



CO₂-balansen groengasketens

Vergisting en vergassing



CE Delft

Committed to the Environment

CO₂-balansen groengasketens

Vergisting en vergassing

Dit rapport is geschreven door:
Cor Leguijt, Harry Croezen, Anouk van Grinsven, Isabel Nieuwenhuijse

Delft, CE Delft, juni 2019

Publicatienummer: 19.180070.088

Biogas / Procestechnologie / Kooldioxide / Vergisten / Vergassen

Opdrachtgever: Groen Gas Nederland

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Cor Leguijt (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	6
2	Beschouwde ketens en gehanteerde methodiek	7
3	Resultaten	8
4	Bibliografie	11
A	Gebruikte afkortingen	13
B	Methodiek en afbakening	14
	B.1 CO ₂ -balansen - inleiding op hoofdlijnen	14
	B.2 De relevantie van broeikasgasbalansen, wettelijke kaders en vrijwillige regelingen	15
C	Mesofiele vergisting van RWZI-slib	19
	C.1 Beschouwde activiteiten	19
	C.2 Uitgangspunten voor vergister	20
	C.3 Uitgangspunten voor gasopwerking	20
	C.4 Resultaat	21
D	Varkensdrijfmest-vergisting	23
	D.1 Uitgevoerde analyse	23
	D.2 Resultaat	24
E	GFT-vergisting	26
	E.1 Uitgevoerde analyse	26
	E.2 Resultaat	27
F	Superkritische watervergassing	30
	F.1 Aangehouden uitgangspunten	30
	F.2 Beschouwde biomassa	33
	F.3 Resultaten	34
G	Houtvergassing	35
	G.1 Beschouwde systeemconfiguratie	35
	G.2 Gehanteerde procesparameters en geraadpleegde bronnen	35
	G.3 Globale evaluatieresultaten	37



Samenvatting

De ‘well-to-usage’ broeikasgasemissiereducties van groengasketens in veelgebruikte bronnen zoals www.CO2emissiefactoren.nl zijn momenteel niet compleet, of gebaseerd op verouderde praktijkwaardes. Co-vergisting levert in die bron bijvoorbeeld een reductie van ‘slechts’ 33% ten opzichte van de waarde voor aardgas in dezelfde lijst. De hedendaagse praktijk voor groengas is fundamenteel anders, zowel wat betreft vergistingsprocessen als wat betreft nieuwe processen zoals vergassing. Deze studie geeft weer een compleet en actueel beeld.

De emissiereductie van **vergistingsketens** varieert van 50-80%, afhankelijk van feedstock en toepassing, zie Tabel 1. Wanneer conform de Europese RED-rekenmethodiek ook het effect van vermeden emissies uit mestopslag wordt meegerekend, ligt het CO₂-eq.-emissiereductie-effect bij mestvergisting 183% punt hoger. Wanneer gebruik wordt gemaakt van CO₂-vastlegging (CCS/CCU) stijgt dit tot 90-136%¹. Ingeval daarnaast ook rekening wordt gehouden met de broeikasgasemissiereductie van bijproducten stijgt de range naar 149-223%².

De emissiereductie van **vergassingsketens** varieert van 75-97%, zie Tabel 1, waarbij de hoogst genoemde waarde geldt voor superkritische watervergassing³. Als ook bij de vergassingsketens gebruik wordt gemaakt van CO₂-vastlegging (CCS/CCU) stijgt dit tot 121-160%.

Zie het overzicht in Tabel 1.

¹ 278% als bij mestvergisting ook het effect van vermeden emissies uit mestopslag wordt meegenomen, conform EU RED-rekenmethodiek.

² 401% als bij mestvergisting ook het effect van vermeden emissies uit mestopslag wordt meegenomen, conform EU RED-rekenmethodiek.

³ Bij vergassing in superkritisch water kan de CO₂-emissiereductie conform inschatting van SCW-Systems in principe nog 150-200% punt hoger uitvallen wanneer de na methanisatie nog in het synthesesgas aanwezige CO₂ volledig kan worden benut als grondstof in bijvoorbeeld ‘groenbeton’ door reactie met olivijn. Daarbij is benutting van reactiewarmte in die synthesesreactie nog niet verdisconteerd.

Tabel 1 - Resultaten broeikasgasemissies en emissiereducties van groengasketens (zonder meetellen van effecten CCS en van uitgespaarde processen/producten)

Groengasproductietechniek en feedstocks	Broeikasgasemissies volgens RED benadering (kg CO ₂ -eq./GJ)			CO ₂ -reductie, geen CCS en geen uitgespaarde processen/producten		
	LNG-productie	H-gas voor HTL ⁴	G-gas voor distributienet	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet
Conventionele mesofiele vergisting						
GFT	23,4	16,8	14,6	68%	78%	80%
Varkensdrijfmest						
Zonder meetellen effect van vermeden emissies uit mestopslag	41,7	34,2	32,9	42%	52%	54%
Inclusief meetellen effect van vermeden emissies uit mestopslag	-89,8	-97,3	-98,5	225%	236%	237%
RWZI-slib	36,0	28,6	27,2	50%	60%	62%
Vergassing in superkritisch water						
Zeewier na eiwitextractie ⁵	8,5	1,9		88%	97%	
RWZI-slib	9,1	3,0		87%	96%	
Allotherme vergassing						
Stamhout	17,4	11,7		76%	84%	
Industriële bijproducten	16,4	10,6		77%	85%	
B-hout	17,8	12,1		75%	83%	
Referentiewaarde broeikasgasemissie	72	72	72			

⁴ HTL = hoofdtransportleidingnet.

⁵ Voor zeewier is slechts de energiecomponent bekeken. De additionele emissiereductie door bijvoorbeeld kweek en kort-cyclische CO₂ opname is daarbij niet meegenomen. Ook de CO₂-reductie door eiwitextractie is niet meegenomen (i.e. vervanging van dierlijke door plantaardige eiwitten uit zeewier). Dit vergt nadere studie.



1 Introductie

Bestaande en veelgebruikte overzichten van CO₂-kentallen, zoals [CO₂-emissiefactoren](#), hanteren verouderde ketenwaardes voor CO₂-emissies. Zo staat in die lijst bij energie-opwekking slechts twee voorbeelden. Het eerste voorbeeld is stortgas met een ketenwaarde van 0,398 kg CO₂-eq./Nm³ en het tweede voorbeeld is co-vergisting met een ketenwaarde (Well-To-Wheel, of, toepasselijker want ook toepasbaar buiten de transportsector: Well-To-Usage) van 1,26 kg CO₂-eq./Nm³. Bij stortgas levert dat een reductie van 79% op en bij co-vergisting levert dat een reductie van ‘slechts’ 33% ten opzichte van de waarde voor aardgas in dezelfde lijst. Stortgas wordt echter nog maar zeer beperkt geproduceerd in Nederland. En de waarde voor co-vergisting wordt in dat overzicht bepaald door geteelde gewassen als standaard voor de gebruikte ‘feedstock’ te nemen.

De hedendaagse praktijk voor groengas is fundamenteel anders. Geteelde gewassen uitsluitend ten behoeve van vergisting worden in Nederland nauwelijks meer toegepast (Velghe & Wierinck, 2013), mede onder druk van aangescherpte regelgeving en wensen van afnemers. Daarnaast zijn er nieuwe innovatieve processen en/of nieuwe conversie-technologieën voor groengasproductie in ontwikkeling.

Een kanttekening bij de in dit rapport gepresenteerde kentallen is nog dat praktijksituaties veelal maatwerk vergen bij het bepalen van precieze CO₂-emissiereductiecijfers, bijvoorbeeld omdat restwarmte van de installatie kan worden benut, of vanwege precieze feedstock-samenstelling.

Het doel van deze studie is drieledig:

- In de eerste plaats een actualisering van de CO₂-kentallen voor op vergisting en biogasopwerking gebaseerde productieroutes voor groengas⁶ en bio-LNG.
- In de tweede plaats een doorkijk naar de nabije toekomst in de vorm van CO₂-kentallen voor nu in ontwikkeling zijnde productieroutes, gebaseerd op vergassing van droge en natte biomassa.
- Door actualisering van deze CO₂-kentallen zijn er betere onafhankelijke gegevens beschikbaar om groengas te positioneren in de uitvoering van het Klimaatakkoord en de CO₂-gerelateerde beleidsinstrumenten.

⁶ NB: voor toepassing als bio-CNG geldt dat de laatste stappen in de keten bij groengas (zoals de compressie) gelijk zijn aan die bij gewoon aardgas.



2 Beschouwde ketens en gehanteerde methodiek

In deze studie worden drie verschillende gebruiksmogelijkheden voor groengas beschouwd:

1. Afzet op regionale gasdistributienetten.
2. Invoeding op het nationale hogedruk transportnetwerk (HTL; H-gas).
3. Afzet als (bio)LNG voor de transportsector.

Hiermee wordt het gehele spectrum aan groengasproducten gedekt⁷. Voor innovatieve vergassingsroutes zijn alleen de laatste twee afzetoepies beschouwd vanwege de verwachte schaalgrootte van die technologie.

Voor de bestaande productieroute voor groengas via vergisting zijn drie substraten beschouwd: GFT, varkensdrijfmest en RWZI-slib. De selectie is representatief voor de voornaamste grondstoffen voor groengasproductie met vergistingstechnieken. Daarnaast zijn groengasketens gebaseerd op vergassing in superkritisch water van zeewier en RWZI-slib beschouwd en allotherme vergassing van hout. Dit zijn in Nederland in ontwikkeling zijnde ketens, waarmee in potentie in de toekomst significante hoeveelheden groengas kunnen worden geproduceerd.

Qua berekeningsmethodiek is aangesloten bij de onder de Europese Renewable Energy Directive (RED) voorgeschreven methodiek omdat dit het wettelijk kader is waarbinnen de verschillende groengasroutes dienen te worden geëvalueerd. Er is daarnaast daar waar relevant geëvalueerd in hoeverre andere methodologische keuzes invloed hebben op de resulterende CO₂-ketenkentallen.

Nadere informatie over broeikasgasbalansmethodiek is opgenomen in Bijlage C.

⁷ NB: voor toepassing als bio-CNG geldt dat de laatste stappen in de keten bij groengas (zoals de compressie) gelijk zijn aan die bij gewoon aardgas.



3 Resultaten

In Tabel 2 is een overzicht gegeven van de broeikasgasemissies en de netto CO₂-eq.-emissiereductie voor de in deze studie beschouwde productieketens. De details van de berekeningen zijn opgenomen in de respectievelijke bijlages. De emissiereducties in Tabel 2 zijn bepaald zonder uitgespaarde emissies in processen en producten, en zonder toepassing van CCS, die het onderwerp zijn van andere tabellen.

