



CIRCWASTE

# Sian lietelannan laskeutus ja biokaasuprosessointi

Circwaste-hankkeen raportti

Ville Pyykkönen, Johanna Laakso, Eeva Lehtonen ja Lucia Blasco

CIRCWASTE

# **Sian lietelannan laskeutus ja biokaasuprosessointi**

Circwaste-hankkeen raportti

Ville Pyykkönen, Johanna Laakso,  
Eeva Lehtonen ja Lucia Blasco

**Viittausohje:**

Pyykkönen, V., Laakso, J., Lehtonen, E. & Blasco, L. 2023. Sian liotelannan laskeutus ja biokaasuprosessointi. Circwaste-hankkeen raportti. Luonnonvarakeskus. 36 s.

## Tiivistelmä

Ville Pyykkönen, Johanna Laakso, Eeva Lehtonen ja Lucia Blasco, Luonnonvarakeskus

Circwaste-hankkeessa demonstroitiin sian lietelannan partikkeleiden painovoimaisen laskeutuksen vaikutusta ravinnekiertoon ja biokaasutuotantoon, sian lietelannan ja naudan kuivikelannan yhteiskäsittelyä biokaasureaktorissa sekä kuivikelannan murskauksen vaikutusta metaanintuottopotentiaaliin.

Demonstraatioissa osoitettiin, että lietelannan kuiva-ainepitoisuuden (ka) ollessa alhainen (1-2 %) voidaan kuiva-ainetta ja fosforia saada laskeutettua lietesäiliön pohjalle tehokkaasti hyvin lyhyessäkin ajassa (0,3-1 vrk/m lietekorkeutta). Paksulla lietelannalla (ka 5-9 %) tarvittava laskeutus aika on pitkä, esimerkiksi 56-65 vrk/m.

Laskeutuksen pohjafraktiolla eli pohjasakalla on suurempi tuoretonnikohtainen metaanintuottopotentiaali kuin lietelannalla, joten sen kuljettaminen on kannattavampaa ja se lisää biokaasulaitoksen nettoenergiantuottoa. Pohjasakkaa (ka 9,3 %) käytettiin onnistuneesti laboratoriomittakaavan jatkuvatoimisen biokaasureaktorin syötteenä. Lyhyempi viipymä on taloudellisesti kannattavampi (parempi energiatase), mutta mädätteen metaanipäästöjen kannalta huonompi kuin pidempi viipymä. Kokeiden ja kirjallisuuden perusteella korkean ka-pitoisuuden pohjasakka (ka-pitoisuus noin >10 %) ei todennäköisesti sovellu yksinään jatkuvatoimisen biokaasureaktorin syötteenä (väkevyytensä vuoksi). Korkean ka-pitoisuuden pohjasakka voisi toimia kuitenkin laimeampia perussyötteitä käsittelevän biokaasulaitoksen lisäsyötteenä.

Demonstraatiotulosten perusteella muodostettiin yksinkertainen sian lietelannan laskeutusmalli, jonka avulla voidaan laskea ravinteiden ja metaanintuottopotentiaalierottuminen neljään vertikaaliseen fraktioon.

Biomassa-atlaksella etsittiin sopivimmat sijainnit laskeutettua sian lietelantaa syötteenään käyttäville biokaasulaitoksille Varsinais-Suomessa. Suurimmat lietelantakeskittymät ovat Loimaan ja Vehmaan seuduilla. Loimaan alueella toimiva laitos voisi ainakin teoriassa hankkia käsiteltäväkseen jopa 94 000 tonnia laskeutettua sian lietelantaa lähialueiltaan ja Vehmaan laitos 57 000 tonnia.

Lisäksi demonstroitiin sian lietelannan ja naudan kuivikelannan yhteiskäsittelyä jatkuvatoimisessa biokaasureaktorissa. Märkämädätysreaktori toimi kohtalaisen hyvin, kun kokonaissyötteen kuiva-ainepitoisuus oli korkea, yli 12 %. Kuivikelanta kasvattaa biokaasulaitoksen nettoenergiantuottoa.

**Asiasanat:** Sika, lietelanta, separointi, laskeutus, biokaasu, Varsinais-Suomi

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Materiaalit ja menetelmät .....</b>	<b>7</b>
2.1. Laskeutusputket ja -fraktiot.....	7
2.2. Laskeutus maatilalla merikontissa .....	7
2.3. Analyysit .....	8
2.4. Biokaasulaitteistot.....	9
2.5. Laskelmat .....	10
<b>3. Demonstraatioiden tulokset.....</b>	<b>13</b>
3.1. Ravinteiden erotustehokkuudet laskeutuksessa.....	13
3.2. Metaanintuottopotentialin erotustehokkuudet laskeutuksessa.....	15
3.3. Laskeutuksen pohjasakka biokaasureaktorin syötteenä.....	16
3.4. Sian lietelannan ja naudan kuivikelanta biokaasureaktorin syötteenä .....	19
3.4.1. Laboratoriomittakaavan tulokset .....	19
3.4.2. Kuivikelannan vaikutus maatilamittakaavan biokaasulaitoksen energiataseeseen...	20
3.5. Naudan kuivikelannan murskauksen vaikutus metaanintuottopotentialiin.....	22
<b>4. Laskeutusmalli: ohjeet sian lietelannan laskeutukseen .....</b>	<b>24</b>
4.1. Erotustehokkuuksien ja fraktioiden pitoisuuksien laskenta.....	24
4.2. Pohjafraktio maatilamittakaavan mittakaavan biokaasulaitoksen syötteenä .....	26
4.3. Lietelanta ja pohjafraktiot keskitetyn biokaasulaitoksen syötteenä (konsepti) .....	28
<b>5. Sian lietelannan ravinnemäärät Varsinais-Suomessa .....</b>	<b>30</b>
<b>6. Pohjasakkaa hyödyntävien biokaasulaitosten sijoittelu Varsinais-Suomessa</b>	<b>35</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>36</b>



# 1. Johdanto

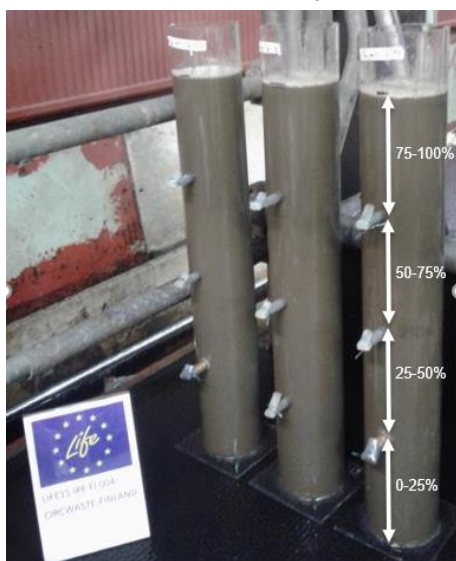
Circwaste-hankkeen action C.8:n tavoitteena oli edistää biokaasutuotantoa ja ravinteiden kiertoa Suomessa ja etenkin Varsinais-Suomessa, joka on kotieläintaloudeltaan sikavaltaista aluetta ja jonka pellot ovat Manner-Suomen fosforirikkaimpia (Lemola ym. 2018). Fosforiongelman vuoksi haluttiin keskittyä etenkin halvan ja yksinkertaisen sian lietelannan separointimenetelmän, painovoimaisen laskeutuksen, demonstroimiseen. Sian lietelannan partikkeleiden laskeutuminen varastosäiliössä on ollut pitkään viljelijöiden tiedossa, mutta yksityiskohtaisia tietoa esimerkiksi tarvittavasta laskeutusajasta ja eri fraktioiden ravinnepitoisuuksista (pohjasakka versus pintaneste) ei ole ollut tarjolla. Myöskään tietoa laskeutuksen pohjafraction metaanintuottopotentialista ja prosessoinnista jatkuvatoimisessa reaktorissa ei ole aiempaa kokemusta.

Varsinais-Suomessa muodostuu noin 550 000 tonnia sian lietelantaa, jossa on 547 000 kg fosforia. Yli puolet muodostuvasta lannasta syntyy kuudessa kunnassa: Loimaalla, Vehmaalla, Somerolla, Salossa, Pöytyällä ja Koski Tl:ssä. Kun sian lietelantaa tarkastellaan suhteessa kasvinviljelyyn, Vehmaan, Taivassalon, Ruskon ja Uudenkaupungin sikojen lietelannan fosfori yksinään riittäisi kattamaan saman kunnan alueella viljeltyjen kasvien tarpeen. Kun kaikki fosforipitoiset biomassat huomioidaan, useimmat Varsinais-Suomen kunnat ovat fosforiomavaraisia tai ylijäämäisiä.

## 2. Materiaalit ja menetelmät

### 2.1. Laskeutusputket ja -fraktiot

Laskeutusdemonstraatioita tehtiin yhden metrin pituisissa laskeutusputkissa, joissa lietepatsaan korkeus oli 90 cm sekä 200 litran tynnyreissä. Akryylimuovista valmistetut laskeutusputket olivat 100 cm korkeat ja sisähalkaisijaltaan 14 cm. Lietekorkeus putkissa oli 90 cm. Putkien lietetilavuus oli jaettu neljään samankokoiseen fraktioon. Näytteet kolmesta ylimmästä fraktiosta (75-100 %, 50-75 % ja 25-50 %) otettiin putkien kylkiin asenetuista yhteistä. Alimman fraktion (0-25 %) näyte kaadettiin putkesta ulos viimeisenä, muiden fraktioiden poistamisen jälkeen (kuva 1). Laskeutus tapahtui sisätiloissa, 15-18 °C lämpötilassa.



**Kuva 1.** Laskeutusputket ja fraktiot (Lucia Blasco/Luke).

### 2.2. Laskeutus maatilalla merikontissa

Laskeutuksen maatilademonstraatiot tehtiin merikontissa. Ennen merikonttilaskeutusta lietelanta sekoitettiin varastosäiliössä, jotta saatiin koko lietesyvyyttä edustava (kuva 2).



**Kuva 2.** Lietelannan sekoitus varastosäiliössä ennen pumppausta merikonttiin (Johanna Laakso/Luke).



Pumppauskokeessa testattiin tehokkaan pumpun toimivuutta paksun pohjasakan ja sitä ylempien jakeiden pumppauksessa. Pumppu oli Xylem rentin Flygt-keskipakoislietepumppu, varustettuna neljän tai viiden tuuman ”tekstiililetkulla”. Letku olisi voinut olla tuettu tai ”kova”, jotta taitokset esimerkiksi kontin reunan yli eivät olisi aiheuttaneet turhaa kitkaa pumppauksessa.

Lietepinta oli kokeen alussa 210 cm ja se laski kokeen aikana 10 cm haihtumisen seurauksena. Ennen pumppausta otettiin näyte ämpärillä pinnan tuntumasta (190 cm, edusti fraktiota 75-100 %). Pinnalla oli muutaman millin kuorettuma, sitä ei otettu näytteeseen. Pumppaus aloitettiin pinnasta ja jatkettiin pohjasta mitattuna 150 cm:iin asti. Näyte ämpärillä tästä kohtaa (50-75 % fraktio). Pumppaus 100 cm:iin asti, josta näyte ämpärillä (25-50 % fraktio). Tämän jälkeen liete näytti huomattavasti paksummalta. Pumppausta jatkettiin pohjasta mitattuna 80 cm:iin saakka, jonka jälkeen koe lopetettiin. Tällöin pohjasakka oli hyvin paksua ja pumppu imi enää kuiva-aineesta erottuvaa nestettä. Näyte pohjasakasta (0-25 %) otettiin ämpärillä painamalla kepillä ämpäriä pohjaan päin.



Viljelijä teki havainnon, että pumppaus vaikuttaa lietteen partikkelikokoon. Kun lietettä pumpataan, kuorettuman määrä vähenee olemattomiin. Eli lietteen sekoitus ennen kontin täyttöä ja konttiin pumppaus ja sieltä poispumppaus hienontavat lietteessä olevia partikkeleita huomattavasti.

Maatilalasketuksen lämpötilaolosuhteiden selvittämiseksi haettiin säätilastot Ilmatieteen laitoksen (2021) palvelusta osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>. Säähavaintopaikka (Turku lentoasema) sijaitti noin 35 km päässä maatilademonstraation toteutuspaikasta.

