LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Energy Systems
Kestävyystutkimus/Sustainability Science

LUT Scientific and Expertise Publications
Raportit ja selvitykset – *Reports*

Ville Uusitalo, Satu Innanen

Biojätteiden erilliskeräys- ja hyötykäyttövaihtoehtojen ilmastonmuutosvaikutusten vertailu

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LUT School of Energy Systems

Kestävyystutkimus/Sustainability Science

LUT Scientific and Expertise Publications

Raportit ja Selvitykset – Reports 113

Ville Uusitalo, Satu Innanen

Biojätteiden erilliskeräys- ja hyötykäyttövaihtoehtojen ilmastonmuutosvaikutusten vertailu

LUT School of Energy Systems
Kestävyystutkimus
Mukkulankatu 19
15210 Lahti
ISBN 978-952-335-805-8
ISSN-L 2243-3384
ISSN 2243-3384
Lappeenranta 2022

TIIVISTELMÄ

Ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta jätehuollossa syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisellä on merkitystä, mutta jätteiden hyötykäytöllä voidaan myös saavuttaa päästövähenemiä mm. korvaamalla fossiilisia polttoaineita. Tässä raportissa esitellään elinkaarimallinnukseen pohjautuva kasvihuonekaasupäästöjen arviointi erilaisista biojätteiden erilliskeräyksen toteutusmalleista haja-asutusalueella sekä erilaisista biojätteen hyötykäyttövaihtoehdoista. Tulosten mukaan biojätteen erilliskeräys ja ohjaaminen biokaasu tuotantoon on kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta todennäköisesti parempi vaihtoehto kuin biojätteen polttaminen, jos biokaasulla korvataan fossiilista bensiiniä. Jätelogistiikalla on tulosten mukaan melko pieni merkitys kokonaispäästöissä. Tämän kaltaiseen tarkasteluun liittyy aina epävarmuuksia, joita on pyritty avaamaan herkkyystarkastelussa.

AVAINSANAT

Biojäte, erilliskeräys, elinkaarimallinnus, hiilijalanjälki

ABSTRACT

From climate change mitigation perspective reducing greenhouse gas emissions from waste management is important. In addition, waste utilization may enable further emission reductions by e.g., replacing fossil fuels. This report presents a life cycle assessment for comparison of different biowaste collection and utilization options. According to the results biowaste use for biogas production seems to a better option from greenhouse gas emissions' perspective than biowaste combustion if biogas can be used to replace fossil petrol. Waste logistics have only a minor role in total greenhouse gas emissions. There are always multiple uncertainties linked to this kind of assessment and impact of uncertainties have been presented via sensitivity analysis.

KEY WORDS

Biowaste, source separation, life cycle assessment, carbon footprint

LUT University

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

SISÄLLYS

1. JOHDANTO 4
2. BIOJÄTTEEN ERILLISKERÄYKSEN JA KÄSITTELYN TARKASTELU ELINKAARIARVIOINNILLA 5
2.1. Tavoitteet ja soveltamisalan määrittely 5
2.2. Inventaarioanalyysi 6
2.3. Ympäristövaikutusten arviointi ja herkkyystarkastelut 10
3. Johtopäätökset ..... Error! Bookmark not defined.
LÄHTEET 20
LIITTEET 22

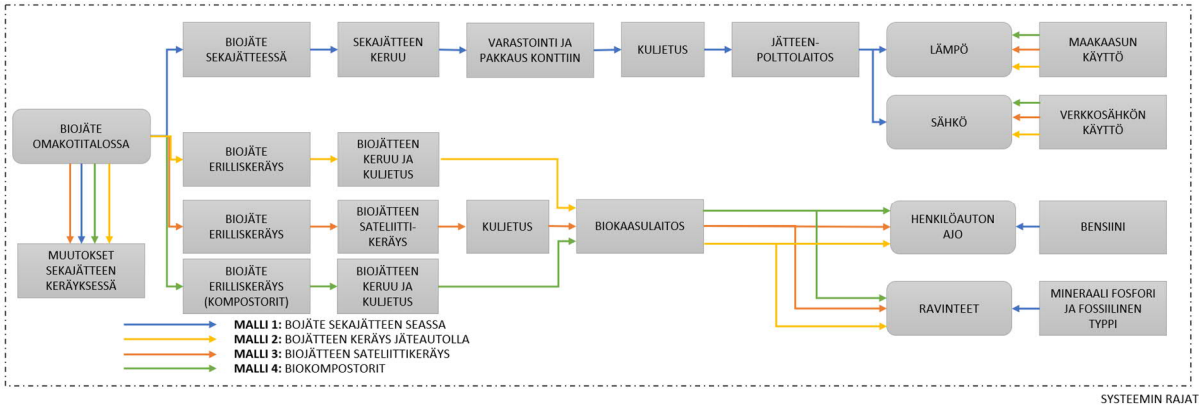
1. JOHDANTO

Omakotitaloasukkaiden biojätteet kerätään tällä hetkellä tyypillisesti, joko sekajätteen seassa, tai asukkaat kompostoivat niitä itse. Uusi jätelainsäädäntö tulee edellyttämään biojätteen erilliskeräystä vähintään 10 000 asukkaan taajamissa kaikilta kiinteistöiltä. Salpakierto Oy toteutti 2020-2021 kokeilun Päijät-Hämeessä, jossa vapaaehtoisilta kokeiluun osallistujilta erilliskerättiin biojätteet. Keruu toteutettiin siten, että ensin pakettiauto keräsi omakotitalokohtaiset biojätteet suurempiin keräysastioihin (biolinkki), joista suurempi jäteauto kuljetti biojätteet käsiteltäväksi Kujalaan biokaasulaitokselle (Bioneerimalli). Tämän lisäksi Jätekukko Oy pilotoi Kuopion seudulla mallia, jossa on käytössä talokohtainen jäteautoon tyhjennettävä kompostori, jonka ansiosta biojätteen keräysväliä voidaan pidentää. Tämän selvityksen tavoitteena oli mallintaa elinkaarimallinnusta hyväksi käyttäen biojätteisiin liittyvät kasvihuonekaasupäästöt eri keräys- ja käsittelyvaihtoehdoilla Päijät-Hämeen alueella. Lisäksi tavoitteena on tunnistaa keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat eri mallien kokonaiskasvihuonekaasupäästöihin. Tämä tarkastelu toteutettiin osana Päijät-Hämeen liiton rahoittamaa (EAKR) Biosykli-hanketta.

2. BIOJÄTTEEN ERILLISKERÄYKSEN JA KÄSITTELYN TARKASTELU ELINKAARIARVIOINNILLA

2.1. Tavoitteet ja soveltamisalan määrittely

Tässä raportissa esitetty laskenta perustuu ISO 14040 ja 14044 standardien esittämiin vaatimuksiin elinkaariarvioinnille ja ISO 14067 vaatimuksille hiilijalanjäljen laskennalle. Tavoitteena on tarkastella Päijät-Hämeessä ja Pohjois-Savossa toteutettujen biojätteen erilliskeräyskokeilujen pohjalta, millaiset ilmastonmuutosvaikutukset biojätteen erilliskeräyksellä on tilanteeseen verrattuna, jossa biojäte kerätään sekajätteen seassa. Ympäristövaikutusten arviointi toteutetaan käyttämällä CML 2001-2016 kertoimia kasvihuonekaasujen ilmastonlämmityspotentiaalille (GWP 100). Tarkastelu toteutetaan systeeminlaajennuksella ISO/TR 14049 mukaan, jolloin kaikissa tarkasteltavissa vaihtoehdoissa pitää tuottaa yhtä paljon tuotteita ja/tai palveluita. Toiminnallinen yksikkö tarkastelussa on 1 kg biojätettä ja siitä saatavissa oleva energia (sähkö ja lämpö) jätteenpolton kautta, kuten myös tuotetut ajokilometrit ja ravinteet (typpi ja fosfori) biokaasuprosessin kautta. Systeemilaajennuksessa siis esimerkiksi, jos biojäte ei ohjaudu polttoon, täytyy korvaava energia tuottaa jollakin muulla tavalla tai jos siitä ei saada tuotettua liikennepolttoainetta, niin liikenteessä täytyy käyttää korvaavia polttoaineita. Systeeminlaajennus, rajaukset, yksikköprosessit ja tarkasteltavat skenaariot on esitetty kuvassa 1. Tarkastelussa vertaillaan neljää erilaista vaihtoehtoa biojätteen keräykselle ja käsittelyllä. Nämä vaihtoehdot on kuvattu taulukossa 1. Laskenta toteutetaan käyttäen GaBi elinkaariarviointi ohjelmaa ja sen tietokantoja. Laskentaa täydennetään kirjallisuustiedoilla, tiedoilla nykyisestä sekajätteen käsittelystä ja biojätteen erilliskeräyskokeiluista kerätyillä tiedoilla.



Kuva 1: Systeemin rajat, yksikköprosessit, ja tarkasteltavat mallit 1-4.

Taulukko 1: Laskennassa vertailtavat mallit 1-4

MALLI	KUVAUS
MALLI 1: BIOJÄTE SEKAJÄTTEEN SEASSA	Tämä kuvaa biojätteen keräyksen nykytilannetta, jossa biojäte päätyy sekajätteen mukana polttoon.
MALLI 2: BIOJÄTTEEN KERÄYS JÄTEAUTOLLA	Tässä mallissa erilliskerätty biojäte kerätään tavallisella jäteautolla ja ohjataan biokaasuprosessiin.
MALLI 3: BIOJÄTTEEN SATELIITTIKERÄYS	Tämä malli kuvaa Salpakierto Oy:n Bioneerimallia, jossa erilliskerätty biojäte kerätään pakettiautolla suurempiin biolinkkeihin, joista ne kuljetetaan tavallisella jäteautolla biokaasuprosessiin.
MALLI 4: BIOKOMPOSTORIT	Tämä malli kuvaa Jätekukko Oy:n mallia, jossa erilliskerätty biojäte kerätään kompostoiviin biojäteastioihin, joista tavallisella jäteauto kuljettaa ne biokaasuprosessiin.

