

# **Puhdistamolietteen termisten käsittelymenetelmien hiilijalanjälki**

Vesilaitosyhdistyksen monistasarja nro 61

Helsinki 2021

Julkaisun jakelu:

Vesilaitosyhdistys  
Ratamestarinkatu 7 B  
00520 Helsinki

puh. (09) 868 9010  
sähköposti: [vvy@vvy.fi](mailto:vvy@vvy.fi)  
kotisivu [www.vvy.fi](http://www.vvy.fi)

ISSN-L 2242-7279  
ISSN 2242-7279

ISBN 978-952-6697-57-4

Helsinki 2021

<b>KUVAILEHTI</b>			
<i>Julkaisija</i>	Suomen Vesilaitosyhdistys ry		
<i>Tekijät</i>	AFRY Finland Oy		
<i>Julkaisun nimi</i>	Puhdistamolietteen termisten käsittelymenetelmien hiilijalanjälki		
<i>Julkaisusarjan nimi ja numero</i>	Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 61		
<i>Julkaisun teema</i>			
<i>Saatavuus</i>	Julkaisu on saatavissa Vesilaitosyhdistyksen verkkosivuilta.		
<i>Tiivistelmä</i>	<p>Tässä raportissa esitellään lietteen termisten menetelmien hiilijalanjälkilaskenta, joka on tehty osana selvitystä <i>Lietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen</i> (VVY 2019).</p> <p>Tässä raportissa kuvataan laskennan tausta ja peruseriaatteet sekä esitellään lyhyesti tarkastellut tekniikat. Laskennan taustaoletukset esitellään ja kuvataan tekniikkakohtaisesti laskennan yksityiskohtia. Hiilijalanjälkilaskennan tulokset esitetään ja niitä avataan kunkin tekniikan osalta. Lopuksi arvioidaan laskennassa käytettyjen oletusten ja laskentarajausten vaikutusta tulosten tulkintaan ja vertailtavuuteen sekä tehdään yhteenveto laskennan pääkohdista.</p> <p>Laskennassa tarkastellut tekniikat ovat mädätys, kompostointi, terminen kuivaus, torrefiointi, pyrolyysi, kaasutus, erillispoltto, yhteispoltto jätteenpolttolaitoksessa sekä yhteispoltto sementtiuunissa. Laskennan tavoitteena on antaa yleiskuva kunkin käsittelyprosessin hiilijalanjäljestä. Koko käsittelyketjun arviointia varten tulisi kuitenkin huomioida myös termistä käsittelyvaihetta edeltävän ja sitä seuraavan käsittelyketjun hiilijalanjälki.</p> <p>Laskennassa huomioitiin käsittelyprosessiin liittyvät suorat ja epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt (hiilijalanjälki) pois lukien biomassasta vapautuva biogeeninen hiilidioksidi. Lisäksi arvioitiin materiaalien ja energian hyödyntämisellä saavutettavia vältettyjä päästöjä.</p> <p>Laskennan tulosten perusteella perinteisistä lietteenkäsittelytekniikoista mädätys on kompostointiin verrattuna hiilijalanjäljen kannalta edullisempi tekniikka. Märkähiillon hiilijalanjälki on käytetyllä laskentarajauksella termisistä menetelmistä pienin. Poltto- ja kaasutusprosessien päästöt ovat muita tekniikoita korkeampia. Korkeimmat päästöt todettiin yhteispoltossa jätteenpolttolaitoksessa. Sementtiuunipoltolla saavutetaan merkittäviä vältettyjä päästöjä, koska näin voidaan välttää fossiilisen kivihiilen käyttöä.</p>		
<i>Avainsanat</i>	Hiilijalanjälki, puhdistamoliete, terminen käsittely, terminen kuivaus, märkähiilto, torrefiointi, pyrolyysi, kaasutus, poltto		
<i>Rahoittaja/toimeksiantaja</i>	Suomen Vesilaitosyhdistys ry		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-57-4	<i>ISSN</i> 2242-7279	
	<i>Sivuja</i> 42	<i>Kieli</i> suomi	<i>luottamuksellisuus</i> julkinen
<i>Julkaisun jakelu</i>	Vesilaitosyhdistys, www.vvy.fi		

<b>BESKRIVNINGSBLAD</b>			
<i>Publicerat av</i>	Finlands Vattenverksförening r.f.		
<i>Författare</i>	AFRY Finland Oy		
<i>Publikationens titel</i>	Koldioxidavtryck av termiska behandlingsmetoder för avloppsslam		
<i>Publikationsseriens titel och nummer</i>	Vattenverksföreningens duplikatserie nr 61		
<i>Publikationens tema</i>	Avloppsslam, koldioxidavtryck		
<i>Tillgänglighet</i>	Publikationen finns på Vattenverksföreningens webbsida.		
<i>Sammanfattning</i>	<p>I den här rapporten presenteras en koldioxidavtrycksberäkning av termiska slambehandlingsmetoder som gjorts som en del av studien <i>Termiska behandlingsmetoder för kommunal slam och deras tillämplighet i Finland</i> (VVY 2019).</p> <p>Den här rapporten beskriver bakgrunden och de grundläggande principerna för beräkningen, och presenterar kort de granskade teknikerna. Beräkningarnas antaganden som ligger till grund presenteras, och beräkningarna beskrivs i detalj för varje teknik. Resultaten av koldioxidavtrycksberäkningarna presenteras och öppnas för varje teknik. Slutligen bedöms effekten av de antaganden och begränsningar som gjorts, på resultatet och på jämförbarheten. Beräkningarnas huvudpunkter sammanfattas.</p> <p>Teknikerna som beaktats i beräkningarna är rötning, kompostering, termisk torkning, torrefiering, pyrolys, förgasning, separat förbränning, samförbränning i en avfallsförbränningsanläggning, och samförbränning i en cementugn. Syftet med beräkningen är att ge en översikt av koldioxidavtrycket i varje behandlingsprocess. Vid bedömning av hela behandlingskedjan bör emellertid också koldioxidavtrycket före och efter det termiska behandlingsskedet beaktas.</p> <p>Man beaktade de andra direkta och indirekta växthusgaserna (koldioxidavtryck) relaterade till behandlingsprocessen, men inte det biogena koldioxidet som frigörs från biomassan. Dessutom bedömdes vilka utsläpp som kan undvikas i och med att material och energi utnyttjas.</p> <p>Baserat på beräkningsresultaten rörande konventionella slambehandlingsmetoder är rötning en mer fördelaktig teknik vad gäller koldioxidavtryck, än kompostering. Koldioxidavtrycket för hydrotermisk karbonisering var minst av de termiska metoderna med den beräkningsgräns som användes. Utsläppen från förbrännings- och förgasningsprocesserna var högre än för de andra teknikerna. De högsta utsläppen konstaterades vid en samförbränning i en avfallsförbränningsanläggning. Med cementugnsförbränning uppnås betydande undvikna utsläpp eftersom detta minskar på behovet av fossilt stenkol.</p>		
<i>Nyckelord</i>	Koldioxidavtryck, avloppsslam, termisk behandling, termisk torkning, hydrotermisk karbonisering, torrefiering, pyrolys, förgasning, förbränning		
<i>Finansiär/uppdragsgivare</i>	Finlands Vattenverksförening r.f.		
	<i>ISBN</i> 978-952-6697-57-4	<i>ISSN</i> 2242-7279	
	<i>Sidantal</i> 42	<i>Språk</i> finska	<i>Konfidentialitet</i> offentlig
<i>Distribution av publikationen</i>	Vattenverksföreningen, www.vvy.fi		

<b>DESCRIPTION SHEET</b>	
<i>Publisher</i>	Finnish Water Utilities Association
<i>Contributors</i>	AFRY Finland Oy
<i>Name of publication</i>	Carbon footprint of the thermal treatment methods of sewage sludge
<i>Name and number of publication series</i>	Finnish Water Utilities Associations's publication series no 61
<i>Subject of publication</i>	Sewage sludge, carbon footprint
<i>Availability</i>	The publication is available online on the Finnish Water Utilities Association website
<i>Abstract</i>	<p>The report presents the carbon footprint calculation of various thermal treatment methods of sewage sludge, which was conducted as part of the study <i>Thermal treatment methods of sewage sludge and their suitability for Finland (VVY 2019)</i>.</p> <p>This report describes the background and basic principles of the calculation and briefly presents the technologies studied. The background assumptions of the calculation are presented, and the details of the calculation are described for each technology. The results of the carbon footprint calculation are presented and specified for each technology. Finally, the effect of the assumptions and calculation boundaries used in the calculation on the interpretation and comparability of the results is assessed and the main points of the calculation are summarized.</p> <p>The technologies studied in the calculation include anaerobic digestion, composting, thermal drying, torrefaction, pyrolysis, gasification, mono-incineration, co-incineration in a waste incineration plant and co-incineration in cement kilns. The aim of the calculation is to give an overview of the carbon footprint of each treatment process. However, for assessing of the whole treatment chain, the carbon footprint of the preceding and following treatment chains of the thermal treatment should also be considered.</p> <p>In the calculation the direct and indirect greenhouse gas emissions (carbon footprint) were also taken into consideration except for the biogenic carbon dioxide released from the biomass. In addition, the avoided emissions achieved by utilization of materials and energy were assessed.</p> <p>Based on the calculation results, anaerobic digestion is a more favourable technology of the traditional sludge treatment technologies compared to composting as regards the carbon footprint. With the used calculation boundaries, the carbon footprint of hydrothermal carbonization is the smallest of the thermal treatment methods. The emissions of incineration and gasification processes are higher than other technologies. The highest emissions were found in co-incineration at a waste incineration plant. Significant avoided emissions are achieved by cement kiln incineration, because the use of fossil coal can be avoided.</p>
<i>Key words</i>	Carbon footprint, sewage sludge, thermal treatment, thermal drying, hydrothermal carbonization (HTC), torrefaction, pyrolysis, gasification, incineration
<i>Financed/ sponsored by</i>	Finnish Water Utilities Association

	<i>ISBN</i> 978-952-6697-57-4	<i>ISSN</i> 2242-7279	
	<i>Pages</i> 42	<i>Language</i> Finnish	<i>Confidentiality</i> public
<i>Distribution</i>	Finnish Water Utilities Association, <a href="http://www.vvy.fi">www.vvy.fi</a>		

# Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	8
2	Laskennan tausta .....	9
2.1	Hiilijalanjälkilaskennan periaatteet.....	9
2.2	Tarkastellut tekniikat.....	10
2.2.1	Mädätys .....	11
2.2.2	Kompostointi .....	11
2.2.3	Terminen kuivaus.....	11
2.2.4	Märkähiilto (HTC).....	11
2.2.5	Torrefiointi .....	12
2.2.6	Pyrolyysi.....	12
2.2.7	Kaasutus .....	13
2.2.8	Erillispoltto.....	13
2.2.9	Yhteispoltto .....	14
3	Laskentarajaus ja -oletukset.....	15
3.1	Yleiset oletukset ja laskentarajaukset.....	15
3.1.1	Laskentarajauksen pääperiaate.....	15
3.1.2	Laitosten kokoluokka .....	15
3.1.3	Puhdistamoliete .....	15
3.1.4	Kemikaalit ja muut syötteet .....	16
3.1.5	Sähkö- ja lämpöenergia .....	16
3.1.6	Muut polttoaineet .....	16
3.1.7	Tuotteiden ja sivutuotteiden hyödyntäminen sekä vältetyt päästöt.....	16
3.1.8	Jätteiden käsittely .....	18
3.1.9	Jätevesien käsittely.....	18
3.1.10	Kuljetukset .....	19
3.1.11	Suorat kasvihuonekaasupäästöt.....	19
3.2	Tekniikkakohtaiset oletukset ja laskentarajaukset.....	20
3.2.1	Mädätys .....	20
3.2.2	Kompostointi .....	22
3.2.3	Terminen kuivaus.....	25
3.2.4	Märkähiilto (HTC).....	26
3.2.5	Torrefiointi .....	27
3.2.6	Pyrolyysi.....	28
3.2.7	Kaasutus .....	29
3.2.8	Erillispoltto.....	30
3.2.9	Yhteispoltto, jätteenpolttolaitos .....	31
3.2.10	Yhteispoltto, sementtiuuni.....	32
4	Tulokset.....	34
4.1	Kompostointi ja mädätys .....	37
4.2	Terminen kuivaus .....	37
4.3	Märkähiilto .....	37
4.4	Torrefiointi ja pyrolyysi.....	37
4.5	Kaasutus, erillispoltto ja yhteispoltto jätteenpolttolaitoksessa .....	38
4.6	Poltto sementtiuunissa .....	38
5	Pohdinta ja suositukset.....	39
5.1	Laskennan lähtökohdat ja tulosten tulkinta.....	39
5.2	Laskentaoletukset ja niiden vaikutus tuloksiin .....	39
6	Yhteenveto .....	41
7	Lähteet.....	43

# 1 JOHDANTO

AFRY (ent. Pöyry) laati keväällä 2019 Vesilaitosyhdistykselle (VVY) selvityksen *Lietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen* (VVY 2019). Selvityshankkeen tavoitteena oli koota tietoja lietteen termisistä käsittelymenetelmistä sekä tarkastella niiden potentiaalia ratkaisuksi, joilla mahdollistetaan turvallinen ja ympäristön kannalta kestävä puhdistamolietteen käsittely. Työn yhtenä osana tehtiin hiilijalanjälkilaskenta selvityksessä käsitellyistä lietteenkäsittelytekniikoista.

Selvityksessä tarkastellut tekniikat ovat terminen kuivaus, märkähiilto (HTC), torrefiointi, pyrolyysi, kaasutus, erillispoltto ja yhteispoltto. Lisäksi hiilijalanjälkilaskennassa määritettiin hiilijalanjäljet mädätykselle sekä kompostoinnille, joita nykyisin käytetään laajasti lietteen käsittelyssä.

Tässä raportissa aiemmin tehdyt hiilijalanjälkilaskennat esitetään erillisenä kokonaisuutena ja aiempaa laajemmin. Hiilijalanjälkilaskennan taustaa ja lähtöoletuksia ja laskentaperusteita avataan tarkemmin, ja lisäksi laskentaperusteet selitetään tekniikkakohtaisesti. Laskennassa tehtyjä rajauksia ja oletuksia tarkastellaan ja arvioidaan niihin liittyviä epävarmuuksia ja lisäselvitystarpeita.

Raportin laatimisen yhteydessä mädätyksen ja kompostoinnin laskentoja tarkennettiin, ja kompostoinnin laskenta muutettiin mädätetyn lietteen kompostointia vastaavaksi. Tästä johtuen tulokset poikkeavat näiden tekniikoiden osalta aiemmassa raportissa (VVY 2019) esitetyistä.

Toivomme, että raportti voisi toimia yhtenä lähtökohtana lietteenkäsittelymenetelmien hiilijalanjäljen vertailussa sekä erityisesti pohjana jatkoselvityksille, joissa tarkastellaan esimerkiksi tietyn tekniikan, prosessikokonaisuuden tai laitospöytähiilijalanjälkeä.



## 2 LASKENNAN TAUSTA

### 2.1 HIILIJALANJÄLKILASKENNAN PERIAATTEET

Hiilijalanjälki on mittari, jolla voidaan määrittää esimerkiksi erilaisten toimintojen ilmasto-vaikutus. Ilmastovaikutus kuvaa syntyneitä kasvihuonekaasuja, jotka voivat aiheutua esimerkiksi kuljetuksista, suorista päästöistä, energiankulutuksesta, käytetyistä raaka-aineista ja syntyneistä jätteistä. Hiilijalanjälki kertoo ilmastovaikutuksen hiilidioksidiekvivalentteina (CO<sub>2</sub>e), jossa eri kasvihuonekaasut (KHK-kaasut) on yhteismittallistettu vertailtavaan muotoon.

Tässä hiilijalanjälkilaskennassa tarkastellaan lietteen käsittelystä aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä (KHK-päästöt) sekä arvioidaan toiminnalla saavutettavia vältettyjä päästöjä. Laskennassa on huomioitu käsittelyprosesseihin liittyvät suorat ja epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt, pois lukien biogeeninen hiilidioksidi. Hiilijalanjäljen laskenta suoritettiin soveltaen hiilijalanjäljen viitekehystä ISO 14067.

Vältetyillä päästöillä tarkoitetaan toiminnasta aiheutuvaa positiivista ilmastovaikutusta eli kasvihuonekaasupäästöjä, joiden aiheutuminen voidaan toiminnan ansiosta välttää jossain muussa toiminnassa. Tällaista toimintaa on esimerkiksi typpilannoitteen valmistuksen välttäminen käyttämällä lietteen termisestä käsittelystä syntyvää lietetuetta lannoitukseen. Tällöin typpilannoitteen valmistuksesta aiheutuviksi arvioidut päästöt lasketaan vältetyiksi päästöiksi. Vältettyjen päästöjen laskennassa huomioitiin tuotteen käytöstä aiheutuvat hyödyt, mutta tuotteen käyttövaiheessa aiheutuvia päästöjä ei huomioitu. Esimerkiksi maanparannusaineena käytettäessä huomioitiin lannoitehyvitykset fosforin ja typen osalta, mutta ei levityslaitteiden polttoaineen kulutusta. Vältetyt päästöt ovat laskennallisia arvioita, joiden toteutuminen käytännössä riippuu useista, yleensä oman toiminnan ulkopuolisista, tekijöistä

Laskennan lähtötiedot perustuvat kirjallisuuslähteisiin, laitetoimittajien antamiin tietoihin sekä asiantuntijoiden arvioihin. Prosessien ilmastovaikutus laskettiin käyttämällä laskentaan soveltuvia päästökertoimia Ecoinvent 3.5 -tietokannasta sekä julkisista lähteistä. Päästökertoimien lähteet on esitetty seuraavassa taulukossa (Taulukko 1)

Laskennan lähtökohtana käytettiin mädätettyä, mekaanisesti kuivattua lietettä (kuiva-ainepitoisuus 30 %, jatkossa merkintä 30 % TS). Jätevedenpuhdistamolla tapahtuva jäteveden käsittely ja lietteen mekaaninen kuivaus rajattiin laskennan ulkopuolelle. Tulokset ilmoitettiin kiloina hiilidioksidiekvivalenttia yhtä käsiteltyä lietetonna (30 % TS) kohden [kgCO<sub>2</sub>e/ t].