## 2.3. Analyysit

## 2.4. Biokaasulaitteistot

Metaanintuottopotentiaalin määrittäminen toteutettiin kolmena rinnakkaisena käsittelemällä automaattisen laitteiston avulla (Bioprocess Control Ab, Ruotsi, kuva 3). Mittaus toteutettiin puolen litran lasipulloissa, joihin kaikkiin lisättiin mikrobiymppeä. Näytteen ja ympin orgaanisen aineen suhde (VS/VS-suhde) oli kullakin näytteellä 0,75. Näytemäärä mitoitettiin siten, että lisätyssä näytemäärässä oli kaikilla koejäsenillä sama määrä orgaanista ainetta (VS). Pullot täytettiin ionivaihdetulla vedellä 400 g kokonaisuudessaan. Lämpötila kokeessa oli  $37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Näyteseosten pH mitattiin ennen ja jälkeen koetta. Ennen kokeen alkua todettiin, että pH:t olivat lähelle optimaalista (7,6-7,7), joten pH-muutosta ei koepulloille tehty. Pulloihin lisättiin pH-muutosten puskuroimiseksi natriumbikarbonaattia ( $\text{NaHCO}_3$ ) annostuksella 3 g/l.

Pullot suljettiin kaasutiiviisti ja kiinnitettiin korkeista lähtevät kaasuletkut. Pulloissa muodostuva biokaasu johdettiin hiilidioksidin sitoutusyksikköön, jossa biokaasun sisältämä hiilidioksidi reagoi natriumhydroksidin kanssa. Metaani johdettiin edelleen kaasun tilavuusmittaukseen, joka perustuu nesteensyrjäytykseen. Ennen kokeen alkua pullojen kaasutila ja letkulinjat huuhdeltiin typpikaasulla, jotta olosuhteet saatiin hapettomiksi.

Ymppeinä käytettiin Luke Maaningan biokaasureaktorin reaktorilietettä (mädätettä), josta poistettiin karkea materiaali 1\*1 mm siivilällä ennen käyttöä.

Kaasuntuottotulokset laskettiin normaalikuutioina ( $\text{Nm}^3$ , eli kaasun lämpötila  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , paine 1 atm) sekä tuorepainoa että kuiva-ainepitoisuutta ja orgaanisen aineen pitoisuutta kohti. Näytteiden kaasuntuotto laskettiin vähentämällä ympin tulos näytettä ja ymppeä sisältävän pullon kaasuntuotosta.



**Kuva 3.** Kokeessa käytetty metaanipotentiaalin mittauslaitteisto (Elina Tampio/Luke).

Jatkuvatoimisissa biokaasukokeissa käytettiin Luken Jokioisten Biopajan ankkurisekoittimella varustettuja laboriomittakaavan CSTR-reaktoreita (continuous stirred-tank reactor) eli sekoitussäilöreaktoreita (Metener Oy, Suomi, kuva 4). Sekoitusta tauotettiin, sekoitusaika oli  $x$  ja tauon pituus  $x$  sekuntia. Prosessilämpötila oli  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ja aktiivinen nestetilavuus 10 litraa. Mikrobiymppeä hankittiin Envor Group Oy:n biokaasulaitokselta Forssasta.



**Kuva 4.** Laboratoriomittakaavan jatkuvatoimiset reaktorit (CSTR-reaktorit) (Lucia Blasco/Luke).

## 2.5. Laskelmat

### Laskeutuksen massatase ja massakomponenttien erottuminen fraktioihin

Ravinteiden, kuiva-aineen, orgaanisen aineen ja metaanintuottopotentialin prosentuaalinen erottuminen neljään eri fraktioon laskettiin fraktioiden summasta. Laskelmissa ei verrattu fraktioita raakalietelantaan ennen laskeutusta, koska eri komponenttien massatase (fraktioiden summa tai painotettu keskiarvo versus lietelanta) ei täsmännyt ja toisaalta varsinkin pitkällä laskeutusajalla lietelannan ominaisuudet saattoivat muuttua: esim. vettä, ja etenkin orgaanista ainetta ja tyypeä voi karata lietteestä kaasumaisessa muodossa). Laskelmissa oletettiin, että lietemäisten ja nestemäisten näytteiden tiheys on  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

### Biokaasulaskelmat

Kaikki kaasuntuottolukemat (BMP ja jatkuvatoimiset CSTR-reaktorit) muutettiin normaalikuutioiksi ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $1 \text{ atm}$ ). Laskettaessa CSTR-kokeiden kaasuntuottoja kaasunvirtaamamittarin lämpötilana käytettiin huoneilman lämpötilaa (keskimäärin  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ja kaasun paineeksi oletettiin ilmakehän paine.

CSTR-reaktoreiden hydraulinen viipymä (HRT) laskettiin kaavalla 1:

$$\text{HRT (vrk)} = \text{Reaktorin nestetilavuus (m}^3\text{)} / \text{syötemäärä (t/vrk)} \quad (1)$$

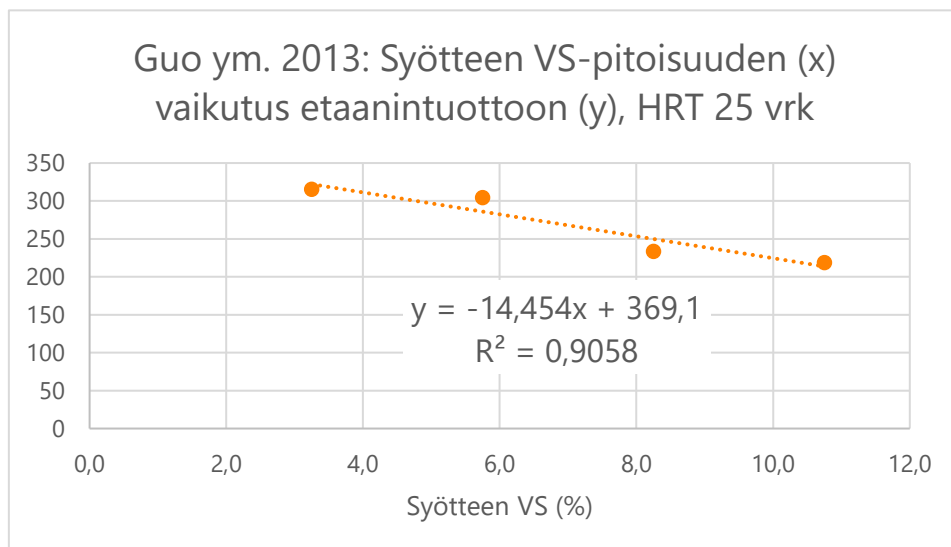
Laskelmassa oletettiin, että syötteen tiheys reaktorissa on  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

CSTR-reaktoreiden orgaaninen kuormitus (OLR, Organic Loading Rate) laskettiin kaavalla 2:

$$\text{OLR (kg VS/(m}^3\text{*vrk)} = \text{F*C/V} \quad (2)$$

jossa F on syötteen määrä vuorokaudessa ( $\text{kg/vrk}$ ), C on syötteen orgaanisen aineen pitoisuus ( $\text{VS \%}/100$ ) ja V on reaktorin nestetilavuus ( $\text{m}^3$ ).

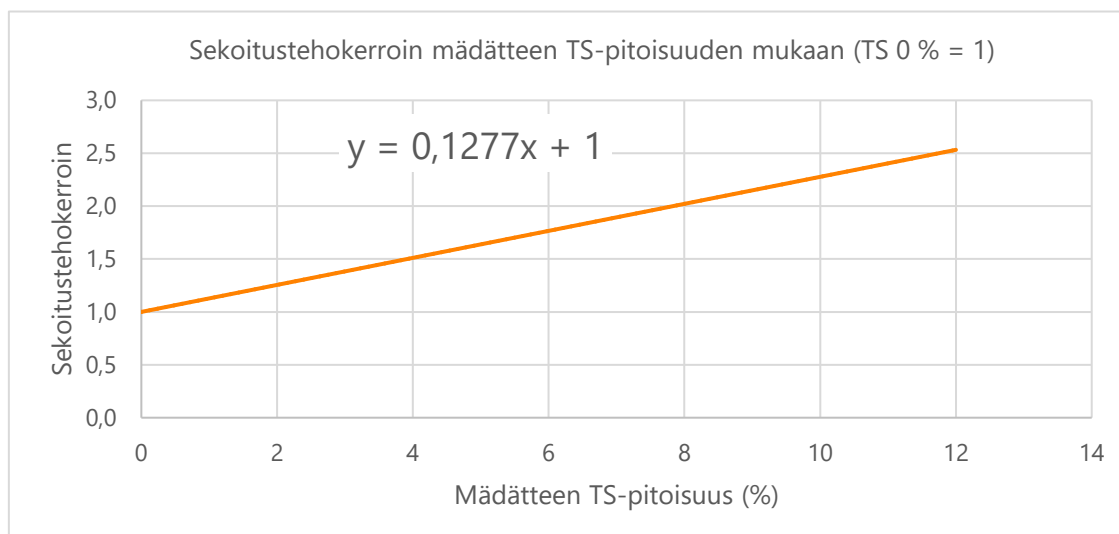
Sian lannan metaanintuottopotentialin toteuman laskennassa käytettiin Guon ym. (2013) datasta muodostettua lineaarista regressiota (kuva 5). Tuloksia verrattiin myös Chenin (1983) malliin. Mallien mukaan hydraulisen viipymän ollessa vakio, syötteen VS-pitoisuuden kasvu vähentää metaanintuottopotentialin toteumaa (reaktorin tuotto/BMP).



**Kuva 5.** Guon ym. (2013) datan perusteella tehty regressiosuora.

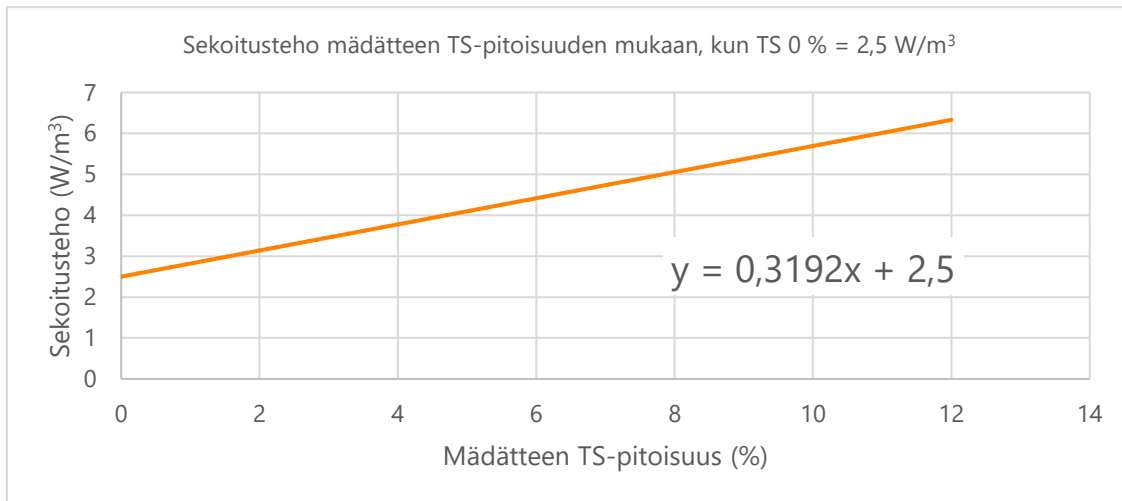
### Biokaasulaitoksen energiankulutuksen mallintaminen

Maatilamittakaavan biokaasureaktorin sekoitusteho mallinnettiin Rivardin ym. (1995) esittämän datan mukaan (kuva 2, RefCoM, juoksupyöräsekoitin). Julkaisussa esitetystä kuvaajasta otettiin kulmakerroin, joka kertoo biokaasureaktorin sekoituksen tehontarpeen suhteellisen kasvun (sekoitustehokerroimen) reaktorilietteen eli mädätteen kuiva-ainepitoisuuden (TS) mukaan (kuva 6).



**Kuva 6.** Mallinnuksessa käytetty sekoitustehokerroin.

Sekoitustehokertoimen avulla muodostettiin regressioyhtälö lantaa käsittelevän maatilamittakaavan reaktorin sekoituksen tehonkulutukselle. Oletuksena oli, että mädätteen TS-pitoisuuden ollessa 0, tarvittava teho on  $2,5 \text{ W/m}^3$  (kuva 7). Arvo perustuu Luken Maaningan maatilamittakaavan laitoksen tuloksiin, jossa jälkikaasualtaan sekoitusteho yhdellä upposekoittimella oli naudan lietelannan ja apila-heinäseoksen yhteiskäsittelyssä (Virkajärvi ym. 2021) noin  $4,5 \text{ W/m}^3$ , kun mädätteen TS-pitoisuus oli 6-7 % (samaa aikaan ensimmäisen reaktorin sekoitusteho oli noin  $6,3 \text{ W/m}^3$  nurmimassan kellumisen estämiseksi, mutta pelkkien lantojen käsittelyssä kellumisongelmaa ei todennäköisesti ole).