2.2. Inventaarioanalyysi

Tässä kappaleessa käydään läpi laskennan lähtötiedot, tehdyt oletukset ja taustatiedot eri prosessivaiheille. Tarkastelun lähtöoletuksena on vertailla 1 kg kotitalouksissa syntyvää tyypillistä biojätettä.

2.2.1 Biojätteen keräysmallit

Biojätteen keräysmalleista 3 ja 4 kerättiin tietoja Salpakierto Oy:n ja Jätekukko Oy:n pilottien yhteydessä. Koska kokeilut tehtiin erilaisissa toimintaympäristöissä ja niihin osallistui vapaaehtoisuuden pohjalta osa asukkaista, ei laskentaa voida toteuttaa kokonaan suoraan pilotointien yhteydessä kerättyjen tietojen pohjalta. Näin ollen vertailu biojätteen keräysvaihtoehdoille tehdään teoreettisesti Lahden Kariston ja Launeen asuinalueille. Asuinalueet ovat keskenään eri kokoisia ja ne sijaitsevat erilaisten etäisyyksien päässä Kujalan käsittelykeskuksesta. Taulukkoon 2 on kerätty tietoja molemmista asuinalueista ja esimerkiksi kartalta mitatuista ajomatkoista.

Taulukko 2: Logistiikkalaskentaa varten perusoletukset Kariston ja Launeen asuinalueille

	Yksikkö	Karisto	Laune
Omakotitalojen määrä	kpl	448	1323
Siirtoajo Kujalasta (edestakainen)	km	6,9	27,6
Keräysajo asuinalueella	km	14,2	53,8
Biolinkkien tyhjennysajo	km	9,8	32,6

Salpakierto Oy:n kokeilun yhteydessä kerättyjen tietojen mukaan omakotitalossa on keskimäärin 3,5 asukasta ja yksi asukas tuottaa noin 1,45 kg biojätettä viikossa (Karlström 2021). Tämän lisäksi

oletettiin, että yksi asukas tuottaa sekajätettä (ilman biojätettä) noin 89 kg vuodessa Circwaste -hankkeen tietojen pohjalta (Circwaste 2019). Lisäksi oletettiin, että noin 50 % asukkaista kompostoi itse biojätteensä ja 50% laittaa biojätteensä jätehuollon piiriin. Nämä samat oletukset koskevat kaikkia vertailtavia malleja.

Laskentamallissa oletettiin, että jäteastia, jossa on biojätettä, joko pelkästään tai sekajätteen seassa tyhjennetään kahden viikon välein. Niin ikään biolinkit tyhjennetään kahden viikon välein. Mikäli sekajätteen seassa ei ole biojätettä oletetaan keskimääräinen tyhjennysaika kahdeksaksi viikoksi (Karlström 2021). Tässä on todellisuudessa vaihtelua, mistä johtuen sekajätteen keruun absoluuttiset päästöt voivat poiketa todellisista päästöistä. Kuitenkin tämä oletus ei muuta vertailtavien biojätteen erilliskeräysvaihtoehtojen suhteellisia päästöjä verrattuna toisiinsa. Jäteautoon tyhjennettävä biokompostori tyhjennetään vain noin neljä kertaa vuodessa, jolloin tyhjennysväli on 13 viikkoa. Kompostiin lisätään myös kompostikuiviketta noin kolme 30 l säkkiä vuodessa. (Malinen 2021) Yhden säkin massa on noin 5,4 kg eli kuivikkeen massa on noin 16,2 kg vuodessa per kotitalous. Kuivikkeen arvioidaan koostuvan noin 30% turpeesta ja loppuosa on uusiutuvaa sivuvirtabiomassaa, kuten kuorta ja kasvikuituja.

Jäteautolle on oletettu polttoaineen kulutukseksi siirtoajossa 0,35 l/km, keräilyajossa 0,43 l/km ja 0,02 l jokaista jäteastian tyhjennystä varten (Vehviläinen 2020). Mallissa 3 pakettiauton polttoaineen kulutukseksi on arvioitu 0,1 l/km ja tyhjäkäynnillä tyhjennysten aikana 1 l/h (Lipasto tietokanta). Tämän lisäksi yhden tyhjennyksen kestoksi on mitattu 47 s ja on oletettu, että yhden pysähdyksen aikana voidaan tyhjentää keskimäärin 1,5 jäteastiaa.

Salpakierto Oy:n tietojen mukaan pakkaavan jäteauton biojätemäärät ovat olleet noin 5 t per kuorma, jonka voidaan olettaa olevan kutakuinkin täynnä (Karlström 2021). Näin olleen laskennassa on oletettu, että kun jäteauton 5 t kapasiteetti tulee täyteen, täytyy sen suorittaa siirtoajo Kujalaan. Toisaalta jos jäteauto ei yhdeltä asuinalueelta saa 5 t kuormaa on oletettu, että se tällöin hakee lisää jätettä joltakin muulta alueelta. Pakettiauton osalta tätä ongelmaa ei ole, koska biolinkkejä on noin 6-7 talon välein, jolloin biojätemäärä ei ehdi ylittää pakettiauton kantokykyä.

Dieselin käytön päästökertoimena käytetään 2339 gCO_{2eq} /l (Lipasto) ja dieselin valmistukselle GaBi tietokannan prosessia dieselille tankkausasemalla EU:ssa.

2.2.2 Biojätteen poltto

Sekajätteen varastointi ja pakkaus konttiin

Kujalassa diesel käyttöinen kauhakuormaaja siirtää sekajätteen kontteihin, jotka kuljetetaan jätteenpolttolaitoksille. Kauhakuormaaja kulutti polttoainetta noin 11,9 l/h. Yhden lastauksen viipymä vaihteli 30 min ja 60 min välillä ja tätä tarkastelua varten on valittu viipymäksi 45 min. Yhden polttoon kuljetettavan kuorman massa on noin 41 t. (Vehviläinen 2020) Dieselin käytön päästökertoimena käytetään 2339 gCO_{2eq} /l (Lipasto) ja dieselin valmistukselle GaBi tietokannan prosessia dieselille tankkausasemalla EU:ssa.

Sekajätteen kuljetus polttoon

Kujalasta konttiin pakattu sekajäte kuljetetaan polttolaitoksille 41 t kuormina (Vehviläinen 2020). Taulukossa 3 on esitetty kuljetusmatkat ja osuus koko jätemäärästä kolmelle voimalaitokselle. Taulukon lukujen pohjalta saadaan laskettua, että keskimääräinen kuljetusmatka sekajätteelle on 87,4 km. Kuljetus on mallinnettu GaBi tietokannan ”GLO: Truck-trailer, Euro 6, 50-60t gross weight” -prosessilla ja dieselin valmistusprosessilla EU:n tankkausasemille.

Taulukko 3. Sekajätteen kuljetus voimalaitoksille ja jätteen osuudet.

Voimalaitos	Etäisyys Kujalasta	Osuus jätteestä
Kotka	95 km	75%
Ekokem	62 km	23%
Woima	96 km	2%

Jätteen polttolaitos

Kotitalouksista erilliskerätyn biojätteen lämpöarvo vaihtelee mm. kosteuspitoisuudesta riippuen ja tämä vaikuttaa myös biokaasun saantoon biokaasulaitoksella (Koskimaa 2016). Tässä tarkastelussa biojätteen lämpöarvo on laskettu perusoletuksilla sekä minimi ja maksimiarvoilla, jotka on esitetty tarkemmin taulukossa 4. Biojätteen lämpöarvo eri tilanteille on laskettu Sokhansanj (2011) esittämän yhtälön mukaan biojätteen kuiva-aineen (TS) osuuden pohjalta. Biojäte ohjautuu polttoon eri polttolaitoksiin, mutta tässä tarkastelussa perusoletuksena on käytetty Kotkan Energian (2021) esittämiä lukuja hyötyvoimalaitokselle, jonka polttoaineteho on 34 MW, sähköteho 4 MW ja lämpöteho (kaukolämpö ja höyry) 23 MW. Näin ollen laitoksen kokonaishyötysuhde on noin 79 %, joka on kutakuinkin sama kuin Valorgas (2013) käyttämä 81%. Mahdollisen tukipolttoaineen käyttöä ei ole otettu huomioon tarkastelussa. Biojätteen palamisesta aiheutuvia päästöjä ei ole otettu laskentaan huomioon, koska niiden on oletettu olevan kokonaisuudessaan biogeenistä alkuperää. Biojätteen tuhkapitoisuudeksi on valittu 8 % (LCA Consulting 2020), joka kuljetetaan arvion mukaan noin 12 km päähän loppusijoitukseen (AVI). Tämä on laskettu Kotkan voimalaitoksen tuhkien kuljetusmatkan mukaan, koska suurin osa poltettavasta jätteestä käsitellään Kotkassa. Tuhkan kuljetuksen päästöt on mallinnettu GaBi:n prosessilla ”GLO: Truck, Euro 5, 26-28t gross weight /18.4 t” ja dieselin valmistusprosessilla EU:n tankkausasemille.

2.2.3. Biojäte biokaasuprosessissa

Biokaasulaitos

Labio Oy:n biokaasulaitos Kujalassa koostuu mädätysprosessista ja kompostiprosessista. Mallinnus perustuu pääasiassa Havukainen et al. (2018) Labio Oy:n laitokselle esittämiin arvoihin, mutta niitä on osin päivitetty Labio Oy:ltä saatujen tietojen pohjalta. Lähtötiedoista ei pysty aina erottelemaan mädätyslaitosta ja kompostointilaitosta toisistaan, joten ne on mallinnettu kokonaisuutena. Labio Oy käsittelykapasiteetti erilaisille syötteille noin 80 000 t vuodessa ja osa syötteistä ohjautuu biokaasuprosessiin ja osa kompostointilaitokseen (Labio 2021). Näistä syntyy kompostia noin 22 000 t ja biokaasua 50 GWh vuodessa (Labio 2021).