Tabel 2 - Resultaten broeikasgasemissies en emissiereducties van groengasketens

Groengasproductietechniek en feedstocks	Broeikasgasemissies volgens RED benadering (kg CO ₂ -eq./GJ)			CO ₂ -eq.-reductie, geen CCS en geen uitgespaarde processen/producten		
	LNG-productie	H-gas voor HTL ⁸	G-gas voor distributienet	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet
Conventionele mesofiele vergisting						
GFT	23,4	16,8	14,6	68%	78%	80%
Varkensdrijfmest						
zonder meetellen effect van vermeden emissies uit mestopslag	41,7	34,2	32,9	42%	52%	54%
Inclusief meetellen effect van vermeden emissies uit mestopslag	-89,8	-97,3	-98,5	225%	236%	237%
RWZI-slib	36,0	28,6	27,2	50%	60%	62%
Vergassing in superkritisch water						
Zeewier na eiwitextractie ⁹	8,5	1,9		88%	97%	
RWZI-slib	9,1	3,0		87%	96%	
Allotherme vergassing						
Stamhout	17,4	11,7		76%	84%	
Industriële bijproducten	16,4	10,6		77%	85%	
B-hout	17,8	12,1		75%	83%	
Referentiewaarde broeikasgasemissie	72	72	72			

Er is uitgegaan van groengasproductie uit biogas middels gasscheiding met membranen. Bij vergassing is uitgegaan van CO₂-afscheiding met Selexol. De in Tabel 2 gepresenteerde CO₂-ketenentallen zijn inclusief gebruik van elektriciteit en hulpstoffen bij vergisting, vergassing en groengasproductie, en zijn inclusief procesemissies gerelateerd aan gebruik van biogas als brandstof voor de voor vergisting benodigde warmte. Bij vergisting van varkensdrijfmest is conform de RED CO₂-ketenentallenmethodiek ook rekening gehouden met vermeden emissies uit mestopslag.

⁸ HTL = hoofdtransportleidingnet.

⁹ Voor zeewier is slechts de energiecomponent bekeken. De additionele emissiereductie door bijvoorbeeld kweek en kort-cyclische CO₂ opname is niet meegenomen. Ook de CO₂-reductie door eiwitextractie is niet meegenomen (i.e. vervanging van dierlijke door plantaardige eiwitten uit zeewier). Dit vergt nadere studie.



Wanneer afvang en permanente opslag of vastlegging van de bij gas productie afgescheiden CO₂ mogelijk is, veranderen de CO₂-kentallen uit Tabel 2 naar de in Tabel 3 gepresenteerde waarden.

Bij vergassing in superkritisch water kan de CO₂-reductie conform inschatting van SCW-Systems in -principe nog 150-200% hoger uitvallen wanneer de na methanisatie nog in het synthesegas aanwezige CO₂ volledig kan worden benut als grondstof in 'groenbeton' door reactie met olivijn. Daarbij is benutting van reactiewarmte in die synthesesreactie nog niet verdisconteerd.

Tabel 3 - Resultaten broeikasgasemissies en emissiereducties van groengasketens, *inclusief* toepassing van CCS

Groengasproductietechniek en feedstocks	Broeikasgasemissies (kg CO ₂ -eq./GJ), <i>inclusief</i> CCS			CO ₂ -reductie, <i>inclusief</i> CCS of CO ₂ -benutting als grondstof		
	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet
Conventionele mesofiele vergisting						
GFT	-19,1	-25,8	-22,2	127%	136%	131%
Varkensdrijfmest (Inclusief meetellen effect van vermeden emissies uit mestopslag ¹⁰)	-124,5	-131,2	-127,5	273%	283%	278%
RWZI-slib	4,9	-1,7	1,7	93%	102%	98%
Vergassing in superkritisch water						
Zeewier na eiwitextractie	-13,0	-19,6		118%	127%	
RWZI-slib	-14,8	-20,9		121%	129%	
Allotherme vergassing						
Stamhout	-36,1	-41,8		150%	158%	
Industriële bijproducten	-37,2	-42,9		152%	160%	
B-hout	-35,7	-41,4		150%	158%	
Referentiewaarde broeikasgasemissie	72	72	72			

Bij GFT-vergisting wordt compost als waardevol bijproduct geproduceerd, terwijl bij vergisting van varkensdrijfmest de bemestende waarde van de drijfmest verbetert. Deze aspecten worden bij beoordeling van afvalverwerkingsroutes onder het Nederlandse afvalbeleid *wel*, maar onder de Europese RED *niet* meegenomen. Het *wel* meenemen geeft de in Tabel 4 gepresenteerde CO₂-kentallen.

¹⁰ Dit effect levert 183%punt CO₂-eq.-emissiereductie.



Tabel 4 - Resultaten broeikasgasemissies en emissiereducties van groengasketens, *inclusief* toepassing van CCS, en inclusief meerekenen van het CO₂-effect van de bijproducten

Groengasproductietechniek en feedstocks	Broeikasgasemissies (kg CO ₂ -eq./GJ), <i>inclusief</i> CCS			CO ₂ -reductie, <i>inclusief</i> CCS		
	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet
Conventionele mesofiele vergisting						
GFT	-35,6	-42,4	-38,7	149%	159%	154%
Varkensdrijfmest (Inclusief meetellen effect van vermeden emissies uit mestopslag ¹¹)	-212,6	-219,3	-215,6	395%	406%	401%

De gepresenteerde cijfers illustreren dat door de onder de huidige RED verplichte methodiek voor bepalen van CO₂-kentallen soms additionele emissiereducties buiten beeld blijven.

¹¹ Dit effect levert 183%punt CO₂-eq.-emissiereductie.

4 Bibliografie

- Aranda Almansa, G. & al, e., 2015. *ECN System for MEthanation (ESME)*. Petten, ECN.
- Bakker, B., 2016. *Bio-LNG on our way to a better climate, significant reduction of CO2 emissions in the transport sector*, sl: DMT Technology.
- CE Delft, 2013a. *Hoe duurzaam is biogas? : Evaluatie van biogasproductie en -gebruik vanuit ecologisch en economisch perspectief*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2013b. *Natural gas in transport : An assessment of different routes*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2017. *Investeren in energie- zuinige beluchting Dokhaven? : Integrale afweging kosten, milieuwinst en overige effecten*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2018d. *Verkenning BioLNG voor transport : Fact finding, marktverkenning, businesscases*, Delft: CE Delft.
- del Álamo, G. & al, e., 2015. *Implementation of bio-CCS in biofuels production*, Paris: IEA Bioenergy.
- F. Reinders, 2013. *Aanvulling Enexis op de Aanvullende Voorwaarden RNB Groen Gas Invoeders*, sl: Enexis.
- IEA Bioenergy, 2017. *Methane emissions from biogas plants Methods for measurement, results and effect on greenhouse gas balance of electricity produced*. [Online] Available at: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/Methane-Emission_web_end_small.pdf [Geopend 2019].
- ISSET, 2008. *Biogasaufbereitung zu Biomethan 6e Hanauer Dialog , Tagungsband*. Kassel, ISSET Universität Kassel.
- Lems, R. & Dirkse, E., 2010. *Biogas upgrading to green gas and vehicle fuel - Start-up and first results of two DMT-PWS® plants 15th European Biosolids and Organic Resources Conference www.european-biosolids.com*. sl, Aqua Enviro Technology Transfer.
- Munetsuna, H., Tamai, M., Noda, Y. & Matsumura, Y., 2011. Energy Balance of a Staged Process for the Supercritical Water Gasification of a hydrogen fermentation residue of food waste. *Journal of the Japan Institute of Energy*, Volume 90, p. 6.
- Rijksoverheid, 2016. Regeling van de Minister van Economische Zaken van 16 februari 2016, nr. WJZ/15079642, tot wijziging van de Regeling gaskwaliteit. *Staatscourant van het Koninkrijk der Nederlanden*, 2016(9333).
- STOWA, 2011. *Handboek slibvergisting*, Amersfoort: STOWA.
- STOWA, 2013. *Vraag en aanbod thermische energie op de rwzi*, Amersfoort: STOWA.
- STOWA, 2014. *Haalbaarheid van thermofiele slibgisting in Nederland*, Amersfoort: STOWA.
- STOWA, 2015. *Businesscase thermofiele slibvergisting*, Amersfoort: STOWA.
- STOWA, 2016. *Experimenteel onderzoek superkritisch vergassen van zuiveringslib*, Amersfoort: STOWA.
- STOWA, 2017. *Cenirelta: demonstratieproject Anammox in de hoofdstroom op RWZI Dokhaven*, Amersfoort: STOWA.



STOWA, 2018. *Supersludge: demonstratie van zuiveringslib in superkritisch water*, Amersfoort: STOWA.

Thunman, H., 2018. *GoBiGas demonstration - a vital step for a large-scale transition from fossil fuels to advanced biofuels and electrofuels*, Göteborg: Chalmers University of Technology.

Van der Meijden, C., 2010. *Development of the MILENA gasification technology for the production of Bio-SNG*, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

Velghe, F. & Wierinck, I., 2013. *Evaluatie van vergisters in Nederland, fase 2 Gent*, Gent: Organic Waste Systems.

Vogel, F., 2016. *Pilot-scale demonstration of the hydrothermal gasification of wet biomass*. Brugg, SCCER BIOSWEET.

Yakaboylu, O., 2016. *Supercritical Water Gasification of Wet Biomass: modelling and experiments*, Delft: TU Delft.



A Gebruikte afkortingen

CCS	CarbonCapture and Storage
CCU	CarbonCapture and Usage
CNG	Compressed Natural Gas
GFT	Groente-, Fruit- en Tuinafval
HRT	hydraulic residence time (hydraulische verblijftijd)
HTL	Hoofdtransportleidingnet (van gas)
LAP	Landelijk Afvalbeheer Plan
LAP	Landelijk Afvalbeheer Plan
LCA	LevensCyclusAnalyse
LNG	Liquefied Natural Gas
RED	Renewable Energy Directive
RWZI	Rioolwaterzuiveringsinstallatie



B Methodiek en afbakening

B.1 CO₂-balansen - inleiding op hoofdlijnen¹²

Een CO₂-balans is een gedeeltelijke LCA, waarin alleen emissies van broeikasgassen worden gekwantificeerd.

Een CO₂-balans omvat conform standaard LCA-methodiek vier stappen:

1. Vaststellen functionele eenheid.
2. Afbakening van beschouwde systeem.
3. Inventarisatie milieu-ingrepen (hier: broeikasgasemissies) over de binnen de afbakening vallende keten/processen.
4. Vertaling milieu-ingrepen naar bijdragen aan milieuthema's - hier: bijdragen aan klimaatverandering (uitgedrukt in CO₂-eq.).

Andere methodologische punten waarop fundamentele keuzes kunnen worden gemaakt betreffen:

- allocatie (hoe verdeel je milieubelasting wanneer er twee of meer producten zijn);
- definitie van 'eeuwigdurend' vastgelegde of opgeslagen koolstof (minimaal 100 jaar of 300 jaar).

Hieronder worden de verschillende aspecten kort besproken.

Functionele eenheid

Het product waarvoor de broeikasgasbalans wordt opgesteld. In deze studie zijn drie verschillende afzetoepies voor groengas beschouwd:

1. Afzet op regionale distributie aardgasnetten.
2. Invoeding op HTL (H-gas).
3. Afzet als LNG.

Deze opties dekken vrijwel het complete spectrum aan afzet opties voor groengas, inclusief productie van bio-CNG. Compressie van conventioneel aardgas of groengas tot CNG is niet onderscheidend.