Taulukko 1. Laskennassa käytettyjen päästökertoimien lähteet

<b>Kemikaalien ja muiden raaka-aineiden valmistus</b>	<b>Päästökertoimen lähde</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktiivihiili</li> <li>• Rikkihappo</li> <li>• Hanavesi</li> <li>• Natriumhydroksidi</li> <li>• Urea</li> <li>• Kalsiumoksidi</li> <li>• Hiekka</li> <li>• Kalsiumkarbonaatti</li> <li>• Puukuorihake</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> </ul>
<b>Suorat päästöt</b>	<b>Päästökertoimen lähde</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metaani CH<sub>4</sub></li> <li>• Typpioksiduuli N<sub>2</sub>O</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tilastokeskus, laatuseloste. Tilastokeskus (2018).</li> </ul>
<b>Kuljetukset &amp; koneet</b>	<b>Päästökertoimen lähde</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lieteraaka-aineen kuljetus (rekka)</li> <li>• Lietetuotteen kuljetus (rekka)</li> <li>• Kemikaalien ja muiden raaka-aineiden kuljetus (laiva ja rekka)</li> <li>• Jätteiden kuljetus (rekka)</li> <li>• Työkoneet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lipasto -tietokanta. VTT (2019)</li> </ul>
<b>Jätteiden käsittely</b>	<b>Päästökertoimen lähde</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktiivihiili</li> <li>• Tuhka (loppusijoitus)</li> <li>• Savukaasujen käsittelyjäte (vaarallinen jäte)</li> <li>• Jäteveden (rejekti) puhdistus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> <li>• Dahlbo et al. (2011)</li> <li>• Dahlbo et al. (2011)</li> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> </ul>
<b>Ostoenergia</b>	<b>Päästökertoimen lähde</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suomen verkkosähkö</li> <li>• Suomessa CHP-laitoksella tuotettu lämpö</li> <li>• Kevyt polttoöljy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sähkön päästökerroin, Motiva (2019)</li> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> <li>• Manninen et al. (2016)</li> </ul>
<b>Vältetyt päästöt</b>	<b>Päästökertoimen lähde</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lannoitehyvitys, typpi</li> <li>• Lannoitehyvitys fosfori</li> <li>• Kivihiilen korvaaminen</li> <li>• Sähkön korvaaminen</li> <li>• Lämmön tuotannon korvaaminen</li> <li>• Hiekan tuottaminen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manninen et al. (2016)</li> <li>• Manninen et al. (2016)</li> <li>• Manninen et al. (2016)</li> <li>• Sähkön päästökerroin, Motiva (2019)</li> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> <li>• Ecoinvent 3.5. Wernet ym. (2016)</li> </ul>

## 2.2 TARKASTELLUT TEKNIIKAT

Selvityksessä *Lietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen* (VVY 2019) tarkasteltiin seitsemää termiseen eli lämpökäsittelyyn perustuvaa käsittelytekniikkaa. Selvitykseen valittiin tekniikat, joita on toteutettu täydessä mittakaavassa tai jotka ovat lähellä kaupallisen mittakaavan toteutusta. Tarkastellut tekniikat ovat terminen kuivaus, märkähiilto (HTC), torrefointi, pyrolyysi, kaasutus, erillispoltto ja yhteispoltto.

Näiden ohella hiilijalanjäkilaskennassa tarkasteltiin jätevesilietteen mädätystä ja aumakompostointia, jotka toimivat vertailukohtana termisille käsittelymenetelmille.

Selvityksen tekniikat kuvataan seuraavassa lyhyesti. Laajemmat kuvaukset termisistä käsittelytekniikoista on esitetty hankkeen loppuraportissa (VVY 2019).

### **2.2.1 Mädätys**

Laskennassa mädätystekniikaksi oletettiin mesofiilinen märkämädätys, jota yleisesti käytetään jätevedenpuhdistamoilla lietteen mädätystekniikkana. Märkämädätyksen jälkeen liete kuivataan mekaanisesti ennen jatkokäsittelyä. Biokaasu oletettiin hyödynnettävän sähkön ja lämmön tuotannossa. Mädätyksen laskentaa tarkennettiin tämän raportointihankkeen yhteydessä suorien päästöjen ja lämmöntuotannon osalta.

Termisten käsittelymenetelmien lähtömateriaaliksi oletettiin mädätetty ja mekaanisesti kuivattu jätevesiliete.

### **2.2.2 Kompostointi**

Kompostoinnin hiilijalanjälki laskettiin ulkona tapahtuvalle aumakompostoinnille. Aiemmin julkaistussa raportissa (VVY 2019) aumakompostoinnin hiilijalanjälki arvioitiin mädättämättömän lietteen kompostoinnin pohjalta, mutta tämän raportointihankkeen yhteydessä laskentaa päivitettiin vastaamaan mädätetyn, mekaanisesti kuivatun lietteen kompostointia. Lisäksi laskentaa tarkennettiin mm. suorien päästöjen ja kulutuslukujen osalta.

### **2.2.3 Terminen kuivaus**

Lietteen terminen kuivaus on tekniikka, jossa lietteen kosteuspitoisuutta alennetaan lämmön avulla. Termisesti kuivattua lietettä voidaan käyttää sellaisenaan tai rakeistettuna mm. maanparannusaineena. Termistä kuivausta käytetään myös useiden muiden termisten käsittelymenetelmien esikäsittelyä.

Termisen kuivauksen tekniikoita on useita. Niiden lämpötila ja energianlähde sekä tuotteen kuivausaste riippuvat sovelluskohteesta ja tekniikasta. Termisen kuivauksen syötteinä käytetään yleensä mekaanisesti kuivattua lietettä, joka on voitu mädättää ennen kuivausta laitoksesta riippuen. Lisäksi kuivaukseen tarvitaan merkittävä määrä lämpöenergiaa, jonka lähteenä voidaan käyttää kohteesta riippuen esimerkiksi prosessihöyryä, kaukolämpöä tai biokaasun poltosta saatavaa lämpöä.

Termisessä kuivauksessa muodostuu kostea poistokaasua, josta tyypillisesti tiivistetään suurin osa vedestä jätevesijakeeksi. Muodostuva jätevesi sisältää merkittävästi orgaanista ainesta, tyyppiä ja kiintoainesta. Kuivattu poistokaasu tyypillisesti käsitellään hajujen poistamiseksi esimerkiksi happopesurilla tai biosuodattimella riippuen hajua aiheuttavien yhdisteiden koostumuksesta. Kuivattu poistokaasu voidaan myös johtaa polttoyksikköön, mikäli kuivainlaitoksen yhteydessä on jätteenpolttokattila, kuten usein on esimerkiksi lietteenpolttolaitoksen tapauksessa.

### **2.2.4 Märkähiilto (HTC)**

Märkähiilto (Hydrothermal Carbonization, HTC) on prosessi, jossa kosteaa biomassaa käsitellään hapettomissa oloissa korkeassa paineessa ja noin 180 – 250 °C lämpötilassa. Käsittelyn viipymäaika on yleensä muutamia tunteja. Liete syötetään reaktoriin märkänä, kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti noin 8 – 15 %.

Märkähiiltoprosessi vaatii prosessin ulkopuolista energiaa korkean lämpötilan ja paineen tuottamiseksi. Prosessissa voidaan käyttää energianlähteenä erilaisia lämmönlähteitä. Tietyissä prosessikokonaisuuksissa lämpöä tuotetaan märkähapetuksella, jossa hyödynnetään lietteen orgaanista ainesta höyryn tuottamiseksi.

Märkähiillolla käsitelty liete voidaan kuivata mekaanisesti jopa n. 50 – 70 % kuiva-ainepitoisuuteen. Kiintoainefraktio johdetaan jatkokäyttöön, yleensä polttoon. Kuivan hiilifraktion ohella prosessissa syntyy nestefraktio (rejekti) ja kaasufraktio. Rejektiveteen päätyy osa lietteen orgaanisesta aineksesta ja merkittävä osa lietteen tpeestä. Rejektivesi voidaan johtaa mädättämöön, jossa sen sisältämää orgaanista ainetta hyödynnetään biokaasun tuotannossa. Poistokaasu johdetaan käsittelyyn esimerkiksi happo- tai vesipesurilla.

### 2.2.5 Torrefiointi

Torrefiointi on tekniikka, jossa materiaalia käsitellään termisesti hapettomissa oloissa noin 200 – 350 °C lämpötilassa. Prosessissa käsiteltävästä materiaalista poistuu kaikki kosteus ja orgaanisten yhdisteiden koostumus muuttuu termokemiallisten reaktioiden seurauksena.

Prosessissa syntyy hiiltynyt kiinteä tuote sekä kaasuja ja höyryjä, jotka jäähtyessään tiivistyvät öljymäiseksi nesteeksi. Prosessissa voidaan tuottaa energiaa tuotekaasun poltolla. Vaihtoehtoisesti tuotekaasusta voidaan tiivistää öljymäistä polttokelpoista nestettä.

Torrefiointia käytetään tällä hetkellä pääasiassa erilaisten lignoselluloosapitoisten biomassojen käsittelyyn. Puhdistamolietteen käsittelyä torrefioinnilla on tutkittu, mutta sitä ei ole laitostamotakaavassa tiittävästi toteutettu. Torrefioinnin päätuote on kiinteä hiilifraktio, jonka pääasiallinen yleisin käyttötarkoitus on polttoaineena. Myös puhdistamolietteen torrefioinnin tutkimuksessa lähtökohtana on pääosin ollut polttoaineen tuotanto. Kuitenkin torrefioidun lietteen käyttöä maanparannusaineena on tutkittu.

Ennen torrefiointikäsitelyä puhdistamoliete kuivataan termisesti. Termisessä kuivauksessa syntyy sivuvirtoja, kuten edellä termisen kuivauksen kohdalla on esitetty. Lisäksi terminen kuivaus vaatii prosessin ulkopuolelta lämpöenergiaa. Lämpöenergiaa tarvitaan myös itse torrefiointiyksikön lämmittämiseen.

Mikäli tuotekaasu poltetaan, tulee savukaasut käsitellä asianmukaisesti. Tyypillisesti ne käsitellään jätteen polton vaatimusten mukaisesti. Savukaasujen käsittelyssä syntyy kiinteää savukaasujen käsittelyjätettä tai märkäpesutekniikkaa käytettäessä pesurin jätevettä.

### 2.2.6 Pyrolyysi

Pyrolyysillä tarkoitetaan termistä muuntamista hapettomissa olosuhteissa noin 350 – 850 °C lämpötilassa. Puhdistamolietteen käsittelyn yhteydessä pyrolyysillä tarkoitetaan yleensä hidasta pyrolyysiä, jossa viipymäaika on yleensä kymmeniä minutteja ja lämpötila yleisimmin välillä 400 – 700 °C. Hidas pyrolyysi muistuttaa tekniikkana torrefiointia, mutta lämpötila on korkeampi.

Prosessissa käsiteltävä materiaali kuivuu täysin ja muuntuu termokemiallisten reaktioiden seurauksena. Pyrolyysin tuloksena orgaaninen aines jakaantuu kaasu- ja kiinteään fraktioon sekä höyryihin, jotka jäähtyessään tiivistyvät pyrolyysiöljyiksi. Kaasut ja höyryt voidaan johtaa polttoon energian tuottamiseksi tai höyryt voidaan tiivistää nestemäiseksi öljytuotteeksi.

Ennen pyrolyysiä liete tulee kuivata termisesti. Terminen kuivaus vaatii lämpöenergiaa ja siitä aiheutuu sivuvirtoja, kuten edellä termisen kuivauksen kohdalla on kuvattu. Myös pyrolyysiyksikön lämmittäminen vaatii ulkopuolista energiaa.

Prosessissa voidaan tuottaa energiaa pyrolyysikaasujen poltolla. Mikäli tuotekaasu poltetaan, tulee savukaasut käsitellä asianmukaisesti, tyypillisesti jätteen polton vaatimusten mukaisesti. Savukaasujen käsittelyssä syntyy kiinteää savukaasujen käsittelyjätettä tai märkäpesutekniikkaa käytettäessä pesurin jätevettä.

Pyrolyysin tavoitteena on yleensä hyödynnettävän pyrolyysihiilen tuotanto. Lietteestä valmistetun pyrolyysihiilen mahdollisia käyttökohteita ovat mm. käyttö maanparannusaineena tai polttoaineena.

### 2.2.7 Kaasutus

Kaasutus on tekniikka, jossa biomassasta tuotetaan energiapitoista kaasua hapen suhteen rajoitetuissa oloissa. Prosessissa kaasutusreaktoriin syötetään happea noin 30 % stoikiometrisesta polton happimäärästä, jolloin osa biomassasta hapettuu ja tuotetaan kaasutusprosessin ylläpitoon tarvittavaa lämpöä. Lämpötila kaasutuksessa on tyypillisesti noin 800 – 900 °C. Viipymäaika on polton tapaan lyhyt, muutamien sekuntien luokkaa.

Kaasutuksen tuhka muistuttaa koostumukseltaan polttotuhkaa, mutta sen orgaanisen aineen pitoisuus on hieman polttotuhkaa korkeampi. Alihapellisissa olosuhteissa kuitenkin PAH-yhdisteitä voi muodostua ja sitoutua tuhkaan. Tuhkaa voidaan sen laadusta riippuen hyödyntää materiaalina esim. rakentamisessa. Hyötykäyttö lannoitteena vaatisi todennäköisesti fosforin talteenottokäsittelyä.

Ennen kaasutusta puhdistamoliete kuivataan termisesti, jolloin syntyy sivuvirtoja kuten edellä termisen kuivauksen kohdalla on esitetty. Lisäksi terminen kuivaus vaatii prosessin ulkopuolista lämpöenergiaa. Kaasutuksen tuotekaasun polton energiaa voidaan prosessikokonaisuudesta riippuen käyttää termisen kuivauksen lämmönlähteenä.

Kaasutuksen tuotekaasu tulee puhdistaa partikkeleista suodattamalla tai syklonilla ennen polttoa. Lisäksi voidaan vaatia epäpuhtauksien poistoa esimerkiksi keraamisella suodattimella ja märkäpesurilla sekä aktiivihieillä polttotekniikasta riippuen. Näistä käsittelyvaiheista muodostuu jätteitä ja/tai jätevesiä.

Kaasutuksen tuotekaasun polton savukaasut tulee käsitellä asianmukaisesti, tyypillisesti jätteen polton vaatimusten mukaisesti. Savukaasujen käsittelyssä syntyy kiinteää savukaasujen käsittelyjätettä tai märkäpesutekniikkaa käytettäessä pesurin jätevettä.

### 2.2.8 Erillispoltto

Erillispoltossa puhdistamolietettä poltetaan ilman muuta polttoainetta. Erillispoltossa termisesti kuivattu liete poltetaan hapellisissa oloissa, tyypillisesti lämpötilassa n. 850 – 950 °C. Polttoon syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee. Osassa laitoksista liete

kuivataan vain osittain (esim. 35 – 45 % kuiva-ainepitoisuuteen) ennen polttoa ja jäännöskosteus haihdutetaan poltossa. Erillispolttoon on olemassa useita tekniikoita, mutta valtaosa nykyaikaisista erillispolttolaitoksista käyttää leijupetitekniikkaa.

Polton tuottamaa energiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi sähkön ja/tai lämmön tuotannossa. Lietteenpolttolaitoksissa tyypillisesti valtaosa energiasta käytetään lietteen kuivauksen tarpeisiin.

Polttotuhkaa voidaan hyödyntää asfaltin, sementin tai tiilien raaka-aineena tai maarakentamisessa ja periaatteessa myös lannoitteena. Tuhkan lannoitekäyttö sellaisenaan on ollut rajoitettua perustuen mm. tuhkan korkeisiin raskasmetallipitoisuuksiin. Fosforin talteenottotekniikoilla voidaan lietetuhkasta valmistaa fosforituotteita, jotka sopivat lannoitetuotteiksi tai muihin fosforituotteiden käyttökohteisiin.

Erillispolton sivuvirtoina syntyy termisen kuivauksen rejektivettä, hyödyntämiskelvotonta lentotuhkaa sekä savukaasujen käsittelyjätteitä ja/tai -jätevesiä.

### 2.2.9 Yhteispoltto

Yhteispoltolla tarkoitetaan lietteen polttoa muun poltettavan materiaalin, kuten biomasan, hiilen, jätteen tai muiden lietteiden seassa. Tyypillisimmät yhteispolttosovellutukset ovat jätteenpolttolaitokset, hiili- ja ligniittivoimalaitokset, sementtiunit ja erityisesti Suomessa metsäteollisuuden polttolaitokset.

Yhteispolton tuhkat käsitellään polttolaitoksen tyypistä riippuen eri tavoin. Voimalaitosten polttotuhkia voidaan hyödyntää mm. asfaltin raaka-aineena tai maarakentamisessa. Biomassan kanssa yhteispoltetun lietteen lannoitekäyttöä on Suomessa selvitetty, mutta se ei tällä hetkellä ole mahdollista lannoitelainsäädännön puitteissa. Sementtiuneihin syötettynä tuhka muodostuu osaksi sementtiä ja siten hyödynnetään materiaalina. Jätteenpolton tuhkat joudutaan loppusijoittamaan jätteenä.

Liete voidaan syöttää polttoon polttolaitoksen tyypistä riippuen mekaanisesti (TS 25 – 35 % TS) tai termisesti (35 – 50%; 60 – 95 % TS) kuivattuna. Vaadittu lietteen kuiva-ainepitoisuus riippuu polttolaitoksen tyyppin ohella muusta polttoaineesta ja lietteen suhteellisesta osuudesta polttoainevirrassa. Mikäli termistä kuivausta käytetään, muodostuu siinä sivuvirtoja. Lietteen sisältämä jäännöskosteus haihdutetaan poltossa, mihin kuluu polton energiaa.

Savukaasut tulee käsitellä jätteenpolton vaatimusten mukaisesti. Lietteen korkeat typpi, rikki- ja raskasmetallipitoisuudet lisäävät jonkin verran niiden päästöjä ja puhdistustarvetta yhteispoltossa. Savukaasujen käsittelyssä muodostuu jätteitä ja/tai jätevesiä.

