

Inhoud

1. Samenvatting.....	3
2. Inleiding	5
3. Context	5
3.1. Nationale doelstellingen	5
3.2. Regionale doelstellingen.....	6
3.3. Lokale actie: mobilisatie en integratie van kringlopen.....	6
4. Systeemgrenzen.....	7
5. Beschrijving componenten.....	11
5.1. Vijzelpers.....	11
5.2. Homogenisatie/voorbehandeling	11
5.3. Thermische Druk Hydrolyse	11
5.4. Vergisting	13
5.5. Digestaatverwerking.....	17
5.5.1. Mestverordening.....	17
5.5.2. Decanter	19
5.5.3. Ultra Filtratie en Reverse osmose	21
5.6. Warmtekrachtkoppeling	22
5.7. Cryogene LBG opwerking.....	23
6. Methode.....	25
6.1. Massabalans.....	27
6.1.1. Gasproductie.....	27
6.1.2. Systemcomponenten.....	28
6.2. Energiebalans.....	29
6.2.1. Elektraverbruik.....	29
6.2.2. Stoomverbruik.....	30
6.3. Financiële balans	31
6.3.1. Operationele kosten.....	31
6.3.2. Investeringskosten.....	33
6.4. Kostprijsberekening biogas en besparing broeikasgassen.....	34
7. Resultaten	36
7.1. Investeringskosten	36
7.2. Elektriciteitsgebruik.....	38
7.3. Warmtegebruik	39

7.4.	Kostprijs biomethaan	40
7.5.	Broeikasgas emissies	42
7.6.	Transport-capaciteit optimalisatie	43
8.	Bronnen	45
9.	Bijlagen	47
9.1.	Bijlage A.....	47
9.2.	Bijlage B.....	47
9.3.	Bijlage C.....	48

1. Samenvatting

Voor de bestuurlijke entiteit Regio Rivierenland en het Consortium ‘Ketensamenwerking LBG Rivierenland’ -bestaande uit Rolande LNG, Logistieke Hotspot Rivierenland, Stout Groep en Gebiedscoöperatie Rivierenland B.A.- is een haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd naar een mest(co)vergistingcase met opwerking van biogas naar bio-LNG oftewel LBG als brandstof voor zwaar transport. Dit onderzoek is onderdeel van een bredere studie naar de potentiële biomassareststromen in Rivierenland en mogelijkheden om deze te verwaarden en mestcovergisting met LBG opwerking is één van de vijf onderzochte casussen. Door de regio lopen een aantal belangrijke transportaders (A-15, Betuwelijn en Maas/Waal) en deze businesscase draagt dan ook bij aan de verduurzaming van de transportsector in de regio. Tevens biedt dergelijke ‘vergisting-tot-LBG-configuratie’ (oftewel VtLBG-configuratie) een interessante opstap tot navolging in het buitenland -waaronder Duitsland- waar het gasnetwerk minder ver is ontwikkeld als in Nederland en een lokale LBG-opwerking binnen een vergistingsconfiguratie aantrekkelijker wordt.

In dit onderzoek is voor een vijftal scenario's een techno-economische analyse en een energie/massabalans opgemaakt van een complete mestverwerkingsopstelling met biogasopwerking: voorbehandeling van mest en coproduct; vergisting; mestverwerking (decanter, ultra-filtratie en reverse osmose); WKK voor de interne energiebehoefte; en cryogene biogasopwerking tot LBG. Een tweede en derde scenario onderzoekt het effect van een thermische drukhydrolyse schakel voor het efficiënter voorbehandelen van coproduct en/of mest. Een vierde scenario onderzoekt het effect op de kostprijs van een mobiele vijzelpers die de mest op voorhand op de boerderij scheidt en alleen de dikke fractie naar de vergistingslocatie stuurt. In al deze scenario's wordt 12.000.000 m³ ruw biogas per jaar geproduceerd (1.500 m³/uur). Hiervan gaat 600 m³/uur naar een klant met energievraag, de rest wordt opgewerkt naar LBG. Voor een vijfde scenario wordt de kostprijs onderzocht mocht alle geproduceerde biogas opgewerkt worden naar LBG.

In alle scenario's wordt een circulaire businesscase nagestreefd om lokaal producten en coproducten te verwaarden. In regio rivierenland komt per jaar ongeveer 2 miljoen ton dierlijke mest vrij. Tevens zijn coproducten als berm- en maaigras en GFT kansrijke en beschikbare stromen in Rivierenland. Ook is een begin gemaakt met het verwaarden van de eindproducten van digestaatverwerking als ‘groene meststoffen’ in akker-, tuin- en glastuinbouw. Verder zijn credits meegerekend voor de vermarkting van vloeibare CO₂ en restwarmte en betaalt 50% van de boeren een prijs voor de mestverwerking.

De kostprijs tussen de scenario's varieerde van 0,28 tot 0,43 €/m³ biomethaan. De laagste kostprijs van 0,28 €/m³ in scenario 4 werd veroorzaakt door o.a. een thermische-drukhydrolyse voorbewerking van het coproduct en de dikke fractie mest. Tevens werd alle mest voorgescheiden met een mobiele vijzelpers op boerenerf. In scenario 5 waar alle biogas werd opgewerkt tot LBG bedroeg de kostprijs 0,43 €/m³ biomethaan, oftewel 0,65 €/kg LBG. Onthouden moet worden dat het hier gaat om een gehele mestverwerkingsketen, inclusief digestaatverwerking en verwaarding van het ruwe biogas en niet alleen om een LBG-opwerkingsinstallatie.

Voor wat betreft de broeikasgasballans presteert deze VtLBG-configuratie gunstig. In scenario 5 waar de opwerking naar LBG prioriteit heeft, wordt 6,7 kg CO_{2,eq}/kg LBG

vermeden, oftewel 134 gram CO_{2,eq}/MJ. Ten opzichte van diesel (89 gram CO_{2,eq}/MJ) is dit een reductie van 150%. Dit wordt mede veroorzaakt doordat ook de bijproducten bijdragen aan het vermijden van CO₂ die anders bij de productie van hun fossiele variant vrijkomen (e.g. meststoffen, restwarmte en vloeibare CO₂ bij de LBG-opwerking). In deze voetafdruk is het methaanverlies in de gebruiksfase van de truck ook meegerekend. Deze bedraagt maximaal 5 gram CO₂/MJ LBG oftewel maximaal 10% van de LNG-levenscyclus van een normale truck.

2. Inleiding

Dit onderzoek is onderdeel van een grotere haalbaarheidsstudie naar biomassa-reststromen in regio Rivierenland. De reden waarom is gekozen om een vergistingscase met opwerking naar LBG uit te werken is tweedelig. Allereerst wordt op deze manier aangesloten bij twee lokale initiatieven, waarvan zich één in een vergevorderd stadium bevindt. Stichting biomassacentrale Hellouw is al enige tijd bezig een mestvergistingscase rond te krijgen en hebben al veel vooronderzoek gedaan en stakeholders verzameld. Tegelijkertijd wordt tijdens het uitbrengen van dit rapport een LBG vulstation geïnstalleerd door het consortium 'ketensamenwerking LBG Rivierenland' in Geldermalsen. Ten tweede behoort de hier onderzochte conversieroute tot één van de interessante opties gezien de bewezen technologie, aanwezige infrastructuur voor gas en brede toepasbaarheid en dient dus als praktische optie om op korte termijn gerealiseerd te kunnen worden.

Dit deelonderzoek ('van Vergisting Tot LBG', hierna genaamd de VtLBG-configuratie) presenteert allereerst de techno-economische parameters van deze specifieke VtLBG configuratie. Hieruit zal blijken welke schaalgrootte deze configuratie aanneemt, wat de investeringskosten zijn en de opbrengsten. Dit is een waardevol startpunt om ook resultaten te presenteren over mogelijke capaciteitsuitbreiding van een VtLBG configuratie.

Het document is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 3 wordt de context gegeven waarin dit verslag een bijdrage levert. Hoofdstuk 0 geeft de grenzen aan van het onderzochte systeem, waarbij kort elk component wordt beschreven. Hoofdstuk 0 geeft een bredere uiteenzetting van die specifieke componenten en de onderbouwing van keuzes binnen en tussen de componenten. Hoofdstuk 6 behandelt de methode die leidt tot de financiële en energetische haalbaarheid van deze VtLBG-configuratie. Eerst wordt de massabalans behandeld, dan de energiebalans en vervolgens de operationele en investeringskosten. Hier wordt ook de kostprijs gegeven in € per Nm³ opgewerkt schoon biomethaan door alle investeringskosten, operationele kosten en baten over een termijn van 15 jaar te verdisconteren.

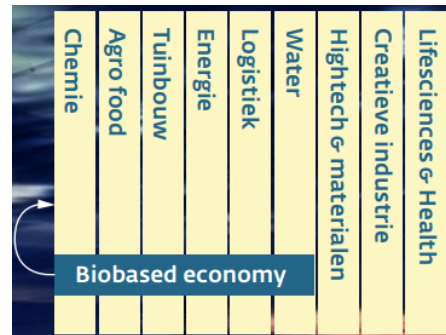
3. Context

3.1. Nationale doelstellingen

Nederland streeft naar een doelstelling van 14% duurzame energie in 2020 (Energieakkoord, 2013). Biomassa krijgt daarin een grote rol: mee- en bijstook moet 25 PJ bijdragen in 2020 uitgaand van een zo hoogwaardig mogelijke inzet van biomassa en gepaard met strenge duurzaamheidscriteria; decentrale opwekking die lokaal georganiseerd is in de vorm van coöperatieven vormt daarnaast een belangrijk onderdeel (3^e pijler energieakkoord). In het jaar 2010 was de bijdrage van biomassa aan de totale duurzame energie ongeveer driekwart, of ongeveer 115 PJ (nationale en geïmporteerde biomassa). Technisch is ongeveer 200 PJ aan biomassa beschikbaar in Nederland rond het jaar 2050 (PBL, 2015). Tegelijkertijd zijn de verwachtingen om rond die tijd ongeveer 1.600 PJ aan bio-energie te gebruiken in de energiemix. De ambities zijn dus (noodzakelijk) hoog en om die waar te maken lijkt het erop dat simpelweg alle beschikbare bronnen ingezet dienen te worden.

3.2. Regionale doelstellingen

Het nationale energiebeleid differentieert zich naar een breed pallet aan maatregelen en initiatieven op provinciaal, regionaal en lokaal niveau. Een biobased economy (waar biomassa wordt gebruikt voor niet-voedseldoeleinden) heeft de potentie om door te groeien tot één van de pijlers van de Nederlandse economie (Provincie Gelderland, 2015), zeker ook omdat Nederland sterk is in chemie, agrofood en logistiek. Ook regio Rivierenland heeft de agribusiness en economie & logistiek (de derde pijler is recreatie & toerisme) tot haar



speerpunten gemaakt. Biomassa in het algemeen en een VtLBG configuratie in het bijzonder sluit goed aan bij het speerpunt agribusiness (daar komt de biomassa voornamelijk vandaan) en bij de speerpunt logistiek (daar gaat de LBG voornamelijk naartoe). Binnen deze speerpunten zijn belangrijke samenwerkingsverbanden aanwezig om voort te bouwen aan een biomassaplatform, nl: de ‘Greenport Betuwse Bloem’, een belangrijk samenwerkingsverband tussen vijf grote tuinbouwklusters; en het initiatief ‘Duurzame Transportcorridor Betuwe’ die de verknoping van economische groei en duurzaamheid langs de A-15 corridor tot doel heeft.

3.3. Lokale actie: mobilisatie en integratie van kringlopen

Aan het hart van het duurzaamheidsvraagstuk gaat het wezenlijk over het ‘ontketenen’ van de lokale en nog onontgonnen potentie van een gebied. Het sluiten van kringlopen wordt genoemd, het creëren van werkgelegenheid, stimuleren van innovatie en het opwekken van duurzame energie. Het stimuleren van lokale initiatieven en organisatievormen (coöperaties) wordt in steeds grotere en belangrijke mate genoemd, benadrukt en verankerd in resp. beleid, wetenschap en samenwerkingsverbanden. De Engelse denktank ResPublica publiceerde onlangs nog een document ‘The missing Multipliers: Devolution to Key Cities’ waarin het belang nog eens werd aangetoond van meer decentralisatie van macht, financiële middelen en zelfstandigheid richting middelgrote steden, gemeenten en dorpen omdat daar de grootste economische groei, innovatie en momentum voor vernieuwing/verduurzaming liggen (ResPublica, 2015). Een grotere mate van flexibiliteit in eigen vormgeving zal ook in deze VtLBG-configuratie een grote rol (gaan) spelen. Ook de hier besproken technologieën (vergisting en opwerking naar LBG) zijn in belangrijke mate pas rond te krijgen als een grote groep potentiële stakeholders (boeren, kastuinders en particulieren tegelijk) worden ondersteund in een innige samenwerking en bij de realisatie van deze energieprojecten.

4. Systeemgrenzen

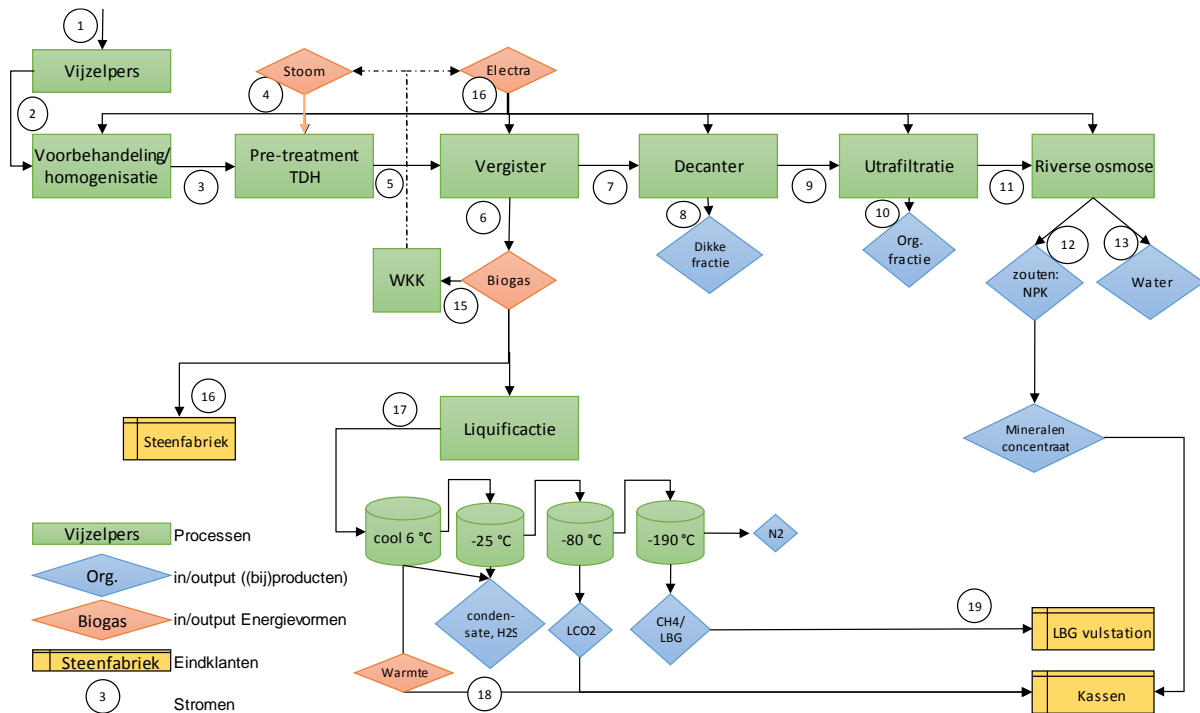
De gangbare vorm van vergisten betreft het anaeroob verwerken van veemest, voornamelijk varkensdrijfmest (VDM) en runderdrijfmest (RDM). Andere vormen van mestvergisting komen minder voor: kippenmest wordt veel vaker gebruikt als meststook; geiten-, schapen-, hoender- en ander kleinveemest komt in kleinere hoeveelheden voor en bereikt niet vaak een geschikt volume voor anaerobe vergisting. Anaerobe vergisting is een natuurlijk proces van ontbinding van organisch materiaal in de afwezigheid van zuurstof. Onder organisch materiaal valt o.a. GFT, mest, voedsel, plantenafval, dierlijke mest en slib. Uit deze anaerobe vergisting ontstaat voornamelijk methaan- en koolstofdioxidegas (meestal 40-70% methaan, de rest CO₂ en een paar procenten overig gas zoals zwaveldioxide en stikstofoxiden). Dit gas kan direct verbrand worden waarbij elektriciteit en/of warmte wordt geproduceerd. Verder wordt het opgewerkt naar schoner (aard)gaskwaliteit, waarbij naar een hoge concentratie methaan (meestal 97%-99,9%) wordt gestreefd. Dit opwerkingsproduct kan dan op het nationaal gasnet worden afgezet, of nog verder worden opgewerkt naar transportbrandstof (zoals in deze casus wordt voorgesteld). De LBG opwerking in dit voorstel zal ook aansluiten bij een 7-tal overige opties voor verdere gasbenutting die in opdracht van Stichting biomassacentrale Hellouw zijn onderzocht door Alliander (2010; 'Haalbaarheidsstudie groen gas Haaften).

Biogasinstallaties komen veelvuldig voor in allerlei configuraties (microvergisting en grootschalige installaties) zowel in ontwikkelings- als in ontwikkelde regio's. De schaal van dergelijke installatie wordt grotendeels bepaald door het aanbod mest: kleinere koepelinstallaties vindt men het meest bij kleine boeren (India, China, Afrika) waar de mest veelal handmatig wordt gemengd en ingebracht in de vergister; boerenbedrijven met hoge mate van mechanisatie zijn in staat grote(re) hoeveelheden te verwerken in grote roervergisters. Europa is voorloper in vergistingsprojecten, en van alle grote configuraties (> 2.500 ton per jaar, 223 projecten in aantal) heeft mest(co)vergisting het grootste aandeel (26%), gevolgd door organisch stedelijk afval (GFT; 11%) en industrieel organisch afval (6%) (Abassi, 2012; IEA, 2008). In absolute termen past Duitsland vergisting het meest toe in Europa (1,7 Mton per jaar geïnstalleerd vermogen), gevolgd door Spanje (1,5 Mton/jaar) en Frankrijk (0,8 Mton/jaar). Echter, per hoofd van de bevolking staan kleinere landen bovenaan (Malta en Luxemburg), gevolgd door Spanje (34.000 ton per miljoen inwoners), Zwitserland (33.000 ton/milj. inw.) en Nederland (29.000 ton/milj. inw.) (Abassi, 2012).

De vergistingsschakel is maar een onderdeel in het voorgestelde geheel. Figuur 1 op de volgende pagina geeft in een grafische weergave een overzicht van de voorgestelde configuratie en dient als afbakening van het onderzochte. Hier zal kort een beschrijving volgen van elk component in het systeem, waarna in de componentbeschrijving (hoofdstuk 4) een uitgebreide omschrijving volgt van de componenten.

- a) Stroom 1 is de mest aangeleverd van de boeren. Het betreft een ongescheiden meststroom met een droge stofgehalte van 7-14%. Idealiter wordt de mest al onderin de stallen gescheiden in een dikke fractie en urine, maar dit betreft enkel de modernste stallen. De gasopbrengst gaat omhoog bij meer droge stof en bij een goede C/N ratio (zie § 5.4). Hierom wordt vaak een passend coproduct gezocht om mee te vergisten. Stichting biomassacentrale Hellouw neemt gras als coproduct, gezien het hoge(re) aandeel koolstof in gras en vanwege de ruime beschikbaarheid. Een andere optie is om de mest te scheiden met een vijzelpers, waarmee het droge-stofgehalte van de dikke fractie verhoogd wordt naar 20%. De dunne fractie wordt

deels gebruikt voor verdunning, de rest wordt schoongemaakt in de ultra-filtratiestap.