Afbakening

In de meest uitgebreide vorm gehanteerde afbakening is ontleend aan de methodiek voor een consequential LCA, zoals gedefinieerd in de ISO-standaarden 14040/14044.

In een consequential LCA wordt niet alleen de productieketen voor een bepaald product beschouwd, maar worden ook indirecte effecten van activiteiten in de productieketen op de rest van het economisch systeem meegenomen. Bijvoorbeeld wanneer elektriciteitsproductie op basis van biomassa concurreert met bepaalde specifieke energiecentrales. Daarnaast worden in een consequential LCA zoals in elke LCA de aan die productieketen gerelateerde zijketens van gebruikte hulpstoffen als brandstoffen en additieven in chemische processen of rookgasreiniging beschouwd.

In een attributional LCA blijven indirecte effecten op het economisch systeem buiten beschouwing.

¹² Zie bijvoorbeeld Handleiding CO₂-waarden voor biobased grondstoffen volgens MJA3/MEE-methodiek.



In beide afbakeningen moet de productieketen in principe worden gevolgd vanaf de winning van de primaire grondstoffen tot het moment waarop alle materialen in de keten zijn omgezet in emissies, te storten afval en afzetbare producten.

B.2 De relevantie van broeikasgasbalansen, wettelijke kaders en vrijwillige regelingen

Broeikasgasbalansen worden in verschillende beleidskaders meegenomen als onderdeel van wettelijke eisenpakket:

- Renewable Energy Directive (RED) en de nationale implementaties;
- Landelijk AfvalbeheerPlan (LAP).

Daarnaast zijn er indicatoren als de CO₂-prestatieladder. Deze indicatoren zijn te gebruiken door bedrijven om in vrijwillige rapportages hun CO₂-voetafdruk te rapporteren.

RED (Renewable Energy Directive)

De Renewable Energy Directive is een Europese wet waarin harde doelstellingen zijn vastgelegd voor de bijdrage van hernieuwbare energie in nationale energiesysteem van lidstaten en van biobrandstoffen in transportbrandstoffenpalet in bijzonder. Sinds december 2018 is de RED II van kracht geworden. Implementatie op lidstaat niveau moet nog plaatsvinden.

Conform RED II moeten biobrandstoffen in 2030 minimaal 10% van de totale geconsumeerde hoeveelheid transportbrandstoffen c.q. voor transport geconsumeerde energie uitmaken. Alleen die biobrandstoffen mogen meetellen die ten opzichte van conventionele brandstoffen 60% lagere broeikasgasemissie over de keten hebben. RED (zowel RED I als de huidige RED II) bevat ook een methodiekbeschrijving hoe broeikasgasemissie per eenheid biobrandstoffen dient te worden bepaald en bevat ook wettelijk vastgelegde broeikasgasemissies voor de conventionele referentie (de comparator).

LAP (Landelijk AfvalbeheerPlan)

In het Landelijk Afval beheerplan (LAP) wordt middels de minimumstandaard en de daaraan gerelateerde milieubelasting per type afval een kader gegeven voor de mogelijkheden voor verwerking.

Doel van het LAP - en in het Europese afvalbeleid - is te komen tot een zo hoogwaardig mogelijke benutting van afval en reststoffen met optimaal hergebruik van reststoffen als grondstof of product en een zo laag mogelijke netto milieubelasting gerelateerd aan verwerking (vaak aangeduid als zoveel mogelijk cascadering).

De minimumstandaard is een reststof- of afvalverwerkingstechniek waarvan de aan verwerking gerelateerde milieubelasting wordt beschouwd als de maximaal wenselijke mate van milieubelasting. Voor vergistbare reststromen is dit bijvoorbeeld compostering. Is de minimumstandaard herverwerking, dan mag de reststroom niet worden vergist of gecomposteerd - tenzij door middel van een milieuanalyse aannemelijk kan worden gemaakt dat deze routes vergelijkbaar of minder milieubelasting veroorzaakt als de minimumstandaard en in minimaal vergelijkbare mate bijdraagt aan het minimaliseren van het gebruik van uitputbare grondstoffen.

In de volgende subparagrafen is kort weergegeven welke methodologische keuzes worden gehanteerd.



B.2.1 Broeikasgasbalansen in Renewable Energy Directive (RED)

Belangrijkste kenmerken

In de RED wordt uitgegaan van een attributional LCA-benadering. De beschouwde keten begint:

- voor reststromen bij de inzameling van de te verwerken biomassa;
- voor akkerbouwgewassen en stamhout uit bos bij de gewasteelt.

De keten eindigt bij het afzetten van de op basis van de biomassa geproduceerde secundaire energiedrager - elektriciteit, warmte, gas of vloeibare brandstof.

Allocatie vindt plaats op basis van de stookwaarde van hoofdproduct en eventuele bijproducten. Daarnaast wordt een economische afkapregel gehanteerd: er wordt niet gealloceerd naar bijproducten met een - gemiddeld over de EU - beperkte of marginale economische waarde (zoals stro)¹³.

Verwerking van reststromen worden in de 'RED-methodiek' buiten beschouwing gelaten. In de gestandaardiseerde ketenanalyses voor groengasproductie op basis van reststromen als mest en organisch afval en op basis van maïs wordt bijvoorbeeld de behandeling van afvalwater en eventuele verdere verwerking van digestaat niet meegenomen. Reststromen worden als het ware als bijproducten zonder economische waarde benaderd. De gehanteerde afbakening sluit op dit aspect niet volledig aan bij de ISO-normen waarin een 'cradle-to-grave' methodiek wordt voorgeschreven en alle massastromen worden gevolgd tot ze zijn omgezet in afzetbare producten, te storten afval of emissies naar de biosfeer.

In het algemeen geldt dat conform de attributional benadering vermeden emissies NIET worden meegenomen. In drie uitzonderingsgevallen is dat wel mogelijk:

1. in de vorm van CO₂-opslag of CO₂-vastlegging in geologische opslagreservoirs;
2. in de vorm van additionele CO₂-vastlegging in bodem en/of vegetatie (categorieën ESCA en LUC in Biograce I en II);
3. in de vorm van vermeden emissies uit mestopslag¹⁴ (alleen in Biograce II - voor elektriciteit, warmte).

Broeikasgasberekening

Broeikasgasemissies door de productie en het gebruik van biobrandstoffen en vloeibare biomassa moeten conform Richtlijn 2009/28/EG en conform de werkwijze zoals opgenomen in COM (2010)11 en SWD(2014) 259 als volgt worden berekend:

$$E = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee}$$

¹³ Stro is in Nederland een bijproduct met een significante waarde van € 100-150 per ton.

¹⁴ Berekend conform de rekenregels voor emissieberekeningen voor mestopslag zoals ontwikkeld door CBS en WUR in het kader van de jaarlijkse broeikasgasemissie rapportages. De gehanteerde uitgangspunten zijn te vinden in het rapport 'hoe duurzaam is biogas' uit 2013.



Waarbij:

- E = de totale emissies ten gevolge van het gebruik van de brandstof uitgedrukt in gram CO₂-equivalent per MJ-brandstof [gCO₂-eq./MJ];
- e_{ec} = emissies ten gevolge van de teelt of het ontginnen van grondstoffen is;
- e_l = de op jaarbasis berekende emissies van wijzigingen in koolstofvoorraden door veranderingen in landgebruik;
- e_p = emissies ten gevolge van verwerkende activiteiten;
- e_{td} = emissies ten gevolge van vervoer en distributie;
- e_u = emissies ten gevolge van de gebruikte brandstof;
- e_{sca} = emissie of emissiereductie door verandering van koolstofaccumulatie in de bodem als gevolg van verandering in landbouwbeheer;
- e_{ccs} = emissiereductie door het afvangen en geologisch opslaan van koolstof;
- e_{ccf} = emissiereductie door het afvangen en vervangen van koolstof;
- e_{ee} = emissiereductie door extra elektriciteit door warmtekrachtkoppel.

Vastlegging van CO₂ in minerale producten zou kunnen worden beschouwd als een vorm van eeuwigdurende of zeer langdurige vastlegging en een variant op geologische opslag of vastlegging in een biotoop.

Voor uitvoeren van berekeningen kan gebruik worden gemaakt van de BioGrace spreadsheetmodel¹⁵.

De BioGrace-tools zijn Europees geharmoniseerde berekeningsinstrumenten voor de broeikasgasemissies en zijn geaccrediteerd onder RED, Better Biomass en Nederlandse wetgeving.

B.2.2 Broeikasgasbalansen in LAP

De in het LAP toe te passen mLCA methodiek is gericht op het doorrekenen van een bepaalde verwerkingsroute voor een afvalstroom en om deze te vergelijken met alternatieve routes of met de minimumstandaard verwerkingsroute voor de betreffende afvalstroom. De mLCA richt zich op het in kaart brengen van de milieudruk vanaf het moment van afdanking en volgt het afval vervolgens tot het volledig is omgezet in emissies, te storten afval en afzetbare producten.

In de mLCA methodiek dienen alle veranderingen in milieubelasting ten opzichte van referentie of minimum standaard te worden verdisconteerd. Daarbij wordt bijvoorbeeld voor alle afzetbare bijproducten uitgegaan van het concept van vermeden emissies, ook voor bijproducten zonder benutbare energie-inhoud. Bij toepassing van herbruikbare nutriënten uit mest of GFT bijvoorbeeld wordt de door substitutie van primaire kunstmest uitgespaarde milieubelasting verdisconteerd.

Bij nuttige toepassing van compost moet rekening gehouden worden met veenvervanging.

Standaard wordt uitgegaan van de proceskaarten zoals vastgelegd in de Ecoinvent 3.3-database (of een meer recente versie wanneer die beschikbaar is). Verder moet voor het modelleren van de verschillende (achtergrond)processen uitgegaan worden van de volgende uitgangspunten:

- Voor de vermeden warmte wordt specifiek gebruik gemaakt van de Ecoinvent proceskaart 'Heat, natural gas, at industrial furnace > 100 kW/RER'.
- Voor de vermeden opgewekte conventionele elektriciteit bij verbranding wordt bij voorkeur uitgegaan van de meest recente gemiddelde Nederlandse elektriciteitsmix op

¹⁵ Zie: [BIOGRACE website](#)



basis van de stroometiketten. De modellering moet gebeuren op basis van energiedrager voor de elektriciteitsmix. Eén en ander betekent dat andere standaard emissiefactoren worden voorgeschreven als vastgelegd in de Biograce spreadsheets.

B.2.3 Deze studie

De functionele eenheid

Zoals uitgelegd in voorgaand hoofdstuk betreft werkterrein van Groen Gas Nederland productie en inzet van groengas. Groengas is de duurzame variant van aardgas. Aardgas bestaat in de praktijk voornamelijk uit methaan. Groen Gas Nederland focust strikt op groengas geproduceerd op basis van biomassa¹⁶. Inzet betreft alle toepassingen waarvoor nu fossiel aardgas wordt ingezet:

- als brandstof in stationaire toepassingen;
- als brandstof in mobiele toepassingen - in gecomprimeerde vorm (CNG of vloeibare/vorm);
- als grondstof in chemische processen (methanol, ammoniak, CO, etc.).

Alle drie worden beschouwd in deze studie.