Lietteen yhteispoltto voi heikentää polttoprosessin toimintaa. Lieite yleensä heikentää prosessin energiataloutta lietteen korkean kosteuspitoisuuden vuoksi. Lisäksi lietteen poltto voi aiheuttaa mm. korroosiota ja kerrostumien muodostumista kattilan lämpöpinoille.

## 3 LASKENTARAJAUS JA -OLETUKSET

### 3.1 YLEISET OLETUKSET JA LASKENTARAJAUKSET

#### 3.1.1 Laskentarakjauksen pääperiaate

Laskennassa huomioitiin prosessien toiminnasta aiheutuvat suorat sekä epäsuorat (välilliset) päästöt, jotka liittyvät kiinteästi prosesseihin. Sen sijaan laitosten muuhun toimintaa liittyvää hiilijalanjälkeä, kuten rakennusten ja huoltojen hiilijalanjälkeä ei huomioitu. Laskenta ei myöskään huomioi laitosten rakentamisen ja elinkaaren lopun päästöjä, vaan ainoastaan toiminnan aikaiset päästöt.

Suoria päästöjä ovat prosessien typpioksiduuli- ja metaanipäästöt sekä laitoksessa tapahtuva fossiilisten polttoaineiden poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Epäsuoria päästöjä ovat mm. laitoksen kuluttamien kemikaalien tuottamisesta ja ostoenergiankäytöstä aiheutuneet päästöt sekä jätteiden ja jätevesien käsittelyssä aiheutuvat päästöt.

Kunkin käsittelymenetelmän laskentarakjaus on määritetty koskemaan vain kyseistä prosessia, eikä sitä edeltäviä tai seuraavia lietteenkäsittelyketjun vaiheita ole huomioitu laskennassa. Laskennan tulokset eivät siis kuvaa koko lietteenkäsittelyketjun hiilijalanjälkeä, vaan kunkin tarkastellun prosessin hiilijalanjälkeä.

Laskennassa arvioitiin myös vältetyt päästöt, joita voidaan saavuttaa prosessin tuottaman energian ja materiaalien hyötykäytöllä.

#### 3.1.2 Laitosten kokoluokka

Lietteen käsittelylaitokset jaettiin hankkeen aiemmassa raportissa (VVY 2019) kolmeen kokoluokkaan: pieniin (< 5000 t TS/a), keskisuuriin (5000 – 10 000 t TS/a) ja suuriin (> 10 000 t TS/a) laitoksiin. Hiilijalanjäljen laskennassa termisten käsittelymenetelmien osalta erillispoltton kohdalla arvioitiin laitokseen olevan suuri ja muiden termisten käsittelymenetelmien kohdalla keskisuuri. Mädätyksen ja kompostoinnin arviointiin käytettiin suuren kokoluokan laitosten tietoja.

#### 3.1.3 Puhdistamoliete

Mädätyksen syötteenä oletettiin sakeutettu puhdistamoliete, joka mädätyksen jälkeen kuivataan 30 % kuiva-ainepitoisuuteen.

Kompostoinnin ja termisten käsittelymenetelmien syötteenä oletettiin mädätetty ja mekaanisesti kuivattu puhdistamoliete, jonka kuiva-ainepitoisuus (TS) on 30 % ja haihtuvan kuiva-aineen (VS) osuus 55% kuiva-aineesta. Hiilipitoisuudeksi arvioitiin 30 % kuiva-aineesta. Ravinnetoimituksina käytettiin kokonaistypelle 4,0 % kuiva-aineesta ja kokonaisfosforille 3,7 %. Lietteen energiasisältö määritettiin haihtuvan kuiva-aineen energiasisällön perusteella käyttäen arvoa 21,8 GJ/t VS.

Mikäli syötemateriaalina käytettäisiin mädättämätöntä lietettä, olisi prosessien energiatase vahvemmin positiivinen, jolloin energiantuotanto ja siihen liittyvät vältetyt päästöt olisivat suuremmat. Toisaalta mädätyksen hiilijalanjälkilaskennan tuloksista voidaan to-

deta, että mädätys itsessään on hiilijalanjäljen kannalta edullinen vaihtoehto. Koko käsittelyketjun hiilijalanjälkilaskentaa sekä ilman mädätystä että mädätyksen kanssa ei ollut mahdollista toteuttaa tämän hankkeen puitteissa.

Oletettu kuiva-ainepitoisuus on suhteellisen korkea, ja useimmilla suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla lietteen kuiva-ainepitoisuus on hieman tätä matalampi. Tämä valinta tehtiin siitä näkökulmasta, että yleisesti termiset käsittelymenetelmät ovat energiataloudellisempia ja toimivat tehokkaammin kuivemmalle lietteelle. Tämän vuoksi termistä käsittelyä toteuttavat laitokset pyrkivät yleensä myös optimoimaan mekaanista kuivausta lietteen kuiva-ainepitoisuuden nostamiseksi.

#### **3.1.4 Kemikaalit ja muut syötteet**

Laskennassa huomioitiin prosessissa käytettävät kemikaalit ja muut kulutushyödykkeet, kuten vesijohtovesi. Näiden syötteiden tuotanto ja kuljetus käyttöpaikalle vaikuttavat lietteen käsittelyn päästöihin epäsuorasti. Kemikaalien osalta huomioitiin kemikaalien tuotannon hiilijalanjälki sekä niiden kuljetus lietteen käsittelypaikalle. Vesijohtoveden osalta huomioitiin veden tuotannon hiilijalanjälki. Kulutushyödykkeiden päästötiedot laskennassa perustuvat tietokantatietoihin.

Laitosten toimintaan liittyviä vähäisesti käytettäviä kulutushyödykkeitä, kuten voiteluaineita, ei huomioitu laskennassa.

#### **3.1.5 Sähkö- ja lämpöenergia**

Prosessien tarvitseman ostetun sähkön hiilijalanjälki arvioitiin Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökertoimen mukaan (Motiva 2019). Päästökertoimena käytettiin arvoa 154 kg CO<sub>2</sub> / MWh.

Ostetun lämmön hiilijalanjälki sekä prosesseissa tuotettavan lämmön ansiosta vältetyt päästöt arvioitiin Ecoinvent 3.5 tietokantaan pohjautuen maakaasun CHP-poltossa tuotetun lämmön hiilijalanjälkeen perustuen.

Useissa prosesseissa sekä kulutetaan että tuotetaan lämpöä ja/tai sähköä. Näin on mm. torrefioinnissa, pyrolyysissä, kaasutuksessa ja polttoprosesseissa. Hiilijalanjälkilaskennassa prosessin energiankulutus ja -tuotanto esitettiin erikseen. Näin ollen prosessien energiankulutus vaikuttaa laskennan hiilijalanjäljen tuloksiin, ja prosessissa tuotettu energia vältettyjen päästöjen määrään. Kulutetulle ja tuotetulle energialle käytettiin samoja päästökertoimia.

#### **3.1.6 Muut polttoaineet**

Pääosa polttoaineiden kulutuksesta liittyy kuljetuksiin, ja ne laskettiin kuljetusmatkojen perusteella kohdassa 3.1.10 esitetysti. Kompostoinnin tapauksessa arvioitiin aumojen kääntämiseen tarvittavan konetyön hiilijalanjälki Lipasto -tietokannan perusteella (VTT 2019). Erillispolttoprosesseissa huomioitiin käynnistyspolttoaineena käytettävän kevyen polttoöljyn kulutus Mannisen et al. (2016) tietoihin pohjautuen.

#### **3.1.7 Tuotteiden ja sivutuotteiden hyödyntäminen sekä vältetyt päästöt**

Laskennassa huomioitiin vältetyt päästöt, jotka voidaan saavuttaa prosessien tuotteiden hyötykäytön ja prosessissa tuotetun energian hyödyntämisellä. Termisten menetelmien



tuotteilla voidaan korvata muita ravinnelähteitä lannoitekäytössä, neitseellisiä materiaaleja mm. rakentamisessa sekä muulla tavalla tuotettua lämpö –tai sähköenergiaa tai fossiilista polttoainetta.

Vältettyjen päästöjen laskennassa huomioitiin tuotteen käytöstä aiheutuvat hyödyt, mutta tuotteen käyttövaiheessa aiheutuvia päästöjä ei huomioitu. Esimerkiksi maanparannusaineena käytettäessä huomioitiin lannoitehyvitykset fosforin ja typen osalta, mutta ei levityslaitteiden polttoaineen kulutusta.

Tuotteen polttoainekäytön tapauksessa (märkähiilto, torrefiointi, pyrolyysi) vältetyissä päästöissä taas huomioitiin tuotteen poltosta saatava lämpö suoraan tuotteen energiasisällön perusteella, mutta ei polttoprosessissa aiheutuvia päästöjä. Tämä valinta tehtiin, jotta voitiin rajata tarkastelu koskemaan vain yhtä termistä prosessia, ei useita termisiä menetelmiä sisältävää prosessiketjua. Varsinaiseen termiseen käsittelyprosessiin liittyvät päästöt, esimerkiksi pyrolyysin tapauksessa prosessissa muodostuvien kaasumaisien aineiden polton päästöt, kuitenkin huomioitiin osana prosessin päästöjä. Energiahöydyntämisen koko prosessiketjun tarkastelemiseksi tulisi tarkastella myös termisen käsittelyn tuotteen polton päästöjä.

Kompostoinnin ja mädätyksen tuotteet oletettiin johdettavan lannoitekäyttöön ja lannoitteiden valmistuksesta aiheutuvat päästöt huomioitiin vältettyjen päästöjen laskennassa typpi- ja fosforiravinnemäärien pohjalta, Manninen et al. (2016) epäorgaanisille lannoitteille esittämien päästökertoimien mukaisesti. Mädätyksen biokaasun CHP-poltossa tuotettu lämpö ja sähkö huomioitiin myös vältetyissä päästöissä.

Torrefioinnille ja pyrolyysille huomioitiin kaksi erillistä tapausta, joissa prosessin tuotteena syntynyt hiili johdetaan joko maanparannusainekäyttöön (vältetty päästö ravinteiden kierrätyksestä) tai polttoon (vältetty päästö tuotetusta lämpöenergiasta).

Kaasutuksessa, erillispoltossa ja yhteispoltossa polttoprosessi on itsessään osa tarkasteltavaa prosessia ja näissä polton hiilijalanjälki huomioitiin laskennassa. Polttotuhka oletettiin hyödynnettävän maarakentamisessa kaasutuksen ja erillispolton tapauksessa. Yhteispoltossa jätteenpolttolaitoksessa ei synny hyödynnettävää tuhkaajetta, vaan tuhka joudutaan loppusijoittamaan.

Sementtiuunissa polton tapauksessa vältetyt päästöt laskettiin olettaen, että lietteen energialla voidaan korvata fossiilista kivihiiltä, jota tyypillisesti käytetään sementin valmistuksessa polttoaineena öljykoksin ohella. Sementtiuunissa poltettaessa palamaton aines jää sementtiin, mutta tälle materiaalihöydyntämiselle ei huomioitu vältettyjä päästöjä.

Laskennassa huomioidut vältetyt päästöt on esitetty koostettuna seuraavassa taulukossa tekniikkakohtaisesti.

Taulukko 2. Laskennassa huomioidut vältetyt päästöt

Käsittelymenetelmä	Vältetyn päästön lähde
<b>Mädätys</b>	Lämpö- ja sähköenergia (biokaasu), ravinteet
<b>Kompostointi</b>	Ravinteet
<b>Terminen kuivaus</b>	Ravinteet
<b>Märkähiilto (HTC)</b>	Lämpöenergia (hiilen poltto)

<b>Torrefiointi</b>	A. Ravinteet, lämpöenergia (kaasun poltto)
	B. Lämpöenergia (hiilen poltto, kaasun poltto)
<b>Pyrolyysi</b>	A. Ravinteet, lämpöenergia (kaasun poltto)
	B. Lämpöenergia (hiilen poltto, kaasun poltto)
<b>Kaasutus</b>	Lämpöenergia, tuhka rakentamiseen
<b>Erillispoltto</b>	Lämpö- ja sähköenergia, tuhka rakentamiseen
<b>Yhteispoltto, jätteenpolttolaitos</b>	Lämpö- ja sähköenergia
<b>Yhteispoltto, sementtiuuni</b>	Lietteen energia korvaa kivihiltä

### 3.1.8 Jätteiden käsittely

Prosesseissa syntyvät hyödyntämiskelvottomat jätteet oletettiin johdettavan asianmukaiseen käsittelyyn. Jätteiden käsittelyn hiilijalanjälki huomioitiin laskennassa. Prosessin ulkopuolella laitosten toiminnassa syntyviä jätteitä, kuten huoltojen yhteydessä syntyviä jätteitä, ei huomioitu laskennassa.

Jätteenpolttolaitoksessa polton tuhka oletettiin johdettavan tavanomaisen jätteen loppusijoitukseen. Muiden polttotekniikoiden kohdalla lentotuhka oletettiin johdettavan tavanomaisen jätteen loppusijoitukseen

Savukaasujen käsittelyjätteet oletettiin johdettavan vaarallisen jätteen käsittelyyn. Käytetty aktiivihilli oletettiin johdettavan regeneroitavaksi.

Muut tuotteet ja sivutuotteet oletettiin johdettavan hyödynnettäväksi.

### 3.1.9 Jätevesien käsittely

Kompostoinnissa ja mädätyksessä ei huomioitu muodostuvia rejektivesivirtoja, jotta tulokset olisivat paremmin verrattavissa termisiin käsittelymenetelmiin. Termisten käsittelymenetelmien syöte on mädätetty ja mekaanisesti kuivattu jätevesiliete, eikä syötteen valmistusprosessin (jätevedenpuhdistamoprosessi, mädätys ja lietteen mekaaninen kuivaus) hiilijalanjälkeä ole huomioitu laskennoissa. Kompostointi- ja mädätystekniikoiden tulosten suoraa vertailtavuutta rejektivesien huomiotta jättäminen heikentää, sillä mädätyksessä vapautuvan typen aiheuttama lisäkuormitus jää huomioimatta.

Mikäli haluttaisiin selvittää koko prosessiketjun hiilijalanjälki, tulisi huomioida myös termistä käsittelyä edeltävän lietteen käsittelyn hiilijalanjälki. Tässä hankkeessa erilaisia käsittelyketjuja ei tarkasteltu, vaan tavoitteena oli tehdä tarkastelu, jonka perusteella yksittäisiä tekniikoita voidaan verrata toisiinsa perustuen mahdollisimman samanlaisiin oletuksiin.

Termisten käsittelymenetelmien rejekti- ja muut jätevesivirrat huomioitiin tilavuusperusteisesti Ecoinvent 3.5 -tietokantaan pohjautuen käyttäen tyypillisen kunnallisen jäteveden hiilijalanjälkeä. Laskennassa huomioitavia jätevesiä muodostuu

mm. savukaasujen käsittelyssä ja kompostoinnissa valumavesinä. Tarkemmassa tarkastelussa olisi syytä huomioida myös jätevesien aiheuttama kuorma puhdistamolle etenkin typen ja orgaanisen aineen osalta. Typen käsittely jätevedenpuhdistamalla aiheuttaa merkittäviä päästöjä jätevedenpuhdistuksessa mm. typpioksiduulin muodostumisen vuoksi, joten jätevesien koostumus voi vaikuttaa niiden hiilijalanjälkeen merkittävästi. Rejektivedet ovat tyypillisesti varsin voimakkaita jätevesiä, ja tavanomaisen kunnallisen jäteveden arvoihin pohjautuva laskenta todennäköisesti jossain määrin aliarvioi rejektivesivirtojen hiilijalanjälkivaikutusta.

### 3.1.10 Kuljetukset

Lietteen kuljetusmatkaksi määritettiin paikkatietodatan ja oletettujen laitosten sijaintien perusteella keskisuuren kokoluokan laitoksiin 46 km ja suuren kokoluokan laitoksiin 109 km. Lietteen kuljetukset oletettiin tehtävän maansiirtoautolla ilman perävaunua. Mädätyksen oletettiin tapahtuvan puhdistamalla, joten lietteen kuljetusmatkaksi määritettiin 0 km.

Termisesti käsiteltyjen lietetuotteiden kuljetusmatkoiksi arvioitiin 150 km. Mädätyksen ja kompostoinnin tuotteiden kuljetusmatkaksi oletettiin 50 km. Lietetuotteiden kuljetukset oletettiin tehtävän maansiirtoautolla ilman perävaunua.

Kemikaalien kuljetusmatkoina käytettiin Suomessa tuotettaville kemikaaleille 175 km kuljetusmatka rekalla ja ulkomailta tuotaville kemikaaleille 225 km laivamatka sekä yhteensä 275 km kuljetusmatka rekalle. Kemikaalien kuljetukset oletettiin tehtävän täysperävaunuyhdistelmällä ja laivamatka konttialuksella (2 000 TEU).

Kiinteiden jätteiden kuljetusmatkaksi oletettiin 100 km ja ajoneuvoksi kokonaismassaltaan 15 t kuorma-auto.

Päästökertoimina kaikille ajoneuvoille käytettiin Lipasto-palvelun tietoja (VTT 2019).

### 3.1.11 Suorat kasvihuonekaasupäästöt

Laskennassa huomioitiin suorat kasvihuonekaasupäästöt metaanin ja typpioksiduulin osalta. Hiilidioksidiekvivalenteiksi muunnoksessa käytettiin metaanille kerrointa 25,0 kg CO<sub>2</sub>e / kg CH<sub>4</sub> ja typpioksiduulille kerrointa 298,0 kg CO<sub>2</sub>e / kg N<sub>2</sub>O (Tilastokeskus, 2018).

Mädätysprosessissa aiheutuvat metaanivuodot sekä biokaasun polton suorat typpioksiduuli- ja metaanipäästöt arvioitiin kirjallisuustietojen pohjalta (Taulukko 3). Kompostoinnin suorat typpioksiduuli- ja metaanipäästöt arvioitiin kirjallisuustietojen pohjalta (Taulukko 4).

Termisen kuivauksen suorat päästöt arvioitiin Myllymaan et al. (2008) esittämien tietojen pohjalta. Terminen kuivaus edeltää myös torrefiointia, pyrolyysiä ja kaasutusta, joten myös näissä tekniikoissa huomioitiin termisen kuivauksen suorat kasvihuonekaasupäästöt.