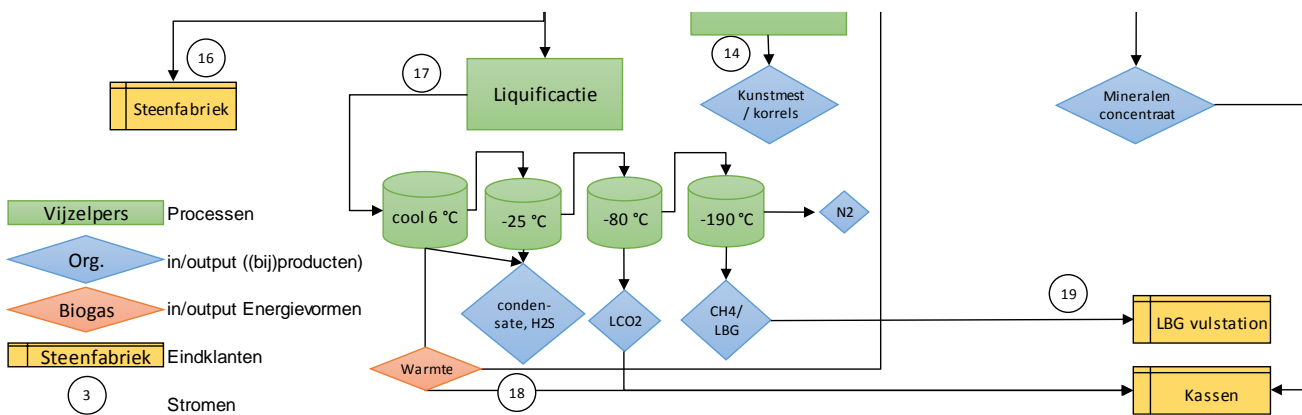


Figuur 1. Systeemoverzicht van de onderzochte ViLBG-configuratie.

- b) In stap 2 wordt de dikke fractie mest, samen met het coproduct gras in een voorbehandeling gehomogeniseerd. Dit wil zeggen verschoond van afval (plastic, metaal en stenen) en verkleind tot 10-20 mm stukjes.
- c) Stroom 3 + 4 is een voorbehandelingsstap die hier wordt meegenomen. Het betreft een zogenaamde ‘Thermische Druk Hydrolyse’. Door de producten enige tijd met stoom te verhitten (165 °C) onder druk (5-6 bar) om daarna te laten expanderen, ontstaat door middel van ‘stoomexplosie’ afbraak van grotere organische moleculen. Complexe structuren zoals (ligno)cellulose en lignine worden dan gebroken waardoor vergistingsenzymen beter bij de deeltjes kunnen komen. Deze hydrolyse wordt ook door micro-organismen gedaan, maar in veel beperktere mate en niet bij alle moleculen. En thermische voorbehandeling vergroot en versnelt dit proces. De techniek is betrekkelijk nieuw, maar zowel Wageningen universiteit als de bedrijven Cambi (Noorwegen) en Sustec (Wageningen) verkopen deze technieken. De gasopbrengst gaat met 30-50% omhoog door deze voorbehandelingsstap (Avans Hogeschool, 2010).
- d) Stroom 5 is klaar voor de vergister met na-vergister. Het betreft hier normale roervergisters in tanks van 4.500 m³ vergistingsproduct. De verblijftijd van mest in dergelijke vergisters kan variëren van 20-40 dagen, maar door de hydrolyse voorbehandeling (TDH) wordt dit verkort naar 10-15 dagen. Dit is een tweede belangrijk voordeel gezien er minder vergistingstanks nodig zijn, oftewel meer kan worden vergist bij dezelfde hoeveelheid tanks. Deze tanks beslaan een groot deel van de investeringskosten.
- e) Na de vergisting bestaan er verschillende verwerkingsprocessen van het digestaat.

Het digestaat wordt nog steeds als mestproduct beschouwd, ook als max. 50% van de inhoud afkomstig is van de coproducten (maximaal toegestane bijmenging bij mest(co)vergisting). Ook het mineraalgehalte in het digestaat is nog even hoog als dat van de mest voor de vergisting (fosfor P, nitraat N en kali K). De meest simpele bestemming is het uitrijden van de mest op het land waar het vandaan kwam. Door steeds strikter mestbeleid echter moet de mest op andere manieren verwijderd worden uit het systeem. Hier is gekozen voor een configuratie van centrifugeren, ultra-filtreren en reverse osmose. Met deze scheidingstechnieken wordt een hogere waardering van het digestaat bereikt, namelijk een dikke fractie relatief rijk aan fosfor (P) en een mineralenconcentraat rijk aan nitraat (N) en kali (K). Door deze scheiding ontstaat meer flexibiliteit in de toepassing van kunstmest. De decanter (centrifuge) is de eerste stap en scheidt het digestaat in een dikke en een dunne fractie.

- f) Stroom 8. Stroom 8 is de dikke fractie van de decanter, die gebruikt kan worden als organische verrijking op het land in de regio zelf of daarbuiten (export).
- g) Stroom 9 + 10 is de dunne fractie uit de centrifuge (en de dunne fractie uit de vijzelpers, stroom 1) en gaat naar de ultra-filtratie. Uit de ultra-filtratie komt een organische fractie met het overige organische materiaal, rijk aan fosfor. Deze stroom wordt (a) in de regio uitgereden op het land, bijmenging met de dikke fractie van de decanter, of (b) alleen uitgereden op het land als de dikke fractie wordt geëxporteerd.
- h) Stroom 11, 12 & 13. Stroom 11 is het concentraat van de ultra-filtratie en is relatief arm aan P en rijk aan N en K. In de reverse osmose (RO) stap wordt het water door membranen geperst maar de mineralen blijven achter. Zo ontstaat een 'permeaat' aan voornamelijk water (stroom 13) dat geloosd kan worden op het oppervlaktewater, en een 'concentraat' (stroom 12) met hoge concentraties N, K en andere organische verbindingen die te groot waren voor het membraan. Door scheiding van P, N en K kunnen kunstmestconcentraten op maat worden gemaakt: vee-, akker- en glastuinbouwers hebben ieder hun specifieke behoeftes aan deze stoffen en op deze manier wordt het makkelijker om gericht kunstmest te vervangen.
- i) In stroom 15 wordt een deel van het geproduceerde gas opgestookt in een warmtekrachtkoppeling (WKK) om de benodigde elektra en stoom in het systeem te voorzien.
- j) Stroom 17. Figuur 2 op de volgende pagina geeft de vervolgstappen nog eens weer van het geproduceerde biogas. Een gedeelte hiervan gaat naar een afnemer met warmtevraag. Het overgebleven gedeelte wordt met cryogene technologie opgewerkt tot LBG. Cryogene technologie is de bewerking van stoffen bij zeer lage temperaturen. Zo wordt het gas in de voorgestelde configuratie in vier stappen verlaagd in temperatuur. Bij koeling tot 6 °C en daarna tot -25 °C condenseert een gedeelte water en waterstofsulfide, dat afgevoerd wordt. Bij verdere koeling tot -80 °C condenseert CO₂ en wordt als 'liquid CO₂' (LCO₂) afgevoerd. Bij de laatste verkoeling tot -190 °C verlaat het methaangas het geheel en wordt afgevoerd naar een LBG vulstation. De LBG bestaat dan uit 97-99,9 % uit CH₄, al naar gelang de gewenste vraag. Wat overblijft uit deze behandeling is een zuivere stikstofstroom N₂.



Figuur 2. Vervolgverwerking van het geproduceerde ruwe biogas.

- k) Stroom 18 bestaat uit veel warmte die bij de verschillende verkoelingsstappen ontstaat. Verkoeling wordt geleverd door compressors die een koelingsvloeistof onder hoge druk zetten, laten afkoelen en dan weer laten expanderen. Deze expansie zorgt voor een temperatuurdaling waarmee het biogas gekoeld wordt. Bij de afkoeling van het gecomprimeerde koelvloeistof ontstaat veel warmte (warmte uit het gekoelde + de warmte als resultaat van deze arbeid) die deels ingezet kan worden voor andere processen, zoals voor de vergisting, voor de indamping van de dikke fractie digestaat of regelrecht als verwarming in bijvoorbeeld kassen. Benutting van deze restwarmte, al dan niet verkocht, is essentieel voor het financiële plaatje.

5. Beschrijving componenten

De verschillende componenten in de voorgestelde configuratie worden hier omschreven. Er bestaan meerdere methodes voor ieder deelproces en daarom worden de keuzes hier toegelicht. De omschrijving van de hier gebruikte componenten zal zoveel mogelijk de configuratie volgen die door Stichting Biomassacentrale Hellouw voor ogen is genomen, met een streefomvang van 12.000.000 m³ biogas per jaar oftewel 1.500 m³/uur en overeenkomende digestaatverwerking. Verder zal bij deze configuratie een optimaal functionerende LBG-opwerkingsinstallatie toegevoegd worden. Als laatste worden een aantal scenario's getest waarbij thermische hydrolyse schakel en een mobiele vijzelpers worden geïntegreerd.

5.1. Vijzelpers

Drijfmest bestaat voor ongeveer 90% uit water. Het primaire doel van mestscheiding is de productie van een dikke fractie met hogere concentratie aan organische stof en fosfor en een lage concentratie vocht. Dergelijke fractie is een waardevol verrijkingsproduct voor de akkerbouw en kan tevens over grotere afstanden vervoerd worden. De vergistingsinstallatie in Hellouw heeft een omvang van 62.200 ton mest en 62.200 ton bermgras, die uit een omtrek van 20 km wordt aangeleverd. Transportafstanden zijn hier dus minder van belang, maar een scheiding zou nog steeds waardevol kunnen zijn om het drogestofgehalte omhoog te halen en voor te bewerken met thermische druk hydrolyse. In het geval van opschaling, waar mest uit een grotere afstand wordt gehaald (straal 20-40 km), kan het voordelig zijn de mest op het erf te scheiden.

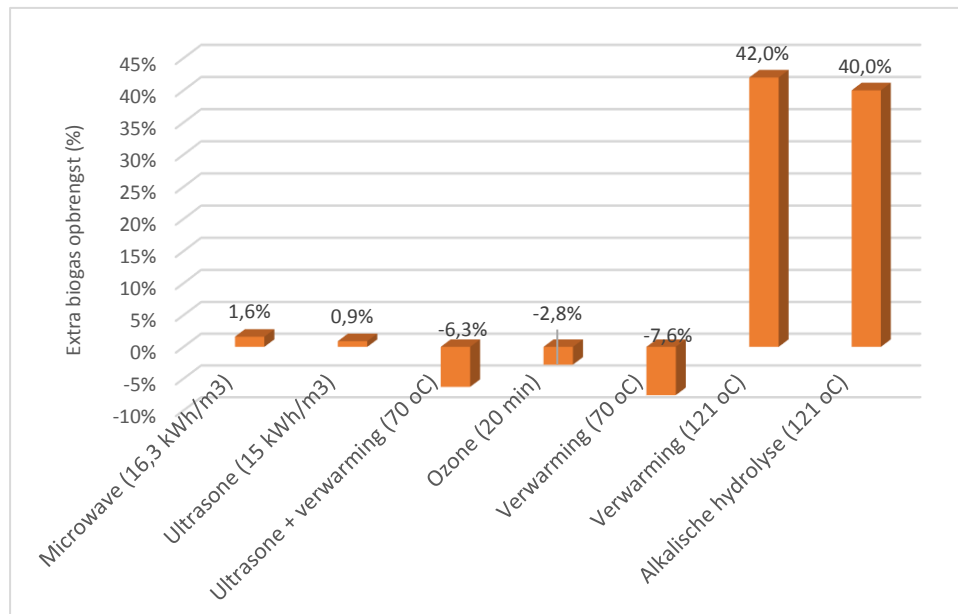
5.2. Voorbehandeling

Homogenisatie is een belangrijke stap voor de vergisting. Het vergistingsproces verloopt optimaal, als de coproducten en de mest verkleind zijn tot 1-15 mm in diameter. Bij roeren in de vergistingstank worden de deeltjes en micro-organismen gelijk over de inhoud verdeeld en kunnen de micro-organismen beter bij de vaste deeltjes komen. Voor de homogenisering kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van indraaiende vijzels, een PFR (plug flow reactor) of een tank met roerwerk (Avans Hogeschool, 2010). Door goed te roeren wordt ook een drijvende laag op de vergisting voorkomen (wat de gasstroom naar boven toe verhindert) en worden bacteriën en afvalstoffen gelijkmatig verdeeld in de tank.

5.3. Thermische Druk Hydrolyse

Hydrolyse is een belangrijke stap in de vergisting: grote moleculen, zoals (ligno)cellulose, eiwitten en koolhydraten, worden afgebroken in kleinere moleculen. Dit hydrolyseproces, op natuurlijke wijze door micro-organismen (biologische hydrolyse), gaat traag en niet alle grote moleculen worden afgebroken. Tevens functioneren deze hydrolyse-organismen hooguit een uur in een vergistingstank omdat ze worden geblokkeerd door de enzymen in de volgende vergistingsstappen. Door een aparte stap van fysieke, chemische en/of mechanische hydrolyse toe te passen wordt dit proces echter wel vergroot en versnelt. Bij fysiek/chemische hydrolyse wordt gebruik gemaakt van verhitting, ultrasone, microwave, thermische drukhydrolyse en ozon behandeling. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** hieronder geeft schematisch weer wat de extra gasopbrengst is bij de verschillende types hydrolyse (ZHAW, ingenieurbüro Hersener, 2013). Runderdrijfmest blijkt bijzonder ongevoelig te zijn voor de meeste

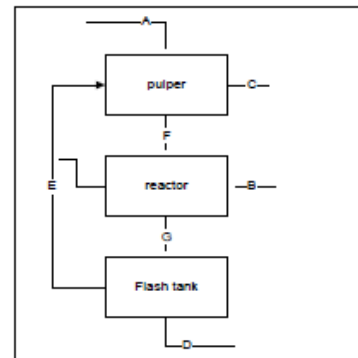
fysiek/chemische voorbehandelingen, behalve thermische druk hydrolyse. In de VtLBG-configuratie wordt dan ook gekozen voor deze thermische druk hydrolyse voorbehandeling.



Figuur 3. Fysieke en chemische voorbehandeling van runderdrijfmest.

Thermische drukhydrolyse zijn te onderscheiden in continue processen (bedrijven HoST, Veolia, Cambi) en in batchprocessen (SUSTEC, Veolia, SH&E). Verder is de warmteterugwinning een belangrijke voorwaarde, omdat dit uiteindelijk de efficiëntie bepaald. Er bestaan warmtewisselaars voor bijvoorbeeld het terugwinnen uit het gehydrolyseerde materiaal, of uit de zogenaamde flashdampinjectie. Het proces van thermische drukhydrolyse dat in de VtLBG-configuratie wordt toegepast is hiernaast schematisch weergeven en betreft de techniek van Cambi en/of HoSt, met flashdamp injectie als warmteterugwinning.

Uit de homogenisatie komt een stroom (A) naar de pulper. In de pulper wordt de stroom voor 90 minuten voorverwarmt tot 96 °C, met warmte (E) dat vrijkomt uit de flashtank. Na deze voorverwarming stroomt het product (F) naar de reactors, waar door middel van stoomtoevoeging de temperatuur stijgt tot 165 °C (bij 5-6 bar). Door dit proces worden de viscositeit en het aantal grote polymeren verlaagd. Tevens is dit een hygiëniseringsproces (verhitten tot 70 °C voor minimaal 1 uur) die bij normale mestverwerking ook verplicht is.



Vervolgens gaat dit product (G) naar de flash tank, waar de druk wordt verlaagd. Door deze plotselinge drukvermindering vindt een ‘stoomexplosie’ plaats die complexe molecuulstructuren verder afbreekt. Er ontstaat ook een hete damp die teruggevoerd wordt (E) naar de pulper. Het finale product (D) verlaat de flash tank en gaat naar de vergister. Een reststroom (C), bestaande uit dampen uit de pulper, wordt gebruikt voor het warm houden van de vergister.

Een thermische druk hydrolyse voorbehandeling heeft ook een aantal andere voordelen (uit: Avans, 2008):

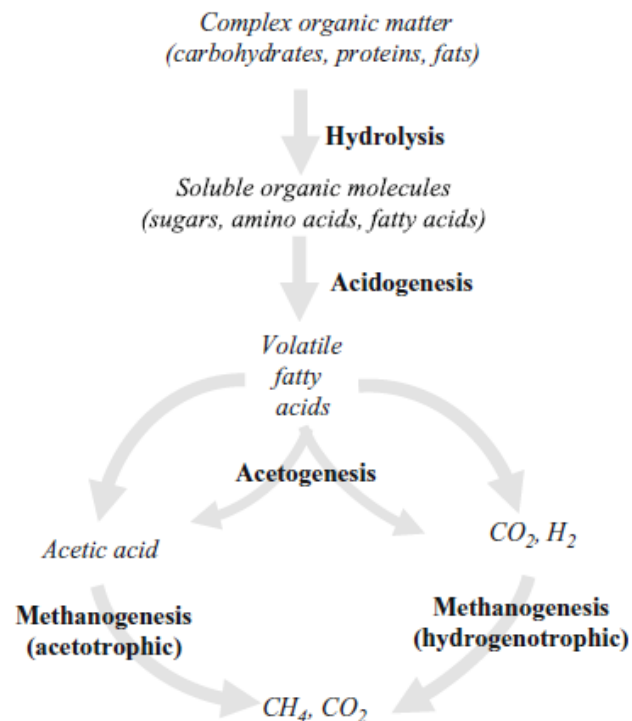
- a) Verhoging van de concentratie CH₄ in het biogas
- b) Betere ontwaterbaarheid van het digestaat (tot 40% droge stof na de decanter)
- c) Minder digestaat en daardoor kleinere investeringskosten van de digestaatverwerking
- d) Hygiënisiestap bij de digestaatverwerking wordt vervangen
- e) Verhoging invoer droge-stofgehalte
- f) Verlaging van de viscositeit
- g) Verhoogde vergistingscapaciteit (2-3x) door hogere doorloopsnelheid (HVT)
- h) Geen schuimvorming in vergister door verwijdering filamentous bacterie.
- i) Soorten materiaal: GFT, organisch uit verwerkings(VGI)industrie, slacht- & agrarisch afval.

5.4. Vergisting

Anaerobe vergisting (bij afwezigheid van zuurstof) is een proces dat veelvuldig in de natuur voorkomt. Het proces bestaat uit verschillende chemische reacties waarbij diverse groepen van micro-organismen een rol spelen.

Figuur 4 hiernaast geeft de conversieroutes overzichtelijk weer (Abassi, 2012). Er zijn 4 verschillende processen te herkennen:

- a) Hydrolyse. Grote moleculaire structuren zoals proteïnen, vetten en koolstofpolymeren (zoals cellulose en zetmeel) worden door middel van hydrolyse in kortere stukken geknipt tot aminozuren, vetzuren en suikers. Dit gebeurt in het vergistingsproces, maar kan ook in een aparte voorbereiding worden voor geprepareerd (zoals in deze VtLBG casus wordt gedaan; zie § 5.3 'Thermische Druk Hydrolyse).



Figuur 4. Afbraak van complexe moleculen in het anaërobe vergistingsproces.

- b) Acidogenese. Deze oplosbare tussenproducten worden dan middels zuurvorming (acidogenese) omgezet in vluchtige vetzuren (voornamelijk melk-, propion-, boter- en valeriaanzuren).
- c) Acetogenese. Deze vetzuren worden wederom geconsumeerd door acetogenese bacteriën en produceren acetaat (azijnzuur), koolstofdioxide en waterstof.
- d) Methanogenese. Methanogenese organismen consumeren dit azijnzuur, waterstof en een gedeelte koolstofdioxide met als product methaangas. Drie verschillende methanogenese processen spelen een rol:
 - a. Acetotrofe proces: $4 \text{ CH}_3\text{COOH} \rightarrow 4 \text{ CO}_2 + 4 \text{ CH}_4$
 - b. Waterstof-trofe proces: $\text{CO}_2 + 4 \text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
 - c. Methylotrofe proces: $4 \text{ CH}_3\text{OH} + 6 \text{ H}_2 \rightarrow 3 \text{ CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$

Theoretisch zou biogas een gelijke concentratie CH₄ en CO₂ moeten produceren (50%-50%), maar in de acetogenese wordt waterstof geproduceert. In het waterstof-trofe proces wordt deze H₂ met CO₂ omgezet in CH₄ waardoor de balans verschuift naar methaan. Vettige en proteïnerijke vergistingsproducten produceren meer H₂ en het resulterende biogas is dientengevolge rijker aan CH₄ (Abassi, 2012).

