevalmisteiden 125 km. Lastaus- ja purku aika arvioitiin samaksi kaikille materiaaleille: nestemäisille/lietemäisille ja kiinteille syötemateriaaleille sekä mädätteille ja lannoitevalmisteille, yhteensä 0,25 h/rekkakuorma (32 m<sup>3</sup>). Rekan tuntikustannus lastauksessa, purkamisessa ja ajossa oli 85 €/h alv 0 %. Rekan ajonopeudeksi oletettiin 60 km/h. Rekan ajoajassa on huomioitu paluumatka eli kuljetusetäisyys kerrottiin kahdella (Mäkelä 2021). Kuljetuksissa oletettiin liete-/nestemäisten materiaalien tiheydeksi 1000 kg/m<sup>3</sup>, kiinteiden materiaalien tiheydeksi 500 kg/m<sup>3</sup>.

### Muut kustannukset ja porttimaksu

Rehun tuotantokustannukseksi oletettiin 20 €/tuoretonni (Rasi ym. 2022). Lannoille ja HVP-nurmille (hoidettu viljelemätön pelto) ei laskettu tuotantokustannusta. Kaikille laitoksille oletettiin päivittäiseksi työajaksi 0,5 h/vrk (sis. päivittäiset tarkastukset ja pienet korjaustyöt) ja työntekijän palkaksi 21 €/h. Märkämädätyslaitoksilla kiinteiden syötteiden lastauksen murskauslaitteeseen hinnaksi arvioitiin 2 €/t. Kuivämädätyslaitoksella syötteiden lastauskustannukseksi reaktoriin sekä mädätteen lastauskustannukseksi pois reaktorista arvioitiin yhteensä 4 €/t syötettä. Vakuutuksen hinnaksi oletettiin 0,5 % laitoksen tukemattomasta investointihinnasta vuodessa (Hahn 2011). Kuivämädätyksessä edistyneellä toimintatavalla oli lisäkustannuksena mädäteaman peittäminen, arviona 500 €/v. Keskitettyjen biokaasulaitosten tuloksi porttimaksuna elintarviketeollisuuden sivuvirroista oletettiin 50 €/t (Luostarinen ym. 2019).

## Syöte- ja mädätevarastojen tilavuudet

Tilakohtaisilla laitoksilla (märkä- ja kuivamädätys) mädätevarastojen tilavuudet laskettiin lannan varastointivaateen mukaisesti 12 kuukauden varastotarpeen mukaan, paitsi kuivamädätyslaitoksella edistyneessä käytännössä vain kolmasosa mädätteestä oletettiin varastoitavaksi (lopun 2/3 suoraan peltolevitykseen). Märkämädätyksessä usean tilan yhteisessä sekä keskitetyssä biokaasulaitoksessa oletettiin, että lietesyötevarastot on mitoitettu kolmen vuorokauden syötettä vastaavalle tilavuudelle (ns. puskurivarasto). Mädätteestä prosessoitujen nestemäisten jakeiden ja lannoitevalmisteiden (separoitu nestejake, ammoniumsulfaatti, ravinnekonentraatti) varastosäiliöiden tilavuudeksi oletettiin seitsemän vuorokauden ja kiinteiden (separoitu kuivajake, kuivattu kuivajake) mädätteiden varastojen tilavuudeksi 30 vuorokauden tuottoa vastaava tilavuus. Märkämädätyksessä kiinteät syötteet oletettiin toimitettavan suoraan syöttölaitteeseen, joten niille ei laskettu varastotilavuuksia. Edistyneen käytännön keskitehtyillä laitoksella tarvittiin kaksi nestemäisen mädätteen varastosäiliötä, omat säiliönsä ammoniumsulfaatille (AMS) ja ravinnekonentraatille. Varastotilavuuden laskennassa lietemäisten/nestemäisten materiaalien tiheydeksi oletettiin  $1000 \text{ kg/m}^3$  ja kiinteiden materiaalien tiheydeksi  $500 \text{ kg/m}^3$ .

Keskitettyjen laitosten hygienisointiyksikköjen tilavuudet laskettiin jakamalla hygienisoitavan syötteen tilavuus ( $\text{m}^3$ ) 365:llä, eli oletettiin, että vuorokaudessa hygienisoidaan vain yksi ”panos” eli säiliöllinen (oletuksena oli, että hygienisoitavan materiaalin tiheys on  $500 \text{ kg/m}^3$ ). Yhden panoksen hygienisointiaika on 3 tuntia, joten panoksia voidaan teoriassa ajaa enintään 8 kpl vuorokaudessa.