Märkähiillon suorat päästöt arvioitiin laitetoimittajan antaminen tietojen (C-Green 2019) pohjalta. Typpioksiduulipäästöt arvioitiin koetulosten pohjalta hyvin pieniksi ja ne jätettiin siksi huomiotta.

Torrefioinnin, pyrolyysin ja kaasutuksen tuotekaasujen polton päästöt arvioitiin Myllymaan et al. (2008) kaatopaikkakaasun poltolle esittämien arvojen mukaan. Päästöt arvioitiin skaalaamalla päästöjen määrä tuotekaasuun sitoutuvan energian suhteessa. Torrefioinnissa tuotekaasuun oletettiin sitoutuvan 35 % lietteen energiasisällöstä, pyrolyysissä 50 % ja kaasutuksessa 87 %.

Lietteen yhteis- ja erillispoltton suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) lietteen poltolle esittämien tietojen pohjalta.

Suorien päästöjen arviot on suuntaa antavia, ja olisi suositeltavaa tarkentaa laskentaa käyttäen kunkin tekniikan tai laitospohjan todennettuja suoria päästöjä.

## 3.2 TEKNIKKAKOHTAISET OLETUKSET JA LASKENTARAJAUKSET

### 3.2.1 Mädätys

Mädätyksen oletettiin tapahtuvan puhdistamolla mesofiilisenä märkämädätyksenä, jonka syötteenä on sakeutettu liete. Laskennassa oletettiin, että lietettä ei tarvitse kuljettaa mädätykseen. Mädäte kuivataan mekaanisesti mädätyksen jälkeen, mutta mekaanisen kuivauksen tai rejektiveden hiilijalanjälkeä ei huomioitu tulosten vertailtavuuden vuoksi.

Prosessissa tarvitaan prosessin ulkopuolista lämpöä lietteen lämmittämiseen sekä sähköä laitoksen laitteiden käyttöön. Biokaasu oletettiin johdettavan polttoon sähkön ja lämmön tuottamiseksi. Tuotetulle sähkölle ja lämmölle laskettiin vältetyt päästöt.

Mädäte oletettiin käytettävän suoraan lannoitteena ja ravinteiden kierrätys huomioitiin vältettyinä päästöinä. Mädätteen kuljetusmatkaksi oletettiin 50 km.

Tämän raportin laatimisen yhteydessä mädätysprosessin laskentaan tehtiin seuraavat päivitykset:

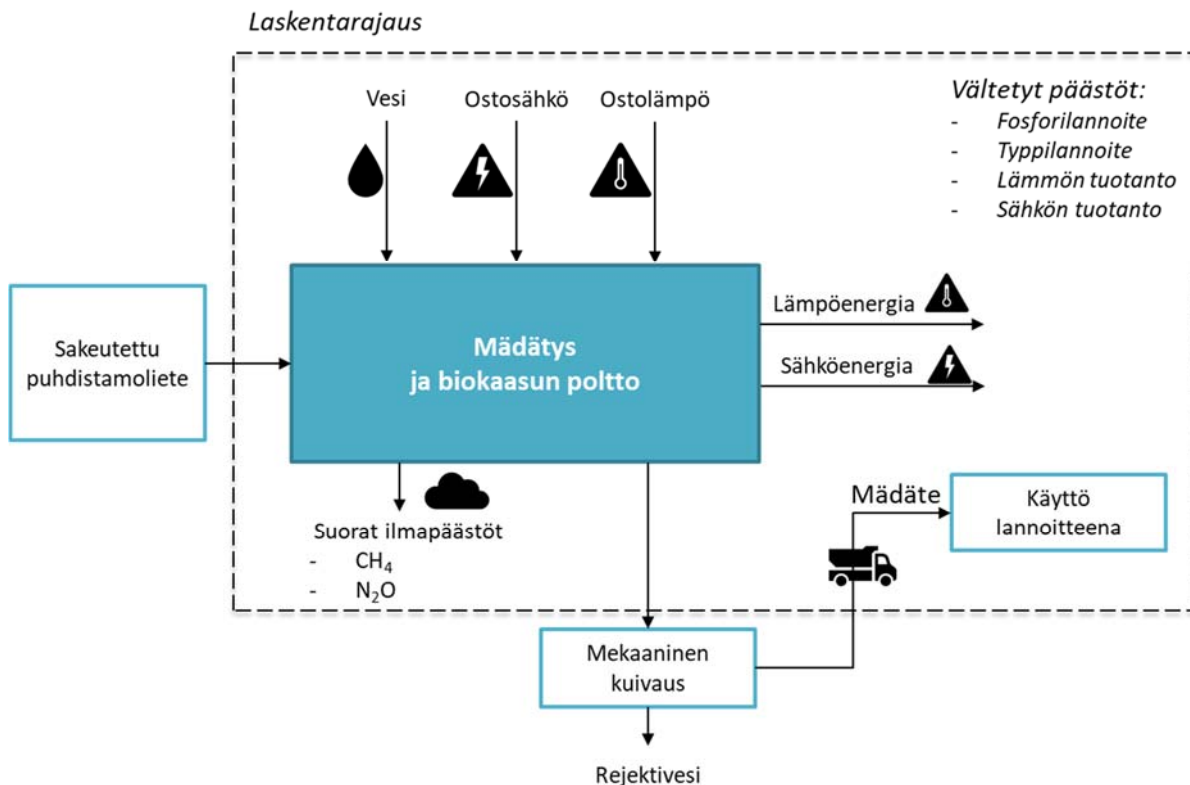
- Suorat päästöt mädätysprosessista karkaavan metaanin sekä polton metaani- ja typpioksiduulipäästöjen osalta huomioidaan laskennassa
- Tuotettavan lämmön määrä päivitettiin sisältämään myös puhdistamon hyödynämä lämpö

Seuraavassa taulukossa on esitetty kirjallisuusarvoja mädätyksen suorista päästöistä sekä laskentaan valitut arvot. Laskennassa käytettäviksi metaanin suoriksi päästöiksi valittiin 1,0 % tuotetusta metaanista mädätyksessä ja poltossa 1,0 % poltetusta metaanista. Biokaasun poltossa muodostuvat typpioksiduulipäästöt arvioitiin IPCC (2006a) mukaisesti metaanin energiasisällön pohjalta lukuarvon 0,1 kg N<sub>2</sub>O/TJ mukaisesti. Metaanin tiheydenä laskennassa käytettiin 0,7172 kg/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ja energiatheydenä 54,6 MJ/Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> (Tilastokeskus 2020).

Taulukko 3 Mädätyksen suorien päästöjen arvoja

MÄDÄTYKSEN SUORAT PÄÄSTÖT		
Mädätyksestä karkaava metaani		
Metaani		Lähde
0,4% tuotetusta metaanista		Tauber et al. (2019)

0,15% tuotetusta metaanista		Tumlin et al. (2014), pohjautuen Gunnarsson et al. (2005)
2,5 % tuotetusta metaanista (kaasuntuotanto 0,7 %; mädätteen jatkokäsittelyn osuus 1,8 %)		Avfall Sverige (2016)
1,0% tuotetusta metaanista		ISCC (2017)
0 - 1,6 % tuotetusta metaanista (vain kaasuntuotanto) 0,1 - 8,6 % tuotetusta metaanista (koko prosessi ml. kaasun jalostus)		RISE (2021), Vapaaehtoiset mittaukset ruotsalaisilla bio-kaasulaitoksilla
Itävalta 0,7 – 14 % Sveitsi 1,3 – 5,6 % Saksa 0,06 – 27 % Ruotsi 3,6 – 9,1 % tuotetusta metaanista		RISE (2021), EvEmBi alustavat tulokset maakohtaisesti koko prosessille
Vastaanotto ja esikäsittely 0,1 – 5,3 % Mädätys ja mädätteen varastointi 0 – 2,4 % tuotetusta metaanista		EvEmBi (2021) alustavat tulokset prosessivaihekohtaisesti
<b>1,0% tuotetusta metaanista</b>		<b>Laskentaan valittu arvo</b>
<b>Biokaasun poltto (raakabiokaasun CHP-poltto)</b>		
<b>Metaani</b>	<b>Typpioksiduuli</b>	<b>Lähde</b>
0,3 % poltetusta metaanista	0,004 - 1,7 g N <sub>2</sub> O /kg CH <sub>4</sub> ,poltettu	Brown et al. (2010)
3,4 % poltetusta metaanista	1,56 g N <sub>2</sub> O /kg CH <sub>4</sub> ,poltettu	Foley et al. (2010) Tumlin et al. (2014) mukaan
2,3 % poltetusta metaanista	0	Fruergaard & Astrup (2011) Tumlin et al. (2014) mukaan
1,0 % poltetusta metaanista		Schaum et al. (2015)
1 kg CH <sub>4</sub> / TJ	0,1 kg N <sub>2</sub> O/TJ (≈ 0,005 g N <sub>2</sub> O /kg CH <sub>4</sub> ,poltettu)	IPCC (2006a)
0,8 – 2,8 %; mediaani 1,6 % poltetusta metaanista		EvEmBi (2021) biokaasun CHP-poltto
<b>0,01 kg CH<sub>4</sub> / kg CH<sub>4</sub>,poltettu (1,0 % poltetusta metaanista)</b>	<b>0,1 kg N<sub>2</sub>O/TJ (≈ 0,005 g N<sub>2</sub>O /kg CH<sub>4</sub>,poltettu)</b>	<b>Laskentaan valitut arvot</b>



Kuva 1 Laskentarajaus: Mädätys. Mädätyksen laskentarajauksessa mekaaninen kuivaus tapahtuu vasta mädätyskäsittelyn jälkeen, kun se muissa tekniikoissa tehdään jo ennen tarkasteltavaa prosessia. Tulosten vertailtavuuden vuoksi mekaaninen kuivaus ja siitä aiheutuva rejektivesivirta on rajattu laskennan ulkopuolelle.

### 3.2.2 Kompostointi

Aiemmin julkaistussa raportissa (VVY 2019) aumakompostoinnin hiilijalanjälki arvioitiin mädättämättömän lietteen kompostoinnin pohjalta, mutta tämän raportointihankkeen yhteydessä laskenta päivitettiin vastaamaan mädätetyn lietteen kompostointia. Päivityksen yhteydessä tehtiin seuraavat muutokset:

- Lietteen määrä ja koostumus arvioitiin mädätetyn lietteen ominaisuuksien mukaisesti
- Ravinnemäärät kompostissa arvoitiin mädätetyn lietteen tietojen pohjalta, huomioiden valumavesien ja haihtumisen aiheuttamat ravinnehäviöt kompostoinnissa. Fosforin häviöiksi kompostoinnissa oletettiin 10 % ja typen häviöiksi 20 % Mönkäreen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) esittämien tietojen pohjalta.
- Suorien päästöjen arvoja tarkennettiin laajemman kirjallisuusotannan pohjalta
- Lämmön ja käyttöveden kulutus poistettiin laskennasta; oletus on, että aumakompostoinnissa ei käytetä kastelua tai lämmitystä
- Sade-/valumavesien aiheuttama jätevesi huomioidaan virtaamaperusteisesti

Kompostointiprosessissa käytetään syötteenä mekaanisesti kuivattua, mädätettyä puhdistamolietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus on 30 %. Lietteen kuljetusmatkaksi kompostointiin oletettiin 46 km. Tukiaineena käytetään ainoastaan haketta (turvetta ei käytetä) tilavuussuhteessa 1:1 syötteeseen nähden. Laskennassa huomioitiin kompostin seulonta ja hakkeen kierrätys (kierrätetyn osuus 50 %), mikä vähentää hakkeen kulutusta.

Hakkeen kuljetusmatkaksi oletettiin 50 km. Materiaalien siirtelyyn käytetään pyöräkuormaajia ja aumojen kääntämiseen kääntökoneita. Näiden työkoneiden käyttö on huomioitu laskennassa.

Turpeen käyttö lisäisi kompostoinnin hiilijalanjälkeä. Turpeen hiilijalanjälkivaikutuksen arviointiin on käytetty hyvin erilaisia kertoimia. Lauronen (2017) ja Manninen & Laitinen (2016) käyttävät Ecolnvent -tietokantaan pohjautuvaa arvoa 10,4 kg CO<sub>2e</sub>/t turvetta. Tumlin et al. (2014) esittävät kirjallisuusarvoja väliltä 330 – 1197 kg CO<sub>2e</sub>/t turvetta (Blodrin et al. 2009; Hagberg & Holmgren 2008), ja SVU:n laskurissa käytettäväksi on valittu 400 kg CO<sub>2e</sub>/t turvetta. Mölsä (2019) esittämässä elinkaarilaskennassa turveton hiilijalanjälki on noin 156 kg CO<sub>2e</sub>/t turvetta. Esimerkiksi turpeen kulutuksella 0,24 t / t (Mölsä 2019) lietettä ja hiilijalanjälkiarvolla 200 kg CO<sub>2e</sub>/t turvetta turpeen käytön hiilijalanjälki olisi noin 48 kg CO<sub>2e</sub>/t lietettä.

Kompostin käyttökohteeksi oletettiin suora lannoitekäyttö. Kompostin kuljetusmatkaksi hyödyntämiskohteeseen oletettiin 50 km. Kompostin sisältämä fosfori ja typpi huomioitiin vältettyjen päästöjen laskennassa.

Laskennassa ei huomioitu lietteen mekaanista kuivausta eikä siinä aiheutuvaa rejektiveivirtaa. Kompostoinnin valumavesien aiheuttama jätevesi kuitenkin huomioitiin virtaamaperusteisesti. Valumaveden määrä arvioitiin 700 mm vuotuisen sadannan perusteella käyttäen valumakertoimena 0,6.

Kompostointiprosessissa aiheutuu suoria metaani- ja typpioksiduulipäästöjä. Seuraavassa taulukossa on esitetty kirjallisuustietoja kompostoinnin suorista päästöistä sekä laskentaan valitut arvot.

Taulukko 4 Kompostoinnin suorien päästöjen arvoja

KOMPOSTOINNIN SUORAT PÄÄSTÖT		
Metaani	Typpioksiduuli	Lähde
10 kg CH <sub>4</sub> /t TS (0,08 – 20 kg CH <sub>4</sub> / t TS )	0,6 kg N <sub>2</sub> O /t TS (0,2 – 1,6 kg N <sub>2</sub> O/t DS)	IPCC (2006b)
0,01 kg CH <sub>4</sub> /t TS	0,007 kg N <sub>2</sub> O /t TS	Foley et al. (2008) Tumlin et al. (2014) mukaan
2,5% C <sub>tot</sub> -> CH <sub>4</sub> -C	1,5 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N	CCME (2009) pohjautuen Brown et al. (2008)
0,75% C <sub>tot</sub> -> CH <sub>4</sub> -C	0,6 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N; lisäksi 0,0157 kg N <sub>2</sub> O/kg NH <sub>3</sub> (haihtuva NH <sub>3</sub> 66% typpihäviöstä = 19,8% N <sub>tot</sub> )	Tumlin et al. (2014), pohjautuen Kirkeby et al. (2005) ja Vogt et al. (2002)
0,75% C <sub>tot</sub> -> CH <sub>4</sub> -C	0,6 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N (2% typpihäviöstä [30 % N <sub>tot</sub> ])	Kirkeby et al. (2005)
	0,1 - 0,7 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N	Blodrin et al (2009) Tumlin et al. (2014) mukaan
	0 - 1,5 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N	Hüther et al (1997) Tumlin et al. (2014) mukaan
	4,7 kg N <sub>2</sub> O-N / t TS (vastaa noin 14,2 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N)	Mölsä (2019)

1,95 % C <sub>tot</sub> -> CH <sub>4</sub> -C (3% hajoavasta hiilestä [65 % C <sub>tot</sub> ])	0,3 - 2,5 % N <sub>tot</sub> -> N <sub>2</sub> O-N	Myllymaa (2008)
<b>1,5% C<sub>tot</sub> -&gt; CH<sub>4</sub>-C</b>	<b>1,0 % N<sub>tot</sub> -&gt; N<sub>2</sub>O-N</b>	<b>Laskentaan valitut arvot</b>

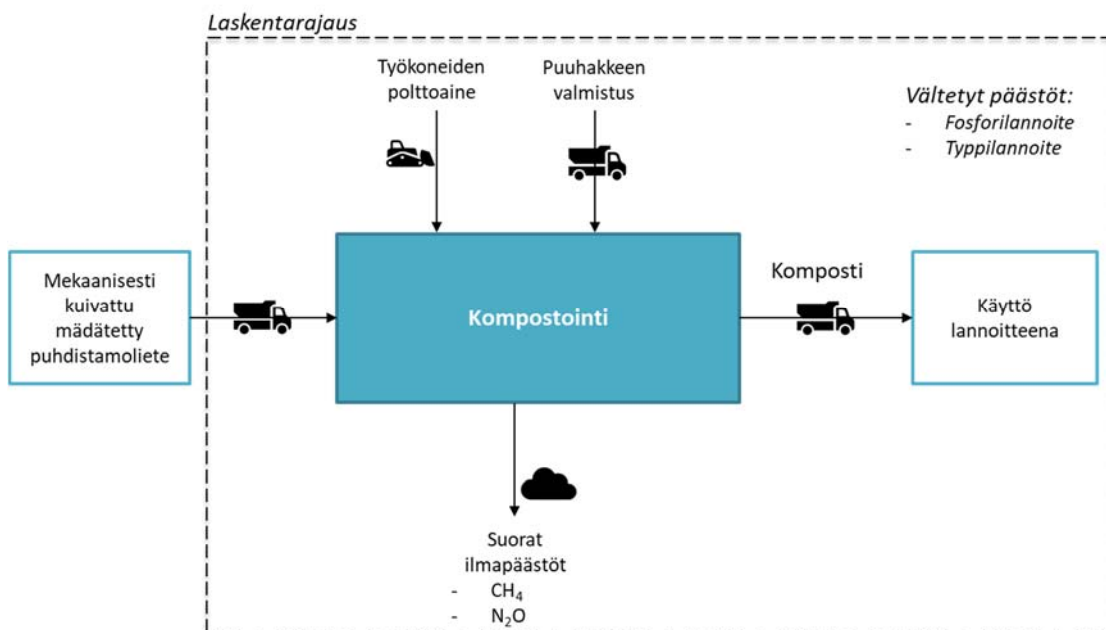
Myllymaa et al. (2008) esittävät metaanipäästöksi 3 % vapautuvasta hiilestä ja vapautuvan hiilen määräksi 65 % kokonaishiilestä, eli lietteen hiilestä 1,95 % muuttuu metaanin hiileksi (CH<sub>4</sub>-C). Tyyppästä muuntuu Myllymaan et al. (2008) mukaan typpioksiduulitypeksi (N<sub>2</sub>O-N) 0,3 – 2,5 % tulevasta tyyppästä. Tiedot on esitetty ilmeisimmin laitospöytäseläälle kompostoinnille. Muun muassa Manninen & Laitinen (2016) hyödyntävät Myllymaan et al. (2008) esittämiä lukuja aumakompostoinnin päästöjen arvioinnissa.

