

**Pro gradu -tutkielma**

**Biokaasuteknologian alueellinen hyödyntämispotentiaali  
– esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta**

**Veli-Heikki Vänttinen**



**Jyväskylän yliopisto**

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

3.5.2010

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

VÄNTTINEN VELI-HEIKKI: Biokaasuteknologian alueellinen hyödyntämispotentiaali  
– esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta

Pro gradu: 72 s.

Työn ohjaajat: Prof. Jukka Rintala, FT Anssi Lensu

Tarkastajat: Prof. Markku Kuitunen, FT Anssi Lensu

Huhtikuu 2010

Hakusanat: biokaasupotentiaali, orgaaninen materiaali, biokaasulaitos, paikkatietoanalyysi

## TIIVISTELMÄ

Tässä tutkielmassa arvioitiin Keski-Suomessa biokaasun tuotantoon soveltuvien orgaanisten materiaalien määrä, niiden alueellinen sijoittuminen sekä materiaalien määrään ja metaanintuottopotentiaaleihin perustuva energiapotentiaali. Lisäksi arvioitiin biokaasupotentiaalin hyödyntämiseen tarvittavien laitosten lukumäärä ja niiden optimaalinen sijoittaminen sekä biokaasun käytön ympäristövaikutukset. Materiaaleista tutkielmaan valittiin yhdyskuntien ja teollisuuden orgaaniset jättemateriaalit, lanta, olki sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävistä energiakasveista nurmi. Biokaasun tuotantoon arvioitiin tuotettavan nurmea ruoan ja rehun tuotantoon kuulumattomilla pelloilla (11 500 ha), joissa oletettiin hyödynnettävän nurmen 1. ja 2. sato (9,7 t TS/ha). Alle viiden vuoden ikäisillä nurmen tuotantoon luokiteltavilla pelloilla (40 500 ha) oletettiin käytettävän yksinomaan nurmen 2. sato (3,3 t TS/ha).

Keski-Suomessa biokaasun tuotantoon voidaan teoriassa hyödyntää yhteensä 433 000 t TS/a orgaanisia materiaaleja. Teoreettinen biokaasupotentiaali on 1,1 TWh/a (0,6 – 1,5 TWh/a), josta suurin osa (67 %) on biokaasun tuotantoa varten viljeltävillä energiakasveilla. Tekninen biokaasupotentiaali on 450 GWh/a (270 – 640 GWh/a), jos lannan, oljen ja energiakasvien teoreettisesta määrästä arvioidaan käytettävän noin 40 %. Biokaasupotentiaalien vaihteluvälit perustuvat jättemateriaalien ja lannan metaanintuottopotentiaalien sekä nurmen ja oljen satotasojen minimi- ja maksimiarvoihin. Teoreettinen biokaasupotentiaali vastaa 7 – 17 % maakunnan vuoden 2006 muusta kuin teollisuuden, kuten rakennusten lämmitysten, tieliikenteen sekä muun kulutuksen, käyttämästä primäärienergiasta. Huomattavaa kuitenkin on, että biokaasun tuotanto kuluttaa energiaa arviolta 20 – 40 % biokaasun primäärienergiasta, joten teoreettinen nettobiokaasupotentiaali on keskimäärin 0,8 TWh. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien hyödyntämiseen tarvitaan neljä kappaletta 5000 m<sup>3</sup>:n biokaasulaitoksia, kun laitosten oletuskuormitukseksi arvioidaan 2 kg VS/m<sup>3</sup>d. Vastaavalla kuormituksella toimivia lantaa, olkea ja biokaasun tuotantoa varten viljeltävää nurmea käyttäviä 2000 m<sup>3</sup>:n biokaasulaitoksia tarvitaan lisäksi 95 kappaletta.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Mathematics and Science

Department of Biological and Environmental Science

Environmental Science and Technology

VÄNTTINEN VELI-HEIKKI: Biogas technology potential for renewable energy production and material flow management in regional scale – case Central Finland

Master of Science Thesis: 72 p.

Supervisors: Professor Jukka Rintala, Ph.D. Anssi Lensu

Inspectors: Professor Markku Kuitunen, Ph.D. Anssi Lensu

April 2010

---

Key Words: biogas potential, organic material, biogas plant, GIS

## ABSTRACT

In this thesis, estimations were made concerning the amount of organic materials that are suitable for biogas production in Central Finland, the resource mapping of the materials, as well as the energy potential of biogas production that is based on the amount and methane potentials of the materials. In addition, the amount and optimal location of biogas plants as well as the environmental impacts concerning the use of biogas were estimated. In this study, municipal and industrial organic waste materials, manure, straw, and energy crops (grass) dedicated for biogas production were selected as feedstocks. The fallow and managed uncultivated arable land (11.500 ha), as well as less than 5 years old grassland (40.500 ha) were presumed to be utilized for cultivation grass and biogas production. It was assumed that the 1st and the 2nd harvests of the fallow and managed uncultivated arable land (9.7 t TS/ha) and only the 2nd harvest of less than 5 years old grassland (3.3 t TS/ha) could be used for biogas production.

In theory, the amount of organic materials, which can be utilised in biogas production in Central Finland, is 433.000 t TS/a. The theoretical biogas potential is 1.1 TWh/a (0.6-1.5 TWh/a), of which energy crops dedicated for biogas production have the largest share (67%). The technical biogas potential is 450 GWh/a (270-640 GWh/a), if approximately 40% of the theoretical amount of manure, straw, and energy crops are estimated to be utilised. The variations of biogas potentials are based on the minimum and maximum values concerning the methane potentials of waste materials as well as the crop yields of grass and straw. The theoretical biogas potential corresponds to 7-17% of the primary energy consumed in Central Finland in 2006 by other sectors than industry, such as heating, road transportation, and other consumption. However, it should be considered that biogas production consumes 20-40% of the primary energy of biogas. Thus, the theoretical net biogas potential is on average 0.8 TWh. Four biogas plants (5000 m<sup>3</sup>) are needed for utilising municipal and industrial waste materials, if the organic load of biogas plant is estimated to be 2 kg VS/m<sup>3</sup>d. Moreover, 95 biogas plants (2000 m<sup>3</sup>) that use manure, straw, and grass cultivated for biogas production are needed with corresponding organic load.

## **ESIPUHE**

Tutkielma liittyy maakunnalliseen *Biokaasusta energiaa Keski-Suomeen* -hankkeeseen, jossa tutkittiin Keski-Suomen biokaasun tuotannon energia- ja ympäristöpotentiaalin sekä biokaasulaitosten sopivimpien sijoitusvaihtoehtojen lisäksi biokaasun tuotannon edellytyksiä Jyväskylän ja Saarijärven seuduilla sekä potentiaalisten biokaasulaitosten taloudellista kannattavuutta. Hankkeen toteuttajia olivat Jyväskylän yliopisto, Protech AD Services Oy, Benet Oy, Ramboll Finland Oy, Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja Pohjoisen Keski-Suomen oppimiskeskus. Projektin päärahoittajana oli Keski-Suomen liitto.

# Sisällysluettelo

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>8</b>
<b>2 TUTKIMUKSEN TAUSTA</b> .....	<b>9</b>
2.1 Yleistä biokaasun tuotannosta .....	9
2.2 Biokaasun tuotantoprosessi .....	10
2.2.1 Anaerobisen hajoamisen vaiheet .....	10
2.2.2 Anaerobiseen hajoamiseen vaikuttavat tekijät .....	11
2.2.3 Biokaasun tuotannon prosessivaihtoehdot.....	12
2.3 Biokaasun tuotannossa käytettävät raaka-aineet .....	13
2.3.1 Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaaniset jättemateriaalit .....	13
2.3.2 Maatalouden materiaalit lanta ja kasvintuotannon sivutuotteet.....	13
2.3.3 Energiakasvit .....	14
2.3.4 Biokaasulaitosvaihtoehdot.....	16
2.4 Biokaasun hyödyntäminen lämpönä, sähkönä ja liikennepolttoaineena .....	17
2.4.1 Lämmöntuotanto.....	17
2.4.2 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (CHP) .....	17
2.4.3 Liikennepolttoaineen tuotanto .....	18
2.5 Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen.....	18
2.6 Biokaasun tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset.....	19
2.7 Paikkatietojärjestelmien käyttö biokaasupotentiaalin ja biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinnissa .....	21
2.8 Yleistä tutkimuksen kohdealueesta .....	21
<b>3 AINEISTO JA MENETELMÄT</b> .....	<b>22</b>
3.1 Kotieläinten lukumäärän ja lannantuoton määrittäminen .....	22
3.1.1 Kotieläinten lukumäärä.....	22
3.1.2 Kotieläinten vuosittainen lannantuotto .....	23
3.2 Biokaasun tuotantoon soveltuvan peltopinta-alan ja peltobiomassan määrittäminen.....	25
3.2.1 Peltopinta-ala .....	25
3.2.2 Satotasot.....	25
3.3 Jätevedenpuhdistamoiden lietteiden määrä .....	26
3.4 Yhdyskuntien biojätteen määrä .....	27
3.5 Teollisuuden orgaanisten jätteiden määrä .....	28
3.6 Materiaalien metaanintuottopotentialit.....	29
3.7 Materiaalien typpi- ja fosforipitoisuudet.....	30
3.8 Orgaanisten materiaalien biokaasupotentiaali, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantopotentiali sekä liikennepolttoainepotentiaali.....	31
3.9 Biokaasun käytöllä saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset.....	31
3.10 Keski-Suomen teoreettinen ja tekninen biokaasupotentiaali.....	32
3.11 Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu.....	33
3.11.1 Yleistä biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehdoista .....	33
3.11.2 Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu .....	34
3.11.3 Pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen kuntakohtainen tarkastelu – esimerkkitapauksena Laukaan kunta.....	41
3.12 Biokaasulaitosten lukumäärien ja polttoainetehtojen arviointi .....	42

<b>4 TULOKSET .....</b>	<b>43</b>
4.1 Keski-Suomen teoreettinen biokaasupotentiaali .....	43
4.1.1 Orgaanisten materiaalien teoreettinen kokonaismäärä .....	43
4.1.2 Orgaanisten materiaalien teoreettinen energiapotentiaali.....	45
4.1.3 Orgaanisten materiaalien kokonaistypen ja -fosforin teoreettiset määrät.....	47
4.1.4 Teoreettisen biokaasupotentiaalin käytöllä saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset .....	47
4.2 Keski-Suomen tekninen biokaasupotentiaali .....	48
4.2.1 Orgaanisten materiaalien teknisesti hyödynnettävissä oleva kokonaismäärä.....	48
4.2.2 Orgaanisten materiaalien tekninen energiapotentiaali.....	49
4.2.3 Teknisesti hyödynnettävien orgaanisten materiaalien kokonaistypen ja -fosforin määrät .....	51
4.2.4 Teknisen biokaasupotentiaalin käytöllä saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset.....	51
4.3 Orgaanisten materiaalmäärien perusteella arvioitujen suuren ja pienen kokoluokan biokaasureaktoreiden lukumäärät.....	52
4.4 Biokaasulaitosten sijoittamisvaihtoehtojen tarkastelu Keski-Suomen alueella ...	54
4.4.1 Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu Keski-Suomen alueella .....	54
4.4.2 Suuren kokoluokan biokaasulaitosten (Jyväskylä, Jämsä ja Äänekoski) reaktoritilavuudet ja polttoainetehot.....	56
4.4.3 Pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen kuntakohtainen tarkastelu – esimerkkitapauksena Laukaan kunta.....	57
<b>5 TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>59</b>
5.1 Keski-Suomen teoreettinen biokaasupotentiaali .....	59
5.2 Keski-Suomen tekninen biokaasupotentiaali .....	61
5.3 Keski-Suomen biokaasulaitosten lukumäärät ja sijoitusvaihtoehdot .....	61
5.4 Keski-Suomeen rakennettavien biokaasulaitosten tulevaisuuden visio .....	62
5.5 Peltobioenergian käytön lisäysmahdollisuudet .....	63
5.6 Biokaasupotentiaalin arvioimisen haasteet .....	64
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>65</b>
<b>KIITOKSET.....</b>	<b>65</b>
<b>KIRJALLISUUS.....</b>	<b>65</b>

## LYHENNELUETTELO

CHP	combined heat and power, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
CO <sub>2</sub> -ekv.	hiilidioksidi-ekvivalentti
CSTR	continuously stirred tank reactor, jatkuvatoiminen täyssekoitteinen reaktori
GIS	geographic information system, paikkatietojärjestelmä
HRT	hydraulic retention time, hydraulinen viipymä
MWh <sub>CH<sub>4</sub></sub>	metaanin energiasisältö, megawattitunteina
NH <sub>4</sub> -N	ammoniumtyppi
N <sub>tot</sub>	total nitrogen, kokonaistyyppi
OLR	organic loading rate, orgaanisen aineksen kuormitus
ppm	parts per million, miljoonasosa
SOFC	solid oxide fuel cell, kiinteä oksidi polttokenno
t	metrisen järjestelmän mukainen tonni
TS	total solids, kuiva-aine
VS	volatile solids, hehkutusjäännös, orgaaninen kuiva-aine
Wh	wattitunti
W <sub>polttoaine</sub>	polttoaineteho
W <sub>sähkö</sub>	sähköteho
ww	wet weight, märkäpaino

## 1 JOHDANTO

Euroopan komissio julkisti vuoden 2008 tammikuussa esityksen Euroopan Unionin (EU) yhteisestä ilmasto- ja energiasta. Ilmasto- ja energiasta tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % vuoden 1990 tasosta, lisätä uusiutuvan energian käyttöä 20 %:iin energian loppukulutuksesta ja parantaa energiatehokkuutta vähentämällä energiankulutusta 20 % vuoteen 2020 mennessä (Euroopan komissio 2009). EU:n kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään yksipuolisella sitoumuksella, mutta uusiutuvan energian edistämismäärä jaetaan eri maiden kesken (Työ- ja elinkeinoministeriö 2008). Suomen tavoite on nostaa uusiutuvan energian osuus 28 %:sta energian loppukulutuksesta 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2008).

Uusiutuvilla energialähteillä tarkoitetaan aurinko-, tuuli-, vesi- ja bioenergiaa, maalämpöä sekä aalloista ja vuoroveden liikkeistä saatavaa energiaa. Suomessa merkittävin osuus (90 %) uusiutuvasta energiasta tuotetaan bioenergialla (Työ- ja elinkeinoministeriö 2008), joka käsittää metsissä ja pelloilla kasvavan biomassan sekä yhdyskunnissa, maataloudessa ja teollisuudessa muodostuvan orgaanisen jättemateriaalin. Bioenergian käytön teoreettisista lisäysmahdollisuuksista suurin potentiaali (75 %) on metsistä saatavalla puubiomassalla (Työ- ja elinkeinoministeriö 2007). Puubiomassan lisäksi potentiaalia on myös peltobiomassassa ja lannoissa (12 %) sekä yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien (3 %) hyödyntämisessä.

Peltobiomassasta ja lannasta sekä yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisista jättemateriaaleista voidaan tuottaa uusiutuvaa energiaa esimerkiksi käyttämällä biokaasuteknologiaa. Biokaasun tuotanto perustuu anaerobiseen eli hapettomaan prosessiin, jossa mikrobit hajottavat orgaanista ainesta biokaasuksi, jota voidaan hyödyntää lämpönä, sähköinä tai liikennepolttoaineena (Rasi 2009). Anaerobisessa prosessissa orgaanisten materiaalien sisältämät ravinteet (typpi ja fosfori) säilyvät, ja ne voidaan tapauskohtaisesti kierrättää ja hyödyntää kasvintuotannossa lannoitteena sekä maanparannusaineena (Berglund 2006). Orgaanisista materiaaleista tuotettavan biokaasun lisäksi biokaasua voidaan kerätä kaatopaikoilta, jolloin siitä käytetään nimitystä kaatopaikkakaasu.

Biokaasusta tuotettiin energiaa Suomessa 421 GWh vuonna 2007, mikä vastasi noin 0,7 % uusiutuvan energian tuotannosta (Kuittinen ym. 2008). Suurin osa (66 %) biokaasun energiasta tuotettiin kaatopaikoilta kerätystä kaatopaikkakaasusta. Asplund ym. (2005) ovat arvioineet, että biokaasun tuotannon lisäysmahdollisuus vuoteen 2015 mennessä on Suomessa 2,3 – 3,0 TWh, josta merkittävä osuus (yli 70 %) voidaan tuottaa orgaanisista materiaaleista, kuten peltobiomassasta sekä yhdyskuntien ja teollisuuden jätteistä. Erityisesti peltobiomassasta tuotettavan energian määrä on arviossa huomattava (1,1 TWh).

Keski-Suomessa biokaasusta tuotettiin energiaa 21,3 GWh vuonna 2007 (Kuittinen ym. 2008). Suurin osa (70 %) energiasta tuotettiin Mustankorkea Oy:n kaatopaikkakaasusta, ja loput Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:n jätevesilietteestä (28 %) sekä Erkki Kalmarin pienen kokoluokan biokaasulaitoksessa lannasta, peltobiomassasta ja teollisuuden orgaanisista sivutuotteista (2 %).



Keski-Suomen primäärienergian kokonaiskulutus vuonna 2006 oli 19,4 TWh, josta uusiutuvien energianlähteiden osuus oli 37 % (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Uusiutuvan energian osuuden lisäämiseksi asetettiin maakunnassa 4 TWh:n lisäystavoite vuoteen 2015 mennessä (Paananen 2007). Lisäystavoite koostuu bioenergian käytön tehostamisesta; biokaasun käyttöä on tavoitteena lisätä maatalouden yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa 25 GWh ja liikennepolttoainetuotannossa 25 GWh (Paananen 2007). Keski-Suomessa tulisi olla käynnissä 3 – 5 keskitettyä biokaasulaitosta ja 10 – 20 maatilakokoluokan biokaasulaitosta vuonna 2015, jotta yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon tavoite saavutettaisiin (Paananen 2007). Liikennepolttoainekäytön tavoitteen saavuttaminen edellyttäisi, että maakunnassa muodostuvista biojätteistä tuotettaisiin biokaasua 20 GWh ja jätevesilietteistä 8 GWh (Paananen 2007).

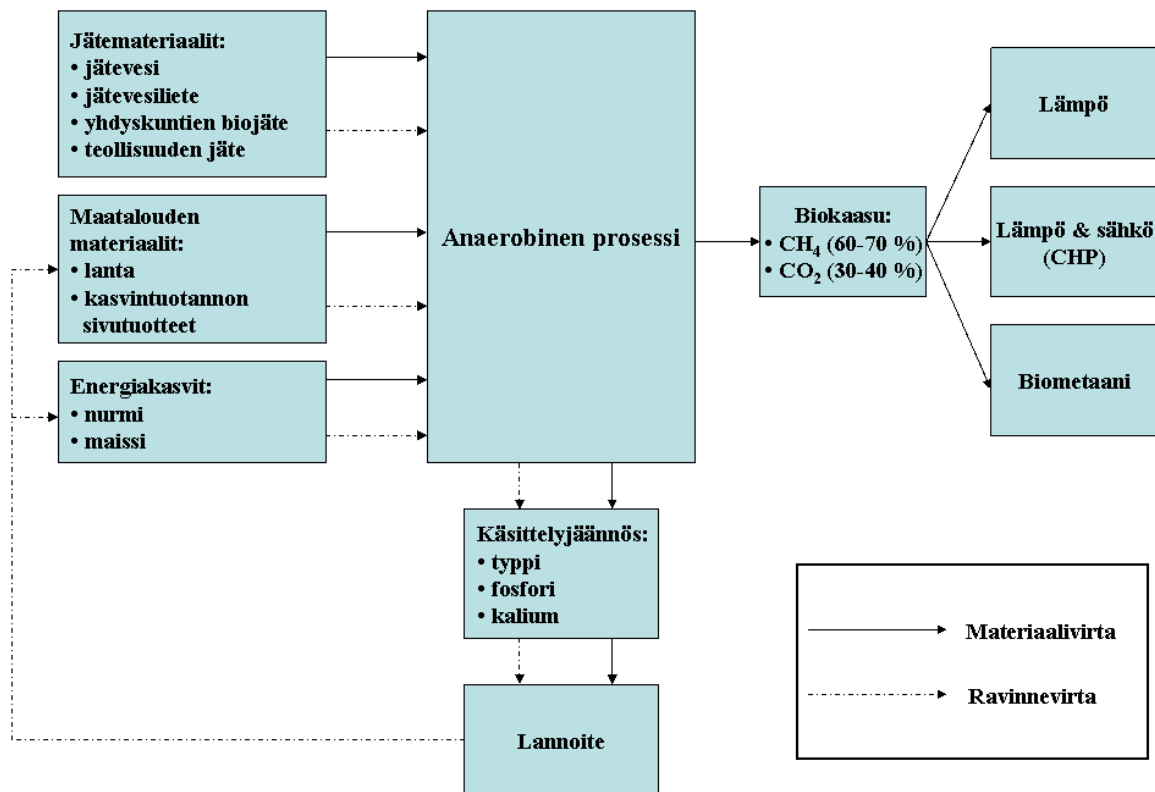
Tämän tutkielman tavoitteena oli arvioida Keski-Suomen alueen biokaasun tuotannon energia- ja ympäristöpotentiaali sekä biokaasulaitosten sopivimmat sijoitusvaihtoehdot maakunnan alueella. Biokaasun tuotantopotentiaalin määrittämisellä vastataan kysymyksiin: kuinka paljon materiaalia biokaasun tuotantoon Keski-Suomessa on käytettävissä, kuinka paljon energiaa voidaan tuottaa tämän materiaalin hyödyntämisestä sekä kuinka paljon ravinteita, eli typpeä ja fosforia, saadaan talteen ja mahdollisesti käytettäväksi kasvintuotannon lannoitteena. Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkasteluun liittyvä tutkimusongelma voidaan tiivistää kysymykseen: mihin biokaasulaitokset kannattaa sijoittaa, jotta laitosten toiminnan ympäristövaikutukset, erityisesti biokaasulaitoksissa käytettävien materiaalien kuljetusetaisyydet, minimoituisivat.

## 2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

### 2.1 Yleistä biokaasun tuotannosta

Biokaasua voidaan tuottaa erilaisista orgaanisista raaka-aineista: yhdyskunnissa ja teollisuudessa muodostuvista jättemateriaaleista, maatalouden materiaaleista ja/tai biokaasun tuotantoa varten viljeltävistä energiakasveista, kuten nurmesta tai maissista (kuva 1). Anaerobisessa (hapettomassa) prosessissa mikrobit hajottavat orgaanista materiaalia biokaasuksi, joka sisältää noin 60 – 70 % metaania (CH<sub>4</sub>), 30 – 40 % hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>), vesihöyryä (H<sub>2</sub>O) sekä erilaisia epäpuhtauksia, kuten rikkivetyä (H<sub>2</sub>S) ja ammoniakkiä (NH<sub>3</sub>) (Rasi 2009). Biokaasusta voidaan tuottaa lämpöä, sähköä sekä liikennepolttoainetta (biometaani). Biokaasun lisäksi anaerobisessa prosessissa muodostuu hajoamatonta orgaanista materiaalia (käsittelyjäännös), joka sisältää myös biokaasun tuotantoon käytettävien orgaanisten raaka-aineiden sisältämät ravinteet, muun muassa typen, fosforin ja kaliumin (Berglund 2006). Ravinteet saadaan kokonaisuudessaan talteen ja ne voidaan tapauskohtaisesti kierrättää pellolle ja hyödyntää kasvintuotannossa lannoitteena.

Biokaasun tuotanto voidaan käsittää sekä jätteenkäsittely- että energiantuotantoprosessina. Biokaasua hyödyntämällä voidaan korvata fossiililla polttoaineilla tuotettua lämpöä tai sähköä sekä fossiilisia liikennepolttoaineita. Ravinteiden kierrätys vähentää kemiallisten lannoitteiden käyttöä, ja siten niiden valmistukseen käytettäviä fossiilisia polttoaineita (Lantz ym. 2007).

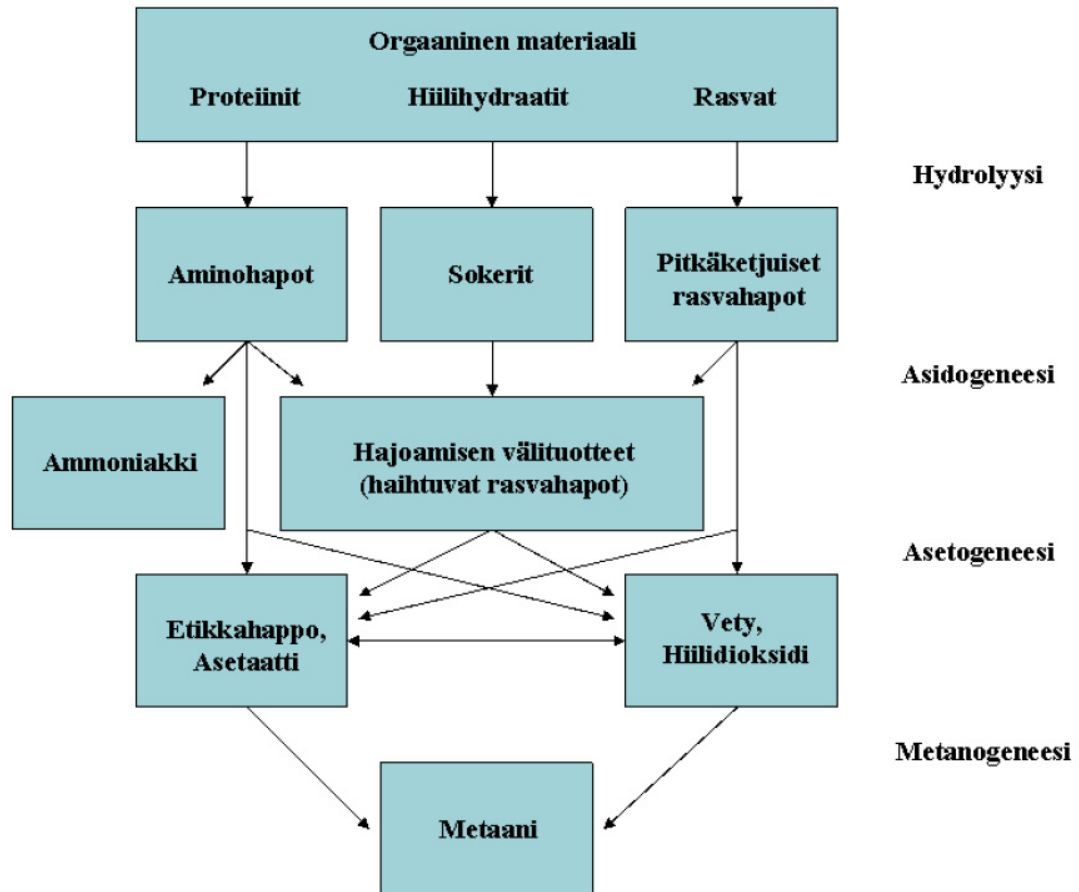


Kuva 1. Biokaasun tuotannon materiaali- ja ravinnevirrat.

## 2.2 Biokaasun tuotantoprosessi

### 2.2.1 Anaerobisen hajoamisen vaiheet

Anaerobinen hajoaminen perustuu hapettomissa olosuhteissa toimiviin mikrobipopulaatioihin (Mata-Alvarez 2003) ja se jakautuu neljään vaiheeseen: hydrolyysiin, asidogeneesiin eli happovaiheeseen, asetogeneesiin ja metanogeneesiin (kuva 2) (Appels ym. 2008). Hydrolyysissä orgaanisen materiaalin yhdisteet, kuten proteiinit, hiilihydraatit ja rasvat, hajoavat yksinkertaisemmiksi liukoiksi yhdisteiksi haponmuodostajabakteerien erittämien entsyymien vaikutuksesta (Mata-Alvarez 2003). Asidogeenin fermentatiiviset bakteerit hajottavat hydrolyysivaiheen tuotteita (aminohapot, sokerit ja pitkäketjuiset rasvahapot) edelleen haihtuviksi rasvahapoiksi. Asetogeenissä vetyä tuottavat bakteerit hajottavat muodostuneet rasvahapot asetaatiksi, hiilidioksidiksi ja vedyksi. Anaerobisen hajoamisen viimeisessä vaiheessa, eli metanogeenissä, metaaninmuodostajabakteerit eli metanogeenit tuottavat asetaatista tai vedystä ja hiilidioksidista metaania.



Kuva 2. Anaerobisen hajoamisen tärkeimmät vaiheet ja välituotteet (Gujer & Zehnder 1983).

### 2.2.2 Anaerobiseen hajoamiseen vaikuttavat tekijät

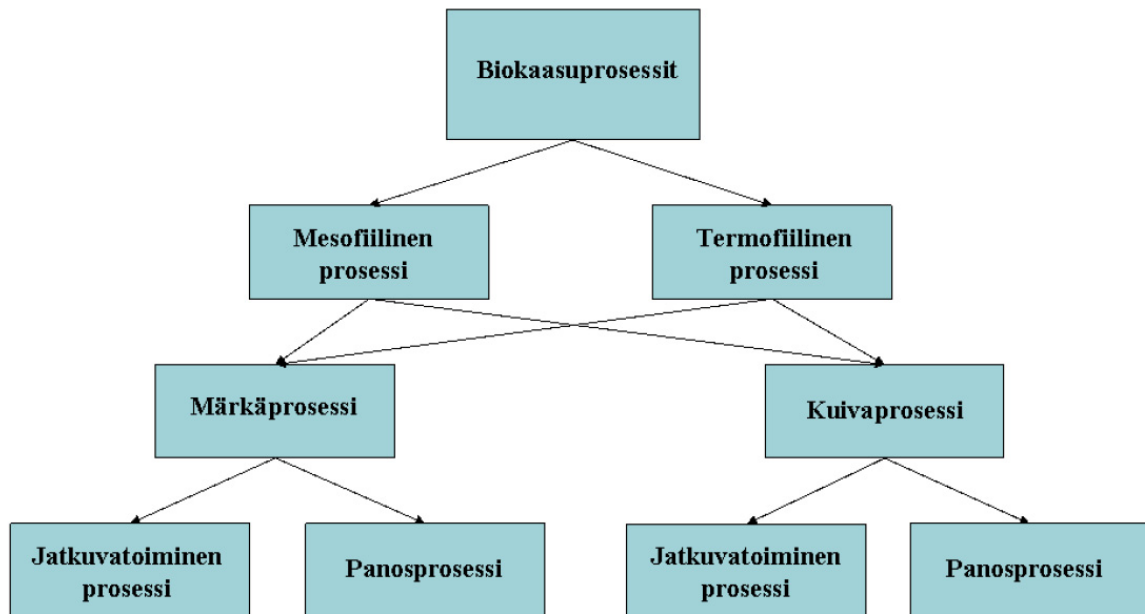
Anaerobiseen hajoamiseen osallistuvat mikrobipopulaatiot ovat riippuvaisia ympäristöolosuhteista, kuten pH:sta ja lämpötilasta (Mata-Alvarez 2003). Optimimaaliset pH-olosuhteet vaihtelevat; hydrolyysiin ja asidogeneesiin osallistuvien mikrobien optimaalinen pH-alue on 5,5 – 6,5, ja metanogeenien 6,8 – 7,2 (Ward ym. 2008). Anaerobiseen hajoamiseen osallistuvat mikrobipopulaatiot toimivat laajalla lämpötila-alueella: psykrofiilissä (alle 20 °C), mesofiilissä (30 – 37 °C) ja termofiilissä (55 – 65 °C) olosuhteissa (Berglund 2006). Biokaasun tuotantoon optimaalisimmat toimintalämpötilat ovat noin 35 °C ja noin 55 °C (Mata-Alvarez 2003).

Orgaanisten materiaalien anaerobinen hajoaminen riippuu pH:n ja lämpötilan lisäksi ajasta, jonka raaka-aineet viipyvät biokaasureaktorissa. Pitkä viipymäaika (*hydraulic retention time*, HRT) tarkoittaa orgaanisen materiaalin täydellisempää hajoamista ja korkeampaa biokaasuntuottoa, mutta vaatii suuremman biokaasureaktorin koon (Al Seadi ym. 2008). Orgaanisen kuorman (*organic load*, OLR) suuruudella voidaan mitoittaa biokaasureaktorin koko. Orgaaninen kuorma kuvaa biokaasureaktoriin päivittäin syötettävän orgaanisen materiaalin (*volatile solids*, VS) määrää reaktorin nestetilavuutta kohden ja se lasketaan (kaava 1) (Wellinger 1999):

$$\text{Orgaaninen kuorma (kg VS/m}^3\text{d)} = \frac{\text{Orgaanisen materiaalin määrä päivässä (kg VS/d)}}{\text{Biokaasureaktorin nestetilavuus (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

### 2.2.3 Biokaasun tuotannon prosessivaihtoehdot

Biokaasun tuotannon prosessitekniikat voidaan luokitella märkä- ja kuivaprosesseihin, joita voidaan operoida sekä mesofiilisisä että termofiilisisä prosessiolosuhteissa (kuva 3) (Weiland 2009b).



Kuva 3. Biokaasun tuotannon tyypilliset prosessivaihtoehdot (Weiland 2003, muokattu).

Märkäprosessissa voidaan hyödyntää sekä nestemäisiä että kiinteitä orgaanisia materiaaleja (Weiland 2006). Niissä käytetään tyypillisesti vertikaalisia jatkuvatoimisia ja -sekoitteisia reaktoreita (CSTR, *continuously stirred tank reactor*), minkä vuoksi biokaasureaktoriin syötettävän materiaalin kuiva-ainepitoisuus voi olla enintään 10 – 13 % (Weiland 2003). Jatkuvatoimisessa prosessissa reaktoriin lisätään normaalisti kerran päivässä materiaalimäärä, joka vastaa reaktorista poistettavan materiaalin määrää (Berglund 2006). Reaktorin sisältöä sekoitetaan, jotta esimerkiksi mikrobit leviäisivät tasaisemmin käsiteltävään materiaaliin ja lämpötilaerot tasoittuisivat reaktorin eri kohdissa (Weiland 2009b).

Kuivaprosessissa voidaan hyödyntää ainoastaan kiinteitä orgaanisia materiaaleja, joiden kuiva-ainepitoisuus on yleensä yli 20 % (Weiland 2006). Kuivaprosessia voidaan soveltaa esimerkiksi yhdyskuntien biojätteen käsittelyyn, mutta yhtä lailla kotieläinten lantojen ja energiakasvien käsittelemiseen (Weiland 2003, 2006). Kuivaprosessissa käytetään tyypillisesti jatkuvatoimisia reaktoreita, jotka toimivat tulppavirtausperiaatteella (Weiland 2003). Tulppavirtausreaktoreissa käsiteltävä materiaali liikkuu reaktorissa eteenpäin joko reaktoria sekoittamalla (vertikaalinen reaktori) tai painovoiman avulla (horisontaalinen reaktori).