Kotitalouksista erilliskerättävän biojätteen kaasuntuotto riippuu useista eri tekijöistä, kuten biojätteen kuiva-aineesta, haihtuvien osuudesta ja näiden metaanin tuotosta. Tätä tarkastelua varten ei suoritettu erillisiä mittauksia näihin liittyen, joten laskenta perustuu kirjallisuudessa esitettyihin

arvoihin. Arvoissa on vaihtelua, joten laskenta on tehty ns. perusoletuksilla sekä minimi ja maksimi arvoilla, jotka pyrkivät kuvaamaan pessimististä ja optimistista tilannetta. Laskennassa käytetyt luvut on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Biojätteen ominaisuuksia ja vaihteluoletuksia (Alakangas et al. 2016; Rasi et al. 2012; Tampio et al. 2014; Valorgas 2013)

Suure	Yksikkö	Minimiarvot	Perusoletukset	Maksimiarvot
Kuiva-aine (TS)	%	20	27	35
Haihtuvien osuus kuiva-aineessa (VS/TS)	%	74	90	95
Metaanin tuotto haihtuvista	m^3_{CH4}/tVS	400	500	550
Metaanin lämpöarvo	MJ/kg	50	50	50
Metaanin tiheys	kg/m^3	0,66	0,66	0,66
Tuotetun biokaasun sisältämä energia biojätekiloa kohden	MJ/kg kWh/kg	1,95 0,54	4,01 1,11	6,03 1,68
Biojätteen lämpöarvo poltossa biojätekiloa kohden	MJ/kg	1,6	3,0	4,6

Kompostoivien biojäteastioiden tilanteessa osa biojätteestä saattaa hajota jo omakotitalokohtaisissa kompostoreissa, jolloin sen biokaasun tuotto heikentyy. Perusoletuksena laskennassa on, että kompostoivien biojäteastioiden käyttö johtaa noin 10% menetykseen biokaasun tuotossa (Malinen 2021). Tähän oletukseen liittyy kuitenkin merkittävää epävarmuutta. On mahdollista, että kuivikkeen turve tai muut komponentin tuottavat biokaasua biokaasuprosessin aikana, mutta tästä ei ole tarkkaa tietoa. Laskennassa on käytetty kuitenkin oletusta, että turve ja kuivike hajoavat biokaasulaitoksella ja tuottavat biokaasua, jonka määrä vastaa keskimääräisen syötteen biokaasun tuottoa Labio Oy:n biokaasulaitoksella. Näin ollen biokaasun tuotannon lisäys yhtä biojätekiloa kohden on noin 5%. Kuivikkeen biokomponenttien on katsottu olevan sivuvirtoja ja niiden tuotannon päästöjä ei ole allokoitu kuivikkeelle. Turpeen osuuden osalta päästöt on arvioitu saman suuruisiksi kuin turpeen poltossa 107,6 gCO_2eq/MJ ja turpeen tuotannon päästöt on arvioitu hyvin matalaksi polton päästöihin verrattuna (Tilastokeskus 2021; Myllymaa 2008). Jos kuivikkeen turpeen hiili päätyy biokaasuprosessin kautta metaaniksi, vapautuu se poltettaessa ilmaan samalla tavalla kuin turpeen suorassa poltossa. Se voi myös vapautua materiaalin hajotessa esimerkiksi kompostin hyötykäytön seurauksena. Kuivikkeen massaosuus Mallissa 4. on vain noin 6 % luokkaa verrattuna biojätteen osuuteen.

Biokaasulaitos käyttää kevyttä polttoöljyä mm. kuormaajissa yhteensä 130 000 l vuodessa. Tämän lisäksi laitos käyttää noin 5 500 MWh/a sähköä. (Havukainen et al. 2018) Sähkö oletetaan tuotetun Lahti Energialla ja sen päästökertoimena on käytetty 211 gCO_{2eq}/kWh (Lahti Energia 2020). Kevyen polttoöljyn käytön päästöt on mallinnettu Havukainen et al. (2018) oletusten pohjalta ja käyttämällä GaBin prosessia kevyen polttoöljyn valmistukselle EU:ssa. Lisäksi laitos tuottaa 2 000 t/a rejektiä joka ohjataan polttolaitokselle. Rejektin osalta tarkasteluun on sisällytetty sen kuljetus polttolaitokselle. Prosessissa syntyy myös 25 000 m^3/a jätevesiä, jotka ohjataan jätevedenpuhdistuslaitokselle (Havukainen et al. 2018). Jätevedenpuhdistuslaitos on mallinnettu GaBin prosessilla EU:n alueen jätevedenpuhdistuslaitoksella, jonka oletetaan käyttävän Lahti Energian tuottamaa sähköä. Rejektin kuljetuksen päästöt on mallinnettu GaBi:n prosessilla ”GLO: Truck, Euro 5, 26-28t gross weight /18.4 t”, 5 km kuljetusmatkalla ja dieselin valmistusprosessilla EU:n tankkausasemille. Laskenta on suoritettu biokaasulaitoksen syötteiden ja tuotosten osalta niin, että ne on jaettu syötetonnia kohden.

Erityisesti kompostointilaitoksessa saattaa syntyä typpioksiduulia (N_2O) ja metaania (CH_4). Ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja, mutta niiden määriin liittyy epävarmuutta. Metaania ei periaatteessa pitäisi syntyä, jos prosessi pysyy aerobisena ja sen mahdollisesta määrästä ei ole tietoa ja siksi sitä ei ole otettu mukaan tähän tarkasteluun. Typpioksiduuli on otettu mukaan samoin oletuksin kuin Havukainen et al. (2018) eli oletetaan, että syötteiden typestä 0,7% reagoi N_2O:ksi. Kotitalouksilta kerätyissä biojätteissä oletetaan olevan 2 % typpeä (TS:stä) ja 0,4 % fosforia (TS:Stä) ja perusoletus on, että TS (total solids) osuus on 27% (Rasi et al. 2012).

Kompostin tai lannoitteiden levitystä ei ole otettu tarkastelussa huomioon, vaan sen on arvioitu johtavan kutakuinkin saman suuruisiin päästöihin kompostiravinteiden ja mineraali/fossiili lannoitteiden kohdalla. Voidaan kuitenkin olettaa, että kompostissa on vielä jäljellä orgaanista ainesta, joka saattaa varastoinnin aikana tai pellolla muodostaa metaania ja typpioksiduulia. Tämän metaanipäästön suuruudesta ei ole tarkkaa tietoa, mutta tässä laskennassa sille on käytetty arvoa 7 gCO_{2eq}/MJ tuotettua biokaasua kohden (Uusitalo 2014).

Biokaasun jalostus, jakelu ja käyttö

Biokaasun jalostusvaiheessa kaasusta poistetaan epäpuhtauksia ja muita kaasukomponentteja, jolloin lopputuote on lähes puhdasta metaania. Teknologiasta riippuen jalostus käyttää sähköä ja lämpöä ja siinä myös osa metaanista voi karata ilmaan. Laskennassa biokaasun jalostuksen hiilijalanjäljelle on käytetty arvoa 7,0 gCO_{2eq}/MJ biokaasua (Kinnunen 2021). Vastaavasti jakelu maakaasuverkossa ja tankkausasemilla kuluttaa sähköä. Tämän on oletettu johtavan 2,5 gCO_{2eq}/MJ päästöihin. (Uusitalo 2014) Kaasukäyttöisen auton energiankulutuksena on käytetty 1,8 MJ/km (Lipasto tietokanta).

Vaihtoehtoiset tavat tuottaa lämpöä, liikenne-energiaa ja ravinteita

Mikäli biojäte erilliskerätään, eikä se päädy enää polttoon, täytyy sen polttamista vastaava lämpö ja sähkö tuottaa jotenkin muuten. Tässä tapauksessa on oletettu, että jos biojäte ei päädy polttoon niin siitä saatavaa lämpöä korvaamaan käytetään maakaasua. Maakaasun käyttö on mallinnettu GaBin prosessilla ”FI: Process steam from natural gas”. Sähkön tuotannon osalta päästöt on mallinnettu GaBin prosessilla ”FI: Electricity grid mix”.

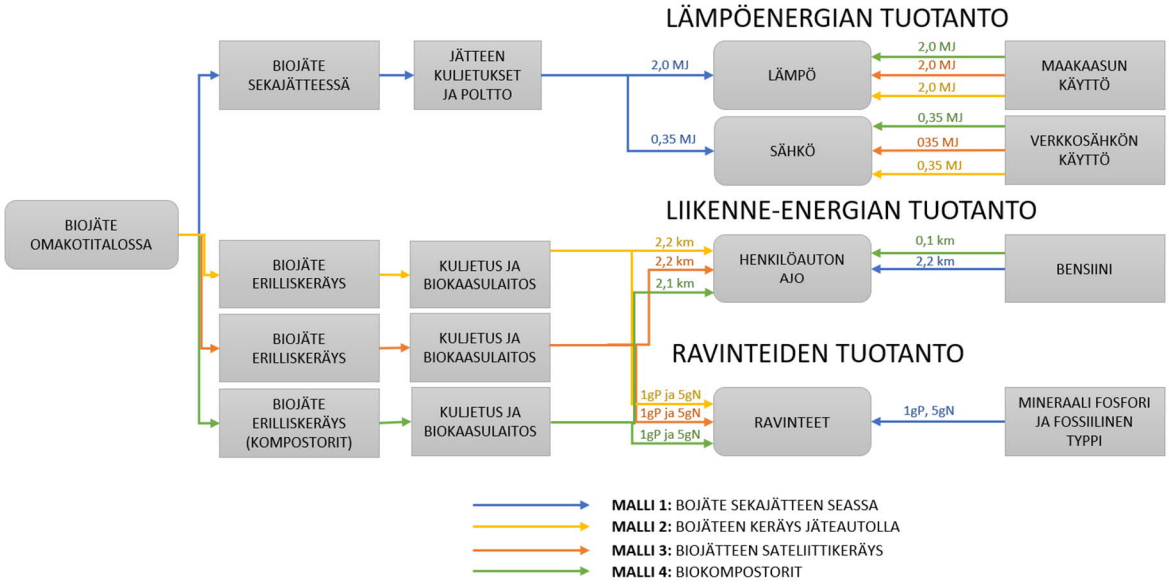
Mikäli biojätteellä tuotettu biokaasu ohjataan liikennekäyttöön, sillä voidaan olettaa korvattavan bensiiniä. Tämä oletus voidaan perustella muun muassa sillä, että kaasuautojen määrä Suomessa on ollut kasvussa. Bensiinin valmistuksen päästöt on mallinnettu GaBin prosessilla ”EU:28 Gasoline mix (regular) at filling station”. Bensa-auton suorina päästöinä on käytetty 130 gCO_{2eq}/km ja polttoaineen kulutuksena 1,9 MJ/km (Lipasto tietokanta).