Kirkeby et al. (2005) esittää kompostoinnissa vapautuviksi metaanipäästöiksi (CH<sub>4</sub>-C) 0,75 % lietteen hiilestä. Typpioksiduulipäästöksi (N<sub>2</sub>O-N) arvioidaan 2 % haihtuvasta tyyppästä sekä haihtuvan tyypin osuudeksi 30 % lietteen tyyppästä. Typpioksiduuliin sitoutuneen tyypin määrä on siis laskennallisesti 0,6 % lietteen tyyppästä. Kirkeby perustaa luvut mittauksiin kompostointilaitoksilla ja kirjallisuuteen (Wogt et al. 2002). Kirkebyn esittämiä arvoja käytetään mm. Svenskt Vatten:n kehittämässä hiilijalanjälkilaskurissa (Tumlin et al. 2014).

Edellä esitetyt kirjallisuusarvot perustuvat laitospöytäseläälle kompostointiin ja ne voivat poiketa merkittävästi aumakompostoinnin päästöistä. Suorien päästöjen määrään vaikuttaa merkittävästi kompostin olosuhteet, kuten aerobisten olosuhteiden kattavuus, hiilen ja tyypin suhde sekä kosteuspitoisuus (Brown et al. 2008; Kirkeby et al. 2005). Aumakompostoinnin päästöjä on tutkittu ja mitattu suhteellisen vähän, ja niiden tarkempi tutkiminen olisi olennaista kompostoinnin todellisten kokonaispäästöjen luotettavaa arviointia varten.

Myös merkittävästi edellä esitettyjä korkeampia päästölukuja on esitetty kirjallisuudessa. Mölsä (2019) esittää typpioksiduulipäästöiksi mädätetyn lietteen aumakompostoinnissa hiilijalanjälkivaikutuksen, joka vastaa typpioksiduulipäästöä 4,7 kg N<sub>2</sub>O-N / t TS ja noin 14,2 % konversiota lietteen tyyppästä typpioksiduuliksi. Laskenta perustuu mittauksiin Metsäpirtin kompostointikentällä vuonna 2011 (HSY 2021).





Kuva 2 Laskentarajaus: kompostointi

### 3.2.3 Terminen kuivaus

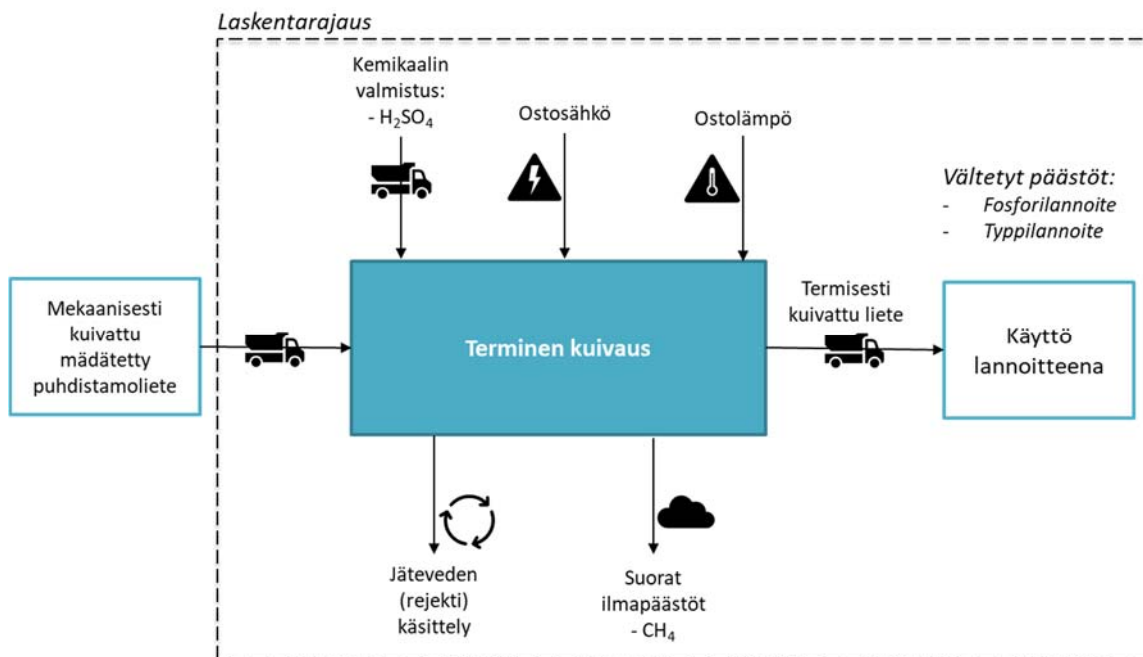
Termisen kuivauksen, kuten muidenkin termisten käsittelymenetelmien, syötteenä käytettiin mädätettyä ja mekaanisesti kuivattua puhdistamolietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus on 30 %. Kuivauksen tuotteen kuiva-ainepitoisuudeksi on oletettu 90 %. Terminen kuivaus oletettiin olevan laituskooltaan keskisuuri (5000 – 10 000 t TS/a) ja kuljetusmatkan käsittelyyn olevan 46 km.

Prosessissa tarvitaan lämpöenergiaa kuivaukseen ja sähköä laitoksen laitteiden käyttöön. Sähkön ja lämmön lähteinä käytettiin, kuten muillekin tekniikoille, keskimääräistä suomalaista verkkosähköä ja maakaasun CHP-polttoa kappaleessa 3.1.5 esitetysti.

Poistokaasut oletettiin käsiteltävän happopesurilla, jossa käytetään rikkihappoa ammoniakkin poistamiseksi poistokaasusta. Poistokaasujen lauhdutuksessa muodostuu rejektivesivirta, jonka käsittelyn päästöt huomioitiin tilavuusperusteisesti.

Suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt termisessä kuivauksessa arvioitiin Myllymaan et al. (2008) esittämien tietojen pohjalta.

Termisen kuivauksen tuotteeksi oletettiin 90 % kuiva-ainepitoisuuteen kuivattu tuote ja sen hyödyntämiskohteeksi oletettiin lannoitekäyttö. Tuotteen kuljetusmatkaksi oletettiin 150 km.



Kuva 3. Laskentaraajaus: Terminen kuivaus

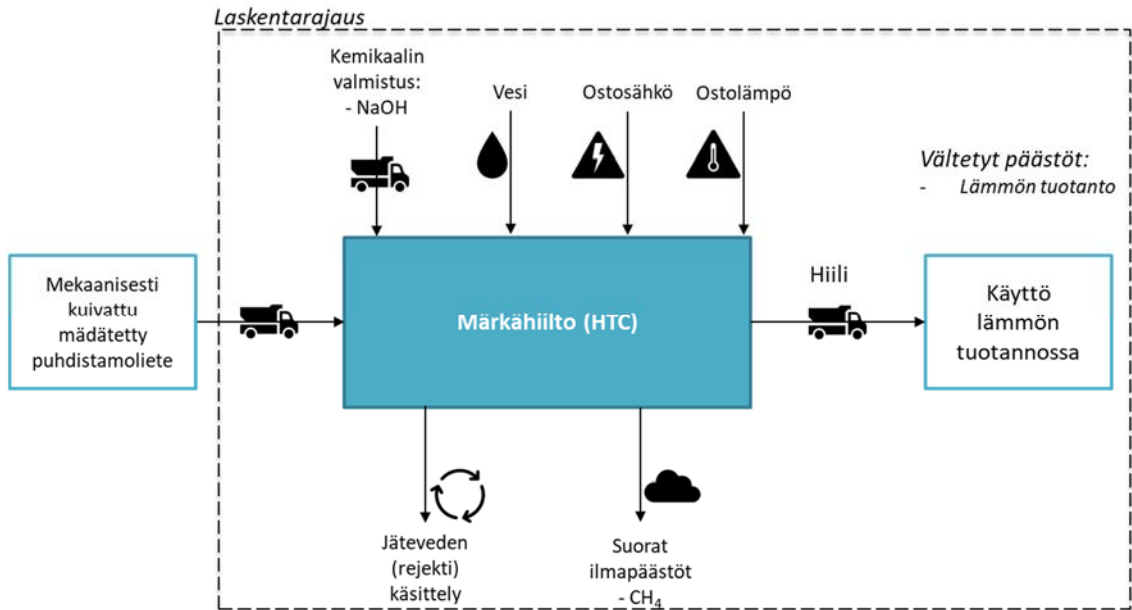
### 3.2.4 Märkähiilto (HTC)

Märkähiillon syötteenä käytetään mädätettyä ja mekaanisesti kuivattua puhdistamolietettä, joka kuitenkin laimennetaan prosessia varten 10 % kiintoainepitoisuuteen. Prosessin olosuhteiden ylläpitämiseksi prosessissa kulutetaan prosessin ulkopuolista sähköä ja lämpöä. Prosessissa käytetään lipeää poistokaasujen käsittelyyn.

Prosessissa muodostuu rejektivesivirta, jonka käsittelyn päästöt huomioitiin tilavuusperusteisesti. On syytä huomata, että rejektiveden päätyttyä merkittävä määrä typpeä, minkä vuoksi rejektiveden todellinen vaikutus hiilijalanjälkeen voi olla merkittävästi arvioitua suurempi.

Märkähiillon hiilituotteelle laskettiin vältetyt päästöt tuotetun lämpöenergian perusteella. Laskennassa oletettiin 80 % lietteen energiasta sitoutuvan hiileen ja polton lämmöntuotannon hyötysuhteeksi 83 %. Tämän polttoprosessin hiilijalanjälkeä ei huomioitu laskennoissa.

Märkähiillon suorat päästöt arvioitiin laitetoimittajan antamien tietojen (C-Green 2019) pohjalta. Typpioksiduulipäästöt arvioitiin koetulosten pohjalta hyvin pieniksi ja ne jätettiin huomiotta.



Kuva 4. Laskentaraja: Märkähiilto (HTC)

### 3.2.5 Torrefiointi

Torrefiointia edeltää oletetussa prosessikokonaisuudessa termisen kuivaus, jossa mekaanisesti kuivattu liete kuivataan 90 % kuiva-ainepitoisuuteen. Termisen kuivauksen päästöt laskettiin, kuten edellä on esitetty termiselle kuivaukselle (3.2.3). Termisessä kuivauksessa muodostuu jätevesi, jonka vaikutus huomioitiin tilavuusperusteisesti.

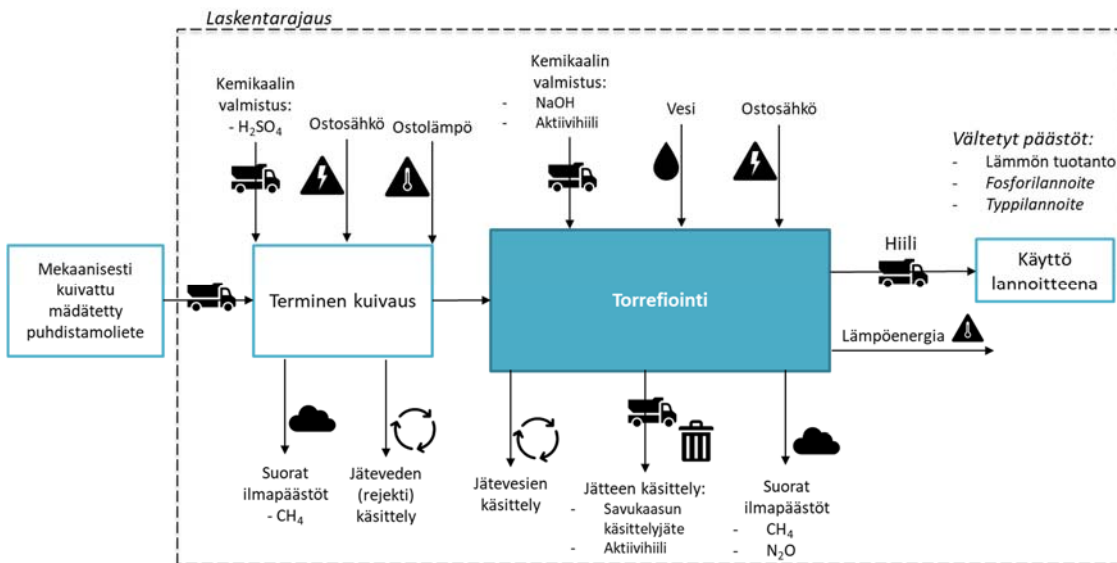
Prosessissa kuluu energiaa lietteen termiseen kuivaukseen ja torrefiointiprosessin lämmitykseen. Lisäksi laitos kuluttaa sähköä prosessilaitteiden käyttöön.

Torrefioinnissa muodostuvat kaasut ja höyryt oletettiin johdettavan polttoon lämmön tuottamiseksi. Tuotekaasun poltossa tuotettava lämpöenergia huomioitiin vältettyinä päästöinä. Prosessissa arvioitiin 35 % lietteen energiasisällöstä sitoutuvan tuotekaasuun ja siten johdettavan polttoon. Prosessin suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) kaatopaikkakaasun poltolle esittämien tietojen pohjalta skaalaamalla päästöjen määrä torrefiointin tuotekaasuun sitoutuvan energian suhteessa.

Rikkihappoa käytetään termisen kuivauksen poistokaasun happopesurissa. Natriumhydroksidia ja aktiivihiltä käytetään torrefiointin tuotekaasun polton savukaasujen käsittelyssä.

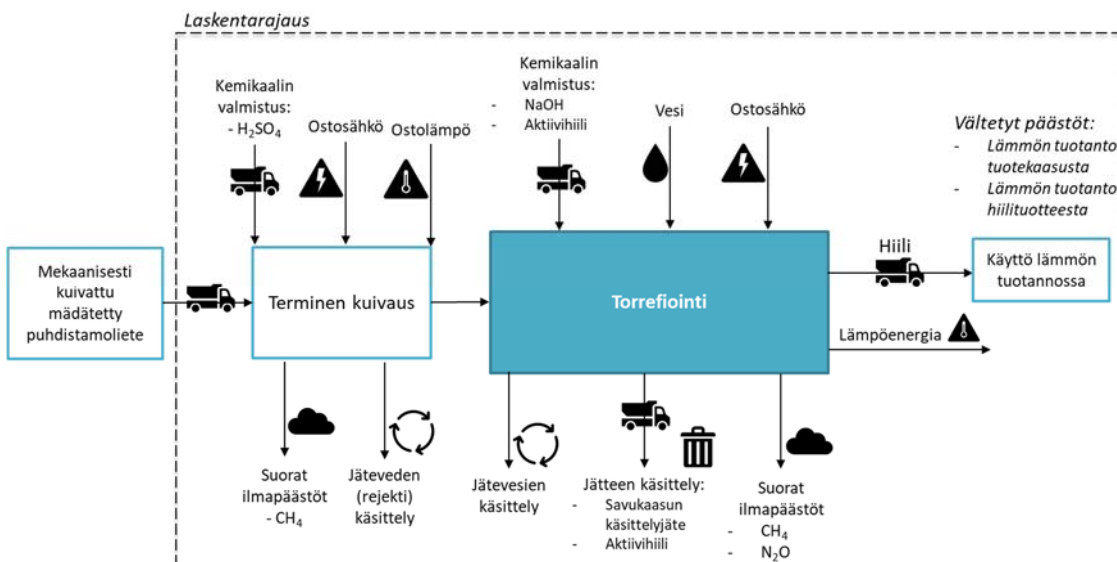
Torrefiointin tuotteena muodostuvan hiilimäisen tuotteen hyödyntämiselle tarkasteltiin kahta vaihtoehtoa: hyödyntäminen energiana (hiilen poltto lämmön tuottamiseksi) ja hyödyntäminen lannoitteena (hiilen suora lannoitekäyttö). Energiahyödyntämisen tapauksessa tuotteen polttoprosessin päästöt ei huomioitu.

#### A: Torrefiointin tuotteen hyödyntäminen lannoitteena



Kuva 5. Laskentaraja: Torrefiointi (lannoitekäyttö)

## B: Torrefiointin tuotteen hyödyntäminen energiana



Kuva 6. Laskentaraja: Torrefiointi (energiantuotanto)

### 3.2.6 Pyrolyysi

Pyrolyysiprosessia edeltää oletetussa prosessikokonaisuudessa terminen kuivaus, jossa mekaanisesti kuivattu liete kuivataan 90 % kuiva-ainepitoisuuteen. Termisen kuivauksen päästöt laskettiin, kuten edellä on esitetty termiselle kuivaukselle (3.2.3).

Prosessissa kuluu energiaa lietteen termiseen kuivaukseen ja torrefiointiprosessin lämmitykseen. Lisäksi laitos kuluttaa sähköä laitteiden käyttöön.