Kiinteiden orgaanisten materiaalien käsittelemiseen voidaan käyttää myös reaktoreita, jotka toimivat panosperiaatteella (Weiland 2009b). Panosprosessissa materiaalit syötetään reaktoriin ja poistetaan reaktorista yhdellä kertaa (Berglund 2006). Reaktorissa

muodostuvaa suotovettä kierrätetään käsiteltävän materiaalin läpi, jotta mikrobit, hajoamistuotteet ja lämpötila jakautuisivat tasaisemmin käsiteltävään materiaaliin (Weiland 2006).

Jatkuvatoimiset prosessit ja panosprosessit voivat olla lisäksi joko yksi- tai kaksivaiheisia (Berglund 2006), jolloin anaerobisen hajoamisen vaiheet, kuten hydrolyysi ja metanogeneesi, tapahtuvat eri reaktoreissa (Weiland 2009b). Esimerkiksi jatkuvatoiminen märkäprosessi voi koostua kahdesta reaktorista, jolloin käytettävä materiaali hajoaa pääasiassa ensimmäisessä reaktorissa (Weiland 2003). Materiaalin ominaisuuksista ja prosessiolosuhteista riippuen noin 5 – 15 % biokaasusta voi kuitenkin muodostua jälkikaasutusreaktorissa.

Kuivaprosessien etuna märkäprosesseihin verrattuna on yksinkertainen prosessitekniikka (Weiland 2003). Kuivaprosessin operointi on kuitenkin märkäprosessia vaikeampaa, minkä vuoksi sen hallittavuus ja ennustettavuus ovat hankalampia (Weiland 2009b).

## **2.3 Biokaasun tuotannossa käytettävät raaka-aineet**

### **2.3.1 Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaaniset jätemateriaalit**

Biokaasun tuotannossa voidaan hyödyntää monia hiilihydraateista, proteiineista, rasvoista, selluloosasta tai hemiselluloosasta koostuvia raaka-aineita, mutta ligniiniä sisältävät materiaalit (esimerkiksi puu) eivät sovellu biokaasun tuotantoon hitaan anaerobisen hajoamisen vuoksi (Weiland 2009b).

Biokaasun tuotantoon voidaan käyttää yhdyskunnissa ja teollisuudessa muodostuvia jätemateriaaleja. Yhdyskunnissa muodostuvista jätemateriaaleista voidaan hyödyntää esimerkiksi jätevedenpuhdistamoiden lietettä ja biojätettä (Paavola ym. 2006). Esimerkiksi Euroopassa jätevesien aerobisessa käsittelyssä muodostuvasta primääri- ja sekundäärilietteestä käsitellään anaerobisesti noin 30 – 70 % (Al Seadi ym. 2008). Yhdyskuntien biojätteen metaanintuottopotentiaali on korkea (500 – 600 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS) (Lehtomäki ym. 2007b), minkä vuoksi se soveltuu hyvin biokaasun tuotantoon. Biojäte täytyy kuitenkin esikäsitellä, koska se voi sisältää 30 – 90 % epäpuhtauksia, kuten muovia, lasia tai metallia, syntypaikkalajittelusta riippuen (Weiland 2000, Pöyry Environment 2009).

Monilla teollisuuden aloilla, kuten elintarvike- ja metsäteollisuudessa, muodostuu erilaisia orgaanisia jätejakeita, joita voidaan myös hyödyntää biokaasun tuotannossa (Braun & Wellinger 2003). Elintarviketeollisuudessa orgaanisia jätejakeita muodostuu esimerkiksi teurastamoissa, leipomoissa, panimoissa tai makeistehtaissa. Näitä jätejakeita voidaan käyttää biokaasun tuotantoon hyvän anaerobisen hajoavuuden vuoksi (Braun & Wellinger 2003). Sellu- ja paperitehtaiden jätevesien aerobisessa puhdistamisessa muodostuvia primääri- ja sekundäärilietteitä voidaan hyödyntää myös biokaasun tuotannossa (Rintala & Puhakka 1994).

### **2.3.2 Maatalouden materiaalit lanta ja kasvintuotannon sivutuotteet**

Maataloudessa muodostuvista materiaaleista kotieläinten (nautaeläimet ja siat) tuottama lanta soveltuu biokaasun tuotantoon osin hyvän anaerobisen hajoavuuden, mikrobeille tärkeiden ravinteiden sekä korkean puskurikapasiteetin vuoksi (Lehtomäki ym. 2007b). Anaerobiseen hajoamiseen vaikuttavat lannan ominaisuudet, jotka vaihtelevat

eläinlajeittain ja riippuvat esimerkiksi eläimen ruokavaliosta, iästä, tuotantosunnasta sekä käytettävästä lannankäsittelymenetelmästä (American Society of Agricultural Engineers 2003). Esimerkiksi nautaeläinten tuottaman lannan biokaasuntuottopotentiaali on sikojen ja siipikarjan lantoja pienempi, koska suurin osa ravinnon sisältämästä hiilestä hajoaa nautaeläinten ruuansulatuskanavassa ja pötsissä (Amon ym. 2007b).

Lanta soveltuu biokaasun tuotantoon myös hyvän saatavuuden vuoksi (Gerin ym. 2008). Suomessa lanta täytyy varastoida siten, että lannan varastointitilavuus riittää 12 kuukauden aikana muodostuvalle lannalle lukuun ottamatta samana laidunkautena eläinten laidunnuksen yhteydessä laitumelle jäävää lantaa (Ympäristöministeriö 2009). Lannan varastointiin vaikuttaa lannankäsittelymenetelmä. Lantaa voidaan käsitellä kolmella eri menetelmällä: lietelanta-, kuivalanta- ja kuivikelantamenetelmällä (Ympäristöministeriö 2009). Lietelantamenetelmässä lanta ja virtsa sekoittuvat keskenään, ja muodostuva liete varastoidaan lietesäiliössä. Kuivalantalassa virtsa erotetaan lannasta, ja virtsa varastoidaan erillisessä virtsasäiliössä. Kuivikelantamenetelmässä virtsaa ei johdeta erilliseen virtsasäiliöön, vaan virtsa imeytetään kuivikkeisiin.

Lannan ominaisuuksien lisäksi kuivikkeiden käyttö vaikuttaa lannan anaerobiseen hajoamiseen (Möller ym. 2004). Kuivikkeena voidaan käyttää puupohjaisia kuivikkeita, kuten kutterinlastua ja sahanpurua, tai kasvipohjaisia kuivikkeita, kuten olkea ja turvetta (Mikkola ym. 2002, Airaksinen 2006). Kutterinlastua ja sahanpuru sisältävät ligniiniä, jonka vuoksi näiden kuivikkeiden anaerobinen hajoaminen on kasvipohjaisia kuivikkeita heikompaa. Oljen kuivikekäytön on todettu kasvattavan lannan biokaasun tuotantoa (Möller ym. 2004). Kuivikkeiden määrä ja laatu vaihtelevat kotieläinten välillä. Esimerkiksi nautaeläimillä ja sioilla käytetään yleensä olkea, turvetta tai kutterinlastua (Mikkola ym. 2002). Siipikarjalla, muun muassa munivilla kanoilla ja broilereilla, voidaan käyttää olkea, turvetta tai sahanpurua (Mikkola ym. 2002). Hevosien lannasta noin 60 – 80 % on kuiviketta, ja kuivikkeena voidaan käyttää kutterinlastua, sahanpurua, turvetta tai olkea (Airaksinen 2006).

Biokaasun tuotannossa voidaan hyödyntää kasvintuotannossa sivutuotteena muodostuvaa kasvibiomassaa, kuten olkea tai sokerijuurikkaan naatteja (Lehtomäki 2006). Suomessa oljen potentiaali olisi biokaasun tuotannossa suuri. Olkea voitaisiin hyödyntää noin 1,9 milj. t TS, jos oletetaan, että viljaa viljeltäisiin 1,2 milj. ha, että oljen sato olisi noin 2 t TS/ha ja että 20 % olkisadosta arvioitaisiin käytettävän kotieläinten kuivikkeena (Mäkinen ym. 2006).

### 2.3.3 Energiakasvit

European Biomass Association (2009) arvioi, että EU:n alueella voitaisiin käyttää bioenergian tuotantoon noin 20 % maanviljelysmaasta (108,6 milj. ha) ja biokaasun tuotantoa varten viljeltävien energiakasvien tuotantoon noin 5 % maanviljelysmaasta vuonna 2020. Eri maissa tehdyissä tutkimuksissa on todettu, että biokaasun tuotannon suurin potentiaali on energiakasvien käytössä. Esimerkiksi Saksassa on arvioitu, että energiakasveista voitaisiin tuottaa noin 57 % biokaasulla tuotettavasta primäärienergiasta (116 TWh), jos 10 % maanviljelysmaasta käytettäisiin biokaasun tuotantoon (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2009).

Suomessa pellon käytön lähtökohtana on suomalaisen ruokaketjun kotimaisen raaka-aineen saannin turvaaminen (Vainio-Mattila ym. 2005). Pellon käyttöön vaikuttavat monet tekijät, kuten viljan ja nurmen käyttösuhde eläinten rehuna sekä kotimaisen bioenergian ja -polttoaineiden raaka-aineiden tuotannossa tapahtuva kehitys. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT) on arvioinut, että Suomen peltoalasta (yhteensä 2,2 milj. ha) voitaisiin käyttää tarvittaessa 500 000 ha peltobioenergian tuotantoon ilman, että ruoan tai rehun tuotantoa vaarannettaisiin (Vainio-Mattila ym. 2005).

Biokaasun tuotannossa voidaan hyödyntää erilaisia kasveja, jotka on viljelty energiantuotantoa varten. Perinteisiä rehuntuotantoon viljeltäviä kasvilajikkeita ovat monivuotiset heinäkasvit, kuten timotei (*Phleum pratense*), ja monivuotiset hernekasvit, kuten puna-apila (*Trifolium pratense*), jotka soveltuvat myös biokaasun tuotantoon helpon viljeltävyyden, korkean biomassan tuottavuuden sekä hyvän anaerobisen hajoavuuden vuoksi (Lehtomäki 2006). Näiden lajikkeiden soveltuvuutta biokaasun tuotantoon lisäävät maanviljelijöiden tuntemus kasvilajikkeista sekä kasvilajien sopivuus olemassa oleviin korjuu- ja varastointimenetelmiin. Viljakasveista erityisesti maissi on tärkeä biokaasun tuotannossa käytettävä materiaali erityisesti Keski-Euroopassa. Esimerkiksi Saksassa maissia käytettiin lannan ohella pienen kokoluokan biokaasulaitoksien raaka-aineena 80 %:ssa biokaasulaitoksista vuosina 2002 – 2004 (Weiland 2006).

Biokaasun tuotannossa hyödynnettävien energiakasvilajikkeiden tärkein ominaisuus on nettoenergiasaanto hehtaaria kohden (Lehtomäki 2006), johon vaikuttavat biomassan saanto hehtaarilta (t TS/ha), metaanintuottopotentiaali ( $m^3 CH_4/t VS$ ) sekä viljelyyn käytetyt energiapanokset. Energiakasvin saanto hehtaarilta riippuu kasvilajikkeesta ja paikallisista kasvuolosuhteista (Amon ym. 2007a) (taulukko 1). Metaanintuottopotentiaaliin vaikuttaa kasvilajikkeen kemiallinen koostumus (Amon ym. 2007a), joka vaihtelee kasvilajikkeiden, kasvien iän, kasvuolosuhteiden sekä lannoituksen mukaan (Seppälä ym. 2009). Metaanintuottoon voidaan vaikuttaa myös korjuuajankohdan valinnalla, säilöntäaineiden käytöllä varastoinnissa sekä kasvilajikkeiden esikäsittelyllä (Lehtomäki 2006).

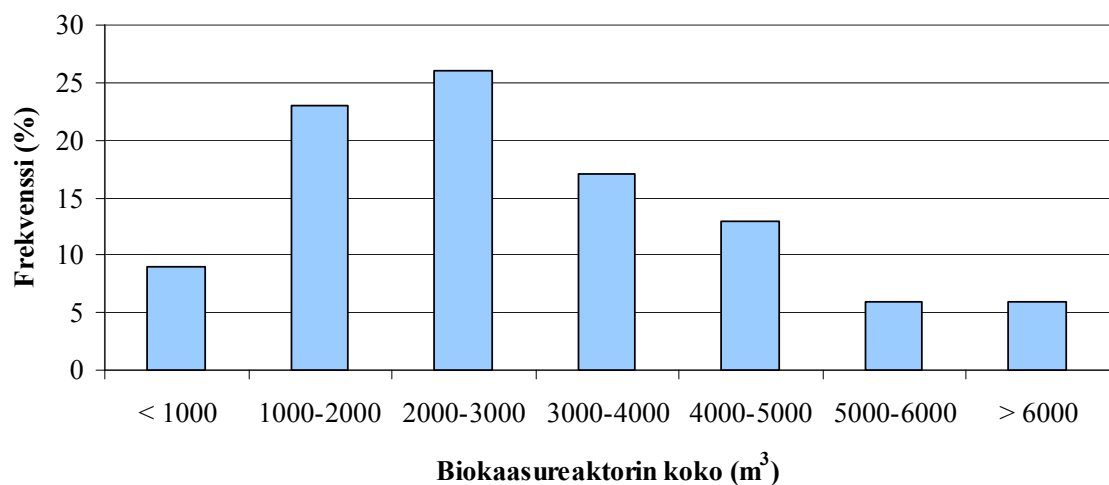
Taulukko 1. Esimerkkejä energiakasvien hehtaari- ja energiasaannoista.

Energiakasvi	Hehtaarisaa- nto t TS/ha	Bruttoenergiasaanto MWh/ha	Lähteet
Maissi	9 – 30	36 – 185	Braun ym. 2009
Maissi	12 – 18	38 – 55	Pyykkönen 2009
Nurmi	12 – 14	36 – 65	Braun ym. 2009
Puna-apila	5 – 19	15 – 67	Braun ym. 2009

Biomassasaannon ja metaanintuottopotentiaalilin perusteella voidaan laskea energiakasvilajikkeen bruttoenergiasaanto hehtaaria kohden (MWh/ha), josta nettoenergiasaanto saadaan vähentämällä viljelyyn käytetyt energiapanokset (Seppälä ym. 2009). Energiapanokset koostuvat esimerkiksi työkoneiden polttoaineiden kulutuksesta ja kemiallisten lannoitteiden käytöstä (Gerin ym. 2008). Viljelyyn käytetyn energiapanoksen täytyy olla pienempi kuin energiakasveista tuotetun energian määrä, jotta energiakasvien tuotanto olisi ympäristön kannalta kestävä (Gerin ym. 2008). Nettoenergiasaantoon voidaan vaikuttaa vuoroviljelyn avulla, jolloin saavutetaan vähemmällä panoksilla suurempi tuotto (Weiland 2006).

### 2.3.4 Biokaasulaitosvaihtoehdot

Biokaasua voidaan tuottaa erilaisista orgaanisista raaka-aineista eri kokoisissa biokaasulaitoksissa. Maataloudessa muodostuvia materiaaleja, eli lantaa ja kasvintuotannon sivutuotteita, sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltäviä energiakasveja hyödynnetään yleisesti pienen kokoluokan biokaasulaitoksissa (Al Seadi ym. 2008). Pienen kokoluokan biokaasulaitoksien reaktorikoot ja käytettävät prosessiteknologiat vaihtelevat. Esimerkiksi Saksassa pienen kokoluokan biokaasulaitoksia on alle 1000 m<sup>3</sup>:n reaktoreista yli 6000 m<sup>3</sup>:n reaktoreihin (kuva 4). Yhden maatalon yhteydessä toimivassa biokaasulaitoksessa käsitellään yleensä samalla maatilalla muodostuvia ja tuotettavia orgaanisia materiaaleja, esimerkiksi suuren sikatilan tuottamaa lantaa (Holm-Nielsen ym. 2007). Keskitetyssä biokaasulaitoksessa hyödynnetään monella maatilalla muodostuvia ja tuotettavia orgaanisia raaka-aineita, jolloin keskitettyjen biokaasulaitosten kokoluokka on yleensä yhden maatalon yhteydessä toimivan biokaasulaitoksen kokoa suurempi.



Kuva 4. Saksan noin 4000 pienen kokoluokan biokaasureaktorin kokojakauma (Weiland 2009a, muokattu).

Pienen kokoluokan biokaasulaitoksia on toiminnassa Euroopassa eniten Saksassa, Itävallassa ja Tanskassa (Holm-Nielsen ym. 2007). Esimerkiksi Saksassa niitä oli noin 4000 ja Itävallassa noin 350 vuonna 2008 (Weiland 2009a, Braun 2009). Euroopassa pienen kokoluokan biokaasulaitosten käyttämät raaka-aineet koostuvat pääasiassa joko nautaeläinten tai sian lannasta, mutta energiakasvien käyttö on kasvussa. Saksan pienen kokoluokan biokaasulaitoksista noin 83 % käytti raaka-aineenaan energiakasveja ja lantaa, noin 15 % yksinomaan energiakasveja ja noin 2 % pelkästään lantaa vuosina 2005 – 2007 (Weiland 2009a).

Yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaalien käyttöä pienen kokoluokan biokaasulaitoksissa ohjaavat lainsäädäntö jäteperäisten materiaalien hyödyntämisestä biokaasun tuotannossa sekä haitallisten yhdisteiden ja patogeeniin leviämisen estämisestä (Gerin ym. 2008). Yksi tapa on käsitellä jätevedenpuhdistamoiden lietteet, yhdyskuntien biojätteet sekä teollisuuden orgaaniset jätemateriaalit maatalouden materiaaleista ja biokaasun tuotantoa varten viljeltävistä energiakasveista erillään (Al Seadi ym. 2008). Esimerkiksi jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä sijaitsevilla biokaasureaktoreilla voidaan hyödyntää yhdyskuntien biojätettä, jolloin käsiteltävien materiaalien biokaasun tuotanto ja käsittelyjännöksen laatu paranevat (Weiland 2000).



## 2.4 Biokaasun hyödyntäminen lämpönä, sähköinä ja liikennepolttoaineena

### 2.4.1 Lämmöntuotanto

Biokaasusta voidaan tuottaa lämpökattilassa lämpöä, jolloin tuotetun energian hyötysuhde on 90 % (Appels ym. 2008). Lämmöntuotantoa varten hyödynnettävällä biokaasulla ei ole suuria puhdistusvaatimuksia. Kaasun kuivausta suositellaan, jotta kattilan pinnoilla korroosiota aiheuttavan rikkivedyn pitoisuus saataisiin laskemaan alle 1000 ppm:n (Wellinger & Lindberg 2000). Lämpökattilassa tuotettua lämpöä voidaan hyödyntää ensisijaisesti biokaasureaktorin lämmittämiseen (Berglund 2006). Lämmön käyttö voi olla rajoitettua etenkin kesäisin (lämmön tarve on pienimmillään), minkä vuoksi lämmön syöttäminen kaukolämpöverkkoon olisi varmempi lämmön hyödyntämisvaihtoehto. Tämä varmistaisi biokaasun hyödyntämisen kokonaisuudessaan, jolloin biokaasua ei tarvitsisi polttaa soihdussa.

### 2.4.2 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (CHP)

Yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon voidaan käyttää kaasumootoreita, suuren kokoluokan kaasuturbiineita, mikrokaasuturbiineita, polttokennoja tai Stirling-koneita (Weiland 2003, Berglund 2006). Energiantuotannon hyötysuhteet vaihtelevat biokaasulaitoksen koon ja käytettävän tekniikan perusteella, mutta yleensä sähköntuotannon hyötysuhde on noin 30 – 40 % ja lämmöntuotannon noin 50 % (Berglund 2006). Sähköntuotannon ohella lämmön hyödyntäminen on tärkeää, koska tällöin kokonaishyötysuhde voi nousta 90 %:iin. Yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa biokaasun puhdistusvaatimukset ovat yleensä korkeammat kuin lämmöntuotannossa (Berglund 2006). Biokaasun kuivauksen ja rikkivedyn pitoisuuden vähentämisen lisäksi biokaasusta tulisi erottaa hiukkaset, halogenoidut hiilivedyt sekä jossakin tapauksessa myös siloksaanit (Wellinger & Lindberg 2000, Berglund 2006).

Kaasumootorit soveltuvat yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotantoon niiden kestävyiden ja toimintavarmuuden vuoksi (Wellinger & Lindberg 2000). Kaasumootoreiden kokoluokat vaihtelevat noin 12 kW<sub>sähkö</sub> useisiin MW<sub>sähkö</sub>:hin, ja käytössä on sekä puristus- että kipinäsytytteisiä kaasumootoreita. Puristus- ja kipinäsytytteisessä kaasumootorissa kaasun ja ilman seos sytytetään nestemäisen polttoaineen avulla, esimerkiksi dieselillä, jonka osuus voi olla noin 8 – 10 % moottoriin syötettävästä kokonaispolttoainetehosta (Raiko ym. 2002, Weiland 2003). Puristus- ja kipinäsytytteisten kaasumootoreiden sähköntuotannon hyötysuhde on 33 – 38 % ja niitä käytetään yleensä yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa, kun sähköntuotannon teho on alle 200 – 250 kW (Weiland 2003). Kipinäsytytteisessä kaasumootorissa sytytykseen käytetään sytytystulppaa (Raiko ym. 2002). Kipinäsytytteisten kaasumootoreiden sähköntuotannon hyötysuhde on yleensä alle 35 % ja niitä käytetään yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa, kun sähköntuotannon teho on suurempi kuin 250 kW (Weiland 2003).

Biokaasusta voidaan tuottaa sähköä myös suuren kokoluokan kaasuturbiinilla tai mikrokaasuturbiinilla. Suuren kokoluokan kaasuturbiineja on käytössä 100 kW<sub>sähkö</sub> kokoluokasta lähtien (Appels ym. 2008). Niiden sähköntuotannon hyötysuhde on samaa luokkaa kaasumootorin hyötysuhteen kanssa vasta yli 800 kW<sub>sähkö</sub> kokoluokasta alkaen (Wellinger & Lindberg 2000). Mikrokaasuturbiinit soveltuvat pienempään kokoluokkaan (25 – 100 kW<sub>sähkö</sub>) (Appels ym. 2008, Weiland 2003), mutta mikrokaasuturbiinien sähköntuotannon hyötysuhde on alhaisempi verrattuna kaasumootoreiden hyötysuhteisiin.

(Weiland 2003). Sähköntuotannon ohella kaasuturbiineilla voidaan tuottaa myös höyryä (Wellinger & Lindberg 2000, Weiland 2003) tai lämmönsiirtimien avulla lämpöä. Hyödyntämällä lämpöä saadaan energiantuotannon kokonaishyötysuhde korkeammaksi.

Biokaasu voidaan muuntaa elektrokemiallisesti suoraan sähköksi ja lämmöksi polttokennoilla (Sammes ym. 2005). Biokaasun käytölle soveltuu parhaiten korkean lämpötilan (550 – 1000 °C) vaativa kiinteä oksidi polttokenno (*solid oxide fuel cell*, SOFC), jolloin voidaan hyödyntää sähköntuotannon ohella myös prosessissa muodostuva lämpö. Polttokennoilla voidaan polttoaineesta tuottaa sähköä korkealla hyötysuhteella (40 – 60 %), koska prosessissa hyödynnetään suoraan polttoaineen sisältämä energia.

#### 2.4.3 Liikennepolttoaineen tuotanto

Biokaasua voidaan hyödyntää lämmön- ja sähköntuotannon lisäksi kaasukäyttöisten ajoneuvojen polttoaineena. Liikennepolttoainekäyttö edellyttää kaasulta sekä korkeaa energiasisältöä että puhtausvaatimuksia, minkä vuoksi raaka biokaasu puhdistetaan liikennepolttoaineeksi soveltuvaksi biometaaniksi (Wellinger & Lindberg 2000). Biometaanin vaatimuksena on monissa maissa yleensä yli 95 %:n metaanipitoisuus (Wellinger & Lindberg 2000), joka saavutetaan biokaasun kuivauksella sekä hiilidioksidin, rikkivedyn, partikkeleiden ja muiden haitallisten yhdisteiden, kuten siloksaanien ja halogenoitujen hiilivetyjen, puhdistuksella.

Biokaasun puhdistuksessa liikennepolttoainekäyttöön voidaan käyttää samoja puhdistustekniikoita vesihöyryn ja korroosiota aiheuttavien yhdisteiden erottamiseen kuin lämmön- ja sähköntuotannossa hyödynnettävän biokaasun puhdistuksessa. Biokaasun kuivauksella estetään biometaanin muussa tapauksessa sisältämän vesihöyryn tiivistyminen ja jäätyminen kylmissä käyttöolosuhteissa (Wellinger & Lindberg 2000). Kaasun varastosäiliöissä sekä moottoreissa korroosiota aiheuttavien yhdisteiden, kuten rikkivedyn, halogenoitujen hiilivetyjen sekä siloksaanien, poistaminen perustuu lämmön- ja sähköntuotannon tavoin materiaalien käyttöikien pidentämiseen. Biometaanin metaanipitoisuutta ja siten energiasisältöä voidaan kasvattaa erottamalla biokaasusta hiilidioksidi esimerkiksi vesipesulla tai kalvotekniikoilla (Wellinger & Lindberg 2000).

Biokaasun puhdistuksen lisäksi biometaanin paineistetaan liikennekäyttöä varten (Berglund 2006). Biometaanin jakelu voidaan suorittaa tankkausasemilla tai raskaalle ajoneuvoille tarkoitetuilla hitailla tankkauspisteillä. Biokaasun puhdistuksessa muodostuu häviöitä esimerkiksi käytettävän prosessiteknologian tai vuotojen vuoksi (Berglund 2006). Häviöt ovat yleensä alle 2 % tuotetun biokaasun määrästä, mutta häviöiden vaihtelut voivat olla suuria (0,4 – 4,0 %) (Berglund 2006).

### 2.5 Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen

Biokaasun tuotannossa muodostuvaa hajoamatonta orgaanista materiaalia kutsutaan käsittelyjäännökseksi, joka sisältää biokaasuprosessiin käytettävien materiaalien sisältämät ravinteet (typpi, fosfori ja kalium) (Berglund 2006). Ravinteiden talteenoton lisäksi biokaasuprosessissa parantuvat käsittelyjäännöksen sisältämien ravinteiden, erityisesti typen, lannoiteominaisuudet; orgaaniseen ainekseen sitoutunut typpi hajoaa mineralisoituen osittain vesiliukoiseksi ammoniumtypeksi, jota kasvit voivat käyttää paremmin hyödykseen.

Lannoiteominaisuuksien vuoksi käsittelyjännös voidaan tapauskohtaisesti käyttää kasvintuotannossa lannoitteena ja maanparannusaineena (Berglund 2006). Esimerkiksi yhdyskunnissa ja teollisuudessa muodostuvien jättemateriaalien sisältämät ravinteet voidaan ohjata paremmin hyötykäyttöön, jolloin voidaan saavuttaa lähes suljettu ravinteiden kierto yhdyskuntien ja maatalouden välillä (Lantz ym. 2007). Käsittelyjännöstä voidaan hyödyntää myös maanparannusaineena. Sen sisältämä hajoamaton orgaaninen materiaali parantaa maaperän rakennetta, jolloin esimerkiksi maaperän kuohkeus, ilmavuus ja vedenpitävyys lisääntyvät (Berglund 2006).

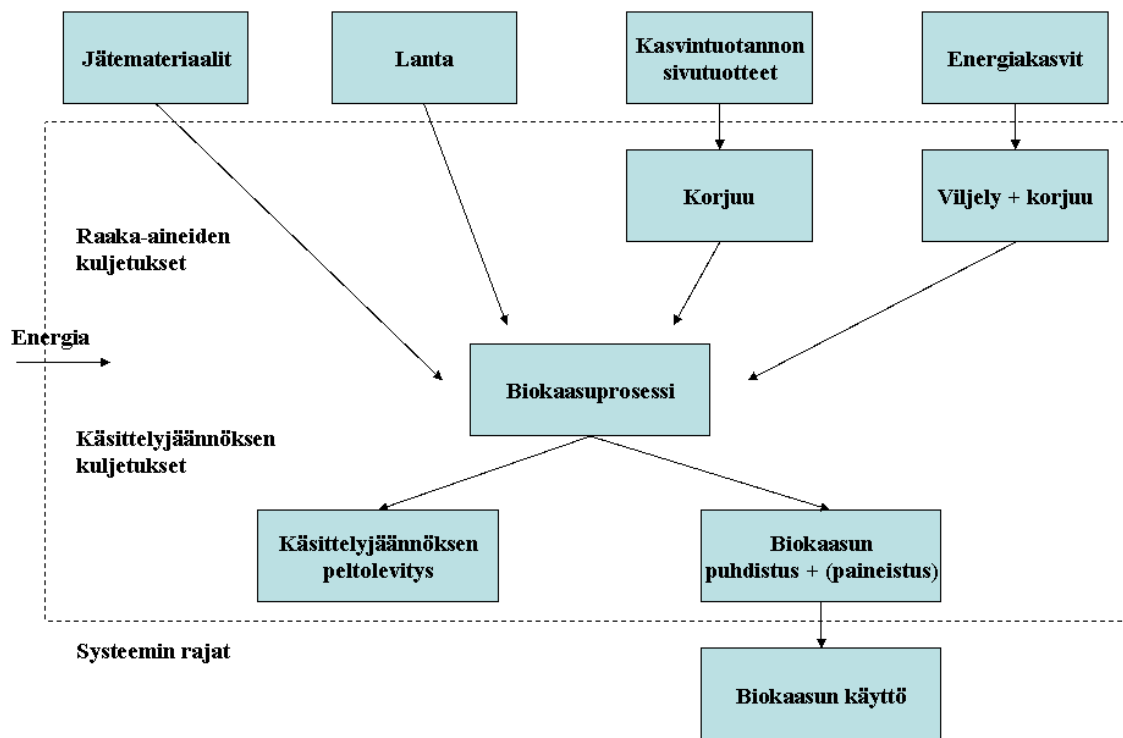
Käsittelyjännöksen käyttöä lannoitteena ja maanparannusaineena ohjataan lainsäädännöllä. MMM:n asetuksessa lannoitevalmisteista (12/2007) säädetään lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelosta ja tyyppinimikohtaisista vaatimuksista sekä esimerkiksi lannoitevalmisteiden laatuvaatimuksista ja raaka-aineista. Maanparannusaineeksi soveltuvan käsittelyjännöksen tyyppinimenä käytetään nykyisin mädätysjännöstä (Maa- ja metsätalousministeriön asetus 19/2009). MMM:n asetuksessa (12/2007) on säädetty mädätysjännöksen sisältämien haitallisten metallien, kuten arseenin, elohopean ja kadmiumin, tautia aiheuttavien pieneliöiden, esimerkiksi *Salmonellan* tai *Escherichia colin*, tai epäpuhtauksien, kuten rikkakasvinsiemenien, enimmäispitoisuuksista.

Lannoite- ja maanparannusaineominaisuuksien lisäämisen lisäksi biokaasun tuotannolla voidaan vähentää käsiteltävien orgaanisten materiaalien sisältämien ihmisille ja eläimille haitallisten bakteerien (*Salmonella* tai *Escherichia coli*) (Sahlström 2003), virusten, sienten tai loisten määrää (Weiland 2009b). Käsiteltävien raaka-aineiden hajujen on myös arvioitu vähenevän biokaasun tuotannossa (Weiland 2009b).

## 2.6 Biokaasun tuotannon ja käytön ympäristövaikutukset

Biokaasun tuotannossa käytetään energiaa mahdollisten energiakasvien viljelyyn, kasvintuotannon sivutuotteiden ja energiakasvien korjuuseen, raaka-aineiden ja käsittelyjännöksen kuljetuksiin, biokaasulaitoksen prosesseihin ja lämmitykseen sekä biokaasun puhdistukseen (kuva 5). Primäärienergian kulutuksen on esitetty olevan käsiteltävästä raaka-aineesta, käytettävästä teknologiasta sekä biokaasulaitoksen kuluttamasta lämmön ja sähkön määrästä riippuen noin 20 – 40 % tuotettavan biokaasun primäärienergiasisällöstä (Berglund 2006).

Biokaasun tuotantoa varten viljeltävien energiakasvien viljelyssä ja korjuussa käytetään fossiilisia energiapanoksia, kuten työkoneiden polttoaineita ja mahdollisesti kemiallisia lannoitteita (Börjesson & Mattiasson 2007). Energiakasvien tuotannon vaatimasta energiankulutuksesta huolimatta energiakasvien viljelemisen on arvioitu tuottavan enemmän energiaa kuin viljelyyn ja korjuuseen kuluu energiaa. Berglund (2006) on arvioinut, että energiakasvien tuotanto vastaa noin 40 % biokaasun tuotantoon kokonaisuudessaan käytettävästä primäärienergiasta. Lukuarvossa on otettu huomioon polttoaineiden ja kemiallisten lannoitteiden tuotannon, kuljetuksen ja käytön energiankulutus. Gerin ym. (2008) ovat arvioineet, että maissin käyttämisestä biokaasun tuotannossa saadaan energiaa 8 – 25 kertaa enemmän ja nurmen hyödyntämisestä 7 – 14 kertaa enemmän kuin viljelyyn käytetään energiaa (Gerin ym. 2008).



Kuva 5. Biokaasun tuotannon materiaali- ja energiavirrat (Berglund 2006, muokattu).

Yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaalit sekä lanta luokitellaan materiaaleiksi, joiden oletetaan muodostuvan joka tapauksessa, minkä vuoksi niiden tuotannon/muodostumisen energiantarvetta ei huomioida. Energiaa tarvitaan ainoastaan raaka-aineiden ja käsittelyjäännöksen kuljetuksiin, biokaasulaitoksen prosesseihin ja lämmitykseen sekä biokaasun puhdistukseen (Berglund 2006).

Biokaasun tuotannossa käytettävistä fossiilisista polttoaineista muodostuu erityisesti hiilidioksidipäästöjä, mutta CO<sub>2</sub>-päästöjä voimakkaampien kasviuonekaasujen (N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>) päästöt voivat olla myös merkittäviä (Börjesson & Mattiasson 2007). N<sub>2</sub>O-päästöjä muodostuu esimerkiksi kemiallisesti valmistetun typpilannoitteen tuotantoprosessissa sekä lannoitetyypen käytössä (Börjesson & Mattiasson 2007). CH<sub>4</sub>-päästöjä muodostuu esimerkiksi biokaasun puhdistuksessa ja paineistuksessa sekä käsittelyjäännöksen anaerobisessa hajoamisessa (Berglund 2006).