Fossiilisen typpilannoitteen valmistuksen päästöt on mallinnettu GaBin urealannoitteen valmistusprosessilla ja mineraalifosforin valmistus GaBin fosfaatin valmistusprosessilla. Kompostin typen ja fosforin on oletettu korvaavan mineraalifosforia ja fossiilista typpeä suoraan massasuhteessa 1:1.

2.3. Ympäristövaikutusten arviointi ja herkkyystarkastelut

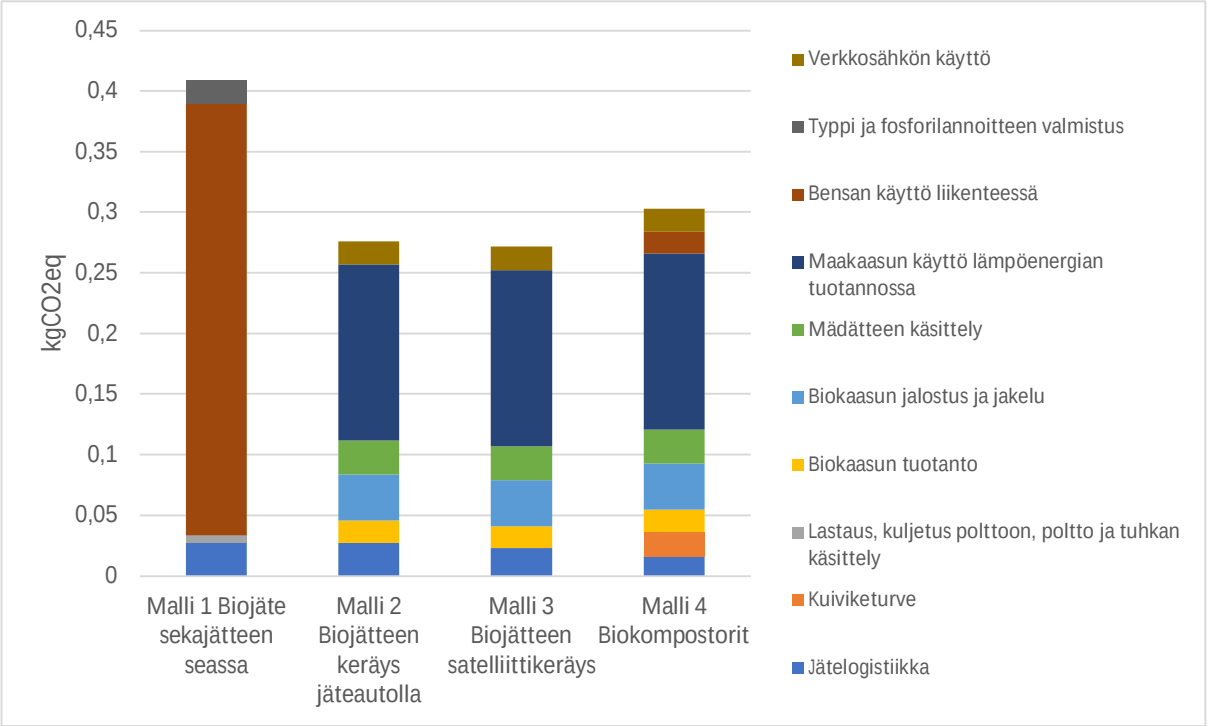
Eri biojätteen keräys- ja käsittelyvaihtoehtojen ilmastonmuutosvaikutuksia (GWP 100) vertailtiin systeemin laajennuksella. Siinä jokaisessa mallissa täytyy systeemitasolla tuottaa sama määrä lämpöenergiaa, sähköä, henkilöauton ajokilometrejä ja ravinteita. Malleissa osa näistä saadaan tuotettua biojätteen avulla. Ne lopputuotteet, joita ei voida tuottaa kyseisessä mallissa biojätteen

avulla, täytyy tuottaa vaihtoehtoisella tavalla. Kuvassa 2. on esitetty eri mallien tuottama lämpö, sähkö, ajokilometrit ja ravinteet, sekä niiden tuotantoreitti.



Kuva 2: Erilaisten tuotteiden määrät systeemin laajennuksessa eri malleille yhtä biojätekiloa kohden.

Kuvassa 3. on esitetty edellä kuvattujen oletusten perusteella lasketut kasvihuonekaasupäästöt (KHK) neljälle biojätteen keräys- ja käsittelymallille. Kuvasta havaitaan, että suurin merkitys KHK-päästöihin on sillä, mitä prosesseja biojätteen hyötykäytöllä voidaan korvata. Suurin vaikutus saadaan, jos biojätteestä tuotetulla biokaasulla voidaan korvata fossiilista bensiiniä liikennekäytössä. Myös biojätettä polttamalla voidaan korvata päästöjä maakaasun käytössä ja verkkosähköntuotannossa, mutta tästä saatava päästöhyöty on pienempi kuin bensiinin korvaamisesta liikennekäytöstä saatu hyöty. Biojätteen käsittely liikennebiokaasuksi aiheuttaa suuremmat päästöt, kuin biojätteen polttaminen energiaksi. Kuitenkin systeemitasolla biojätteen ohjaaminen biokaasuprosessiin on ilmaston näkökulmasta parempi vaihtoehto. Tässä tarkastelussa erilaisilla biojätteen erilliskeräyksen logistiikkavaihtoehdoilla on vain pieni merkitys kokonaispäästöihin. Kuvassa esitetyt logistiikkapäästöt ovat keskiarvo Launeen ja Kariston alueelle lasketuista teoreettisista päästöistä. Mallissa 4. perusoletuksena oli, että biojätteen kaasun tuotto laskee noin 10% kompostorien takia, mutta toisaalta kompostikuivikkeen hajoaminen lisää kaasun tuottoa 5% ja siksi tässä mallissa tarvitaan pienimäärä bensiiniä tuottamaan lisäajokilometrejä liikennekäyttöön.



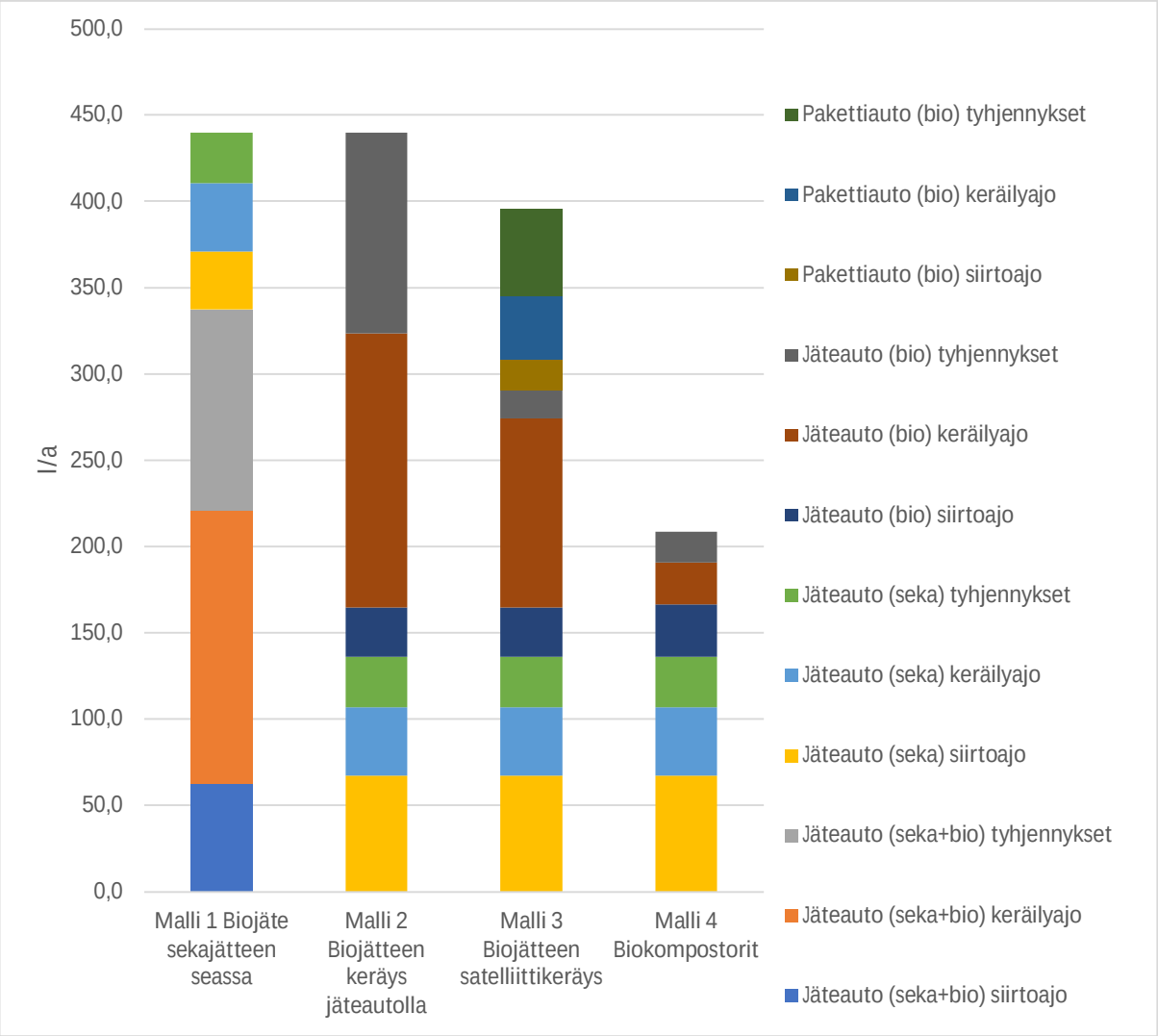
Kuva 3. Biojätteiden keräys- ja käsittelymallien ilmastonmuutosvaikutusten vertailu systeemin laajennuksella yhtä biojätekiloa kohden.