Voor het anaerobe proces zijn verder een aantal variabelen van belang die invloed hebben op de loop van vergisting. Deze worden hier kort besproken:

C/N ratio

Rekening moet worden gehouden met de verhouding tussen de hoeveelheid koolstof (C) en stikstof (gebonden N) in het vergistingssubstraat. Organismen gebruiken namelijk een hoeveelheid N voor hun proteïne-behoefte. Is deze ratio te hoog, dan wordt het overgrote deel N door de methanogene organismen geconsumeerd (4e stap) waardoor er schaarste dreigt voor de organismen in eerdere stappen (het vergistingsproces raakt bedrukt). Is de verhouding te laag, dan komt teveel N vrij die vervolgens omgezet wordt in ammoniak (NH₃) wat de pH waarde weer doet stijgen. Bij een pH hoger dan 8,5 heeft dit weer een drukkend effect op de methanogene organismen (Abassi, 2012). Een verhouding van 20-30 wordt als optimaal beschouwd. Tabel 1 hieronder geeft voor een selecte groep vergistingssubstraten aan wat die verhouding is (in dikke fracties). Het meevergisten van cosubstraten heeft dus ook als doel deze C/N ratio optimaal te krijgen (naast het verhogen van de methaanproductie door een hoger C-gehalte).

Tabel 1. Verhouding tussen koolstof en stikstof in verbinding voor verschillende types mest en organische materialen (Abassi, 2012).

Materiaal	C/N ratio
Gezamenmest	8
Menselijke uitwerpselen	8
Kippenmest	10
Geitenkeutels	12
Varkensmest	18
Schapenmest	19
Koemest	24
Waterhyacinth	25
GFT	40
Maisstengel	60
Tarwestengel	90
Zaagsel	> 200

Verdunning

Het vergistingssubstraat dient een dusdanige verdunning te hebben dat het materiaal goed geroerd kan worden. Een te grote verdunning betekent minder koolstof (en dus CH₄ productie) en de vaste deeltjes bezinken teveel. Een te kleine verdunning en het substraat kan niet goed gemengd worden, waardoor micro-organismen niet goed genoeg bij hun 'voeding' kunnen komen. Een voorbehandelingsstap (Thermische Drukhydrolyse) vergroot de verfijning van het vaste materiaal nog meer, waardoor het beter te verpompen is, te roeren en te verteren. Een optimale verdunning ligt op 10-20% vaste stof.

Zuurtegraad (pH)

Een optimale zuurtegraad (tussen 6-7 pH) is belangrijk voor het proces. Wanneer het proces

begint, worden in de acido- en acetogenese veel zuren geproduceerd waardoor de zuurtegraad daalt. Verder in het proces, bij de consumptie van stikstof (waar amoniak, NH₃ bij vrijkomt) stijgt de zuurtegraad weer. Bij stabilisatie van het productieproces van gas stabiliseert het weer op 7-8 pH. Er zijn verschillende configuraties vergisting beschikbaar die hierop invloed proberen uit te oefenen: zoals de 'batch'-vergisting, navergisting en propstroomvergisting. Afhankelijk van de voorkeuren van de relevante stakeholders zal voor een juiste configuratie gekozen worden.

Temperatuur

Vergistingsinstallaties kunnen in drie categorieën worden ingedeeld: psychrofiële (<10 oC), mesofiele (20-40 oC; 35oC is optimaal) en thermofiele vergisting (50-65 oC; 55oC is optimaal). Per type zijn een specifieke groep micro-organismen werkzaam, die buiten deze temperatuurbreedtes niet overleeft. Thermofiele vergisting is optimaler dan mesofiele, maar moeilijker te controleren en er is meer energie (warmte) nodig voor het op temperatuur houden van de vergister. Tabel 2 hieronder weergeeft die verhouding in mesofiele en thermofiele projecten in de EU.

Tabel 2. Geïnstalleerde projecten in de EU in voorgaande 5-jaarperiodes; meso- en thermofiel. Bron: Abassi, 2012.

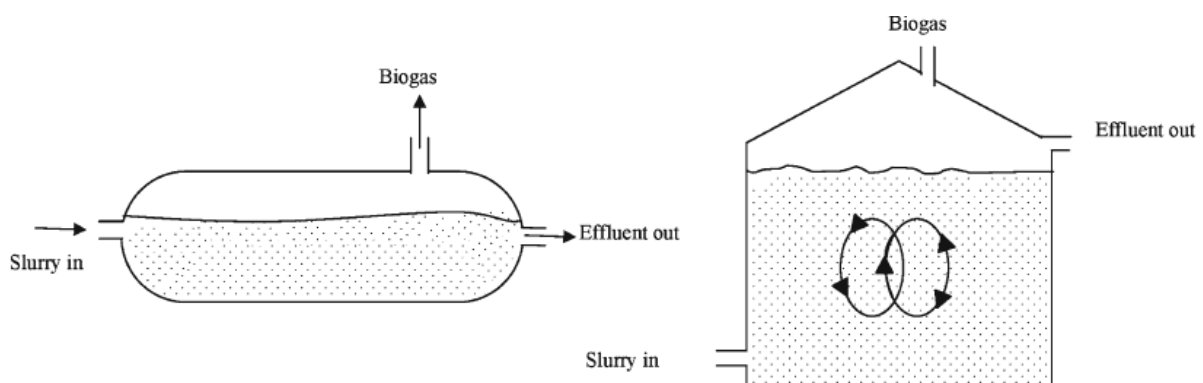
Periode (5 jaar)	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010
Mesofiele projecten	123.500	717.500	1.655.950	14.187.000
Thermofiele projecten	70.500	400.000	422.000	827.750
% mesofiel	64%	64%	80%	63%
% thermofiel	36%	36%	20%	37%

Voedingstempo

Bij een inadequaat voedingstempo kan het systeem ook vast raken. Zo kan een te grote voeding van bijproducten en ondermaatse menging een te hoge zuurvorming als gevolg hebben, waardoor de zuurtegraad teveel daalt. Een snelle oplossing is het bijmengen van kalk. Een optimale voeding is natuurlijk de beste oplossing.

Verblijftijd

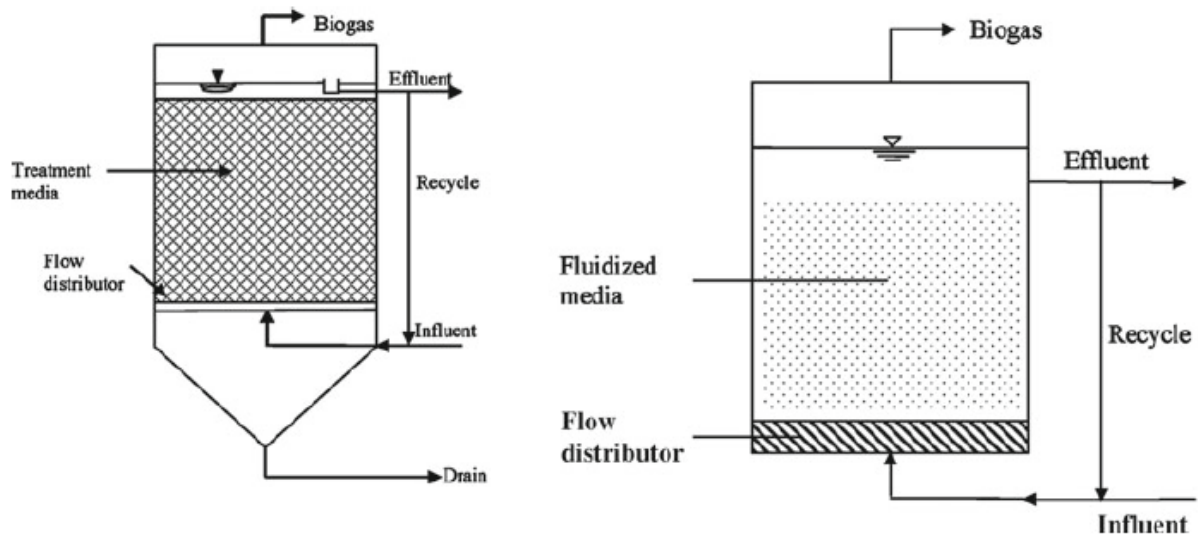
Bij het vergisten worden er twee type 'verblijftijden' gebruikt: die van de te vergiste producten (ook wel hydraulische verblijftijd of HVT) en van de micro-organismen (micro-organismen verblijftijd of MVT). De hydraulische verblijftijd is van het moment dat de vergistingsproducten in, tot wanneer ze uit de vergister gaan. De MVT is de tijd dat de micro-organismen actief in de vergister blijven. De verhouding tussen deze twee, de Feed/Micro-organisme ratio, of kortweg de F/M ratio, is een belangrijke parameter in het vergisten. Het rendement wordt verhoogt bij een zo laag mogelijke HVT (grotere doorstroom) en bij een zo hoog mogelijke MVT (organismen doen zo snel mogelijk hun werk). Bij simpele, kleinschalige vergisters (Figuur 5 hieronder weergeeft een niet-geroerde en geroerde vorm) is



Figuur 5. Simpele configuraties van vergisters, veelal te vinden in derdewereldlanden. Hier is de HVT = MVT, oftewel de vergistingsorganismen verlaten de tank samen met het te vergisten product.

de HVT = MVT omdat de micro-organismen met het digestaat de vergister verlaten.

In modernere technieken echter is het mogelijk om de $HVT > MVT$ te laten zijn. Door een medium in de vergister te plaatsen, bijvoorbeeld een fijn rooster van kunstmateriaal (Figuur 6 onder, links) of een beweegbaar bed van kunststofkorrels (Figuur 6 onder, rechts), worden de micro-organismen een kans geboden zich te binden aan het medium. In de praktijk kan een HVT/MVT ratio van 3 al gehaald worden (Abassi, 2012).

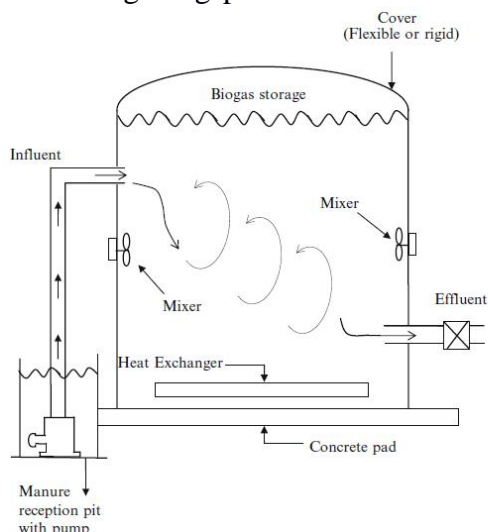


Figuur 6. Tweede generatie vergisters met mediums die een proces bereiken waar $HVT \gg MVT$.

Toxiciteit en pathogenen

Minerale ionen (bijv. zware metalen) en detergents hebben een remmende werking op de micro-organismen. In kleine hoeveelheden zijn mineralen voedend, zoals sodium, kalium, calcium, magnesium, maar in grotere hoeveelheden werken ze vergiftigend. Ook zware metalen in zeer kleine hoeveelheden stimuleert de groei van micro-organismen, maar teveel is giftig. Een onderbroken vergistingsproces door vergiftiging kan dus alleen worden hervat door spoeling van de installatie of verdunning om de concentraties omlaag te brengen.

In de vergistingsproducten bevinden zich ook altijd pathogene bacteriën: bij slib- en



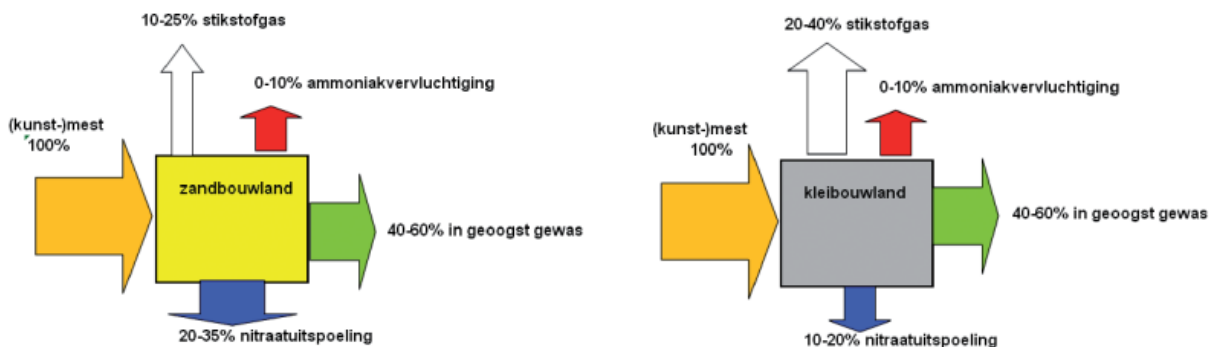
Figuur 7. Type vergistingsconfiguratie die in de hier gepresenteerde ViLBG-configuratie wordt voorgesteld. Dit is de meest gangbare type vergisting in Nederland.

huishoudelijk afval bestaat er meer infectie voor werkers dan bij dierlijke mest. Voor ieder geval moet gekeken worden of een hygiëniseringsprocedure als voor- of nabehandeling (verwarmen op 70 °C voor minimaal één uur) nodig is. Voor mestverwerking die voor de export dient is deze stap verplicht. Figuur 7 hieronder illustreert de gangbare vergister die hier in Nederland vaak te zien zijn op boerderijen.

5.5. Digestaatverwerking

5.5.1. Mestverordening

Nadat de mest en bermgras door de vergister zijn geweest, wordt het bestempeld als digestaat en dient het verder te worden verwerkt. Het wordt nog steeds als mest(product) gezien en valt dus onder de landelijke mestwetten en -regels. Een overmaat aan mineralen fosfor en nitraat op het land worden uitgespoeld naar het grond- en oppervlaktewater en zorgen daar onder andere voor eutrofiëring. Figuur 8 hieronder geeft een overzicht van de stikstofverliezen op zand- en kleibouland.



Figuur 8. Nitraatverliezen op zand- en kleibouland. (Kennissakker, geciteerd op 2015).

Agrariërs zijn daarom aan drie specifieke gebruiksnormen voor mest gebonden:

1. Gebruiksnorm voor dierlijke mest: hoeveelheid (werkzame) stikstof uit dierlijke mest dat mag worden aangebracht op het land;
2. Stikstofnorm: hoeveelheid stikstof dat *in totaal* mag worden aangebracht;
3. Fosfaatnorm: hoeveelheid fosfaat dat *in totaal* mag worden aangebracht.

Door voortschrijdende intensivering van de veeteelt, ontstaat een situatie waar er meer mest wordt geproduceerd dan wordt afgevoerd (i.e. door melk en/of vlees). Het overschot dient uit het systeem te worden gehaald en getransporteerd te worden naar daar waar er inzetruiimte is. Dit kunnen akker-, (glas)tuinbouwers of andere veehouders zijn. Meestal gebeurt dit van vee-rijke kleiregio's naar vee-arme zandregio's. Als mest ongescheiden op het land wordt aangebracht, zal die hoeveelheid drijfmest beperkt worden door één van bovenste (mineraal)normen. Om de gebruiksnorm van het tweede mineraal te halen, zal kunstmest moeten worden aangekocht. Tevens dient de overgebleven mest te worden afgevoerd.

Verder zijn mineralen in dierlijke mest (organische meststoffen oftewel mest en compost)

maar deels meteen beschikbaar voor opname door de plant en deels pas na mineralisatie van organische verbindingen (na meerdere jaren). Deze vertraging is vertaald naar wettelijk vastgelegde werkingscoëfficiënten (oftewel het werkelijk beschikbare aandeel mineralen in procenten). Voor kunstmest is dit 100%; voor mest(-producten beduidend) minder. Tabel 3 hieronder geeft die coëfficiënten weer voor verschillende types mest.

Tabel 3. Werkingscoëfficiënten (in %) van verschillende types mest, toegediend op verschillende momenten in het jaar. Bron: Kennisakker (2015).

Termijn:	In het eerste jaar na toediening		Op lange termijn bij herhaald gebruik	
	1 sept	1 mrt	1 sept	1 mrt
Drijfmest van rundvee	10	55	20	75
Drijfmest van vleesvarkens	10	75	20	85
Vaste vleeskuikenmest	10	55	20	70
Compost	10	20	40	60 *

* Dit geldt pas na vele jaren herhaalde composttoediening.

Dit is één van de redenen waarom ook een gebruiksnorm voor dierlijke mest bestaat: er bestaat immers een grotere kans voor vervluchting en uitspoeling van de niet (direct) opneembare mineralen in latere jaren na toediening.

Nu worden organische verbindingen door het vergistingsproces afgebroken en komt een deel van de organisch verbonden stikstof vrij, waardoor de werking meer in de buurt komt van de werking van kunstmest. Proeven met vergist digestaat laten zien dat de stikstofwerking is verhoogd ten opzichte van niet vergiste mest (Schröder et al, 2008). De stikstofopname in het eerste jaar na toediening wordt dus verhoogd en in latere jaren verlaagd, wat resulteert in een gelijke overall werking maar met minder uitspoelingsrisico (id.). Echter, ook proeven met mineralenconcentraten uit bewerkte mest laten zien dat deze niet precies hetzelfde werkt als kunstmest. De werking van deze producten blijft tot 20% achter op kunstmest (WUR, Schröder, 2009). Meer onderzoek naar de werking van concentraten moet daarom gedaan worden willen mestproducten ingezet worden als kunstmestvervangers.

De huidige criteria van de EU-meststoffenverordening maken het deze vervanging niet eenvoudig. Mogelijk zal een herziening hiervan (vernieuwde verordening 2014/2015) meer ruimte bieden. Ook de nitraatrichtlijn (DG-ENVI) biedt mogelijk ruimte. Het rijk zet als eerste belanghebbende in op het verkrijgen van derogatie voor mineralenconcentraat, binnen de onderhandelingen met de Europese commissie m.b.t. het vijfde actieprogramma voor de nitraatrichtlijn (Smit, 2013). De milieudruk zal dan niet verhoogd mogen worden. Uiteindelijk is het de Europese commissie die een besluit zal nemen over de mogelijkheid tot vervanging van kunstmest door mestproducten (Alterra, 2013). In deze VtLBG wordt de valorisatie van deze mestproducten alvast meegerekend in het financiële plaatje. Op deze manier ontstaat de mogelijkheid een beeld te scheppen van de kosten voor verdere mineralenraffinage uit dierlijke mest.

KUMAC Mineralen Deurne is een voorbeeld van een ‘mineralenconcentraatcoöperatie’ waar loonbedrijf Kuunders en Demac (samen 43 varkensboeren) een ontheffing van de overheid hebben gekregen om het mineralenconcentraat als kunstmestvervanger aan te merken. De

hypothese dat een voorbehandelingsstap (TDH) en een vergistingsschakel de mineralenbeschikbaarheid vergroot, zou als een innovatief onderzoekscasus kunnen worden uitgewerkt waar Wageningen Universiteit, Stichting biomassacentrale Hellowou en mestleverende stakeholders aan deelnemen.