Biokaasun käytöllä voidaan korvata fossiilisia polttoaineita ja siten vähentää kasviuonekaasupäästöjä (Lantz ym. 2007). Biokaasusta voidaan tuottaa lämpöä, sähköä ja/tai liikennepolttoainetta, jolloin voidaan korvata esimerkiksi lämmöntuotantoon käytettävää kevyttä polttoöljyä tai liikenteen nestemäisiä polttoaineita. Käsittelyjäännöksen käyttäminen lannoitteena vähentää kemiallisten lannoitteiden käyttöä ja siten niiden valmistuksessa muodostuvia kasviuonekaasupäästöjä (Lantz ym. 2007).

## 2.7 Paikkatietojärjestelmien käyttö biokaasupotentiaalin ja biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinnissa

Tuotettavissa olevan bioenergian määrä ja sen hyödyntämisen mahdollisuudet ovat riippuvaisia maantieteellisestä sijainnista (Dagnall ym. 2000), koska raaka-aineet ovat jakaantuneet alueellisesti epätasaisesti (Voivontas ym. 2001). Paikkatietojärjestelmiin (GIS, *geographic information system*) voidaan tallentaa ja niillä voidaan hallita, analysoida tai esittää paikkatietoon perustuvaa informaatiota (Noon & Daily 1995), jolloin esimerkiksi bioenergian alueellista määrää tai bioenergiaa käyttävän laitoksen sijoitusvaihtoehtoja voidaan arvioida (Voivontas ym. 2001).

Paikkatietojärjestelmiä on hyödynnetty bioenergiapotentiaalien ja bioenergiaa käyttävien laitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinneissa 1980-luvun alusta alkaen (Graham ym. 2000). Biokaasuun liittyvissä tutkimuksissa on arvioitu esimerkiksi lantojen ja biokaasun tuotantoon käytettävien kasvintuotannon sivutuotteiden (oljet) alueellista määrää sekä biokaasu- ja energiapotentiaalia paikkatietojärjestelmiä hyödyntämällä (Nordberg ym. 1998, Voivontas ym. 2001, Batzias ym. 2005). Esimerkiksi Ruotsin kuntakohtaisessa biokaasupotentiaalin arvioinnissa käytettiin paikkatietojärjestelmää, jolla esitettiin biokaasupotentiaalin alueellinen jakautuminen (Nordberg ym. 1998).

Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinnissa on myös hyödynnetty paikkatietojärjestelmiä (Nordberg ym. 1998, Dagnall ym. 2000, Voivontas ym. 2001, Ma ym. 2005). Tutkimukset ovat enimmäkseen tarkastelleet biokaasulaitosten potentiaalisia sijoitusvaihtoehtoja paikallisella tasolla, jolloin biokaasulaitosten sijaintiin ovat vaikuttaneet esimerkiksi taloudelliset kustannukset, kuten sähköverkon liittymiskustannukset ja raaka-aineiden kuljetuskustannukset (Voivontas ym. 2001). Nordbergin ym. (1998) ja Dagnallin ym. (2000) tutkimukset biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtoista perustuivat siihen, että orgaanista materiaalia oli tarpeeksi saatavilla tietyn kokoluokan laitokseen. Sen sijaan tietoa biokaasulaitosten sijoittelusta negatiivisten ympäristövaikutusten, esimerkiksi CO<sub>2</sub>-päästöjen minimoinnin, perusteella ei ole saatavilla.

## 2.8 Yleistä tutkimuksen kohdealueesta

Keski-Suomen maakunta sijaitsee Länsi-Suomen läänissä ja sen rajamaakuntia ovat Pohjois-Savo, Etelä-Savo, Päijät-Häme, Pirkanmaa, Etelä-Pohjanmaa, Keski-Pohjanmaa sekä Pohjois-Pohjanmaa (Keski-Suomen liitto 2006). Maakunta jakautuu alueellisesti kuuteen seutukuntaan ja vuoden 2009 alusta lähtien 23 kuntaan (Keski-Suomen liitto 2009). Keski-Suomen kokonaispinta-ala on 19 950 km<sup>2</sup>, josta on vettä noin 16 % (Maanmittauslaitos 2009). Maapinta-alasta (16 707 km<sup>2</sup>) on metsä- ja kitumaata miltei 85 % ja maatalousmaata noin 7 % (Tilastokeskus 2005). Keski-Suomen asukasluku oli vuoden 2008 lopussa 271 747 ihmistä, joista noin 47 % asui maakuntakeskus Jyväskylässä (Tilastokeskus 2009).

Energian kokonaiskulutus primäärienergiana laskettuna oli Keski-Suomessa noin 19,4 TWh vuonna 2006 (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Energiaa kului teollisuuden tarpeisiin 10,8 TWh, rakennusten lämmitykseen 4,8 TWh, tieliikenteeseen 2,4 TWh ja muuhun kulutukseen 1,4 TWh. Teollisuuden energiankulutus vastasi siten noin 56 % Keski-Suomen kokonaisenergiankulutuksesta, ja suurimmat energian käyttäjät olivat Äänekoskella ja Jämsänjokilaaksossa sijaitsevat sellu- ja paperitehtaat. Energian

kokonaiskulutus koostui suurimmaksi osaksi tuontisähkön (28 %) ja öljyn (23 %) käytöstä (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Sähköä kulutti erityisesti teollisuus, joka käytti noin 71 % sähkön kokonaiskulutuksesta. Öljyn kulutus jakaantui tieliikenteen (54 %) ja rakennusten lämmityksen (46 %) kesken.

Keski-Suomen energian käytön kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2006 yhteensä 3,1 Mt CO<sub>2</sub>-ekv., josta noin 74 % muodostui öljyn ja tuontisähkön käytöstä (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Asukasta kohti laskettuna kasvihuonekaasupäästöt olivat 11,6 t CO<sub>2</sub>-ekv., joka vastaa suomalaisen keskimääräistä kasvihuonekaasupäästöä (11,4 t CO<sub>2</sub>-ekv.).

### **3 AINEISTO JA MENETELMÄT**

#### **3.1 Kotieläinten lukumäärän ja lannantuoton määrittäminen**

##### **3.1.1 Kotieläinten lukumäärä**

Kotieläinten kuntakohtaiset lukumäärät saatiin MMM:n tietopalvelukeskuksesta (TIKE), joka kokoaa vuosittain tiedot kotieläinten lukumäärästä Matilda-tietopalvelun maatilarekisteriin. Tilasto kuvaa kotieläinten lukumäärän tilannetta kyseessä olevalla alueella pääosin tilastointivuoden toukokuun ensimmäisenä päivänä.

Maatilarekisterissä kotieläimet jaotellaan kuuteen pääluokkaan: nautaeläimiin, sikoihin, lampaisiin, vuohiin, siipikarjaan sekä hevosiin. Tämän lisäksi jokainen pääluokka vuohia ja hevosia lukuun ottamatta jaetaan alaluokkiin eläinten koon, sukupuolen tai iän perusteella. Maatilarekisterissä olevien nautaeläinten, lampaiden ja vuohien lukumäärätiedot perustuvat Maatalouden Laskentakeskus Oy:n ylläpitämään nautaeläinrekisteriin ja sikojen, siipikarjan sekä hevosten tiedot maataloustukien hallinto- ja valvontarekisteriin (IACS), johon tieto tallennetaan viljelijöiden tukihakemuslomakkeilta (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007).

Tässä tutkimuksessa oletettiin, että maatilarekisteriin tilastoitujen eläinten lukumäärä kuvaa koko vuoden keskimääräistä kotieläinten lukumäärää. Tarkastelussa käytettiin Keski-Suomen maakunnan sekä sen kuntien maatilarekisteriin vuonna 2007 tallennettuja nautaeläinten, sikojen, lampaiden, vuohien, siipikarjan sekä hevosten tilastotietoja. Siipikarjasta huomioitiin ainoastaan munivat kanat (vähintään 20 viikkoa), kananpoikaset (alle 20 viikkoa) ja broilerit, koska muiden siipikarjaan kuuluvien lintujen (kukot, broileriemot ja kalkkunat) määrät olivat tämän tutkimuksen kannalta merkityksettömät (alle 200 kpl). Tämän lisäksi tarkastelussa käytettiin tarkemman maakunta- tai kuntakohtaisen tiedon puuttuessa maatilarekisterissä ilmoitettujen hevosten lukumäärätietoa, joka sisälsi ainoastaan maataloilla olevien hevosten määrän. Todellisuudessa hevosten lukumäärä on suurempi. Suomen Hippos ry:n ylläpitämän hevoscannan perusteella Suomessa oli hevosia vuonna 2007 yhteensä 68 000, kun maataloilla niitä oli noin 30 000 (Suomen Hippos ry. 2010).

Maatilarekisterin vuoden 2007 kuntakohtaiset tilastotiedot olivat puutteellisia joidenkin kotieläimien osalta, koska kaikkia tilastotietoja ei ollut jokaisesta kunnasta julkistettu. Tämän vuoksi kotieläinten lukumääriä arvioitiin edellisten vuosien tilastojen perusteella. Sikojen lukumääriä ei voinut kuitenkaan arvioida aikaisempien vuosien tilastojen pohjalta, vaan arviointi perustui sikojen alaluokkien (karjut, emakot, lihasiat, muut siat ja porsaatt)

suhteelliseen lukumääräjakaumaan, joka laskettiin koko Keski-Suomea koskevan tilaston (2007) perusteella. Suhteellisella lukumääräjakaumalla kerrottiin valitun kunnan sikojen kokonaislukumäärä, jolloin saatiin puuttuville alaluokille lukuarvot.

### 3.1.2 Kotieläinten vuosittainen lannantuotto

Kotieläinten vuosittaisen lannantuoton arvioinnissa käytettiin MMM:n rakentamismääräys ja -ohjekokoelman osaa C4, joka sisältää kotieläinrakennusten ympäristöhuoltoon liittyviä ohjeita ja suosituksia (Maa- ja metsätalousministeriö 2002). Kokoelmassa esitetään eläinlajikohtaisesti minimivarastointitilavuudet kuutiometreissä (m<sup>3</sup>) kuivalannalle ja virtsalle, lietelannalle sekä kuivikelannalle, jossa virtsa on imeytetty kuivikkeeseen. Tässä tutkielmassa käytettiin ainoastaan lietelannan sekä kuivikelannan varastointitilavuuksia, ja oletuksena oli, että minimivarastointitilavuudet vastaavat eläinlajien vuosittaista lannantuottoa.

Nautaeläinten ja sikojen lannantuoton laskemisessa hyödynnettiin sekä liete- että kuivikelannan lukuarvoja (taulukko 2). Kuivikelantajärjestelmän arvioidaan koskevan Suomessa 60 % nautaeläimistä ja 40 % sioista (Mäenpää 2005), minkä vuoksi Keski-Suomen nautaeläinten ja sikojen kuivikelantojen osuuksien oletettiin vastaavan koko Suomen lukuarvoja. Lampaiden, vuohien, siipikarjan ja hevosten lannantuotto laskettiin pelkästään kuivikelannan lukuarvoilla, koska minimivarastointitilavuuksia lietelannalle ei ollut saatavilla.

Liete- ja kuivikelannan tilavuudet (m<sup>3</sup>) muunnettiin lantojen keskimääräisillä tiheyden lukuarvoilla märkätonneiksi (t), joista laskettiin kuiva-ainepitoisuuksien (TS %) perusteella jokaisen eläinlajin tuottaman lannan kuiva-ainemäärä (t TS) (kaava 2):

$$\text{Lannan kuiva-ainemäärä (t TS)} = \text{lannantuotto (m}^3\text{)} \times \text{tiheys (kg/m}^3\text{)} \times \text{TS (\%)} / 1000 \quad (2)$$

Nautaeläinten, sikojen ja siipikarjan lannan orgaanisen kuiva-aineen (VS) määrä (t) perustui kirjallisuudessa esitettyihin lannan keskimääräisiin VS/TS-suhteisiin. Lampaiden, vuohien ja hevosten lannan keskimääräistä VS/TS-suhdetta ei ollut saatavilla, minkä vuoksi niiden oletettiin vastaavan siipikarjan lannan VS/TS-suhdetta. Lantojen orgaanisen kuiva-aineen (VS) määrä laskettiin kaavalla 3:

$$\text{Orgaanisen kuiva-aineen määrä (t VS)} = \text{lannan kuiva-ainemäärä (t)} \times \text{VS/TS (\%)} \quad (3)$$

Keski-Suomen kotieläinten vuosittain tuottaman lantamäärän laskemiseen tarvittiin tiedot kotieläinten lukumäärästä ja vuosittaisesta lannantuotosta. Tuotettu lantamäärä sijoitettiin kuntakohtaisesti jokaisen kunnan keskipisteeseen, koska maatilakohtaista paikkatietoa ja kotieläinten lukumäärää ei ollut saatavilla. Kunnan keskipiste määritettiin ArcGIS<sup>®</sup>-paikkatieto-ohjelmiston avulla Maanmittauslaitoksen 1:4,5 miljoonaan karttatietokannan vuoden 2006 näyteaineistoa käyttäen.

Taulukko 2. Kotieläinten vuosittainen lannantuotto (liete- ja kuivikelanta) per kotieläin, lannan tiheys ja kuiva-ainepitoisuus liete- ja kuivikelannalla sekä keskimääräinen orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineessa.

Kotieläin <sup>1</sup>	Lietelanta			Kuivikelanta			
	Lannantuotto <sup>2</sup>	Tiheys <sup>3</sup>	TS <sup>3</sup>	Lannantuotto <sup>2</sup>	Tiheys <sup>3</sup>	TS <sup>3</sup>	VS/TS <sup>4</sup>
	m <sup>3</sup> /vuosi	kg/m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup> /vuosi	kg/m <sup>3</sup>	%	%
Lypsylehmä	24	992,7	5,5	24	782,8	21,5	80
Emolehmä	15	992,7	5,5	15	782,8	21,5	80
Hieho							
(2 vuotta ja yli)	15	992,7	5,5	15	782,8	21,5	80
Hieho							
(1 – alle 2 vuotta)	15	992,7	5,5	15	782,8	21,5	80
Sonni							
(2 vuotta ja yli)	15	992,7	5,5	15	782,8	21,5	80
Sonni							
(1 – alle 2 vuotta)	15	992,7	5,5	15	782,8	21,5	80
Vasikka							
(alle 1 vuotta)	6	992,7	5,5	6	782,8	21,5	80
Karju							
(50 kg ja yli)	2,4	997,1	3,5	2,4	640,7	29,3	75
Emakko							
(50 kg ja yli)	2,4	997,1	3,5	2,4	640,7	29,3	75
Lihasika							
(50 kg ja yli)	2	997,1	3,5	2,4	640,7	29,3	75
Muu sika							
(20 kg - alle 50 kg)	2	997,1	3,5	2,4	640,7	29,3	75
Porsas							
(alle 20 kg)	1	997,1	3,5	1,2	640,7	29,3	75
Uuhi							
(12 kk ja yli)	-	-	-	1,5	589,6	34	75 <sup>6</sup>
Karitsoinut ja tiine uuhi							
(alle 12 kk)	-	-	-	1,5	589,6	34	75 <sup>6</sup>
Muu lammas	-	-	-	1,5	589,6	34	75 <sup>6</sup>
Vuohi	-	-	-	1,5	589,6 <sup>5</sup>	34	75 <sup>6</sup>
Muniva kana							
(vähintään 20 viikkoa)	-	-	-	0,05	621,5	48	75
Kananpoikanen							
(alle 20 viikkoa)	-	-	-	0,015	621,5	48	75
Broileri	-	-	-	0,015	621,5	48	75
Hevonen	-	-	-	12	527,8	31,4	75 <sup>6</sup>

<sup>1</sup> Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007

<sup>2</sup> Maa- ja metsätalousministeriö 2002

<sup>3</sup> Viljavuuspalvelu Oy 2004

<sup>4</sup> Iileleji ym. 2008

<sup>5</sup> Käytetty lampaiden lannan TS %

<sup>6</sup> VS/TS-suhde arvioitu

- Tietoa ei saatavilla



## 3.2 Biokaasun tuotantoon soveltuvan peltopinta-alan ja peltobiomassan määrittäminen

### 3.2.1 Peltopinta-ala

Tässä työssä käytettiin vuoden 2007 tilastotietoja kotimaisten viljakasvien: vehnä, ruis, ohra ja kaura, alle viiden vuoden nurmien, kesannon sekä hoidetun viljelemättömän pellon pinta-aloista (taulukko 3). Keski-Suomen maakunnassa ja sen kunnissa käytössä olevien peltojen ja muun maatalousmaan pinta-alat tilastoidaan vuosittain Matilda-tietopalvelun maatilarekisteriin, jonka tiedot perustuvat IACS-rekisteristä saatuihin kasvulohkotietoihin.

Maatilarekisterissä viljakasvit jaetaan syys- ja kevätvehnään, kauraan, ohraan, rukiiseen, seosviljaan sekä muihin viljoihin. Alle viiden vuoden nurmiin luokitellaan 1- – alle 5-vuotiset kuivaheinä-, säilörehu- ja tuorerehunurmet, laidunnurmet, siemennurmet sekä laidunnettu vähentämissopimuksen alainen pelto (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007). Kesantoon kuuluvat CAP-kesanto (*common agricultural policy*, CAP), hoitamaton CAP-kesanto, CAP-kesanto/monimuotoisuuskohte, 5-vuotinen kesanto, muu ei tukikelpoinen kesanto ja viljelykierto-kunnostuskesanto sekä viherlannoitusnurmi. Hoidetulla viljelemättömällä pellolla tarkoitetaan tuotantoon käyttämätöntä peltoa, jota säilytetään siinä kunnossa, ettei sen käyttö maataloudellisiin tarkoituksiin vaarannu. Tämän vuoksi se on pidettävä nurmipeitteisenä, ja kasvusto on niitettävä kerran kasvukaudessa.

### 3.2.2 Satotasot

Tässä tutkielmassa arvioitiin, että biokaasun tuotantoon voidaan käyttää Keski-Suomessa viljojen viljelystä jäljelle jäävät oljet sekä alle viiden vuoden nurmilla, kesannolla ja hoidetulla viljelemättömällä pellolla viljeltävä nurmi. Olkien ja nurmen satotasojen vaihteluiden oletettiin kuvaavan keskimääräisiä satotasoja paremmin viljelyn kausittaista vaihtelua. Olkien satotasoina käytettiin keskimääräisten vuosittaisten satojen perusteella arvioituja satojen minimi- ja maksimiarvoja (taulukko 3).

Alle viiden vuoden nurmien ensimmäinen sato käytetään Suomessa normaalisti kotieläinten rehuna (Seppälä ym. 2009). Tämän vuoksi tässä työssä oletettiin, että alle viiden vuoden nurmien viljelyyn käytetyiltä pelloilta saatavista sadoista voidaan hyödyntää biokaasun tuotantoon ainoastaan toinen sato. Kesannolla ja hoidetulla viljelemättömällä pellolla viljeltävästä nurmesta voidaan sen sijaan käyttää ensimmäinen ja toinen sato.

Nurmen satotasot perustuivat Seppälän ym. (2009) julkaisuun, jossa tutkittiin koiranheinän, ruokonadan, timotein ja ruokohelven soveltuvuutta biokaasun tuotantoon Lounais-Suomessa (Hahkiala) ja Keski-Suomessa (Saarijärvi) vuosina 2004 – 2007 (taulukko 3). Ensimmäisen ja toisen sadon vaihtelu (6,5 – 11,5 t TS/ha) arvioitiin Saarijärvellä vuonna 2007 viljeltyjen koiranheinän ja ruokonadan sekä Hahkialassa vuonna 2006 viljellyn timotein satotasojen perusteella. Toisen sadon vaihtelu (1,5 – 5,2 t TS/ha) laskettiin Saarijärvellä vuosina 2006 ja 2007 viljeltyjen koiranheinän sekä ruokonadan 2. sadoista ja Hahkialassa vuonna 2006 viljellyn timotein 2. sadosta.

Laskettu peltobiomassa sijoitettiin kuntakohtaisesti jokaisen kunnan keskipisteeseen, koska tarkkaa tietoa erityyppisten peltojen sijainnista ei ollut. Keskipisteet määritettiin ArcGIS®-paikkatieto-ohjelmistolla Maanmittauslaitoksen 1:4,5 miljoonan karttatietokannan vuoden 2006 näyteaineistosta.

Taulukko 3. Keski-Suomessa olevien peltojen pinta-alat vuonna 2007, oljen ja nurmen keskimääräinen satotaso vuodessa sekä arvioitu satotasojen vaihtelu.

Pelto	Pinta-ala <sup>1</sup>	Oljen satotaso <sup>2</sup>	Nurmen satotaso <sup>3</sup>
	ha	t TS/ha	t TS/ha
Syysvehnä	63	2,0 (1,0 – 3,0)	-
Kevätvehnä	1 774	2,0 (1,0 – 3,0)	-
Ruis	705	2,0 (1,0 – 3,0)	-
Ohra	15 626	2,0 (1,0 – 3,0)	-
Kaura	18 383	2,0 (1,0 – 3,0)	-
Kesanto	2 981	-	9,7 (6,5 – 11,5)
Hoidettu viljelemätön pelto	8 550	-	9,7 (6,5 – 11,5)
Alle 5-vuoden nurmet	40 393	-	3,3 <sup>4</sup> (1,5 – 5,2)
<b>Yhteensä</b>	<b>88 475</b>		

<sup>1</sup> Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007

<sup>2</sup> Mäkinen ym. 2006 (keskimääräinen satotaso), <sup>3</sup> Seppälä ym. 2009

<sup>4</sup> Nurmen satotaso toisessa niitossa

- Tietoa ei saatavilla

### 3.3 Jätevedenpuhdistamoiden lietteiden määrä

Keski-Suomessa sijaitsevilla yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoilla muodostuvien lietemäärien tiedot kerättiin ympäristöhallinnon ylläpitämästä ympäristön-suojeluntietojärjestelmästä (VAHTI). VAHTI-aineisto sisälsi jätevedenpuhdistamoilla (30 kpl) muodostuvien lietemäärien lisäksi lietteiden kuiva-ainepitoisuudet, jotka vaihtelivat jätevedenpuhdistamoilla käytössä olevien lietteen kuivaustekniikoiden mukaan (taulukko 4). Hankasalmen ja Joutsan viemärlaitoksilla muodostuvien lietteiden kuiva-ainepitoisuuksia ei ollut tilastoitu, minkä vuoksi puutteelliset lukuarvot korvattiin muiden jätevedenpuhdistamoiden ilmoittamista kuiva-ainepitoisuuksista lasketulla keskiarvolla 19 %. Lietteiden VS/TS-suhteena käytettiin kirjallisuudessa esitetyistä lukuarvoista laskettua keskiarvoa (taulukko 4).

Taulukko 4. Keski-Suomen jätevedenpuhdistamoilla muodostuvan lietteen määrä, kuiva-ainepitoisuus sekä orgaanisen aineksen osuus kuiva-aineesa.

Materiaali	Märkäpaino <sup>1</sup>	TS <sup>1</sup>	VS/TS <sup>2</sup>
	t/vuosi	%	%
Jätevedenpuhdistamoiden liete	33120	19 (3 – 32)	69

<sup>1</sup> Keski-Suomen ympäristökeskus 2008

<sup>2</sup> Bougrier ym. 2006, Keskitalo & Kettunen 2007, Luostarinen ym. 2008, Roberts ym. 1999, Sanchez ym. 1995, Tomei ym. 2008 (laskettu lukuarvojen pohjalta)

VAHTI-tietojärjestelmän tiedot olivat pääosin vuodelta 2005, minkä vuoksi aineistossa esiintyi vuoden 2009 tilanteeseen verrattuna jo toimintansa lakkauttaneita jätevedenpuhdistamoita. Vuonna 2009 toiminnassa olevien laitosten määrän ja sijainnin selvittämiseksi aineistoa päivitettiin voimassa olevien ympäristölupien sekä Keski-Suomen alueellisen jätesuunnitelman vuoteen 2016 perusteella. Jätevedenpuhdistamoiden sijaintitiedot kerättiin ympäristöhallinnon ylläpitämästä OIVA-tietojärjestelmästä.

### 3.4 Yhdyskuntien biojätteen määrä

Yhdyskunnissa muodostuvien ja biokaasun tuotantoon soveltuvien jätejakeiden määrät arvioitiin VAHTI-tietojärjestelmän avulla. VAHTI-aineisto sisälsi jokaisesta tilastoidusta jätejakeesta jäteluetteloon perustuvan kuusinumeroisen tunnusluvun, märkäpainon, alkuperän sekä loppusijoituspaikan. Tässä tutkielmassa huomioitujen yhdyskunnissa muodostuneet jätejakeet valittiin tunnusluvun perusteella.

Laskennassa huomioitiin yhdyskunnissa muodostuvat biojätteet, jotka oli kirjattu jäteluetteloon biohajoavina keittiö- ja ruokalajätteinä (20 01 08) sekä ruokaöljyinä ja ravintorasvoina (20 01 25). Puutarha- ja puistojätteisiin luokiteltavat biohajoavat jätteet (20 02 01) rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle, koska niiden oletettiin sisältävän anaerobisissa olosuhteissa heikosti hajoavaa puumaista materiaalia sekä epäpuhtauksia.

Keski-Suomessa toimi vuonna 2007 kolme seudullista biojätteen käsittelyyn erikoistunutta yritystä, jotka ottivat vastaan keittiö- ja ruokalajätteet sekä ruokaöljyt ja ravintorasvat suurimmasta osasta Keski-Suomen kunnista (taulukko 5). Biojätteen TS- ja VS/TS -pitoisuudet arvioitiin kirjallisuuden perusteella. Biojätettä vastaanottavien yritysten sijaintitiedot määritettiin hyödyntämällä Kansalaisen karttapaikka -tietopalvelua.

Taulukko 5. Keski-Suomen seudullisilla jätteenkäsittelyasemilla vastaanotettujen keittiö- ja ruokalajätteiden sekä ruokaöljyjen ja ravintorasvojen määrät vuonna 2007.

Sijaintipaikka	Märkäpaino <sup>1</sup> t/vuosi	TS <sup>2,3</sup> %	VS/TS <sup>3</sup> %
Jyväskylä	12 400	30	80
Saarijärvi	1 900	30	80
Jämsä	1 400	30	80

<sup>1</sup> Keski-Suomen ympäristökeskus 2008, <sup>2</sup> Sokka ym. 2004, Paavola ym. 2006, <sup>3</sup> Paavola ym. 2006, Kurki 2008

Osa kunnista ei toimittanut yhdyskunnissa muodostuvia orgaanisia jätejakeita seudullisille jätteenkäsittelyasemille, minkä vuoksi näiden kuntien biojätteen määrä arvioitiin laskennallisesti (taulukko 6). Laskennallinen arvio perustui väestörekisterin tietoihin kuntien asukasluvusta vuosien 2007 ja 2008 vaihteessa (Väestörekisterikeskus 2008), yksittäisen henkilön tuottamaan keskimääräiseen biojätteen määrään vuodessa sekä biojätteen erilliskeräyksen tehokkuuteen. Oletuksena oli lisäksi, että biojäte kerätään jokaisesta kotitaloudesta, mutta kaupan, teollisuuden sekä muiden laitosten toiminnassa muodostuvien keittiö- ja ruokalajätteiden määrää ei huomioitu arvioinnin monimutkaisuuden vuoksi. Laskennallisen biojätteen paikkatietona käytettiin kuntien keskipisteitä, jotka oli määritetty ArcGIS<sup>®</sup> -paikkatieto-ohjelman avulla Maanmittauslaitoksen 1:4,5 miljoonan karttatietokannan vuoden 2006 näyteaineistosta.

Yhdyskunnissa muodostuvaa ja kerättävää biojätettä ei voida hyödyntää kokonaisuudessaan biokaasun tuotannossa biojätteen sisältämien epäpuhtauksien, kuten muovin, lasin ja metallin, vuoksi. Biojätteen esikäsitellyssä muodostuvan rejektin määrä vaihtelee, mutta tässä työssä oli oletuksena, että biojätteen kokonaismäärästä voidaan käyttää 90 % biokaasun tuotantoon (Pöyry Environment 2009).

Taulukko 6. Laskennallinen arvio eräistä Keski-Suomen kuntien kotitalouksista kerättävistä biojätteiden määristä vuonna 2007.

Kunta	Märkäpaino <sup>2,3</sup> t/vuosi	TS <sup>4</sup> %	VS/TS <sup>5</sup> %
Joutsa <sup>1</sup>	109	30	80
Konnevesi	83	30	80
Kyyjärvi	44	30	80
Luhanka	23	30	80
Pihtipudas	131	30	80
Viitasaari	201	30	80

<sup>1</sup> Sisältää Leivonmäen kunnan määrät

<sup>2</sup> Keittiöjätettä arvioitiin muodostuvan 73 kg/henkilö (YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta 2004)

<sup>3</sup> Keittiöjätettä arvioitiin erilliskerättävän 30 kg/henkilö (YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta 2004)

<sup>4</sup> Sokka ym. 2004, Paavola ym. 2006

<sup>5</sup> Paavola ym. 2006, Kurki 2008

### 3.5 Teollisuuden orgaanisten jätteiden määrä

Tässä tutkielmassa teollisuudessa muodostuviin ja biokaasun tuotannossa hyödynnettäväksi luokiteltaviin orgaanisiin jätteisiin luettiin jätejakeet, joita ei ollut tilastoitu vastaanotetuiksi seudullisilla jätteenkäsittelylaitoksilla, kunnallisilla jätevedenpuhdistamoilla tai maataloilla. Materiaalien määrätiedot pohjautuivat pääosin VAHTI-tietojärjestelmään tilastoituihin lukuarvoihin ja TS- sekä VS/TS-pitoisuudet kirjallisuudessa esitettyihin lukuarvoihin. Materiaalien muodostumispaikkojen koordinaattitiedot määritettiin Kansalaisen karttapaikka -tietopalvelun avulla.

Merkittäviä orgaanisia sivutuotevirtoja muodostui Keski-Suomen alueella vuonna 2006 elintarvike- ja metsäteollisuuden sekä bioteknologian aloilla (taulukko 7). Elintarviketeollisuudessa muodostuvista sivutuotteista huomioitiin lihanjalostuksesta peräisin olevia eläinkudosjätteitä (02 02 02), joita hyödynnettiin ihmisravinnoksi käytettävien eläinten rehuna tai turkiseläinten rehuna. Tämän lisäksi elintarviketeollisuuden laskentaan otettiin mukaan lehti- ja kaalitehtaassa muodostuva ylimääräinen orgaaninen materiaali. Bioteknologian alalta huomioitiin rehu-, tekstiili- ja elintarviketeollisuuteen tehtyjen materiaalien sivutuotteina muodostunut solumassa (07 01 99). Metsäteollisuuden orgaanisista sivutuotteista huomioitiin ensisijaisesti sellu- ja paperitehtaiden jätevedenpuhdistamoiden aktiivilietelaitoksilla muodostunutta sekalietettä (19 08 14). Sellu- ja paperitehtaiden mekaanisessa erotuksessa muodostuvat kuitujätteet sekä kuitu-, täyteaine- ja päällystysainelietteet (03 03 10) ja kuitusavi (03 03 99) jätettiin tarkastelussa huomioimatta niiden soveltumattomuuden vuoksi.

Taulukko 7. Keski-Suomen teollisuudessa muodostuneiden orgaanisten sivutuotteiden märkäpaino, kuiva-ainepitoisuus sekä orgaanisen aineksen keskimääräinen osuus kuiva-aineesta vuonna 2006.

Jätejae	Märkäpaino <sup>1</sup> t	TS %	VS/TS %
Eläinkudossjäte	11 000	21 <sup>3</sup>	91 <sup>3</sup>
Kaalijäte	740 <sup>2</sup>	6 <sup>4</sup>	89 <sup>5</sup>
Solumassa	5 200	20 <sup>1</sup>	80 <sup>6</sup>
Metsäteollisuuden lietteet	26 000	14 <sup>1</sup>	60 <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Keski-Suomen ympäristökeskus 2008 (laskettu lukuarvojen pohjalta)

<sup>2</sup> Leijala 2008

<sup>3</sup> Alvarez & Lidén 2008, Cuetos ym. 2008, Luste ym. 2009, Murto ym. 2004, Salminen 2000 (laskettu lukuarvojen pohjalta)

<sup>4</sup> Stabnikova ym. 2005

<sup>5</sup> Stabnikova ym. 2005, Gunaseelan 2004 (laskettu lukuarvojen pohjalta)

<sup>6</sup> Rintala 2008

<sup>7</sup> Jokela ym. 1997 (laskettu lukuarvojen pohjalta)

### 3.6 Materiaalien metaanintuottopotentialit

Materiaalien metaanintuottopotentialeina käytettiin kirjallisuudessa esitettyjä minimi- ja maksimiarvoja sekä niiden perusteella määritettyjä keskimääräisiä lukuarvoja (taulukko 8). Lampaan, vuohen ja hevosen lannan, oljen, nurmen sekä solumassan metaanintuottopotentialit perustuivat kuiva-ainemäärään (t TS), kun muilla materiaaleilla käytettiin orgaanista kuiva-ainemäärää (t VS) kohti määritettyä metaanintuottopotentialia. Lampaiden ja vuohien lannan metaanintuottopotentiali määritettiin biokaasuntuottopotentialista, kun keskimääräinen metaanipitoisuus oli 71 % (Kanwar & Kalia 1993). Hevosenlannasta tuotetun biokaasun keskimääräistä metaanipitoisuutta ei ollut kirjallisuudessa saatavilla, minkä vuoksi metaanipitoisuuden oletettiin olevan 60 %.

Peltobiomassojen (olki ja nurmi) vuosittainen sato vaihtelee (taulukko 2), minkä vuoksi oljesta ja nurmesta tuotettavan metaanin määrä arvioitiin satotasojen minimi- ja maksimiarvoilla sekä keskimääräisillä metaanintuottopotentialeilla. Muista materiaaleista tuotettavan metaanimäärän arviointi perustui materiaalien tilastoituihin/arvioituihin määriin sekä metaanintuottopotentialien minimi- ja maksimiarvoihin.

Taulukko 8. Materiaalien keskimääräiset metaanintuottopotentialit sekä niiden minimi- ja maksimiarvot (suluissa) sekä kokonaistypen ja kokonaisfosforin pitoisuudet.