## Märkämädätyslaitosten investointihinnat, käyttöiät ja ylläpitokustannukset

Märkämädätyslaitosten eri osien ja laitteiden investointihintojen laskentakaavat sekä käyttöiät ja ylläpitokustannusten laskentaperusteet on esitetty Taulukossa 6.1. Ylläpitokustannukset ovat laitoksen useimpien osien kohdalla arvioitu prosentteina tukematomasta investointikustannuksesta vuodessa (% inv./v). CHP-yksikön ylläpitokustannus on arvioitu tuotettua sähkön kilowattituntia kohti. Keskitettyjen laitosten dekantterilingon, nestejakeen haihdutuslaitteiston, kuivajakeen kuivauslaitteiston ja ammoniakkipesurin ylläpitokustannukset on ilmoitettu euroina prosessoitavaa tonnia kohti (lähde: keskustelut alan toimijoiden kanssa). Ylläpitokustannukset eivät sisällä laitteiden energiankulutuksia (kulutukset ilmoitettu Taulukossa 1.5).

**Taulukko 6.1.** Märkämädätyslaitosten investointihintojen laskentakaavat ja kaavojen muodostuksessa käytettyjen datojen lähteet sekä arvioidut käyttöiät (k.ikä) ja vuotuisten ylläpitokustannusten laskentaperusteet.  $V_R$  = reaktorin tai reaktoreiden yhteenlaskettu prosessitilavuus ( $m^3$ ).  $V_S$  = säiliön tilavuus ( $m^3$ ).

Laitoksen osa	Hinnan laskentakaava (€)	Lähde	K.ikä (v)	Ylläpidon laskenta
Reaktorirakenteet (sis. pohjalaatat)	$=84,55125 \cdot V_R + 80599,05$	1	20	1 % inv./v
Reaktorin sekoi-tin/sekoittimet	$=13,2132 \cdot V_R + 7150,185$ , reaktorikohtainen	1	10	5 % inv./v
Lietesyötepumput	$=10500$ (vakio), 1 kpl/reaktori	1	10	5 % inv./v
Mädätteen poisto-pumppu	$=10500$ (vakio), 1 kpl/reaktori	1	10	5 % inv./v
Muu prosessitek-niikka	$=56\,600$ (vakio)	1	10	5 % inv./v
Muut rakenteet (tek-niset tilat, putket, kondenssikaivot)	$=3,34257 \cdot V_R + 38007,9$	1	20	1 % inv./v
Kiinteään syöttölaite (apevaunu ja syöt-töyhteet reaktoriin)	$=3,2051 \cdot F + 40313$ , jossa F on syötemäärä (t/v)	1	15	5 % inv./v
Lämpökattila	$=20\,000$ (vakio, joka laitoksella varalla)	1	20	2 % inv./v
Boileri, putkitukset ja automaatioliitännät	$=46\,000$ (vakio)	1	20	2 % inv./v
CHP-yksikkö + kaa-sun puhallus, aktiivi-hiili & kondenssive-den poisto	$=2388,225 \cdot e^{(-0,003 \cdot P)} \cdot P + 45950$ , jossa P on sähköteho (kW <sub>el</sub> )	1	10	1,8 snt/kW <sub>hel</sub>
Yllä mainittujen asennustyöt & käyt-töönotto	$=10,282125 \cdot V_R + 71452,5$	1	20	ei
Suunnittelu ja projek-tin johto	$=5,95371 \cdot V_R + 41373,15$	1	20	ei
Soihtu	$=10000$ (vakio)	Arvio	20	ei