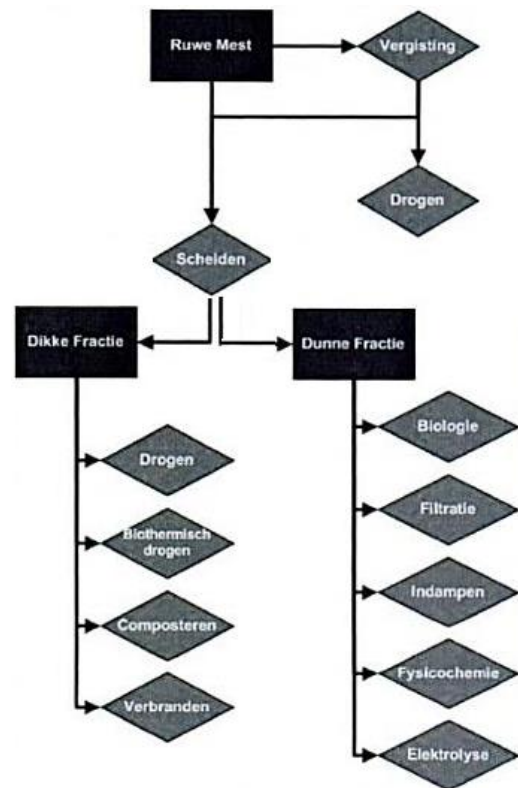
In de hier voorgestelde VtL BG configuratie is gekozen voor het verder verwerken van het digestaat. Figuur 9 hiernaast geeft een overzicht van de mogelijkheden die worden ingezet in de mestverwerking en die gelden ook voor digestaat. Het digestaat wordt gescheiden in een dikke fractie met verhoogde fosfaatconcentratie en een mineralenconcentraat met verhoogde nitraat- en kaliconcentratie. Dit biedt dus de mogelijkheid om de bedrijfsspecifieke bemestingsvraag meer op maat aan te bieden. Hierbij geldt dat een installatie met een zo hoog mogelijk scheidingsrendement dit maatwerk het beste kan leveren. Daarom is gekozen voor een decanter (centrifuge) waar de dikke fractie wordt gescheiden om verder ingedroogd te kunnen worden. De dunne fractie wordt met ultra-filtratie en reverse osmose verder verwerkt tot een organische fractie, een mineralenconcentraat en een fractie loosbaar water (Vlaams BBT Kenniscentrum, 2002).

5.5.2. Decanter

Bij de keuze voor de digestaatscheider spelen een aantal factoren een rol. Een aantal belangrijke factoren zijn (i) het type mest (en coproduct) waarmee is vergist, (ii) de mate van droging oftewel stapelbaarheid, (iii) het verlangde scheidingsrendement voor de specifieke mineralen, (iv) onderhoudsgevoeligheid en natuurlijk (v) de kosten.

Type mest

Runder- en varkensdrijfmest kunnen heel erg verschillen in de samenstelling. Tabel 4 hieronder weergeeft dat voor beide mesttypes. Runderen eten veel grover voedsel (rijkere structuur) terwijl dat bij varkens minder het geval is. Dit heeft direct gevolgen voor de type mestscheider. Ook krijgen runderen veel meer zand binnen, wat niet bezinkt in mestopvang en dus door de scheider heen moet, wat weer slijtage tot gevolg heeft. Daarnaast zijn de N en P gehalten van varkensmest ook veel hoger dan dat van runderen, wat zich weer vertaalt in verschillende concentraties in de dikke en dunne fractie na scheiding. De vergistingscasus in Hellowou richt zich echter op runderdrijfmest.



Figuur 9. Verschillende mestverwerkingsroutes.
Bron: BBT Vlaams kenniscentrum.

Tabel 4. Gemiddelde samenstelling van de drie belangrijkste soorten drijfmest (Bokhorst, 2000; WUR, 2009).

Soort drijfmest	Droge stof (%)	Org. Stof (%)	N-totaal* (g/kg)	NNH ₃ * (g/kg)	P ₂ O ₅ * (g/kg)	K ₂ O* (g/kg)
Vleesvarkensdrijfmest	9,0	6,0	7,2	4,2	4,2	7,2
Zeugendrijfmest	5,5	3,4	4,2	2,5	3,0	4,2
Rundveedrijfmest	9,0	6,8	4,9	2,6	1,8	6,8

* N-totaal = totaal stikstofgehalte; NNH₃ = ammoniakale stikstof; P₂O₅ = fosfaat; K₂O = kali.

Droge stof (stapelbaarheid)

In de verdere uitwerking van de VtL BG configuratie moet besloten worden waar de dikke fractie voor wordt gebruikt. Als die op grote afstanden vervoerd moet worden (bijvoorbeeld naar Duitsland) dan is een zo hoog mogelijke droge-stofgehalte de belangrijkste factor. In Tabel 5 hieronder wordt de invloed gegeven van de droge-stofgehalte (DS-gehalte) van de ingaande mest, van de dikke en van de dunne fractie, op de DS-gehalte van de gescheiden mest. Als gekozen wordt voor een hoge DS-gehalte (voor transport) dan wordt er minder dikke fractie geproduceerd. Wordt daarentegen gekozen voor een lagere DS-gehalte in de dikke fractie, dan wordt meer dikke fractie afgescheiden.

Tabel 5. De invloed van de droge-stofgehalte van ingaande mest/dunne/dikke fractie op de afgescheiden hoeveelheid dikke en dunne fractie, in kg per m³ gescheiden mest. Bron: Schröder, 2009).

	Drogestofgehalte ingaande drijfmest (%)	Drogestof-gehalte dunne fractie (%)	Drogestof-gehalte dikke fractie (%)	Afgescheiden hoeveelheid dikke fractie per m ³ gescheiden drijfmest (kg)	Overblijvende hoeveelheid dunne fractie (kg)
A	10	5	25	250	750
B	10	7	25	167	833
C	7	5	25	100	900
D	10	5	15	500	500
E	10	7	15	375	625
F	7	5	15	200	800

Het verschil in DS-gehalte tussen de dunne fractie en de ingaande drijfmest is een belangrijke maatstaf voor de prestatie van een mestscheider (Schröder, 2009). Hoe groter dit verschil, hoe beter de scheiding (Vergelijk voorbeeld 1 A, B en C). Maar ook het droge stofgehalte van de dikke fractie is van belang (Vergelijk voorbeeld 1 A en D). Voorbeeld 1 D, waar een dikke fractie met slechts 15% droge stof wordt geproduceerd, resulteert in een hoeveelheid van 500 kg dikke fractie per m³ gescheiden drijfmest. Een dergelijke grote hoeveelheid dikke fractie met een DS-gehalte dat slechts 50% hoger ligt dan dat van de ingaande drijfmest is ongewenst. Deze dikke fractie is niet stapelbaar en transport zal duur zijn door het grote volume met een vochtgehalte van 85%.

Voor de vergistingscasus in Hellouw verdient een lokale inzet van het digestaat en mineralenconcentraat de voorkeur. Transportkosten van lange afstanden wordt vermeden en kunstmest wordt vervangen. Dit draagt allemaal bij aan de duurzaamheid van de valorisatie van deze type biomassa. Voor een tweede en/of grotere schaal vergisting kan de export van digestaat alsnog een waardevolle optie worden.

Scheidingsrendement

Het scheidingsrendement is ook belangrijk: verschillende scheiders halen andere hoeveelheden droge stof, N, P en K-mineralen uit het digestaat. Het scheidingsrendement is het procentuele aandeel dat bij scheiding in de dikke fractie terecht komt, ten opzichte van de totale hoeveelheid van die stof in de ingaande mest. in formulevorm:

$$\% = \frac{[\text{gehalte dikke fractie}] * [\text{hoeveelheid dikke fractie}] * 100}{[\text{gehalte ingaande mest}] * \text{hoeveelheid ingaande mest}}$$

Tabel 6 hieronder geeft de DS- en mineraalwaarden weer van een vijzelpers en centrifuge, gemeten in proeven met varkensdrijfmest (Schröder, 2009). Duidelijk is dat bij deze type scheiding vooral het fosfaat wordt meegescheiden, i.e. blijft vastkleven aan het organisch materiaal. De centrifuge scheidt nog veel sterker dan de vijzelpers. Van de proefopstelling waar Tabel 6 over rapporteert, is bekend dat die uit een ton ingaande mest, 86 kg dikke fractie met de vijzelpers produceerde en 79 kg met de centrifuge. Hieruit en met behulp van bovenstaande formule is te halen dat het scheidingsrendement voor fosfaat 20% voor de vijzelpers is en 64% voor de centrifuge. Voor deze VtLBG-configuratie wordt dan ook voor een centrifuge (decanter) gekozen. Dit is ook door Stichting biomassacentrale Hellow bevestigd.

Tabel 6. Samenstelling varkensdrijfmest voor en na de scheiding met vijzelpers en centrifuge (uit: Schröder, 2009).

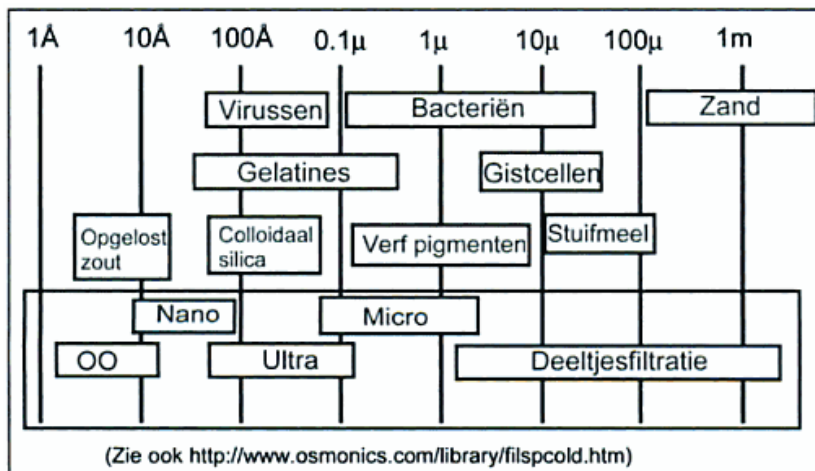
	Droge stof g/kg	Organ. stof g/kg	N-totaal g/kg	N- NH ₃ g/kg	P ₂ O ₅ g/kg	K ₂ O g/kg
<i>Vijzelpers</i>						
Ingaande drijfmest	72	55	5,43	3,2	3,1	4,3
Dikke fractie	296	268	7,63	3,0	7,2	3,8
Dunne fractie	49	33	5,16	3,3	2,6	4,5
<i>Centrifuge</i>						
Ingaande drijfmest	52	38	4,0	2,5	2,4	3,5
Dikke fractie	317	250	9,6	5,5	19,6	3,5
Dunne fractie	27	17	3,3	1,9	0,6	3,4

De centrifuge is echter wel veel onderhoudsgevoeliger dan bijvoorbeeld de vijzelpers. Het type meevergiste coproduct speelt hierbij ook een grote rol. Door vergisting treedt een pH-verhoging op in het substraat waardoor, na afkoeling van het substraat buiten de vergister, opgeloste zouten gemakkelijk kunnen neerslaan en problemen veroorzaken door aangroei van kristallen (scaling) in leidingen, scheiders en opslagen. Met name de ongecontroleerde vorming van struvietkristallen (ammonium-magnesium-fosfaat) kan grote problemen veroorzaken. Ook zijn de energie- en investeringskosten hoger. In de sectie ‘resultaten’ zal inzichtelijk worden gemaakt wat het effect is (scheidingsrendement versus financieel rendement).

5.5.3. Ultra Filtratie en Reverse osmose

De laatste twee stappen in de digestaatverwerking zijn ultra-filtratie (UF) en reverse osmose (RO). Onderstaand Figuur 10 illustreert op een inzichtelijke wijze de verschillende korrelgroottes van materiaal/organismen en de technieken die die kunnen scheiden. De deeltjesfiltratie wordt door de decanter gedaan. UF haalt daar nog al het fijne organische materiaal uit dat door de centrifuge mee is gekomen. En als laatst haalt de RO het overgrote

deel water uit het UF-concentraat. RO is een membraantechniek waar onder hoge druk de vloeistof wordt gescheiden. Wat overblijft is een ‘permeaat’ van water wat geloosd kan worden op het oppervlaktewater en een ‘concentraat’ met hoge concentraties stikstof en kali.



Figuur 10. Deeltjesgrootte overeenkomst met bekende voorbeelden. Vlaams BBT-Kenniscentrum (2002).

De vuistregel is hoe gecompliceerder of geavanceerder de digestaatverwerking, des te zuivere eindproducten maar ook des te hoger de investeringskosten. In het volgende hoofdstuk ‘resultaten’ wordt onder andere onderzocht wat deze TvLbg-configuratie voor consequenties heeft voor wat betreft het energieverbruik en investeringskosten.

5.6. Warmtekrachtkoppeling

Middels een warmtekrachtkoppeling wordt een deel van het biogas opgestookt om in de elektriciteits- en warmtebehoefte van het systeem te voorzien. Alle componenten gebruiken elektriciteit, waarbij de digestaatverwerking het grootste deel verbruikt. Warmte wordt onder ander gebruikt voor het TDH proces en voor het warmhouden van de vergisters op 38 graden. In een aantal onderzochte scenario’s kan de verwarming van de vergisters gedaan worden met het eindproduct van het TDH proces. Tevens staat de WKK geschaald op het electriciteitsgebruik van de gehele VtLbg-configuratie. Hierdoor kan het voorkomen dat een overschot aan warmte wordt geproduceerd als bijproduct. In de onderzochte scenario’s wordt ervan uitgegaan dat deze warmte kan worden vermarkt.

5.7. Cryogene LBG opwerking

Sinds enkele jaren ontwikkelt zich een markt voor LNG (liquefied natural gas ofwel vloeibaar methaangas) als transportbrandstof, specifiek voor het zware transport, de binnenvaart, de passagiersvaart en de short sea sector. Transporteurs zijn geïnteresseerd in deze brandstof omdat motoren schoner en stiller zijn dan dieselmotoren en de actieradius dankzij de hogere energiedichtheid veel groter is dan die van motoren op aardgas of groen gas (niet v.s. wel gecomprimeerd en gekoeld). LNG voldoet nu al aan de aankomende scherpere emissie-eisen voor het wegtransport en de scheepvaart. Dit maakt LNG interessant voor leveranciers van winkelketens, supermarkten en internationaal transport (Groen Gas Nederland, 2013).

Door het gebruik van LNG in de transportsector kan op termijn voor biogas als een aantrekkelijk nieuw en rendabel afzetkanaal ontstaan. LNG kan namelijk ook worden gemaakt uit biogas (uit vergisting of stort) en wordt dan bio-LNG genoemd. Verwacht wordt dat in 2030 10% van het totale biogas potentieel (5,6 PJ) wordt gebruikt voor bio-LNG, overeenkomend met een productie van 100.000 ton bio-LNG (dit komt ongeveer overeen met 215 miljoen m³ ruw biogas). Bio-LNG kan dus meeliften op de groei van de LNG-markt.

Er zijn een aantal technologieën beschikbaar om (bio)gas op te werken naar LBG, waaronder de gangbare 'water scrubbing' en PSA. Een opkomende techniek is die van cryogene opwerking, waarbij het gas afgekoeld wordt tot zeer lage temperaturen. Op deze manier wordt gebruik gemaakt van de verschillende (specifieke) condensatietemperaturen van de gassen in het biogas. Zo wordt bij een koeling tot -78,5°C de CO₂ gecondenseerd en ontstaat een 'liquid CO₂' oftewel LCO₂ stroom. Het gas kan ook doorgekoeld worden naar -161°C (condensatietemperatuur van methaan): dit vergt wel meer elektrische energie, maar het vloeibare gas (LBG) heeft voor een aantal doeleinden een groot voordeel gezien het ongeveer 600 keer 'ruimte-efficiënter' is dan normaal biogas bij atmosferische druk, en 3 keer meer 'ruimte-efficiënter' dan gecomprimeerd gas (bij 200 bar, oftewel CNG) (Johansson, 2008). Dit is uitstekend voor situaties met grote vrachten over grote afstanden, bijvoorbeeld voor zwaar land- en waterverkeer. Echter is een belangrijke voorwaarde voor het goed functioneren van een LBG-installatie de constante kwaliteit en levering van het biogas. Dit is vaak nog een uitdaging voor vergisters en stortplaatsen.

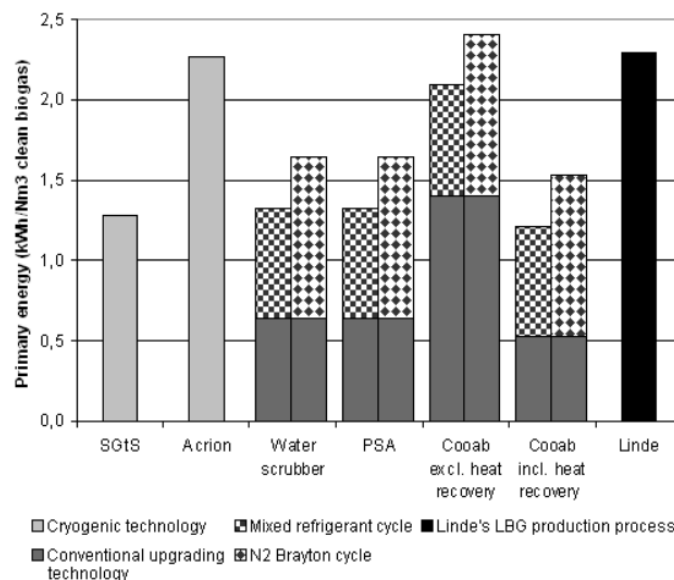
Bij het toepassen van biogas naar schoon methaangas of transportbrandstof moeten schadelijke componenten zoals water, waterstofsulfide, kleine deeltjes, siloxanen en andere halogene deeltjes worden verwijderd. Dit zou anders corrosie, afzetting of andere schade aan materiaal opleveren. Biogas uit vergisting en stortgas bevat over het algemeen veel water (5%) en dit veroorzaakt in reactie met CO₂ of H₂S bijvoorbeeld veel corroderende zuren. Siloxanen zijn organische silica moleculen die bij verbranding een soort wit poeder vormen, dat ophoopt in motoren en daar blokkades en erosie veroorzaakt (Johansson, 2008).

De technieken die het biogas verschoneren kunnen gecategoriseerd worden in vier types:

1. Absorptie. Deze techniek maakt gebruik van verschillen in moleculaire bindingskracht van gassen. Het biogas wordt gecomprimeerd en door water heen geleid (de 'water scrubbing techniek') waarin CO₂ en H₂S oplossen, en kleine hoeveelheden CH₄. Het uitgaande gas heeft een CH₄ gehalte van 97% maar is nog betrekkelijk verzadigd met water. In plaats van water als absorberend middel kunnen ook andere organische absorbens worden gebruikt.

2. Adsorptie. Bij deze techniek worden de CO₂ deeltjes met enige druk op een medium vastgehouden. Door een verschil in molecuulgrootte worden deze gassen gehecht aan het medium, bijvoorbeeld aan geactiveerd koolstof of moleculaire zeven. Een gangbare techniek is de ‘pressure swing adsorption’ (PSA) of ‘temperature swing adsorption’ (TSA). Het biogas dient vooraf wel ontdaan te zijn van H₂S.
3. Membranen. Een derde technologie is het toepassen van membranen, waar gebruik wordt gemaakt van het verschil in molecuulgrootte. Onder druk wordt het gas door de opstelling gebracht, waarna CO₂ wel doorgelaten wordt en CH₄ niet (geheel). Er ontstaat wel een geringe fractie CH₄ in het ‘permeaat’. Als de membraandoorgang groter wordt gemaakt, ontstaat wel meer CO₂ afvoer, maar er is dan ook een grotere CH₄ regeneratie nodig.
4. Cryogene technologie. Zoals eerder omschreven maakt deze technologie gebruik van de verschillende condensatietemperaturen van gassen. Zo condenseren vervuilingen en een gedeelte water bij +6°C, de rest van de contaminanten lossen in dit water op; bij -25°C condenseren H₂S en siloxanen; CO₂ bij -78 °C en CH₄ bij -190 °C. Wat overblijft is een stroom nitraat (N₂). Bijkomend voordeel is dat deze N₂ nu ook gescheiden is, wat bij voorgaande technologieën moeilijk was. Het resultaat is een methaanstroom van meer dan 99% zuiverheid.