Materiaali	CH <sub>4</sub> -potentiaali	N-N <sub>KOK</sub>	P <sub>KOK</sub>	Viitteet	
	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t VS	%/kg TS	%/kg TS	CH <sub>4</sub> -potentiaali	Ravinteet
Lehmänlanta (lietelanta)	175 (100 – 250)	5,5	0,9	1	14
Lehmänlanta (kuivikelanta)	175 (100 – 250)	2,5	0,7	1	14
Sianlanta (lietelanta)	350 (300 – 400)	10,9	2,3	1	14
Sianlanta (kuivikelanta)	350 (300 – 400)	2,5	1,5	1	14
Siipikarjanlanta	250 (200 – 300)	3,5	1,7	2	14
Lampaanlanta	76 (66 – 85) *	2,6	0,8	3,4	14
Vuohenlanta	76 (66 – 85) *	2,6 **	0,8 **	3,4	14
Hevosenlanta	96 *	1,4	0,3	3	14
Olki (vehnä ja ruis)	255 *	0,5	0,1	5,6	15
Olki (kaura ja ohra)	255 *	0,6	0,1	5,6	15
Nurmi	302 *	2,6	0,3	5,6,7,8	15
Jätevedenpuhdistamon liete	300 (200 – 400)	4,0	2,0	1	16
Biojäte	550 (500 – 600)	2,0	0,4	1	4
Eläinkudosjäte	480 (210 – 910)	5,5	0,3	9,1	5
Kaalijäte	310 (300 – 320)	2,0 ***	0,4 ***	1,11	4
Solumassa	430 (380 – 480) *	0,024	0,0	12	19
Metsäteollisuuden lietteet	170 (100 – 190)	0,03	0,002	13	20,21

\* m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t TS, \*\* Käytetty lampaanlannan arvoja, \*\*\* Käytetty biojätteen arvoja

<sup>1</sup> Lehtomäki ym. 2007b, <sup>2</sup> Salminen & Rintala 2002, <sup>3</sup> Batzias ym. 2005, <sup>4</sup> Kanwar & Kalia 1993,

<sup>5</sup> Lehtomäki ym. 2008, <sup>6</sup> Kaparaju ym. 2002, <sup>7</sup> Lehtomäki ym. 2007a, <sup>8</sup> Seppälä ym. 2009,

<sup>9</sup> Luste ym. 2009, <sup>10</sup> Salminen 2000, <sup>11</sup> Gunaseelan 2004, <sup>12</sup> Rintala 2008, <sup>13</sup> Jokela ym. 1997,

<sup>14</sup> Viljavuuspalvelu Oy 2004 (laskettu lukuarvojen pohjalta), <sup>15</sup> Maaseutuvirasto 2008,

<sup>16</sup> Keskitalo & Kettunen 2007, <sup>17</sup> Sokka ym. 2004, <sup>18</sup> Alvarez & Lidén 2008, <sup>19</sup> Kaparaju 2009,

<sup>20</sup> Pöykiö ym. 2007, <sup>21</sup> Haverila & Kivilinna 1999

### 3.7 Materiaalien typpi- ja fosforipitoisuudet

Tässä tutkielmassa arvioitiin biokaasuprosessissa käytettävien materiaalien sisältämistä ravinteista kokonaistyyppi (N<sub>KOK</sub>) ja -fosfori (P<sub>KOK</sub>). Ravinteiden pitoisuuksina käytettiin kirjallisuudessa esitettyjä lukuarvoja (taulukko 8). N<sub>KOK</sub> ja P<sub>KOK</sub> laskettiin kaavalla 4:

$$R = A \times C / 100, \quad (4)$$

missä  $R$  = ravinteiden määrä biokaasun tuotantoon käytettävässä materiaalissa (kg)

$A$  = materiaalin kuiva-ainemäärä (kg TS)

$C$  = ravinteiden pitoisuus kuiva-aineessa (%/kg TS)

### 3.8 Orgaanisten materiaalien biokaasupotentiaali, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantopotentiaali sekä liikennepolttoainepotentiaali

Keski-Suomen alueella vuosittain muodostuvista orgaanisista materiaaleista tuotettavissa olevan biokaasun sisältämän metaanin perusteella laskettiin biokaasun primäärienergiasisältö. Tuotettavissa olevan metaanin määrä muunnettiin primäärienergiaksi kaavalla 5:

$$E = A \times M \times Q / 1000, \quad (5)$$

missä  $E$  = primäärienergia (MWh)

$A$  = biokaasun tuotantoon käytettävän materiaalin määrä (t VS)

$M$  = materiaalin metaanintuottopotentiaali ( $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t VS}$ )

$Q$  = metaanin energiatiheys  $\approx 10 \text{ kWh}/\text{m}^3 \text{CH}_4$  (Lide & Frederikse 1996)

Tässä tutkielmassa arvioitiin biokaasusta tuotettavan lämmön ja sähkön määrät yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa sekä liikennepolttoaineen (biometaani) määrä liikennepolttoainetuotannossa. Yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa oletettiin, että lämmöntuotannon hyötysuhde oli 50 % ja sähköntuotannon 30 %. Lämmön ja sähkön määrät laskettiin biokaasun primäärienergian perusteella (kaava 6).

$$T = \eta \times E, \quad (6)$$

missä  $T$  = biokaasusta tuotettavan sähkön tai lämmön määrä (MWh)

$\eta$  = hyötysuhde

$E$  = biokaasun primäärienergian määrä (MWh)

Biokaasusta tuotettavan biometaanin määrä laskettiin myös biokaasun primäärienergian perusteella (kaava 7). Oletuksena oli, että biometaanin puhdistuksessa ja paineistuksessa muodostuvat biokaasun häviöt ovat yhteensä 2 % raakakaasun metaanimäärästä.

$$B = \eta \times E, \quad (7)$$

missä  $B$  = biometaanin määrä (MWh)

$\eta$  = hyötysuhde

$E$  = biokaasun primäärienergia määrä (MWh)

### 3.9 Biokaasun käytöllä saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset

Kasvihuonekaasupäästövähennyslaskujen tavoitteena oli laskea kuinka paljon fossiilisten polttoaineiden käytöstä muodostuvia kasvihuonekaasupäästöjä voitaisiin vähentää, jos fossiilisia polttoaineita korvattaisiin biokaasulla. Tässä tutkielmassa oletettiin, että fossiilisia polttoaineita korvattaisiin biokaasulla joko yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa tai liikennepolttoainetuotannossa. Yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa tuotettavalla lämmöllä arvioitiin korvattavan rakennusten lämmityksessä käytettävää kevyttä polttoöljyä sekä sähköllä Suomessa keskimääräisesti tuotettavaa sähköä. Biokaasusta tuotettavalla liikennepolttoaineella oletettiin korvattavan raakaöljystä jalostettuja nestemäisiä liikennepolttoaineita (benssiini ja diesel). Tutkielmassa arvioitiin yksinomaan biokaasun käytöllä saavutettavia kasvihuonekaasupäästövähennyksiä (brutto). Biokaasun tuotannossa, kuten raaka-aineiden ja käsittelyjännöksen kuljetuksissa tai energiakasvien viljelyssä ja korjuussa, muodostuvia kasvihuonekaasupäästöjä ei huomioitu.

Kasvihuonekaasupäästöistä arvioitiin ainoastaan fossiilisten polttoaineiden poltossa muodostuvat CO<sub>2</sub>-päästöt (taulukko 9). Nestemäisten fossiilisten liikennepolttoaineiden CO<sub>2</sub>-päästökertoimina käytettiin moottoribensiinin ja dieselöljyn käytön päästökertoimien keskiarvoa (263,5 kg CO<sub>2</sub>/MWh) (Tilastokeskus 2006). Sähkön päästökerroin (200 kg CO<sub>2</sub>/MWh) laskettiin Energiateollisuus ry:n (2009) ilmoittamien vuosien 2007 ja 2008 sähköntuotannossa muodostuvien CO<sub>2</sub>-päästöjen keskiarvona.

Taulukko 9. Fossiilisten polttoaineiden CO<sub>2</sub>-päästökertoimet.

Polttoaine	CO <sub>2</sub> -päästökerroin kg CO <sub>2</sub> /MWh	Viitteet
Kevyt polttoöljy	267	Tilastokeskus 2006
Sähkö	200	Energiateollisuus ry 2009
Moottoribensiini	262	Tilastokeskus 2006
Dieselöljy	265	Tilastokeskus 2006

CO<sub>2</sub>-päästövähennykset laskettiin tuotettavan biokaasun primäärienergian avulla (kaava 8).

$$P = B \times F / 1000, \quad (8)$$

missä  $P$  = biokaasun tuotannolla saavutettava CO<sub>2</sub>-päästövähennys (t CO<sub>2</sub>)

$B$  = biokaasun primäärienergiämäärä (MWh)

$F$  = kevyen polttoöljyn, sähkön tai nestemäisen liikennepolttoaineen CO<sub>2</sub>-päästökerroin (kg CO<sub>2</sub>/MWh)

### 3.10 Keski-Suomen teorettinen ja tekninen biokaasupotentiaali

Tässä tutkielmassa arvioitiin biokaasun tuotantoon soveltuvien orgaanisten materiaalimäärien perusteella Keski-Suomen teorettinen ja tekninen biokaasupotentiaali. Teoreettisessa potentiaalitarkastelussa huomioitiin kokonaisuudessaan yhdyskunnissa ja teollisuudessa vuosittain muodostuvat orgaaniset jättemateriaalit (jätevedenpuhdistamoiden liete, yhdyskuntien biojäte ja teollisuuden jätteet) sekä maataloudessa muodostuva kotieläinten lanta. Viljojen viljelyssä sivutuotteena muodostuvien olkien teoreettiseksi määräksi arvioitiin 80 % olkien kokonaissadosta, koska 20 % muodostuvasta olkisadosta oletettiin käytettävän kotieläinten kuivikkeena (Mäkinen ym. 2006). Energiakasvien, kuten nurmen, viljelyyn oletettiin käytettävän kaikki kesantopellot ja hoidetut viljelemättömät pellot. Kesantopelloilla ja hoidetuilla viljelemättömillä pelloilla viljeltyjen energiakasvien sadot arvioitiin hyödynnettävän kokonaisuudessaan biokaasun tuotantoon, mutta alle viiden vuoden nurmen viljelyyn luokitelluilla pelloilla viljeltävästä nurmesta oletettiin käytettävän ainoastaan toinen sato.

Teknisen biokaasupotentiaalin tarkastelussa arvioitiin Keski-Suomessa vuosittain muodostuvan orgaanisen materiaalin määrä, joka voitaisiin teknisesti hyödyntää biokaasun tuotannossa. Materiaalien käytön taloudellisuutta ei huomioitu. Teknisen tarkastelun oletuksena oli, että yhdyskuntien ja teollisuuden orgaaniset jättemateriaalit voitaisiin käyttää biokaasun tuotannossa kokonaisuudessaan. Maatalouden materiaalien (lanta ja olki) ja biokaasun tuotantoa varten viljeltävien energiakasvien (nurmi) määrät arvioitiin, koska niiden saatavuudet ja hyödynnettävyydet oletettiin olevan yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisia jättemateriaaleja heikommat.



Teknisessä biokaasupotentiaalitarkastelussa arvioitiin kotieläinten lantojen soveltuvuus biokaasun tuotantoon, kotieläinten laidunnus sekä maatilojen koko. Kotieläinten lannoista huomioitiin ainoastaan nautaeläinten, sikojen ja siipikarjan tuottama lantamäärä. Lampaiden, vuohien ja hevosten lantaa ei otettu huomioon, koska kuivikelantojen oletettiin sisältävän paljon anaerobisesti heikosti hajoavaa sahanpurua tai kutterinlastua. Kotieläinten laidunnuksen oletuksena oli, että nautaeläimet ulkoilevat vuodessa neljä kuukautta (Ympäristöministeriö 2009), jolloin niiden lantaa saadaan talteen noin 67 % muodostuvasta lannan kokonaismäärästä. Maatilojen koko arvioitiin nautaeläimille ja sioille erikseen. Keski-Suomen lypsylehmistä noin 60 % ja sioista noin 80 % on maatiloilla, joiden koko on yli 20 lypsylehmää (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007).

Biokaasun tuotantoa varten viljeltävän nurmen määrä arvioitiin erikseen kesantopelloilla, hoidetuilla viljelemättömillä pelloilla sekä alle viiden vuoden nurmiksi luokitetuilla pelloilla viljeltävälle nurmelle. Kirjallisuudessa (Seppälä ym. 2009) on arvioitu, että keskimäärin 40 % kesanto- ja hoidetun viljelemättömän pellon pinta-aloista voitaisiin hyödyntää sekä keskimäärin 40 % alle viiden vuoden nurmilla viljeltävän nurmen toisesta sadosta voitaisiin käyttää biokaasun tuotantoon. Oljen energiakäytön tekninen potentiaali oletettiin olevan 20 % muodostuvasta oljen kokonaismäärästä (Mäkinen ym. 2006).

### **3.11 Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu**

#### **3.11.1 Yleistä biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtoista**

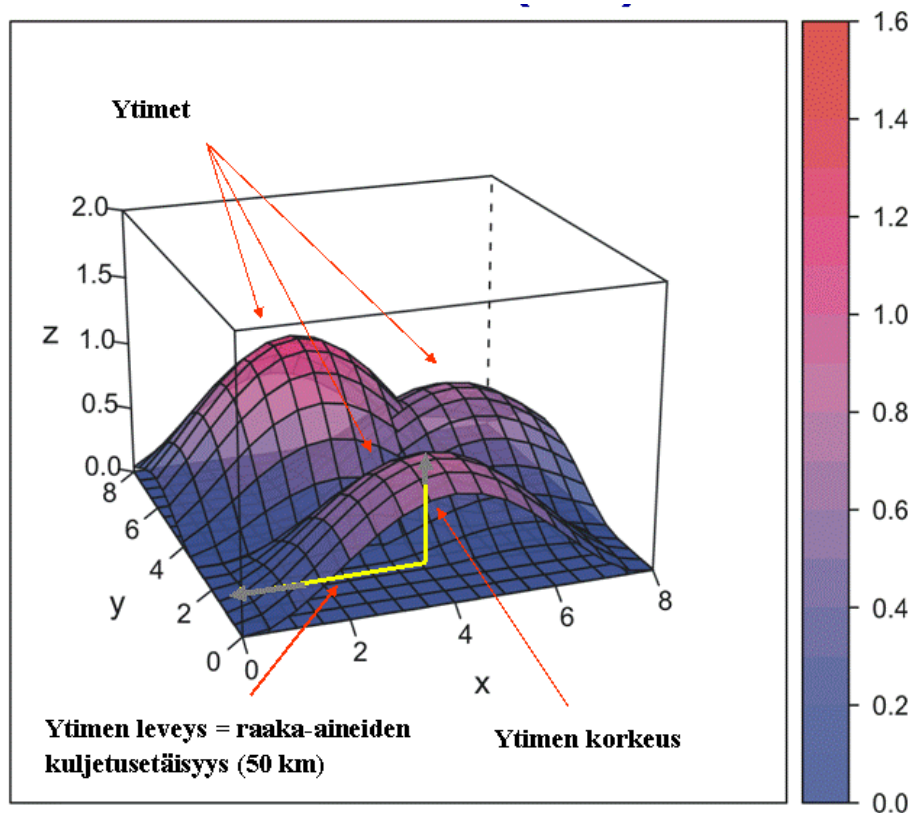
Tässä tutkielmassa arvioitiin biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehdot Keski-Suomen alueella. Biokaasulaitokset jaettiin koon ja käytettävien raaka-aineiden perusteella kahteen tyyppiin: suuren kokoluokan (5000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitoksiin ja pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) keskitettyihin biokaasulaitoksiin. Suuren kokoluokan biokaasulaitoksissa oletettiin hyödynnettävän jätevedenpuhdistamoiden lietteitä, yhdyskuntien biojätettä ja teollisuuden orgaanisia jättemateriaaleja ja pienen kokoluokan biokaasulaitoksessa maatalouden materiaaleja (lanta ja olki) ja biokaasun tuotantoa varten viljeltäviä energiakasveja (nurmi). Molemmassa biokaasulaitosvaihtoehtoissa oletettiin tuotettavan joko lämpöä ja sähköä (CHP) tai liikennepolttoainetta (biometaani).

Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinnit tehtiin raaka-aineiden sijainnin ja biokaasun hyödyntämisen perusteella. Oletuksena oli, että raaka-aineiden kuljettamisesta aiheutuvat CO<sub>2</sub>-päästöt ovat biokaasun tuotannon merkittävin yksittäinen negatiivinen ympäristövaikutus, minkä vuoksi biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehdot perustuivat ensisijaisesti raaka-aineiden kuljetusetäisyyksien minimoimiseen. Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtoja koskevan analyysin yksinkertaistamiseksi käsittelyjäännöksen kuljettamista ei huomioitu. Kuljetusetäisyyksien minimoimisen lisäksi biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen valintaan vaikuttivat biokaasusta tuotettavan lämmön tai liikennepolttoaineen hyödyntämismahdollisuudet. Yhdistetyssä lämmön ja sähköntuotannossa sekä liikennepolttoainetuotannossa biokaasulaitosten sijoitteluvaihtoehtojen kriteerinä oli joko lämmön tai biometaanin maksimaalinen hyödyntäminen, minkä vuoksi laitosten sijoitusvaihtoehtoissa huomioitiin lämmön tai biometaanin potentiaalisten käyttäjien sijainnit.

Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehdot arvioitiin maakunnallisesti. Pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten maakunnallista sijoittamista ei ollut mahdollista toteuttaa, koska mautilojen tarkkoja eläinmäärä- ja sijaintitietoja ei ollut saatavilla. Viljelysmaiden pinta-ala tiedot kuitenkin mahdollistivat mautilakokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioimisen kuntakohtaisesti. Tässä tutkielmassa tarkasteltiin esimerkinomaisesti Laukaan kuntaan sijoitettavia biokaasulaitosvaihtoehtoja. Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtotarkastelu toteutettiin molemmissa kokoluokissa ArcGIS® -paikkatieto-ohjelmiston ja Digiroad 2009 -aineiston avulla. Digiroad 2009 on paikkatietoaineisto, joka sisältää kansallisen tie- ja katutietojärjestelmän (Tiehallinto 2009). Aineisto soveltuu esimerkiksi paikkatietoanalyysien lähdeaineistoksi sekä kuljetuksien ja logistiikan suunnitteluun.

### 3.11.2 Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu

Suuren kokoluokan biokaasulaitosten maakunnalliset sijoitusvaihtoehdot arvioitiin biokaasulaitoksissa käytettävien raaka-aineiden massoihin ja paikkatietoihin perustuvalla tiheysanalyysillä (Kernel density estimation) sekä biokaasusta tuotettavan lämmön tai biometaanin käyttäjäpotentiaalien perusteella. Tiheysanalyysin tuloksena saadaan pintaesitys, joka kuvaa materiaalin keskittymistä alueellisesti (kuva 6). Jos materiaali voitaisiin kuljettaa suorinta mahdollista reittiä biokaasulaitoksiin, antaisi tämän pintaesityksen huippujen valinta suoraan sellaiset sijoituspaikat biokaasulaitoksille, jotka minimoisivat kuljetustarpeet. Käytännössä monihuippuisen ratkaisun tulkinta ei ole kuitenkaan näin helppoa, ja tiestöön perustuvien kuljetustenkin vuoksi tulos on vain karkea pelkistys todellisuudesta.



Kuva 6. Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinnissa käytettävän tiheysanalyysin periaate. Tässä kuvataan yhden materiaalin alueellista keskittymistä. Yhden materiaalin perusteella tehtävä summapinta esitetään kuvassa 8 (Alkuperäinen kuva: Anssi Lensu 2009).

Tiheysanalyysiä alustettiin sijoittamalla suuren kokoluokan biokaasulaitoksissa käytettävien materiaalien massat Keski-Suomen karttapohjalle, joka tässä tutkimuksessa oli Maanmittauslaitoksen vuoden 2006 näyteaineisto (1:4,5 milj.). Jätevedenpuhdistamoiden lietteet sijoitettiin kunnallisten jätevedenpuhdistuslaitosten koordinaattipisteisiin ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien massat teollisuuslaitosten koordinaattipisteisiin. Yhdyskuntien biojätteen määrät asetettiin joko biojätettä vastaanottavien seudullisten jäteasemien paikoille tai ArcGIS<sup>®</sup> -paikkatieto-ohjelmistolla määritettyihin kuntien (Joutsa, Konnevesi, Kyyjärvi, Luhanka, Pihtipudas ja Viitasaari) keskipisteisiin.

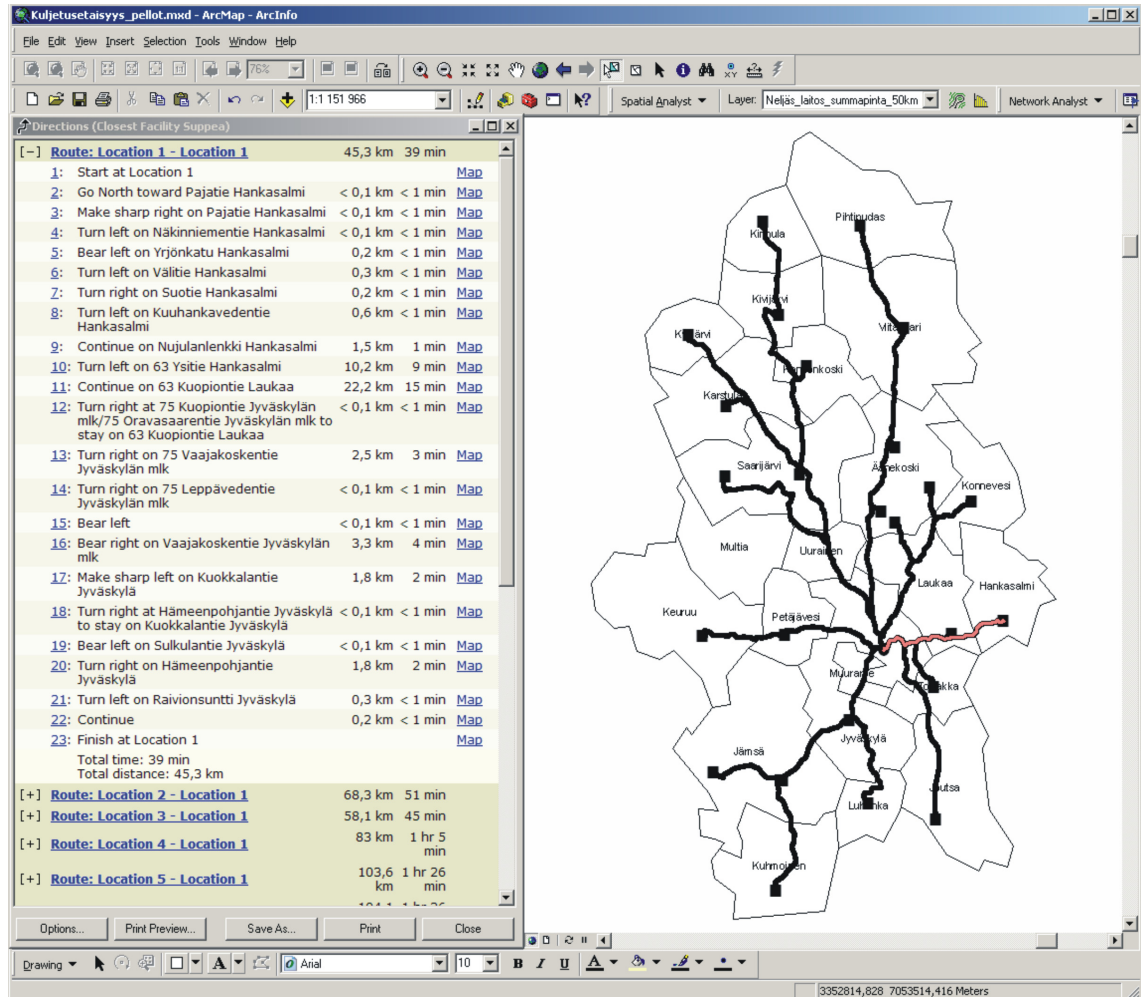
Tiheysanalyysiä varten tarvitaan muuttuja-/ominaisuustieto, jonka suhteen lasketaan tiheys ja materiaalien kuljetusetäisyyksiä vastaava vuorovaikutussäteen pituus. Tässä tutkielmassa materiaalien ominaisuustiedoksi valittiin materiaalien massat, koska tarkoituksena oli selvittää materiaalien alueellinen keskittyminen Keski-Suomen alueella ja minimoida materiaalien kuljetustarve. Massat ilmoitettiin märkäpainona, koska niiden oletettiin rajoittavan ajoneuvoon mahtuvan materiaalin määrää. Tiheysanalyysissä koordinaattipisteisiin (ytimiin) sijoitetut materiaalimäärät vaikuttivat ytimien kokoon, koska paikkatieto-ohjelma jakoi ytimeen sijoitetun materiaalin määrän siten, että ytimen tilavuus vastasi ytimessä olleen massan määrää.

Vuorovaikutussäteen pituus (ytimen leveys) vaikutti alueen laajuuteen, johon materiaalien määrä jaettiin. Vuorovaikutussäteen ollessa erittäin pieni raaka-aineiden määrät jakaantuvat lähelle ytimiä. Tällöin sopivia biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtoja olisivat kaikki ytimet, koska kuljetusetäisyyden pituus ei mahdollistaisi muita ratkaisuja. Suurella vuorovaikutussäteellä materiaalien määrät jakaantuvat laajalle alueelle, jolloin biokaasulaitoksiin kuljetettavien raaka-aineiden kuljetusetäisyydet voivat olla pidempiä. Kirjallisuudessa (Berglund & Börjesson 2006) on esitetty useita erilaisia lukuarvoja eri materiaalien kuljetusmatkojen pituuksille, jotka ovat perustuneet esimerkiksi materiaalista saatavan energian ja materiaaliin kulutetun energian suhteeseen. Tässä tutkielmassa näitä lukuarvoja ei voitu käyttää suoraan, koska vuorovaikutussäteen tulee olla jokaiselle materiaalille yhtä pitkä, jos tulospintoja halutaan yhdistää. Tämän vuoksi ytimen leveys selvitettiin ja arvioitiin Keski-Suomen alueella erikseen.

Vuorovaikutussäteen arviointi perustui materiaalien kuljetuksissa muodostuvien CO<sub>2</sub>-päästöjen minimoimiseen maakunnan alueella. Arvio edellytti jäljempänä kuvattavien tiheysanalyysien tekoa jokaisesta materiaalista erikseen siten, että ainoastaan vuorovaikutussäteen lukuarvoja muutettiin. Vuorovaikutussäteen lukuarvoina käytettiin 50, 60, 70, 100 ja 200 km. Tiheysanalyysin tuloksena saatiin selville suuren kokoluokan biokaasulaitoksessa hyödynnettävien materiaalien alueellinen keskittyminen, joka painottui Jyväskylän kaupungin ympäristöön kaikilla vuorovaikutussäteen lukuarvoilla.

Materiaalien kuljetuksista aiheutuvien CO<sub>2</sub>-päästöjen laskemiseksi biokaasulaitoksen tarkemmaksi sijainniksi valittiin Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:n jätevedenpuhdistamo. CO<sub>2</sub>-päästölaskuissa oletettiin, että kaikkien materiaalien kuljetuksiin voidaan käyttää ajoneuvoa (kantavuus 19 t), joka on menomatalla täydessä lastissa ja paluumatkalla tyhjä. Ajoneuvon tuottamien CO<sub>2</sub>-päästöjen lukuarvoina käytettiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) toteuttaman Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmän (LIISA) mukaisia tuloksia. Materiaalien todelliset kuljetusetäisyydet laskettiin ArcGIS<sup>®</sup> Network Analyst Extensionin Closest Facility -työkalun ja Digiroad 2009 -aineiston avulla (kuva 7).

Massojen kuljetuksista aiheutuvat CO<sub>2</sub>-päästöt olivat suurimmat, kun vuorovaikutussäteen pituus oli 200 km. CO<sub>2</sub>-päästöistä yli 60 % muodostui 50 – 60 km etäisyydellä biokaasulaitoksesta olevien suurten massojen kuljettamisesta Jyväskylän laitokseen. Tämän vuoksi vuorovaikutussäteen pituudeksi valittiin 50 km, jolloin CO<sub>2</sub>-päästöt olivat noin 80 % pienemmät 200 km vuorovaikutussäteen tapaukseen verrattuna.



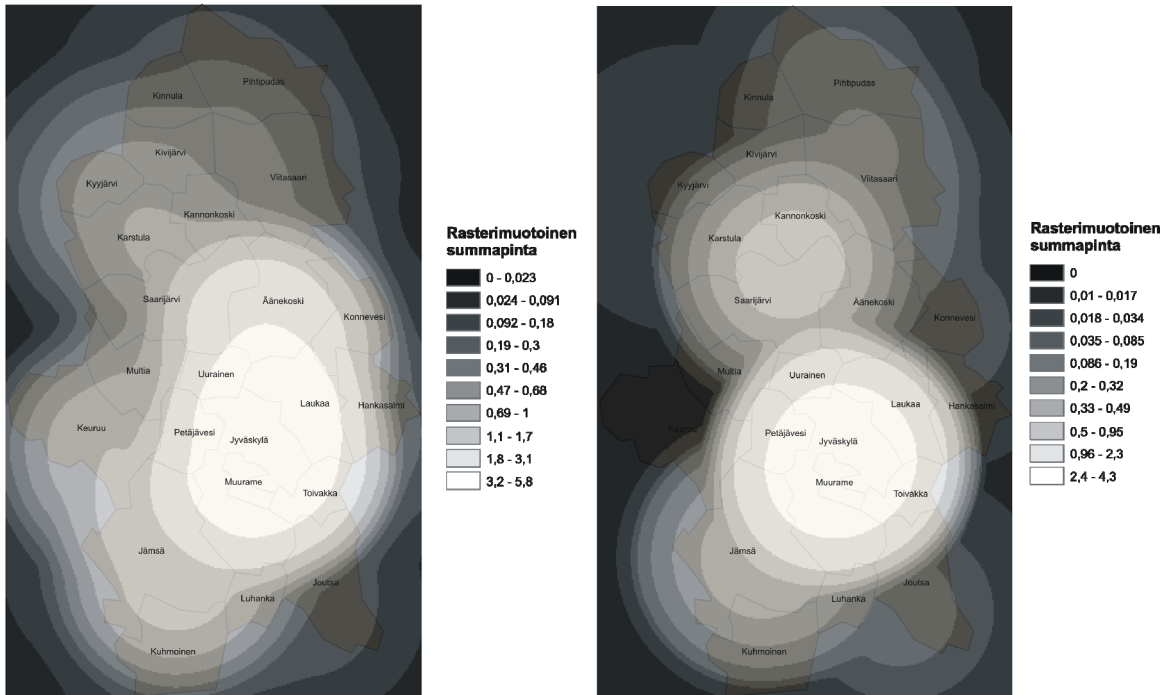
Kuva 7. Digiroad 2009 -aineiston ja Closest Facility -työkalun avulla voitiin laskea esimerkiksi Keski-Suomessa toimivissa kunnallisissa jätevedenpuhdistamoissa muodostuvien lietteiden todelliset kuljetusetäisyydet. Vasemmalla olevassa taulukossa esitetään tarkat ajo-ohjeet ja matkaan keskimäärin käytettävä aika Hankasalmen jätevedenpuhdistamolta Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:n jätevedenpuhdistamoon (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10. Tieaineisto: © Tiehallinto 2009).

Lähtöarvojen määrittämisen jälkeen tiheysanalyysi tehtiin jokaiselle materiaalille erikseen. Tiheysanalyysin tuloksena muodostui 2-ulotteinen rasterimuotoinen summapinta, joka perustui kaavan 9 (Silverman 1986) laskutoimituksiin (kuvat 8 ja 9).

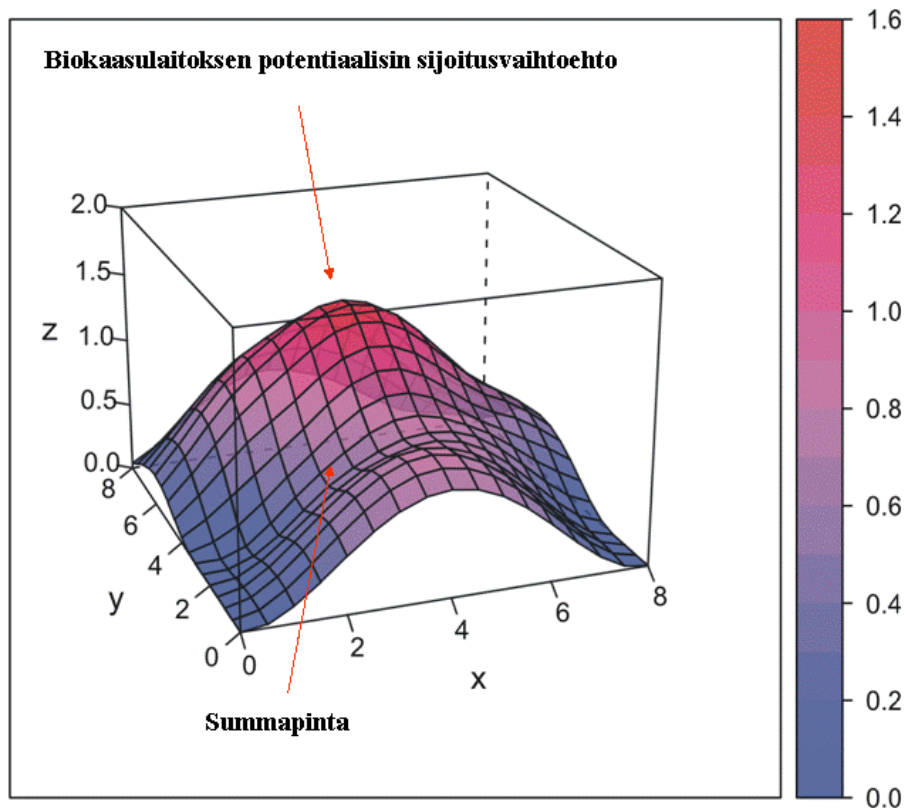
$$\hat{\lambda}(x) = \frac{1}{h^2} \sum_{i=1}^n \kappa\left(\frac{\|x - x_i\|}{h}\right), \quad (9)$$

missä  $\kappa(u) = \frac{3}{\pi} (1 - \|u\|^2)^2$ , jos  $\|u\| < 1$

muulloin  $\kappa(u) = 0$



Kuva 8. 2-ulotteinen rasterimuotoinen summapinta jätevedenpuhdistamoiden lietteistä (vasemmanpuoleinen kuva) ja yhdyskuntien biojätteestä (oikeanpuoleinen kuva). Vaalea väri kuvaa materiaalien tiheintä alueellista keskittymistä. Lukuarvot ovat suhteellisia eivätkä ole siten suoraan vertailukelpoisia (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).