**Kuva 7.** Mallinnuksessa käytetty sekoitustehon regressiokaava ja kuvaaja.

Biokaasulaitoksen sähkönkulutuksen laskennassa käytettiin taulukossa 1 lueteltuja arvoja. Arvot perustuvat Luonnonvarakeskuksen Maaningan biokaasulaitoksen mittausdataan. Laskennassa ei ole mukana jälkikaasualtaan sähkönkulutusta (sekoitin ja kaasuväestön sääsuojakuvun paineilmapuhallin).

**Taulukko 1.** Maatilamittakaavan biokaasulaitoksen sähköenergian kulutuksen laskenta-arvot.

Sähkönkuluttaja	Arvo	Yksikkö
Reaktorin sekoitus	$2,5+0,3193 \cdot [\text{TS \%}]$	$\text{W/m}^3_{\text{reaktorineste}}$
Lietelannan syöttöpumppu	0,09	kWh/t
Kuivikelannan syöttöruuvi	0,54	kWh/t
Muut sähkölaitteet	76	kWh/vrk

### 3. Demonstraatioiden tulokset

#### 3.1. Ravinteiden erotustehokkuudet laskeutuksessa

Välikasvattamon ja lihasikalan lietalantaa laskeutettiin laboratoriomittakaavan akryyliputkissa sekä maatilalla merikontissa. Lietalannasta ennen laskeutuksen aloitusta sekä laskeutuksen jälkeen neljästä vertikaalisesta fraktiosta määritettiin kuiva-aine- (TS), orgaanisen aineen (VS) ja ravinteiden pitoisuudet, jotta näiden massakomponenttien erotustehokkuudet eri fraktioihin voitiin laskea. Välikasvattamon lietalannan TS-pitoisuus oli alhainen, 2 % ja sille valittiin kirjallisuuden perusteella lyhyt laskeutusaika, 6 tuntia (0,3 vrk/m lietesvyvyyttä). Lyhyessä ajassa ei ehdi tapahtua juuri muutosta lietalannan ominaisuuksissa, mutta alkuperäisen lietalannan ja "loppulietteen" eli fraktioiden keskiarvon ravinnepitoisuudet eivät täsmänneet yhtä (taulukko 2). Ero saattoi johtua näytteenoton ja/tai analyysien epätarkkuuksista.

**Taulukko 2.** Välikasvattamon lietalannan putkilaskeutuksen ravinnepitoisuudet.

	Aika (vrk/m)	TS (%)	VS (%)	N (kg/t)	Liuk. N (kg/t)	P (kg/t)	K (kg/t)	Liuk.N/ P-suhde
Välikasv. lietalanta	-	2,03	1,47	1,90	1,30	0,19	0,76	6,8
Fraktio 75-100 %	0,3	0,85	0,45	1,80	1,20	0,08	1,10	15,0
Fraktio 50-75 %	0,3	0,79	0,44	1,70	1,20	0,08	1,10	15,0
Fraktio 25-50 %	0,3	1,74	1,06	1,90	1,10	0,33	0,89	3,3
Fraktio 0-25 %	0,3	6,99	5,64	3,40	1,40	1,50	1,20	0,9
Pintafrak. 50-100 %	0,3	0,82	0,44	1,75	1,20	0,08	1,10	15,0
Pohjafrak. 0-50 %	0,3	4,37	3,35	2,65	1,25	0,92	1,05	1,4
<b>Frak. keskiarvo</b>	0,3	2,60	1,89	2,20	1,23	0,50	1,07	2,5

Lihasicalan lietalannan putkilaskeutus kesti 50 vrk eli laskeutusaika oli 56 vrk/m. TS- ja VS-pitoisuudet alenivat hiukan, todennäköisesti biokaasun muodostuksen takia. Lietalannan ja fraktioiden keskiarvon ravinnepitoisuudet täsmäsivät suhteellisen hyvin (taulukko 3).

**Taulukko 3.** Lihaskalan lietelannan putkilaskeutuksen ravinnepitoisuudet.

	Aika (vrk/m)	TS (%)	VS (%)	N (kg/t)	Liuk. N (kg/t)	P (kg/t)	K (kg/t)	Liuk.N/P- suhde
Lihaskalan lietelanta	-	6,82	5,21	5,60	3,50	1,30	2,2	2,7
Fraktio 75-100 %	56	2,47	1,40	4,60	3,70	0,27	2,50	13,7
Fraktio 50-75 %	56	3,09	2,08	5,10	3,70	0,66	2,20	5,6
Fraktio 25-50 %	56	6,00	4,46	5,90	3,80	1,37	2,40	2,8
Fraktio 0-25 %	56	14,93	12,32	6,67	3,80	2,53	2,13	1,5
Pintafrak. 50-100 %	56	2,78	1,74	4,85	3,70	0,47	2,35	8,0
Pohjafrak. 0-50 %	56	10,46	8,39	6,28	3,80	1,95	2,27	1,9
<b>Fraktioiden keskiarvo</b>	56	6,62	5,07	5,57	3,75	1,21	2,31	3,1

Kesällä 2019 tehdyssä Merikonttilaskeutuksessa käytettiin 52 vrk laskeutusaikaa, mutta lietsyvyys oli hieman yli 2 metriä ja metrikohtainen laskeutusaika oli lyhyempi, 25 vrk/m lietsyvyyttä. Tässäkin tapauksessa aloituslietteen ja fraktioiden keskiarvon ravinnepitoisuudet täsmäsivät kaliumia lukuun ottamatta suhteellisen hyvin. TS- ja VS-pitoisuudet laskivat lähes neljänneksen verran demonstraation aikana (taulukko 4), todennäköisesti kaasunmuodostuksen takia.

**Taulukko 4.** Lihaskalan lietelannan merikonttilaskeutuksen (14.6.-5.8.2019, 52 vrk eli 25 vrk/m) ravinnepitoisuudet.

	Aika (vrk/m)	TS (%)	VS (%)	N (kg/t)	Liuk. N (kg/t)	P (kg/t)	K (kg/t)	Liuk.N/P- suhde
Lihaskalan lietelanta 14.6.2019	-	9,15	7,23	6,30	3,70	1,20	2,00	3,1
Fraktio 75-100 %	25	2,54	1,52	5,80	4,30	0,20	2,80	21,5
Fraktio 50-75 %	25	2,94	1,89	5,90	2,50	0,43	2,60	5,8
Fraktio 25-50 %	25	8,02	6,35	7,30	4,10	2,00	2,40	2,1
Fraktio 0-25 %	25	14,73	12,28	7,40	3,20	2,50	2,20	1,3
Pintafrak. 50-100 %	25	2,74	1,71	5,85	3,40	0,32	2,70	10,8

Pohjafрак. 0-50 %	25	11,38	9,32	7,35	3,65	2,25	2,30	1,6
<b>Fraktioiden keskiarvo</b>	25	7,06	5,51	6,60	3,53	1,28	2,50	2,7

### 3.2. Metaanintuottopotentialin erotustehokkuudet laskeutuksessa

Metaanintuottopotentialit määritettiin fraktioittain vain merikonttilaskeutuksissa (taulukko 5).

**Taulukko 5.** Metaanintuottopotentialit merikonttilaskeutuksessa: liotelanta laskeutuksen alussa, fraktiot laskeutuksen lopussa sekä fraktioiden keskiarvot, jotka kuvaavat koko lietepatsasta laskeutuksen lopussa. TS = kuiva-aine, VS= orgaaninen aine, FM = tuoremassa.

Näyte	Aika (vrk/m)	TS (%)	VS (%)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t TS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t FM
Välikasv. liete 2.5.2018	-	2,9	2,2	94	125	2,7
Fraktio 50-100 % 3.5.2018	1,3	1,0	0,6	121	208	1,2
Fraktio 25-50 % 3.5.2018	1,3	1,5	1,0	94	140	1,4
Fraktio 0-25 % 3.5.2018	1,3	6,9	5,4	133	171	9,2
Laskenn. fraktio 0-50 %	1,3	4,2	3,2	113	156	5,3
<b>Frak. keskiarvo 3.5.2018</b>	<b>1,3</b>	2,6	1,88	117	182	3,2
Lihaskala liete 13.2.2018	-	7,3	5,8	263	331	19,3
Fraktio 50-100% 16.4.2018	65	1,4	0,8	419	718	5,7
Fraktio 25-50 % 16.4.2018	65	4,2	3,0	347	491	14,7
Fraktio 0-25 % 16.4.2018	65	12,7	10,7	188	225	24,0
Laskenn. fraktio 0-50 %	65	8,5	6,8	268	358	19,3
<b>Frak. keskiarvo 16.4.2018</b>	65	4,9	3,8	343	538	12,5
Lihaskalaliotelanta 14.6.2019	-	9,1	7,2	321	406	29,4
75-100 % fraktio 5.8.2019	25	2,5	1,5	525	878	13,3
50-75 % fraktio 5.8.2019	25	2,9	1,9	474	738	13,9
25-50 % fraktio 5.8.2019	25	8,0	6,4	270	341	21,7



CIRCWASTE

0-25 % fraktio 5.8.2019	25	14,7	12,3	248	297	36,5
Laskenn. fraktio 0-50 %	25	11,4	9,3	259	319	29,1
<b>Frak. keskiarvo 5.8.2019</b>	25	7,1	5,5	379	564	21,4

Metaanintuottopotentiaaleista laskettiin erotustehokkuudet ( $E$ , % fraktioiden summasta) eri korkuisiin pohjafraktioihin (taulukko 6).

**Taulukko 6.** Pitoisuuksien perusteella lasketut kuiva-aineen, orgaanisen aineen ja metaanintuottopotentiaalain erotustehokkuudet.

Fraktio	Aika (vrk/m)	$E_{TS}$ (%)	$E_{VS}$ (%)	$E_{BMP}$ (%)
Välikasv. 2018 / pohjafraktio 0-50 %	1,3	81	85	82
Välikasv. 2018 / pohjafraktio 0-25 %	1,3	67	72	71
Lihaskala 2018 / pohjafraktio 0-50 %	65	86	90	77
Lihaskala 2018 / pohjafraktio 0-25 %	65	65	70	48
Lihaskala 2019 / pohjafraktio 0-75 %	25	91	93	84
Lihaskala 2019 / pohjafraktio 0-50 %	25	81	85	68
Lihaskala 2019 / pohjafraktio 0-25 %	25	52	56	43

### 3.3. Laskeutuksen pohjasakka biokaasureaktorin syötteenä

Demonstraation tavoitteena oli osoittaa sian lietelannan laskeutuksen pohjasakan käyttökelpoisuus biokaasulaitoksen syötteenä. Lihaskalan lietelannan laskeutuksen "pohjasakkaa" eli alinta neljänestä (0-25 % fraktio) käytettiin kahden jatkuvatoimisen reaktorin syötteenä. Prosessilämpötila oli mesofiilinen 40 °C. Reaktorin syöttö tapahtui viitenä päivänä viikossa. Kuormitus, viipymä ja kaasuntuotto laskettiin kokonaista koeviikkoa kohti.