Afbakening, allocatie en standaard emissiefactoren

Voor genoemde aspecten wordt zoveel mogelijk aangesloten bij de methodologie van de Renewable Energy Directive omdat de RED als Europese wet gezaghebbender is en omdat de focus van de studie ligt bij productie van groengas, niet per se bij verwerking van reststromen. Waar relevant wordt indicatief aangegeven wat voor verschil verdiscontering van in het LAP wel, maar in RED niet meegenomen aspecten als afzet van compost bij GFT-vergisting voor invloed heeft op de netto broeikasgasbalans.

¹⁶ Methaan geproduceerd op basis van CO₂ van biologische oorsprong en waterstof uit hernieuwbare bronnen valt in principe buiten werkterrein GGN.



C Mesofiele vergisting van RWZI-slib

In deze studie worden drie verschillende afzetoepies voor groengas beschouwd:

1. Afzet op regionale distributie aardgasnetten.
2. Invoeding op HTL (H-gas).
3. Afzet als LNG.

Met oog op het doel en beleidskader is zoveel mogelijk aangesloten bij de methdologie voor broeikasgasemissies vastgelegd in de Renewable Energy Directive. Er is bijvoorbeeld uitgegaan van allocatie op basis van stookwaarde van productfracties met een economisch relevante waarde en omvang. Praktisch gezien is daarom alleen gealloceerd naar geproduceerd groengas.

Omdat slibvergisting standaardtechnologie is bij grotere RWZI's is er geen vergelijking gemaakt met een referentie en zijn emissies elders op de RWZI buiten beschouwing gelaten, ook waar het emissies betreft gerelateerd aan zuivering van afvalwater van het vergistingsproces en de interne logistiek van digestaat.

C.1 Beschouwde activiteiten

In de ketenanalyse voor RWZI-slib vergisting wordt aangenomen dat geproduceerd ruw gas na beperkte compressie worden ontzwaveld (Thiopaq-proces + actief kool filter) en gedroogd (moleculaire zeef), waarna een deel van het behandelde biogas en voor regeneratie van de moleculaire zeef gebruikte biogas worden verbrand in een CV-ketel voor productie van de voor vergisting benodigde warmte.

Het resterende droge en ontzwavelde wordt met multimembraan systeem gescheiden in een CO₂-rijke fractie en een biomethaanfractie.

Bij gebruik van een multimembraansysteem wordt het gas gecompriemd tot 20-25 bar(a) voorafgaand aan scheiding. De biomethaanproductfractie heeft volgens de technologie-leverancier dezelfde druk als het ingaande gecompriemde biogas. Het biomethaan kan zonder verdere compressie op een regionaal distributienet worden geïnjecteerd, injectie op het HTL vergt additionele compressie. Bij LNG-productie wordt de biomethaan middels koeling met een externe koelcyclus gecondenseerd tot een vloeistof. Er is aangenomen dat bij afzet als LNG boil-off tijdens tussentijdse opslag op productie-locatie wordt voorkomen.

Er is in de analyse geen aandacht besteed aan optimalisatie, bijvoorbeeld door gebruik van de bij biogascompressie vrijkomende en weg te koelen warmte als warmtebron voor de vergister (of een ander proces binnen de RWZI). Ook is geen rekening gehouden met de potentie om de biomethaan bij toepassing van multimembraanscheiding al significant te koelen middels smoren over een expansieklep (Joules-Thomson effect).



C.2 Uitgangspunten voor vergister

Voor het eigen gebruik aan biogas voor het op temperatuur houden van het vergistingsproces is uitgegaan van de relatieve warmtebehoefte opgegeven in STOWA 2013-03 voor modelzuiveringen. Volgens deze bron is de warmtebehoefte voor de vergister 25% van de (onderste) verbrandingswaarde van het bij slibvergisting geproduceerde ruwe biogas.

In de studie is aangenomen dat bij groengasproductie de warmtebehoefte wordt gedekt door verbranding van een deel van het ruwe biogas in een CV-ketel met een rendement van 95% (STOWA 2014-23). In de SDE+-regeling wordt hetzelfde percentage voor eigen gebruik aangehouden, zei het niet gecorrigeerd voor het ketelrendement.

Er is verder een eigen gebruik van 115 kWh_e/ton d.s. aan slib aangehouden, gebaseerd op een gemiddeld energiegebruik voor gas inblazen zoals gegeven in het Handboek Vergisting en uitgaande van een verblijftijd van slib van 27 dagen bij een droge stof concentratie van 4,20%.

Emissies van methaan en lachgas uit de vergister of gasreiniging zijn verwaarloosd. Conform een studie voor EIA (IEA Bioenergy, 2017) zijn deze emissies bij een goed beheerde vergister verwaarloosbaar.

C.3 Uitgangspunten voor gasopwerking

Aangenomen is dat het ruwe biogas voorafgaand aan scheiding in methaan en CO₂ eerst wordt ontzwaveld en gedroogd middels Thiopaq-proces met nageschakeld actieve kool filter en een PSA. Er is aangenomen dat het ruwe biogas in beperkte mate (tot 2 bar(a)) wordt gecompriemd om de drukval over beide systemen te kunnen overbruggen en om voldoende druk op het gedroogde biogas te hebben voor PSA-regeneratie.

De voor een multimembraansysteem aangehouden parameters zijn samengevat in Tabel 5.

Tabel 5 - Voor gasscheidingstechnieken aangehouden parameters

	Multimembraan (DMT)
– Druk (bar(a))	20-25
– Recycle	40%
– Rendement CH ₄ isolatie	99,5%
– CO ₂ -concentratie in methaan concentraat	1,5%
– Specifiek energiegebruik	
a) Elektriciteit, kWh _e /Nm ³ biogas	0,21
b) Warmte, GJ/ton CO ₂	

Voor compressie naar de genoemde drukken is steeds uitgegaan van een isentroop rendement van 75% voor de compressor en 98% voor de elektromotor.

Voor LNG-productie is uitgegaan van een specifiek elektrisch gebruik van 0,55 kWh_e/Nm³ biomethaan, zoals ook aangehouden in een studie voor het Havenbedrijf Rotterdam en Nationale LNG Platform (CE Delft, 2018d).

Bij het Thiopaq-proces is uitgegaan van een natronloog (100%) consumptie van 0,44 kg NaOH/kg S. Er is aangenomen dat de mate waarin zwavel uit slib wordt vrijgemaakt tijdens vergisting evenredig is met de mate van afbraak van de organische stof (ongeveer

40 gew%)¹⁷. Er is verder rekening gehouden met de mate waarin H₂S bij de in de vergister heersende pH is gedissocieerd en de mate waarin niet-gedissocieerde H₂S is opgelost in de waterfase.

Consumptie van actieve kool is verwaarloosd. Met het Thiopaq-proces kunnen H₂S-restconcentraties van enkele tientallen mg/Nm³ biogas worden gehaald, waardoor consumptie van actieve kool in het politiefilter minimaal wordt.

Ook consumptie van FeCl₃ voor vastlegging van fosfaat en zwavel en gebruik van elektrolyt voor slibontwatering na vergisting zijn buiten beschouwing gelaten in verband met het globale karakter van de in deze studie uitgevoerde analyses.

C.4 Resultaat

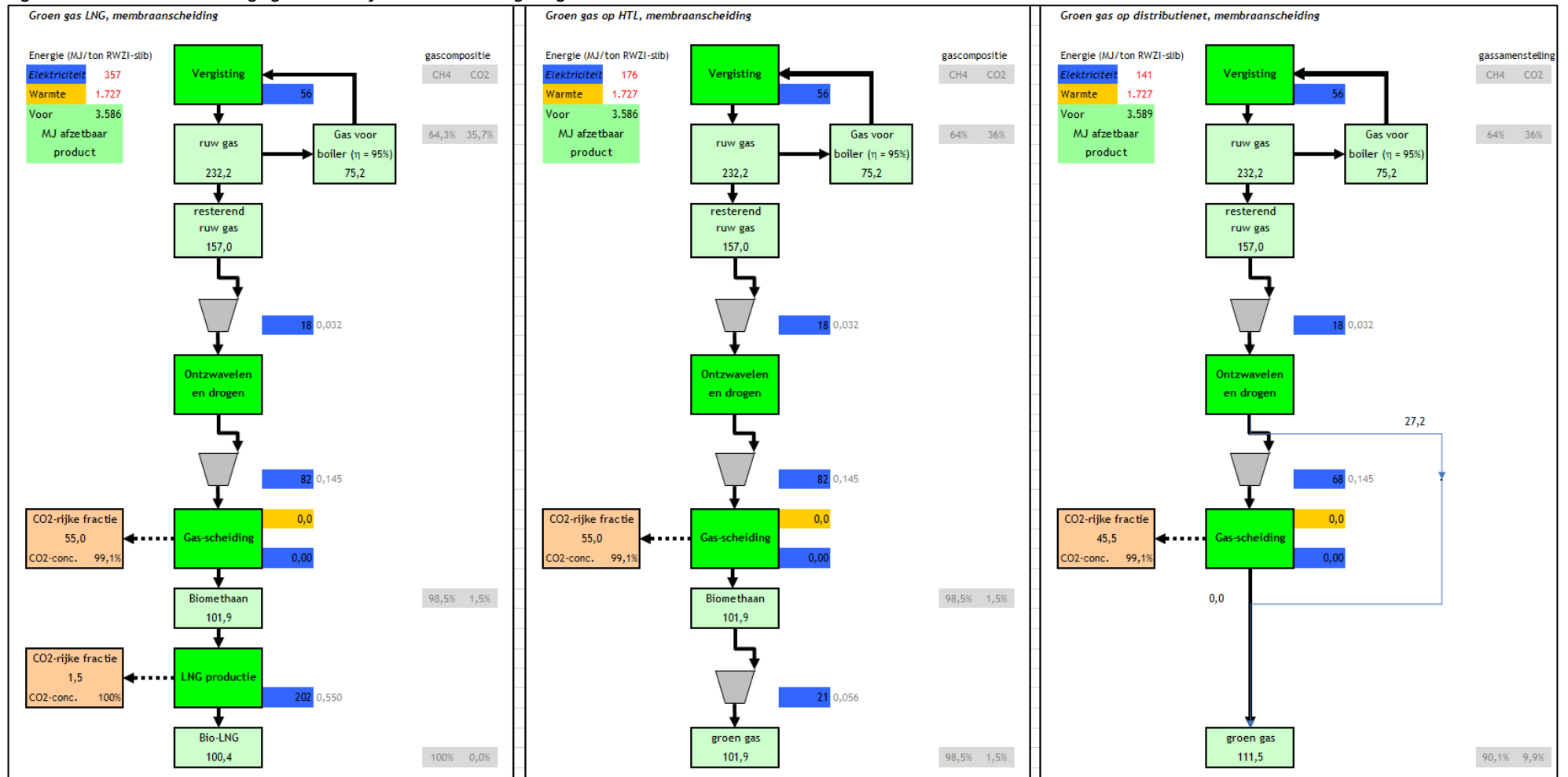
De resulterende balans en energiegebruiken zijn gegeven in Figuur 1. De resulterende broeikasgasemissie per eenheid slib is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 - Broeikasgasemissie per kg droog slib en per eenheid geleverd product bij mesofiele vergisting

	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet
RED afbakening	Kg CO ₂ -eq. /kg d.s. slib	Kg CO ₂ -eq /kg d.s. slib	Kg CO ₂ -eq. /kg d.s. slib	Kg CO ₂ -eq./GJ productgas	Kg CO ₂ -eq. /GJ productgas	Kg CO ₂ -eq. /GJ productgas
Vergisting	76,41	76,41	76,41	21,3	21,3	21,3
Ontzwavelen en drogen	3,27	3,27	3,27	0,9	0,9	0,9
Gasscheiding	41,61	15,02	9,92	11,6	4,2	2,8
				33,8	26,4	25,0

¹⁷ Een alternatieve benadering kan zijn om uit te gaan van de mate waarin eiwitten in de vergister worden afgebroken.