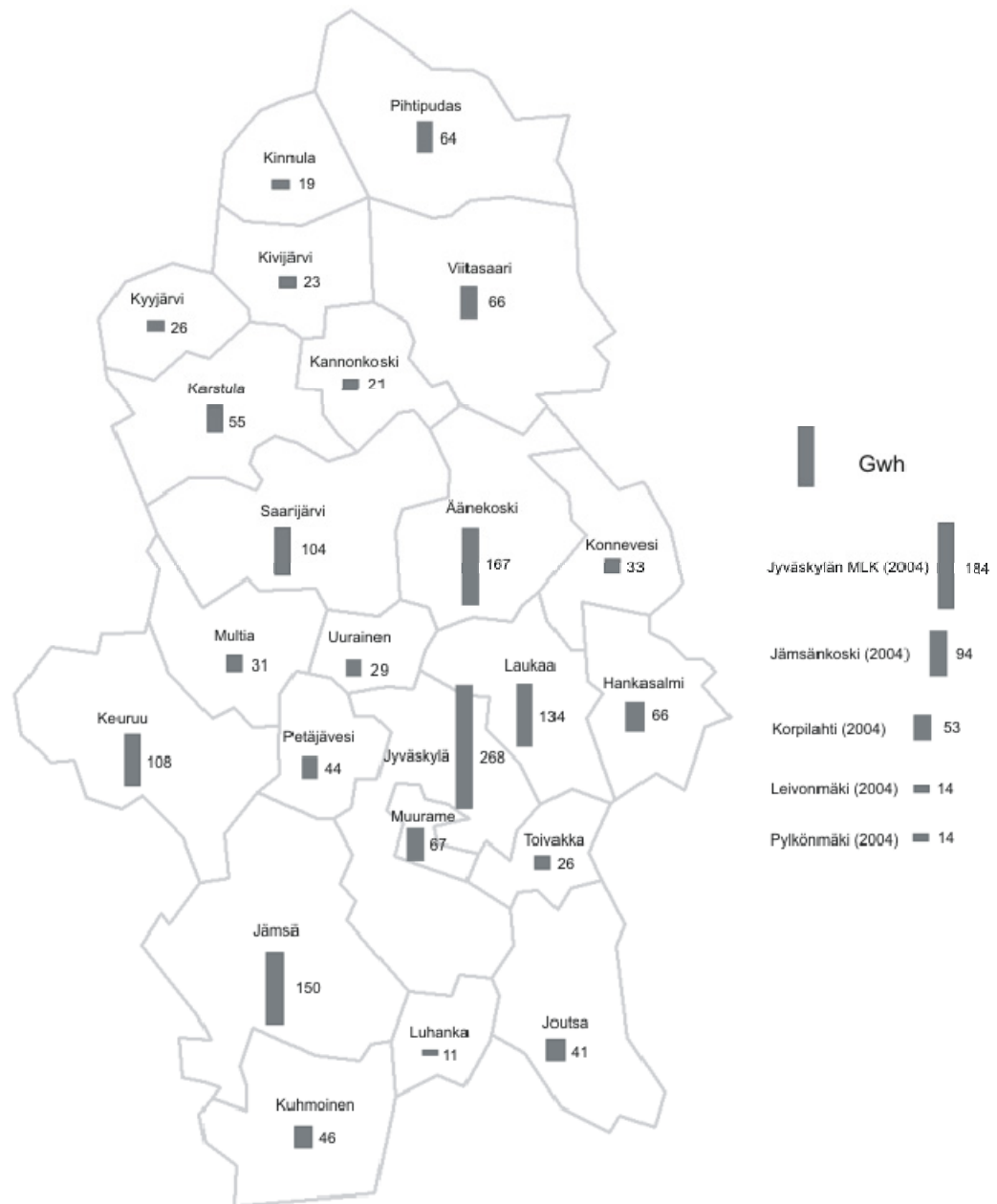
Kuva 9. Yhtä materiaalia koskevien ytimien yhteenlaskun tuloksena saatava summapinta (Alkuperäinen kuva: Anssi Lensu 2009).

Kaavan 9 avulla laskettiin jokaisen rasterisolun keskipisteelle  $x$  lukuarvo (tiheysarvo), johon vaikuttivat vuorovaikutussäteen  $h$  sisäpuolella olleet ytimet  $x_i$ . Tiheysfunktion neliöllisen muodon vuoksi ytimeen sijoitetun materiaalin vaikutus tiheyteen väheni ytimen ja solun keskipisteen välisen etäisyyden kasvaessa. Ytimeistä vuorovaikutussädetä kauempana olleet solut eivät saaneet kontribuutiota kyseisestä ytimeistä eli ytimen vaikutus niihin oli nolla. Lopuksi kaikkien ytimien arvot solun keskipisteessä laskettiin yhteen ja kerrottiin kertoimella  $h^{-2}$ .

Summapintoja painotettiin painokertoimilla, jotka arvioitiin materiaalien keskimääräisten metaanintuottopotentiaalien perusteella. Tällä tavoin huomioitiin, että biokaasulaitoksen metaanintuotto oli mahdollisimman suuri ja siellä käytettävien materiaalien kuljetusetäisyydet mahdollisimman pienet. Yhdyskuntien biojätteen keskimääräinen metaanintuottopotentiaali oli korkein, minkä vuoksi sen painokerroin oli 1. Muiden materiaalien keskimääräiset metaanintuottopotentiaalit suhteutettiin biojätteen painokertoimeen. Lopuksi painotetut summapinnat laskettiin yhteen. Yhteenlasku edellytti, että jokaisen materiaalin rasterihila oli identtinen, eli rasterikuvan kuvapisteen lukumäärä ja niiden koko olivat samansuuruisia. Soveltuvien biokaasulaitoksen sijainti valittiin tämän tulospinnan sekä muiden rajoitteiden kuten lämmön tai liikennepolttoaineen käyttäjäpotentiaalin avulla.

Tapauksessa, jossa biokaasulaitoksessa tuotettiin lämpöä ja sähköä CHP-tekniikalla, tuotettavan lämmön käyttäjäpotentiaali täytyi ottaa huomioon biokaasulaitosten sijoituspaikkavaihtoehtojen vertailussa. Lämmön hyödyntäminen mahdollistaa paremman hyötysuhteen biokaasulaitoksessa tuotettavalle energialle. Tässä tutkielmassa lämmön käyttäjäpotentiaali arvioitiin Keski-Suomen energiatoimiston (2004) tekemästä Keski-Suomen kuntien energiatasetarkastelusta, jossa rakennusten lämmitykseen käytetty energia jaettiin kaukolämmön, sähkölämmityksen ja kiinteistökohtaisten (puu ja öljy) lämmitysten kesken. Biokaasusta tuotettavan lämmön laskennalliseksi käyttäjäpotentiaaliksi arvioitiin kiinteistökohtaiset lämmitysjärjestelmät, jotka olisivat helpoimmin muunnettavissa käyttämään biokaasusta tuotettua lämpöä (kuva 10).

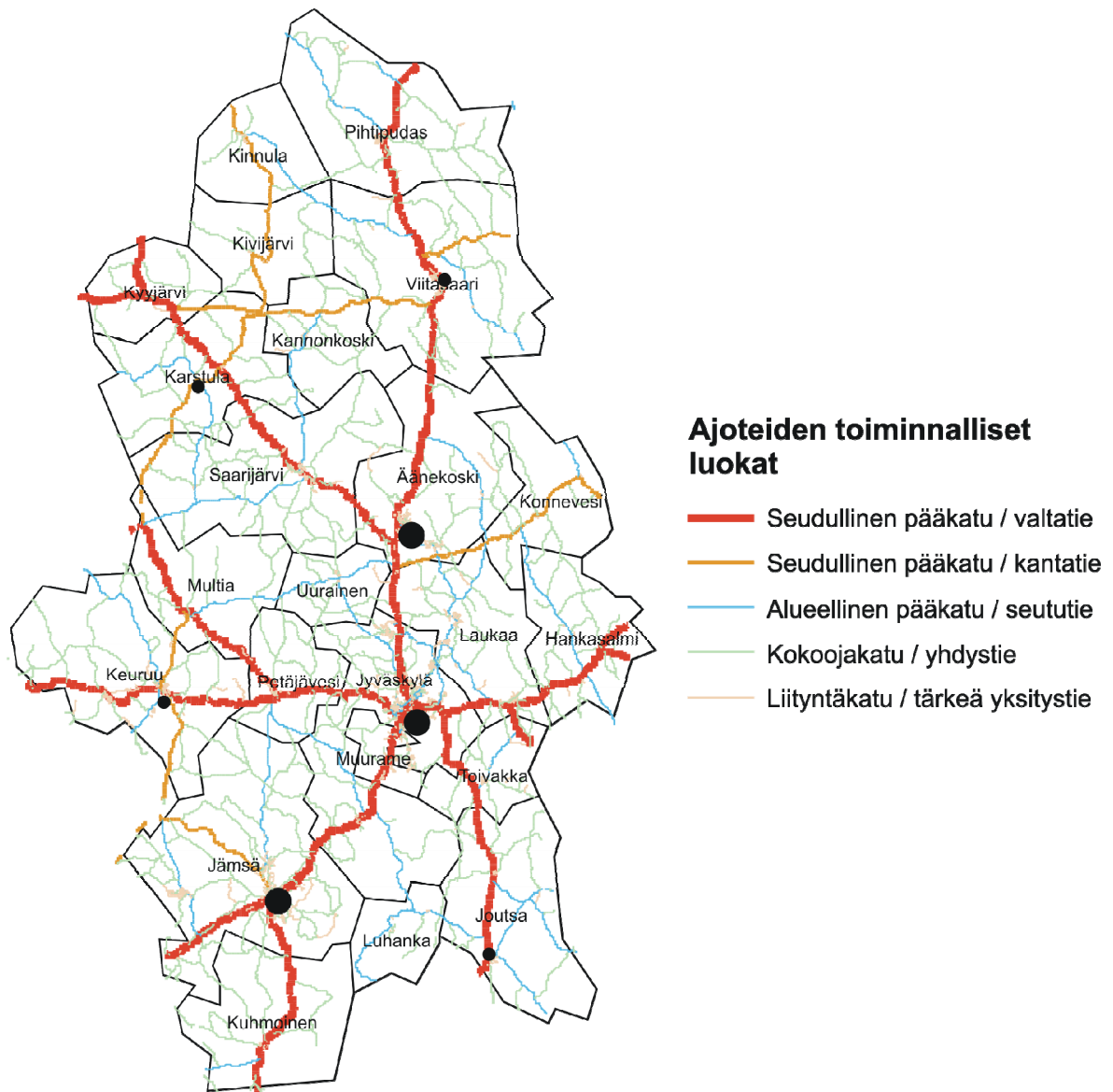
Tässä tutkielmassa liikennepolttoaineen käyttäjien määrää arvioitiin Digiroad 2009 -aineiston perusteella. Tiet on jaettu Digiroad 2009 -aineistossa viiteen eri luokkaan: valtateihin, seututeihin, kantateihin, yhdysteihin ja tärkeisiin yksityisteihin. Suurelle osalle kaikista tieosuudesta on annettu ominaisuustietona teiden käyttäjämäärä (ajoneuvoja/vuosi). Tämän tiedon perusteella tieosuudet havainnollistettiin eri värein, jolloin biokaasulaitosten sijoituspaikkavaihtoehtoja voitiin tarkastella tarkemmin (kuva 11).



Kuva 10. Keski-Suomen kuntien vuoden 2004 kiinteistökohtaisen lämmön käytön perusteella arvioitu biokaasusta tuotettavan lämmön käyttäjäpotentiaali. Jyväskylän MLK:n, Jämsänkosken, Korpilahden, Leivonmäen ja Pylkönmäen kiinteistökohtaista lämmön käyttöä ei ole huomioitu kartan lukuarvoissa. (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).

Ensimmäisen biokaasulaitoksen sijoitusvaihtoehdon arvioimisen jälkeen laskettiin laitoksessa hyödynnettävien materiaalien todelliset kuljetusetäisyydet käyttämällä Closest Facility -työkalua. Tässä tutkielmassa päätettiin CO<sub>2</sub>-päästölaskujen perusteella, että materiaalien todellisen kuljetusmatkan maksimipituus on 50 km. Tämän vuoksi ensimmäisen suuren kokoluokan biokaasulaitoksen sijoitusvaihtoehdon arvioimisen

jälkeen Keski-Suomessa muodostuvista orgaanisista yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaaleista vähennettiin ensimmäisen laitoksen käyttämät materiaalmäärät.



Kuva 11. Digiroad 2009 -aineiston pohjalta havainnollistetut vuosittaiset käyttäjämäärät (ajoneuvoja/vuosi) Keski-Suomen alueella. Paksu viiva kuvaa suurta käyttäjämäärää (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10. Tieaineisto: © Tiehallinto 2009).

Seuraavien biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehdot estimoitiin käyttämällä tiheysanalyysiä ja lämmön sekä biometaanin käyttäjäpotentiaaliarvioita jäljelle jääville määrille edellä kuvatulla tavalla. Tarkastelua jatkettiin tällä tavoin kunnes kaikki maakunnan alueella muodostuneet jätevedenpuhdistamoiden lietteet, teollisuuden orgaaniset sivutuotteet ja yhdyskunnista erilliskerätyt biojätteet oli hyödynnetty jossakin suuren kokoluokan biokaasulaitoksessa.



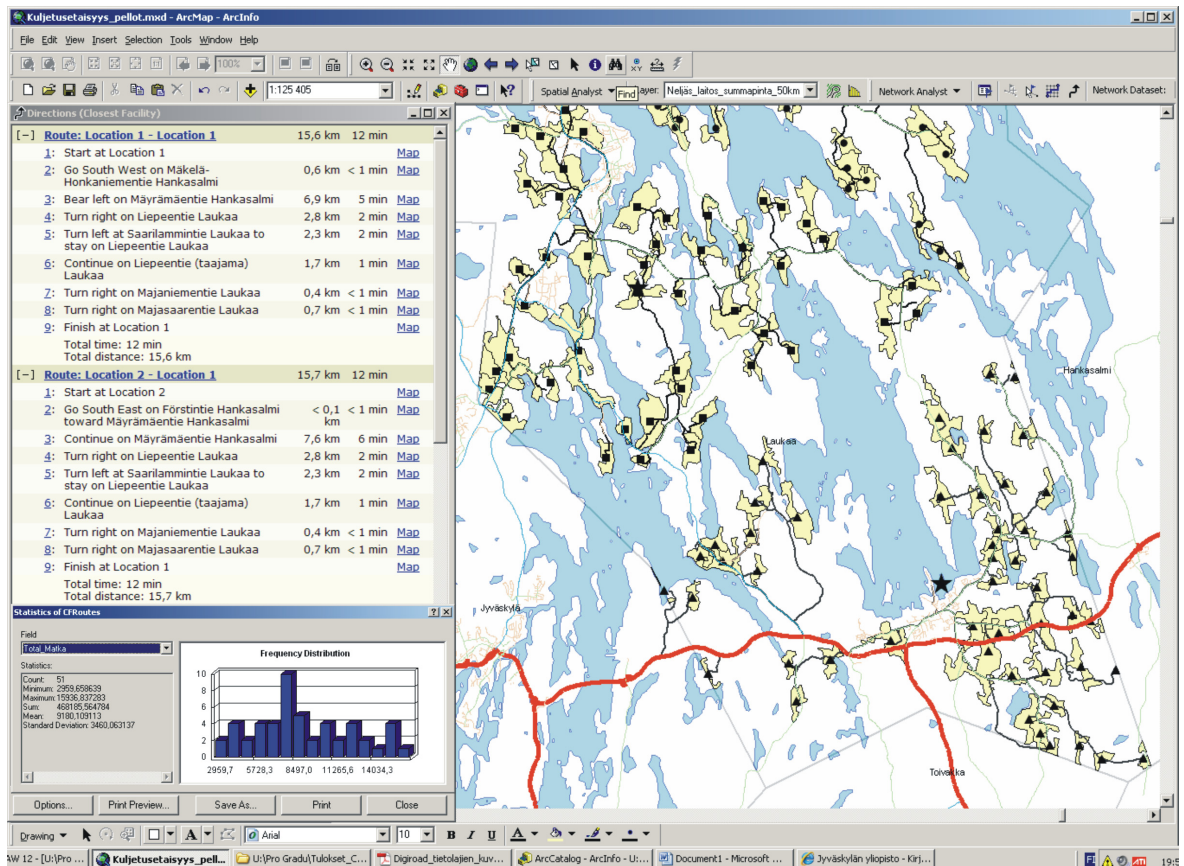
### 3.11.3 Pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen kuntakohtainen tarkastelu – esimerkkitapauksena Laukaan kunta

Tässä tutkielmassa pienen kokoluokan keskitetyissä biokaasulaitoksissa oletettiin käytettävän maatalouden materiaaleja (lanta ja olki) ja biokaasun tuotantoa varten viljeltäviä energiakasveja (nurmi). Näihin raaka-aineisiin perustuvaa maakunnallista tai kuntakohtaista sijoittelua ei voitu kuitenkaan toteuttaa, koska maatilakohtaisia eläinmäärä-, peltopinta-ala- ja paikkatietoja ei ollut saatavilla. Tämän vuoksi pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu rajoitettiin esimerkinomaisesti kuntakohtaiseen (Laukaa) viljelysmaiden pinta-alatietoihin perustuvaan tiheysanalyysiin (Kernel density estimation).

Keski-Suomen alueen viljelysmaiden pinta-alatiedot perustuivat Suomen ympäristökeskuksen ja Maanmittauslaitoksen tuottamaan CORINE Land Cover 2000 -aineistoon, josta ArcGIS<sup>®</sup> -paikkatieto-ohjelmistolla määritettiin viljelysmaiden peltopinta-alat kuntakohtaisesti. Peltoalueiden keskipisteet määritettiin tiheysanalyysiä varten laskemalla peltojen x- ja y-koordinaatit jokaisesta peltoalueesta erikseen. Tiheysanalyysissä ominaisuustietona käytettiin peltojen pinta-aloja, koska peltojen koko vaikuttaa välillisesti niiltä saatavan oljen tai energiakasvin määrään. Ominaisuustiedot sijoitettiin peltoalueiden keskipisteisiin, jotka toimivat tiheysanalyysissä ytiminä. Vuorovaikutussäteen pituudeksi (ytimen leveys) arvioitiin 10 km, joka perustui kirjallisuudessa esitettyyn lukuarvoon (Dagnall ym. 2000).

Tiheysanalyysin tuloksena muodostui 2-ulotteinen rasterimuotoinen summapinta, joka laskettiin kaavan 9 avulla. Summapinnan perusteella arvioitiin mahdollisten biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen lukumäärä, joka vaikutti peltoalueiden jakamiseen biokaasulaitosten kesken. Paikkatieto-ohjelmistolla ei ollut helposti tehtävissä automaattista peltoalueiden jakoa ryhmiin, minkä vuoksi jako toteutettiin manuaalisesti valitsemalla sopivimmat pellot tietylle biokaasulaitosvaihtoehdolle (kuva 12). Valintaan vaikuttivat esimerkiksi vesistöt ja Digiroad 2009 -aineistolla havainnollistetut tiestöt. Menetelmän valinnan vuoksi biokaasulaitoksissa hyödynnettävien materiaalien määrät vaihtelivat laitoksittain.

Biokaasulaitoksessa käytettävän peltobiomassan tuotantoon valituista peltoalueista määritettiin Mean Center -työkalun avulla painotettu keskipiste, joka valittiin biokaasulaitoksen sijoituspaikaksi. Biokaasusta tuotettavan lämmön ja sähkön (CHP) sekä biometaanin käyttäjäpotentiaalit määritettiin Digiroad 2009 -aineiston perusteella siten, että vilkkaasti liikennöityjen tieosuuksien varrella oleviin biokaasulaitosten sijoituspaikkoihin valittiin biometaanin tuottava laitos. Muissa tapauksissa biokaasulaitoksissa oletettiin tuotettavan lämpöä ja sähköä.



Kuva 12. Pienen kokoluokan keskittyneiden biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu Laukaan kunnan alueella. Digiroad 2009 -aineistoa hyödynnettiin biokaasulaitoksissa tuotettavan lopputuotteen (lämpö ja sähkö tai biometaan) valinnassa (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10. Tieaineisto: © Tiehallinto 2009).

### 3.12 Biokaasulaitosten lukumäärien ja polttoainetehojen arviointi

Keski-Suomen alueelle sijoitettavien biokaasulaitosten lukumäärät arvioitiin orgaanisten materiaalmäärien sekä biokaasulaitosten kokoluokkien perusteella. Suuren kokoluokan (5000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitoksissa oletettiin käsiteltävän yhdyskunnissa ja teollisuudessa muodostuvia orgaanisia jätemateriaaleja ja pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitoksissa maatalouden materiaaleja (lanta ja olki) sekä energiakasveja.

Biokaasulaitoksissa hyödynnettävien raaka-aineiden sisältämä orgaanisen aineksen (VS) määrä laskettiin jokaiselle materiaalille erikseen. Oletuksena oli, että biokaasulaitokset toimivat ympäri vuoden (365 d) kuormituksella (OLR) 2 kg VS/m<sup>3</sup>d, jolloin niiden lukumäärät voitiin arvioida (kaava 1).

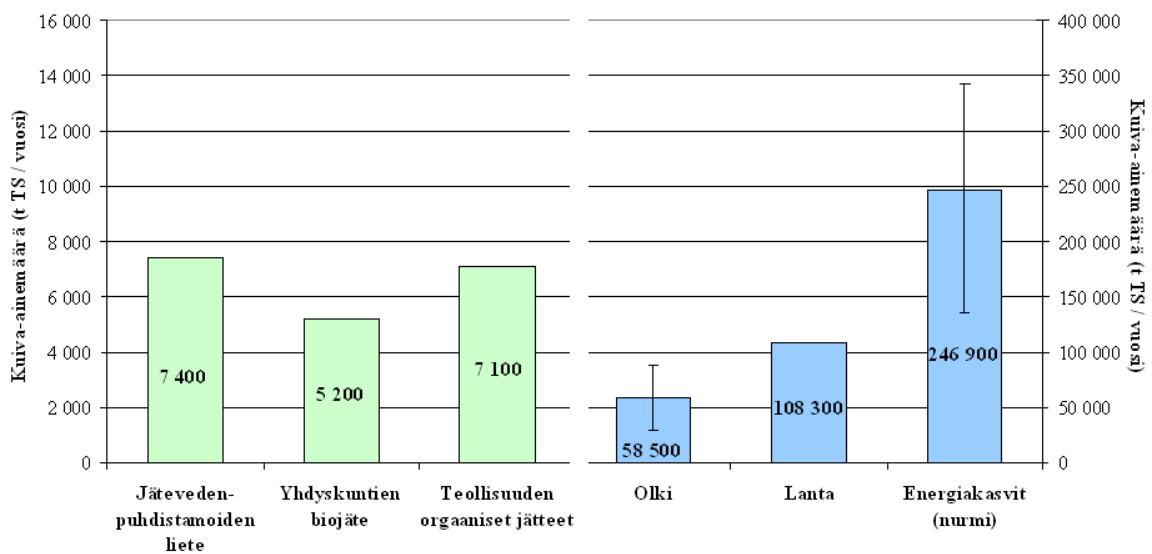
Biokaasulaitosten polttoainetehot arvioitiin biokaasulaitosten lukumäärien ja käsiteltävien orgaanisten materiaalien perusteella; raaka-aineista tuotettavan biokaasun primäärienergia laskettiin kaavalla 5, ja primäärienergia jaettiin biokaasulaitosten lukumäärällä.

## 4 TULOKSET

### 4.1 Keski-Suomen teorettinen biokaasupotentiaali

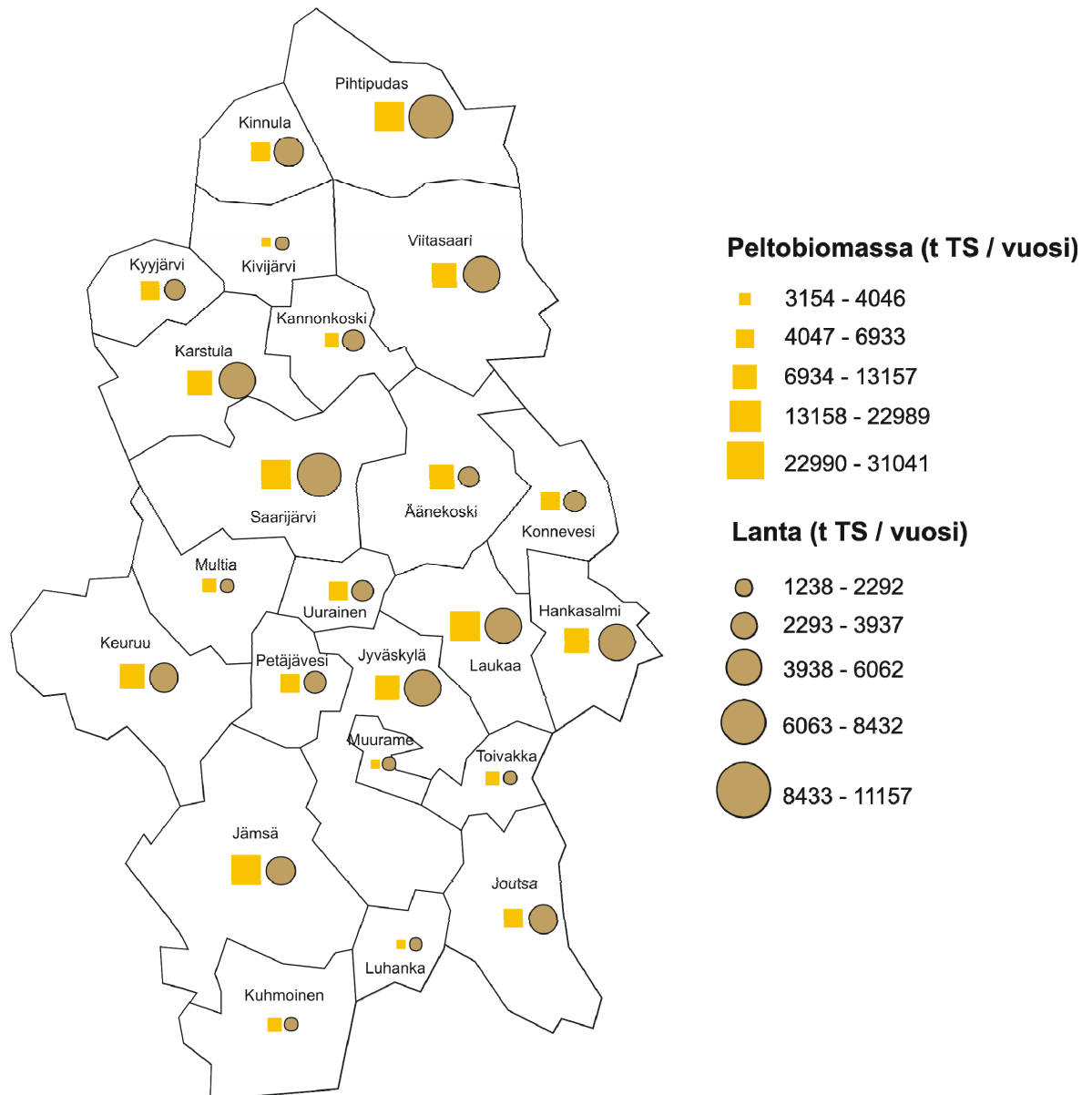
#### 4.1.1 Orgaanisten materiaalien teorettinen kokonaismäärä

Työssä laskettiin Keski-Suomen alueella muodostuvien orgaanisten materiaalien (lanta, olki, jätevedenpuhdistamoiden liete, yhdyskuntien biojäte sekä teollisuuden orgaaninen jäte) ja tuotettavissa olevien raaka-aineiden (energiakasvit) vuosittaiset teorettiset kokonaismäärät. Orgaanisten materiaalien laskennallinen kokonaismäärä on yhteensä noin 433 000 t TS/a (kuva 13). Suurin osa (57 %) kokonaismäärästä (TS) koostuu biokaasun tuotantoa varten viljeltävästä energiakasvista (nurmi). Maatalouden materiaalit (lanta ja olki) muodostavat noin 38 % ja yhdyskuntien sekä teollisuuden orgaaniset jättemateriaalit alle 5 % orgaanisten materiaalien teorettisesta määrästä.



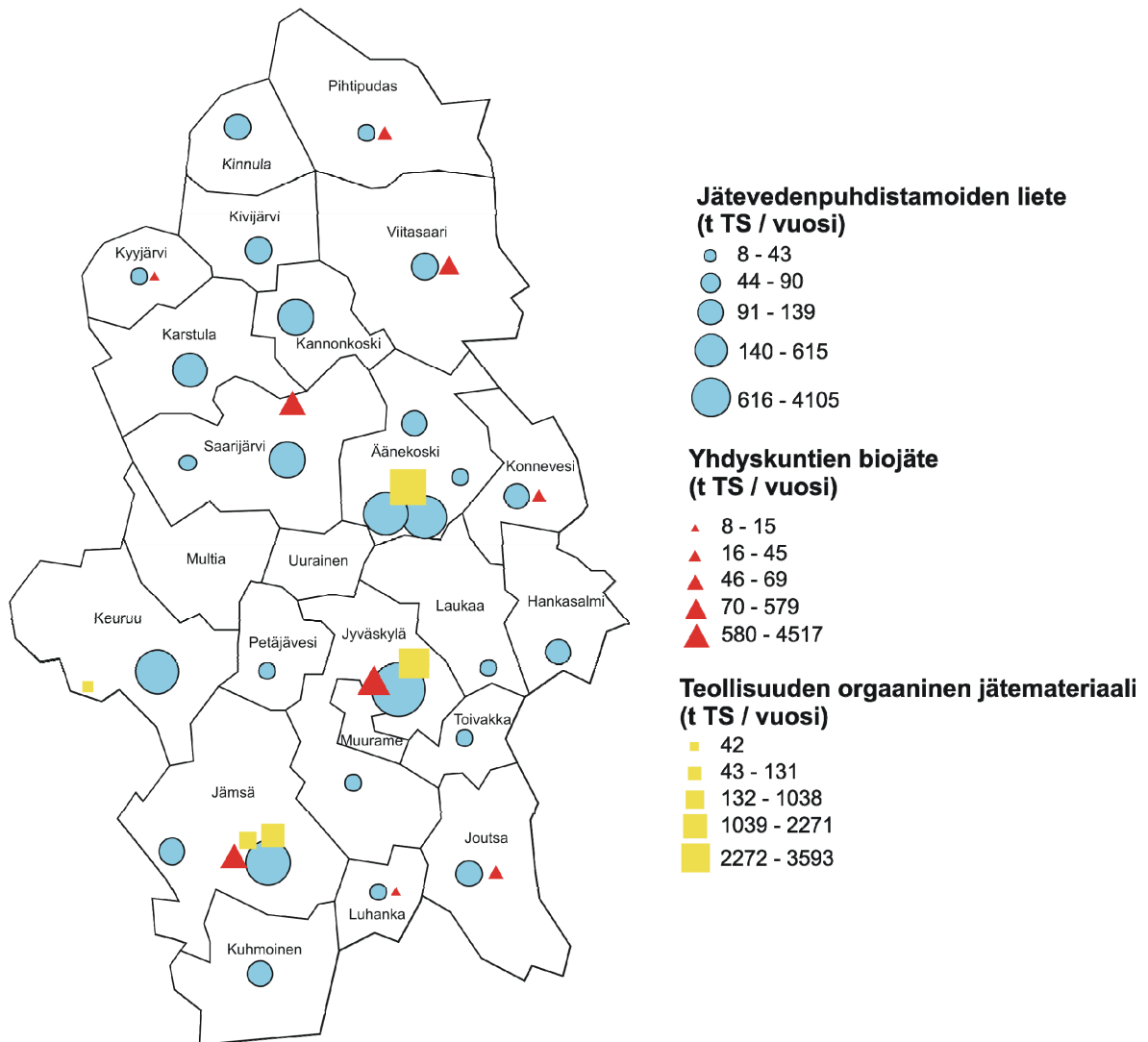
Kuva 13. Keski-Suomessa biokaasun tuotantoon soveltuvien orgaanisten materiaalien laskennallinen kokonaismäärä vuodessa. Ilmoitettu lukuarvo kuvaa keskimääräistä materiaalien määrää. Vaihteluvälit perustuvat oljen ja nurmen satotasojen vaihteluun. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

Lannan, oljen ja biokaasun tuotantoa varten viljeltävän nurmen jakautumista maakunnan alueelle havainnollistettiin karttapohjalla, jossa materiaalit sijoitettiin kuntakohtaisesti jokaisen kunnan keskipisteeseen (kuva 14). Peltobiomassan (olki ja nurmi) määrä on yli 20 000 t TS Jämsän, Saarijärven, Laukaan, Pihtiputaan, Jyväskylän ja Hankasalmen kunnissa, mikä vastaa yhteensä noin 50 % Keski-Suomen peltobiomassan kokonaispotentiaalista. Lannan määrä on suurin Pihtiputaan, Saarijärven, Hankasalmen, Laukaan, Jyväskylän, Viitasaaren ja Karstulan kunnissa, joissa lantaa muodostuu yhteensä noin 53 % Keski-Suomessa tuotetusta lannan kokonaismäärästä.



Kuva 14. Keski-Suomen kunnissa muodostuvan lannan määrä sekä peltobiomassan (olki ja nurmi) potentiaali (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).

Jätevedenpuhdistamoiden lietteitä muodostuu jokaisessa kunnassa, ja suurin osa (80 %) lietteiden määrästä (TS) keskittyy Jyväskylän, Jämsän ja Äänekosken kaupunkien alueille (kuva 15). Teollisuuden orgaaniset jätemateriaalit muodostuvat myös kokonaisuudessaan näiden kaupunkien läheisyydessä. Kolmelle seudulliselle jätteenkäsittelyasemalle (Jyväskylä, Jämsä ja Saarijärvi) toimitettavan yhdyskuntien biojätteen osuus on yli 96 % laskennallisesta maakunnan biojätteen kokonaismäärästä.