Meerdere bedrijven zetten LBG op de markt middels één van bovenstaande technologieën, of in een combinatie daarvan. Figuur 11 hieronder weergeeft het primaire energieverbruik¹ voor de productie LBG, door verschillende bedrijven en technologieën. Acrion Technologies is een voorbeeld van een klein Amerikaans bedrijf, dat stortgas in verschillende stappen van absorptie en membraantechnologie het biogas verschoont, alvorens die te koelen tot LBG-kwaliteit. Het Scandinavisch-Nederlandse bedrijf GtS gebruikt alleen cryogene technologie. Coaab is een bedrijf dat met absorptie (organische absorbens) werkt. Het energieverbruik van de cryogene GtS technologie kan nog eens max. 50% aan primaire energie besparen als de restwarmte (van 55 °C) nuttig wordt ingezet.

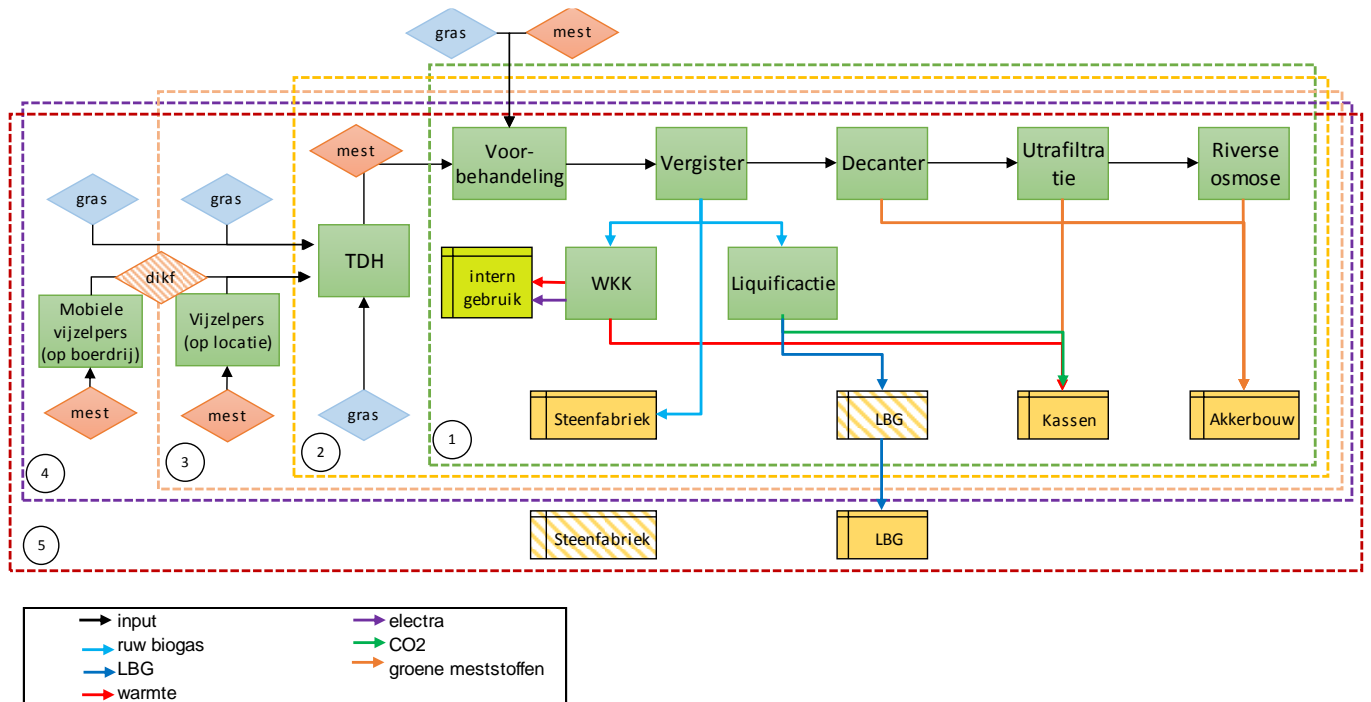


Figuur 11. Primaire energiegebruik voor verschillende LBG technologieën. De water scrubber, PSA en COA zijn geïntegreerd met een ‘mixed refrigerant’ of N₂ koelcyclus.

¹ Om het primaire energieverbruik te krijgen is hier het verbruik voor opwerking vermenigvuldigd met een conversie-efficiëntie factor van de Zweedse energiemix van 1,6 voor elektriciteit en 1,16 voor (biomassa-gestookte) warmte.

6. Methode

In dit gedeelte wordt de methode beschreven die leidt tot een overzicht van de financiële en energetische haalbaarheid van een Vergisting-tot-LBG-configuratie. In hoofdstuk 4 zijn de systeemgrenzen omschreven en in dit hoofdstuk worden de rekenmethodes en grootheden van ieder van die systeemcomponenten behandeld. Omdat er twee schakels betrekkelijk nieuw zijn in het systeem (mest bij voorhand scheiden met vijzelpers voor grotere drogestof gehalte; en een Thermische Druk Hydrolyse) worden verschillende scenario's getest op de financiële en energetische haalbaarheid. De scenario's en betreffende specificaties zijn in Figuur 12 hieronder weergegeven.



Figuur 12. Schematische weergave van de vijf onderzochte scenario's en bijbehorende systeemgrenzen.

Scenario 1: in dit scenario wordt de meest gangbare vorm van mest(co)vergisting en digestaatverwerking bekeken. Het betreft de aanvoer van ongescheiden mest, die direct met het coproduct gras wordt gemengd in een voorbehandelingsstap. Het digestaat wordt verwerkt in drie stappen (centrifuge, ultra-filtratie en reverse osmose). Een deel van de gasopbrengst ($600 \text{ m}^3/\text{uur}$ ruw biogas) gaat naar de steenfabriek in Hellouw, de rest wordt met cryogene technologie opgewerkt naar LBG.

Scenario 2: in dit scenario wordt een Thermische Druk Hydrolyse proces toegevoegd die het gras (coproduct) zal gaan hydrolyseren. Het verwachte effect is een verhoogde biogasopbrengst en een betere ontwatering in de nabewerking. Tevens zullen de concentraties ongebonden mineralen (NPK) hier het hoogst zijn. De mestinvoer blijft ongescheiden en ondergaat geen TD-Hydrolyse. Beide producten worden na de TDH stap gemengd in de homogenisatiestap. Verder gaat $600 \text{ m}^3/\text{uur}$ ruw biogas naar de steenfabriek in Hellouw, de rest wordt met cryogene technologie opgewerkt naar LBG.

Scenario 3: in dit scenario wordt voor de TD Hydrolyse een vijzelpers geplaatst die de aangeleverde mest op locatie van de vergistingsinstallatie scheidt in een dikke en dunne

fractie. De dikke fractie wordt vervolgens samen met het gras gehydrolyseerd. Dit levert een hogere drogestofgehalte op en dus meer biogas. De dunne fractie gaat niet door de vergister, maar wordt samen met de dunne fractie uit de centrifuge door de UF en RO geleid. Eén nadeel is dat de gebonden nitraat in de dunne fractie vanuit de vijzelpers niet wordt afgebroken in het vergistingsproces, waardoor het werkzame N-deel lager is dan bij scenario's 1 en 2 en dus een lager werkingscoëfficiënt heeft. Hierdoor worden minder credits verkregen uit 'groene kunstmest'. Een tweede nadeel is dat de capaciteit van de UF & RO veel groter (en dus duurder) wordt door een grotere stroom dunne fractie. Dit scenario dient dus om te testen of een verdikking in aangeleverde mest voor vergisting opweegt tegen bovengenoemde twee nadelen. Verder gaat 600 m³/uur ruw biogas naar de steenfabriek in Hellewou, de rest wordt met cryogene technologie opgewerkt naar LBG.

Scenario 4: dit scenario is hetzelfde als het voorgaande scenario 3, met het enige verschil dat een mobiele vijzelpers wordt ingezet die de mest op boerenlocatie al scheidt. Enkel de dikke fractie wordt vervoerd naar de vergistingsinstallatie, de dunne fractie wordt meteen uitgereden op het land. Het resultaat is dat minder transportbewegingen worden gemaakt en dat er een minder grote UF & RO capaciteit geïnstalleerd hoeft te worden (een duur component!). Hierbij volgt ook dat er minder credits uit kunstmestvervangers zullen zijn. Verder gaat 600 m³/uur ruw biogas naar de steenfabriek in Hellewou, de rest wordt met cryogene technologie opgewerkt naar LBG.

Scenario 5: in dit scenario wordt het totale plaatje geschetst dat nodig is voor een optimaal functionerende LBG-opwerkingsinstallatie. In de voorgaande scenario's is uitgegaan van een levering van 600 m³/uur biogas aan de steenfabriek, terwijl de rest voor LBG-opwerking wordt gebruikt. Helaas heeft de steenfabriek ook een specifiek consumptiepatroon van gas door het jaar heen, waardoor de levering aan de LBG installatie onregelmatig is. Dit is ongewenst en dient zoveel mogelijk voorkomen te worden bij de hier onderzochte GtS-technologie. In dit scenario wordt alle biogas ingezet voor LBG-opwerking.

De opzet van de methode ziet er als volgt uit. Eerst wordt de massabalans gegeven van het gehele systeem. Vervolgens wordt in een energiebalans een overzicht geven van alle energieverbruiken per component. Ook zijn de 'operational expenditures' (OPEX) van transportkosten, bijproducten, arbeid en onderhoud hier te vinden. Als laatste worden de formules gegeven die de financiële, energetische en broeikasprestaties berekenen.

6.1. Massabalans

6.1.1. Gasproductie

De gasproductie komt van de vergisting van rundveedrijfmest en gras. Het coproduct kan ook van andere bronnen komen, zo is gemeentelijk GFT ook een geschikte bron met een hoog koolstofgehalte. De formule voor deze productie is als volgt:

$$V_{\text{methaangas}} = M_{\text{in}} * f_{\text{ds}} * f_{\text{org.ds}} * f_{\text{c in ds}} * \eta_{\text{c conversie}} * f_{\text{ch4 aandeel}} * r_{\text{ch4:c}} / \rho_{\text{ch4}} * 1000, \text{ waar:}$$

$V_{\text{methaangas}}$	= Geproduceerde volume aan methaangas (Nm ³ /jaar methaangas)
M_{in}	= Debiet aan input (ton/a)
f_{ds}	= Aandeel drogestof (ds) in de input (%)
$f_{\text{org.ds}}$	= Aandeel organische drogestof in ds (%)
$f_{\text{c in ds}}$	= Aandeel koolstof in (organische) ds (%)
$\eta_{\text{c conversie}}$	= Conversie-efficiëntie van koolstof door vergisting, voor CO ₂ + CH ₄ (%)
$f_{\text{ch4 aandeel}}$	= Aandeel methaan (CH ₄) in het geproduceerde biogas (%)
$r_{\text{ch4:c}}$	= Massaratio CH ₄ :C
ρ_{ch4}	= Dichtheid van methaan (kg/m ³).
1.000	= conversie van Km ³ naar m ³ (mestinput is in ton/a, dichtheid is in kg/m ³).

Voor ieder vergistingsproduct wordt dit afzonderlijk berekend, dus voor runderdrijfmest én voor gras (en dus ook voor additionele coproducten die eventueel in de toekomst worden benut). Voor de totale gasproductie over de totale input geldt dan:

$$\text{Biogasrendement} = \frac{V_{\text{methaan,RDM}} + V_{\text{methaan, bermgras}}}{M_{\text{runderdrijfmest}} + M_{\text{bermgras}}} \text{ (in Nm}^3\text{/ton biomassa)}$$

Tabel 7 hieronder weergeeft een aantal kengetallen van de vergisting met en zonder thermische drukhydrolyse en vijzelpers (oftewel scenario 1 of 4). Een bijmenging van maximaal 50% coproduct is geoorloofd wil het nog als ‘mestvergisting’ doorgaan. Het is aannemelijk om dit ratio aan te houden gezien dit resulteert in de maximale hoeveelheid koolstof en dus biogasproductie in de vergister. Uit bovenstaande twee formules is te herleiden dat (voor scenario 4) de vergistingsefficiëntie voor RDM en bermgras resp. ca. 50 en 112 m³/ton_{in,nat} is. Stichting biomassacentrale Hellowou beoogt een biogasproductie van 12.000.000 m³ per jaar. De primaire input is 117.000 ton ruwe mest, maar die wordt voorgescheiden met een vijzelpers waardoor er 35.000 ton dikke fractie wordt aangeleverd, terwijl er 31.500 ton gras nodig is. Beide stromen gaan nog door de hydrolyse waar er extra stoom wordt toegevoegd.. Dit resulteert vervolgens in een vergistingsinput van afgerond 40.900 ton/jaar voor RDM en voor bermgras. De totale vergistingsopbrengst is van beide vergistingsproducten samen is 147 m³/ton_{in,nat}.

Tabel 7. Technische parameters voor de vergisters.

Grootheid	Eenheid	RDM	Bermgras
Drogestof	%	9% (14% met vijzelpers)	30% (24% met TDH)
Org. DS	%	70%	80%
C in (org) DS	%	50%	60%
Conversie C	%	50% (90% met TDH)	55% (90% met TDH)
Aandeel CH ₄ in biogas	%	55%	55%

<i>ratio CH4:C</i>	#	1,33	
<i>Dichtheid CH4</i>	kg/m3	0,66	
<i>Streefproductie</i>	Mm3/jaar	12.000.000	
<i>Dichtheid input</i>	kg/m3	0,800	0,250
<i>Input primair</i>	ton/jar	117.000	31.500
<i>Input vergister</i>	ton/jaar	40.900	40.900
<i>vergistingsefficiëntie</i>	biogas m3/ton	18 (50 met TDH)	89 (112 met TDH)
<i>... gezamenlijk</i>	biogas m3/ton	147	

6.1.2. Systemcomponenten

Tabel 8 hieronder geeft een overzicht van de debieten tussen alle componenten. In de derde kolom worden de verwerkingsefficiënties gegeven van iedere component ten opzichte van hun ingaande stroom. In de vijzelpers en homogenisatie is de verwerkingsefficiëntie 100% gezien alle materiaal wordt behandeld en doorgegeven. In de TD Hydrolyse is die zelfs 123%, gezien naast de input ook nog 23m% aan stoom wordt toegevoegd voor de afbraak van moleculen. De input naar de vergister is dan 81.800 ton/jaar.

Het scheidingsrendement van de decanter is 13% (de organische fractie). Dit getal is flexibel (zie § 5.5.2 ‘Decanter’) al naar gelang het gewenste drogestofgehalte of scheidingsefficiënties voor nitraten. De hoeveelheden gescheiden materiaal en het gehalte aan scheidingsproducten zijn omgekeerd evenredig aan elkaar. Dit betekent dat hoe meer massa er wordt gescheiden, hoe lager de concentraties aan N/P/K of DS. Om nog goede concentraties mineralen te behalen moet dus niet teveel dikke fractie worden gescheiden. Door deze relatieve flexibiliteit kan ook gericht naar de benodigde mineralenconcentraties bij de afnemer worden gescheiden al naar gelang de wensen voor ieder geteelde gewas. De vierde kolom geeft de efficiënties weer van de specifieke componenten in de mestverwerking.

Tabel 8. Technische parameters voor de verschillende componenten

Component	Debiet	% efficiëntie t.o.v eigen input	% t.o.v initiële input
	ton/a	%	%
<i>Vijzelpers</i>	117.030	100%	
<i>Homogenisatie</i>	66.584	100%	
<i>TD Hydrolyse</i>	66.584	123%	
<i>Vergisting</i>	81.752		
<i>Decanter</i>	77.423	13%	12%
<i>Ultra-Filtratie</i>	67.358	55%	45%
<i>Reverse Osmose</i>	30.311	45%	17%
<i>RO permeaat (water)</i>	16.671		20%

6.2. Energiebalans

6.2.1. Elektraverbruik

Energie wordt in verschillende delen van het systeem gebruikt. Voor de scenario's is er elektra nodig voor de homogenisatie (stampen en fijnmalen), vergister (continu roeren), decanter (centrifugeren), UF en RO (persen), al het materiaal rondpompen en als laatste het biogas koelen tot -190 °C (comprimeren van koelvloeistof). Er is ook warmte nodig in de vorm van stoom: de Thermische drukhydrolyse benodigd stoom van 180 °C en de vergister moet op temperatuur gehouden worden (constant op 38 °C, ook in de winter). Normaal gesproken wordt een WKK geïnstalleerd om aan beide types energievraag te voldoen.

Tabel 9 hieronder geeft een overzicht van het interne elektraverbruik van de VtL BG-configuratie. Zoals te zien in onderstaande tabel wordt de meeste elektra gebruikt voor de digestaatverwerking (decanter, UF en OO samen goed voor 2,9%+3,3% van de totale energie-inhoud van de geproduceerde biogas) en voor de opwerking van LBG (3,1%). In totaal is 11,5% opgewekte biogas nodig voor intern gebruik. Als uit wordt gegaan wordt van een conversie-efficiëntie van de WKK van 40%, dan wordt in totaal 29% van het geproduceerde biogas voor de interne energiebehoefte gebruikt. Voor alle 5 scenario's is de netto LBG-productie weergegeven in bijlage [A].

Tabel 9. Energiebalans voor de elektriciteitsbehoefte van het VtL BG-systeem, in dit geval van scenario 4.

Component	Eenheid	Grootheid	..als % van geproduceerde biogas	Bronnen
<u>Vijzelpers</u>				
verbruik	kWh,e/m3 mest	3		[1]
...subtotaal	MWh,e/jaar	439	0,8%	
<u>Homogenisatie</u>				
Electra verbruik	kW,e/ton.uur	6,64		[2]
...subtotaal	MWh,e/ jaar	442	0,8%	
<u>(Na)vergister</u>				
Electra verbruik	kW,e/vergister (4500 m3)	33,25		[2]
..subtotaal	MWh,e/ jaar	453	0,8%	
<u>Decanter</u>				
Electra verbruik	kWh/m3 te scheiden	14		[1]
te scheiden	m3/ jaar	96.778		
...subtotaal	MWh,e/ jaar	1.694	2,9%	
<u>UF & OO</u>				
Electra verbruik	kWh/ton te scheiden	28		[1]
te scheiden	ton/ jaar	67.358		
...subtotaal	MWh,e/ jaar	1.886	3,3%	
<u>LBG opwerking (Scandinavian GtS)</u>				
Electra verbruik	kWh/Nm3 clean gas	1		[3] [4]
Totaal CH4	Nm3/ jaar	2.225.000		
...subtotaal	MWh,e/ jaar	1.780	3,1%	
Totaal Totaal	MWh,e/ jaar	6.694	11,5%	
Efficiëntie WKK	%	40%		
Bron:	[1] Schröder et al, 2008	[2] Avans, 2010	[3] Johansson, 2008	[4] Kasper, 2013

6.2.2. Stoomverbruik

Onderstaande Tabel 10 geeft een samenvatting voor het interne warmtebehoefte van scenario 4. Allereerst is er warmte nodig voor het op temperatuur houden van de vergisters op 38 °C. vergisters hebben gangbaar een energieverlies naar de buitenwereld van 30% over een jaar oftewel 797 MWh_{th} in scenario 4.

Vervolgens is er warmte nodig in de vorm van stoom voor het TDH proces. Dit is stoom van 165 °C en eerder beschreven in paragraaf 4.3. In dit proces wordt 40% warmte gerecycled van het uitgangspunt naar het beginpunt in de TDH. Als de bewerkte stroom de TDH uitkomt heeft die een temperatuur van 100 °C en moet afgekoeld worden naar 38 °C. Dit geeft een warmteoverschot van 5.300 MWh_{th} (zie tabel). Een deel wordt gebruikt om de inhoud van de vergisters op temperatuur te houden maar er blijft nog 4.480 MWh_{th} laagwaardige warmte over die verhandeld kan worden.