Laitoksen osa	Hinnan laskentakaava (€)	Lähde	K.ikä (v)	Ylläpidon laskenta
Muut (toimittajan rahoituskulut, matkakulut, rahti jne.)	=1,011045*V <sub>R</sub> +20887,65	1	20	ei
Lietesyötevarasto membraanikatteella, sis. asennus	=26,491*V <sub>S</sub> +28273+14,45*V <sub>S</sub> +5876,1	1	20	1 % inv./v
Lietesyötevaraston sekoitin sis. asennus	=6000 (vakio)	2	10	5 % inv./v
Kattamaton lietemädäte-/nestejæavarasto, sis. asennus	=26,491*V <sub>S</sub> +28273	1	20	1 % inv./v
Telttamainen kate mädätteen nestejææsäiliöön, sis. asennus	ks. Telttamaisen katteen hinnan laskenta	3	20	1 % inv./v
Kelluva kate mädätteen nestejææsäiliöön	=21 €/m <sup>2</sup> (vain usean tilan edistynyt)	4	10	1 % inv./v
Lietemädäte-/nestejæavaraston sekoitin sis. asennus	=6 000 €/säiliö	2	20	5 % inv./v
Kattamaton mädätteen kuivajæavarasto, sis. asennus	=43,863*V <sub>S</sub> +10435	1	20	1 % inv./v
Katettu mädätteen kuivajæavarasto, sis. asennus	=87,727*V <sub>S</sub> +20870	1	20	1 % inv./v
Jalostin + paineistus 250 bariin, sis. asennus	=2720,5*X+114812, jossa X on jalostettavan raakakaasun virtaama tunnissa (m <sup>3</sup> /h)	5	20	3 % inv./v
Tankkausasema jalostimen yhteydessä, sis. asennus	=150 000 €/kpl (edistynyt keskitetty 6 kpl, Tavanomainen keskitetty 5 kpl)	6	20	3 % inv./v
Maatyöt	=45 €/m <sup>2</sup>	1	20	ei
Sähköllyityntä verkkoon	=10 000 (vakio)	Arvio	20	ei

Laitoksen osa	Hinnan laskentakaava (€)	Lähde	K.ikä (v)	Ylläpidon laskenta
Hygienisointiyksikkö	=2680,2*V <sub>S</sub> +44113	7	15	5 % inv./v
Ruuvipuristin	=50 000 (edistynyt maatilalaitos); 75 000 (edistynyt usean tilan laitos)	Arvio	12	5 % inv./v
Dekantterilinko	=600 000 (keskitetyt laitokset)	8	12	2,46 €/t
Nestejakeen tiivistys haihduttamalla	=4 600 000 (edistynyt keskitetty)	8	15	2,85 €/t
Kuivajakeen termi- nen kuivaus	=1 500 000 (edistynyt keskitetty)	8	15	2,0 €/t
Kuivauksen ammoni- akkipesuri	=150 000 (edistynyt keskitetty)	8	15	1,5 €/t

Investointihintojen lähteet: 1) Saalasti 2022, 2) KTBL 2013, 3) Saalasti 2023, 4) MMM 2021, 5) Lehtonen & Luostarinen 2022, 6) Lehtonen 2023, 7) Ervasti ym. 2021, 8) keskustelut alan toimijoiden kanssa.

Biokaasulaitoksen perustamisvaiheen maatyökustannuksen (45 €/m<sup>2</sup>) arvioimiseksi laskettiin laitosten rakennelmien pinta-alat. Pinta-alalaskelmissa oletettiin reaktoreiden korkeudeksi 6,9 m, lietesyötteiden ja lietemäisten/nestemäisten mädätteiden varastosäiliöiden korkeudeksi 4 m sekä kiinteiden syötteiden ja mädätteiden/lannoitevalmistusten varastojen korkeudeksi 2,5 m. Teknisten konttien alaksi oletettiin 200 m<sup>2</sup> (Saalasti 2022). Kaasunjalostinkontin pinta-alaksi oletettiin 60 m<sup>2</sup> (Lehtonen & Luostarinen 2022). Tankkausasemien pinta-aloiksi oletettiin 50 m<sup>2</sup>/kpl. Kulkureittien pinta-alaksi oletettiin 10 % rakennelmien pinta-alasta (Saalasti 2022).

## Nestesaesäiliön telttamaisen katteen hinnan laskenta

Mädätteen separoinnin nestejakeen varastosäiliön telttamaisen membraanikatteen hinta laskettiin seuraavalla tavalla (edistyneet käytännöt tilakohtainen ja keskitetty laitos). Ensin laskettiin säiliön katettavan yläpinnan pinta-ala ( $A_{säiliö}$ , m<sup>2</sup>) kaavalla 1:

$$A_{säiliö} = \frac{V_{säiliö}}{h_{säiliö}} \quad (1)$$

jossa  $V_{säiliö}$  on säiliön tilavuus (m<sup>3</sup>) ja  $h_{säiliö}$  on säiliön korkeus (oletus nestesaesäiliöille 4 m). Sitten laskettiin säiliön säde ( $r_{säiliö}$ , m) kaavalla 2:

$$r_{säiliö} = \sqrt{\frac{A_{säiliö}}{\pi}} \quad (2)$$

Sitten laskettiin suoraan säiliön päällä olevan membraanikartion vaipan korkeus ( $h_{vaippa}$ , m) kaavalla 3:

$$h_{vaippa} = \tan 30^\circ \times r_{säiliö} \quad (3)$$

Sen jälkeen laskettiin pelkästään säiliön pinnan peittävän, kartion muotoisen, 30 asteen kulmalla varustetun membraanikatteen ( $A_{vaippa}$ , m<sup>2</sup>), kartion pohja ei ole mukana laskelmassa) pinta-ala kaavalla 4:

$$A_{vaippa} = \pi \times r_{säiliö} \times \sqrt{(h_{vaippa}^2 + r_{säiliö}^2)} \quad (4)$$

Membraanikatteen pystyssä pitävän keskitolpan ( $h_{tolppa}$ , m) korkeus laskettiin kaavalla 5:

$$h_{tolppa} = h_{säiliö} + h_{vaippa} \quad (5)$$

Membraanikate tarvitsee kiinnitystä varten 0,3 m korkean liepeen. Liepeen sisältävän membraanikartion korkeus ( $h_{vaippa \text{ sis. lieve}}$ , m) laskettiin kaavalla 6:

$$h_{vaippa \text{ sis. lieve}} = h_{vaippa} + 0,3 \quad (6)$$

Liepeen sisältävän membraanin pohjan säde ( $r_{vaippa \text{ sis. lieve}}$ , m) laskettiin kaavalla 7:

$$r_{vaippa \text{ sis. lieve}} = h_{vaippa \text{ sis. lieve}} / \tan 30^\circ \quad (7)$$

Lopuksi laskettiin koko membraanin pinta-ala ( $A_{vaippa \text{ sis. lieve}}$ , m<sup>2</sup>) kaavalla 8:

$$A_{vaippa \text{ sis. lieve}} = \pi \times r_{vaippa \text{ sis. lieve}} \times \sqrt{(h_{vaippa \text{ sis. lieve}}^2 + r_{vaippa \text{ sis. lieve}}^2)} \quad (8)$$

Pelkän membraanin hinta on 39 €/m<sup>2</sup>. Telttamaisen katteen pystyssä pitävän keskitolpan hinta on 580 €/m. Lisäksi asennuskustannus on membraanin koosta riippuen 10 000–15 000 € (Saalasti 2023). Edistyneen käytännön maatilalaitoksen mädätteen nestejakeen varastosäiliön (n. 8610 m<sup>3</sup>, 12 kk varasto) asennuksen hinnaksi oletettiin 15 000 €. Edistyneen käytännön keskitetyn laitoksen ammoniumsulfaattisäiliön (n. 185 m<sup>3</sup>, 7 vrk puskurivarasto) ja konsentraattisäiliön (n. 990 m<sup>3</sup>, 7 vrk puskurivarasto) katteiden asennuksien hinnaksi oletettiin 10 000 €/kpl.



## Kuivämädätyslaitosten investointihinnat, käyttöiät ja ylläpitokustannukset

Kuivämädätyslaitosten eri osien ja laitteiden investointihintojen laskentakaavat sekä käyttöiät ja ylläpitokustannusten laskentaperusteet on esitetty Taulukossa 6.2. Reaktoritilavuuden laskennassa syötteiden tiheydeksi reaktorissa oletettiin 400 kg/m<sup>3</sup>.

**Taulukko 6.2.** Kuivämädätyslaitosten investointihintojen laskentakaavat ja kaavojen muodostuksessa käytettyjen datojen lähteet sekä arvioidut käyttöiät (k.ikä) ja vuotuisien ylläpitokustannusten laskentaperusteet. V = kokonaisreaktoritilavuus (m<sup>3</sup>).