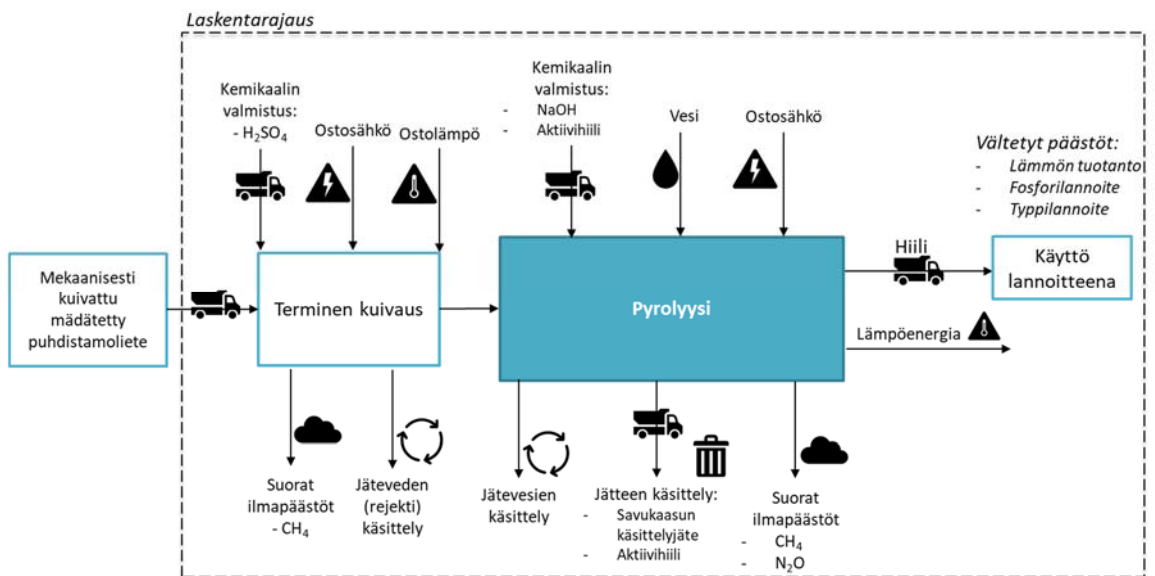
Pyrolyysissä tuotettavat kaasut ja höyryt oletettiin johdettavan polttoon lämmön tuottamiseksi. Poltossa tuotettava lämpöenergia huomioitiin vältettyinä päästöinä. Prosessissa arvioitiin 50 % lietteen energiasisällöstä sitoutuvan tuotekaasuun ja siten johdettavan polttoon. Prosessin suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al.

(2016) ja Myllymaan et al. (2008) kaatopaikkakaasun poltolle esittämien tietojen pohjalta, skaalaamalla päästöjen määrä pyrolyysin tuotekaasuun sitoutuvan energian suhteessa.

Rikkihappoa käytetään termisen kuivauksen poistokaasun happopesurissa. Natriumhydroksidia ja aktiivihiltä käytetään pyrolyysikaasun polton savukaasujen käsittelyssä.

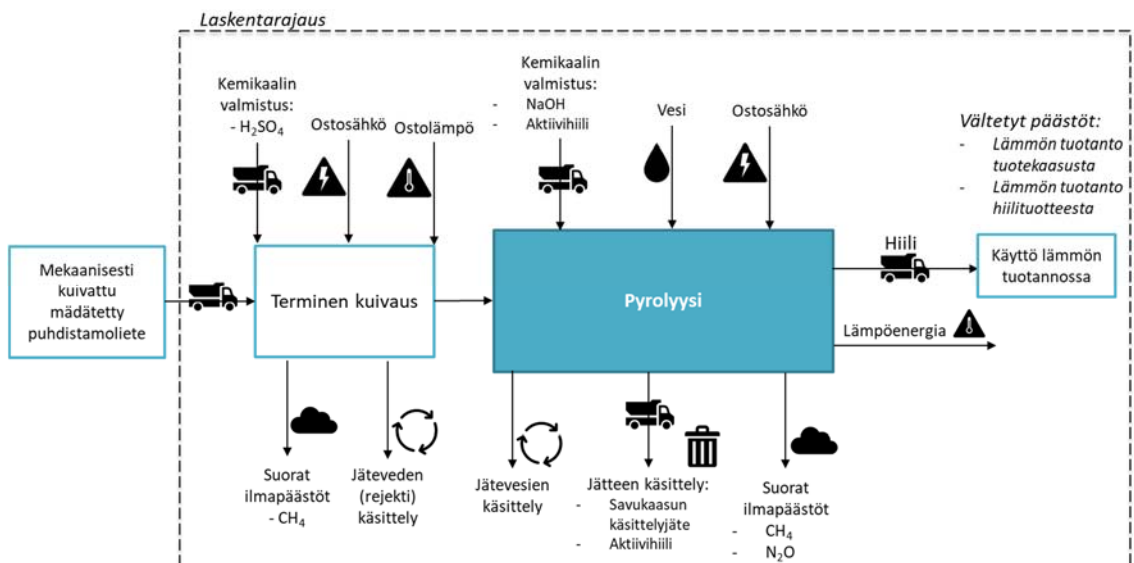
Pyrolyysin tuotteena muodostuvan hiilimäisen tuotteen hyödyntämiselle tarkasteltiin kahta vaihtoehtoa: hyödyntäminen energiana (hiilen poltto lämmön tuottamiseksi) ja hyödyntäminen lannoitteena (hiilen suora lannoitekäyttö). Energiahyödyntämisen tapauksessa tuotteen polttoprosessin päästöjä ei huomioitu.

### A: Pyrolyysin tuotteen hyödyntäminen lannoitteena



Kuva 7. Laskentaratjaus: Pyrolyysi (lannoitekäyttö)

### B: Pyrolyysin tuotteen hyödyntäminen energiana



Kuva 8 Laskentaratjaus: Pyrolyysi (lämmön tuotanto)

### 3.2.7 Kaasutus

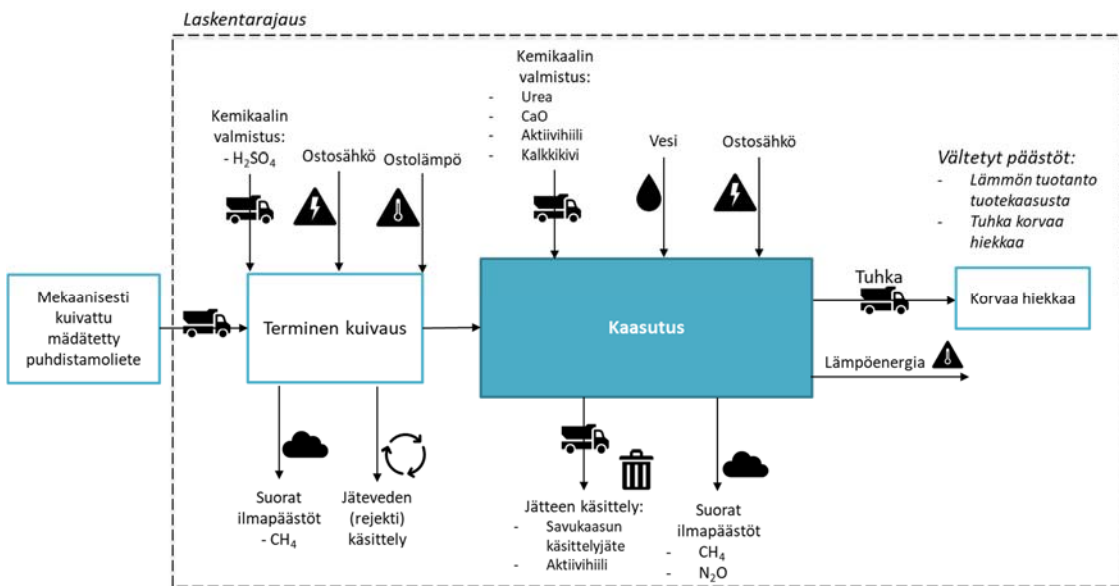
Kaasutusta edeltää oletetussa prosessikokonaisuudessa terminen kuivaus, jossa mekaanisesti kuivattu liete kuivataan 90 % kuiva-ainepitoisuuteen. Terminen kuivauksen päästöt laskettiin, kuten edellä on esitetty termiselle kuivaukselle (3.2.3).

Kaasutuksen tuotekaasu puhdistetaan prosessissa, jossa käytetään ureaa, kalsiumoksidia (CaO), aktiivihiliä sekä kalkkikiveä. Kaasutuksessa oletettiin, että terminen kuivaus toteutetaan ulkopuolisella energialla, joten kuivausvaiheeseen tarvitaan ostolämpöä prosessin ulkopuolelta. Lisäksi laitos kuluttaa sähköä.

Tuotekaasu poltetaan prosessissa lämmön tuottamiseksi. Prosessin tuotteena saatavalle lämmölle laskettiin vältetyt päästöt. Laskenta tehtiin ainoastaan lämmöntuotantoon tähtäävälle prosessiketjulle, koska sähköä tuottavan CHP-poltton vaatimaan tuotekaasun käsittelyyn olisi liittynyt merkittävä määrä kemikaalien käyttöä. Lämmöntuotanto arvioitiin siis hiilijalanjäljen kannalta edullisemmaksi ratkaisuksi.

Tuotteena muodostuu tuhkaa, joka on oletettu käytettävän rakentamisessa korvaamaan hiekkaa. Jätteinä muodostuu savukaasujen käsittelyjätettä, joka johdetaan vaarallisen jätteen käsittelyyn sekä käytettyä aktiivihiliä, joka johdetaan regenerointiin.

Prosessin suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) kaatopaikkakaasun poltolle esittämien tietojen pohjalta, skaalaamalla päästöjen määrä kaasutuksen tuotekaasuun sitoutuvan energian suhteessa. Prosessissa arvioitiin 87 % lietteen energiasisällöstä sitoutuvan tuotekaasuun ja siten johdettavan polttoon.



Kuva 9. Laskentarajaus: Kaasutus

### 3.2.8 Erillispoltto

Lietteen erillispoltossa lämpöenergiaa kuluu lietteen kuivaukseen esikuivauksessa ja jäännöskosteuden haihdutukseen poltossa. Polttoprosessilla taas tuotetaan sähköä ja lämpöä. Tuloksissa veden haihduttamisen lämmöntarve ja polttoprosessin tuottama lämpö ja sähkö on esitetty erikseen, joten ne näkyvät vastaavasti hiilijalanjäljessä ja vältetyissä päästöissä.

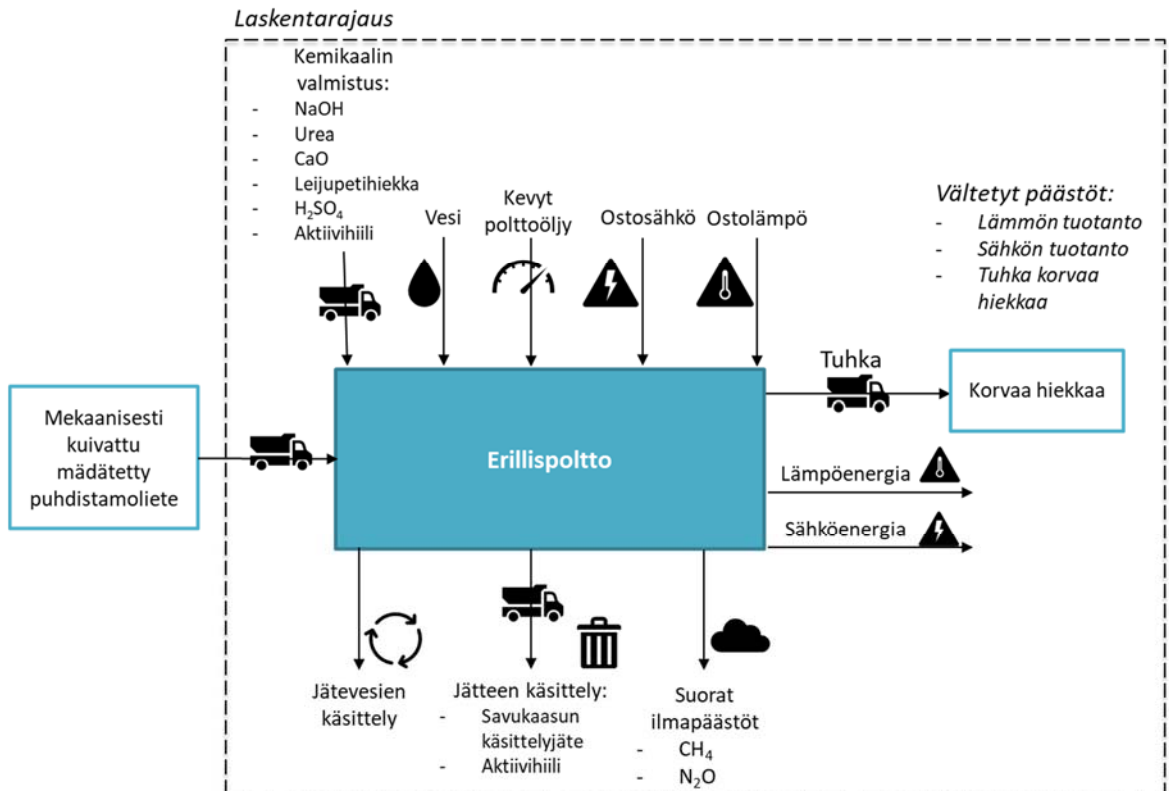
Erillispolton prosessiin kuuluu lietteen esikuivaus poltosta saatavalla lämmöllä. Esi-kuivauksessa muodostuu rejektivesivirta. Lauhdutuksen jälkeen poistokaasut syötetään polttoon, joten niille ei tarvita hajukaasujen käsittelyä.

Erillispolton tekniikaksi oletettiin leijupetipolttu. Savukaasujen käsittelyyn käytetään lipeää, ureaa, kalsiumhydroksidia ja aktiivihiliä. Lisäksi prosessissa kulutetaan leijupeti-hiekkaa. Polton käynnistyspolttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä.

Savukaasujen käsittelyssä muodostuu jätevesivirta märkäpesurista. Jätevedenkäsittely on laskettu tilavuusperusteisesti. Jätteinä muodostuu savukaasujen käsittelyjätettä, joka johdetaan vaarallisen jätteen käsittelyyn sekä käytettyä aktiivihiliä, joka johdetaan reaktiivointiin.

Tuotteena muodostuu tuhkaa, joka on oletettu käytettävän rakentamisessa korvaamaan hiekkaa.

Suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) lietteen poltolle esittämien tietojen pohjalta.



Kuva 10. Laskentarajaus: Erillispolttu

### 3.2.9 Yhteispolttu, jätteenpolttolaitos

Lietteen yhteispolton vaikutus jätteenpolttolaitoksessa arvioitiin lietteen erillispoltossa lasketun energiataseen perusteella. Laskennan perusoletus on, että lietteen vaikutus energiataseeseen on jätteenpoltoissa samankaltainen kuin erillispoltossa.



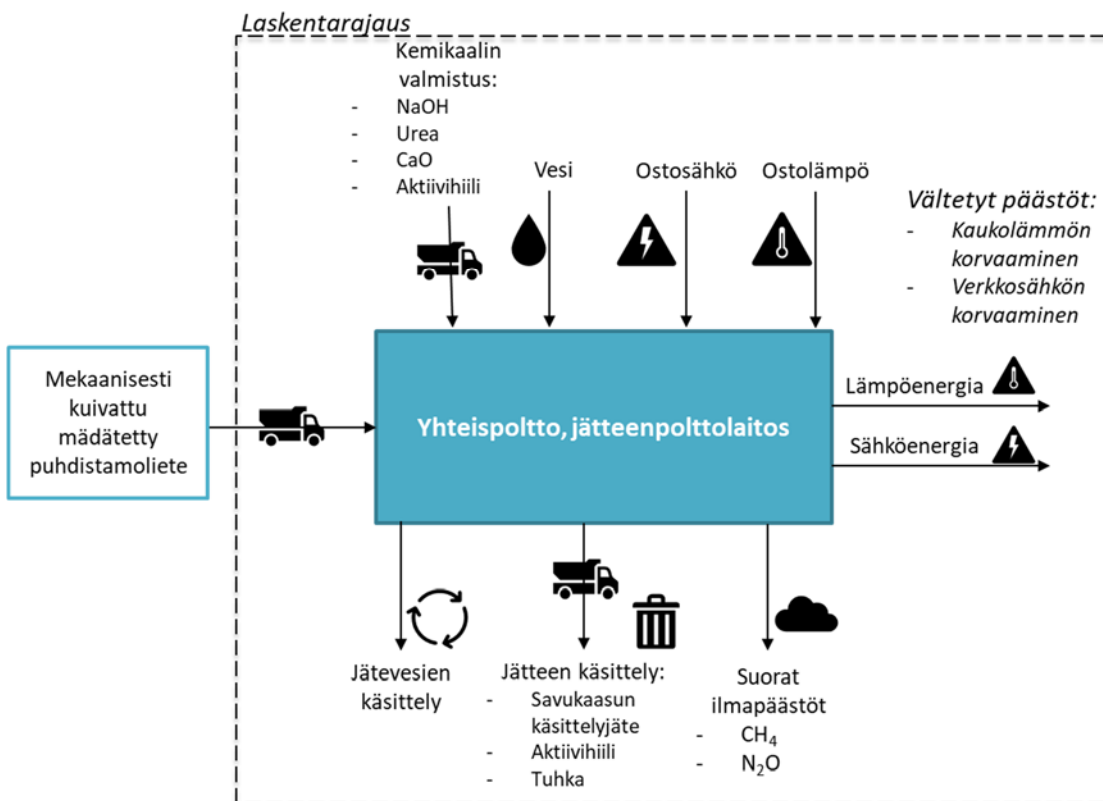
Polttoprosessiin kuuluu lietteen esikuivaus poltosta saatavalla lämmöllä. Tuloksissa veden haihduttamisen (esikuivauksessa ja poltossa) lämmöntarve ja polttoprosessin tuottama lämpö on esitetty erikseen, joten ne näkyvät hiilijalanjäljessä ja vältetyissä päästöissä.

Esikuivauksessa muodostuu rejektivesivirta. Lauhdutuksen jälkeen poistokaasut syötetään polttoon, joten niille ei tarvita hajukaasujen käsittelyä.

Jätteenpolton savukaasujen käsittely oletettiin vastaavaksi kuin erillispoltossa. Savukaasujen käsittelyyn käytetään lipeää, ureaa, kalsiumhydroksidia ja aktiivihiliä. Polton käynnistyspolttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä.

Savukaasujen käsittelyssä muodostuu jätevesivirta märkäpesurista. Jäteveden käsittely on laskettu tilavuusperusteisesti. Jätteinä muodostuu savukaasujen käsittelyjätettä, joka johdetaan vaarallisen jätteen käsittelyyn sekä käytettyä aktiivihiliä, joka johdetaan regenerointiin. Polton tuhka päätyy osaksi jätteenpolton tuhkaa, joka johdetaan tavanomaisen jätteen loppusijoitukseen.

Suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) lietteen poltolle esittämien tietojen pohjalta.