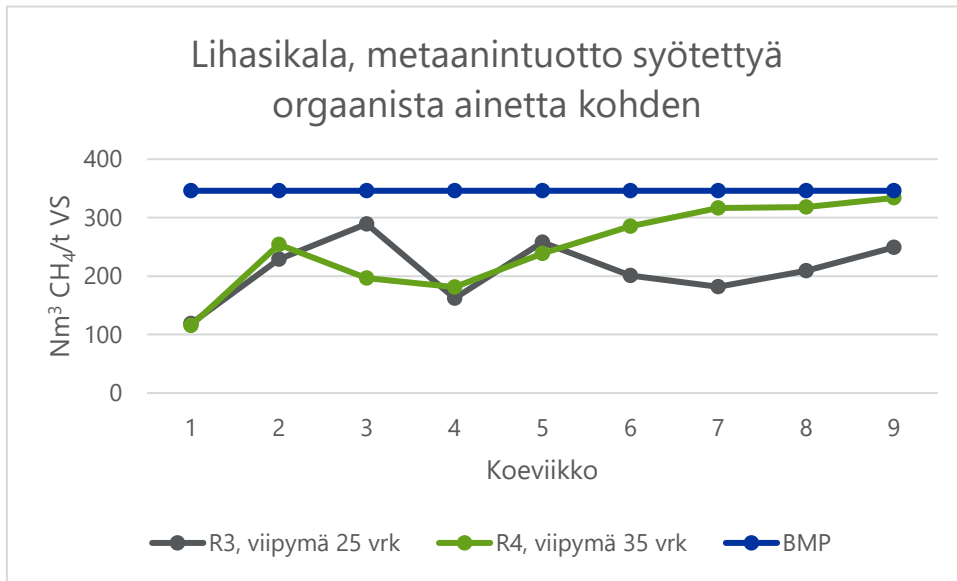
Syötteenä käytetyn pohjasakan kuiva-ainepitoisuus oli 9,28 %, orgaanisen aineen eli VS-pitoisuus 7,08 %. Metaanintuottopotentiaali 346 normaalikuutiota metaania orgaanisen aineen tonnia kohden ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t VS}$ ), eli 24,5 kuutiota metaania tuoretonnia kohti. Normaalikuutio metaania on alemmalta lämpöarvoltaan 10 kWh, joten pohjasakan energiasisältö oli noin 2450 kWh/tuoretonni. Korkean kuormituksen reaktorissa (R3) syötteen hydraulinen viipymä oli 25 vrk ja orgaaninen kuormitus 2,8 kg orgaanista ainetta reaktorilietekuutiota kohti vuorokaudessa ( $\text{kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ). Matalan kuormituksen reaktorissa (R4) viipymä oli 35 vrk ja kuormitus 2,0  $\text{kgVS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ .

**Taulukko 7.** Syötteen ja mädätteen ominaisuudet sekä kuormitus ja metaanintuotto (koejakson keskiarvo) pohjafraction kahdella eri viipymääjalla.

	HRT 25 vrk	HRT 35 vrk
Syöte (g/vrk)	400	286
Syöte TS (%)	9,28	9,28
Syöte VS (%)	7,08	7,08
OLR (kgVS/(m <sup>3</sup> *vrk))	2,8	2,0
Syöte BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS)	346	346
BMP-toteuma (%)	64	77
Tuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS)	222	265
Tuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> reaktori/vrk)	0,63	0,54
Mädäte TS (%)	8,05	7,59
Mädäte VS (%)	5,12	5,09
Mädäte BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS)	226	141
Mädäte BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t tuore)	11,6	7,2

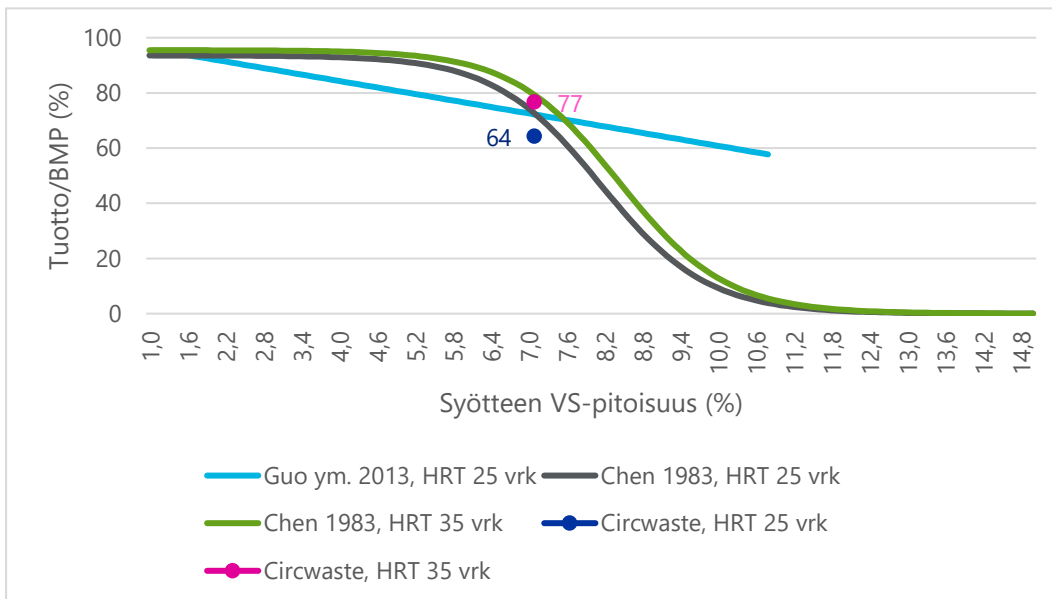
Pidemmällä 35 vrk viipymällä syötteen metaanintuottopotentialista toteutui suurempi osa, keskimäärin 77 % eli 265 m<sup>3</sup> metaania orgaanisen aineen tonnia kohti (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS) tai 0,54 m<sup>3</sup> reaktorilietekuutiota kohti vuorokaudessa (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> reaktori/vrk). Lyhemmällä 25 vrk viipymällä saavutettiin 64 % suurempi metaanintuotto reaktorilietekuutiota kohti vuorokaudessa (0,63 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> reaktori/vrk), mutta syötteen potentiaalinen toteuma oli huonompi, 64 % (222 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS). Lyhyemmällä viipymällä myös mädätteen metaanintuottopotentialiaali oli 60 % suurempi kuin pitkällä viipymällä (taulukko 7). Biokaasulaitoksen metaanintuottoa voidaan lisätä ja samalla vähentää mädätteen päästöjä käsittelemällä reaktorin mädäte jälkikaasualtaassa (tai toisessa reaktorissa).

Pohjasakkaa käytettiin onnistuneesti syötteenä molemmilla kuormituksilla, mutta tuotto vaihteli suhteellisen paljon viikosta toiseen, eikä ns. staattista tilaa ehditty suhteellisen lyhyellä demonstraatiojaksolla saavuttaa. Viimeisen kolmen viikon aikana tuotto oli pitkän viipymän reaktorissa suurta, potentialista toteutui pitkällä viipymällä 92-96 % (kuva 8).



**Kuva 8.** Syötettyä orgaanista ainetta (VS) kohden laskettu metaanintuotto korkeakuormitteisessa reaktorissa (R3) ja matalakuormitteisessa reaktorissa (R4) sekä syötteen orgaanisen aineen metaanintuottopotentiaali (BMP).

Pohjasakan demonstraatioissa mitattua tuottoa verrattiin kirjallisuuteen. 35 vrk viipymän reaktorin 8 viikon keskiarvo vastasi suunnilleen Chenin (1983) staattista (steady state) mallia sianlannan tuotosta. Chenin malli ennustaa kuitenkin, että tuotanto putoaa jyrkästi sianlantasyötteen VS-pitoisuuden kasvaessa yli 7 %:iin (kuva 9). Guon (2013) tutkimuksen ja heidän datastaan muodostetun regressiomallin (luku 2.5. ja kuva 9) mukaan metaanintuotto ei laske yhtä nopeasti syötteen VS-pitoisuuden kasvaessa (Guon tutkimuksessa HRT 25 vrk). Demonstraation ja kirjallisuusmallien perusteella ei voida suositella VS-pitoisuukseltaan erittäin korkean pohjasakan käsittelemistä sellaisenaan CSTR-reaktorissa.



**Kuva 9.** Sian lannan metaanintuottopotentiaalin toteuma syötteen VS-pitoisuuden ja viipymän mukaan Circwasten demonstraatioissa ja kirjallisuudessa.

### 3.4. Sian lietelannan ja naudan kuivikelanta biokaasureaktorin syötteenä

#### 3.4.1. Laboratoriomittakaavan tulokset

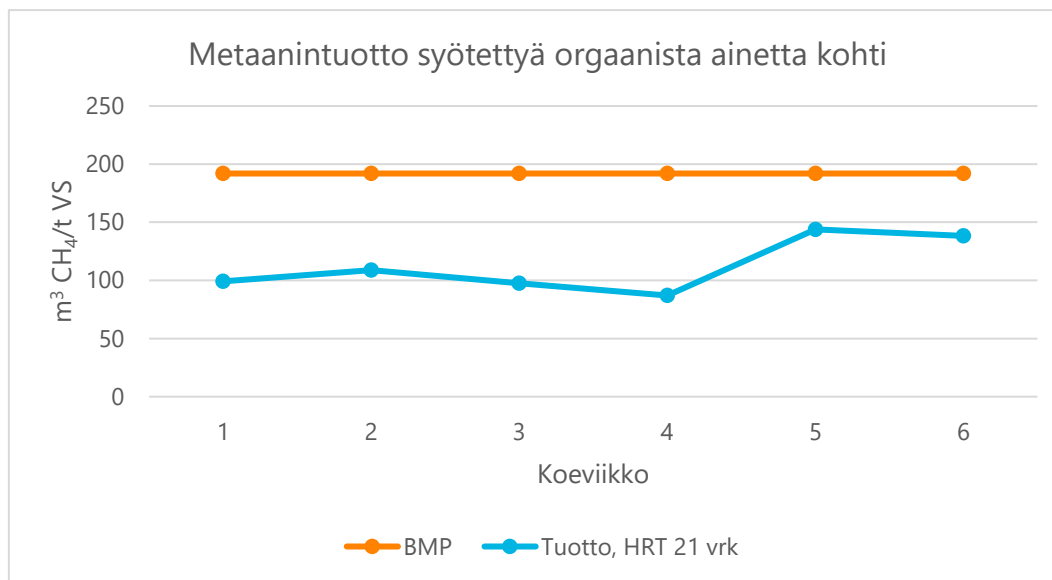
Sian lietelannan ja naudan kuivikelannan yhteiskäsittelyn tavoitteena oli optimoida syötesuhdetta ja havainnollistaa kuivikelannan lisähyötyä biokaasutuotannossa. Demonstraatioita tehtiin 23 viikon ajan erilaisilla lietelannan ja kuivikelannan syötesuhteilla ja kokonaiskuormituksilla, mutta kokeissa tapahtui syötteen korkean ka-pitoisuuden takia useita sekoittimen osien rikkoja sekä liete- ja kaasuputkitukoksia. Lopulta reaktori saatiin toimimaan suurella kuormituksella yhdeksän viikon ajan, joista kuuden viikon tuotto raportoidaan tässä (datasta poistettu viikkojen 5-7 data, jolloin oli lyhytaikainen sekoitushäiriö ja kaasunmittausongelmia).

Tarkastelujaksolla syötettiin sian lietelantaa (kuiva-aine eli TS 8,3 %) ja naudan kuivikelantaa (TS 32,5 %) Kokonaissyötteen ka-pitoisuus oli suhteellisen korkea, 12,3 %. Hydraulinen viipymä reaktorissa oli 21 vrk ja orgaaninen kuormitus 4,5 kg VS/(m<sup>3</sup>\*vrk). Metaanintuottopotentialit olivat alhaisia, lietelannalla 216 ja kuivikelannalla 156 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS ja kokonaissyötteellä 192 CH<sub>4</sub>/t VS (taulukko 8).

**Taulukko 8.** Sian lietelannan ja kuivikelannan ominaisuudet ja syötemäärät, orgaaninen kuormitus (OLR) ja viipymä (HRT), metaanintuottopotentiali (BMP) ja laboratoriomittakaavan CSTR-reaktorissa toteutunut metaanintuotto kuuden viikon keskiarvona.

	Lietelanta	Kuivikelanta	Kokonaissyöte
Syötemäärä (g/vrk)	400	80	480
Osuus kokonaissyöttestä (%)	83	17	100
TS-pitoisuus (%)	8,3	32,5	12,3
VS-pitoisuus (%)	6,7	22,5	9,3
OLR (kg VS/(m <sup>3</sup> *vrk))	2,7	1,8	4,5
Osuus OLR:sta (%)	60	40	100
Viipymä (vrk)	-	-	21
BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS)	216	156	192
BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t tuore)	14,4	35,2	17,8
BMP-toteuma (%)	-	-	58,6
Tuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS)	-	-	112
Tuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> /vrk)	-	-	0,502

Metaanintuottopotentialista toteutui kuuden viikon jaksolla keskimäärin 59 % ja parhaimmalla viikolla . Syötteen korkean ka-pitoisuuden ja huonon biohajoavuuden (alhainen BMP) vuoksi reaktorin mädätteen ka-pitoisuus oli korkea, kokeen lopussa 9,9 %.



**Kuva 10.** Metaanintuottopotentiali ja toteutunut tuotto syötettyä orgaanisen aineen tonnia kohti kuuden viikon tarkastelujaksolla.