Yhden biojätekilon osalta biojätteen satelliittikeräys ja biojätteen ohjaaminen biokaasuprosessiin (malli 3.) vähentää päästäjä määrällä, joka vastaa hieman vajaata 1 km henkilöautolla ajoa. Keskimääräiselle kotitaloudelle (3,5 henkilöä) tämä tarkoittaa vuodessa päästövähennystä, joka vastaa yli 200 km henkilöautoilun välttämistä.

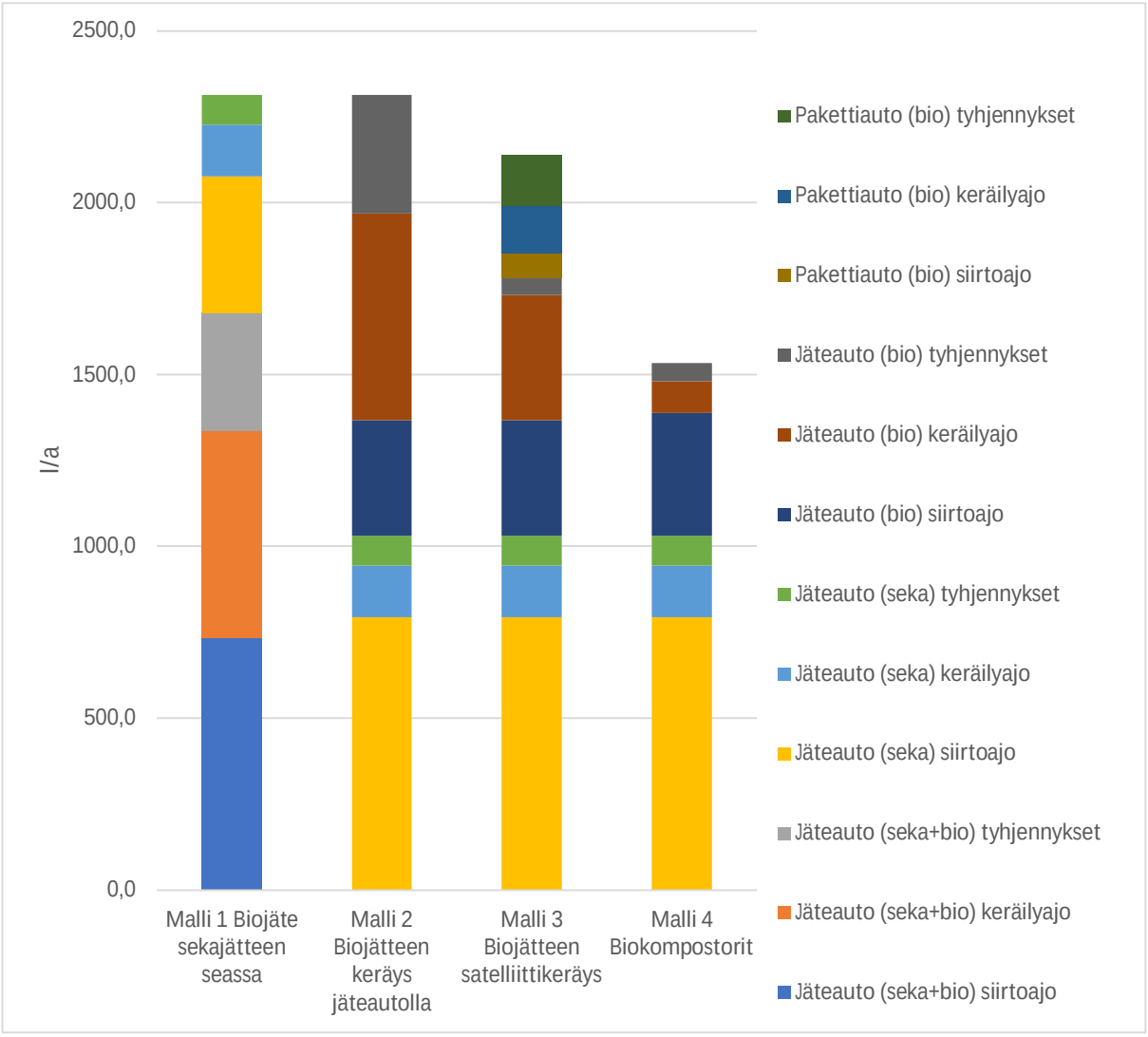
Biojätteestä tuotetun biometaanin hiilijalanjäljeksi muodostui tässä laskennassa (tavallista jäteautoa käytettäessä ja mädätteen käsittely mukana) noin 28 gCO_{2eq}/MJ, joka on korkeammalla tasolla kuin Gasumin ilmoittama keskimääräisen suomalaisen biometaanin hiilijalanjälki (19 gCO_{2eq}/MJ) (Seppälä et al. 2020). On mahdollista, että tässä lasketuissa biokaasun tuotannon päästöissä on yliarviota, koska mädätys ja kompostiprosessiin liittyvää dataa ei voitu erotella. Ero saattaa johtua myös esimerkiksi laskennassa käytetystä melko korkeasta mädätteen käsittelyn päästöstä tai siitä, että erilliskerätyn biojätteen kaasun tuotto on matalampaa kuin keskimääräisillä syötteillä.

Kuvassa 4 ja 5 on esitetty tarkemmin polttoaineen kulutus vuositasolla eri logistiikkamalleille Kariston ja Launeen asuinalueille. Kuvista havaitaan, että nykyinen logistiikka, jossa biojäte kerätään sekajätteen seassa (malli 1.) aiheuttaa laskennallisesti saman suuruisen polttoaineen kulutuksen, kuin malli jossa biojäte erilliskerättäisiin perinteisellä jäteautolla (malli 2.). Biojätteen satelliittikeräys (malli 3.) näyttäisi johtavan hieman matalampaan kokonaispolttoaineen kulutukseen kuin kaksi ensimmäistä mallia. Biokompostorimallissa (malli 4.) logistiikan kokonaispolttoaineen kulutus on kaikkein matalin. Mallien suhteellisilla polttoaineen kulutuksilla ei ollut merkittävää eroa kahden erilaisen asuinalueen välillä. Logistiikan polttoaineen kulutusta voisi edelleen vähentää Mallissa 3. esimerkiksi siten, että biolinkkien tyhjennysajoa voitaisiin optimoida tai jos asukkaat toimittaisivat itse biojätteet biolinkkeihin, jolloin pakettiauton operaatioita ei tarvittaisi. Yksi vaihtoehto voisi olla myös yksi suurempi asuinaluekohtainen biolinkki, jolla voitaisiin välttää kokonaan suuremman jäteauton

biolinkkien tyhjennysajot. Lisäksi jätteiden keräys voitaisiin toteuttaa esimerkiksi käyttämällä biokaasu polttoaineena jäteautoissa.



Kuva 4: Biojätelogistiikkamallien teoreettiset polttoaineen kulutukset vuositasolla eri logistiikkamalleille Kariston alueelle.

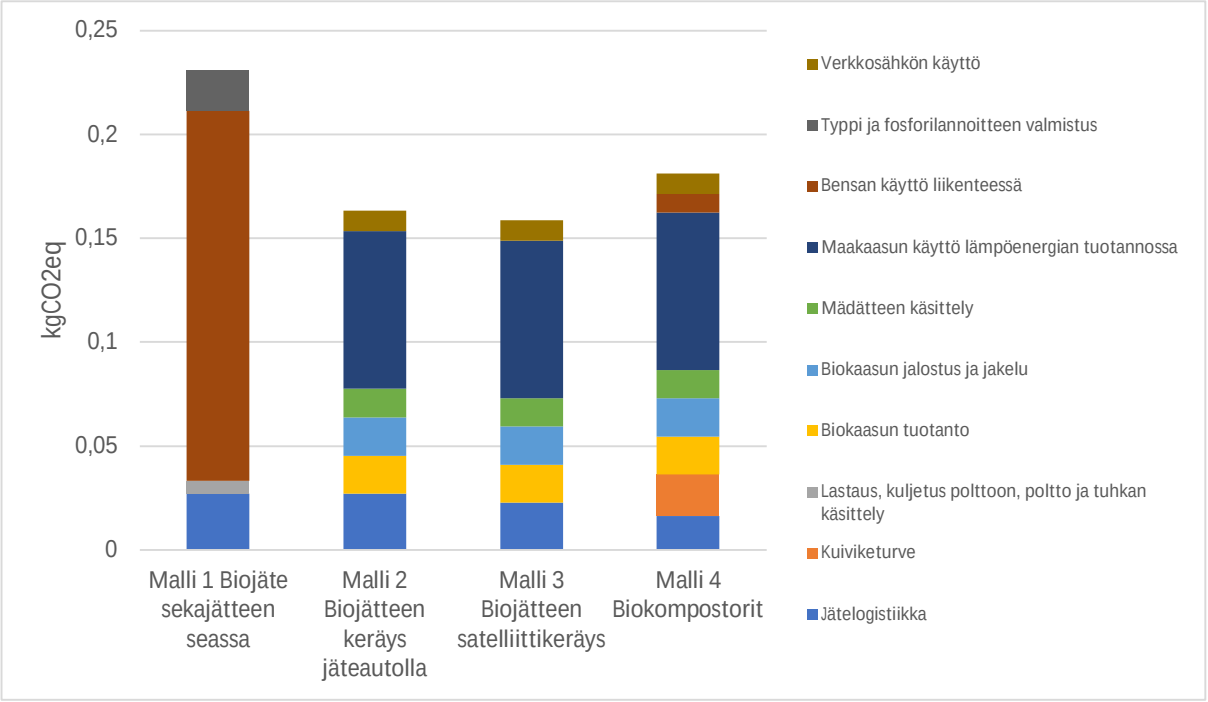


Kuva 5: Biojätelogistiikkamallien teoreettiset polttoaineen kulutukset vuositasolla eri logistiikkamalleille Launeen alueelle.