Figuur 1 - Massabalans en energiegebruiken bij mesofiele slibvergisting



Cijfers in lichtgroene kaders in Nm³/ton d.s. aan RWZI-slib.

D Varkensdrijfmest-vergisting

D.1 Uitgevoerde analyse

Voor de broeikasgasbalans inschatting voor varkensdrijfmest is uitgegaan van een eerdere, in het kader van de studie ‘Hoe duurzaam is biogas?’ uitgevoerde analyse. In de analyse in deze studie is net als in eerder uitgevoerde studie vergeleken met opslag en uitrijden van onbehandelde drijfmest.

In de broeikasgasbalans zijn behalve emissies gerelateerd aan het vergistingsproces zelf en indirecte emissies gerelateerd aan gebruik van elektriciteit en additieven ook emissies gerelateerd aan het toedienen van mest en digestaat beschouwd (zie Tabel 7). Daarbij is ook rekening gehouden met de betere beschikbaarheid van stikstof in digestaat vergeleken met onvergiste mest - een aspect dat onder de RED-methodologie niet wordt verdisconteerd.

Tabel 7 - Broeikasgasemissies bij opslag en toediening van onvergiste en vergiste mest (alle cijfers in kg/ton varkensdrijfmest)

	Mestvergisting				Uitrijden sec			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Emissies tussenopslag		0,08	0,0019	2,6	0,0	1,62	0,0431	53,4
Emissies vergister:				0,0				0,0
– lekverliezen;			0,0194	5,8				0,0
– biogas in ketel;	0,0	0,00	0,0000	0,0				0,0
– elektriciteit.	2,2	0,00	0,0001	2,3				0,0
Transport mest	0,8	0,00	0,0000	0,8	0,8	0	0	0,8
Werktuig-emissies uitrijden	1,0	0,00	0,0000	1,0	1,0	0	0	1,0
Emissies toediening			0,16	47,3			0,25	75,0
Uitgespaarde N-kunstmest productie	-5,7	-0,01	-0,0042	-7,3				0,0
Uitgespaarde inzet N-kunstmest			-0,03505	-10,4				0,0
	-1,7	0,07	0,14	42,0	1,8	1,62	0,29	130,2

In deze studie zijn net als bij andere substraten drie verschillende afzetoepies voor groengas beschouwd:

1. Afzet op regionale distributie aardgasnetten.
2. Invoeding op HTL (H-gas).
3. Afzet als LNG.

Er is daarnaast net als in andere ketens uitgegaan van ontzwavelen met Thiopaq-proces, drogen van biogas middels een moleculaire zeef en gasscheiding met een membraan-installatie. De voor een multimembraansysteem aangehouden parameters zijn samengevat in Tabel 8.

Tabel 8 - Voor gasscheidingstechnieken aangehouden parameters

	Multi membraan (DMT)
Druk (bar(a))	20-25
Recycle	40%
Rendement CH ₄ isolatie	99,5%
CO ₂ -concentratie in methaan concentraat	1,5%

Voor compressie naar de genoemde drukken voorafgaand aan membraanscheiding is steeds uitgegaan van een isentroop rendement van 75% voor de compressor en 98% voor de elektromotor.

Voor LNG-productie is uitgegaan van een specifiek elektrisch gebruik van 0,55 kWh/Nm³ biomethaan, zoals ook aangehouden in een studie voor het Havenbedrijf Rotterdam en Nationale LNG Platform (CE Delft, 2018d). Voor injectie van groengas op het HTL is rekening gehouden met additionele compressie na membraanscheiding.

Bij het Thiopaq-proces is uitgegaan van een natronloog (100%) consumptie van 0,44 kg NaOH/kg S. Er is aangenomen dat de mate waarin zwavel wordt vrijgemaakt tijdens vergisting evenredig is met de mate van afbraak van de organische stof. Er is verder rekening gehouden met de mate waarin H₂S bij de in de vergister heersende pH is gedissocieerd en de mate waarin niet-gedissocieerde H₂S is opgelost in de waterfase.

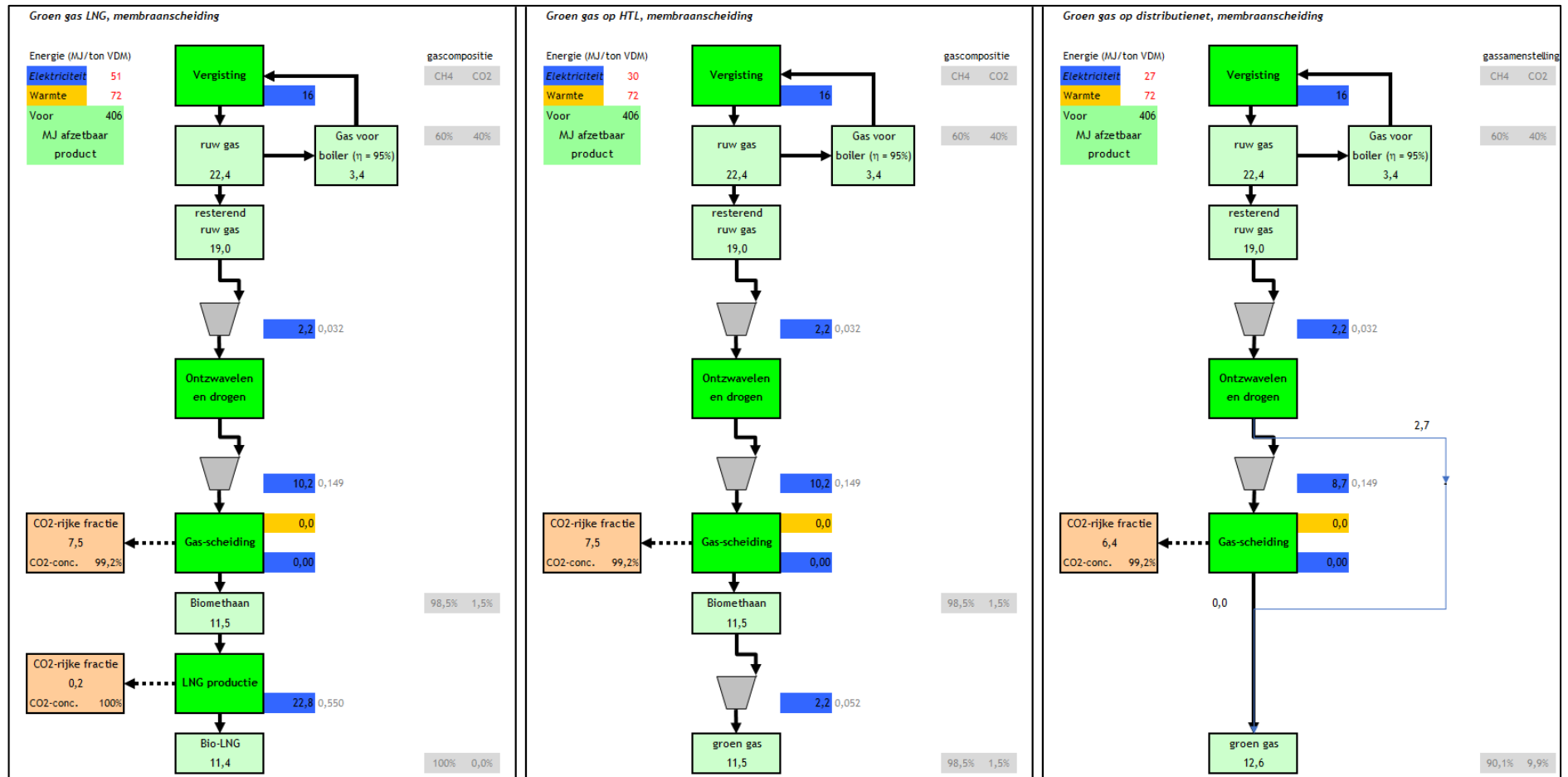
D.2 Resultaat

De resulterende balans en energiegebruiken zijn gegeven in Figuur 2. De resulterende broeikasgasemissie per eenheid varkensdrijfmest is weergegeven in Tabel 9. In de cijfers in Tabel 9 is vergelijking met opslag en toepassing van ongegiste mest (zie Tabel 7) verdisconteerd, waardoor de cijfers voor vergisting negatief zijn.

Tabel 9 - Broeikasgasemissie per ton varkensdrijfmest en per eenheid geleverd product bij mesofiele vergisting

	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet	LNG-productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributienet
RED afbakening	Kg CO ₂ -eq./ ton VDM	Kg CO ₂ -eq./ton VDM	Kg CO ₂ -eq./ ton VDM	Kg CO ₂ -eq./GJ productgas	Kg CO ₂ -eq. /GJ productgas	Kg CO ₂ -eq. /GJ productgas
Vergisting	-42,67	-42,67	-42,67	-105,1	-105,1	-105,0
Ontzwavelen en drogen	1,37	1,37	1,37	3,4	3,4	3,4
Gasscheiding	4,85	1,81	1,28	11,9	4,5	3,1
				-89,8	-97,3	-98,5

Figuur 2 - Massabalans en energiegebruiken bij mesofiele vergisting van varkensdrijfmest VDM



Cijfers in lichtgroene kaders in Nm³/ton varkensdrijfmest.

E GFT-vergisting

E.1 Uitgevoerde analyse

De broeikasgasanalyse voor GFT-vergisting is grotendeels gebaseerd op eerder uitgevoerde LCA's van IVAM en Grontmij. Omdat GFT-vergisting met navolgende compostering één van de twee conventionele verwerkingsroutes voor apart ingezameld GFT-afval betreft, is geen vergelijking van deze route met een referentie gemaakt.

Conform deze studies is rekening gehouden met het voorafgaand aan vergisting opschonen van GFT en het nacomposteren van digestaat voor productie van afzetbare compost. Compostering, composttoepassing en het opschonen van GFT met verbranding van afgescheiden vervuiling met energierterugwinning wordt in de Biograce spreadsheets niet meegenomen.

Om een analyse voor een consistent systeem te kunnen uitvoeren is echter wel een aangepaste massabalans opgesteld, waarbij afbraak van organische stof in vergisting en navolgende compostering van organisch materiaal modelmatig zijn uitgewerkt en consistent zijn gemaakt (zie Tabel 10) met samenstellingsgegevens voor nagecomposteerd digestaat, biogasopbrengsten en met de warmtebehoefte bij compostering.