Kuva 11. Laskentarajaus: Yhteispoltto, jätteenpolttolaitos

### 3.2.10 Yhteispoltto, sementtiuuni

Liete kuivataan termisesti noin 90 % TS kuiva-ainepitoisuuteen ennen johtamista sementtiuunissa polttoon. Termisen kuivauksen päästöt laskettiin, kuten edellä on esitetty termiselle kuivaukselle (3.2.3).

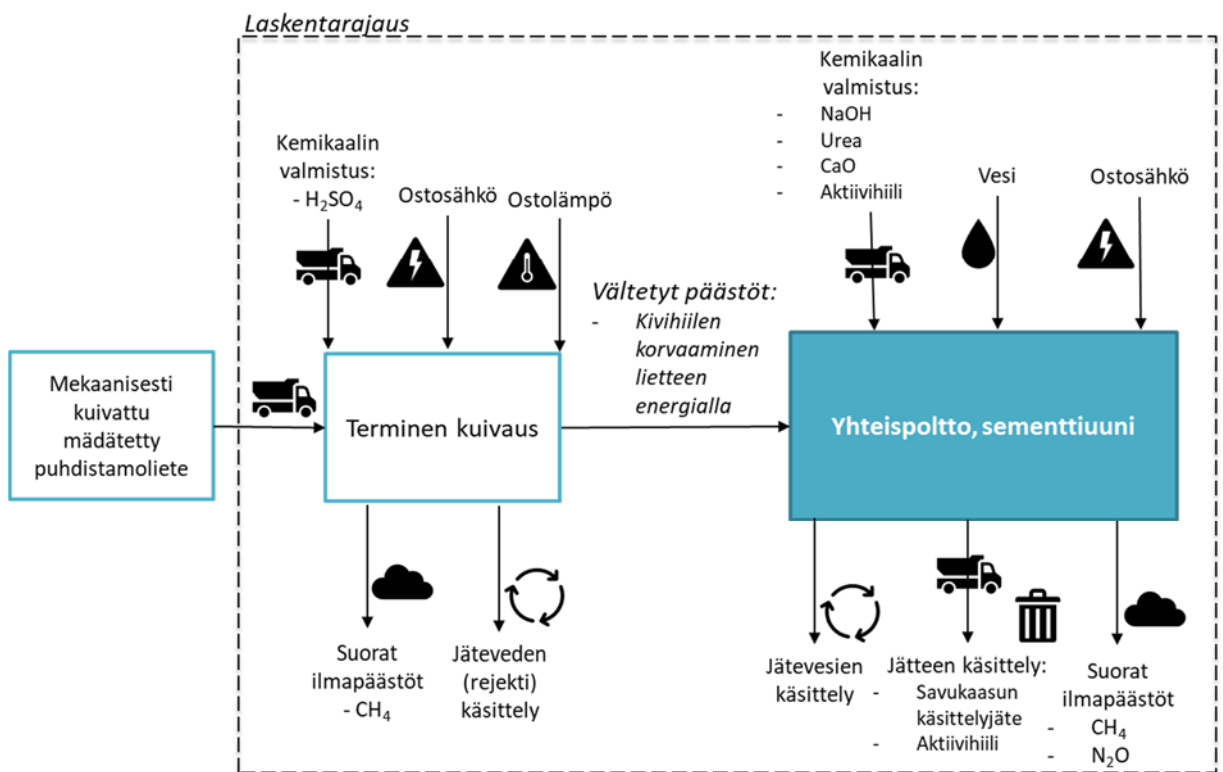


Sementtiuunipoltossa oletettiin, että polton energiaa ei voida hyödyntää lietteen termisessä kuivauksessa, vaan terminen kuivaus toteutetaan täysin ulkopuolisella energialla.

Savukaasujen käsittely oletettiin vastaavaksi kuin erillispoltossa. Savukaasujen käsitteilyyn käytetään lipeää, ureaa, kalsiumhydroksidia ja aktiivihiiltä.

Sementtiuunipoltossa lietteen energia hyödynnetään ja laskennassa sen energialla oletettiin korvattavan kivihiilestä saatavaa energiaa. Energiataseessa huomioitiin termisesti kuivatun lietteen jäännöskosteuden 10 % haihduttaminen prosessissa.

Suorat metaani- ja typpioksiduulipäästöt arvioitiin Mannisen et al. (2016) ja Myllymaan et al. (2008) lietteen poltolle esittämien tietojen pohjalta.



Kuva 12. Laskentarajaus: Yhteispoltto, sementtiuuni

## 4 TULOKSET

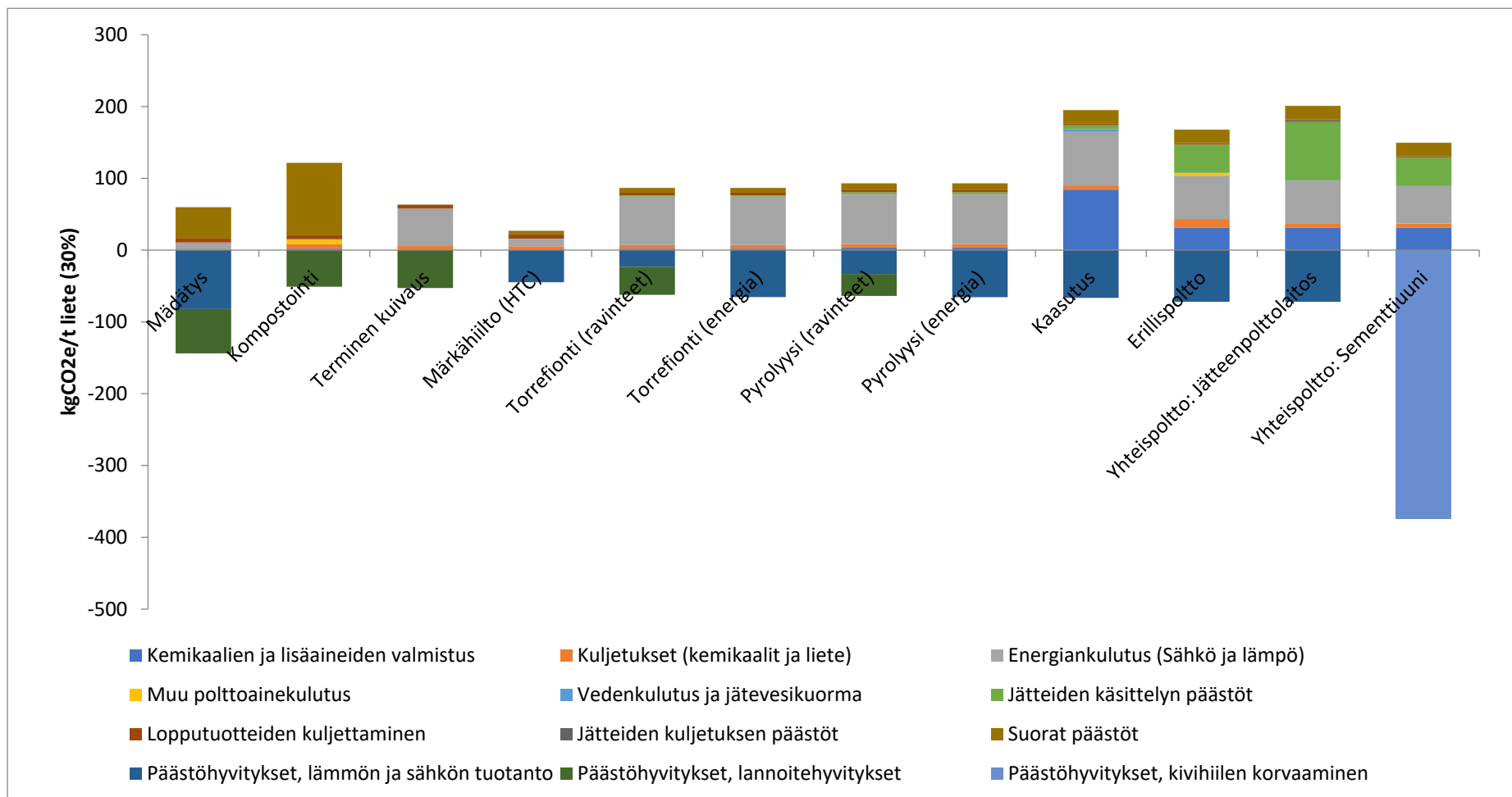
Hiilijalanjätkilaskennan ja vältettyjen päästöjen tulokset on esitetty seuraavissa kuvissa graafisesti ja taulukkomuodossa.

Useimmissa termisissä käsittelymenetelmissä energiankulutus muodostaa merkittävän päästökuorman ja tietyissä tekniikoissa myös kemikaalien valmistus sekä jätteiden käsittely ovat merkittäviä tekijöitä. Suorat päästöt ovat merkittäviä lähinnä erilaisten poltto-tekniikoiden sekä kompostoinnin tapauksissa.

Lietteen, kemikaalien ja tuotteiden kuljetukset muodostavat suhteellisen pienen osuuden kokonaispäästökuormasta kaikissa tapauksissa. Laitoksen kokoluokka vaikuttaa kuljetusten hiilijalanjälkeen; mikäli lietteen kuljetusmatkat ovat pitkiä, voivat ne aiheuttaa merkittävän hiilijalanjälkivaikutuksen.

Vältetyt päästöt ovat merkittäviä niin lietteen energia- kuin lannoitehyödyntämisessäkin. Vältettyjen päästöjen laskennasta tulee huomioida, että hyödyntämisessä muodostuvat päästöt (esim. lannoitteen levittäminen, tuotteen polton päästöt) on rajattu laskennan ulkopuolelle. Lämmön tuotannon vältetty päästö on laskettu lämpöenergian tuotantoon (ks. 3.1.5) pohjautuen muiden kuin sementtiunipolton osalta, jossa lietteen energialla on oletettu korvattavan fossiilista kivihiiltä.

Tuloksia on tarkasteltu tekniikkakohtaisesti seuraavissa kappaleissa.



Kuva 13. Hiilijalanjäljen (päästöt) ja vältettyjen päästöjen laskennan tulokset

Taulukko 5. Hiilijalanjalan (päästöt) ja vältettyjen päästöjen laskennan tulokset

Kg CO2e / t lietettä (30 %)	Mädä- tys	Kom- pos- tointi	Termin- nen kui- vaus	Märkä- hiilto (HTC)	Torrefi- ointi (ravin- teet)	Torrefi- ointi (ener- gia)	Pyro- lyysi (ravin- teet)	Pyro- lyysi (ener- gia)	Kaasu- tus	Erillis- poltto	Yhteis- poltto, Jät- teen- poltto- laitos	Yhteis- poltto, Se- ment- tiuuni
<b>HIILIJALANJÄLKI YHTEENSÄ</b>	<b>60</b>	<b>121</b>	<b>63</b>	<b>27</b>	<b>87</b>	<b>87</b>	<b>93</b>	<b>93</b>	<b>195</b>	<b>168</b>	<b>201</b>	<b>149</b>
Kemikaalien valmistus	0	2	1	0	2	2	3	3	84	31	31	31
Kuljetukset (kemikaalit ja liete)	0	6	5	5	5	5	5	5	6	12	5	6
Energiankulutus (Sähkö ja lämpö)	10	0	52	10	67	67	69	69	75	60	60	52
Muu polttoainekulutus	0	6	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
Vedenkulutus ja jätevesikuorma	0	1	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
Lopputuotteiden kuljettaminen	5	5	5	6	4	4	3	3	2	2	2	2
Jätteiden kuljetuksen päästöt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1
Jätteiden käsittelyn päästöt	0	0	0	0	2	2	3	3	6	39	81	39
Suorat päästöt	44	101	0	5	7	7	9	9	19	19	19	19
<b>VÄLTETYT PÄÄSTÖT YHTEENSÄ</b>	<b>-144</b>	<b>-51</b>	<b>-53</b>	<b>-45</b>	<b>-62</b>	<b>-65</b>	<b>-64</b>	<b>-66</b>	<b>-67</b>	<b>-72</b>	<b>-72</b>	<b>-374</b>
Vältetyt päästöt, lämmön ja sähkön tuotanto	-82	0	0	-45	-23	-65	-33	-66	-66	-72	-72	0
Vältetyt päästöt, lannoitehyvitykset	-62	-51	-53	0	-39	0	-31	0	0	0	0	0
Vältetyt päästöt, kivihiilen korvaaminen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-374
Vältetyt päästöt, hiekan korvaaminen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 4.1 KOMPOSTOINTI JA MÄDÄTYS

Tuloksista havaitaan, että mädätys on kompostointiin verrattuna hiilijalanjäljen kannalta edullisempi tekniikka, johtuen lähinnä biokaasun energiahyödyntämisen ansiosta välte-tyistä päästöistä ja kompostoinnin korkeammiksi arvioituista suorista metaani- ja typpi-oksiduulipäästöistä. Suorien päästöjen arviointiin liittyy merkittävää epävarmuutta molempien tekniikoiden kohdalla. Erityisesti kompostoinnin todelliset päästöt riippuvat merkittävästi mm. prosessin olosuhteista ja niitä tulisi selvittää nykyistä tarkemmin.

Rejkti- tai valumaveteen vapautuvan kuormituksen, erityisesti typpikuorman, vaikutusta ei huomioitu laskennoissa. Tämän tekijän huomioiminen todennäköisesti pienentäisi mädätyksen ja kompostoinnin välistä eroa johtuen mädätyksessä rejktiveteen vapautuvasta typestä.

## 4.2 TERMINEN KUIVAUS

Terminen kuivaus kuluttaa merkittävän määrän lämpöenergiaa, mikä näkyy hiilijalanjäljessä suurimpana tekijänä. Lisäksi päästöjä aiheutuu rejktivetestä ja pienessä määrin kemikaaleista ja kuljetuksista. Rejktivetesten vaikutus on laskettu tilavuusperusteisesti, mikä todennäköisesti aliarvioi rejktivetesten todellista hiilijalanjälkeä, sillä rejktivesti on yleensä väkevää jätevettä ja sen typpipitoisuus on normaalia jätevettä korkeampi.

## 4.3 MÄRKÄHIILTO

Märkähiillon hiilijalanjälki on laskennan perusteella termisistä menetelmistä pienin, mikä pääosin selittyy käsittelyn pienellä energiankulutuksella. On kuitenkin syytä huomioida, että märkähiilto on uutta tekniikkaa ja laskennan lähtötiedot pohjautuvat pääosin laitetoimittajien julkaisemiin energiatase- ja kulutuslukuihin. Lähtötietoja olisi hyvä tarkentaa todellisten laitoskohteiden tietojen pohjalta.

Lisäksi märkähiillon rejktivetesten vaikutus voi todellisuudessa olla laskennassa arvioitua korkeampi. Märkähiiltoprosessissa vapautuu merkittävä määrä tyypeä rejktiveteen, mikä voi aiheuttaa laskettua suuremman hiilijalanjäljen jäteveden käsittelyssä. Lisäksi hiilituotteen energiahyödyntämisen hiilijalanjälkeä ei ole huomioitu, joten mm. polton suorat päästöt sekä savukaasujen käsittelykemikaalien vaikutus jäävät huomiotta.

## 4.4 TORREFIOINTI JA PYROLYYSI

Torrefiointi ja pyrolyysi muistuttavat tekniikkana toisiaan ja käytetyillä laskentaoletuksilla niiden hiilijalanjälki asettuu samaan suuruusluokkaan. Merkittävin hiilijalanjälkeä aiheuttava tekijä on lämpöenergian kulutus termisessä kuivauksessa ja itse prosessissa.

Tuotteen hyödyntämisellä saavutetaan vältettyjä päästöjä. Lannoitekäytön tapauksessa vältetty päästö muodostuu kierrätetyistä ravinteista ja energiakäytön tapauksessa hiilituotteen poltossa saatavasta lämpöenergiasta. Lisäksi päästöjä saavutetaan sekä tuotteen lannoite- että energiakäytön tapauksessa prosessin tuotekaasun polton ansiosta. Käytetyillä laskentaoletuksilla sekä lannoite- että energiahyödyntämisen vältetyt päästöt ovat samaa suuruusluokkaa. On syytä huomata, että energiahyödyntämisessä tapahtuvan polton päästöjä ei ole huomioitu.

Muihin termisiin käsittelymenetelmiin verrattuna torrefioinnin ja pyrolyysin hiilijalanjälki on märkähiiltoa ja termistä kuivausta suurempi, mutta kaasutus- ja polttotekniikoita pienempi.

## **4.5 KAASUTUS, ERILLISPOLTTO JA YHTEISPOLTTO JÄTTEENPOLTTOlaitoksessa**

Kaasutuksen hiilijalanjälki on laskennan termisistä menetelmistä toiseksi korkein. Merkittävä osa hiilijalanjäljestä muodostuu termisen kuivauksen energiankulutuksesta sekä tuotekaasun käsittelyyn tarvittavista kemikaaleista. Verrattuna erillispolttoon kaasutuksen etu on pienempi savukaasujen käsittelyjätteen määrä. Laskennan pohjana käytettyjen tietojen mukaan suurin osa kiintoaineesta jää hyödynnettävään tuhkakakeeseen ja savukaasujen käsittelyjätteen määrä jää pieneksi. Energiantuotannon määrä on samaa suuruusluokkaa kuin erillispoltossa. Tuhkan hyötykäytöllä saavutettava vältetty päästö on hyvin pieni.

Erillispoltossa merkittävimmät hiilijalanjäljen osatekijät ovat kuivauksen energiankulutus, savukaasujen käsittelykemikaalit sekä savukaasujen käsittelyjätteet. Sähkö- ja lämpöenergian tuotannolla saavutetaan vältettyjä päästöjä. Tuhkan hyötykäytön vältetty päästö on tässäkin tapauksessa pieni. Erillispoltton oletettiin vaativan suurta laitoksen kokoluokkaa, joten lietteen kuljetuksiin liittyvät päästöt ovat esimerkiksi kaasutusta ja jätteenpolttolaitospolttua suuremmat.

Yhteispolttoon jätteenpolttolaitoksessa liittyvä hiilijalanjälki on laskennan korkein. Merkittävin hiilijalanjäljen osuus muodostuu jätteiden käsittelystä, kun lietteen tuhka joudutaan loppusijoittamaan. Lisäksi merkittäviä päästölähteitä ovat lietteen kuivauksen energia sekä savukaasujen käsittelykemikaalit.