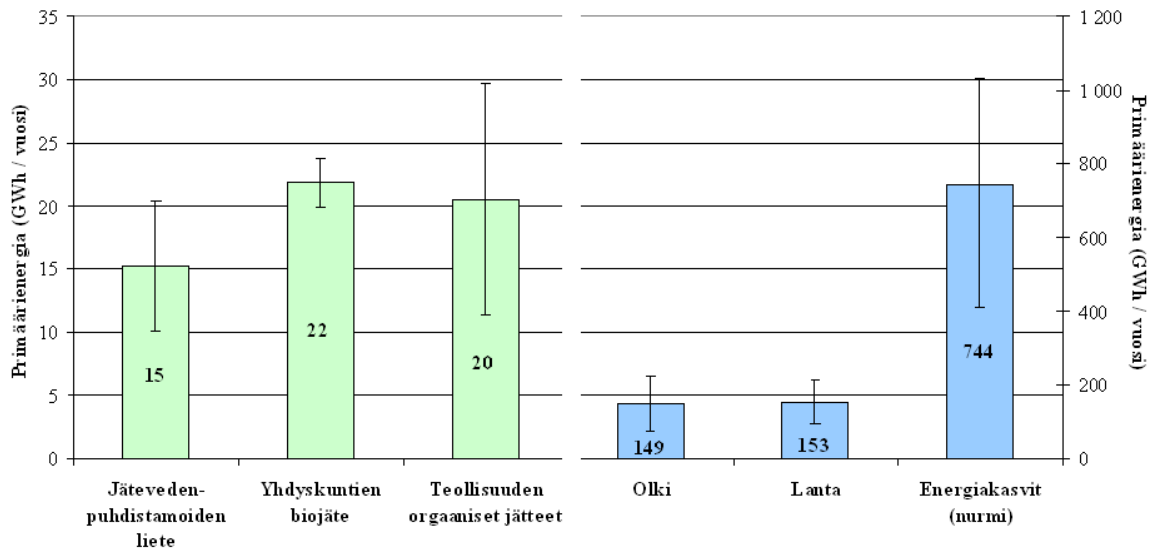


Kuva 15. Keski-Suomen orgaanisten jättemateriaalien alueellinen jakautuminen maakunnan alueella (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).

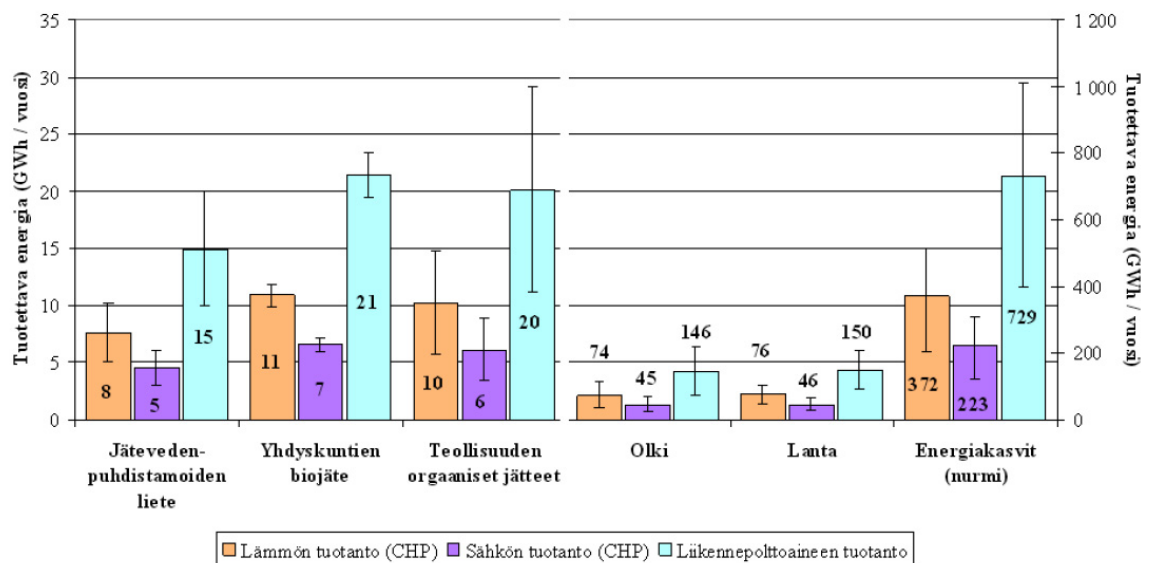
#### 4.1.2 Orgaanisten materiaalien teoreettinen energiapotentiaali

Keski-Suomen orgaanisten materiaalien teoreettinen biokaasupotentiaali on 0,6 – 1,5 TWh (keskimäärin 1,1 TWh) (kuva 16). Vaihteluvälit muodostuvat yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaaleilla sekä lannalla metaanintuottopotentialien minimi- ja maksimiarvoista. Nurmen ja oljen vaihteluvälit perustuvat satotasojen minimi- ja maksimiarvoihin. Biokaasun tuotantoa varten viljeltävän nurmen biokaasupotentiaali on suurin (keskimäärin 744 GWh), ja sen osuus on noin 67 % laskennallisesta biokaasupotentiaalista. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien biokaasupotentiaali on yhteensä noin 60 GWh, joka vastaa noin 5 % teoreettisesta biokaasupotentiaalista.

Teoreettisesta biokaasupotentiaalista laskettiin yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantopotentiaali sekä liikennepolttoainepotentiaali (kuva 17). Keski-Suomessa biokaasusta voidaan tuottaa 310 – 770 GWh (keskimäärin 550 GWh) lämpöä ja 190 – 460 GWh (keskimäärin 330 GWh) sähköä CHP-tuotannolla. Suurin osa (68 %) lämmön- ja sähköntuotantopotentiaalista voidaan tuottaa biokaasun tuotantoa varten viljeltävästä nurmesta. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien lämmöntuotantopotentiaali on keskimäärin 29 GWh ja sähköntuotantopotentiaali 17 GWh.



Kuva 16. Orgaanisten materiaalien teoreettinen biokaasupotentiaali vuodessa. Ilmoitettu lukuarvo kuvaa keskimääräistä primäärienergisäilyä. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

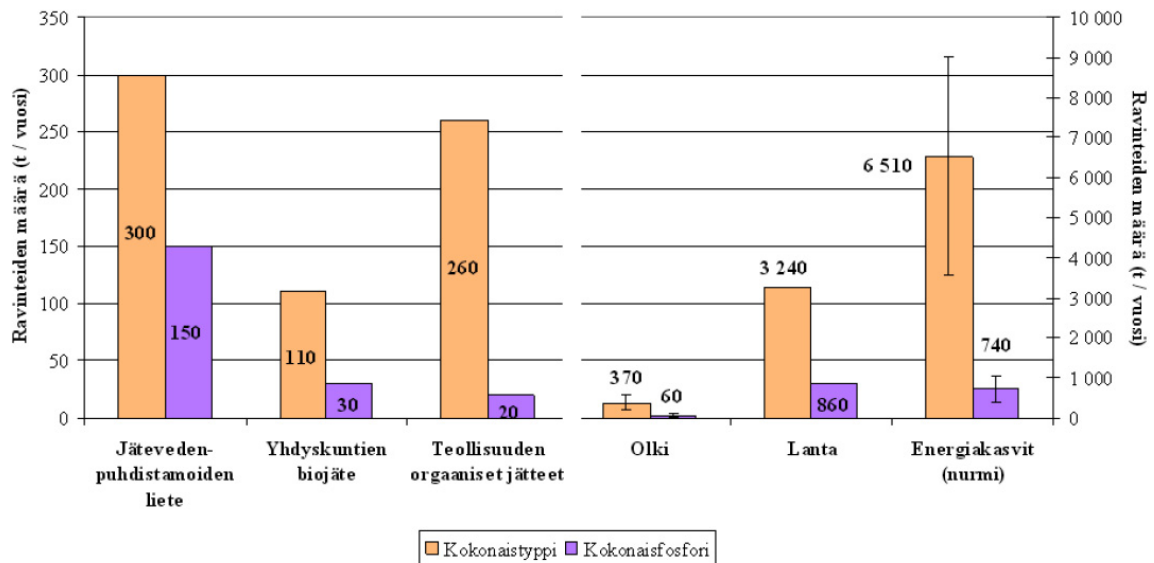


Kuva 17. Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantopotentiaali sekä liikennepolttoainepotentiaali. Ilmoitettu lukuarvo kuvaa keskimääräistä energiamäärää. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

Keski-Suomen liikennepolttoainepotentiaali on 0,6 – 1,5 TWh (keskimäärin 1,1 TWh). Maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) sekä energiakasveista (nurmi) voidaan tuottaa keskimäärin 1,0 TWh liikennepolttoainetta. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien liikennepolttoainepotentiaali (keskimäärin 60 GWh) vastaa yhteensä noin 5 % Keski-Suomen biometaanin liikennepolttoainepotentiaalista.

#### 4.1.3 Orgaanisten materiaalien kokonaistypen ja -fosforin teoreettiset määrät

Keski-Suomessa muodostuvat orgaaniset materiaalit sisältävät kokonaistyyppiä yhteensä noin 11 000 t/a ja kokonaisfosforia noin 2000 t/a (kuva 18). Kokonaistypen ja -fosforin määrät ovat suurimmat lannalla ja biokaasun tuotantoa varten viljeltävällä nurmella, jotka yhteensä sisältävät noin 92 % kokonaistypestä ja 87 % kokonaisfosforista. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien ravinteiden osuudet ovat noin 5 % kokonaistypestä ja 10 % kokonaisfosforista (noin 670 t kokonaistyyppiä ja 200 t kokonaisfosforia).

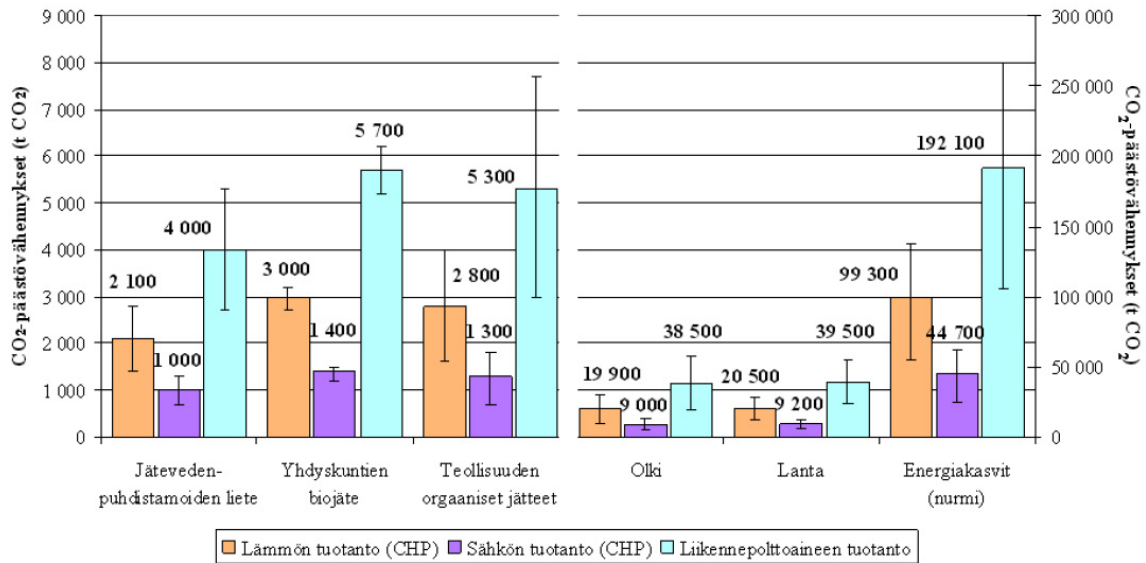


Kuva 18. Keski-Suomen orgaanisten materiaalien kokonaistypen ja -fosforin määrät vuodessa. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

#### 4.1.4 Teoreettisen biokaasupotentiaalin käytöllä saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset

Keski-Suomessa teoreettisen biokaasupotentiaalin käytöllä voidaan saavuttaa 120 000 – 299 000 (keskimäärin 213 500) t CO<sub>2</sub>-päästövähennykset vuosittain, jos yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa tuotettavalla lämmöllä korvataan kevyttä polttoöljyä ja sähköllä Suomessa keskimäärin tuotettua sähköä (kuva 19). Liikennepolttoainetuotannossa tuotettavalla biometaanilla voidaan korvata nestemäisiä liikennepolttoaineita (moottoribensiini ja dieselöljy), jolloin voidaan saavuttaa vuosittain 160 000 – 399 000 (keskimäärin 285 000) t CO<sub>2</sub>-päästövähennykset.

Suurin osa (67 %) keskimääräisistä CO<sub>2</sub>-päästövähennyksistä on mahdollista saavuttaa sekä yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa että liikennepolttoainetuotannossa biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi) käytöllä. Vaihteluvälit muodostuvat yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaaleilla sekä lannalla metaanintuottopotentiaalien minimi- ja maksimiarvoista. Nurmen ja oljen vaihteluvälit perustuvat satotasojen minimi- ja maksimiarvoihin.



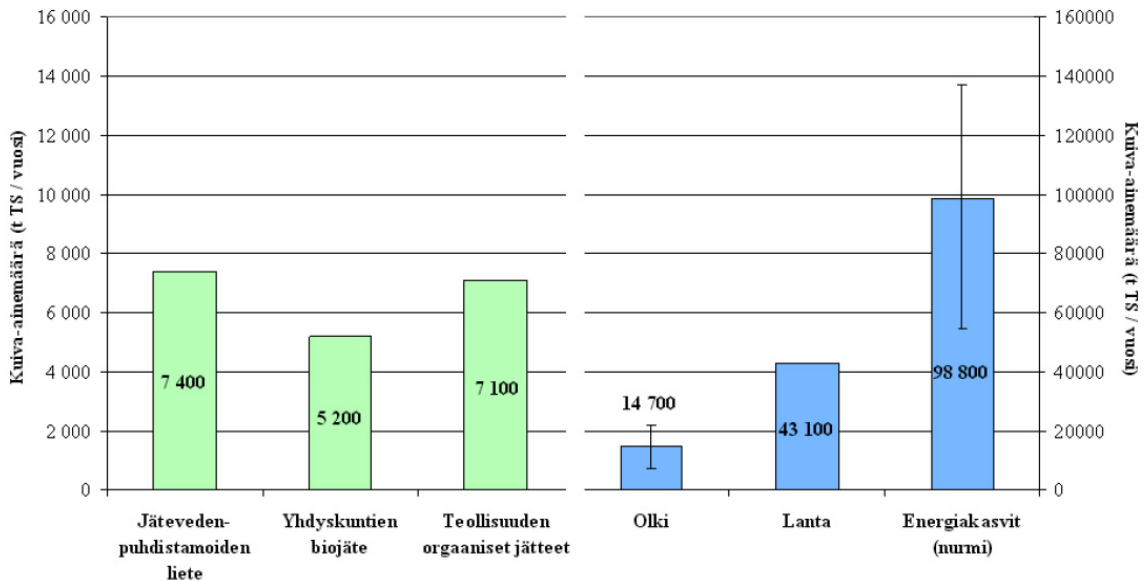
Kuva 19. Biokaasun käytöllä teoriassa saavutettavissa olevat CO<sub>2</sub>-päästövähennykset yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa sekä liikennepolttoainetuotannossa. Lukuarvo kuvaa keskimääräistä CO<sub>2</sub>-päästövähennystä. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

## 4.2 Keski-Suomen tekninen biokaasupotentiaali

### 4.2.1 Orgaanisten materiaalien teknisesti hyödynnettävissä oleva kokonaismäärä

Teknisen biokaasupotentiaalin arvioinnissa huomioitiin biokaasun tuotantoon käytettävien orgaanisten materiaalien hyödyntämismahdollisuudet Keski-Suomen alueella. Tarkastelussa oletettiin, että yhdyskunnissa ja teollisuudessa muodostuvat orgaaniset jättemateriaalit voidaan käyttää biokaasun tuotannossa kokonaisuudessaan, mutta maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoon viljeltävästä energiakasvista (nurmi) voidaan teknisesti hyödyntää ainoastaan osa. Orgaanisten materiaalien teknisesti hyödynnettävissä oleva kokonaismäärä on yhteensä noin 176 000 t TS/a (kuva 20). Suurin osa (56 %) hyödynnettävästä materiaalista koostuu nurmesta. Maatalouden materiaalit muodostavat noin 33 % ja yhdyskuntien sekä teollisuuden orgaaniset jättemateriaalit noin 11 % orgaanisten materiaalien teknisesti hyödynnettävissä olevasta kokonaismäärästä.





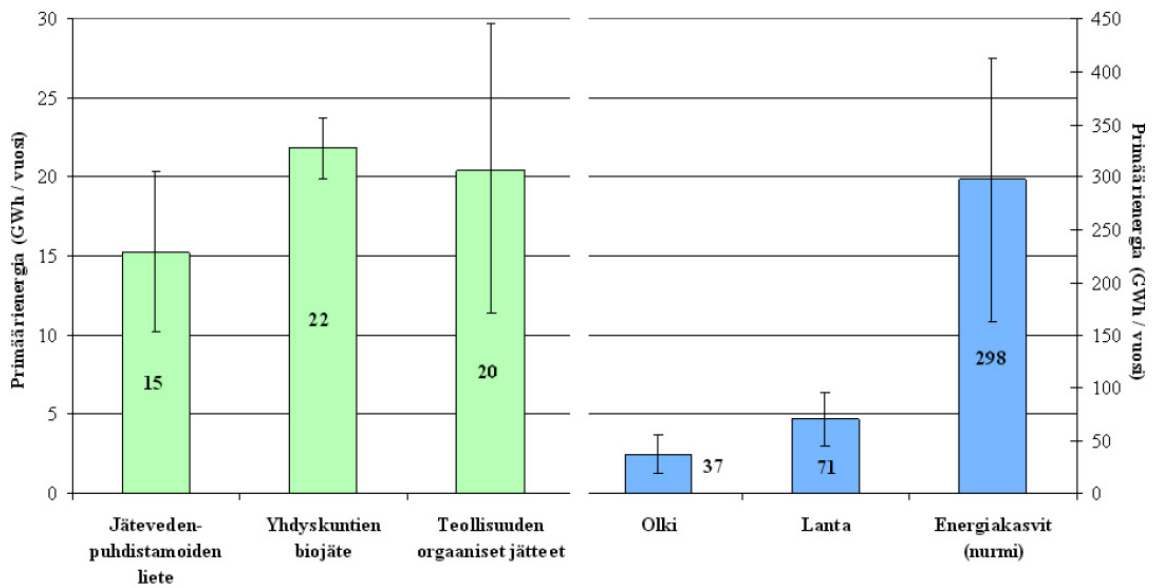
Kuva 20. Keski-Suomessa muodostuvien ja tuotettavissa olevien orgaanisten materiaalien tekninen potentiaali vuodessa. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

#### 4.2.2 Orgaanisten materiaalien tekninen energiapotentiaali

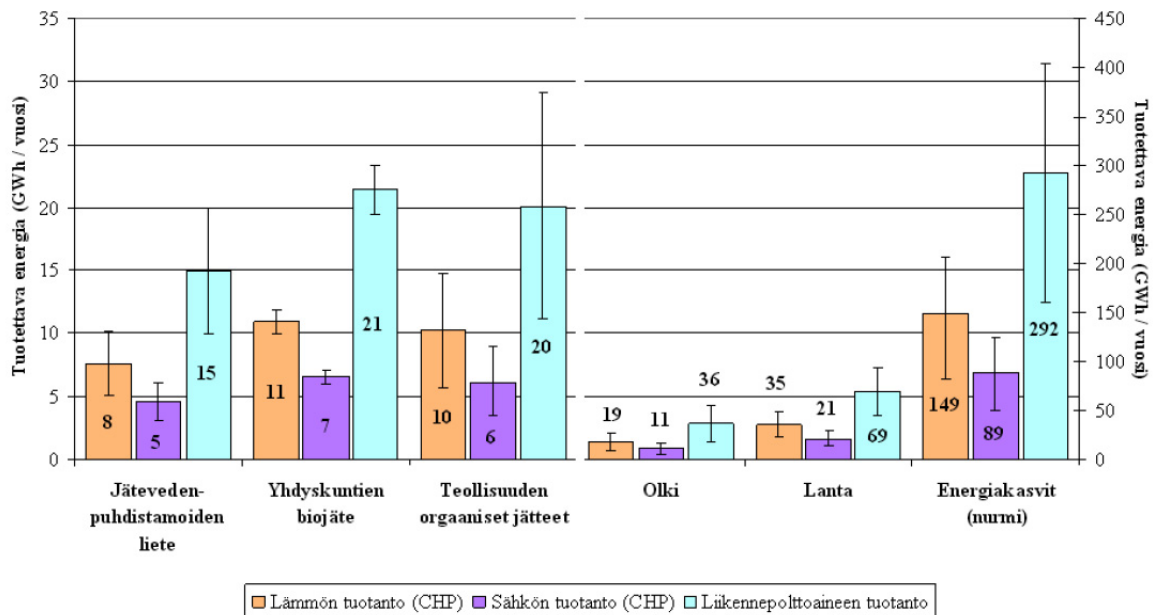
Keski-Suomessa teknisesti hyödynnettävissä olevien orgaanisten materiaalien biokaasupotentiaali on 270 – 640 GWh (keskimäärin 460 GWh) (kuva 21). Vaihteluvälit muodostuvat yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaaleilla sekä lannalla metaanintuottopotentiaalien minimi- ja maksimiarvoista. Nurmen ja oljen vaihteluvälit perustuvat satotasojen minimi- ja maksimiarvoihin. Suurin osa (88 %) teknisestä biokaasupotentiaalista koostuu maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävästä nurmesta. Nurmen osuus on suurin (64 %).

Keski-Suomessa biokaasusta voidaan teknisesti tuottaa lämpöä 140 – 320 GWh (keskimäärin 230 GWh) ja sähköä 80 – 190 GWh (keskimäärin 140 GWh) yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa (kuva 22). Suurin osa (64 %) lämmöstä ja sähköstä voidaan tuottaa nurmesta. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisista jättemateriaaleista voidaan tuottaa noin 12 % keskimääräisestä lämmön- ja sähköntuotannosta.

Keski-Suomen tekninen liikennepolttoainepotentiaali on 260 – 630 GWh (keskimäärin 450 GWh). Maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) sekä nurmesta voidaan tuottaa liikennepolttoainetta keskimäärin noin 400 GWh, joka vastaa 88 % liikennepolttoainepotentiaalista.



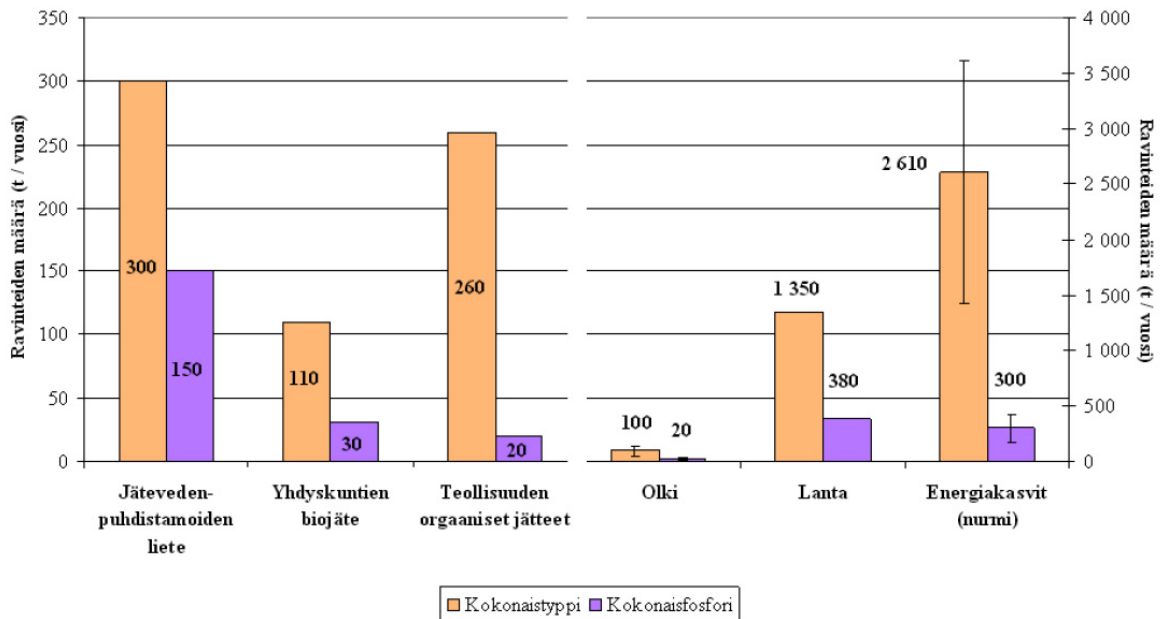
Kuva 21. Teknisesti hyödynnettävissä olevien orgaanisten materiaalien biokaasupotentiaali vuodessa. Ilmoitettu lukuarvo kuvaa keskimääräistä primäärienergiasisältöä. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).



Kuva 22. Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotantopotentiaali sekä liikennepolttoainepotentiaali. Ilmoitettu lukuarvo kuvaa keskimääräistä energiamäärää. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

#### 4.2.3 Teknisesti hyödynnettävien orgaanisten materiaalien kokonaistypen ja -fosforin määrät

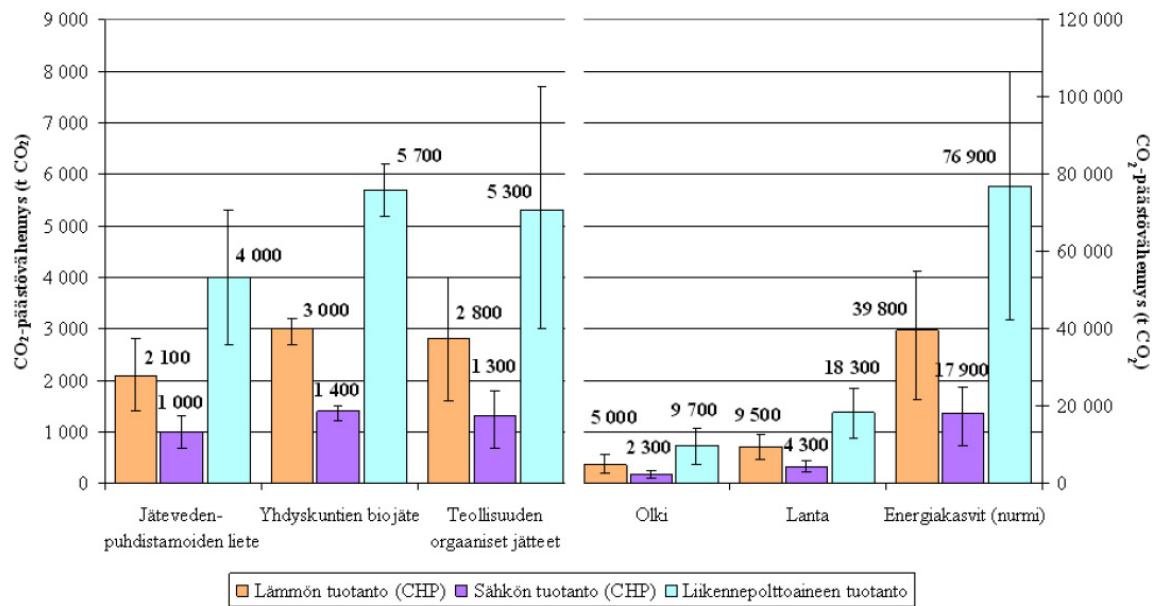
Keski-Suomessa teknisesti hyödynnettävät orgaaniset materiaalit sisältävät kokonaistyyppiä yhteensä noin 4 700 t ja kokonaisfosforia noin 900 t (kuva 23). Biokaasun tuotantoa varten viljeltävät energiakasvit (nurmi) sisältävät suurimman osan (55 %) orgaanisten materiaalien kokonaistypestä. Lannat sisältävät noin 29 % kokonaistypestä ja 42 % kokonaisfosforista. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaaniset jättemateriaalit sisältävät noin 14 % kokonaistypestä ja 22 % kokonaisfosforista.



Kuva 23. Keski-Suomessa teknisesti hyödynnettävien orgaanisten materiaalien kokonaistypen ja -fosforin määrät vuodessa. Ilmoitettu lukuarvo kuvaa keskimääräistä ravinteiden määrää. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jätteiden asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävien energiakasvien (nurmi).

#### 4.2.4 Teknisen biokaasupotentiaalin käytöllä saavutettavat kasvihuonekaasupäästövähennykset

Keski-Suomessa teknisen biokaasupotentiaalin käytöllä voidaan saavuttaa 53 000 – 124 000 (keskimäärin 90 000) t CO<sub>2</sub>-päästövähennykset vuosittain, jos yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa tuotettavalla lämmöllä korvataan kevyttä polttoöljyä ja sähköllä Suomessa keskimäärin tuotettua sähköä (kuva 24). Liikennepolttoainetuotannossa tuotettavalla biometaanilla voidaan korvata nestemäisiä liikennepolttoaineita (moottoribensiini ja dieselöljy), jolloin voidaan saavuttaa 70 000 – 165 000 (keskimäärin 120 000) t CO<sub>2</sub>-päästövähennykset vuosittain. Vaihteluvälit muodostuvat yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaaleilla sekä lannalla metaanintuottopotentiaalien minimi- ja maksimiarvoista. Nurmen ja oljen vaihteluvälit perustuvat satotasojen minimi- ja maksimiarvoihin.



Kuva 24. Biokaasun käytöllä teknisesti saavutettavissa olevat CO<sub>2</sub>-päästövähennykset yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa sekä liikennepolttoainetuotannossa. Lukuarvo kuvaa keskimääräistä CO<sub>2</sub>-päästövähennystä. Vasemmanpuoleinen y-akseli on jätevedenpuhdistamoiden lietteiden, yhdyskuntien biojätteen sekä teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien asteikko ja oikeanpuoleinen maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän energiakasvin (nurmi).

Suurin osa (64 %) keskimääräisistä CO<sub>2</sub>-päästövähennyksistä on mahdollista saavuttaa sekä yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa että liikennepolttoainetuotannossa hyödyntämällä biokaasun tuotantoa varten viljeltävää energiakasvia (nurmi). Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien käytöllä biokaasun tuotannossa voidaan vähentää keskimäärin 12 000 t CO<sub>2</sub>-päästöjä yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa tai 15 000 t CO<sub>2</sub>-päästöjä liikennepolttoainetuotannossa.

### 4.3 Orgaanisten materiaalmäärien perusteella arvioitujen suuren ja pienen kokoluokan biokaasureaktoreiden lukumäärät

Orgaanisten materiaalien teoreettisen ja teknisen määrän perusteella arvioitiin Keski-Suomen alueelle sijoitettavien biokaasureaktoreiden lukumäärät. Oletuksena oli, että suuren kokoluokan biokaasulaitokset hyödyntävät yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisia jättemateriaaleja vähintään 5000 m<sup>3</sup> reaktoreissa, ja pienen kokoluokan biokaasulaitoksissa oletettiin käytettävän maatalouden materiaaleja (lantaa ja olkea) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävää energiakasvia (nurmi) vähintään 2000 m<sup>3</sup> reaktoreissa.

Teoreettisessa tarkastelussa huomioitiin Keski-Suomen alueella muodostuvat orgaaniset materiaalit (433 000 t TS) kokonaisuudessaan. Yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaalien hyödyntämiseen olisi mahdollista rakentaa neljä suuren kokoluokan (5000 m<sup>3</sup>) biokaasureaktoria. Maatalouden materiaalien sekä energiakasvien hyödyntämiseen tarvittaisiin noin 250 kappaletta pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasureaktoria (taulukko 10).

Teknisessä tarkastelussa oletettiin, että yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaalit voidaan käyttää biokaasun tuotantoon kokonaisuudessaan. Maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävästä energiakasvista (nurmi) arvioitiin hyödynnettävän teoreettista määrää pienempi osuus (taulukko 10). Teknisen tarkastelun perusteella Keski-Suomeen voitaisiin rakentaa suuren kokoluokan (5000 m<sup>3</sup>) biokaasureaktoreita neljä kappaletta ja pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasureaktoreita 95 kappaletta.

Taulukko 10. Orgaanisten materiaalien teoreettisen ja teknisen määrän perusteella arvioitujen suuren kokoluokan (5000 m<sup>3</sup>) ja pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasureaktoreiden lukumäärä Keski-Suomen alueella. Suluissa olevat lukuarvot kuvaavat materiaaleista tuotetun biokaasun primäärienergiämäärää.

Materiaalit	Materiaalin määrä t TS/vuosi	Suuri kokoluokka kpl	Pieni-kokoluokka kpl
<u>Teoreettinen tarkastelu (1100 GWh)</u>			
Yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaalit	20 000	4	-
Lanta, olki ja nurmi	413 000	-	250
<u>Tekninen tarkastelu (460 GWh)</u>			
Yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaalit	20 000	4	-
Lanta, olki ja nurmi <sup>1</sup>	156 000	-	95

<sup>1</sup> Nautaeläinten, sikojen ja siipikarjan lanta, nautaeläinten laidunnus (4 kk), lypsylehmätilojen koko yli 20 lypsylehmää/tila, lihasikatiilojen koko yli 100 lihasikaa/tila, 20 % olkisadosta, 40 % peltopinta-alasta (kesanto ja hoidettu viljelemätön pelto) ja 40% nurmen toisesta sadosta (alle viiden vuoden nurmet)

Teknisessä tarkastelussa arvioitiin pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitosten lukumäärät ja polttoainetehot (kW) myös kuntakohtaisesti (taulukko 11). Pienen kokoluokan biokaasulaitoksia voitaisiin sijoittaa eniten (yli seitsemän kappaletta) Hankasalmen, Jyväskylän, Jämsän, Laukaan, Pihtiputaan ja Saarijärven kuntien alueille. Kaikkien pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitoksien polttoaineteho olisi yhteensä noin 48 MW, ja yksittäisen biokaasulaitoksen polttoaineteho noin 500 kW. Jos laitosten polttoainetehon oletettaisiin olevan 1 MW, Keski-Suomeen voitaisiin laskennallisesti rakentaa pienen kokoluokan biokaasulaitoksia noin 40 kappaletta.

Taulukko 11. Pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitosten kuntakohtaiset lukumäärät ja polttoainetehot teknisen tarkastelun sekä 1 MW<sub>polttoaineteho</sub> perusteella.