### 3.4.2. Kuivikelannan vaikutus maatilamittakaavan biokaasulaitoksen energiataseeseen

Laboriomittakaavan demonstraatiosta saadut tulokset skaalattiin maatilamittakaavaan mallintamalla. Mallinnuksessa laskettiin maatilamittakaavan biokaasulaitoksen energiatase, kun syötteenä on pelkkä lietelanta ja kun lietelannan lisäsyötteenä on kuivikelanta (ominaisuudet taulukossa 8). Pelkän lietelannan toteutuva metaanintuotto laskettiin Guon ym. (2013) datasta johdetulla regressiomallilla. Lietelannan ja kuivikelannan metaanintuotto skaalattiin laboriotuloksista. Laitoksen energiankulutuksen laskentamenetelmät on kuvattu luvussa 2.5. Molempien lantasyötteiden lämpötilaksi oletettiin 10 °C ja reaktorin ympäristön lämpötilaksi 5 °C.

Mallinnetussa biokaasulaitoksessa on yksi 40 °C lämpötilassa toimiva reaktori, jonka nestetilavuus on 260 m<sup>3</sup> ja kokonaistilavuus 299 m<sup>3</sup>. Pelkällä lietelantasyötteellä (10,4 t/vrk) viipymä reaktorissa olisi 25 vrk ja orgaaninen kuormitus 2,7 kg VS/(m<sup>3</sup>\*vrk). Lietelannan ja kuivikelannan (2,08 t/vrk) yhteiskäsittelyssä viipymä olisi 21 vrk ja kuormitus 4,5 kg VS/(m<sup>3</sup>\*vrk).

Pelkällä lietelannalla metaanintuottopotentialista toteutuisi 74 % ja tuotetun kaasun energiasisältö olisi 1106 kWh vuorokaudessa. Kaasusta tuotettaisiin CHP-yksiyöllä sähköä 332 kWh (hyötysuhde 30 %) ja lämpöä 663 kWh/vrk (hyötysuhde 60 %). Biokaasulaitos kuluttaisi mallinnuksen mukaan sähköä 106 ja lämpöä 383 kWh/vrk. Täten biokaasulaitos tuottaisi maatalan tai muun kohteen käyttöön nettosähköä 226 kWh ja nettolämpöä 281 kWh/vrk. Reaktorin sekoitus kuluttaisi sähköä 29 kWh/vrk, kun mädätteen mallinnettu TS-pitoisuus olisi 6,7 % (oletus: biokaasusta 70 % metaania ja 30 % hiilidioksidia).

Kuivikelannan käyttö lisäsyötteenä parantaisi biokaasulaitoksen energiatasetta. Metaanintuotto olisi 1305 kWh/vrk eli 18 % suurempi kuin pelkällä lietelannalla, vaikka

yhteiskäsittelyssä metaanintuottopotentialin toteuma olisi pienempi, 59 %. Kuivikelannan käyttö lisää biokaasulaitoksen sähkönkulutusta 8 %, koska reaktorin sekoitus kuluttaa sähköä 36 kWh (mädätteen TS 10,4 %, johon vaikuttaa myös biokaasun alhaisempi metaanipitoisuus, 60 %) ja kuivikelannan syöttöruuvi 1 kWh/vrk. Suuremman bruttosähköntuotantomäärän vuoksi nettosähköntuotanto olisi kuitenkin 23 % suurempaa, 277 kWh/vrk. Lämmönkulutus olisi kWh/vrk, eli 13 % suurempi kuin pelkällä lietesyötteellä. Lämmönkulutusta lisäisi ylimääräinen prosessilämpötilaan lämmitettävä massa. Nettolämmöntuotto olisi kuitenkin 25 % suurempi, 350 kWh/vrk. Kokonaisnettoenergian tuotto olisi 24 % suurempi kuin pelkällä lietesyötteellä.

Mallin mukaan reaktorin upposekoittimet vähentävät vastaavasti reaktorin lämmönkulutusta (liike-energia ja hukkalämpö), lämmönkulutus olisi

**Taulukko 9.** Maatilanmittakaavan biokaasulaitoksen mallinnettu energiatase lietelantasyötteellä sekä lietelannan ja kuivikelannan yhteiskäsittelyssä.

	Liete	Liete+ kuivikelanta
Lietelantasyöte (t/vrk)	10,40	10,40
Kuivikelantasyöte (t/vrk)	-	2,08
Syötteen BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /vrk)	150	223
BMP-toteuma reaktorissa (%)	74,0	58,6
Kaasuntuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /vrk)	111	130
Kaasun energiasisältö (kWh/vrk)	1106	1305
Bruttosähköntuotto (kWh/vrk)	332	391
Bruttolämmöntuotto (kWh/vrk)	663	783
Sähkönkulutus (kWh/vrk)	106	114
Lämmönkulutus (kWh/vrk)	383	433
Nettosähköntuotto (kWh/vrk)	226	277
Nettolämmöntuotto (kWh/vrk)	281	350
Nettoenergia yhteensä (kWh/vrk)	506	627
Nettoenergia/kaasuenergia (%)	46	48

Mallinnuksessa ei huomioitu kuivikelannan mahdollista murskaustarvetta (ei todennäköisesti tarvita, jos kuivikkeena käytetään esim. olkisirppua).

### 3.5. Naudan kuivikelannan murskauksen vaikutus metaanintuottopotentiaaliin

Demonstraatioissa käytetty kuivikelanta kerättiin Perttelissä sijaitsevalta emolehmätilalta kuivikepohjapihatosta. Pihaton ruokintapaikan edusta puhdistettiin viikoittain lannasta kolaamalla ja kuivitettiin ”pitkällä oljella” (muuten pihatossa oli kuivikkeena turve). Olkikuivitus toteutettiin 14.3.2019 ja lannan kolaus 22.3.2019, jonka jälkeen lantaa haettiin murskausta varten. Osa ruokintapaikan edustasta kuivitettiin silputulla oljella 18.3.2019. Olki oli tehty sikalan virikemateriaaliksi, jonka palakoko oli niin pieni, että se sopi lietelantasysteemiin. Olkisilpulla kuivitetusta lannasta otettiin näyte 22.3.2019 metaanintuottopotentiaalimääritystä varten. Kuivikelannan murskaus ja näytteenotto metaanintuottopotentiaalikoetta varten suoritettiin 22.3.2019 Ypäjällä. Murskauksessa käytettiin ALLU Transformer DN 3-17 -seulakauhaa, jossa oli murskaavat TS 25 -kirvesterät. Kauhaa käytettiin telaketjukaivinkoneella (kuva 10).



**Kuva 11.** ALLU Transformer DN 3-17 -seulakauha.

Metaanintuottopotentiaalikokeen (BMP, Biochemical methane potential) koejäsenet olivat seuraavat (kuva 10):

- Murskaamaton, pitkällä oljella kuivitettu lanta (kontrolli)
- Seulakauhalla murskattu lanta (murskausmenetelmä 1)
- Olkisilpulla kuivitettu lanta (murskausmenetelmä 2)





**Kuva 12.** Murskausdemonstraation koejäsenet.

Silmämääräisesti koejäsenissä ei ollut suuria eroja. Seulakauha katkoi jonkin verran pitkiä olkia. Yleensä palakoon pienentäminen lisää metaanintuottopotentiaalia. Odotusarvosta poiketen murskauskäsittelyt eivät lisänneet kuivikelannan metaanintuottopotentiaalia: murskaamattoman kontrollin BMP oli 249, murskatun lannan 228 ja olkisilpulla kuivitetun 217 normaalikuutiota metaania orgaanisen aineen tonnia kohti ( $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t VS}$ ). Tuoretonnikohtaiset potentiaalit olivat 31-43  $\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}$  eli 310-430 kWh/t (taulukko 10).

**Taulukko 10.** Murskaamattoman ja murskattujen lantojen pitoisuudet sekä metaanintuottopotentiaali normaalikuutiolina kuiva-ainetonnina (TS), orgaanisen aineen tonnia (TS) ja tuoretonnia kohti (FM).

	TS (%):	VS (%):	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}_{\text{TS}}$	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}_{\text{VS}}$	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{t}_{\text{FM}}$
Murskaamaton lanta	19,9	17,2	215	249	43
Murskattu lanta	20,1	16,7	189	228	38
Olkisilpulla kuivitettu	17,3	14,4	181	217	31



## 4. Laskeutusmalli: ohjeet sian lietelannan laskeutukseen

### 4.1. Erotustehokkuuksien ja fraktioiden pitoisuuksien laskenta

Sian lietelannan laskeutuksessa tulee käyttää riittävän pitkää laskeutusaikaa, jos halutaan saada myös pienet fosforipitoiset partikkelit laskeutumaan säiliön pohjalle. Laskeutusaika riippuu suuresti lietelannan kuiva-ainepitoisuudesta (TS-pitoisuudesta). Alhaisen TS-pitoisuuden (1-3 %) lietteille riittävä laskeutusaika voi olla vain 0,3-1 vrk metrin lietesyvyyttä kohti. Paksuilla eli korkean TS-pitoisuuden lietelannoilla riittävä laskeutusaika fosforin erotukselle on huomattavasti pidempi, esimerkiksi 56-63 vrk/m lietesyvyyttä. Kuiva-ainetta ja metaanintuottopotentialia voidaan saada erotettua suhteellisen tehokkaasti lyhyemmälläkin laskeutusajalla pohjafraktioihin.

Tässä on esitetty erotustehokkuusmalli paksuille (TS 5-9 %) lietelannoille olettaen, että myös fosfori halutaan erottaa tehokkaasti säilön pohjalle (demonstraatioiden perusteella ohuella lietelannalla erotustehokkuudet pohjafraktioihin voivat olla suurempia). Mallin avulla voidaan laskea, kuinka paljon lietelannan eri massakomponentteja saadaan erotettua neljään vertikaaliseen fraktioon "lietepatsaassa" (taulukko 11).

**Taulukko 11.** Erotustehokkuusmalli pohjafraktioiden pitoisuuksien laskentaa varten. E = massakomponentin erotustehokkuus ko. pohjafraktioon (% lietelannan massasta).

Fraktio	E <sub>TS</sub>	E <sub>VS</sub>	E <sub>BMP</sub>	E <sub>N</sub>	E <sub>Iiuk.N</sub>	E <sub>P</sub>	E <sub>K</sub>
Lietelanta (fraktio 0-100 %)	100	100	100	100	100	100	100
Erotus pohjafraktioon 0-75 %	91	93	90	79	75	94	73
Erotus pohjafraktioon 0-50 %	79	83	77	56	51	81	49
Erotus pohjafraktioon 0-25 %	56	61	48	30	25	52	23

Erotustehokkuusmallin avulla voidaan laskea eri fraktioiden ravinnepitoisuudet ja metaanintuottopotentialit tuoretonna kohti. Esimerkiksi, jos pohjafraktioksi valitaan fraktio 0-50 %, sen TS-pitoisuus voidaan laskea kaavalla 3:

$$E_{TS} / 100 * C / F = 79 / 100 * 6,7 / 0,5 = 10,6 \quad (3)$$

jossa E<sub>TS</sub> on erotustehokkuus (%) ko. pohjafraktioon, C on koko lietelannan kuiva-ainepitoisuus (TS %) laskeutuksen lopussa (eli kaikkien fraktioiden keskiarvo) ja F on fraktion osuus lietesyvyydestä (esim. 0,5 = pohjafraktio 0-50 % ja 0,25 = pohjafraktio 0-25 %).

Samalla tavalla voidaan laskea orgaanisen aineen, muiden ravinteiden ja metaanintuottopotentialin pitoisuudet erikorkuisissa laskeutusfraktioissa (taulukko 12). Koska osa orgaanisesta aineesta muuttuu pitkän laskeutuksen tai muun säiliövarastoinnin aikana kaasuksi (metaani, hiilidioksidi), on koko lietelannan metaanintuottopotentiali pienentynyt. Samoin tyypeä haihtuu esim. ammoniakkinä. Tämän takia pitoisuuksien mallilaskelmissa

(taulukko 12) laskeutusfraktioiden keskiarvona on käytetty Normilanta-järjestelmässä (Luostarinen ym. 2017) ilmoitettua Lietelanta ex storage eli liotelanta varastosta -pitoisuutta. Taulukossa 12 on esitetty myös Lietelanta ex housing eli liotelanta eläinsuojasta -pitoisuudet. Luostarisen ym. (2017) esittämien arvojen perusteella orgaanisen aineen massa alenee 12 % varastoinnissa. Jäljelle jäävän orgaanisen aineen metaanintuottopotentiaali on oletettu erotustehokkuusmallissa samaksi ennen ja jälkeen varastoinnin/laskeutuksen (320 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ VS, oletusarvo on otettu Biokaasulaskurista (2021)). Orgaanisen aineen hävikin vuoksi tuoretonnikohtainen metaanintuottopotentiaali alenee pitkän laskeutuksen tai muun varastoinnin aikana (vertaa: ex housing 211 kWh/t, ex storage 171 kWh/t, normaalikuutio metaania on alemmalta lämpöarvoltaan 10 kWh). Erotustehokkuusmallissa ei ole huomioitu veden määrän lisääntymistä varastoinnin aikana (Normilanta-arvojen perusteella tuoremassa lisääntyy 9 % varastoinnin aikana).