## **4.6 POLTTO SEMENTTIUUNISSA**

Sementtiunipolttoon liittyvät päästöt ovat verrattavissa erillispolttoon, joskin kuljetuksiin ja apupolttoaineen käyttöön sekä sähkönkulutukseen liittyvät päästöt arvioitiin laskennassa pienemmiksi.

Sementtiunipoltossa on oletettu kuivatun lietteen sisältämällä energialla voitavan korvata kivihiiltä. Fossiilisen kivihiilen polton päästöt ovat suuret, minkä ansiosta vältetty päästö muodostuu hyvin merkittäväksi. Mikäli muilla tekniikoilla lietteestä tuotetulla polttoaineella voitaisiin korvata fossiilista polttoainetta, voitaisiin niilläkin saavuttaa vastaavassa suuruusluokassa olevia vältettyjä päästöjä.

## 5 POHDINTA JA SUOSITUKSET

### 5.1 LASKENNAN LÄHTÖKOHDAT JA TULOSTEN TULKINTA

Laskennassa on käytetty useita koti- ja ulkomaisia kirjallisuuslähteitä sekä suunniteltujen ja olemassa olevien laitosten tietoja. Laskennassa on huomioitu laitosprosessien toiminnasta aiheutuvat suorat ja epäsuorat päästöt, mutta esimerkiksi rakentamista, huoltotoimenpiteitä, rakennusten ylläpitoa tai laitosten tukitoimintoja ei ole sisällytetty laskentaan.

Tämän laskennan tavoitteena on luoda yleiskuva kunkin tekniikan hiilijalanjäljestä, joten laskenta ei kuvaa tiettyä laitospohjaa tai prosessikokonaisuutta. Tietyn laitoksen tai prosessikokonaisuuden hiilijalanjälki tulisikin määrittää kyseisen kohteen tiedoilla.

Laskennassa keskityttiin kuhunkin termiseen käsittelymenetelmään, eikä siinä huomioitu termistä käsittelyä edeltävän lietteenkäsittelyn (mädätys ja mekaaninen kuivaus) hiilijalanjälkeä, eikä tuotteen hyödyntämiseen liittyvää hiilijalanjälkeä (esim. tuotteen polton päästöt tai lannoitteen levittäminen). Mikäli halutaan selvittää koko lietteen käsittelyketjun hiilijalanjälki, on suositeltavaa huomioida termisen käsittelyn lisäksi sitä edeltävä lietteen käsittely ja mm. rejektivesien käsittelyn hiilijalanjälki.

### 5.2 LASKENTAOLETUKSET JA NIIDEN VAIKUTUS TULOSSIIN

Laskennassa on tehty rajauksia, valintoja ja oletuksia, jotta laskenta voitiin toteuttaa sen tavoitteiden mukaisesti. Tehdyt valinnat tulee huomioida tulosten tulkinnassa ja vertailussa muihin selvityksiin. Seuraavassa on mainittu keskeisiä oletuksia, jotka on syytä huomioida.

Oletettu lietteen kuiva-ainepitoisuus (30 %) on suhteellisen korkea ja useimmilla suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla lietteen kuiva-ainepitoisuus on hieman tätä matalampi. Mikäli lietteen kuiva-ainepitoisuus on matalampi, on termisten käsittelymenetelmien energiatase laskettua heikompi ja siten hiilijalanjäljen kannalta epäedullisempi. Toisaalta kohteissa, joissa lietettä ei mädätetä, on lietteen energiasisältö korkeampi ja siten siitä saatavat hyödyt energiantuotannossa voivat olla laskennassa esitettyä suurempia.

Termisten käsittelymenetelmien tuotteiden energiahyödyntämisen vältetyt päästöt arviointiin suoraan tuotteen energiasisällön perusteella. Varsinaisen polttoprosessin päästöjä ja häviöitä polttoprosessissa ei ole siten huomioitu. Tuotteen polton hiilijalanjälki voi vaikuttaa merkittävästi prosessiketjun kokonaishiilijalanjälkeen. Energiahyödyntämisen koko prosessiketjun päästöjen tarkastelemiseksi tulisi siksi tarkastella myös polton päästöjä.

Rejektivesivirrat termisistä käsittelymenetelmistä huomioitiin tilavuusperusteisesti tyypillisen kunnallisen jäteveden hiilijalanjäljen pohjalta. Tarkemmissa selvityksissä olisi suositeltavaa huomioida myös näiden jätevesivirtojen kuormitus etenkin typen ja orgaanisen aineen osalta. Esimerkiksi märkähiillon ja termisen kuivauksen jätevesikuormituksen vaikutus on todennäköisesti laskettua merkittävämpi johtuen prosesseissa jäteveten päätyvästä typestä.

Tulosten vertailtavuuden vuoksi kompostoinnissa ja mädätyksessä ei huomioitu muodostuvia rejektivesivirtoja. Kompostointi- ja mädätystekniikoiden keskinäistä vertailtavuutta rejektivesien huomiotta jättäminen kuitenkin heikentää, sillä

mädätyksessä vapautuvan typen aiheuttama lisäkuormitus jätevedenpuhdistamolle jää huomioimatta.

Suorien päästöjen arviot tekniikoista perustuvat kirjallisuuslähteisiin ja laitetoimittajilta saatuihin tietoihin. Näitä lukuja on pidettävä suuntaa antavia ja olisi suositeltavaa tarkentaa laskentaa käyttäen todellisissa laitoskohteissa analysoituja tai mitattuja suoria päästöjä.



## 6 YHTEENVETO

Tässä raportissa on esitetty lietteen termisten menetelmien hiilijalanjälkilaskenta, joka on tehty osana hankeselvitystä *Lietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen* (VVY 2019). Selvityshankkeen tavoitteena oli koota tietoja lietteen termisistä käsittelymenetelmistä sekä tarkastella niiden potentiaalia ratkaisuksi, joilla mahdollistetaan turvallinen ja ympäristön kannalta kestävä puhdistamolietteen käsittely.

Yksi osa selvitystä oli tässä raportissa laajemmin esitetty hiilijalanjälkilaskenta, jossa tarkasteltiin lietteenkäsittelytekniikoita teoriaan ja kirjallisuuteen pohjautuen. Laskennassa on huomioitu laitosprosessien toiminnasta aiheutuvat suorat sekä epäsuorat päästöt, ja se antaa yleiskuvan kunkin käsittelyprosessin hiilijalanjäljestä. Laskentojen rajaukset ovat tehty prosessikohtaisesti, mikä mahdollistaa tekniikoiden vertaamisen toisiinsa. Lietteenkäsittelyn kokonaishiilijalanjäljen määrittämiseksi tulisi laajentaa laskennan elinkaarta huomioiden koko lietteenkäsittelyn prosessiketju.

Laskennan tulosten perusteella perinteisistä lietteenkäsittelytekniikoista mädätys on kompostointiin verrattuna hiilijalanjäljen kannalta edullisempi tekniikka, johtuen lähinnä biokaasun energiahyödyntämisen ansiosta vältetyistä päästöistä sekä kompostoinnin korkeammiksi arvioiduista suorista päästöistä. Suorien päästöjen arviointiin liittyy kuitenkin merkittävää epävarmuutta molempien tekniikoiden osalta ja erityisesti aumakompostoinnin suorien päästöjen tarkempi tutkiminen olisi suositeltavaa arvioiden luotettavuuden parantamiseksi.

Termisen kuivauksen hiilijalanjälki on laskennan perusteella termisistä menetelmistä toiseksi pienin. Hiilijalanjäljen merkittävin tekijä on kuivauksen energiankulutus. Termisen kuivaus 90 % kuiva-ainepitoisuuteen on esikäsittelynä myös torrefioinnissa, pyrolyysissä, kaasutuksessa sekä sementtiunipoltossa. Erillispoltossa ja yhteispoltossa jätteen kanssa prosessiin kuuluu osittainen esikuivaus. Termisen kuivauksen kohdalla onkin erityisen keskeistä huomioida kuivauksen ohella muun käsittelyketjun hiilijalanjälki.

Märkähiillon hiilijalanjälki on laskennan perusteella termisistä menetelmistä pienin. Toisaalta märkähiiltotuotteen energiakäytössä saavutetut vältetyt päästöt ovat vertailun pienimmät, sillä ravinteita ei saada hyödynnettyä. Käytettyjen laskentaoletusten ja -rajauksen vuoksi laskenta ei huomioi märkähiilossa rejektiveteen päätyvän typen eikä hiilituotteen polton päästöjä, jotka vaikuttavat märkähiiltokäsittelyyn perustuvan lietteenkäsittelyketjun kokonaishiilijalanjälkeen.

Torrefioinnin ja pyrolyysin hiilijalanjälki on laskennan perusteella termisten menetelmien keskitasoa. Energiankulutus on merkittävin päästölähde. Kaasutus- ja polttotekniikoihin verrattuna päästöt ovat pienemmät mm. kemikaalien kulutuksen ja jätteiden käsittelyn sekä suorien päästöjen osalta. Hiilituotteen energiahyödyntämisen osalta tulee huomoida, että hiilituotteen polton päästöjä ei ole huomioitu laskennassa.

Poltto- ja kaasutusprosessien päästöt ovat muita tekniikoita korkeampia johtuen mm. savukaasujen käsittelyn kemikaaleista sekä tuotetuista jätteistä. Lisäksi liete joudutaan näissä tekniikoissa kuivaamaan, mikä aiheuttaa energiankulutusta. Korkeimmat päästöt todettiin yhteispoltossa jätteenpolttolaitoksessa.

Sementtiunipoltolla saavutetaan laskennan mukaan merkittäviä vältettyjä päästöjä, mikä selittyy kivihiilen korvaamisella. Mikäli muilla tekniikoilla lietteestä tuotetulla polttoaineella voitaisiin korvata fossiilista polttoainetta, voitaisiin niilläkin saavuttaa vastaavassa suuruusluokassa olevia vältettyjä päästöjä.

Hiilijalanjälki on yksi tekijä, joka on syytä huomioida uusien lietteenkäsittelytekniikoiden arvioinnissa. Hiilijalanjäljen ohella on tärkeää huomioida ratkaisujen kestävyys myös muiden tekijöiden, kuin hiilijalanjäljen näkökulmasta. Esimerkiksi fosforin kierrätyksen edistäminen puoltaa lannoitekäyttöä energiakäytön sijaan siihen soveltuville tuotteille. Tekniikoiden vertailussa tulee lisäksi huomioida myös muita tekijöitä, kuten lopputuotteiden hyödynnettävyys ja kohdemarkkinat, haitta-aineiden poiston tehokkuus, tekniikoiden kypsyyssaste sekä kustannukset. Näitä tekijöitä on arvioitu hankkeen loppuraportissa (VVY 2019).

## 7 LÄHTEET

Avfall Sverige (2016). Rapportering av data från metanmätningar enligt Egenkontroll metanutsläpp – frivilligt åtagande 2007 – 2015. Avfall Sveriges utvecklingssatsning Biologisk återvinning. Rapport 2016:18. ISSN 1003-4092. Viitattu 11.2.2021. Saatavilla: <https://www.svenskvatten.se/globalassets/avlopp-och-miljo/uppstromsarbete-och-kretslopp/biogas/2016-18-rapportering-av-data-fran-metanmatningar-enligt-egenkontroll-metanutslapp--frivilligt-atagande-2007-2015.pdf>

Boldrin, A., Andersen, J. K., Møller, J., Christensen, T. H. & Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27, pp. 800–812.

Brown, S., Kruger, C., Subler, S. (2008). Greenhouse Gas Balance for Composting Operations. *American Society of Agronomy. J. Environ. Qual.* 37:1396–1410 (2008). doi:10.2134/jeq2007.0453

Brown, S., Beecher, N. & Carpenter, A. (2010). Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use. *Environmental Science & Technology*, vol. 44(24), ss. 9509–9515.

CCME (2009). The Biosolids Emissions Assessment Model (BEAM): A Method for Determining Greenhouse Gas Emissions from Canadian Biosolids Management Practices. Final Report. Canadian Council of Ministers of the Environment, July 2009. Viitattu 11.2.2021. Saatavilla: [https://www.ccme.ca/files/Resources/waste/biosolids/beam\\_final\\_report\\_1432.pdf](https://www.ccme.ca/files/Resources/waste/biosolids/beam_final_report_1432.pdf)

C-Green (2019). C-Green's response to inquiry from Pöyry 2019-01-28 (julkaisematon). Kontaktihenkilö: Peter Axegård, C-Green Technology AB.

Dahlbo, H., Myllymaa, T., Manninen, K., Korhonen, M.-R. (2011) HSY:n alueella tuotettujen, käsiteltyjen ja hyödynnettyjen jätelajien khk-päästökertoimet – Laskelmien taustatietoa. Julia 2030 -hanke. Suomen ympäristökeskus 19.12.2011.

EvEmBi (2021) Minimising methane emissions from biogas plants. EvEmBi Webinar 26.1.2021. Viitattu 23.2.2021. Saatavilla: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/02/Presentations-EVEMBI-workshop-Methane-emissions.pdf>

Foley, J., de Haas D., Hartley, K. & Lant, P. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Research*, vol. 44(5), ss.1654–1666.

Fruergaard, T. & Astrup, T. (2011). Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Management*, vol. 31, 3, ss. 572–582.

HSY (2021). Henkilökohtainen kommunikaatio. Mari Heinonen, Helsingin Seudun Ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 19.2.2021.

Hagberg, L. & Holmgren, K. (2008). The climate impact of future energy peat production. IVL Rapport B1796. Tukholma, Ruotsi.

Hüther, L., Schuchardt, F. & Wilke, T. (1997). Emissions of Ammonia and Greenhouse Gases during Storage and Composting of Animal Manures, in: *Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities*, Proceedings of the International Symposium, 327–334. AB Rosmalen, the Netherlands: NVTL.

IPCC (2006a) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Volume 2 Energy, Chapter 2 Stationary combustion. Viitattu 11.2.2021. Saatavilla: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf)

ISCC (2017) ISCC 201-3 GUIDANCE FOR THE CERTIFICATION OF BIOGAS AND BIOMETHANE. Viitattu 15.2.2021 Saatavilla: [https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2017/02/ISCC-Guidance-Document-201-3\\_Biogas-and-biomethane.pdf](https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2017/02/ISCC-Guidance-Document-201-3_Biogas-and-biomethane.pdf)

IPCC (2006b) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Volume 5 Waste, Chapter 4 Biological treatment of solid waste. Viitattu 11.2.2021. Saatavilla: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_Volume5/V5\\_4\\_Ch4\\_Bio\\_Treat.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf)

Kirkeby, J.T., Gabriel, S. och Christensen, T.H. (2005). Miljøvurdering af genanvendelse og slutdisponering af spildevandsslam - en livscyklus screening af fire scenarier. Institut for Miljø & Ressourcer Danmark Tekniske Universitet (DTU), Kungens Lyngby, Danmark.

Lauronen, M. (2017). Jätevesilietteen eri käsittelyvaihtoehtojen kasvihuonekaasupäästöjen vertailu pohjoisissa olosuhteissa. Diplomityö, Oulun yliopisto. Huhtikuu 2017.

Manninen, K., Laitinen, J. (2016). Jätevesilietteen käsittelyn laskentamallit: Biokaasun tuotanto, Lietteen poltto, Lietteen kompostointi. Suomen ympäristökeskus 2015. Päivitetty 8/2016. Viitattu 27.5.2020. Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/download/name/%7BA5EA912E-4539-445E-AE17-1A1AA198BCD2%7D/126747>

Motiva (2019). CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Verkkojulkaisu. Viitattu: 28.5.2019. Saatavilla: <https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto suomessa/co2-laskentaohje energian kulutuksen hiilidioksidipaastojen laskentaan/co2-paastokertoimet>

Myllymaa, T., Moliis, K., Tohka, A., Rantanen, P., Ollikainen, M., Dahlbo, H. (2008) Jätteen kierrätyksen ja polton käsittelyketjujen ympäristökuormitus ja kustannukset. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 28/2008. Viitattu 27.5.2020. Saatavilla <http://hdl.handle.net/10138/39792>

Mölsä, K. (2019) Life Cycle Assessment of a Wastewater Treatment and a Sludge Handling Process – Current state and future scenarios. Diplomityö, Aalto-yliopisto.

Tilastokeskus (2018). Laatuseloste: Kasvihuonekaasut. Verkkojulkaisu. Viitattu 28.5.2019. Saatavilla: [https://tilastokeskus.fi/til/khki/2017/khki\\_2017\\_2018-05-24\\_laa\\_001.fi.html](https://tilastokeskus.fi/til/khki/2017/khki_2017_2018-05-24_laa_001.fi.html)

RISE (2021). Metanemissioner -från olika typer av biogas anläggningar. Johan Yngveson 27.01.2021.

Schaum, C., Fundneider, T., Cornel, P. (2015) Analysis of methane emissions from digested sludge. Water Science and Technology. 73. 10.2166/wst.2015.644.

Tilastokeskus (2020). Polttoaineluokitus 2020. Viitattu 11.2.2021. Saatavilla: [http://tilastokeskus.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus\\_2020\\_v2.xlsx](http://tilastokeskus.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus_2020_v2.xlsx)

Tauber, J., Parravicini, V., Svardal, K. & Krampe, J. (2019). Quantifying methane emissions from anaerobic digesters. *Water Science and Technology*. 80. 10.2166/wst.2019.415.

Tumlin, S., Gustavsson, D., Bernstad, A., Schott, S. (2014) Klimatpåverkan från avloppsreningsverk. *Svenskt Vatten Utveckling Rapport Nr 2014-02*, 2014.

Vogt, R., Knappe, F., Griegrich, J. & Detzel, A. (2002). *Ökobilanz Bio-abfallverwertung: Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Systemen zur Verwertung von biologisch-organischen Abfällen*. ErichSchmidt, Berlin, Germany.

VTT (2019) Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. LIPASTO – Suomen liikenteen pako- kaasupäästöjen ja energiakulutuksen laskentajärjestelmä. Viitattu: 28.5.2019. Saatavilla: [lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/](http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/)

VVY (2019). Lietteiden termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. *Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56*. Helsinki 2019.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., (2016). The ecoinvent database version 3. (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Saatavilla: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>. Viitattu 28.5.2019. Tietokannan versio 3.5.