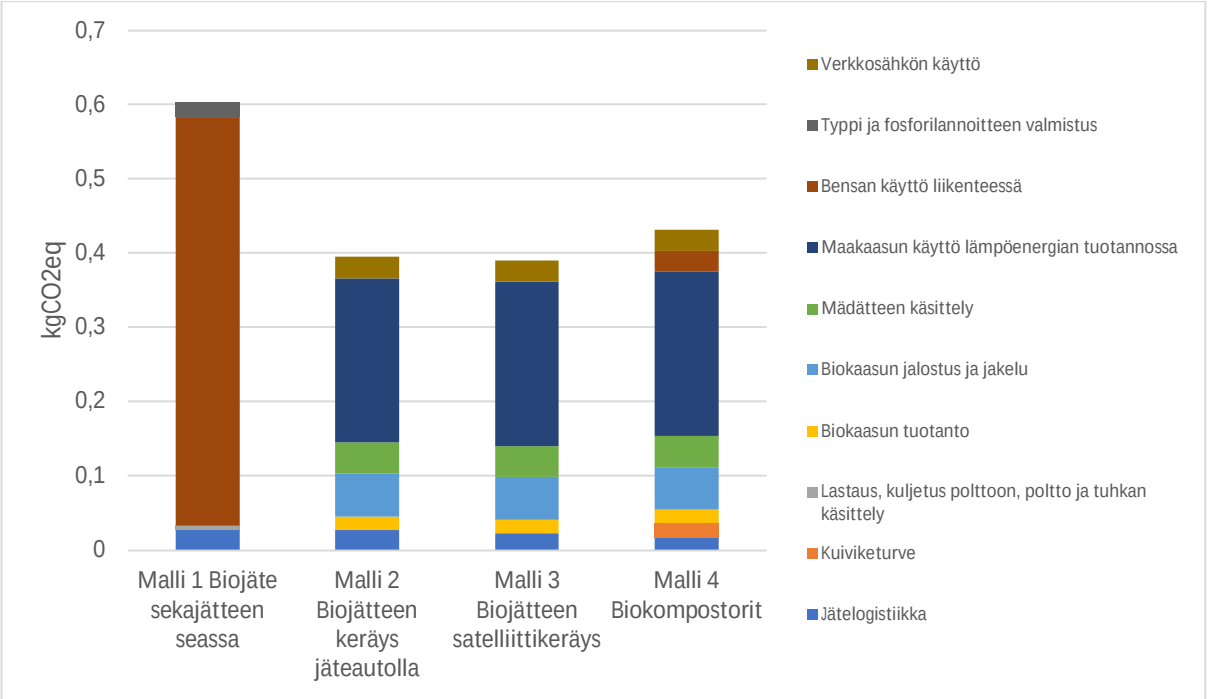
2.3.1. Herkkyystarkastelu

Tämän kaltaiseen laskentaan liittyy aina epävarmuuksia. Monin paikoin jouduttiin tekemään erilaisia oletuksia mallinnuksen pohjaksi, koska esimerkiksi mitattua tietoa ei ollut saatavilla. Tämän herkkyystarkastelun tavoitteena on arvioida erilaisten keskeisten oletusten vaikutusta tuloksiin ja tukea johtopäätösten tekemistä.

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty vertailu käyttämällä minimi ja maksimiarvoja biojätteen biokaasun ja energian tuotoille. Kuvista havaitaan, että vaikka absoluuttisten päästöjen määrä muuttuu, niin silti biojätteen ohjaaminen biokaasun tuotantoon näyttää olevan ilmaston kannalta paras vaihtoehto. Tämä johtuu siitä, että biojätteen lämpöarvo ja biokaasun tuotto kulkevat pitkälti käsikädessä, koska biojätteen kuiva-ainepitoisuudella on molempiin suuri vaikutus.



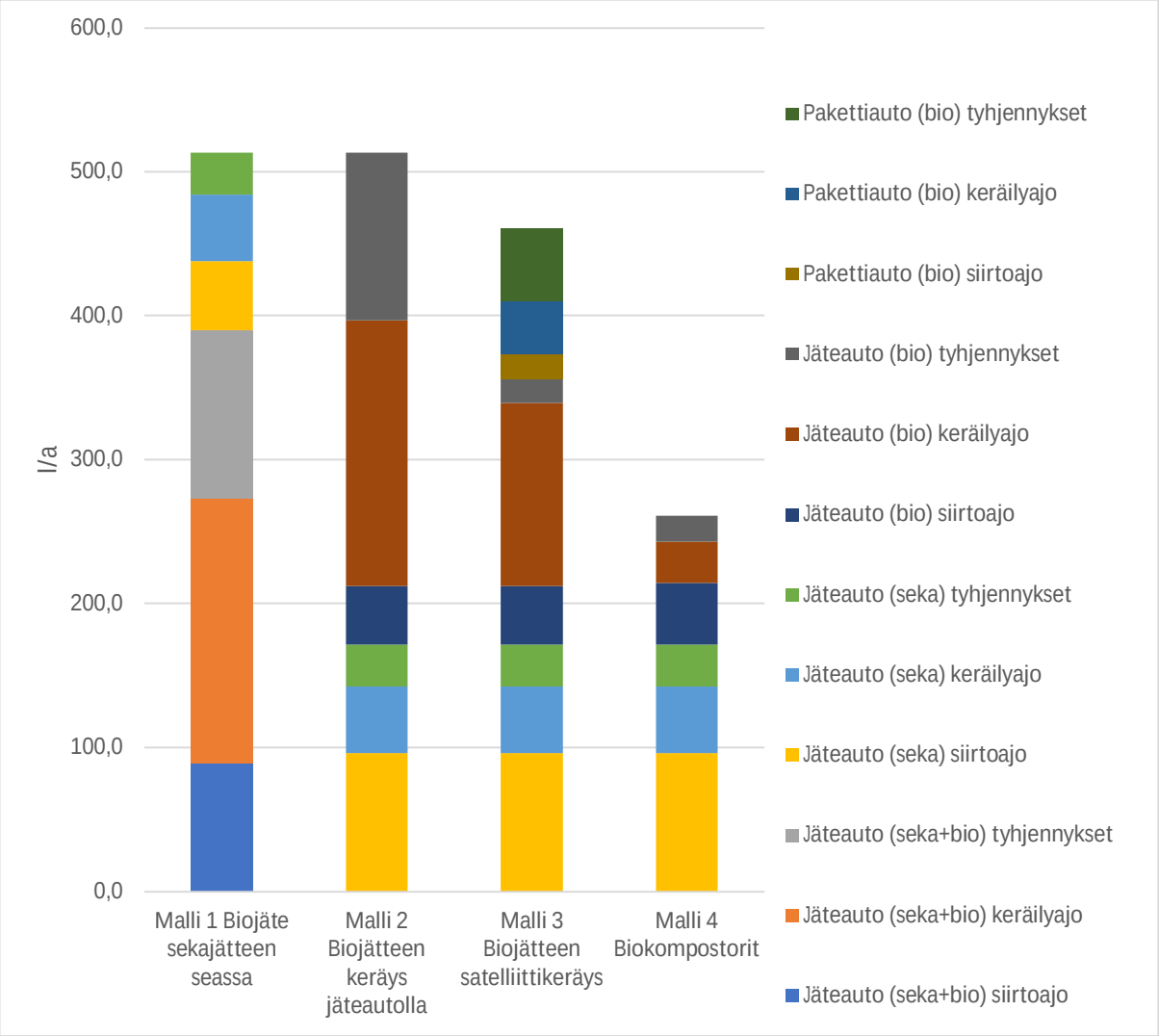
Kuva 6: Biojätteiden keräys- ja käsittelymallien ilmastonmuutosvaikutusten vertailu systeemin laajennuksella yhtä biojätekiloa kohden biojätteen laadun minimioletuksilla.



Kuva 7: Biojätteiden keräys- ja käsittelymallien ilmastonmuutosvaikutusten vertailu systeemin laajennuksella yhtä biojätekiloa kohden biojätteen laadun maksimioletuksilla.

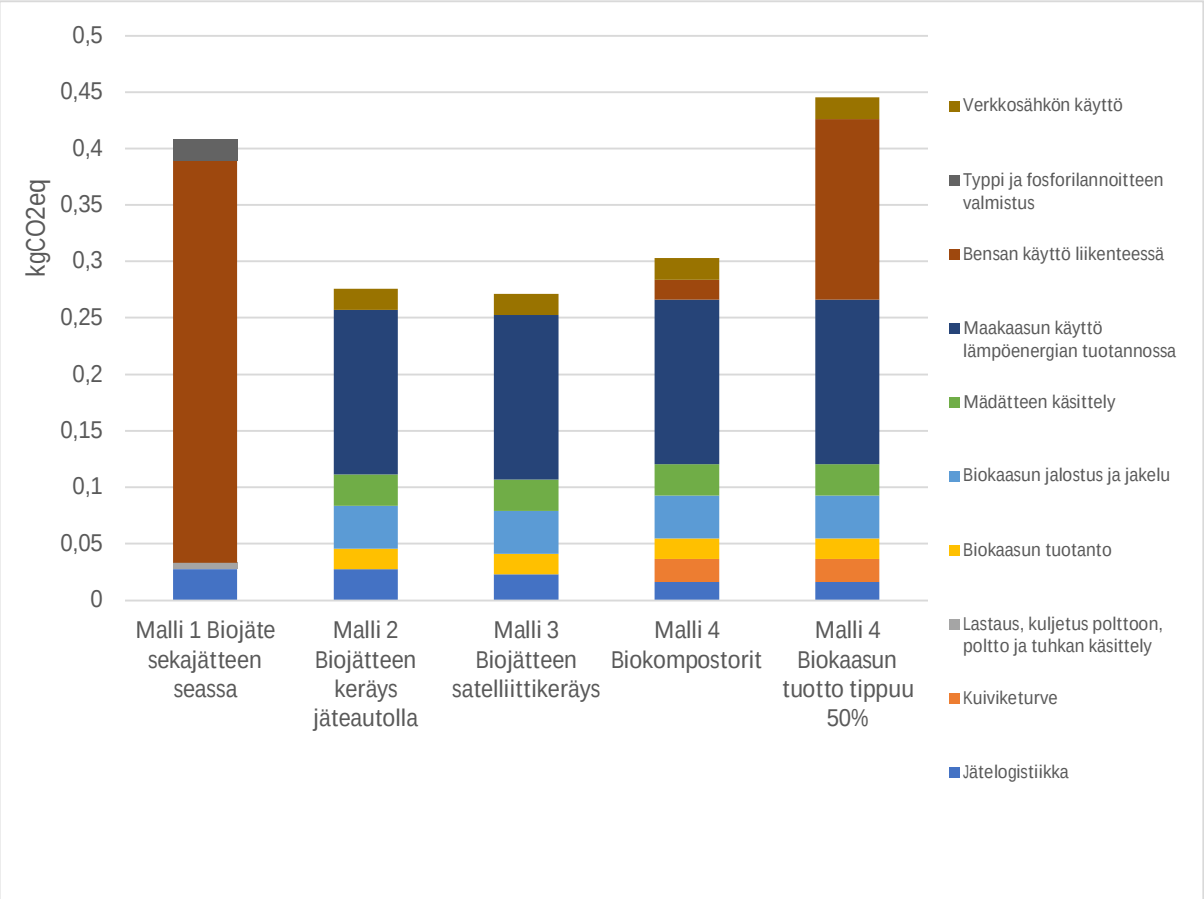
Seuraavaksi tarkastellaan jäteauton polttoaineen kulutusta. Osa lähteistä antaa korkeampia polttoaineen kulutuksia jäteautolle, kuin laskennan perusoletuksissa on käytetty. Kuvassa 8. on esitetty