**Taulukko 12.** Lietelantojen (Luostarinen ym. 2017) sekä erotustehokkuusmallilla laskettujen laskeutuksen pohjafraktioiden pitoisuudet. Pohjafraktioiden pitoisuudet on laskettu taulukossa 11 esitettyjen erotustehokkuuksien ja Liete ex storage -pitoisuuksien perusteella.

Lietelanta/fraktio	TS (%)	VS (%)	BMP (kWh/t)	N (kg/t)	Liuk.N (kg/t)	P (kg/t)	Liuk.N/P
Liete ex housing	8,1	6,6	211	4,6	2,9	1,0	2,9
Liete ex storage (0-100 %)	6,7	5,3	171	4,0	2,6	0,9	2,8
Pohjafraktio 0-75 %	8,1	6,6	205	4,2	2,6	1,2	2,3
Pohjafraktio 0-50 %	10,6	8,9	263	4,5	2,6	1,5	1,8
Pohjafraktio 0-25 %	15,0	13,0	328	4,8	2,6	1,9	1,4

Pohjafraktioiden käyttö biokaasulaitoksen syötteenä liotelannan sijasta on kannattavaa, koska pohjafraktioilla on korkeampi energiatiheys (metaanintuottopotentiaali tuoretonnia kohti). Korkeampi energiatiheys lisää biokaasulaitoksen nettoenergiantuottoa ja tekee kuljetuksesta kannattavampaa. Laskeutuksen alimman neljänneksen (pohjafraktio 0-25 %) potentiaali on 328 kWh/t, eli 92 % korkeampi kuin liotelannalla varastoinnin jälkeen (ex storage, 171 kWh/t). Alimmalla neljänneksellä on kuitenkin myös korkea TS-pitoisuus, 15 % ja sen fosforipitoisuus olisi yli kaksinkertainen liotelantaan verrattuna. Näin paksun pohjafraktion pumppaaminen on kuitenkin vaikeaa, kuten v. 2019 demonstraatiossa havaittiin. Laskeutuksen alemman puolikkaan eli pohjafraktion 0-50 % käyttäminen biokaasulaitoksen syötteenä olisi helpommin toteutettavissa, sillä sen TS-pitoisuus on mallilaskelman mukaan 10,6 %. Fosforipitoisuus olisi noin 60 % korkeampi kuin liotelannassa. Metaanintuottopotentiaali olisi 263 kWh/t, eli 54 % korkeampi kuin liotelannalla.

Laskeutuksen pintafraktioiden ravinnepitoisuudet voidaan laskea, kun taulukossa 11 esitetyt erotustehokkuudet pohjafraktioon käännetään toisinpäin (taulukko 13)

**Taulukko 13.** Erotustehokkuusmalli pintafraktioiden pitoisuuksien laskentaa varten. E = massakomponentin erotustehokkuus ko. pohjafraktioon (% liotelannan massasta).

Fraktio	E <sub>TS</sub>	E <sub>VS</sub>	E <sub>BMP</sub>	E <sub>N</sub>	E <sub>liuk.N</sub>	E <sub>P</sub>	E <sub>K</sub>
Pintafraktio 75-100 %	9	7	10	21	25	6	27
Pintafraktio 50-100 %	21	17	23	44	49	19	51
Pintafraktio 25-100 %	44	39	52	70	75	48	77
Liete ex storage (fraktio 0-100 %)	100	100	100	100	100	100	100

Pintafraktioiden ominaisuudet ovat tärkeitä, koska esimerkiksi lannan levitysmäärä ympäristötuen fosforirajoituksen puitteissa riippuu liukoisen typen ja kokonaisfosforin suhdeluvusta (liuk.N/P-suhde). Esimerkiksi, jos laskeutuksen ylemmän puolikkaan (pintafraktio 50-100 %) käytetään lannoitteena lietalannan sijasta, saadaan peltohehtaarille levitettyä 158 % enemmän liukoista typpeä, toisin sanoen pintafraktion liuk.N/P-suhde on 158 % korkeampi, (taulukko 14).

**Taulukko 14.** Lietalannan ex storage (Luostarinen ym. 2017) sekä erotustehokkuusmallilla laskettujen laskeutuksen pintafraktioiden pitoisuudet sekä liuk.N/P-suhdeluvut.

Liete/fraktio	TS %	VS %	BMP (kWh/t)	N (kg/t)	Liuk.N (kg/t)	P (kg/t)	Liuk.N/P	% enemmän liuk.N/ha
Pintafraktio 75-100 %	2,4	1,5	68	3,4	2,6	0,2	11,8	317
Pintafraktio 50-100 %	2,8	1,8	79	3,5	2,5	0,3	7,3	158
Pintafraktio 25-100 %	3,9	2,8	119	3,7	2,6	0,6	4,4	56
Liete ex storage (fraktio 0-100 %)	6,7	5,34	171	4,00	2,6	0,92	2,8	-

## 4.2. Pohjafraktio maatilamittakaavan mittakaavan biokaasulaitoksen syötteenä

Mallinnuksessa verrattiin pohjafraktiosyötteen ja laskeuttamattoman lietalantasyötteen vaikutusta maatilamittakaavan biokaasulaitoksen energiataseeseen. Lietteen (ex storage) ja pohjafraktion (0-50 %) ominaisuuksina käytettiin mallilla (luku 4.1) laskettuja arvoja. Pohjafraktion käsittelylle käytettiin samaa 25 vrk viipymää kuin lietalannalle sekä lisäksi 35 vrk viipymää. Metaanintuottopotentialin toteuman laskennassa käytettiin Guon (2013) datasta johdettua regressiomallia. Pohjafraktion kohdalla huomioitiin se, että mallinnettu pohjafraktion VS-pitoisuus oli hieman korkeampi kuin demonstraatioissa käytetyn pohjasakan (noin 10 % pienempi metaanintuottopotentialin toteuma).

Mallinnetussa biokaasulaitoksessa on yksi 40 °C lämpötilassa toimiva reaktori, jonka nestetilavuus on 260 m<sup>3</sup> ja kokonaistilavuus 299 m<sup>3</sup>. Pelkällä lietalantasyötteellä (10,4 t/vrk)

viipymä reaktorissa olisi 25 vrk ja orgaaninen kuormitus 2,1 kg VS/(m<sup>3</sup>\*vrk). Lietelannan ja kuivikelannan (2,08 t/vrk) yhteiskäsittelyssä viipymä olisi 21 vrk ja kuormitus 4,5 kg VS/(m<sup>3</sup>\*vrk).

Laskeuttamattomalla liotelannalla metaanintuottopotentialista toteutuisi 79 % ja tuotetun kaasun energiasisältö olisi 1406 kWh vuorokaudessa. Kaasusta tuotettaisiin CHP-yksiöllä sähköä 422 kWh (hyötysuhde 30 %) ja lämpöä 844 kWh/vrk (hyötysuhde 60 %). Biokaasulaitos kuluttaisi mallinnuksen mukaan sähköä 102 ja lämpöä 391 kWh/vrk. Täten biokaasulaitos tuottaisi maatilaa tai muun kohteen käyttöön nettosähköä 320 kWh ja nettolämpöä 453 kWh/vrk. Reaktorin sekoitus kuluttaisi sähköä 25 kWh/vrk, kun mädätteen mallinnettu TS-pitoisuus olisi 6,7 % (oletus: biokaasusta 70 % metaania ja 30 % hiilidioksidia).

Jos liotelannan sijasta laitoksen syötteenä käytettäisiin laskeutuksen pohjafraktiota sama määrä kuin liotelantaa (viipymä 25 vrk), orgaaninen kuormitus olisi korkeampi (3,5 kg VS/(m<sup>3</sup>\*vrk)) ja metaanintuottopotentialista toteutuisi pienempi osuus, 58 %. Laitoksen metaanintuotto olisi kuitenkin 13 % suurempi, 1590 kWh/vrk. Laitos kuluttaisi hieman enemmän sähköä, koska mädätteen korkeampi TS-pitoisuus (8,4 %) lisäisi reaktorin sekoituksen sähkönkulutusta. Nettosähköntuotto olisi kuitenkin 15 % korkeampi ja nettolämmöntuotto 28 % korkeampi kuin lietesyötteellä. Kokonaisnettoenergiantuotto olisi 948 kWh/vrk, eli 23 % suurempi kuin lietesyötteellä.

Jos pohjafraction syötemäärä olisi pienempi (7,43 t/vrk) ja viipymä siten pidempi, 35 vrk, laitos tuottaisi 8 % enemmän nettoenergiaa kuin liotelantasyöte 25 vrk viipymällä. Nettosähköntuotto olisi kuitenkin 7 % (taulukko 15).

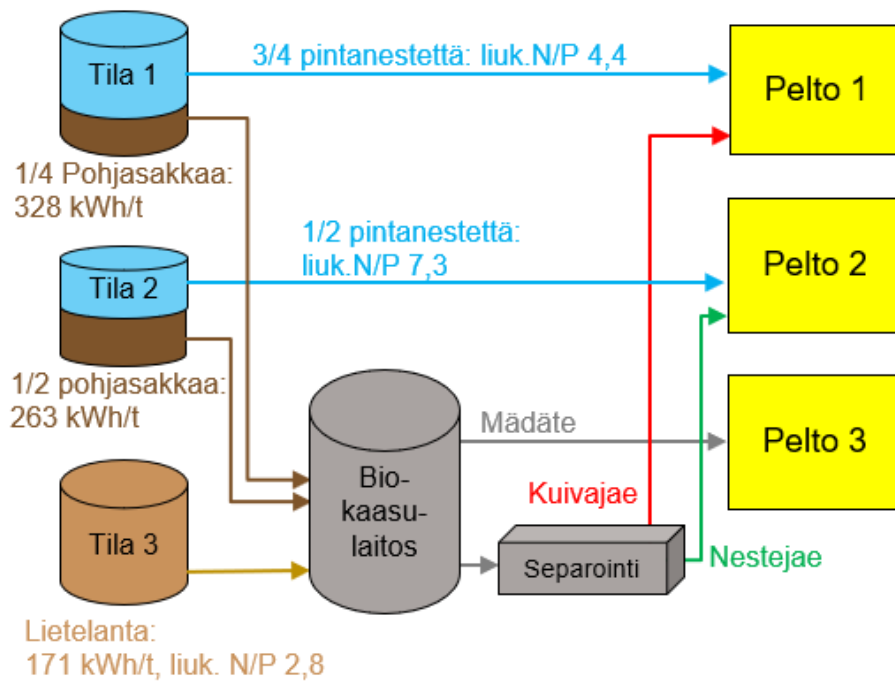
**Taulukko 15.** Mallinnetut energiataseet maatilamittakaavan biokaasulaitokselle liotelantasyötteen 25 vrk viipymällä ja pohjafraktiosyötteen 25 ja 35 vrk viipymillä.