Laitoksen osa	Hinnan laskentakaava (€)	Lähde	K.ikä (v)	Ylläpidon laskenta
Reaktorit (2 kpl), suotonesäiliö, kaasuväkä ja maatyöt	$=0,65*(167,03*V+487327)$	1	20	1 % inv./v
Prosessitekniikka (sis. putkistot, sähkö ja automaatio)	$=0,15*(167,03*V+487327)$	1	10	5 % inv./v
Yllä mainitun tekniikan asennukset	$=0,1*(167,03*V+487327)$	1	20	ei
Suunnittelu ja luvat (sis. bio-kaasulaitos ja kaasun hyödyntäminen)	$=0,1*(167,03*V+487327)$	1	20	ei
CHP-yksikkö + kaasun puhallus, aktiivihili & kondenssiveden poisto	$=2388,225*e^{(-0,003*P)*P}+45950$ , jossa P on sähköteho (kW <sub>el</sub> )	2	10	1,8 snt/kWh <sub>el</sub>
Lämpökattila	=20 000 (varalla)	2	20	2 % inv./v
Soihku	=10 000	Arvio	20	ei
Sähköliityntä verkkoon	=10 000	Arvio	20	ei
Mädätevarasto (betonilaatta)	=40 €/m <sup>2</sup>	Arvio	20	1 % inv./v

## Kannattavuuslaskelmat

Investoinnin annuiteetti (A) laskettiin kaavalla 9:

$$A = I \times \frac{p(1+p)^n}{(1+p)^n - 1} \quad (9)$$

jossa A on annuiteetti, I on investointikustannus, p on laskentakorko (käytettiin arvoa 0,05 eli 5 % laskentakorko) ja n on käyttöikä (vuotta). Laitosten eri osien käyttöiät on ilmoitettu taulukoissa 6.1 ja 6.2. Takaisinmaksuaika (vuotta) laskettiin jakamalla tuettu investointikustannus vuotuisella nettotuotolla. Investointitukitasoksi oletettiin keskitetyille laitoksille 30 % ja muille laitoksille 50 %.

### Lähteet:

- Ervasti, S., Tampio, E. & Pyykkönen, V. 2021. Maatilojen biokaasuntuotannon mahdollisuudet Lapissa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 34/2021. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 53 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-209-4>
- Hahn, H. 2011. Guideline for Financing Agricultural Biogas Projects-Training Material for Biogas Investors, IEE Project 'BiogasIN' D.3.7, WP 3; Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES): Bremerhaven, Germany. <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-413182.html>
- KTBL 2013. Faustzahlen biogas. 3. Ausgabe. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Silber Druck oHG, Niestetal. 360 s.
- Lehtonen, J. 2023. Metener Oy. Keskitetyn laitoksen liikennebiokaasun tankkausasemien hinnat. Henkilökohtainen tiedonanto 20.1.2023.
- Lehtonen, J. & Luostarinen, J. 2022. Metener Oy. Metener Oy:n vesiabsorptiotekniikkaan perustuvan biokaasun jalostuslaitteiston investointikustannus- ja sähkönkulutustiedot. Henkilökohtaiset tiedonannot 16.-25.3.2022.
- Luostarinen, J. 2022. Metener Oy. Metener Oy:n kuivamädätyslaitosten investointihinnat. Henkilökohtainen tiedonanto 28.10.2022.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Niskanen, O., Koikkalainen, K., Kauppila, J., Valve, H., Salo, T. & Ylivainio, K. 2019. Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 75 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-777-0>
- MMM 2021. Maa- ja metsätalousministeriön asetus maatalouden investointien hyväksyttävistä yksikkökustannuksista annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen liitteen muuttamisesta 1124/2021. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2021/20211124>
- Mustankorkea 2023. Mustankorkea Oy. Biokaasun hinta. <https://www.mustankorkea.fi/hinnastot/biokaasun-hinta/> Haettu 23.3.2023
- Rasi, S., Markkanen, J., Pyykkönen, V., Aro, K., Seppänen, A-M., Niskanen, O., Mönkkönen, S., Kahelin, M. & Luostarinen, S. 2021. Kohti biokaasun liikennekäyttöä Pohjois-Savossa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 51/2022. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 44 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-454-8>
- Saalasti, M. 2022. Doranova Oy. Doranova Oy:n biokaasulaitosten investointikustannus- ja sähkönkulutuserviöt. Henkilökohtainen tiedonanto 21.2.2022.
- Saalasti, M. 2023. Doranova Oy. Lietesäiliön telttamaisen katteen investointihinta. Henkilökohtainen tiedonanto 2.3.2023.

tietokayttoon.fi

---

ISBN PDF 978-952-383-479-8

ISSN PDF 2342-6799