Een tweede warmtestroom die verhandeld kan worden komt van het onbenutte deel van de WKK. Onderin Tabel 10 staat vermeld dat een WKK van 952 kW_e nodig is om het interne elektra gebruik op te wekken. Bij dergelijk elektrisch vermogen komt een thermisch vermogen van ca. 1.190 kW_{th} oftewel 8.923 MWh_{th} opgewekte warmte per jaar. Gezien het grootste gedeelte hiervan gebruikt wordt voor de TDH, blijft ongeveer 95 MWh_{th} aan hoogwaardige warmte over (met T = 180 °C). Voor andere scenario's is dit bedrag veel groter (zie § 7.3 'Warmtegebruik'). Deze twee stromen samen kunnen vermarkt worden tegen een waarde van 8 euro/GJ en dit levert ongeveer 132.000 euro op per jaar. Voor alle scenario's is dit verschillend, gezien er door verschillende configuraties verschillende vraag is naar elektra, dus WKK-capaciteit is. Voor alle scenario's zijn het interne elektraverbruik, warmteverbruik, WKK grootte en verhandelbare warmte terug te vinden in bijlage [B].

Tabel 10. Warmteverbruik en schaling van de WKK voor intern energieverbruik.

Vergister	Eenheid	grootheid	Bronnen
<i>T mesofiel</i>	oC	38	
<i>T buiten,gem</i>	oC	10	
<i>dT</i>	oC	28	
<i>c</i>	MJ/ton*K	4,18	
<i>m</i>	ton/jaar	81.752	
<i>Warmteverlies</i>	%	30%	[1]
<i>Totaal nodig</i>	MWh,th	797	
TDH stoom verbruik			
<i>Input gras+mest+stoom</i>	ton/jaar	81.800	[2]
<i>Specifieke warmte H₂O</i>	MJ/kg/K	4,18	
<i>ΔT</i>	Van 10 naar 165°C	155	
<i>TDH recycle</i>	%	40	
<i>Totale stoom nodig</i>	MWh/ jaar	8.830	
TDH afkoelen			
<i>gras + mest</i>		totaal	
<i>massa</i>	ton/ jaar	73.300	(81.800 ton minus stoom recycle)
<i>T-uit</i>	oC	100	
<i>T-vergisting</i>	oC	38	
<i>Q-gras+mest</i>	MWh,th/ jaar	5.278	
WKK			
<i>Nom. vermogen</i>	kW,e	952	
<i>Therm. vermogen</i>	kW,th	1.190	
<i>Q,wkk</i>	MWh,th/ jaar	8.923	
<i>Q,over,T=180</i>	MWh,th/ jaar	95	

Q, over, T=80	MWh, th/ jaar	4.480	
Bronnen:	[1] Ecofys, IMAG-Wageningen, 2002		
	[2] Avans, 2010		

6.3. Financiële balans

6.3.1. Operationele kosten

Operationele kosten bestaan in deze VtLBG configuratie uit het transport van mest, gras en digestaat van/naar de vergister, de boerenbedrijven en tuinders. Verder zijn er operationele kosten voor arbeid, onderhoud en rente. De baten bestaan uit het verhandelen van bijproducten zoals groene kunstmest, warmte en (vloeibare) CO₂. Tabel 11 hieronder vat alle jaarlijkse kosten samen.

Er bestaat een significant verschil in transportkosten voor mest en digestaat (5-20 €/ton) doordat de vraag naar mest wordt bepaald per gebied, moment in het jaar en grondsoort. Daarnaast betalen boeren in gebieden met mestoverschot een bedrag om de mest af te voeren en te verwerken. In overschotgebieden wordt ongeveer 20-30 €/m³ betaald terwijl dit in gebieden zonder overschot ongeveer 5-6 €/m³ is. In deze VtLBG-configuratie wordt uitgegaan dat voor 50% van de aangevoerde mest een mestverwerkingsprijs wordt ontvangen van 10 €/m³ (transport al mee verrekend). Voor de andere 50% wordt uitgegaan dat die net zo goed uitgereden kan worden op het land van de buurman, waardoor er geen kostenpost mag bestaan voor de leverende boer. Deze boeren betalen dan alleen de transportkosten van 6 €/m³ maar geen mestverwerkingskosten. Voor de VtLBG-configuratie zijn de netto kosten voor dit deel mest dan nul.

De aanvoer van gras wordt gedaan door een (semi)private instantie zoals Rijkswaterstaat en Staatsbosbeheer, waar de afvoer van gras vooralsnog gezien wordt als kostenpost. Wellicht kan dergelijke instantie in de toekomst ongeveer 10 €/ton ontvangen als de extra gasopbrengst door covergisting aan de graslevering wordt doorberekend. (WUR/ACRESS, 2012). Nu wordt met een bedrag van 2 €/ton gerekend.

Tabel 11. Operationele kosten voor de VtLBG-configuraties.

Opex	eenheid	grootheid	bron
Mestverwerkingskosten *	€/m ³	10	[7]
Transport mest / digestaat	€/ton	6	[4] [5]
Transport coproduct	€/ton	2	[6]
Credits kunstmest P	€/kg	1,04	[8]
Credits kunstmest N	€/kg	1,11	[8]
Credits kunstmest K	€/kg	0,66	[8]
Toeslagfactor (BTW, engineering, risico, etc)	% 1e jaar	30%	[2]
Onvoorzien	% 1e jaar	10%	[1]
O&M	% jaarlijks	5%	[3]
Arbeid	% jaarlijks	2%	[3]
Rente	% jaarlijks	4%	[3]
Credits warmte	€/GJ	8	[9]

* Boeren betalen in overschotgebieden gangbaar 20-30 €/m³ om hun mest af te voeren en te laten verwerken; in gebieden zonder overschot ligt dit rond de 5-6 €/m³. In deze case wordt uitgegaan van een mestverwerkingsprijs van 10 €/m³.

Bronnen:

	[1] Evelop, 2004	[2] STOWA, 2013	[3] Bouwmeester, WUR, 2006
	[4] Schröder, WUR, 2008	[5] ECN, 2005	[6] Faaij, Dornburg, 2006
	[7] van Noord, 2016	[8] Alterra, 2013	[9] Devo Veenendaal,

In dit onderzoek wordt ook een begin gemaakt met het waarderen van mestproducten als kunstmest. Door de hoge graad van raffinage benaderen deze mestproducten de werkbaarheid van kunstmest. In Tabel 11 zijn ook de marktprijzen gegeven voor de mineralen P, N en K oftewel: fosfaten in dikke fractie (uit de decanter); nitraten en kali in de ultra-filtratie (organische fractie) en mineralenconcentraat (uit de reverse osmose). Als laatste is nog een werkingscoëfficiënt van 90% toegepast op de concentraten. Dit is het wettelijk vastgestelde percentage aan mineralen dat ook echt werkelijk beschikbaar is aan de plant.

Andere kosten voor arbeid, onderhoud en rente zijn ook in bovenstaande Tabel 11 gegeven, uitgedrukt als percentage van de investeringskosten. Daarnaast is gerekend met een toeslagfactor van 1,3 van bouwkosten naar investeringskosten en is inclusief BTW, ontwerp en installatie (engineering). De onvolledigheidstoelage van 10% is hier nog apart bij inbegrepen. Verder betreffen de baten de credit van overtollige warmte en levering van (vloeibare) CO₂.

In § 5.5 ‘Digestaatverwerking’ is te zien dat de dikke fractie voornamelijk een hoge concentratie P₂O₅ heeft (gescheiden door de decanter) en de stikstof en kali in de latere organische fracties eruit worden gehaald (door de UF+RO). Door deze scheiding van mineralen kan per afnemer (agrarische onderneming) op maat een kunstmestsamenstelling worden geleverd. Opgemerkt moet worden dat in scenario 4 de N en K concentraties lager doen vermoeden dan in soortelijke literatuur voorkomt. Dit komt omdat in dit scenario de mest eerst langs een vijzelpers (op het boerenerf) is gegaan, waardoor een aanzienlijk deel N en K in de dunne fractie op het boerenerf achter is gebleven. Bij andere scenario’s zonder vijzelpers is dit niet het geval. Tabel 12 hieronder geeft een samenvatting van de mineralenbalans zoals die voor scenario 4 is berekend.

Tabel 12. Bespaarde kosten door het verwaarden van het bijproduct ‘groene kunstmest’.

	Debiet	Droge stof	P ₂ O ₅	N-totaal	N-NH ₃	K ₂ O
	ton/a	%	kg/ton	kg/ton	kg/ton	kg/ton
Dikke fractie P	10.065	20,3%	6,4	4,2	0,9	0,6
Org. Fractie NK	13.472	15,7%	2,0	2,5	0,2	0,4
Mineral. Concentr.	16.166	2,0%	0,4	8,04	2,1	3,7
Opbrengst NPK	€/kg [1]		1,04	1,11		0,66
Werkingscoëfficiënt (%)	% [2]		90%	90%		90%
Opbrengst	€/jaar		91.554	206.800		43.136
totaal	€/jaar					341.500
[1] Alterra (2013)						
[2] Kennisakker (2015)						

6.3.2. Investeringskosten

Investeringskosten voor scenario 4 voor iedere component worden weergegeven in Tabel 13 hieronder. De grootste kostenpost is de Ultra-Filtratie met Reverse Osmose opstelling. Daarnaast beslaat de TD Hydrolyse ook een grote investering. Een normale vergisting heeft een doorlooptijd van ongeveer 40 dagen. Door de voorbewerking en hydrolyse wordt deze doorlooptijd ongeveer 25 dagen in dit scenario. Als dan uit wordt gegaan van grote vergisters van e.g. 4.500 m³ dan zijn er in scenario 4 ongeveer 2 grote vergisters nodig. Voor alle componenten wordt uitgegaan van een afschrijving van 15 jaar en een rentevoet van 6,7%. In bijlage [C] is de rekenmethode voor de investeringskosten voor ieder specifiek component terug te vinden.

Tabel 13. Investeringskosten (CAPEX) voor de ViLBG-Configuratie in scenario 4..

Component	Eenheid	Getal	Bron
<u>Vijzelpers</u>			
capaciteit	m3/u	24	
Investering	€	30.000	
<u>Homogenisatie</u>			
capaciteit	ton/u	44	[1]
Investering	€	30.000	
<u>TD Hydrolyse</u>			
capaciteit	m3/u	30	[2] [10]
Investering	€	2.286.928	
<u>Vergisters</u>			
bedrijfsuren	uur/a	8.000	[1]
verblijftijd	dagen	25	
inhoud 1 vergister	m3	4.500	
aantal vergisters	#	1,7	
totale prijs	€	878.836	
<u>Decanter</u>			
capaciteit	m3/u dikf	1,7	[3]
Investering	€	80.649	
<u>UF & RO</u>			
capaciteit	ton/u	11,2	[1]
Investering	€	1.828.279	
<u>WKK</u>			
capaciteit	kW,e	892	[4] [9]
Investering	€	446.244	
<u>Cryogene LBG</u>			
capaciteit	Nm3 / h ruw gas	539	[5] [6]
Investering	€ /m3 ruw gas	2000	
	€	1.077.135	
Totale Investering	€	6.658.070	
<u>Bronnen:</u>			
[1] Avans Hogeschool (2010)		[5] Vattenfall (2006)	
[2] WUR/ACRESS (2014)		[6] Danish Technology Institute (2012)	
[3] WUR, Schröder (2008)		[9] Evelop (2004)	
[4] IF Technology (2009)		[10] Projectbureau Lokale Mestverwerking (2013)	

6.4. Kostprijsberekening biogas en besparing broeikasgassen

De energetische (gas)opbrengst is al in paragraaf 5.1.1. ‘Gasproductie’ beschreven. Voor de financiële haalbaarheid is de gangbare formule gebruikt voor de netto contante kosten:

$$COE = \frac{I + \sum \frac{(C-B)}{(1+r)^t}}{\sum \frac{E}{(1+r)^t}}, \text{ waar}$$

- COE = ‘Cost Of Energy’ oftewel de totale projectkosten teruggerekend per Nm³ geproduceerd schoon (methaan) gas, onder atmosferische (normale) druk en temperatuur (in €/Nm³);
- I = Totale Investeringskosten in het eerste jaar (in €);
- C = ‘Costs’ oftewel totale variabele kosten, zoals transport, onderhoud (in €);
- B = ‘Benefits’ oftewel de baten, zoals kunstmestvervangers, CO₂, warmte;
- E = geproduceerd schoon methaangas (in Nm³);
- r = afschrijvingspercentage (in %);
- t = tijdseenheid (in jaren).

Voor de berekening van de ‘groene CO₂ credits’ (GC) oftewel de uitgespaarde broeikasgassen deze VtL BG-valorisatieroute, is de volgende formule gebruikt:

$$GC = \frac{GHG_{\text{biogas/LBG}} + GHG_{\text{kunstmest}} + GHG_{\text{restwarmte}} + GHG_{\text{L BG-opwerking}} - GHG_{\text{transport}}}{V_{\text{biogas}} \text{ (Nm}^3\text{)}, \text{ waar:}$$

- GHG_{biogas/LBG} = De vermeden uitstoot van aardgas, die hier wordt vervangen door het stoken van biogas (in kg/jaar);
- GHG_{kunstmest} = De vermeden uitstoot bij de productie van synthetische kunstmest (N, P en K), die hier wordt vermeden door het inzetten van groene kunstmest (in kg/jaar);
- GHG_{restwarmte} = De vermeden uitstoot bij verwarming met aardgas. Als de restwarmte door een kas wordt benut, zal de emissiefactor van een gasketel of WKK worden gebruikt (in kg/jaar);
- GHG_{L BG-opwerking} = De CO₂ productie die als bijproduct geproduceerd wordt in het liquefactieproces (in kg/jaar);
- GHG_{transport} = De emissies van het transport van mest en coproduct uitgestoten tijdens het rijden met dieseltrucks.
- V_{biogas} = Volume van het geproduceerde biogas (in Nm³/jaar).

Emissies voor de interne energiebehoefte worden niet meegeteld, gezien die energiebehoefte wordt gedekt met het eigen biogas in een WKK. Dit geldt ook voor de uitstoot van CO₂ bij de verbranding van aardgas en/of LBG bij de eindverbruiker, gezien deze hoeveelheid al door de biogene koolstofvastlegging (middels de veevoeder-biomassa) is opgenomen uit de atmosfeer. Deze biomassa (als veevoer) heeft bij wijze van spreken niet alleen de broeikasgassen gebonden van enkel het verbrande biogas, maar ook van de groene kunstmest, duurzame warmte en de vloeibare CO₂ als bijproduct van de LBG-opwerking. Tabel 14 op de volgende pagina vat de gebruikte emissiefactoren samen die gebruikt zijn voor bovenstaande GHG-berekening.

Tabel 14. Kengetallen voor broeikasgasberekeningen.

Gegevens	Eenheid	Grootheid	Bron
<i>emissiefactor aardgas</i>	kg CO ₂ /m ³	1,88	
<i>emissiefactor LNG</i>	kg CO ₂ /kg	3,37	
<i>emissiefactor diesel</i>	kg Co ₂ /L	3,23	[1]
<i>emissiefactor P₂O₅</i>	kg CO ₂ -eq/kg P ₂ O ₅	1,30	[2]
<i>emissiefactor N</i>	kg CO ₂ -eq/kg N	2,52	[2]
<i>emissiefactor K₂O</i>	kg CO ₂ -eq/K ₂ O	0,1	
<i>LHV diesel</i>	MJ/L	39,00	
<i>LHV aardgas</i>	MJ/ m ³	31,65	
<i>Dichtheid CO₂</i>	kg/ m ³	1,97	
			Bron:
			[1] Lijst emissiefactoren, 2016
			[2] gemiddeld (n = 66) wereld; RVO, 2010.

7. Resultaten

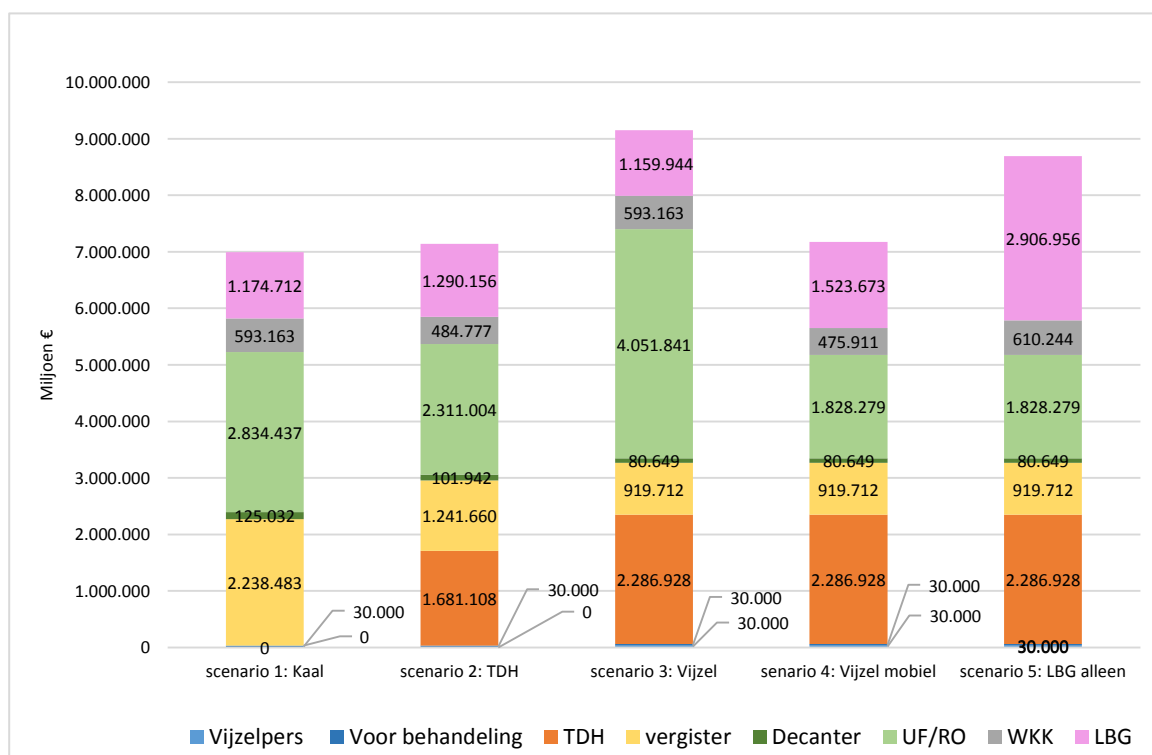
Uitgangspunt voor de resultaten die hier worden behandeld is dat in alle scenario's worden uitgegaan naar een ruwe biogasproductie van 12.000.000 m³ per jaar oftewel 1.500 m³ per uur, met een methaangehalte van 55%. Hiervan wordt een deel besteed aan de interne energiebehoefte. Daarnaast gaat er standaard 600 m³/uur naar een steenfabriek. Voor het overige deel biogas moet een bestemming gezocht worden en in dit verslag is de cryogene opwerking naar LBG onderzocht (de VtLBG-configuratie). Dit zijn de uitgangspunten zoals aangegeven door Stichting biomassacentrale Hellouw. Een nadeel hiervan is dat de aanvoer van biogas voor LBG onregelmatig zal zijn over het jaar, afhankelijk van het gasverbruik van de steenfabriek. In onderstaand Figuur 13 zijn de investeringskosten voor de verschillende VtLBG- scenario's gegeven, onderverdeeld naar component. Als vijfde scenario is ter illustratie nog eens een situatie bijgevoegd waarbij alle 12.000.000 m³ biogas (minus de interne energievoorziening) wordt opgewerkt naar LBG.

7.1. Investeringskosten

Onderstaand Figuur 13 illustreert dat scenario 1, 2 en 4 nagenoeg dezelfde investeringskosten hebben. Scenario 1, doorgaans de meest gangbare (en kale) vorm van vergisting en mestverwerking heeft de laagste investeringskosten heeft, namelijk 7,0 miljoen euro. De grootste kostenpost hierin is de Ultra-filtratie en Reverse Osmose unit. Door een lage conversie van vergistingsproduct naar biogas moet relatief meer digestaat verwerkt worden.

Als de TDH schakel wordt toegevoegd in scenario 2, wordt de CAPEX van de vergisters verlaagd. Dit komt omdat de TDH zorgt voor een verhoogde biogasproductie van 40%. Hierdoor wordt de verblijftijd van de mest en gras verlaagd van 40 dagen naar ongeveer 27 dagen. Dientengevolge is bij eenzelfde productie van 12.000.000 m³ biogas dus relatief minder input en dus het aantal vergistingstanks nodig. Concluderend wordt de extra uitgave

Figuur 13. Investeringskosten (CAPEX) per scenario, uiteengezet per component



van de TDH grofweg gecompenseerd door een verkleining van vergisters en digestaatverwerking.