	Lietelanta	Pohjafraktio	Pohjafraktio
HRT (vrk)	25	25	35
Syöte (t/vrk)	10,40	10,40	7,43
Kokonaissyötteen TS (%)	6,7	10,6	10,6
Kokonaissyötteen VS (%)	5,3	8,9	8,9
OLR (kg VS/(m <sup>3</sup> *vrk))	2,1	3,5	2,5
Syötteen BMP (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /vrk)	178	274	196
BMP-toteuma reaktorissa (%)	79,1	58,0	69,3
Kaasuntuotto (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /vrk)	141	159	136
Kaasun energiasisältö (kWh/vrk)	1406	1590	1356
Bruttosähköntuotto (kWh/vrk)	422	477	407
Bruttolämmöntuotto (kWh/vrk)	844	954	813

Sähkönkulutus (kWh/vrk)	102	109	108
Lämmönkulutus (kWh/vrk)	391	374	278
Nettosähköntuotto (kWh/vrk)	320	368	299
Nettolämmöntuotto (kWh/vrk)	453	580	535
Nettoenergia yht. (kWh/vrk)	773	948	833
Nettoenergia/kaasun energia (%)	55	60	61

### 4.3. Lietelanta ja pohjafraktiot keskitetyn biokaasulaitoksen syötteenä (konsepti)

Biokaasulaitoksessa voidaan käyttää syötteenä myös liotelantaa ja laskeutuksen pohjasakkoja yhdessä. Paksusta liotelannan laskeutuksen alin neljännes (pohjafraktio 0-25 %) ei todennäköisesti sovi sellaisenaan biokaasulaitoksen syötteenä (ks. luku 3.3.). Siksi perussyötteenä voidaan tarvita laimeampaa syötettä, esimerkiksi separoimatonta liotelantaa, jota keskitetylle biokaasulaitokselle voisivat toimittaa lähellä sijaitsevat maatilat. Korkean TS-pitoisuuden pohjafraktio voi olla kannattavaa kuljettaa kaukanakin sijaitsevilta maatioilta. Keskipitkiltä etäisyyksiltä laitokselle voitaisiin toimittaa 0-50 % pohjafraktiota. Maatioille laskeutuksesta jäävät pintafraktiot voidaan hyödyntää typpipitoisena lannoitteena korkean fosforipitoisuuden pelloilla. Keskitetty biokaasulaitos voi separoida mädätettä laskeuttamalla ja/tai muilla tehokkaammilla menetelmillä (esim. dekantterilinko). Korkean fosforipitoisuuden jakeet voidaan kuljettaa takaisin pohjasakkaa syötteenä toimittaneille tiloille tai muille pelloille, jotka tarvitsevat fosforilannoitusta (kuva 13).

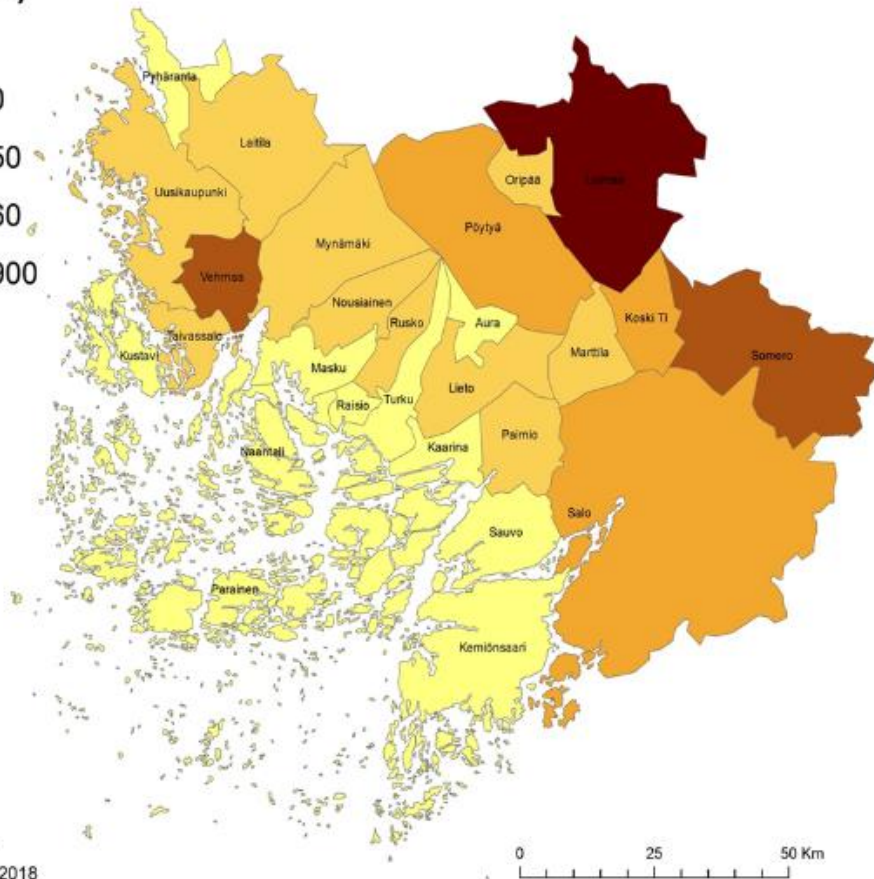
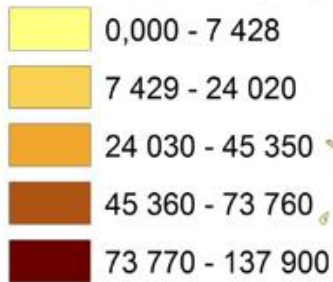


**Kuva 13.** Konsepti, jossa separoimatonta lietelantaa toimitetaan keskitettyyn biokaasulaitokseen läheltä ja laskeutuksen pohjasakkoja kauempaa. Myös mädätettä voidaan separoida laskeuttamalla ja/tai tehokkaammilla menetelmillä. Energiasisällöt ja liukoisen typen ja fosforin suhdeluvut on laskettu luvussa 4.1. esitetyllä mallilla.

## 5. Sian liettelannan ravinnemäärät Varsinais-Suomessa

Varsinais-Suomen kunnissa sian liettelantaa muodostuu vuosittain noin 550 000 tonnia. Syntyvä liettelanta sisältää fosforia 547 000 kg. Liettelantaa muodostuu eniten Loimaalla, 138 000 t/v ja seuraavaksi eniten Vehmaalla, 74 000 t/v ja Somerolla, 56 000 t/v. Myös Salossa, Pöytyällä ja Koskella muodostuu liettelantaa yli 33 000 t/v. (Kuva 14).

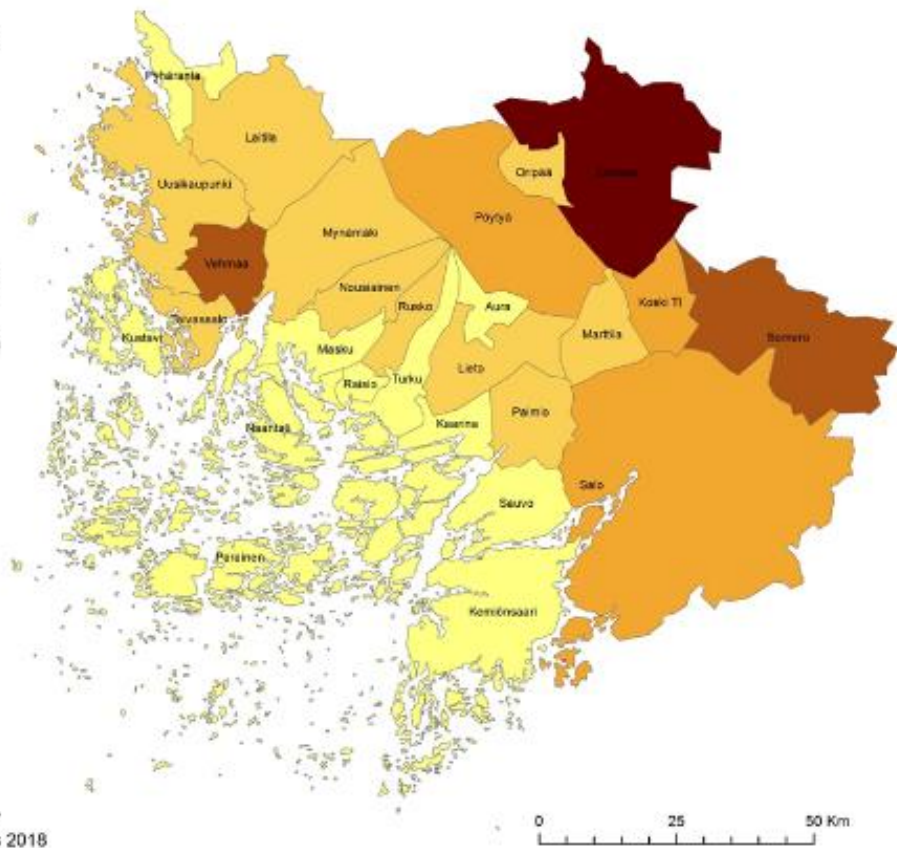
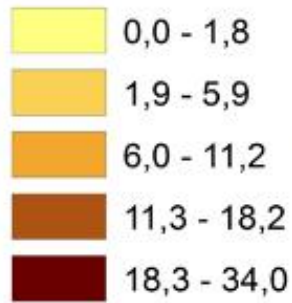
### Sian liettelanta (t/v)



**Kuva 14.** Vuosittain Varsinais-Suomen kunnissa muodostuva sian liettelanta.

Myös peltopinta-alaan suhteutettuna sian liettelannan määrä on samoissa kunnissa suuri (Kuva 15).



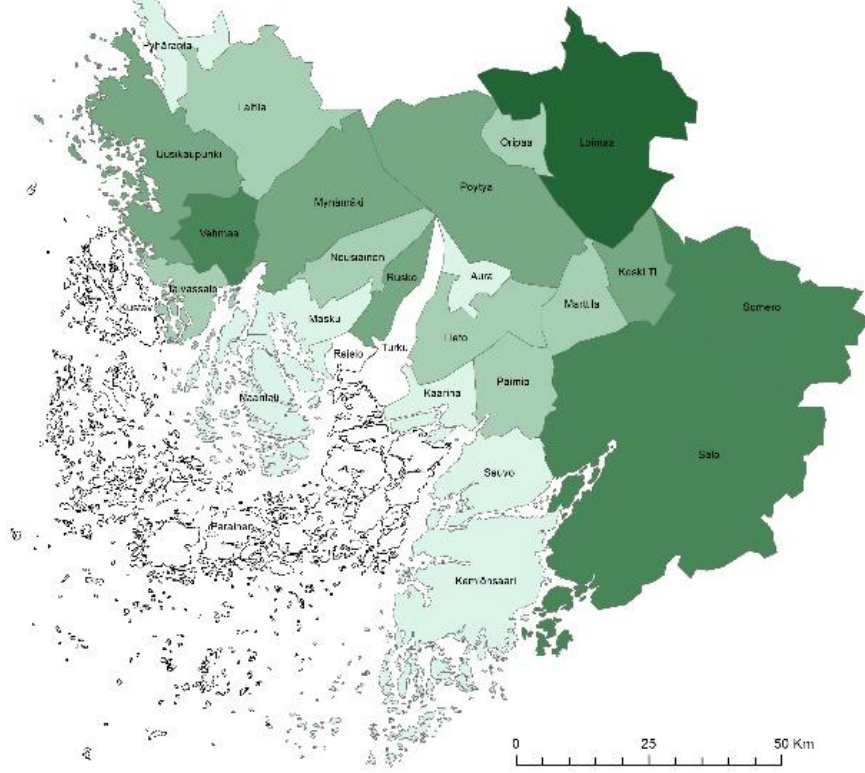
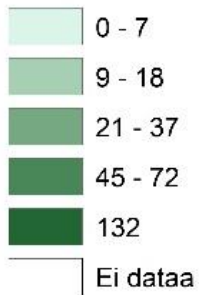
**Lietelanta t/ha**

**Kuva 15.** Sian lietelantatiheys pellohehtaaria kohden laskettuna Varsinais-Suomen kunnissa.



CIRCWASTE

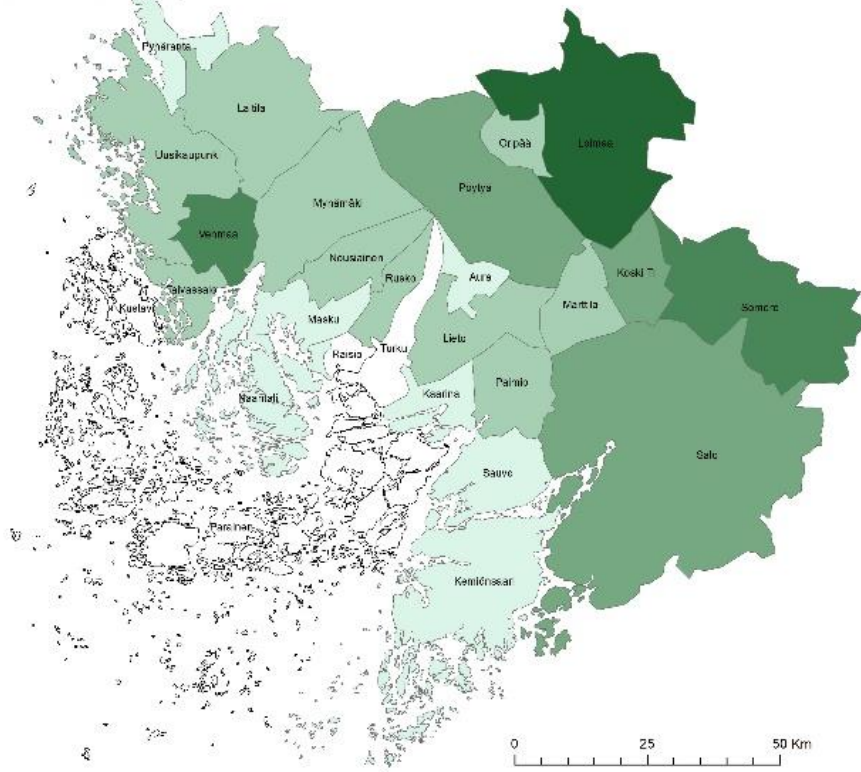
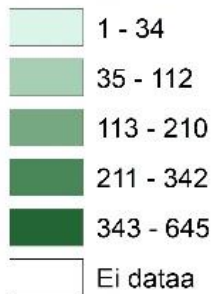
Sian liettelannan fosfori t/a