Kariston alueen logistiikan päästöt jos jäteauton polttoaineen kulutus olisi 0,5 l/km (Vehviläinen 2020). Kuvasta havaitaan, että tällöin eri vaihtoehtojen kokonaispolttoaineen kulutukset kasvavat, mutta eri mallien järjestys ei muutu. On mahdollista, että mallissa neljä kompostoreiden tyhjennysväli on lyhyempi kuin pilotissa käytetty, mikä osaltaan lisäisi logistiikan päästöjä tässä vaihtoehdossa. Tätä ei kuitenkaan sisällytetty tarkempaan herkkyystarkasteluun.



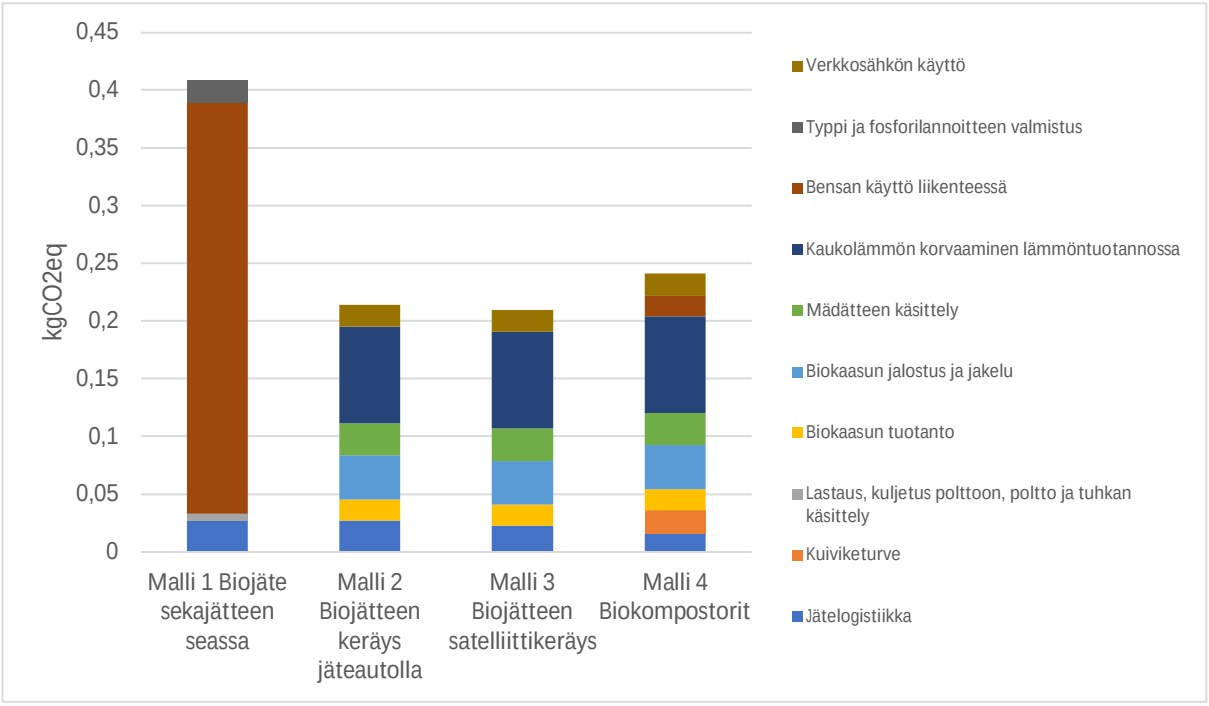
Kuva 8. Kariston alueen logistiikkavaihtoehtojen polttoaineen kulutus jos jäteauton kulutus on perusoletuksia korkeampi.

Kuvassa 9 on esitetty herkkyystarkastelu biojätteen biokaasuntuottopotentiaalin suuremmalla pienenemiselle (50% lasku) omakotitalokohtaisissa kompostoreissa (Mallissa 4). Kuvasta havaitaan, että näin suuri biokaasun tuoton pieneneminen edellyttää suurempaa fossiilisen polttoaineen käyttöä tuottamaan ajokilometrejä liikenteeseen, jolloin kokonaispäästöt kasvavat merkittävästi. Koska biojätteen hajoaminen kompostorissa ja mahdollinen kaasun tuotannon heikkeneminen vaikuttaa merkittävästi tuloksiin, tulisi tätä pyrkiä selvittämään mittauksilla. Tämän lisäksi olisi hyvä selvittää miten kompostorin kuivike käyttäytyy biokaasuprosessissa.



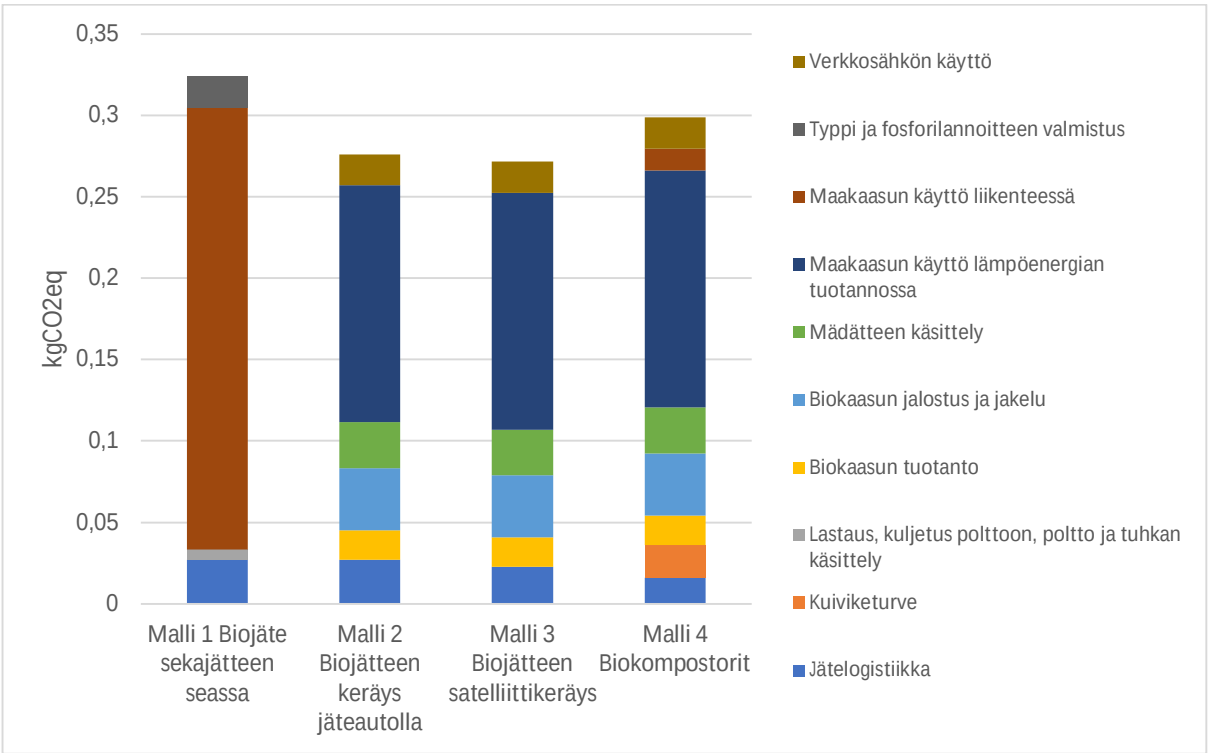
Kuva 9. Biojätteen biokaasuntuottopotentiaalin merkittävä pienenemisen kompostoivassa jäteastiassa (Mallissa 4) vaikutukset kokonaiskasvihuonekaasupäästöihin.

Kuvassa 10 on tarkasteltu mikä vaikutus tuloksiin olisi, jos maakaasun sijaan biojätteen poltolla tuotetulla lämmöllä korvattaisiin keskimääräistä suomalaista kaukolämmön tuotantoa. Kaukolämmön tuotannon päästökertoimeksi on valittu 148 $kgCO_{2eq}$/MWh (Motiva 2021). Kuvasta havaitaan, että tällöin biokaasun tuottaminen biojätteestä johtaa vielä selvästi matalampiin päästöihin kuin tapauksessa, jossa poltossa tuotetulla lämmöllä korvataan maakaasun käyttöä.



Kuva 10: Kasvihuonekaasupäästöt eri malleille, kun biojätteen poltolla tuotetulla lämmöllä korvataan keskimääräistä suomalaista kaukolämmön tuotantoa maakaasun sijaan.

Kuvassa 11 on esitetty tulokset, joissa bensan sijaan korvataan maakaasun käyttöä liikenteessä. Havaitaan, että tällöin biokaasun tuottaminen biojätteestä ei johda yhtä merkittäviin päästövähennyksiin biojätteen polttoon verrattuna kuin edellisillä oletuksilla.