Tabel 10 - Massabalans voor vergisting en compostering van GFT

	Relatieve omvang productfractie	Aanhang end H ₂ O	Nm ³ /ton a.r.	% d.s.	% o.s. van d.s.	o.s. in d.s.	As in d.s.	vol% CH ₄	kg o.s./ton GFT afgebroken
GFT aangeleverd	1,0	61,0%		39%	59%	23,0%	16,0%		
GFT opgeschoond	95%								
Reststroom voor AVI	5,0%	2,0%		3,0%		2,3%	0,8%		
Biogas (bruto)			100,0					55%	128
Digestaat ongecomposteerd						8,0%	15,2%		
Digestaat ontwaterd	52%	28,4%		45%		8,0%	15,2%		
Digestaat gecomposteerd	31%	10,4%		66%	25%	5,0%	15,2%		
Verwijderd water		18,0%							

Voor verbranding van de bij opschonen afscheiden reststroom is uitgegaan van de huidige gemiddelde thermisch en elektrisch rendement van respectievelijk 27,6 en 17,4%. Bij toepassing van compost is rekening gehouden met vervanging van veen en kunstmest en met een bijdrage van compost aan opbouw van organische stof in de bodem.

In deze studie zijn net als bij andere substraten drie verschillende afzetoepies voor groen-gas beschouwd:

1. Afzet op regionale distributie aardgasnetten.
2. Invoeding op HTL (H-gas).
3. Afzet als LNG.

Er is daarnaast net als in andere ketens uitgegaan van ontzwavelen met Thiopaq-proces, drogen van biogas middels een moleculaire zeef en gasscheiding met een membraan-installatie. De voor een multimembraansysteem aangehouden parameters zijn samengevat in Tabel 11.

Tabel 11 - Voor gasscheidingstechnieken aangehouden parameters

	Multi membraan (DMT)
Druk (bar(a))	20-25
Recycle	40%
Rendement CH ₄ isolatie	99,5%
CO ₂ -concentratie in methaan concentraat	1,5%

Voor compressie naar de genoemde drukken voorafgaand aan membraanscheiding is steeds uitgegaan van een isentropisch rendement van 75% voor de compressor en 98% voor de elektromotor.

Voor LNG-productie is uitgegaan van een specifiek elektrisch gebruik van 0,55 kWh/Nm³ biomethaan, zoals ook aangehouden in een studie voor het Havenbedrijf Rotterdam en Nationale LNG Platform (CE Delft, 2018d). Voor injectie van groengas op het HTL is rekening gehouden met additionele compressie na membraanscheiding.

Bij het Thiopaq-proces is uitgegaan van een natronloog (100%) consumptie van 0,44 kg NaOH/kg S. Er is aangenomen dat de mate waarin zwavel wordt vrijgemaakt tijdens vergisting evenredig is met de mate van afbraak van de organische stof. Er is verder rekening gehouden met de mate waarin H₂S bij de in de vergister heersende pH is gedissocieerd en de mate waarin niet-gedissocieerde H₂S is opgelost in de waterfase.

E.2 Resultaat

De geschatte broeikasgasemissies voor GFT-verwerking en toepassing van geproduceerde compost zijn weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12 - Emissies van broeikasgassen bij vergisten, composteren en composttoepassing (alle cijfers in kg/ton GFT)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -eq.
Transport GFT	0	0,00	0,0000	0,03
Vergisting:				
– elektriciteit;	13	0,01	0,0005	0,0900
– biogas in ketel voor warmte;	0	0,12	0,0005	
– electrolyt.				
	13	0,13	0,0010	16,23
Compostering:				
– elektriciteit;	8	0,01	0,0003	
– procesemissies.				



	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ -eq.
a) CH ₄		0,39		
b) N ₂ O			0,0496	
	8	0,40	0,0499	32,37
Verbranding residu:				
– transport naar AVI;	0	0,00	0,0000	
– Geproduceerd:				
a) Warmte	-10	-0,03	-0,0002	
b) Elektriciteit	-12	-0,01	-0,0005	
– CO ₂ -emissie plastic fractie	18			
	-2	-0,04	-0,0007	-3,75
Compostafzet:				
– composttransport;	1,9	0,00	0,0000	
– C-vastlegging;	-7			
– uitsparen veen.				
a) Veenaanvoer	-1,2	0,00	0,0000	
b) Energiegebruik winning	-0,2	0,00	0,0000	
c) Emissie CO ₂ door veenoxidatie	-18			
– Uitsparen KAS met 27% N	-18	-0,05	-0,0134	
– Uitsparen TSP met 45% P ₂ O ₅	-1	0,00	0,0000	
– Uitsparen K ₂ O met 60% K ₂ O	-1	0,00	0,0000	
– Netto N ₂ O emissie bij toepassing			0,0204	
Als organische meststof				
	-46,0	-0,05	0,0069	-45,15

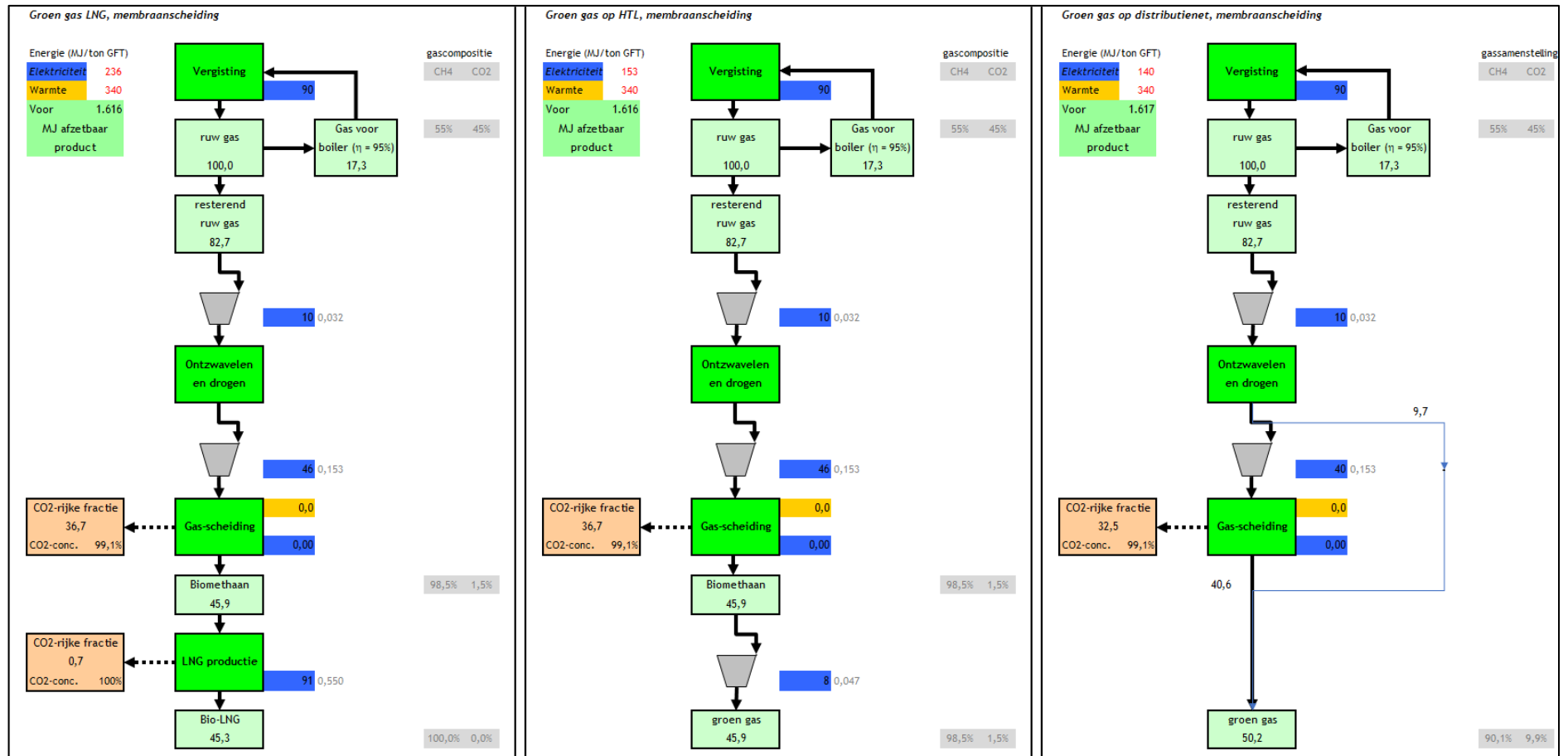
De resulterende balans voor biogas en energiegebruiken zijn gegeven in Figuur 3. De resulterende broeikasgasemissie per eenheid GFT is weergegeven in Tabel 13.

Tabel 13 - Broeikasgasemissie per ton GFT en per eenheid geleverd product bij mesofiele vergisting

	LNG- productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributie- net	LNG- productie	H-gas voor HTL	G-gas voor distributie- net
RED afbakening	Kg CO ₂ -eq. /kg d.s. slib	Kg CO ₂ - eq./kg d.s. slib	Kg CO ₂ -eq. /kg d.s. slib	Kg CO ₂ - eq./GJ productgas	Kg CO ₂ -eq. /GJ productgas	Kg CO ₂ -eq. /GJ productgas
Vergisting	16,23	16,23	16,23	10,0	10,0	10,0
Ontzwavelen en drogen	1,47	1,47	1,47	0,9	0,9	0,9
Gasscheiding	34,63	22,44	20,51	21,4	13,9	12,7
				32,4	24,9	23,6



Figuur 3 - Massabalans en energiegebruiken bij mesofiele vergisting van GFT



Cijfers in lichtgroene kaders in Nm³/ton GFT.

F Superkritische watervergassing

In deze bijlage is een indicatieve broeikasgasbalans opgesteld voor vergassing in superkritisch water.

De opgestelde broeikasgasbalans is indicatief vanwege de huidige stand der techniek. Ervaringen bij technologie-ontwikkelaars in Nederland (bijvoorbeeld SCW-Systems en Supersludge initiatief) en in het buitenland zijn nog zeer beperkt, ook al lijkt de ontwikkeling bij diverse partijen zeer snel te gaan.

Ook internationaal zijn praktische ervaringen met vergassing in superkritisch water beperkt. Er zijn wereldwijd slechts een paar installaties operationeel, allen op het niveau van pilot-installatie of semicommerciële demonstratie-installatie. De verschillende installaties werken met verschillende concepten/configuraties en verschillende procescondities bedreven. Het precieze verloop van het proces is nog niet geheel duidelijk en simulatiemodellen volgen verschillende perspectieven, bijvoorbeeld reactiekinetiek of chemisch evenwicht. Modelsimulaties en praktijkmetingen sluiten in alle gevallen niet volledig tot beperkt op elkaar aan.

F.1 Aangehouden uitgangspunten

Procesconfiguratie

Voor schatten van de broeikasgasbalans voor SNG-productie via vergassing van natte biomassa in superkritisch water is uitgegaan van een configuratie voor maximale SNG-productie. Er is verder zoveel mogelijk aangesloten bij gangbare technologieën zoals gebruikt in aardgasbehandeling en conditionering van synthesesgassen:

- verwijdering van CO₂ (en H₂S) uit hogedruk gasstromen met een fyisch absorbens zoals Selexol is gangbaar bij conditioneren van synthesesgas;
- koeling en drogen door expansie wordt bijvoorbeeld toegepast op de King-Size productieclusters van het Groningen aardgasveld.