Kuntarajat: Maanmittauslaitos 2017  
Lantadata: Ravinnelaskuri 2018

Kuva 16. Sian liettelannan sisältämä fosfori Varsinais-Suomen kunnissa

Sian liettelannan kokonaistyyppi t/a



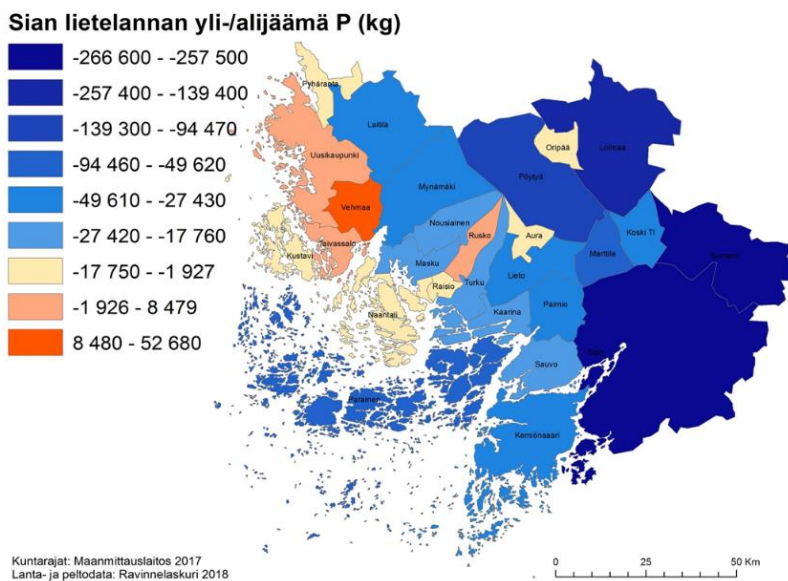
Kuntarajat: Maanmittauslaitos 2017  
Lantadata: Ravinnelaskuri 2018

Kuva 17. Sian liettelannan sisältämä tyyppi Varsinais-Suomen kunnissa

Ravinnelaskurin datasta piirretyt ravinnekartat osoittavat, että sian lietelanta yksin riittää Vehmaan, Taivassalon, Ruskon ja Uudenkaupungin viljelykasvien lannoittamiseen. Kunnissa syntyy ravinneylijäämää, ja fosforia olisi hyvä saada kuljetettua niistä naapurikuntiin, kuten Laitilaan ja Mynämäelle (Kuva 18).

Kun huomioidaan kaikki alueella muodostuvat fosforipitoiset biomassat, fosforylijäämää muodostuu edellä mainittujen kuntien lisäksi Laitilassa, Pöytyällä, Oripäessä, Loimaalla, Koskella, Turussa, Mynämäellä, Liedossa, Nousiaisissa, Maskussa, Raisiossa ja Naantalissa. Fosforin suhteen alijäämäisiä kuntia ovat Somero, Marttila, Parainen, Paimio ja Kemiönsaari (Kuva 19).

Sian lietelantaa ja muita biomassoja olisi saatava prosessoinnin jälkeen kuljetettua näille alueille, joilla ravinteille olisi käyttöä. Massojen kuljettaminen on tehokkaampaa prosessoinnin jälkeen, kun niistä on poistunut nestettä ja saatu talteen myös energiaa biokaasun muodossa. Prosessointi kannattaa tehdä siellä, missä massoja muodostuu. Jos lannoitustarvetta on lähellä, lietelannan voi levittää myös suoraan peltoon. Toisin sanoen prosessoitavaksi kannattaisi koota lietelantaa erityisesti niiltä alueilta, joilla lietelannan ja muiden massojen ravinteista on ylijäämää. Ja erityisesti niillä alueilla, joissa lietelantaa muodostuu paljon. Lantamääriä ja ravinnetaseita tarkastelemalla muotoutuu kuva, että Loimaa-Oripää-Pöytyä sekä Vehmaa-Uusikaupunki-Laitila muodostavat tällaiset seudut.

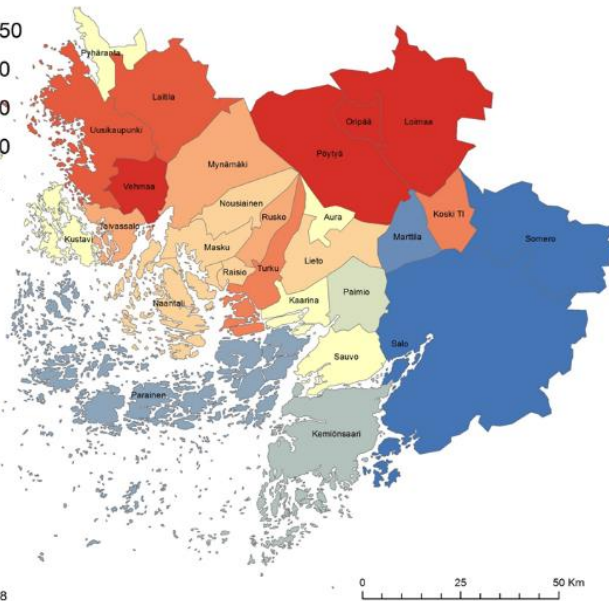
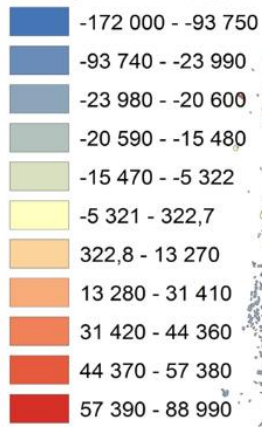


**Kuva 18.** Sian lietelannan sisältämän fosforin ja kasvien fosforitarpeen välinen tase.

Loimaan seudulla lietelantaa muodostuu yhteensä 187 500 t/v ja Vehmaan seudulla 115 000 t/v. Koska suurin osa Loimaan seudun lannasta muodostuu Loimaalla, laitos kannattaisi perustaa sinne ja kuljettaa laskeutettua pohjasakkaa naapurikunnista. Jos mukaan otetaan vielä Koski TL:n lietelannat, kokonaismäärä neljästä kunnasta on 225 000 tonnia vuodessa.

Vehmaan lähialueilta sian lietelantaa kertyisi 158 000 tonnia vuodessa, jos lantaa koottaisiin Vehmaan Laitilan ja Uudenkaupungin lisäksi Taivassalosta, Mynämäeltä ja Nousiaisista.

## Yli-alijäämä P (kg)



Kuntarajat: Maanmittauslaitos 2017  
Lanta- ja pellotiedot: Ravinnetilaskuri 2018

0 25 50 Km

**Kuva 19.** Varsinais-Suomen kunnissa muodostuvien biomassojen fosforin ja kasvien fosforintarpeen välinen tase.

## 6. Pohjasakkaa hyödyntävien biokaasulaitosten sijoittelu Varsinais-Suomessa

Luontevia paikkoja biokaasulaitoksille olisi sellaisissa paikoissa, joissa sian lietelantaa on runsaasti saatavilla. Lantaa syntyy runsaasti Vehmaan ja Loimaan alueilla. Loimaalla ja lähikunnissa Oripäässä ja Pöytyällä lantaa tulee 187 000 tonnia vuodessa. Laskeutetun pohjasakan määrä on noin puolet syntyvästä lantamäärästä. Pohjasakkaa olisi saatavilla vuosittain siis noin 94 000 tonnia. Jos vaikka puoletkin tästä määrästä tuotaisiin biokaasulaitoksen käsittelyyn, Loimaan alueelle voitaisiin perustaa kapasiteetiltaan liki 50 000 tonnin laitos tai kaksi yli 23 000 tonnin biokaasulaitosta.

Vehmaalla ja lähikunnissa Uudessakaupungissa ja Laitilassa lantaa tulee 115 000 tonnia vuodessa ja pohjasakkaa siis 57 000 tonnia. Jos noin puolet lannasta saataisiin biokaasulaitokseen, voitaisiin alueelle perustaa yksi 25 000 – 30 000 tonnia pohjasakkaa vuosittain käsittelevä laitos. Isompaan, noin 40 000 tonnin laitokseen lantaa pitäisi todennäköisesti koota myös Taivassalon, Mynämäen ja Nousiaisten alueelta. Luonteva paikka laitokselle olisi Vehmaan alueella, sillä siellä syntyy lantaa eniten ja se sijoittuu edellä mainittujen kuntien keskelle. Vehmaalla on jo biokaasulaitos, joka käyttää noin 15 000 tonnia lantaa (Mykkänen 2020).

**Taulukko 16.** Varsinais-Suomen sian lietelannan pohjafraktioita (0-50 % lietekorkeudesta) käsittelevien biokaasulaitosten syötemäärät, syötteiden metaanintuottopotentiaalit ja ravinnemäärät.

	Pohjafr. (t/v)	BMP (MWh/v)	N (t/v)	Liuk.N (t/v)	P (t/v)	K (t/v)	Liuk.N/ P-suhde
Loimaa, Oripää & Pöytyä	46 750	12 310	210	124	70	83	1,8
Vehmaa, Uusikaupunki & Laitila	28 750	7 570	129	76	43	51	1,8

**Taulukko 17.** Maatiloille sellaisenaan "typpilannoitteeksi" jäävän päällysfraction (50-100 % lietekorkeudesta) määrät, metaanintuottopotentiaalit ja ravinnemäärät.

	Pintafr. (t/v)	BMP (MWh/v)	N (t/v)	Liuk.N (t/v)	P (t/v)	K (t/v)	Liuk.N/ P-suhde
Loimaa, Oripää & Pöytyä	46 750	12 310	165	119	16	340	7,27
Vehmaa, Uusikaupunki & Laitila	28 750	7 570	101	73	10	209	7,27

## Viitteet

- Bach, L.T., Riebesell, U., St, S., Febiri, S., Rzepka, P. & Schulz, K.G. 2012. An approach for particle sinking velocity measurements in the 3–400 µm size range and considerations on the effect of temperature on sinking rates. *Mar Biol.* 2012; 159(8): 1853–1864.
- Biokaasulaskuri 2021. Luonnonvarakeskus. Metaanintuottopotentiaaliarvo sian lietelannalle haettu 20.12.2021. <https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>.
- Chen, Y.R. 1983. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. *Agricultural Wastes* 8: 65-81.
- Guo, J., Dong, R., Clemens, J. & Wang, W. 2013. Kinetics evaluation of a semi-continuously fed anaerobic digester treating pig manure at two mesophilic temperatures. *Water research* 47: 5743-5750.
- Lemola, R., Uusitalo, R., Hyväluoma, J., Sarvi, M & Turtola, E. 2018. Suomen peltojen maalajit, multavuus ja fosforipitoisuus. Vuodet 1996–2000 ja 2005–2009. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 17/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 211 s.
- Luostarinen, S. Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017. SUOMEN NORMILANTA –laskentajärjestelmän kuvaus ja ensimmäiset tulokset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 56 s. [http://ravinnejaenergia.fi/materiaali/omalannoitteet/wp-content/uploads/sites/3/2017/05/luke-luobio\\_47\\_2017.pdf](http://ravinnejaenergia.fi/materiaali/omalannoitteet/wp-content/uploads/sites/3/2017/05/luke-luobio_47_2017.pdf)
- Rivard, C.J., Kay, B.D., Kerbaugh, D.H., Nagle, N.J. & Himmel, M.E. 1995. Horsepower Requirements for High-Solids Anaerobic Digestion. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 51/52. s.155-162.



luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Latokartanonkaari 9  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000