Als in scenario 3 de aangeleverde mest wordt gescheiden door een vijzelpers op de vergistingslocatie en de dikke fractie met het gras wordt gehydrolyseerd, kan dus een voortzetting van bovenstaande conclusies worden verwacht: een verhoogde drogestof in de massa; een verkleining in de vergister; en een vergroting van de hydrolysecomponent. Echter, de kostendaling van een verkleinde vergister gaat gepaard met extra investeringskosten van de vijzelpers en TDH waardoor het totale investeringsplaatje stijgt van 7,14 naar 9,15 miljoen.

Deze stijging is voor een groot deel ook te wijten aan de bijna verdubbeling van de dure UF/RO unit (van 2,3 naar 4,1 miljoen) doordat een grote stroom dunne fractie niet wordt vergist maar meteen wordt verwerkt in de decanter/UF/RO. Een voordeel hiervan is een grotere hoeveelheid 'groene meststoffen' (mineralenconcentraten). Later zal duidelijk worden dat deze twee maatregelen elkaar opheffen, i.e. de kostprijs voor schoon biogas is gelijk in scenario 2 en 3. Verder komen in scenario 3 nog de hoge transportvolumes en -kosten bij die dit scenario minder aantrekkelijker maken.

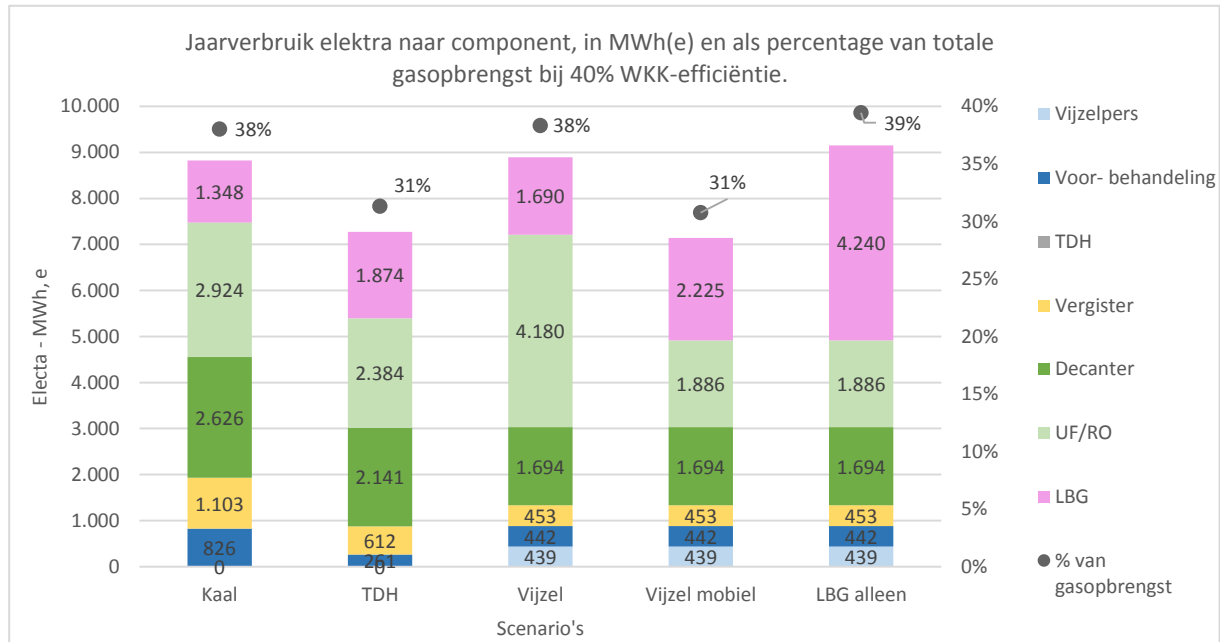
Daarom is in scenario 4 uitgegaan van mobiele (vijzelpers-)mestscheiding op het boerenerf. Enkel de dikke fractie wordt vervoerd naar de vergistingslocatie en de dunne fractie wordt op het land uitgereden. Alle investeringskosten uit scenario 4 zijn daarom hetzelfde als scenario 3 (vergister, TDH, decanter), behalve de UF/RO kan verkleint worden naar 1,83 miljoen. Dit verminderd wel weer de credits uit het bijproduct 'groene meststoffen'. Dit komt doordat de vijzelpers een lage scheidingsefficiëntie heeft (voor o.a. fosfaat) en een aanzienlijk deel van de stikstof en kali blijft achter in de dunne fractie op het boerenerf. Hier is sprake van een afweging tussen transportkosten en credits uit groene meststoffen.

Verder vallen nog de schommelingen op in de investeringskosten van de WKK. Dit heeft te maken met de elektraconsumptie in de verschillende scenario's. Hier wordt in de volgende paragraaf op ingegaan. Ook zijn de investeringen voor LBG opwerking in alle scenario's verschillend en dit heeft te maken met de verschillen in interne energiebehoefte, waarvoor biogas wordt gebruikt en dus minder overblijft om opgewerkt te worden naar LBG. In scenario's 1 t/m 4 blijft er 300-500 m³/uur ruw biogas over om opgewerkt te worden naar LBG. In scenario 5 wordt –na de interne energiebehoefte- alle biogas (970 m³/uur ruw biogas) opgewerkt naar LBG.

Van de eerste 4 scenario's met een gemengde productie van de eindproducten 'groen gas' en 'LBG' heeft scenario 4 de laagste investeringskosten en hoogste conversie-efficiëntie van mest-naar-biogas/LBG. Later zal dit nog eens verder onderbouwd worden door de jaarlijkse kosten (de OPEX) mee te nemen om tot de uiteindelijke kostprijs ('COE' oftewel 'Cost of Energy') te komen. Scenario 5 komt duurder uit doordat alle biogas wordt opgewerkt naar LBG en hiervoor een grotere cryogene opwerkingsinstallatie nodig is.

7.2. Elektriciteitsgebruik

Het interne energieverbruik is een belangrijk onderdeel in de kostenopbouw en wordt hier verder toegelicht. Het energieverbruik bestaat uit elektra en stoombehoefte in verschillende onderdelen van een VtL BG-configuratie. Onderstaand Figuur 14 geeft de elektriciteitsconsumptie weer per component, per scenario.



Figuur 14. Jaarverbruik elektra naar component.

De interne elektriciteitsbehoefte wordt gedekt met een warmtekrachtinstallatie (WKK), omdat zowel warmte als elektra nodig is en een eigen elektriciteitsproductie goedkoper is dan aankoop van het net. De WKK wordt geschaald op de elektriciteitsbehoefte van de VtL BG-configuratie, inclusief LBG opwerking. Deze aanname gaat dus uit van een LBG-opwerking op locatie van de mestvergisting. Verder is uitgegaan van een WKK-efficiëntie van 40% (elektrisch).

Te zien is dat scenario 1 ongeveer 8.800 MWh_e nodig heeft en bij een WKK-efficiëntie van 40% is dit 22.000 MWh_e, oftewel 38% van de opgewekte biogas. Er zijn 4 vergistingstanks van elk 4.500 m³ nodig. Veruit het grootste elektraverbruik gaat naar de digestaatverwerking (decanter, UF en RO). In scenario 2 wordt een betere conversie-efficiëntie bereikt, waardoor er elektra bespaard wordt door een kleiner aantal vergisters en een kleinere digestaatverwerking (decanter, UF en RO).

Scenario 3 laat weer een hoog verbruik zien in de UF/RO, door de grote hoeveelheid dunne fractie die verwerkt wordt. De aangeleverde mest wordt op de vergistingslocatie gescheiden in een dikke en dunne fractie: enkel de dikke fractie wordt gehydrolyseerd en vergist; de dunne fractie wordt daar buiten gelaten en pas na de vergisting weer samengevoegd met het digestaat om verder verwerkt te worden.

Scenario 4 knipt deze dunne fractie eruit en komt weer uit op 31% biogasgebruik voor interne energiebehoefte. Door de verhoogde biogas-opbrengst en verminderd elektraverbruik, blijft er

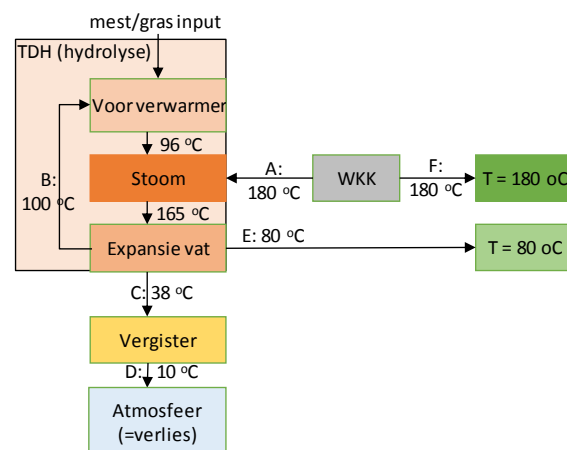
meer biogas over voor LBG-opwerking.

Over het algemeen valt te concluderen dat door een hoger drogestofgehalte en betere benutting daarvan, minder vergistingsproduct nodig is en daardoor kleinere verwerkingsunits (vergisters, decanter, UF en RO) wat flink scheelt in zowel investeringskosten als elektraverbruik. Covergistingsproducten met een zo hoog mogelijk drogestofgehalte zijn dan interessant, zoals hooi, stro of gemeentelijk GFT.

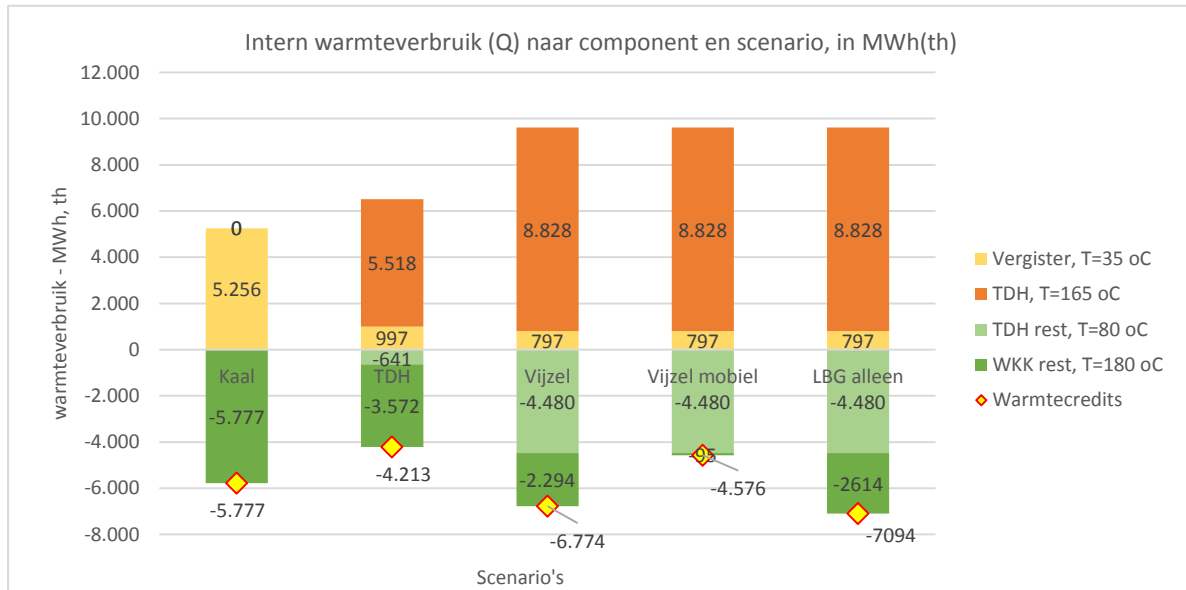
Als alle biogas wordt omgezet naar LBG, dan is ongeveer 39% van het geproduceerde biogas nodig voor elektra. Hiervan wordt grofweg de helft gebruikt voor LBG-opwerking en de rest voor de afdeling mestverwerking. Het percentage biogas dat gebruikt wordt voor de interne energiebehoefte lijkt groot (31-39% voor de scenario's) maar er moet steeds weer gerealiseerd worden dat het hier om een complete mestverwerkingsketen gaat met een extra schakel waardetoevoeging LBG en niet alleen om een LBG-opwerkingsinstallatie.

7.3. Warmtegebruik

De VtLBG-scenario's hebben verder warmte nodig voor de hydrolyse- en verwarmingsschakel. Figuur 15 hiernaast geeft een schematische weergave van de integratie van warmtestromen. Flow 'A' is de stoombehoefte van 180 °C nodig voor het TDH proces. In een expansievat wordt de druk verlaagd van 6 naar 1 bar, wat de macromoleculen in de mest/gras in een 'stoomexplosie' doet afbreken. Van deze warmte wordt 40% gerecycled (flow 'B') om de mest/gras-input te voorverwarmen. Verder wordt de output van het expansievat (flow 'C') gebruikt om de vergister op temperatuur te houden (flow 'D'). Als de warmte uit het expansievat groter is dan wat de vergisters nodig hebben, komt een gedeelte vrij om vermarkt te worden (flow 'D'). Dit is een warmtebron van 80 °C. Als laatste komt een hoge kwaliteitwarmte vrij van de WKK. Die is namelijk geschaald op het elektraverbruik van het gehele scenario en dus staat de stoomproductie vast. Als deze stroom groter is dan de TDH-stoombehoefte wordt die ook vermarkt. Figuur 16 op de volgende pagina illustreert de warmtestromen per component en scenario in een staafdiagram.



Figuur 15. Overzicht van de warmtestromen in he systeem.



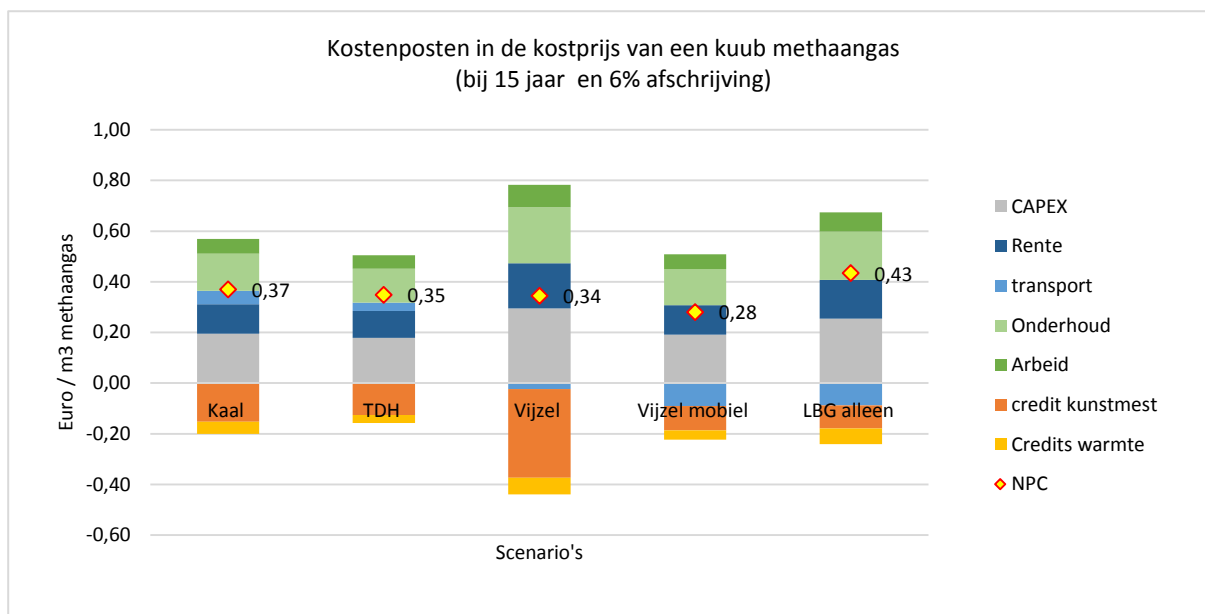
Figuur 16. Intern warmtegebruik van het systeem.

In scenario 1 is er geen thermische hydrolyse; warmte is nodig om het vergistingsproduct te verwarmen van 10 naar 38°C en om het warmteverlies naar de atmosfeer compenseren. Verder is de WKK dermate geschaald dat nog eens 5.777 MWh_{th} aan hoogwaardige warmte overblijft voor vermarkting.

In scenario 3-5 is de stoombehoefte hetzelfde, namelijk 8.828 MWh_{th} voor het hydrolyseproces. De vergisters worden op temperatuur gehouden met het hete, gehydrolyseerde vergistingsmateriaal. In alle 3 scenario's kan ongeveer de helft daarvan worden vermarkt, i.e. 4.480 MWh_{th}. Doordat in scenario 3 en 5 de WKK groter staat geschaald, is daar ook nog een stroom hoogwaardige warmte te vermarkten. De gele sterren geven de totale hoeveelheid vermarktbaar warmte.

7.4. Kostprijs biomethaan

In de methode zijn alle kengetallen voor de capex en opex weergegeven. Als die verdisconteerd worden over een levensloop van 15 jaar met 6,7% afschrijving, dan is de COE oftewel de 'cost of energy' te berekenen. Dit zijn de totale kosten berekend per kuub geproduceerd gas (de formule hiervoor is behandeld in §6.4 'Kostprijsberekening'). Dit wordt ook wel een 'well-to-tank' (WTT) analyse genoemd. de kosten/baten/energieanalyse van de gebruikersfase is hierbij niet meegenomen (Anders heet dit de 'well-to-wheel' analyse). Met de WTT-analyse kan de productie van LBG vergeleken worden met een referentiesituatie, in dit geval de productie van LNG uit aardgas of de productie van diesel. Wat echter continu in het achterhoofd moet worden gehouden is dat hier een systeembrede analyse is uitgevoerd, inclusief de schakels 'mestverwerking' en 'vergisting' die normaal gesproken aparte businesscases zijn. Figuur 17 op de volgende pagina geeft de kostprijs-resultaten voor de verschillende scenario's.



Figuur 17. Onderverdeling van kostenposten per scenario.

De gele diamantjes in bovenstaande figuur zijn de netto kostprijzen voor schoon biomethaan, in euro per kuub CH₄. De meeste posten zijn kosten; credits voor kunstmest, warmte en in scenario 3-5 ook 'transport' zijn baten. Scenario 1 en 2 zijn bijna gelijk: de investering voor de extra hydrolyse-schakel zorgt voor een verhoging van de biogasproductie en diensgevolg voor een verkleining in vergisters en mestverwerking. Ook de transportkosten zijn minder. Echter, door een verminderd energieverbruik en mestverwerking zijn ook de credits kleiner. Geconcludeerd kan worden dat een TDH schakel weliswaar duur, maar even voordelig is en tevens een veel kleinere systeemconfiguratie nodig heeft.

Scenario 3 lijkt qua kostprijs erg op scenario 2, terwijl de configuratie heel anders is. De nadruk ligt veel meer op mestverwerking, met hogere investeringen als gevolg voor decanter, ultra-filtratie en reverse osmose. Echter, deze worden goed gecompenseerd met credits uit groene meststoffen. Voor alle scenario's is aangenomen dat er voor 50% van alle mest mestverwerkingskosten betaald wordt door de boeren, wat de kostenpost 'transport' dekt. Dit is gangbaar voor veehouders en er kan nagedacht worden over een reductie in mestverwerkingskosten doordat die mest extra wordt gewaardeerd (vergist). In regio Rivierenland wordt zo goed als alle mest meteen uitgereden en heerst er geen overschot, waardoor een dergelijke prikkel aannemelijker zal zijn.