Kuva 11: Kasvihuonekaasupäästöt, kun maakaasun käyttöä korvataan liikenteessä bensiinin sijaan biojätteestä tuotetulla biokaasulla.

3. JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskennan tulokset osoittavat, että biojätteen erilliskeräys ja ohjaaminen biokaasuprosessiin ja liikennepolttoaineeksi on ilmastonmuutoksen hillitsemisen näkökulmasta todennäköisesti parempi vaihtoehto, kuin biojätteen polttaminen. Erilaisilla logistiikkavaihtoehdoilla oli systeemitasolla kokonaispäästöjen kannalta vain pieni merkitys. Biojätteen satelliittikeräys (Malli 3.) ja Biokompostorimalli (Malli 4.) johtivat kuitenkin teoreettisessa tarkastelussa kahdelle esimerkkiasuinalueelle matalampiin logistiikkapäästöihin kuin perusmallit (Malli 1. ja 2.). Kokonaisuuden kannalta keskeinen kysymys on Mallissa 4 paljonko biojätteen biokaasuntuottopotentiaali pienenee kompostoreissa. Laskentaan liittyy kuitenkin erilaisia epävarmuuksia, erityisesti lähtöoletusten osalta ja näiden vaikutuksia on pyritty avaamaan herkkyystarkastelussa.

Oletus, että biokaasulla voidaan korvata fossiilista bensiiniä, on perusteltu, koska kaasun liikennekäyttö on kasvussa Suomessa. Mikäli biokaasulla korvattaisiin liikennekäytössä maakaasua ei biojätteen ohjaaminen biokaasuntuotantoon välttämättä johtaisi merkittäviin kasvihuonekaasupäästövähenemiin polttoon verrattuna. Biokaasun liikennekäyttöä voitaisiin myös varmistaa siten, että biokaasu käytettäisiin keräystä suorittavassa kaasukäyttöisessä jäteautossa. Myös oletukseen, että biojätteen poltolla korvataan maakaasua, liittyy niin ikään epävarmuutta. Keskimääräisen suomalaisen kaukolämmöntuotannon korvaaminen biojätteenpoltolla maakaasun sijaan pienentää polton päästövähennyspotentiaalia. Biojätteestä poltossa saatava energia ja mädätyksessä saatava biokaasun määrä riippuvat mm. biojätteen kuiva-aineesta. Muutokset biojätteen kuiva-aineessa voivat vaikuttaa absoluuttisiin tuloksiin, mutta niillä ei näytä olevan vaikutusta eri mallien keskinäiseen paremmuuteen. Laskennan lähtötietoihin liittyy epävarmuuksia mm. biokaasun tuotannon sekä mädätteen käytön osalta. Kuitenkin nämä epävarmuudet eivät vaikuta mallien 2., 3. ja 4. keskinäiseen paremmuuteen kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta. Logistiikkamallit perustuvat teoreettiseen tarkasteluun, joihin saatiin tietoja Salpakierto OY:n ja Jätekukko Oy:n biojätekokeiluista. Tulevaisuudessa olisi myös hyvä mitata tuottaako talokohtainen kompostori metaanipäästöjä ja miten kuivike käyttäytyy biokaasuprosessissa.

Lisätiedot

Tämä raportti on laadittu osana Päijät-Hämeen liiton rahoittamaa BIOSYKLI: Päijät-Hämeen biokiertotalous hanketta.

LÄHTEET

Alakangas, E et al. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T258.pdf

AVI. Heinsuon tuhkasijoitus-raportti.

Circwaste. 2019. Kotitalousjätteen määrä ja biojätteen keräys. https://materiaalitkiertoon.fi/fi-FI/Seuranta/Kotitalousjatteet

Havukainen, J., Uusitalo, V., Koistinen, K., Liikkanen, M., Horttanainen, M. 2018. Carbon footprint evaluation of biofertilizers. International Journal of Sustainable Development 13 (8), 1050-1060.

ISO 14044. International Organization for Standardization. EN ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.

ISO 14040. International Organization for Standardization. EN ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.

ISO 14049. International Organization for Standardization. ISO/TR 14049:2000. Environmental management. Life cycle assessment. Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis.

ISO 14067. International Organization for Standardization. EN ISO 14067:2018. Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification.

Karlström, L. 2021. Salpakierto Oy. Sähköpostit.

Kinnunen, V. 2021. Gasum Oy. Sähköpostit.

Koskimaa, A. 2016. Pääkaupunkiseudun kotitalouksien sekajätteen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet. Aalto-yliopisto, diplomityö.

Kotkan Energia. 2021. Hyötyvoimalaitos. https://www.kotkanenergia.fi/tietoa-meista/tuotantolaitokset/hyotyvoimalaitos/

Labio. 2021. https://www.labio.fi/en/front-page/

Lahti Energia. 2020. Sähköntuotannon päästökerroin 2019.

LCA Consulting. 2020. Asumisessa syntyvien jätteiden erilliskeräysvaihtoehtojen vaikutusten arviointi. Selvitys Ympäristöministeriölle.

Lipasto tietokanta. Yksikköpäästöt. VTT

Malinen, K. 2021. Jätekukko. Tiedonanto

Motiva. 2021. CO_2 päästökertoimet. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-paastokertoimet

Myllymaa 2008. Jätteiden kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Inventaariraportti. Suomen ympäristökeskus. https://helda.helsinki.fi/handle/10138/39792

Pohjala, M. 2014. Mikä on energia- ja kasvuturpeen elinkaaren ilmastovaikutus? Pro Gradu -tutkielma. Helsingin Yliopisto.

Rasi et al. 2012. From Waste to Traffic Fuel -projects. MTT Report 50.

Sokhansanj, S. 2011. Biomass energy databook. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.730.3430&rep=rep1&type=pdf

Seppälä, J. et al. 2020. Autokalkulaattori, käyttöopas ja laskennan perusteet. https://www.ilmastopaneeli.fi/autokalkulaattori/

Tampio, E. et. al. 2014. Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste. Waste Management 34 (2) 370-7.

Tilastokeskus. 2021. Polttoaineluokitus 2021. https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Uusitalo, V. 2014. Potential for Greenhouse Gas Emission Reductions by Using Biomethane as a Road Transportation Fuel. Väitöskirja.

Valorgas. 2013. Seventh framework programme theme energy.2009.3.2.2. Biowaste as feedstock for 2nd generation. http://www.valorgas.soton.ac.uk/publications.htm

Vehviläinen, J. 2020. Salpakierto Oy. Sähköpostit.

Wassholm, N. 2020 ja 2021. LABIO Oy. Sähköpostit.

LIITTEET

Bioneerikokeilussa kerättyjä tietoja biojätteen erilliskeräyksestä

Biojätteiden erilliskeräyskokeilu hoidetaan niin, että pienempi pakettiauto kerää omakotitaloilta lajitellun biojätteet suurempaan keräysastiaan. Suuremman keräysastian tyhjentää puolestaan suurempi jäteauto. Tällöin vältytään suurella jäteautolla tehtävästä keräysajosta. Pakettiautolla toteutettujen keräysajojen tiedot on koottu taulukkoon A. Vapaaehtoiset kokeiluun osallistuneet kotitaloudet ovat voineet lajitella biojätteensä 35 tai 50 l biojäteastioihin. Pakettiauton kokonaispolttoaineen kulutus oli noin 0,14 l/km, joka on kutakuinkin samalla tasolla kuin laskennassa käytetty Lipasto-tietokannan arvo.

Taulukko A. Biojätteiden keruun ja suurempaan jäteastiaan kuljetuksen tiedot (Karlström 2021)

Päivämäärä	Polttoaineen kulutus	Ajomatka	Ajoaika	Biojätteen määrä	Kohteiden määrä	Polttoaineen kulutus biojätettä kohden
21.1.2021	10,21l	73km	6,75h	1066,4 kg	105	0,010 l/kg
1.2.2021	12,1l	87km	7,0h	958,1 kg	119	0,013 l/kg
4.2.2021	11,3l	73km	6,75h	828,8kg	105	0,014 l/kg
12.4. 2021	11,75l	92km	7h	930kg		0,0126 l/kg
15.4.2021	8,9l	73km	6h	795kg		0,0112 l/kg
					ka:	0,012 l/kg

Suuremman keräysastian tyhjennys hoidetaan jäteautolla ja sen toiminnasta on saatavilla suoraan myös hiilijalanjälki. Laskennassa käytetään näitä valmiina saatavilla olevia hiilijalanjälkitietoja ja niihin lisätään dieselin valmistuksen päästöt. Tulokset keräyksestä kahdelta kohdealueelta on esitetty taulukossa B.

Taulukko B. Suuren jäteastian tyhjennys ja kuljetus Kujalaan (Karlström 2021)

Kuukausi	Jätemäärä	Hiilijalanjälki	Hiilijalanjälki jätemäärää kohden
Alue 1			
Syyskuu	0,336 t	0,033 tCO_{2eq}	0,098 $kgCO_{2eq}/kg$
Lokakuu	1,680 t	0,107 tCO_{2eq}	0,064 $kgCO_{2eq}/kg$
Marraskuu	1,344 t	0,080 tCO_{2eq}	0,060 $kgCO_{2eq}/kg$
Joulukuu	1,344 t	0,079 tCO_{2eq}	0,060 $kgCO_{2eq}/kg$
Tammikuu	1,344 t	0,080 tCO_{2eq}	0,060 $kgCO_{2eq}/kg$
Alue 2			
Syyskuu	0 t	0,014 tCO_{2eq}	n.a.
Lokakuu	1,200 t	0,070 tCO_{2eq}	0,060 $kgCO_{2eq}/kg$
Marraskuu	1,392 t	0,079 tCO_{2eq}	0,057 $kgCO_{2eq}/kg$
Joulukuu	1,680 t	0,102 tCO_{2eq}	0,061 $kgCO_{2eq}/kg$
Tammikuu	1,248 t	0,080 tCO_{2eq}	0,064 $kgCO_{2eq}/kg$
Keskiarvo (täydet kuukaudet)			0,06 $kgCO_{2eq}/kg$

ISBN 978-952-335-805-8

ISSN-L 2243-3384

ISSN 2243-3384

Lappeenranta 2022