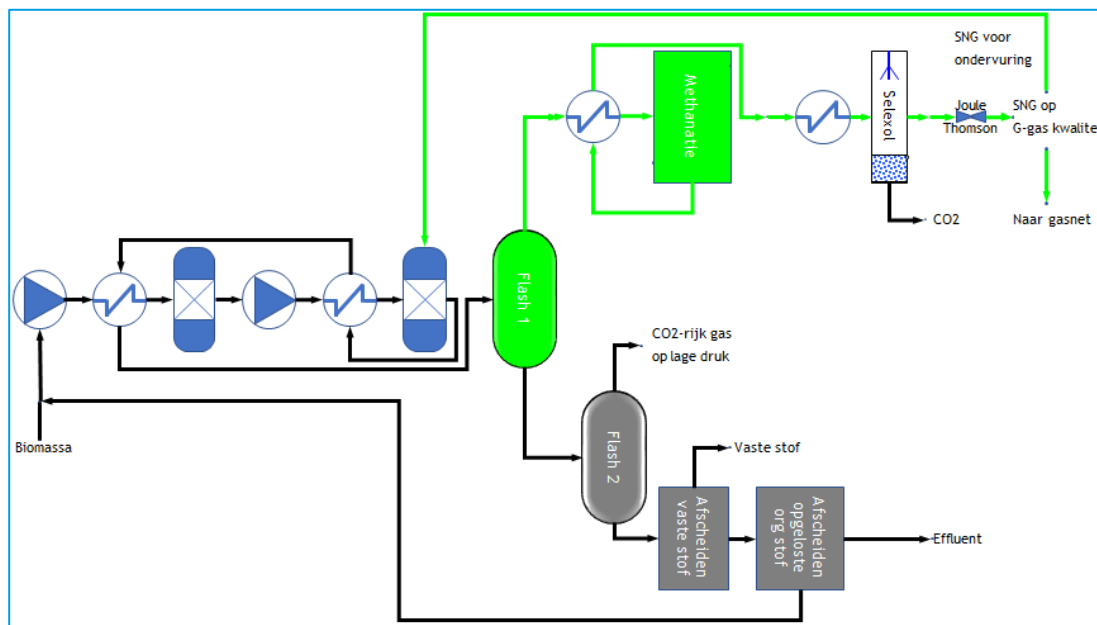
Voor het op vergassingstemperatuur brengen van het substraat benodigde warmte wordt verondersteld zoveel mogelijk middels warmtewisseling met vergassingsproducten te worden geleverd. Nog benodigde additionele warmte wordt verondersteld te worden geleverd door verbranding van een deel van het productgas. Consumptie van een deel van het productgas voor warmtelevering aan het vergassingsproces wordt bijvoorbeeld toegepast bij de demonstratie-installatie bij Verenum in Zwitserland.

Er is verondersteld dat assen en zouten niet voorafgaand aan vergassing, maar na vergassing worden afgescheiden.

Na afscheiding van productgassen en vaste stof resterend proceswater wordt verondersteld te worden behandeld, zodat het overblijvend effluent kan worden geloosd in het riool. Grotere opgeloste organische verbindingen worden daarbij afgescheiden en gerecirculeerd.



Figuur 4 - Schematische weergave aangehouden configuratie voor SNG-productie op basis van vergassing van natte biomassa in superkritisch water



Voor afscheiding van productgassen is uitgegaan van twee knock-out vaten, één op 100 bar en één op atmosferische druk. Bij flashen op atmosferische druk vrijkomend CO₂-rijk gas bevat ook lage concentraties van brandbare gassen. Aangenomen is dat dit gas wordt 'naverbrand' om emissies van koolwaterstoffen te minimaliseren.

Bij maximale SNG-productie wordt het gezuiverde gas vervolgens gemethaniseerd om aanwezige waterstof met CO en CO₂ te converteren. Overblijvende CO₂ wordt verwijderd met een fysisch absorbens tot wordt voldaan aan de eisen voor gasinjectie op het aardgasnet (Wobbe-index), waarna het gas wordt gedroogd middels een smoorklep.

Afgescheiden CO₂ kan volgens sommige technologieleveranciers worden gebonden aan olivijn middels een exotherme reactie bij 100 bar en 175 °C.

In de beschouwde configuratie komt de CO₂-rijke gastroom uit het tweede knock-out vat op atmosferische druk vrij, terwijl de met selexol afgevangen CO₂ bij een druk van ongeveer 1,1 bar(a) vrijkomt. Beide stromen zullen nog moeten worden gecomprimeerd tot een superkritische vloeistof om in de reactie met olivijn te kunnen worden ingezet.

De aangehouden configuratie is schematisch weergegeven in Figuur 4.

Procesparameters

Er is uitgegaan van vergassing bij een druk van 300 bar en een temperatuur van 600 °C. Volgens de geraadpleegde literatuur dient de vergassingstemperatuur minstens 600-650 °C te bedragen voor een volledige omzetting van de te vergassen biomassa en om vorming en afzetting van teer en char te minimaliseren.

Voor de biomassaconcentratie in het substraat is een waarde van 20% aangehouden.

De aangehouden concentratie is voornamelijk gekozen omdat RWZI-slib en dikke fractie

mest bij 30 gew% droge stof steekvast zijn en niet meer verpompbaar zijn. RWZI-slib is in de praktijk vaak niet verder te ontwateren dan tot ongeveer 25 gew% droge stof.

Verdeling van elementen

Voor de verdeling van de elementen in de vergaste biomassa zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- alle zwavel wordt volledig omgezet in gasvormig H_2S (STOWA, 2016), (Yakaboylu, 2016);
- stikstof wordt voor 80% omgezet in gasvormig NH_3 en voor 20% in moleculaire stikstof (STOWA, 2016);
- Na, K, Mg en Ca vormen zouten met fosfaat, chloride en silicaat voor zover deze anionen aanwezig zijn in de biomassa;
- een (eventueel) overschot aan kationische alkali en aardalkali metalen vormt vaste carbonaten (Yakaboylu, 2016);
- koolstof wordt - voor zover niet gebonden als carbonaat - voor ongeveer 95% omgezet in gasvormige producten en voor 5% in char (STOWA, 2016)¹⁸;
- voor de char wordt een samenstelling met een C/O verhouding van 10: 1;
- waterstof wordt volledig omgezet in gasvormige producten.

Gassamenstelling

Bij schatten van de gassamenstelling is aangenomen dat concentraties van CO en hogere koolwaterstoffen verwaarloosbaar zijn en dat kan worden volstaan met beschouwen van CH_4 , CO_2 , H_2 en H_2O ¹⁹.

Verder is verondersteld dat het gasmengsel geen evenwicht bereikt - water gas shift of CO_2 -methanatie - omdat beide reacties bij de aangehouden vergassingstemperatuur nog te langzaam verlopen in vergelijking met de verblijftijd van het substraat op de vergassings-temperatuur (zie bijvoorbeeld (Yakaboylu, 2016)).

Er is verder verondersteld dat afhankelijk van de temperatuur en biomassa concentratie in het substraat een bepaalde hoeveelheid water met de biomassa reageert - voor 20 gew% biomassa en $600^\circ C$ circa $0,52 \text{ mol } H_2O / \text{mol } C_{\text{biomassa}}$ ²⁰. De zuurstof in de reagerende biomassa wordt daarbij geconverteerd naar CO_2 , de waterstof naar CH_4 en H_2 .

Extern toegevoerde warmte

De vraag naar extern toe te voeren warmte is geschat op basis van de aanname dat de warmtewisselaars zo zijn gedimensioneerd dat het effluent tot $50^\circ C$ boven de temperatuur van het substraat kan worden afgekoeld door warmtewisseling met het substraat.

Er is verder rekening gehouden met een verlies van 5% aan voelbare warmte over het systeem (Vogel, 2016), (Munetsuna, et al., 2011).

¹⁸ In de verdeling van koolstof over de productfracties is verondersteld dat de koolstof die wordt omgezet in opgeloste organische verbindingen volledig worden teruggewonnen bij nanofiltratie en uiteindelijk volledig worden omgezet bij navolgende vergassing.

¹⁹ Ethaan (C_2H_6) kan wel in significante concentraties (> 10 vol%) in het gas voorkomen.

²⁰ Op basis van (Yakaboylu, 2016).



Elektriciteitsgebruik

Elektriciteitsgebruik is met name gerelateerd aan het op druk brengen van het substraat. In principe is het elektriciteitsgebruik niet alleen een functie van de einddruk, maar ook van reologische eigenschappen van het substraat. De reologische eigenschappen worden sterk beïnvloed door bijvoorbeeld dichtheid, vaste stofgehalte en samenstelling, deeltjes-grootte en -verdeling, bezinkingseigenschappen, brosheid, geleidbaarheden, pH en temperatuur. Al deze eigenschappen zijn niet bekend voor de in deze studie beschouwde typen biomassa.

Om toch een indicatie van het elektriciteitsgebruik te kunnen geven zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- hydrolyse bij circa 150°C en 5 bar;
- op druk brengen van het hydrolysaat bij 150°C.

Bij deze uitgangspunten bedraagt het energiegebruik circa 30 kJ/kg substraat, gecorrigeerd voor het rendement van de pomp (50% ?)²¹ ongeveer 65 kJ/kg substraat of circa 330 kJ/kg droge biomassa.

Ook bij nanofiltratie en andere deelprocessen zullen elektriciteit vragen. Het is bij de huidige beschikbare informatie en tijd niet mogelijk hiervoor een voldoende onderbouwde aanname te maken.