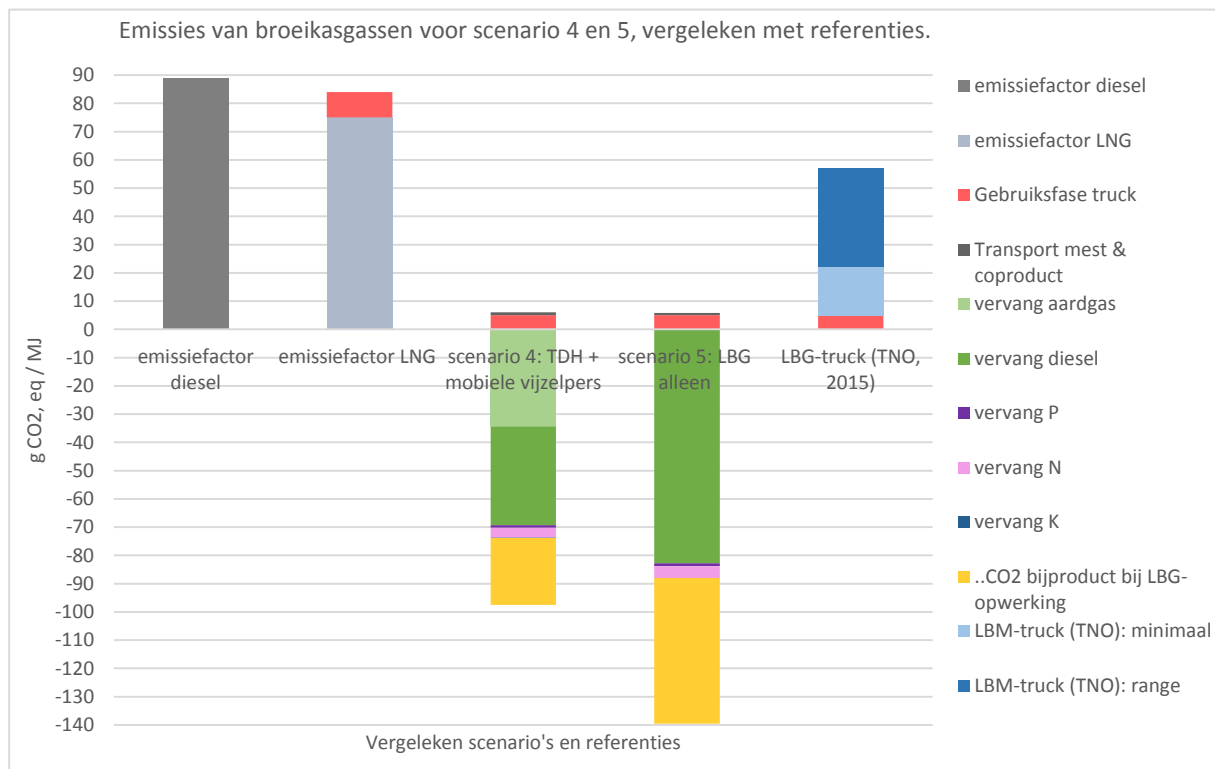
Scenario 4 heeft de beste kostprijs en hier kost een kuub schoon biomethaan 0,28 €/m³. Bij dit scenario bestaat uit een hydrolyseschakel en een mobiele vijzelpers waarbij de aangeleverde mest al voorgescheiden is. Dit levert onder andere een hoogwaardiger vergistingsproduct op met hogere drogestofgehalte, minder transportbewegingen en kleinere installatiecomponenten. Credits voor groene kunstmest zijn er wel, maar een vermindering ervan weegt niet op tegen de gereduceerde transportkosten. Bovendien is door de algehele hogere efficiëntie veel minder vergistingsproduct nodig, waardoor naar verhouding (nog steeds 50% van de boeren betaald voor mestverwerking) meer credits worden gegenereerd met een facturatie aan boeren voor 'mestverwerking' (hier meegerekend met de kostenpost 'transport'; zie 'Tabel 11. Operationele kosten voor de VtLBG-configuraties.').

Echter is in de eerste vier scenario's uitgegaan van twee bestemmingen voor het biogas: voor een warmtetoepassing en voor een transporttoepassing. Hierdoor zijn in alle vier scenario's de LBG-opwerkingsinstallatie klein (300-500 m³/uur). Scenario 5 geeft een beeld van de kostprijs als alle biogas wordt een transporttoepassing krijgt. Wordt een hoeveelheid van 970 m³/uur ruw biogas (bestaande uit 55% CH₄, 43% CO₂ en 2% restcomponenten) opgewerkt in deze VtLBG-configuratie, dan hoort daar een kostprijs bij van 0,43 €/m³ biomethaan. Om de kostprijs per kilogram LBG te berekenen, vermenigvuldig dan met 1,5 (oftewel 0,65 €/kg LBG in scenario 5).

7.5. Broeikasgas emissies

De resultaten voor de vermeden broeikasgassen van de VtLBG-scenario's zijn gunstig ten opzichte van referentiesituaties. In onderstaande Figuur 18 zijn de vermeden broeikasgasemissies van scenario 4 en 5 gegeven. Er is voor gekozen om alleen deze twee scenario's te geven omdat die het meest voordelig zijn (scenario 4) en meest relevant (scenario 4 en 5). Naast die scenario's zijn nog een drietal referenties toegevoegd: de emissiefactor van dieseltrucks, van LNG-trucks en van trucks op LBG volgens het rapport van TNO 'LNG for trucks and ships: review of pollutants and GHG emissions' uit 2015. Dit rapport vergeleek verschillende alternatieve brandstoffen voor de zware transport inclusief het verlies in de gebruiksfase.

Onderstaand figuur illustreert verder waar de reducties in scenario 4-5 aan toe te schrijven zijn. Zo wordt in scenario 4 aardgas en diesel vervangen. Scenario 5 heeft een grotere vermeden uitstoot, omdat meer diesel wordt vervangen dat een grotere voetafdruk per MJ heeft dan aardgas. Verder wordt er meer LBG opgewerkt, waardoor meer 'groene CO₂' wordt geproduceerd als bijproduct. Voor scenario 4 en 5 wordt in totaal resp. 91 en 134 gram CO₂ per Megajoule *vermeden*, oftewel resp. 103% en 150% ten opzichte van een dieseltruck met



Figuur 18. Vrijkomende en bespaarde broeikasgassen per scenario en per referentie.

een gemiddelde uitstoot van 89 gram CO₂ per MJ. Dit komt doordat –bovenop de fossiele diesel die bespaard wordt- ook emissies vermeden worden door de productie van groene meststoffen en ‘groene’ CO₂. Bij de opwerking van LBG wordt namelijk CO₂ als vloeibaar bijproduct geproduceerd, dat bijvoorbeeld afgezet kan worden in de glastuinbouw of voedingsmiddelenindustrie. Normaal gesproken zou die CO₂ een fossiele basis hebben (kassen stoken op aardgas speciaal met het oog op CO₂-‘bemesting’). Echter moet wel rekening gehouden worden met de *allocatie* van CO₂-credits. Het zou niet eerlijk zijn als alle credits toekwamen aan een kilogram LBG, omdat een kas of akkerbouwer ook zijn voetafdruk wil verminderen door het aankopen van groene meststoffen of groen CO₂. Onderstaand figuur laat dus zien wat de *totale* emissiereductie is en waardoor die specifiek wordt veroorzaakt.

In bovenstaande vergelijking is ook de uitstoot meegenomen in de gebruiksfase van LBG/LNG-trucks. Trucks op LNG/LBG moeten namelijk hun tank koud houden op -160 °C, wat wordt gedaan door het isobaar laten uitzetten van een kleine stroom gas (wat voor de verbranding gebruikt wordt). Door deze uitzetting daalt de temperatuur en wordt de tank gekoeld. Door de hoge bezettingsgraad van grote trucks (veel rijden, lange dagen) gaat bijna niks verloren. Enkel bij stilstand moet sporadisch methaan ‘geventileerd’ worden naar de buitenlucht. Voor zwaar transport over land (zware trucks) wordt dit verlies geschat op 5-10% (TNO, 2015).

Uit het rapport van TNO is ook een derde referentie meegenomen in de voorgaande staaftiagram, namelijk de broeikas-voetafdruk van trucks op ‘Liquid Bio-Methane’ oftewel LBG en bedraagt 57 gram CO₂/MJ LBG. Hiervan is 17 in ieder geval het minimale en 0-35 g/MJ de marge tijdens de productiefase. Het rapport noemt verder niet waar die emissies door worden veroorzaakt: waarschijnlijk is dit het eigen elektra/warmtegebruik van de vergisting als die extern wordt geleverd. In de hier onderzochte VtLBG-scenario’s wordt die interne energiebehoefte gedekt door een deel biogas en dus is die uitstoot ‘groen’ oftewel nul.

7.6. Transport-capaciteit optimalisatie

Bij een systeembrede analyse is het interessant om een transport/capaciteitsoptimalisatie uit te voeren. Met andere woorden, bij welke capaciteit LBG-opwerking worden de schaalvoordelen teniet gedaan door een toename in transportkosten van de benodigde aanvoer van mest. Deze optimalisatie is afhankelijk door schommelingen in transportkosten, maar ook in installatiekosten (capex). De cryogene technologie van GtS voor de opwerking van biogas bevindt zich echter nog in een te innovatieve fase om duidelijke data te vinden over grootschalige toepassing: met andere woorden er is nog te weinig documentatie over de techniek op verschillende schaalniveaus. Wel duidelijk is dat biogas (van mestvergisting, maar helemaal van stortplaatsen) een te grote variatie in samenstelling heeft, wat de opwerking met de GtS-technologie problematischer maakt. De GtS-technologie werkt verder met verschillende schakels van koeling, waarvoor een continu proces gegarandeerd moet worden. Echter, levering van biogas over een jaar heen is vaker onregelmatig dan regelmatig.

Een gedetailleerde optimalisatie van capaciteit/transport is echter wel zeer interessant en ook zeer nodig, ook met het oog op grootschalige vergroening van de (zware) transport in de toekomst. Niettemin is een dergelijke optimalisatie buiten het reikgebied van dit onderzoek gebleken als gevolg van beperkte middelen (tijd en geld). De volgende punten zouden in dergelijk vervolgonderzoek onderzocht moeten worden: een gedetailleerde analyse van investeringskosten vis-a-vis schaalvergroting en ‘technological learning’; bottle-necks in

opschaling en procescontinuering van het LBG-opwerkingsproces; flexibiliteit in het opwerken van verschillend biogas; provincie(s)brede analyse van structureel mestoverschot en –tekort om een geschikte locatie-analyse met massastromen uit te voeren.

Als laatste spelen nog de geografische en regionale invloeden een rol: in hoeverre is een dermate grote VtLBG-configuratie geschikt en/of gewild door de populatie en inaspaar in gebiedsontwikkeling. Vanuit technisch oogpunt blijkt de optimale capaciteit van een LBG-installatie tussen de 1.000-1.500 m³ ruw gas per uur te liggen (Rolande, 2016; Bauer, 2012; Danish Technological Institute, 2012). De huidige prijs voor LNG schommelt tegenwoordig tussen de 0,96-0,99 €/kg excl. BTW. Om de hier berekende prijs van 0,65 €/kg LBG verder omlaag te brengen zal verder onderzoek naar kostendaling door bijvoorbeeld procesoptimalisatie en ‘technological learning’ nodig zijn.

8. Bronnen

Abassi, T (2012). *Biogas Energy*. Centre for Pollution Control and Environmental Engineering, Pondicherry University, Kalapet, India.

Alterra WUR; Biomass Technology Group BTG (2013). *Mest(co)vergistening en biogas/groengas productie in Overijssel: Ervaringsproblemen, kansen & verbeterstrategieën*. Wageningen.

Avans Hogeschool (2010). *Adviesrapport Innovatieve vergisting*. Academie voor technologie van gezondheid en milieu, en chemische technologie. Breda.

Danish Technological Institute (2012). *Report: Overview of biogas technologies for production of liquid transport fuels*. Kongsvang Allé 29, Aarhus, Denmark.

Devo Veenendaal. Geciteerd vanaf het www: <http://www.devo-veenendaal.nl/>.

ECN (2005). Geciteerd op het www: <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05080.pdf>.

Ecofys, IMAG, Wageningen (2002). *Mestvergistening op boerderijschaal in bestaande opslagsystemen*. Kanaalweg 16-G, Utrecht.

Energieakkoord SER (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei. Socio-Economische Raad*. Verkregen op het www: <http://www.energieakkoordser.nl/>.

Evelop (2004). *Ombouw van een bestaande mestverwerkingsinstallatie tot een biomassa vergistingsinstallatie*. Kanaalweg 16-G, Utrecht.

Faaij, Dornburg (2006). *Optimizing waste treatment systems Part A: Methodology and technological data for optimising energy production and economic performance*. Copernicus Instituut, Utrecht.

IF Technology (2009). *Energievoorziening glastuinbouw provincie Utrecht, haalbaarheidsstudie*. Arnhem. Verkregen op het www: [file:///C:/Windows/Temp/haalbaarheidsstudie naar energievoorziening in de glastuinbouw in de provincie utrecht%20\(1\).pdf](file:///C:/Windows/Temp/haalbaarheidsstudie%20naar%20energievoorziening%20in%20de%20glastuinbouw%20in%20de%20provincie%20utrecht%20(1).pdf)

Johansson, N (2008). *Production of Liquid biogas, with cryogenic and conventional upgrading technology*. Institutionen för Teknik och Samhälle, Lunds Tekniska Högskola, Lund, Zweden.

Kasper, G (2013). *Transportbrandstof uit biogas; geeft hoger rendement en verduurzaamt*. Wageningen UR & Research. Gevonden op het www: <http://edepot.wur.nl/286737>

Kennisakker (2015). Geciteerd van het www: http://www.kennisakker.nl/files/Kennisdocument/Leaflet_N.pdf.

Lijst emissiefactoren (2016). Verkregen van het www: <http://co2emissiefactoren.nl/lijs-emissiefactoren/>.

PBL (2015). Geciteerd van het www: <http://infographics.pbl.nl/biomassa/>.

Projectbureau Lokale Mestverwerking (2013). *Haalbaarheidsstudie Thermische Druk Hydrolyse bij mestvergisting*. Verkregen vanaf het www: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/04/Rapportage%20Haalbaarheidsstudie%20toepassing%20TDH%20bij%20mestvergisting.pdf>

Provincie Gelderland (2015). Geciteerd van het www: [file:///C:/Users/ben/Downloads/Energie transitie pc android.pdf](file:///C:/Users/ben/Downloads/Energie%20transitie%20pc%20android.pdf).

ResPublica (2015). Geciteerd van het www: <http://www.respublica.org.uk/our-work/publications/the-missing-multipliers/>.

RVO, Wageningen UR (2010). *Inventarisatie klimaatvriendelijke kunstmest*. Agro business park 10, Wageningen.

Smit, H. (2013). Mest, mestverwerking en wetgeving. Ministerie EZ Presentatie bij het symposium verwerken en verwaarden van dierlijke meststromen, 18 april 2013, Hengelo (Gld).

Vattenfall Power Consultant AB (2006). *LCNG study – possibilities with LNG supporting supply of methane and a vehicle fuel in Sweden*. Powerpoint presentatie: <file:///C:/Users/ben/Downloads/Annexe%20E%20Consultant%20Su%C3%A9dois%20Vattenfall%20Power.pdf>.

Vlaams BBT Kenniscentrum (2002). *Best Beschikbare Technieken (BBT) voor mestverwerking, 2^e editie*. Vlaams Gewest, Vlaanderen, België.

WUR, Wageningen University Research; Schröder et. Al. (2009). *Mestscheiding: relaties tussen techniek, kosten, milieu en landbouwkundige waarde*. Plant Research International, Wageningen, Nederland.

WUR/ACRESS (2012). *Vergisten van natuurgras uit de Weerribben*. Application Centre for Renewable RESources, Wageningen.

WUR/ACRESS (2014). *Het verhogen van de biogasopbrengst door middel van thermische druk hydrolyse van de voeding van de vergister*. Wageningen.

ZHWA, Life Sciences und Facility Management; Schweizerische Eidgenossenschaft (2013). *Optimization of anaerobic digestion by pretreatment, additives and process engineering*. Bern/Ittigen Zwitserland.

9. Bijlagen

9.1. Bijlage A

Tabel 15. Mass Flow Rates voor ieder specifiek component, bij 12.000.000 m³ ruw biogas productie per jaar. Opmerkelijke massastromen zijn in rood of groen geschreven.

Massa balans	mest	gras	totaal input	Vijzelpers	Homogenisatie	TDH	Vergister	Decanter	UF	RO	Cryogene LBG
	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	ton/a	m ³ /u ruw biogas
scenario 1: Kaal	62.180	62.180	124.360	-	124.360	-	124.360	120.031	104.427	83.541	392
scenario 2: TDH	51.097	39.346	90.443 [3]	-	39.346	39.346	102.194	97.865	85.142	68.114	430
scenario 3: Vijzel	117.030	31.475	148.505	117.030	66.584	66.584	81.752	77.423	149.278 [2]	119.423	387
scenario 4: Vijzel mobiel	35.109 [1]	31.475	66.584	117.030	66.584	66.584	81.752	77.423	67.358	53.886	508
scenario 5: LBG alleen	35.109 [1]	31.475	66.584	117.030	66.584	66.584	81.752	77.423	67.358	53.886	969

[1] De totale verwerkte mest is hier 117.030 ton per jaar; in scenario 4 en 5 wordt met een vijzelpers de mest voorgescheiden waardoor alleen 35.109 ton/jaar aan dikke fractie wordt verwerkt in de TDH en vergisters. Zie mass flow rate van de 'vijzelpers'.

[2] in scenario 3 ging de dunne fractie uit de vijzelpers direct door naar de ultra-filtratieschakel. De aangeleverde mest werd immers op de vergistingslocatie gescheiden, en dus moet de dunne fractie op één of andere manier verwerkt worden.

[3] de TDH alleen al verlaagt de benodigde input met ca. 30% in scenario 2 t.o.v. scenario 1. De TDH wordt alleen gebruikt bij het coproduct gras. In scenario 3 wordt die ook bij de dikke fractie toegepast.

9.2. Bijlage B

Tabel 16. Intern energiegebruik in de scenario's, aan elektra en warmte. Tevens is gegeven het elektrisch vermogen van de WKK en de verhandelbare warmte. Aangenomen is dat het thermische vermogen van de WKK steeds 25% hoger ligt dan het elektrisch vermogen.

scenario's	electra	stoom	WKK	verhandelbare warmte
	in MWh _e	in MWh _{th}	in kW _e	in MWh _{th}
1	8.826	5.256	1.177	5.777
2	7.272	5.518	970	4.213
3	8.897	8.828	952	6.774
4	7.139	8.828	952	4.576
5	9.154	8.828	1.220	7.094

9.3. Bijlage C

Tabel 17. Totstandkoming van investeringskosten/CAPEX bij ieder component.

	Rekenmethode voor totstandkoming investeringskosten	Bronnen
<i>Vijzelpers</i>	Capaciteit van 30 m3/uur mest; Capex van 30.000 euro.	Schröder, WUR, 2008
<i>Homogenisatie</i>	Capaciteit van 50 m3/uur input; Capex van 30.000 euro	Avans hogeschool, 2010.
<i>TDH hydrolyse</i>	Opschalingsformule gebruikt: $3448,1 \cdot x^{0,585}$, waar $x = \text{input}$	Projectbureau lokale mestvergisting, 2013.
<i>Vergisting</i>	450.000 euro per vergister; aantal vergisters = $\text{input (m3)} / 8000 \text{ u per jaar} \cdot 24 \text{ uur} / T_{\text{verbliftijd mest}}$	Avans, 2010; Evelop, 2004; Projectbureau lokale mestverwerking, 2013.
<i>Decanter</i>	Unit van 20 m3/u input kost 100.000 euro; lineair geschaald.	Schröder, WUR, 2008
<i>UF & RO</i>	Opschalingsformule gebruikt: $(\text{prijs 1}/\text{prijs 2})^{0,9} = \text{capaciteit 1}/\text{capaciteit 2}$; waarbij prijs 1 = 1.900.000 euro en capaciteit 1 = 70.000 ton/jaar input.	Avans hogeschool, 2010.
<i>Cryogene LBG</i>	3000 euro/m3 ruw biogas opwerking	Bauer, 2012; Rolande, 2016
<i>WKK</i>	500 euro/kW _e	Evelop, 2004