Kunta	Materiaalin määrä t TS / vuosi	Laitosten lukumäärä kpl	Polttoaineteho kW / laitos	1 MW:n laitokset kpl
Hankasalmi	11 000	7	480	3
Joutsa	6 500	4	470	2
Jyväskylä	10 600	7	470	3
Jämsä	13 300	8	540	4
Kannonkoski	3 600	2	530	1
Karstula	9 600	6	490	3
Keuruu	7 700	5	470	2
Kinnula	4 700	3	440	1
Kivijärvi	2 100	1	610	0
Konnevesi	4 800	3	490	1
Kuhmoinen	3 500	2	530	1
Kyyjärvi	4 600	3	460	1
Laukaa	12 200	7	540	4
Luhanka	1 700	1	500	0
Multia	2 800	2	420	0
Muurame	1 500	1	460	0
Petäjävesi	4 500	3	460	1
Pihtipudas	12 500	7	520	4
Saarijärvi	15 700	9	530	5
Toivakka	2 600	2	400	0
Urainen	4 600	3	440	1
Viitasaari	9 000	5	550	3
Äänekoski	7 100	4	580	2
<b>Yhteensä</b>	<b>156 100</b>	<b>95</b>	<b>ka. 500</b>	<b>42</b>

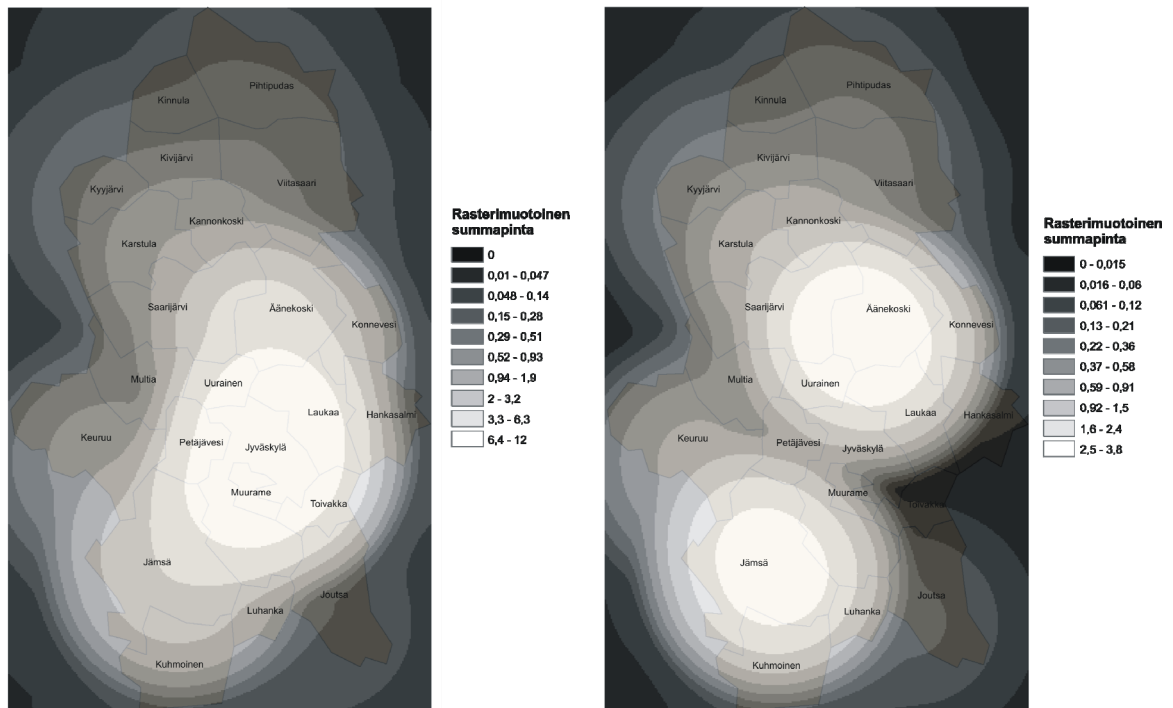
#### 4.4 Biokaasulaitosten sijoittamisvaihtoehtojen tarkastelu Keski-Suomen alueella

##### 4.4.1 Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu Keski-Suomen alueella

Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoituspaikkavaihtoehtojen määrittäminen perustui biokaasulaitoksissa hyödynnettävistä orgaanisista materiaaleista tehtyihin tiheysanalyysiin (Kernel density estimation) sekä lämmön tai liikennepolttoaineen käyttäjäpotentiaalien arvioimiseen. Materiaalikohtaisten tiheysanalyysien yhdistämisen tuloksena muodostui 2-ulotteinen rasterimuotoinen summapinta, jonka perusteella Keski-Suomessa vuosittain muodostuvat orgaaniset jättemateriaalit (jätevedenpuhdistamoiden liete, yhdyskuntien biojäte ja teollisuuden orgaaniset jätteet) painottuvat Jyväskylän kaupungin läheisyyteen (kuva 25).

Biokaasulaitoksen tarkemmaksi sijoituspaikaksi valittiin Jyväskylän kaupunki, jossa kaukolämmön laskennallinen käyttäjäpotentiaali ja liikennemäärät ovat muita lähialueen paikkakuntia suuremmat (kuvat 10 ja 11). Jyväskylän biokaasulaitoksessa hyödynnettävät

materiaalit (11 000 t TS), joiden todellinen kuljetusetäisyys on alle 50 km, koostuvat Hankasalmen, Jyväskylän, Laukaan ja Petäjäveden jätevedenpuhdistamoiden lietteistä, Jyväskylän jätteenkäsittelyasemalla vastaanotetusta biojätteestä sekä lihanjalostusteollisuuden orgaanisista jätteistä.

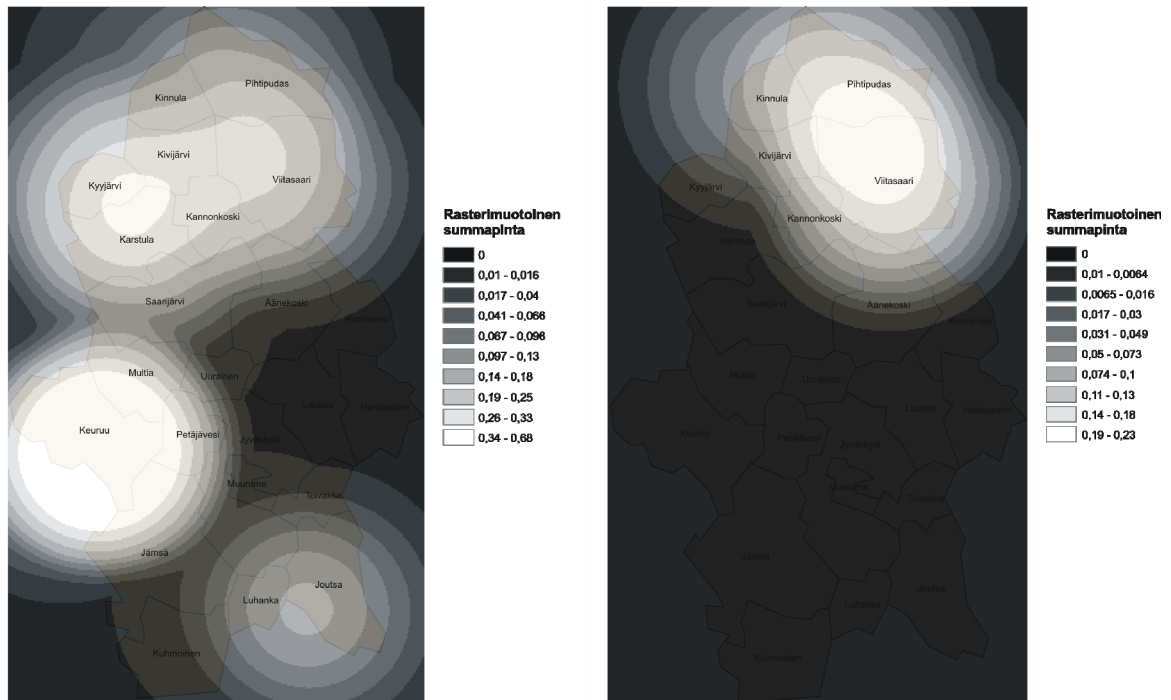


Kuva 25. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien sijoittuminen Keski-Suomen alueella. Vasemmanpuoleisen tulospinnan avulla havainnollistetaan maakunnan alueella muodostuvien materiaalien alueellinen keskittyminen. Oikeanpuoleisessa kuvassa on ensimmäisen biokaasulaitosvaihtoehdon jälkeen hyödyntämättä jäävien materiaalien pohjalta tehdyn tiheysanalyysin tulospinta. Vaalea alue kuvaa materiaalien tiheää alueellista keskittymistä. Lukuarvot ovat suhteellisia eivätkä ole siten suoraan vertailukelpoisia (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).

Tiheysanalyysi tehtiin uudelleen orgaanisista materiaaleista, joita ei hyödynnetty ensimmäisessä suuren kokoluokan biokaasulaitoksessa. Massat keskittyvät tällöin Jämsän ja Äänekosken kaupunkien läheisyyteen (kuva 25). Molempien laitospaihtohtojen tarkemmaksi sijainniksi valikoituivat Jyväskylään sijoitettavan biokaasulaitoksen perusteluiden tavoin Jämsän ja Äänekosken kaupungit. Jämsän laitoksessa voidaan käyttää yhteensä noin 2 300 t TS orgaanista materiaalia, joka kuljetetaan biokaasulaitukseen Jämsän ja Kuhmoisten jätevedenpuhdistamoilta, Jämsän jätteenkäsittelyasemalta sekä bioteknologian ja metsäteollisuuden yrityksiltä. Äänekosken biokaasulaitoksessa hyödynnettävän orgaanisen materiaalin määrä on noin 5 600 t TS. Laitoksessa käsitellään Äänekosken ja Saarijärven jätevedenpuhdistamoiden lietteitä, Saarijärven seudullisella jätteenkäsittelyasemalla vastaanotettua biojätettä, Konnevedellä erilliskerättyä biojätettä sekä metsäteollisuuden orgaanisia jätteitä.

Tarkastelua jatkettiin samalla tavalla kunnes kaikki Keski-Suomen alueella muodostuva orgaaninen jättemateriaali oli hyödynnetty jossain suuren kokoluokan biokaasulaitoksessa. Suurten biokaasulaitosvaihtohtojen (Jyväskylä, Jämsä ja Äänekoski) lisäksi biokaasulaitoksia on mahdollista sijoittaa Keuruun kaupungin sekä Joutsan ja Karstulan kuntien taajamien läheisyyteen (kuva 26). Näissä biokaasulaitoksissa käsiteltävien

materiaalien määrät vaihtelevat noin 140 – 460 t TS, ja massat muodostuvat pääasiassa jätevedenpuhdistamoiden lietteistä sekä yhdyskuntien biojätteestä. Kun näihinkin biokaasulaitoksiin kohdistettavat materiaalit otetaan tarkastelusta pois, jää jäljelle enää yksi keskittymä Pihtiputaan ja Viitasaaren rajalle.



Kuva 26. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien sijoittuminen Keski-Suomen alueelle. Vasemmanpuoleisessa kuvassa havainnollistetaan materiaalien alueellista jakautumista, kun suurten biokaasulaitosten (Jyväskylä, Jämsä ja Äänekoski) hyödyntämät materiaalit on vähennetty maakunnassa muodostuvan massan kokonaismäärästä. Oikeanpuoleisessa kuvassa kuvataan viimeisen tiheysanalyysin tulosta, kun kuuden aikaisemmin sijoitettujen laitosten materiaalit on vähennetty aineistosta (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).

#### 4.4.2 Suuren kokoluokan biokaasulaitosten (Jyväskylä, Jämsä ja Äänekoski) reaktoritilavuudet ja polttoainetehot

Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisia jättemateriaaleja käyttäviä biokaasulaitoksia voidaan sijoittaa Keski-Suomen alueelle yhteensä seitsemän kappaletta. Biokaasulaitosten reaktoritilavuudet laskettiin laitoksessa hyödynnettävän orgaanisen materiaalin määrän ja orgaanisen kuormituksen perusteella. Orgaanisen kuormituksen oletettiin olevan 2 kg VS/m<sup>3</sup>d, jolloin neljässä laitosvaihtoehdossa (Joutsa, Karstula, Keuruu ja Viitasaari) reaktoritilavuudet olivat alle 500 m<sup>3</sup>. Tämän vuoksi biokaasulaitosten todellisia reaktoritilavuuksia ja polttoainetehoja tarkasteltiin ainoastaan Jyväskylän, Jämsän sekä Äänekosken laitosten osalta.

Jyväskylän, Jämsän ja Äänekosken biokaasulaitoksissa voidaan käsitellä jätevedenpuhdistamoiden lietteitä, yhdyskuntien biojätettä ja teollisuuden orgaanisia jätteitä yhteensä noin 19 000 t TS (taulukko 12). Suurin osa (58 %) materiaaleista voidaan hyödyntää Jyväskylän laitoksessa, esimerkiksi kahdessa 6 000 m<sup>3</sup>:n reaktorissa. Loput



materiaaleista voidaan käyttää esimerkiksi Äänekosken 5 000 m<sup>3</sup>:n ja Jämsän 2 500 m<sup>3</sup>:n reaktoreissa.

Biokaasulaitoksissa tuotettavan biokaasun kokonaisenergiasisältö on noin 54 GWh, josta Jyväskylän laitoksessa tuotettavan biokaasun osuus on noin 70 %, Äänekosken laitoksessa noin 16 % ja Jämsän laitoksessa noin 14 %. Biokaasulaitosten polttoainetehot arvioitiin tässä tutkimuksessa primäärienergian ja laitoksen käyttöasteen perusteella. Jokaisen biokaasulaitoksen polttoaineteho on vähintään 1 MW<sub>polttoaine</sub>, jos laitosten huollon pituudeksi arvioidaan vuosittain 10 päivää.

Taulukko 12. Jyväskylän, Äänekosken ja Jämsän biokaasulaitosten hyödyntämät materiaalit, tarvittavat reaktoritilavuudet, tuotettavan biokaasun primäärienergia sekä polttoaineteho.

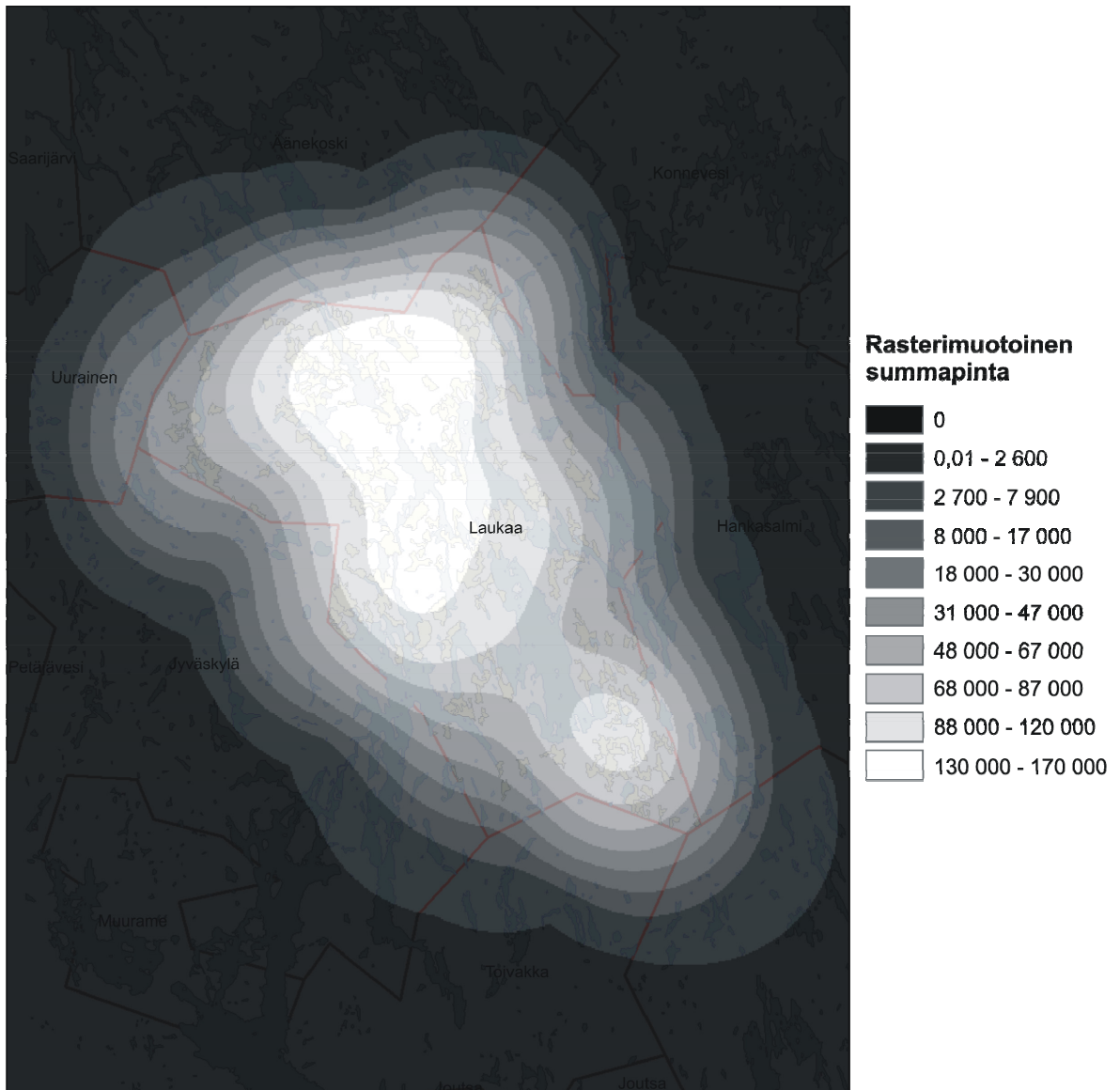
Biokaasulaitokset	Materiaalin määrä t TS / vuosi	Reaktoritilavuus m <sup>3</sup>	Primäärienergia MWh	Polttoaineteho MW / laitos
Jyväskylä	11 100	6000 x 2	38 100	4,5
Äänekoski	5 600	5 000	8 600	1,0
Jämsä	2 300	2 500	7 700	1,0
Yhteensä	19 000	19 500	54 400	6,4

#### 4.4.3 Pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen kuntakohtainen tarkastelu – esimerkkitapauksena Laukaan kunta

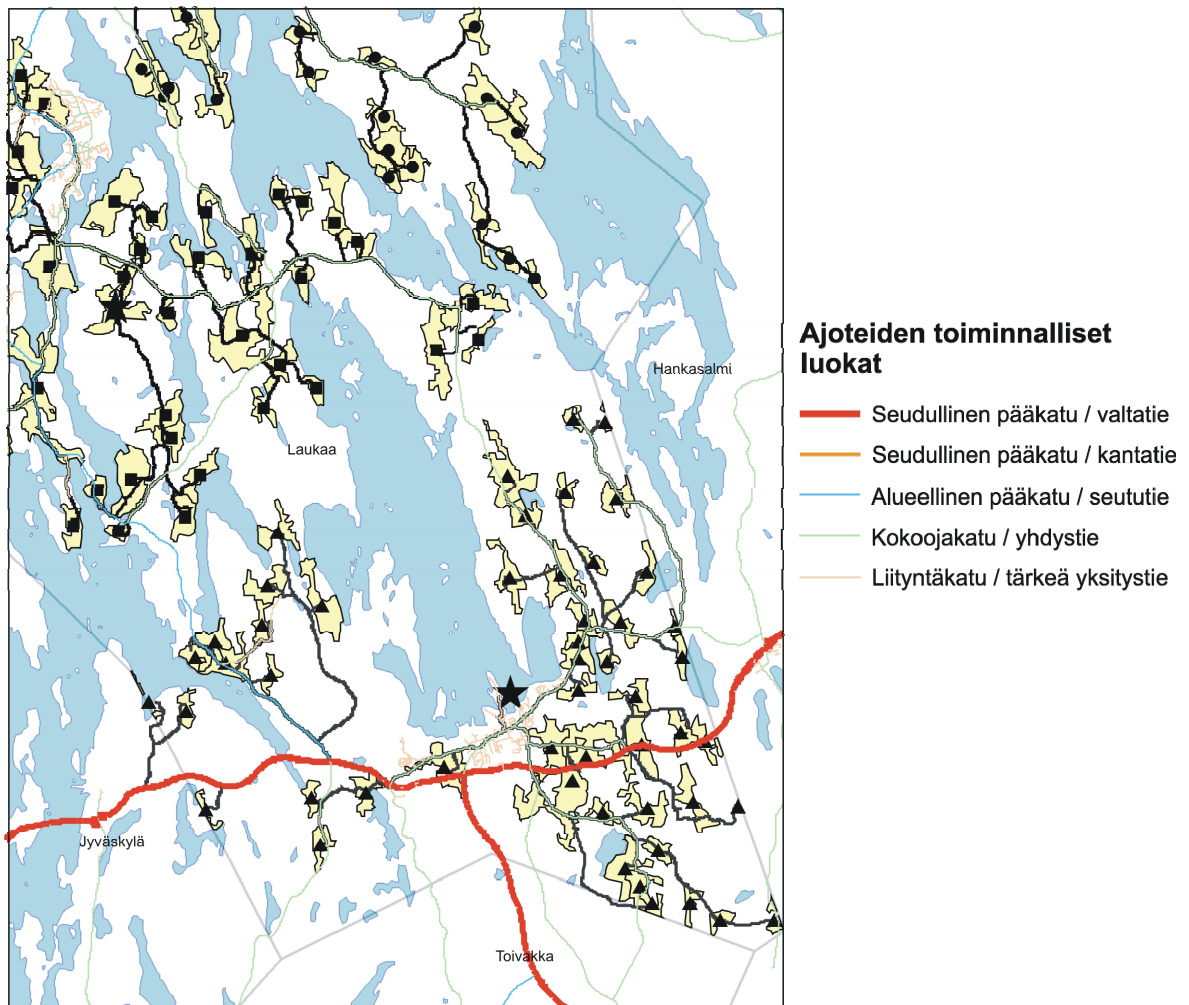
Pienen kokoluokan keskitettyjen biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu Laukaan kunnan alueella perustui viljelysmaiden pinta-alojen perusteella tuotettuun tiheysanalyysiin (Kernel density estimation). Tiheysanalyysin tuloksena muodostui 2-ulotteinen rasterimuotoinen summapinta, jolla havainnollistettiin Laukaan kunnassa sijaitsevien peltoalueiden alueellista keskittymistä (kuva 27). Summapinnan perusteella arvioitiin, että Laukaan kuntaan voidaan sijoittaa 2 – 4 pienen kokoluokan keskitettyä biokaasulaitosta, jotka käyttävät raaka-aineenaan olkea sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävää energiakasvia (nurmi). Kun tarkastelussa huomioitiin Laukaan kunnan alueen tiestöt ja vesistöt, tarkentui biokaasulaitosten lukumäärä neljään.

Liikennepolttoaineen käyttäjäpotentiaalın (liikennemäärät) perusteella arvioitiin, että yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto olisi kolmessa pienen kokoluokan biokaasulaitoksessa liikennepolttoainetuotantoa mielekkäämpää. Neljäs biokaasulaitos sijaitisi valtatie 9 varrella, jolloin biokaasu olisi mielekästä jalostaa liikennepolttoaineeksi (kuva 28).

Laukaan kunnassa sijaitsevilla pienen kokoluokan keskitetyissä biokaasulaitoksissa hyödynnettävän peltobiomassan keskimääräiset kuljetusetäisyydet arvioitiin laitoskohtaisesti. Laukaan kuntaan sijoitettavien biokaasulaitosten käyttämän peltobiomassan keskimääräinen todellinen kuljetusetäisyys pellolta biokaasulaitokseen olisi noin 10 km.



Kuva 27. Laukaan kunnan alueella sijaitsevien viljelysmaiden perusteella tuotettu tiheysanalyysi. Vaalea väri kuvaa peltoalueiden tiheämpää alueellista sijoittumista (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10).



Kuva 28. Valtatien 9 varrelle sijoitetun pienen kokoluokan keskitetyn biokaasulaitoksen (tähdellä merkitty) on mahdollista tuottaa biokaasusta biometaania. Pohjoisempana olevan biokaasulaitoksen tuotanto rajoittuu luultavasti yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon. Optimoidut reitit on merkitty karttaan tummalla värillä (Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos lupanro 51/MML/10. Tieaineisto: © Tiehallinto 2009).

## 5 TULOSTEN TARKASTELU

### 5.1 Keski-Suomen teoreettinen biokaasupotentiaali

Bioenergian tuotantopotentiaalien ja hyödyntämismahdollisuuksien yksityiskohtainen arvioiminen on haastavaa. Tutkimuksissa käytettävät metodit ja tutkimuksissa tehtävät oletukset esimerkiksi valittavien materiaalien sekä niiden lähtöarvojen suhteen vaikuttavat lopputuloksiin. Biokaasun tuotantopotentiaalin arviointiin vaikuttavat esimerkiksi raaka-aineiksi soveltuvien materiaalien monipuolisuus ja tärkeimmän raaka-aineen eli peltobiomassan sadot ja käytettävissä olevat tuotantopinta-alat.

Tässä tutkielmassa arvioitiin Keski-Suomen alueen biokaasun tuotannon energia- ja ympäristöpotentiaali sekä biokaasulaitosten sopivimmat sijoitusvaihtoehdot maakunnan alueella. Energia- ja ympäristöpotentiaalin arvioimisessa huomioitiin yksinomaan biokaasun käytön energia- ja ympäristövaikutukset.

Keski-Suomessa biokaasun tuotantoon voidaan teoriassa hyödyntää yhteensä 433 000 t TS/a orgaanisia materiaaleja, joiden biokaasupotentiaali on 0,6 – 1,5 TWh. Biokaasupotentiaali vastaa 3 – 8 % maakunnan vuoden 2006 primäärienergian kokonaiskulutuksesta (19,4 TWh), ja 7 – 17 % muusta kuin teollisuuden kuluttamasta primäärienergiasta (rakennusten lämmitys, tieliikenne ja muu kulutus) (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Keski-Suomen teoreettinen biokaasupotentiaali on pienempi, jos arvioinnissa huomioidaan myös biokaasun tuotantoon käytettävän energian määrä. Biokaasun tuotantoon on arvioitu kuluvan noin 20 – 40 % biokaasun primäärienergiasta (Berglund 2006), jolloin Keski-Suomen keskimääräinen nettobiokaasupotentiaali on 0,4 – 1,1 TWh.

Biokaasun tuotantoon käytettävistä orgaanisista materiaaleista suurin potentiaali (67 %) on biokaasun tuotantoa varten viljeltävällä energiakasvilla (nurmi). Energiakasvien biokaasupotentiaaliin vaikuttivat työhön valitut nurmen satotasot ja metaanintuottopotentiaalit. Seppälän ym. (2009) tutkimuksessa arvioitiin nurmen kokonaissadoksi 7,6 t TS/ha ja 2. sadoksi 5,4 t TS/ha sekä metaanintuottopotentiaaliksi 320 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t VS. Näiden lukuarvojen perusteella energiakasvien potentiaali (977 GWh) olisi vastannut noin 73 % Keski-Suomen biokaasupotentiaalista.

Keski-Suomen öljylämmitteisten rakennusten energiankulutus oli noin 1,1 TWh ja sähkölämmitteisten rakennusten energiankulutus noin 0,7 TWh vuonna 2006 (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Biokaasun teoreettinen lämmöntuotantopotentiaali (keskimäärin 550 GWh) vastaa noin 48 % öljylämmitteisten rakennusten energiankulutuksesta ja sähköntuotantopotentiaali (keskimäärin 330 GWh) vastaa noin 45 % sähkölämmitteisten rakennusten energiankulutuksesta.

Biokaasusta laskennallisesti tuotettavalla lämmöllä (550 GWh) voidaan korvata keskimäärin 55 milj. litraa kevyttä polttoöljyä. Jos oletetaan, että kevyellä polttoöljyllä lämmitettävän pientalon öljyn kulutus on 2000 l/a (Ölly- ja kaasualan keskusliitto 2010), voidaan biokaasusta teoreettisesti tuotettavalla lämmöllä korvata 27 500 pientalon öljylämmitys. Biokaasusta laskennallisesti tuotettavalla sähköllä (330 GWh) voidaan korvata 16 500 pientalon sähkölämmitys, jos sähkönkulutuksen oletetaan olevan 20 MWh/a (Energiamarkkinavirasto 2002).

Teoreettinen liikennepolttoainepotentiaali (1,1 TWh) vastaa noin 44 % Keski-Suomen vuoden 2006 nestemäisten liikennepolttoaineiden primäärienergiakulutuksesta (2,4 TWh) (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Biokaasusta laskennallisesti tuotettavalla liikennepolttoaineella voidaan korvata 68 000 henkilöauton polttoaine, jos oletetaan biokaasukäyttöisen henkilöauton keskikulutukseksi 8 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/100 km ja keskimääräiseksi ajettavaksi matkaksi 20 000 km/a (Lehtomäki 2006).

Keski-Suomessa käytettiin viljelyssä olevan pellon (100 000 ha) lannoittamiseen kemiallista typpilannoitetta vuonna 2007 yhteensä noin 7900 t ja fosforilannoitetta noin 780 t, kun väkilannoitteiden käytön oletettiin olevan 78,7 kg N/ha ja 7,8 kg P/ha (Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007). Biokaasun tuotannossa käsiteltävien yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien sisältämät ravinteet saadaan talteen ja voidaan kierrättää tapauskohtaisesti takaisin pellolle lannoite- ja maanparannusainekäyttöön, jolloin noin 8 % maakunnassa vuonna 2007 viljelyyn käytetystä kemiallisesta tyyppistä ja 26 % kemiallisesta fosforista voidaan kattaa yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien sisältämällä ravinteilla.

Biokaasun käytöllä yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa voidaan Keski-Suomessa teoriassa saavuttaa keskimäärin 213 500 t CO<sub>2</sub>-päästövähennys, joka vastaa noin 48 % maakunnan vuoden 2006 öljy- ja sähkölämmitteisten rakennusten CO<sub>2</sub>-päästöistä (449 000 t CO<sub>2</sub>) (Keski-Suomen energiatoimisto 2008). Biokaasun käytöllä liikennepolttoaineena voidaan saavuttaa keskimäärin 285 000 t CO<sub>2</sub>-päästövähennys, joka vastaa noin 44 % Keski-Suomen vuoden 2006 liikenteen polttoaineiden CO<sub>2</sub>-päästöistä (643 000 t CO<sub>2</sub>) (Keski-Suomen energiatoimisto 2008).

Huomioitavaa on, että biokaasun tuotannossa myös muodostuu kasvihuonekaasupäästöjä (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O ja CH<sub>4</sub>). Esimerkiksi nurmen viljelyssä arvioidaan muodostuvan 17 – 35 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sub>CH<sub>4</sub></sub> (Gerin ym. 2008), jolloin Keski-Suomessa biokaasun tuotantoon viljeltävästä nurmesta (744 GWh) muodostuisi keskimäärin 19 000 t CO<sub>2</sub>. Hiilidioksidipäästöjen lisäksi energiakasvien viljelyssä erityisesti N<sub>2</sub>O-päästöt voivat olla merkittäviä. Typpilannoitteen käytöstä aiheutuu suoria N<sub>2</sub>O-päästöjä IPCC:n (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) arvion mukaan 0,00125 kg/kg N (IPCC 1996), jolloin Keski-Suomen peltojen lannoittamisessa (7900 t N) muodostui typpioksiduulia vuonna 2007 noin 100 t, joka vastasi noin 29 600 t CO<sub>2</sub>-ekv.

## 5.2 Keski-Suomen tekninen biokaasupotentiaali

Keski-Suomessa biokaasun tuotantoon voidaan teknisesti hyödyntää arviolta yhteensä 176 000 t TS orgaanisia materiaaleja, joiden biokaasupotentiaali on 270 – 640 GWh. Suurin potentiaali on maatalouden materiaaleissa (23 %) sekä erityisesti biokaasun tuotantoa varten viljeltävässä nurmessa (64 %), vaikka lannan, oljen ja nurmen teoreettisesta kokonaismäärästä oletetaan hyödynnettävän ainoastaan noin 38 %.

Biokaasusta laskennallisesti tuotettavalla lämmöllä (230 GWh) ja sähköllä (140 GWh) voidaan korvata yhteensä noin 18 500 pientalon lämmitys, jos pientalon energiakulutukseksi oletetaan 20 MWh/a. Liikennepolttoainepotentiaalin (450 GWh) perusteella voidaan kattaa 22 500 henkilöauton vuosittainen käyttö, jos oletuksena biokaasukäyttöisen henkilöauton keskimääräiselle on 8 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/100 km ja keskimääräiselle ajettavalle matkalle 20 000 km/a (Lehtomäki 2006).

Keski-Suomen maakunnan tavoitteena on lisätä biokaasun käyttöä maatalouden yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa (25 GWh) ja liikennepolttoainetuotannossa (25 GWh) vuoteen 2015 mennessä (Paananen 2007). Yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotannon lisäystavoite voidaan saavuttaa käyttämällä noin 8 % maatalouden materiaalien (lanta ja olki) sekä biokaasun tuotantoa varten viljeltävän nurmen teknisestä potentiaalista. Liikennepolttoainetuotannon lisäystavoitteen saavuttaminen edellyttää yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien hyödyntämistä. Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:n jätevedenpuhdistamolla tuotettiin biokaasua laskennallisesti 8 GWh vuonna 2007 (Paananen 2007), minkä vuoksi yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaaleja on käytettävä noin 52 % liikennepolttoainetuotannon lisäystavoitteen saavuttamiseksi.

## 5.3 Keski-Suomen biokaasulaitosten lukumäärät ja sijoitusvaihtoehdot

Tässä tutkielmassa biokaasulaitosten lukumäärät perustuivat ennalta arvioituihin biokaasulaitosten kokoluokkiin (5000 ja 2000 m<sup>3</sup>) sekä orgaaniseen kuormitukseen (2 kg VS/m<sup>3</sup>d). Itävallassa tehdyn tutkimuksen mukaan suurimmaksi osaksi energiakasveja ja lantaa käyttävien 41 biokaasulaitoksen orgaaninen kuormitus vaihtelee 1 – 8 kg VS/m<sup>3</sup>d

ollen keskimäärin 3,5 kg VS/m<sup>3</sup>d (Braun ym. 2009). Keski-Suomeen sijoitettavien pienen kokoluokan biokaasulaitosten kokonaislukumäärä puolittuisi 47 laitokseen, jos biokaasureaktoreiden tilavuus pidettäisiin vakiona ja orgaaninen kuormitus nostettaisiin 4 kg VS/m<sup>3</sup>d. Tällöin biokaasulaitosten keskimääräinen polttoaineteho kasvaisi 0,5 MW:sta 1 MW:iin. Orgaanisen kuormituksen kolminkertaistuksessa määrään 6 kg VS/m<sup>3</sup>d, biokaasulaitoksia voitaisiin sijoittaa maakunnan alueelle 31 kappaletta. Laitosten keskimääräinen polttoaineteho nousisi 1,5 MW:iin, jolloin lämpöä ja sähköä (CHP) tuottavien biokaasulaitosten investointikustannukset laskisivat noin 1000 €/kW<sub>sähkö</sub> (Weiland 2008).

Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehdot ovat Jyväskylässä, Äänekoskella ja Jämsässä, jos raaka-aineiden kuljetusetäisyyksien oletetaan olevan enintään 50 km. Raaka-aineiden kuljetusetäisyyksiä kasvattamalla orgaaniset materiaalit keskittyisivät edelleen Jyväskylän kaupungin alueelle, jolloin Jyväskylän biokaasulaitoksessa käsiteltävien materiaalien määrät ja raaka-aineiden kuljetuksissa muodostuvat kasvihuonekaasupäästöt kasvaisivat. Yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jättemateriaalien paikallisten sijaintien vuoksi biokaasun tuotantoa kannattaa kuitenkin soveltaa hajautetusti, jolloin raaka-aineiden kuljetuksissa muodostuvat haitalliset ympäristövaikutukset voidaan minimoida. Hajautetun energiantuotannon malli korostuu erityisesti pienen kokoluokan biokaasulaitoksissa, jotka hyödyntävät biokaasun tuotannossa lantaa sekä olkea ja energiakasveja (peltobiomassa). Peltobiomassan määrä riippuu käytettävissä olevasta peltopinta-alasta, minkä vuoksi pienen kokoluokan biokaasulaitoksen koon kasvu aiheuttaa raaka-aineiden kuljetusetäisyyden kasvamisen ja kuljetuksista aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymisen.

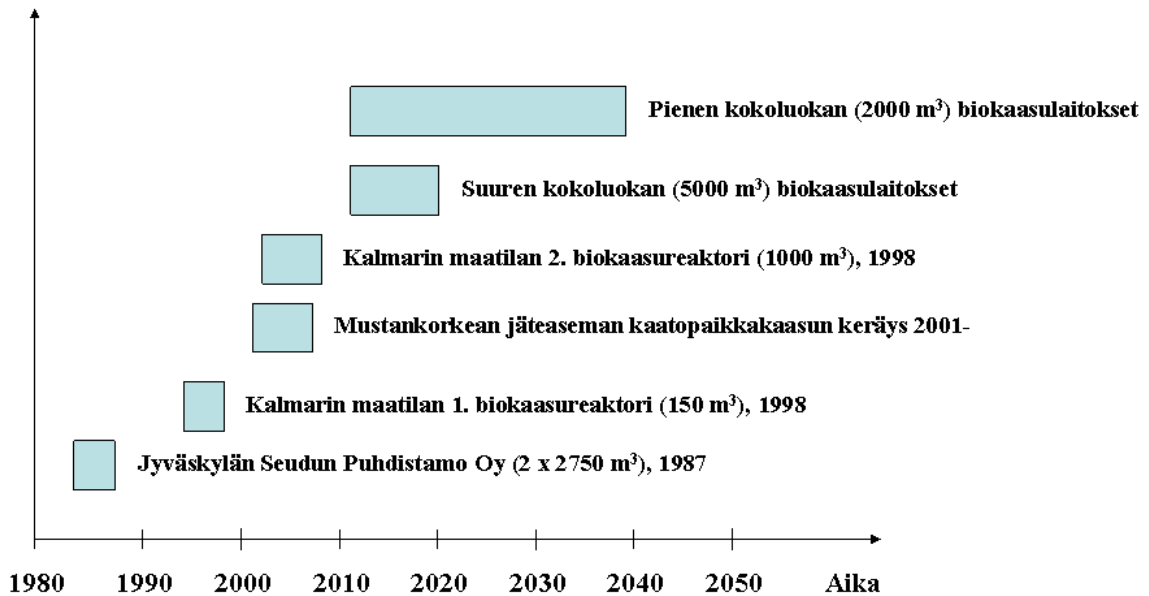
Biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen arvioinnin menetelmät vaativat tulevaisuudessa kehittämistä. Suuren kokoluokan biokaasulaitosten sijoittamiseen vaikuttaa raaka-aineiden ominaisuuksien (massa ja metaanintuottopotentiaali) sekä sijainnin lisäksi käsittelyjäännöksen palauttaminen takaisin pelloille lannoite- ja maanparannusainekäyttöön, minkä vuoksi käsittelyjäännöksen hyödyntämiseen käytettävissä olevat pellot pitäisi ottaa sijoitusvaihtoehtojen tarkastelussa huomioon. Pienen kokoluokan biokaasulaitosten sijoitusvaihtoehtojen tarkastelu vaatii tarkempia maatilakohtaisia materiaalien määrä- ja sijaintitietoja, jotta sijoitusvaihtoehtoja voidaan tarkastella tarkemmin.

#### **5.4 Keski-Suomeen rakennettavien biokaasulaitosten tulevaisuuden visio**

Keski-Suomen asettaman biokaasun käytön lisäystavoitteiden saavuttaminen edellyttää uusien biokaasulaitosten rakentamista. Biokaasulaitosten (erityisesti pienen kokoluokan) investointipäätöksiin vaikuttanevat energia- ja ympäristöpotentiaalia enemmän kuitenkin taloudelliset tekijät, kuten myytävästä lämmöstä, sähköstä tai liikennepolttoaineesta saatava hinta. Biokaasun tuotantoon vuonna 2009 suunniteltu syöttötariffi koskisi kuitenkin ainoastaan biokaasulaitoksia, jotka tuottavat biokaasusta lämpöä ja sähköä (CHP) vähintään 1 MW:n (polttoainetehto) laitoksissa. Polttoainetehon kasvattaminen vähentäisi pienen kokoluokan biokaasulaitoksien määrää noin 40 kappaleeseen, jolloin laitoskohtaiset reaktoritilavuudet kasvaisivat laskennallisesti yli 2000 m<sup>3</sup>:n.

Teknisen biokaasupotentiaalin ja mahdollisen syöttötariffin perusteella maakunnan biokaasulaitosten lukumäärä voi tulevaisuudessa moninkertaistua (kuva 29). Esimerkiksi suuren kokoluokan (5000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitoksia voisi olla Keski-Suomessa vuonna 2020

yhteensä neljä kappaletta ja pienen kokoluokan (2000 m<sup>3</sup>) biokaasulaitoksia vuonna 2040 yhteensä 40 kappaletta.



Kuva 29. Keski-Suomen biokaasulaitosten lukumäärän toteutunut ja mahdollinen kehitys tulevaisuudessa (roadmap).

### 5.5 Peltobioenergian käytön lisäsmahdollisuudet

Keski-Suomen biokaasupotentiaali koostuu suurelta osin biokaasun tuotantoa varten viljeltävistä energiakasveista, minkä vuoksi pellon käytön arvioiminen peltobioenergian tuotantoon on tärkeää. Tässä tutkielmassa arvioitiin, että kaikki ruuan ja rehun tuotantoon kuulumattomat pellot (10 % maakunnan viljelysmaasta) voidaan käyttää energiakasvien viljelyyn. Peltoa voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti hyödyntää peltobioenergian tuotantoon tämänkin työn arviota enemmän. Esimerkiksi MTT:n koko Suomea koskevien arvioiden perusteella Keski-Suomessa voitaisiin hyödyntää peltoa energiakasvien (esimerkiksi nurmen) viljelyyn yli 20 000 ha. VTT on arvioinut, että ruokohelven tuotantoon voitaisiin maakunnassa käyttää 33 000 ha (Rahkonen 2009).

Arviot peltobiomassan viljelyyn käytettävissä olevasta pinta-alasta vaihtelevat. Esimerkiksi EU:ssa voitaisiin hyödyntää peltobioenergian tuotantoon 10 – 30 % käytettävissä olevasta viljelysmaasta (European Biomass Association 2009). MTT on arvioinut, että Suomen peltoalasta voitaisiin käyttää tarvittaessa 500 000 ha peltobioenergian tuotantoon ilman, että ruuan tai rehun tuotanto vaarannettaisiin (Vainio-Mattila ym. 2005). Tämä peltopinta-ala vastaisi yli 20 % Suomen viljelyalasta (2,2 milj. ha).

Peltobioenergian tutkimus-, kehitys- ja demonstraatiotoimintaa täytyy tulevaisuudessa jatkaa, jotta biokaasupotentiaalia voidaan tarkentaa. Esimerkiksi Keski-Suomen alueella viljeltäväksi soveltuvien energiakasvien satotasojen tarkempi arviointi vaatii lisätutkimusta.

Monivuotisten nurmikasvilajien lisäksi Keski-Suomessa voisi menestyä yksivuotisista kasvilajeista esimerkiksi maissi. Tietyillä maissilajikkeilla voitaisiin saada nurmikasveja

suuremmat hehtaarikohtaiset sadot, mutta maissin viljelyn haasteena on olosuhteiden vaihtelevuus. Esimerkiksi Laukaassa vuonna 2007 viljelty maissisato (7 t TS/ha) jäi normaalia kylmemmän kesän vuoksi pieneksi (Pyykkönen 2009).

## 5.6 Biokaasupotentiaalin arvioimisen haasteet

Biokaasupotentiaalin arvioimisen haasteet liittyvät biokaasun tuotannossa käytettävien raaka-aineiden valintaan sekä raaka-aineista tehtäviin lähtöoletuksiin. Esimerkiksi EU:n teoreettisen biokaasupotentiaalin on arvioitu olevan 1 930 TWh/a ja realistisesti saavutettavan biokaasupotentiaalin noin 460 TWh/a vuonna 2020 (European Biomass Association 2009). Realistisen biokaasupotentiaalin arviointi perustuu energiakasvien ja lannan hyödyntämiseen. Biokaasun tuotantoa varten viljeltäviä energiakasveja arvioidaan viljeltävän 5 %:lla viljelyyn käytettävistä olevista pelloista ja lantaa hyödynnettävän 35 % teoreettisesta kokonaismäärästä.

Raaka-aineiden valinnalla on merkitystä erityisesti silloin, kun arvioidaan viljelysmaan käyttöä energiantuotannossa. Esimerkiksi Saksassa ja Ruotsissa tehdyt biokaasupotentiaaliarviot eroavat toisistaan energiakasvien hyödyntämisen suhteen (taulukko 13). Saksan biokaasupotentiaali on noin 108 TWh/a, josta yli puolet (60 %) koostuu biokaasun tuotantoa varten viljeltävien energiakasvien hyödyntämisestä noin 10 %:lla Saksan viljelysmaasta (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2009). Ruotsin biokaasupotentiaaliksi on arvioitu 15 TWh/a, josta suurin osa (71 %) koostuu lannasta ja kasvintuotannon sivutuotteista, etenkin oljesta (Linné ym. 2008). Energiakasvien potentiaalia ei ole otettu tutkimuksessa huomioon, koska se käsittelee yksinomaan Ruotsissa muodostuvia biokaasun tuotannon raaka-aineita. Tutkimuksen tulokset siis ilmeisesti aliarvioivat Ruotsin biokaasupotentiaalia.

Ruotsin biokaasupotentiaalia (14 TWh/a) on kuitenkin arvioitu myös sisällyttämällä energiakasvit tutkimukseen mukaan (Linné & Jönsson 2004). Energiakasvien potentiaali on noin 7,2 TWh, joka vastaa 51 % biokaasupotentiaalista. Energiakasveja on oletettu viljeltävän Saksan biokaasupotentiaaliarvion mukaisesti noin 10 %:lla Ruotsin viljelysmaasta. Linné & Jönssonin (2004) arvio Ruotsin biokaasupotentiaalista vastaa Linné ym. (2008) tutkimuksen kokonaispotentiaalia. Olkea ei ollut otettu tarkastelussa huomioon, vaan sitä on arvioitu käytettävän bioetanolin tuotantoon.

Taulukko 13. Arvioita Saksan ja Ruotsin biokaasupotentiaaleista.

Orgaaninen raaka-aine	Saksan biokaasupotentiaali <sup>1</sup>		Ruotsin biokaasupotentiaali <sup>2</sup>	
	TWh	%	TWh	%
Jätevedenpuhdistamoiden liete	5,5	5,1	0,8	5,3
Yhdyskuntien biojäte	3,5	3,2	1,4	9,3
Teollisuuden orgaaniset jätteet	2,5	2,3	2,0	13,3
Lanta	27,0	25,0	4,2	28,0
Kasvintuotannon sivutuotteet	4,0	3,7	6,6	43,3
Energiakasvit	65,5	60,6	0,0	0,7
<b>Yhteensä</b>	<b>108,0</b>	<b>100,0</b>	<b>15,0</b>	<b>100,0</b>

<sup>1</sup> Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2009

<sup>2</sup> Linné ym. 2008



## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Biokaasun tuotantoa varten voidaan Keski-Suomessa teknisesti käyttää noin 176 000 t TS orgaanisia materiaaleja, joiden biokaasupotentiaali on keskimäärin 470 GWh. Suurin potentiaali (67 %) on energiakasvien hyödyntämisessä, ja niiden viljelyyn on tulevaisuudessa käytettävissä maakunnan alueella reilusti ylimääräistä peltopinta-alaa. Maakunnan tavoitteena on lisätä biokaasun käyttöä maatalouden lämmön- ja sähköntuotannossa 25 GWh ja liikennepolttoainetuotannossa 25 GWh vuoteen 2015 mennessä. Koska biokaasun tuotannolle on hyvät edellytykset Keski-Suomen alueella, biokaasun käytön lisäystavoitetta voidaan pitää realistisena. Tavoite edellyttää kuitenkin konkreettisia toimia; erityisesti pienen kokoluokan biokaasulaitosten investointipäätöksiin vaikuttanevat energia- ja ympäristöpotentiaalia enemmän taloudelliset tekijät, kuten myytävästä lämmöstä, sähköstä tai liikennepolttoaineesta saatava hinta.

## KIITOKSET

Haluan kiittää Keski-Suomen liittoa *Biokaasusta energiaa Keski-Suomeen* -hankkeen rahoituksesta, Jyväskylä Innovation Oy:tä projektin koordinoinnista ja Keski-Suomen ympäristökeskusta taustamateriaalista. Suuret kiitokset pro gradu -tutkielmani ohjaajalle Jukka Rintalalle, ohjaajalle ja tarkastajalle Anssi Lensulle sekä tarkastajalle Markku Kuituselle. Kiitokset kuuluvat tietysti myös kaikille työkavereille, erityisesti Hanne Tähdelle ja Saija Rasille, sekä Annalle ja muulle kotiväelle tuesta ja avustuksesta.

## KIRJALLISUUS

- Airaksinen, S. 2006: Bedding and manure management in horse stables – its effect on stable air quality, paddock hygiene and the compostability and utilization of manure. –Kuopion yliopiston julkaisuja C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet 190. Kuopion yliopisto, Kuopio. 53 s.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. & Janssen, R. 2008: Biogas handbook. –University of Southern Denmark, Denmark. ISBN 978-87-992962-0-0. 125 s.
- Alvarez, R. & Lidén, G. 2008: Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure and fruit and vegetable waste. –Renewable Energy 33: 726 – 734.
- American Society of Agricultural Engineers 2003: Manure production and characteristics. –The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems, USA. 4 s.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Machmüller, A., Hopfner-Sixt, K., Bodiroza, V., Hrbek, R., Friedel, J., Pötsch, E., Wagentristl, H., Schreiner, M. & Zollitsch, W. 2007a: Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. –Bioresource Technology 98: 3204 – 3212.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. & Gruber, L. 2007b: Biogas production from maize and dairy cattle manure – influence of biomass composition on the methane yield. –Agriculture, Ecosystems and Environment 118: 173 – 182.
- Appels, L., Baeyens, J., Degève, J. & Dewil, R. 2008: Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. –Progress in Energy and Combustion Science 34: 755 – 781.

- Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen, S. 2005: Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. –Kauppa- ja teollisuusministeriö. 48 s.
- Batzias, F. A., Sidiras, D. K. & Spyrou, E. K. 2005: Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method. –Renewable Energy 30: 1161 – 1176.
- Berglund, M. 2006: Biogas production from a systems analytical perspective. –Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering. Lund University, Sweden. ISBN 91-88360-80-6. 79 s.
- Berglund, M. & Börjesson, P. 2006: Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. –Biomass and Bioenergy 30: 254 – 266.
- Bougrier, C., Delgenes, J-P. & Carrere, H. 2006: Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. –Process Safety and Environmental Protection 84: 280 – 284.
- Braun, R. 2009: Experiences from large scale use of crops for biogas production. Seminar on biogas technology for sustainable bioenergy production 28.4.2009, Jyväskylä.
- Braun, R. & Wellinger, A. 2003: Potential of co-digestion. –IEA Bioenergy, task 37 – energy from biogas and landfill gas. 16 s.
- Braun, R., Weiland, P. & Wellinger, A. 2009: Biogas from energy crop digestion. –IEA Bioenergy, task 37 – energy from biogas and landfill gas. 20 s.
- Börjesson, P. & Mattiasson, P. 2007: Biogas as a resource-efficient vehicle fuel. –Trends in Biotechnology 26: 7 – 13.
- Cuetos, M. J., Gómez, X., Otero, M. & Morán, A. 2008: Anaerobic digestion of solid slaughterhouse waste (SHW) at laboratory scale: Influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). –Biochemical Engineering Journal 40: 99 – 106.
- Dagnall, S., Hill, J. & Pegg, D. 2000: Resource mapping and analysis of farm livestock manures – assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes. –Bioresource Technology 71: 225 – 234.
- Energiamarkkinavirasto 2002: Sähköenergian kilpailuttaminen. <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=865&pgid=39> (20.2.2010)
- Energiateollisuus ry 2009: Energiavuosi 2008: Sähkötuotannon hiilidioksidipäästöt vähenivät 5,3 miljoonaa tonnia. Lehdistötiedote. <http://www.energia.fi/fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/energiavuosi%202008%20s%c3%a4hk%c3%b6.html> (22.12.2009)
- Euroopan komissio 2009: The Climate action and renewable energy package, Europe's climate change opportunity. [http://ec.europa.eu/environment/climat/climate\\_action.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/climate_action.htm) (22.4.2009)
- European Biomass Association 2009: A biogas roadmap for Europe. –European Biomass Association. 24 s.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2009: Biogas basisdaten Deutschland. –Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Deutschland. 7 s.
- Gerin, P. A., Vliegen, F. & Jossart, J-M. 2008: Energy and CO<sub>2</sub> balance of maize and grass as energy crops for anaerobic digestion. –Bioresource Technology 99: 2620 – 2627.

- Graham, R. L., English, B. C. & Noon, C. E. 2000: A Geographic Information System-based modeling system for evaluating the cost of delivered energy crop feedstock. –*Biomass and Bioenergy* 18: 309 – 329.
- Gujer, W. & Zehnder, A. J. B. 1983: Conversion processes in anaerobic digestion. –*Water Science Technology* 15: 127 – 167.
- Gunaseelan, V. N. 2004: Biochemical methane potential of vegetable solid waste feedstocks. –*Biomass and Bioenergy* 26: 389 – 399.
- Haverila, P. & Kivilinna, V-A. 1999: Biosludge incineration in a recovery boiler. –*Water Science and Technology* 40: 195 – 200.
- Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T. & Oleskowicz-Popiel, P. 2009: The future of anaerobic digestion and biogas utilization. –*Bioresour. Technol.* 100: 5478 – 5484.
- Ileleji, K. E., Martin, C. & Jones, D. 2008: Basics of energy production through anaerobic digestion of livestock manure. –*Purdue Agriculture* 8/08, Purdue University. 6 s.
- IPCC 1996: Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Reference manual (volume 3), agriculture. IPCC, 1996.
- Jokela, J., Rintala, J., Oikari, A., Reinikainen, O., Mutka, K. & Nyrönen, T. 1997: Aerobic composting and anaerobic digestion of pulp and paper mill sludges. –*Water Science Technology* 36: 181 – 188.
- Kanwar, S. S. & Kalia, A. K. 1993: Anaerobic fermentation of sheep droppings for biogas production. –*World Journal of Microbiology and Biotechnology* 9: 174 – 175.
- Kaparaju, P. 2009: Kirjallinen tiedonanto 16.8.2009.
- Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J. & Rintala, J. 2002: Co-digestion of energy crops and industrial confectionary by-products with cow manure: batch-scale and farm-scale evaluation. –*Water Science and Technology* 45: 275 – 280.
- Keski-Suomen energiatoimisto 2004: Keski-Suomen kuntien energiatase 2004. <http://www.kesto.fi/default.asp?SivuID=15811> (20.2.2010)
- Keski-Suomen energiatoimisto 2008: Keski-Suomen energiatase 2006. <http://www.kesto.fi/default.asp?sivuID=24383> (24.4.2009)
- Keski-Suomen liitto 2006: Keski-Suomi 2005 – katsaus maakunnan fyysiseen rakenteeseen ja aluekehitykseen. –*Julkaisu B* 148, tammikuu 2006. 67 s. <http://www.keskisuomi.fi/filebank/1363-ks-katsaus.pdf> (27.5.2009)
- Keski-Suomen liitto 2009: Tietoja Keski-Suomesta – Keski-Suomen seutukunnat. <http://www.keskisuomi.fi/fin/palautelomake/index.php?id=79> (27.5.2009)
- Keski-Suomen ympäristökeskus 2008: Ympäristönsuojelutietojärjestelmä (VAHTI).
- Keskitalo, P. & Kettunen, R. 2007: Jätevesilietteiden ravinteiden kierrätyksen strategiasta. –*Vesitalous* 1/2007:14 – 17.
- Kurki, S. 2008: Uusiutuvaa voimaa Etelä-Pohjanmaalle – Etelä-Pohjanmaan energiaomavaraisuuden kehittämisstrategia. –*Raportteja* 27. Helsingin yliopisto, Ruralia-instituutti. 56 s.
- Kuittinen, V., Huttunen, M. J. & Leinonen, S. 2008: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 11. Tiedot vuodelta 2007. –*Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutin raportteja* N:o 4. Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutti. 82 s.

- Lantz, M., Svensson, M., Björnsson, L. & Börjesson, B. 2007: The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden – incentives, barriers and potentials. –Energy Policy 35: 1830 – 1843.
- Lehtomäki, A. 2006: Biogas production from energy crops and crop residues. –Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 163. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. 94 s.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S. & Rintala, J. 2007a: Laboratory investigations on co-digestion of energy crops, crop residues and cow manure: effect of crop to manure ratio. –Resources, Conservation and Recycling 51: 591 – 609.
- Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007b: Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. –Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. 70 s.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T. A. & Rintala, J. A. 2008: Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. –Biomass and Bioenergy 32: 541 – 550.
- Leijala, J. 2008: Kirjallinen tiedonanto 13.10.2008.
- Lide, D. R. & Frederikse, H. P. R. 1996: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 77<sup>th</sup> ed. –CRC Press Inc., USA.
- Linné, M. & Jönsson O. 2004: Summary and analysis of the potential for production of renewable methane (biogas and SNG) in Sweden. Literature study. –Swedish Gas Centre, Sweden. 16 s.
- Linné, M., Ekstrandh, A., Englesson, R., Persson, E., Björnsson, L. & Lantz, M. 2008: Den svenska biogaspotentialen från inhemska restprodukter. –Avfall Sverige, Svenska Biogasföreningen, Svenska Gasföreningen och Svenskt Vatten, Sweden. 79 s.
- Luostarinen, S., Luste, S. & Sillanpää, M. 2008: Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant. –Bioresource Technology 100: 79 – 85.
- Luste, S., Luostarinen, S. & Sillanpää, M. 2009: Effect of pre-treatments on hydrolysis and methane production potentials of by-products from meat-processing industry. –Journal of Hazardous Materials 164: 247 – 255.
- Ma, J., Scott, N. R., DeGloria, S. D. & Lembo, A. J. 2005: Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. –Biomass and Bioenergy 28: 591 – 600.
- Maa- ja metsätalousministeriö 2002: Kotieläinrakennusten ympäristöhuolto C4. Maa- ja metsätalousministeriön rakentamismääräykset ja -ohjeet. Liite 12 MMM:n asetukseen tuettavaa rakentamista koskevista rakentamismääräyksistä ja suosituksista (100/01). <http://www.mmm.fi/attachments/maaseutu/rakentaminen/5g7GBLiUF/L12-rmoC4-01.pdf> (13.6.2009)
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus (19/2009): Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen 12/2007 muuttamisesta. <http://www.finlex.fi> (20.2.2010)
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista (12/2007). <http://www.finlex.fi> (20.2.2010)
- Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus 2007: Matilda-tietopalvelun maatilarekisteri. <http://www.matilda.fi> (5.3.2009)

- Maanmittauslaitos 2009: Pinta-ala kunnittain 1.1.2009.  
<http://www.maanmittauslaitos.fi/default.asp?id=894> (5.2.2010)
- Maaseutuvirasto 2008: Ravinnetaseet. Ympäristötuen lisätoimenpide lannoituksen ja sadon ravinnemäärien seurantaan. –Maaseutuvirasto. 16 s.
- Mata-Alvarez, J. 2003: Fundamentals of the anaerobic digestion process. –Teoksessa: Mata-Alvarez, J. (Toim.) Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes: 1 – 20. –IWA, London.
- Mikkola, H., Puumala, M., Kallioniemi, M., Grönroos, J., Nikander, A. & Holma, M. 2002: Paras käytettävissä oleva tekniikka kotieläintaloudessa. –Suomen ympäristö 564. Suomen ympäristökeskus. ISBN 952-11-1179-8. 168 s.
- Murto, M., Björnsson, L. & Mattiasson, B. 2004: Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. –Journal of Environmental Management 70: 101 – 107.
- Mäenpää, I. 2005: Kansantalouden ainevirtatilinpito. Laskentamenetelmät ja käsitteet. Suomen ainetaseet 1999. –Tilastokeskus ja Oulun yliopiston Thule-instituutti. ISBN 952-467-486-6. 173 s.
- Mäkinen, T., Soimakallio, S., Paappanen, T., Pahkala, K. & Mikkola, H. 2006: Liikenteen biopolttoaineiden ja peltoenergian kasvihuonekaasutaseet ja uudet liiketoimintakonseptit. –VTT tiedotteita – research notes 2357. VTT, Helsinki 2006. ISBN 951-38-6826-5. 176 s.
- Möller, H. B., Sommer, S. G. & Ahring, B. K. 2004: Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. –Biomass and Bioenergy 26: 485 – 495.
- Noon, C. E. & Daily, M. J. 1995: GIS-based biomass resource assessment with Bravo. –Biomass and Bioenergy 10: 101 – 109.
- Nordberg, Å., Lindberg, A., Gruvberker, C., Lilja, T. & Edström, M. 1998: Biogaspotential och framtida anläggningar i Sverige. –JTI-rapport, Kretslopp & Avfall Nr 17. Jordbrukstekniska institutet, Uppsala. 42 s.
- Paananen, M. 2007: Bioenergiasta elinvoimaa klusteriohjelma 2007 – 2015. –Jyväskylä Innovation Oy, Jyväskylä. 37 s. [http://www.keskisuomi.fi/filebank/1647-bioenergiasta\\_elinvoimaa\\_klusteriohjelma\\_2007\\_-\\_2015.pdf](http://www.keskisuomi.fi/filebank/1647-bioenergiasta_elinvoimaa_klusteriohjelma_2007_-_2015.pdf) (23.4.2009)
- Paavola, T., Syväsalu, E. & Rintala, J. 2006: Co-digestion of manure and biowaste according to the EC Animal By-Products Regulation and Finnish national regulations. –Water Science and Technology 8: 223 – 231.
- Pöykiö, R., Nurmesniemi, H. & Keiski, R. L. 2007: Environmental risk assessment of heavy metal extractability in a biosludge from the biological wastewater treatment plant of a pulp and paper mill. –Environmental Monitoring and Assessment 128: 153 – 164.
- Pyykkönen, V. 2009: Biokaasua maissista – lajikkeen vaikutus energiasaantoon sekä maissin ja lehmän lietelannan yhteiskäsittely biokaasureaktorissa. Pro gradu-tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. 39 s.
- Pöyry Environment 2009: Kymen Vesi Oy. Lietteenkäsittely vaihtoehtojen ympäristövaikutusten arviointi. –Pöyry Environment Oy, Vantaa. 181 s.
- Rahkonen, J. 2009: Keski-Suomi haluaa olla bioenergian mallimaakunta. [http://www.farmit.net/farmit/fi/06\\_rakentaminen\\_ja\\_energia/01\\_farmituutiset/853\\_bioenergian\\_mallimaakunta.jsp](http://www.farmit.net/farmit/fi/06_rakentaminen_ja_energia/01_farmituutiset/853_bioenergian_mallimaakunta.jsp) (20.12.2009).

- Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002: Poltto ja palaminen. –International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. 750 s.
- Rasi, S. 2009: Biogas composition and upgrading to biomethane. –Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 202. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä. 79 s.
- Rintala, J. A. & Puhakka, J. A. 1994: Anaerobic treatment in pulp- and paper-mill waste management: a review. –Bioresource Technology 47: 1 – 18.
- Rintala, J. 2008: Suullinen tiedonanto 20.10.2008.
- Roberts, R., Davies, W. J. & Forster, C. F. 1999: Two-stage, thermophilic-mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge. –Institution of Chemical Engineers Vol 77, part B: 93 – 97.
- Sahlström, L. 2003: A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. –Bioresource Technology 87: 161 – 166.
- Salminen, E. 2000: Anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse by-products and wastes. –Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 90. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Salminen, E. & Rintala, J. 2002: Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. –Bioresource Technology 83: 13 – 26.
- Sammes, N. M., Du, Y. & Bove, R. 2005: Fuel cell principles and prospective. –Teoksessa Lens, P., Westermann, P., Haberbauer, M. & Moreno, A. (Toim.) Biofuels for fuel cells. Renewable energy from biomass fermentation: 235 – 247. IWA, London.
- Sanchez, E., Montalvo, S., Travieso, L. & Rodriguez, S. 1995: Anaerobic digestion of sewage sludge in an anaerobic fixed bed digester. –Biomass and Bioenergy 6: 493 – 495.
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. & Rintala, J. 2009: Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. –Bioresource Technology 100: 2952 – 2958.
- Silverman, B. W. 1986: Density estimation for statistics and data analysis. Monographs on statistics and applied probability. –Chapman & Hall Ltd, London. 175 s.
- Sokka, L., Antikainen, R. & Kauppi, P. 2004: Flows of nitrogen and phosphorus in municipal waste: a substance flow analysis in Finland. –Progress in Industrial Ecology 1: 165 – 186.
- Stabnikova, O., Wang, J-Y., Ding, H. B. & Tay, J-H. 2005: Biotransformation of vegetable and processing wastes into yeast biomass enriched with selenium. –Bioresource Technology 96: 747 – 751.
- Suomen Hippos ry. 2010: Hevoskannan kehitys maassamme 1910 – 2009. [http://www.hippos.fi/hippos/tilastot/jalostus\\_ja\\_kasvatus/hevoskannan\\_kehitys.php](http://www.hippos.fi/hippos/tilastot/jalostus_ja_kasvatus/hevoskannan_kehitys.php) (5.2.2010).
- Tiehallinto 2009: Tiehallinnon Digiroad-palvelu.
- Tilastokeskus 2005: Ympäristötilasto 2005. –Ympäristö ja luonnonvarat 2005: 2. Tilastokeskus, Helsinki. ISBN 952-467-452-1. 208 s.
- Tilastokeskus 2006: Polttoaineluokitus 2006. 3.4.2006, Tilastokeskus. [http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.xls](http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.xls) (20.12.2009)

- Tilastokeskus 2009: Väestörakenne 2008. Tilastokeskus.  
[http://www.stat.fi/til/vaerak/2008/vaerak\\_2008\\_2009-03-27\\_fi.pdf](http://www.stat.fi/til/vaerak/2008/vaerak_2008_2009-03-27_fi.pdf) (27.5.2009)
- Tomei, M. C., Braguglia, C. M. & Mininni, G. 2008: Anaerobic degradation kinetics of particulate organic matter in untreated and sonicated sewage sludge: Role of the inoculum. –*Bioresource Technology* 99: 6119 – 6126.
- Työ- ja elinkeinoministeriö 2007: Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa: asiantuntijatyöryhmän raportti, 12.2.2007. –Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. 44 s.
- Työ- ja elinkeinoministeriö 2008: Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6.päivänä marraskuuta 2008. –Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki. 130 s.
- Vainio-Mattila, B., Ginström, T., Haaranen, T., Luomanperä, S., Lähdetie, P., Oravuo, M., Pietola, K., Suojanen, M., Virolainen, J., Knuutila, K. & Ovaska, S. 2005: Peltoviljelyn tulevaisuuden linjaukset Suomessa. Työryhmämuistio 2005: 15. –Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki. 47 s.
- Viljavuuspalvelu Oy 2004: Lantatilastot 2000 – 2004. 10 s.  
[http://www.viljavuuspalvelu.fi/user\\_files/files/kotielain/lanta\\_tilastot.pdf](http://www.viljavuuspalvelu.fi/user_files/files/kotielain/lanta_tilastot.pdf) (5.3.2009)
- Voivontas, D., Assimacopoulos, D. & Koukios, E. G. 2001: Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. –*Biomass and Bioenergy* 20: 101 – 112.
- Väestörekisterikeskus 2008: Suomen asukasluku vuodenvaihteessa 2007 – 2008.  
[http://www.vrk.fi/vrk/files.nsf/files/C10998E033F7095EC2257408003A3AB5/\\$file/Asukasluku\\_2007\\_2008.htm](http://www.vrk.fi/vrk/files.nsf/files/C10998E033F7095EC2257408003A3AB5/$file/Asukasluku_2007_2008.htm) (25.3.2009)
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J. & Jones, D. L. 2008: Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources: a review. –*Bioresource Technology* 99: 7928 – 7940.
- Weiland, P. 2000: Anaerobic waste digestion in Germany – status and recent developments. –*Biodegradation* 11: 415 – 421.
- Weiland, P. 2003: Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. –*Applied Biochemistry and Biotechnology* 109: 263 – 274.
- Weiland, P. 2006: Biomass digestion in agriculture: a successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. –*Engineering in Life Sciences* 6: 302 – 309.
- Weiland, P. 2008: Impact of competition claims for food and energy on German biogas production. Seminar on co-digestion for an optimized production of biogas and fertilizer 17.4.2008, Ludlow.
- Weiland, P. 2009a: Biogas in Germany: today 1400 MW biogas electricity and future targets. Seminar on biogas technology for sustainable bioenergy production 28.4.2009, Jyväskylä.
- Weiland, P. 2009b: Biogas production: current state and perspectives: a mini-review. –*Applied Microbiology and Biotechnology* 85: 849 – 860.
- Wellinger, A. 1999: Process design of agricultural digesters. –Nova Energie GmbH, Ettenhausen. 28 s.

Wellinger, A. & Lindberg, A. 2000: Biogas upgrading and utilisation. –IEA Bioenergy, task 24 – energy from biological conversion of organic waste.

Ympäristöministeriö 2009: Kotieläintalouden ympäristönsuojeluohje.  
–Ympäristöministeriö, Helsinki. 70 s.

YTV Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta 2004: Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen määrä ja laatu. –Pääkaupunkiseudun julkaisusarja B 2004: 13. YTV Jätehuolto. 77 s.

Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2010: Usein kysyttyä – öljylämmitys. <http://www.oil-gas.fi/index.php?m=3&id=149> (20.2.2010)