F.2 Beschouwde biomassa

Voor de analyse is uitgegaan van biomassa met de volgende samenstelling:

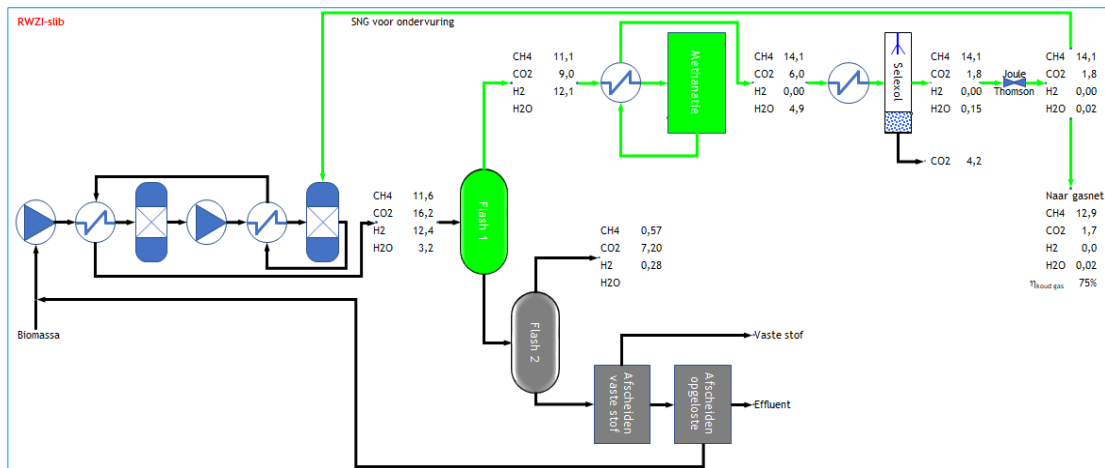
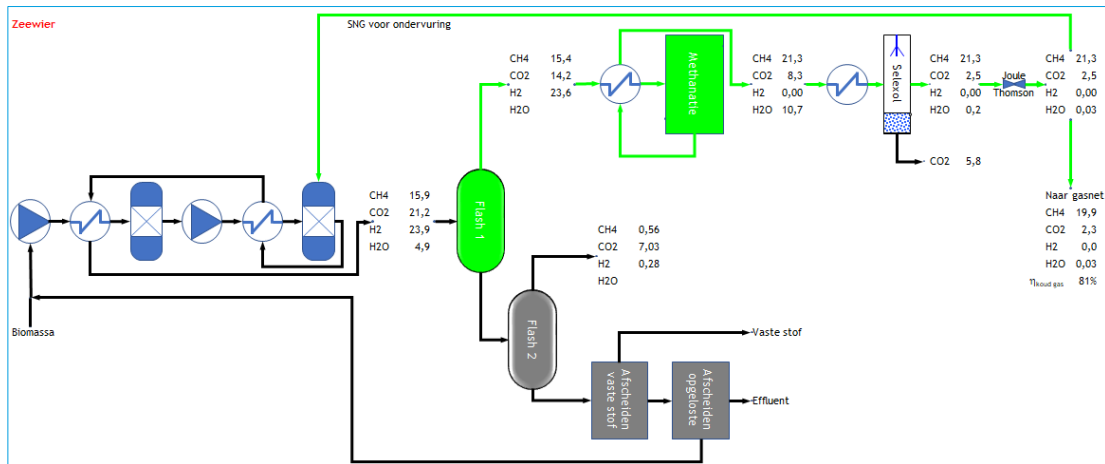
	Zeewier-residu	RWZI-slib
C	47,0%	33,8%
H	7,4%	5,0%
O	37,7%	23,9%
N	0,0%	3,8%
S	0,0%	1,4%
Cl	0,4%	0,5%
Ca	0,1%	2,2%
K	1,3%	3,3%
Mg	0,3%	0,0%
Na	0,2%	0,0%
P	0,5%	2,0%
Si	0,0%	2,9%
As	5,1%	21,3%
	100,0%	100,0%
Stookwaarde (kJ/kg d.s.)	19.708	13.885

²¹ Voorlopige inschatting.



F.3 Resultaten

De voor zeewier en RWZI-slib geschatte balansen worden hieronder weergegeven.



G Houtvergassing

In deze memo wordt een concept broeikasgasbalans voor groengasproductie op basis van schoon hout middels allotherme vergassing beschreven. Het concept is bedoeld ter toetsing van de uitgangspunten door externe partijen.

In de memo worden achtereenvolgend beschreven:

- beschouwde systeemconfiguratie voor vergassing en SNG-productie;
- gehanteerde procesparameters en geraadpleegde bronnen;
- resultaten voor massabalans, energiebalans, consumptie van additieven;
- resulterende broeikasgasbalans over de gehele keten.

G.1 Beschouwde systeemconfiguratie

Voor het systeem is uitgegaan van allotherme vergassing bij 850 °C en een iets verhoogde druk (1,4 bar) volgens de Milena technologie. Voor gasreiniging en methanatie is grotendeels uitgegaan van de eveneens door ECN ontwikkelde OLGA-technologie en ESME-concept (Aranda Almansa & al, 2015).

Voor wat betreft CO₂-verwijdering en droging is aangesloten bij de systeemconfiguratie van de GoBiGas installatie.

G.2 Gehanteerde procesparameters en geraadpleegde bronnen

De analyse is gebaseerd op de biomassasamenstelling, ruwe synthesesegassamenstelling en de samenstelling van char en teer zoals berekend voor schone houtsnippers (25% vocht) in (Van der Meijden, 2010).

Op basis van de in deze bron opgegeven ruwe synthesesegassamenstelling is vervolgens een analyse gemaakt van energiegebruiken, beschikbare restwarmtestromen in de zuivering en conversie van synthesesgas naar SNG van Groningen kwaliteit (Wobbe-index 43,8).

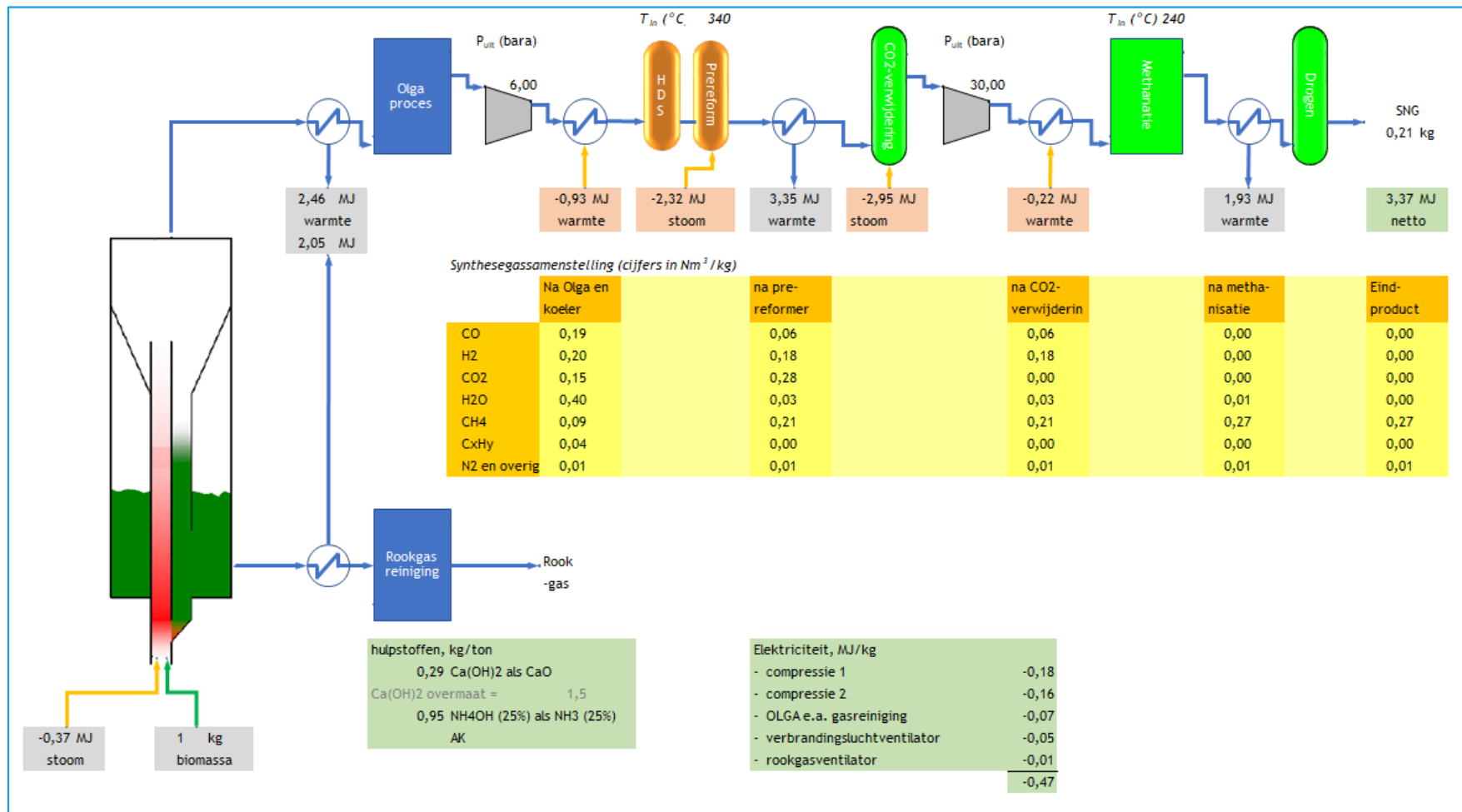
Aangehouden temperaturen en drukken zijn weergegeven in Figuur 5.

Verder is aangenomen dat:

- alle etheen en ethyn bij hydrogenatie van zwavelverbindingen worden omgezet in ethaan;
- in de pre-reformer alle ethaan, benzeen en toluen wordt gehydrogeneerd tot methaan;
- voor CO₂-verwijdering en drogen van gereed SNG van toepassing van respectievelijk chemische adsorptie aan MDEA en moleculaire zeef, zoals in de praktijk toegepast bij GoBiGas.

Bij compressie is steeds uitgegaan van een isentroop rendement van 75% en een tussenkoeling tot 30 °C.

Figuur 5 - Stroomschema en parameters van beschouwde SNG-productieketen



Voor drukval over procesonderdelen is uitgegaan van 1 bar voor reactoren en 0,05 bar voor warmtewisselaars.

Gebruik van additieven voor rookgasreiniging is geschat conform de methodiek, ontwikkeld in het kader van de milieueffectrapportage voor het Landelijk AfvalbeheerPlan 2.

G.3 Globale evaluatieresultaten

Berekend energetisch rendement en koolstofrendement bedragen respectievelijk 70% en 40% en zijn vergelijkbaar met de waarden genoemd in (del Álamo & al, 2015) voor het Ambigo concept (koud gas efficiency 66%) en (Thunman, 2018) voor het Ambigo concept en GoBiGas (koud gas efficiency 65%).

In de berekende balans is een overschot van ongeveer 10% ten opzichte van de stookwaarde van de ingaande biomassa aan warmte uit chemische reacties beschikbaar. De consumptie aan warmte en stoom nodig voor de verschillende deelprocessen kan ruimschoots met de vrijkomende reactiewarmte worden gedekt.

Dit is consistent met het gegeven dat de GoBiGas installatie in Göteborg ongeveer 10% van de stookwaarde van de verwerkte biomassa als warmte aan het warmtenet in die stad kan leveren.

Het berekende elektriciteitsgebruik is vergelijkbaar met de waarde genoemd in (del Álamo & al, 2015) en lager dan praktijkcijfers bekend voor GoBiGas (Thunman, 2018).

Een voorbeeld van de resulterende broeikasgasbalans is gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 14 - Voorbeeld voor broeikasgasbalans voor allotherme vergassing: LNG productie op basis van stamhout

	Per ton	Per GJ bio	CO ₂ -eq./GJ
CO ₂ -emissies voorketen (Biograce II)			
Cultivation and harvesting			1,1
Stemwood seasoning			0,0
Chipping			0,4
Transport of wood chips			4,6
			6,1
Vergassing			
CaO, kg/ton houtsnippers	0,29	0,022	0,02
NH ₄ OH, kg/ton houtsnippers	0,24	0,018	0,05
Elektriciteit vergasser, GJ/ton houtsnippers	0,47	0,035	5,2
Elektriciteit LNG-productie	0,55	0,042	6,1
			11,4
Totaal			17,5

