

TOEPASSING VAN BIOLOGISCHE METHANISERING OP RIOOLWATERZUIVERINGEN



RAPPORT

2021
21

TOEPASSING VAN BIOLOGISCHE METHANISERING
OP RIOOLWATERZUIVERINGEN

RAPPORT

2021

21

ISBN 978.90.5773.936.1



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Jaap Koppejan en Jan Zeevalkink, ProBiomass BV
Robert Böhm, microbEnergy GmbH

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Ruud Peeters, Waterschap de Dommel
Martijn Theelen, N.V. Nederlandse Gasunie
Cora Uijterlinde, STOWA
George Zoutberg, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Marc Vermeulen, Waterschap Rivierenland
Jan Hendrik Annema, GasTerra
Rob van de Sande, Waterschap Aa en Maas
Koen Smidt, Waterschap Brabantse Delta

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau bv
STOWA STOWA 2021-21
ISBN 978.90.5773.936.1

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

TEN GELEIDE

TOEPASSING VAN BIOLOGISCHE METHANISERING OP RIOOLWATERZUIVERINGEN

Biologische methanisering is een technologie om de omzetting van biogas naar groengas te realiseren. De economie van het proces wordt vooral bepaald door de prijs van de benodigde waterstof dan wel door de prijs van de groene elektriciteit die nodig is om die waterstof eventueel lokaal te produceren. Onder de huidige omstandigheden zijn die te hoog. Desondanks wordt de technologie als veelbelovend gezien, omdat de vraag naar groen gas sterk zal gaan toenemen en er aanleiding is aan te nemen dat de kostprijs zal dalen, o.a. door dalende kosten van elektriciteit of waterstof.

Biologische methanisering is een robuuste technologie om koolstofdioxide om te zetten in methaan met behulp van waterstof. De technologie kan leiden tot een hogere productie van groen gas op RWZI's.

Dit project sluit aan op het initiatief van de energiefabriek dat tot doel heeft de RWZI zo mogelijk om te bouwen tot een leverancier van duurzame energie en past binnen de activiteiten voor de realisatie van het Klimaatakkoord, dat is gesloten tussen de Rijksoverheid en de Unie van Waterschappen. Ook op de lange termijn wordt verwacht dat er vraag zal blijven naar groen gas waar er weinig of geen alternatieven voor handen zijn.

Het initiatief voor dit project komt vanuit het project SuperSludge, waarbij zuiveringsslib superkritisch wordt vergast en waarbij syngas wordt geproduceerd. Hiervoor loopt bij het waterschap Aa en Maas een pilot onderzoek. In vergelijking met anaerobe vergisting leidt de technologie tot een hogere omzetting van organische stof in slib naar een energierijk gasmengsel. Om het als groen gas in te voeden in het gasnet is het wel nodig om eerst waterstof en koolstofdioxide (wat van nature al in syngas aanwezig is) om te zetten tot methaan.

Met dit project is aangetoond dat de technologie van biologische methanisering voor dit doel geschikt is. Omdat er lang niet voldoende waterstof van nature in het syngas aanwezig is om alle koolstofdioxide in het syngas volledig om te zetten, kan de productie aan groen gas substantieel worden verhoogd wanneer extra waterstof van buitenaf wordt toegevoerd. Onder de huidige marktcondities is die extra toevoeging echter meestal niet rendabel.

De technologie kan ook worden toegepast in combinatie met bestaande biogasinstallaties. Hierdoor kan de methaanproductie met ca. 50 % toe nemen.

Het onderzoek is mede gefinancierd door GasTerra met als belangrijke doelstelling de verduurzaming van het Nederlandse aardgas.

Joost Buntsma
Directeur STOWA

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de uitkomsten van een studie naar de toepassingsmogelijkheden van biologische methanisering op rioolwaterzuiveringsinstallaties. Door de productie van een duurzame vervanger van aardgas wordt beoogd de benutting van slib op RWZI's te verbeteren.

Het belangrijkste aandachtspunt van dit project is onderzoek naar de biologische methanisering van syngas uit superkritische vergassing van slib om vast te stellen of dit technisch en financieel haalbaar is voor de productie van groen gas. Ook is onderzocht of dit haalbaar is voor biogas uit conventionele slibvergistinginstallaties.

Door superkritische vergassing van zuiveringsslib gevolgd door methanisering kan in principe jaarlijks 18,3 PJ aan groen gas worden geproduceerd wanneer al het aanwezige koolstofdioxide gas wordt omgezet naar methaan met behulp van 6,6 PJ waterstof. Dit betreft het slib van de waterschappen plus dat van de industrie. Ter vergelijking: via de route van anaerobe vergisting van alle slib kan ongeveer 3,4 PJ groen gas worden gemaakt. Indien daaraan methanisering wordt toegevoegd, stijgt dit naar 5,7 PJ.

Voor de methanisering van syngas uit superkritische vergassing zijn in dit onderzoek twee opties bekeken:

1. Methanisering van het syngas zonder externe waterstoftoevoer. In dit geval reageert alleen de waterstof die reeds aanwezig is in het ruwe syngas met het koolstofdioxide. Er blijft dan een restant aan koolstofdioxide over in het gas, wat nadien moet worden verwijderd om een acceptabele samenstelling voor het groen gas te bereiken: de RECO₂-route.
2. Met een externe waterstofbron kan de koolstofdioxide in het syngas volledig worden omgezet tot methaan en wordt een grotere hoeveelheid methaan geproduceerd: de AddH₂-route.

In tegenstelling tot het syngas bij superkritische vergassing bevat biogas afkomstig uit anaerobe vergisting helemaal geen waterstof. Bij biogas is daarom alleen de tweede optie relevant als alternatief voor de gangbare route waarbij koolstofdioxide wordt verwijderd voordat het gas kan worden ingevoerd.

In dit project is de biologische methanisering van twee synthetische gasmengsels (representatief voor syngas uit superkritische vergassing) experimenteel onderzocht in kleine batchexperimenten en in een continu opererende pilot plant. Beide routes blijken technisch mogelijk; naar verhouding vertoont de AddH₂-route wel een hogere processtabiliteit omdat waterstof en koolstofdioxide in de ideale verhouding worden toegevoerd en levert deze route groen gas op dat beter voldoet aan de technische eisen tot invoeding in het gasnet.

De RECO₂ variant is substantieel goedkoper dan de AddH₂-benadering door een geringere investeringsbehoefte en lagere variabele kosten, vooral vanwege de afwezigheid van een elektrolyser voor waterstofproductie. Het levert echter ook veel minder groen gas op. Verder wijkt de ruwe gassamenstelling wel wat meer af van de invoedingseisen voor injectie in het gasnet; er is dan ook meer moeite nodig om het op specificatie te brengen.

Bij de verdere ontwikkeling is het daarom aan te bevelen om bij het RECO₂ concept wel de mogelijkheid open te houden om in de toekomst alsnog per as of pijpleiding waterstof aan te voeren en te doseren, of dit lokaal te gaan maken uit elektriciteit zonder meteen al vanaf het begin een elektrolyser te installeren. Hiermee kan op den duur een verhoogde processtabiliteit en productievolume groen gas worden bereikt zonder de noodzaak om al in de aanvang van het project extra hardware bij te plaatsen. Afhankelijk van de toekomstige beschikbaarheid en prijs van waterstof of elektriciteit kan vervolgens de productie van groen gas worden opgevoerd.

Biologische methanisering kan ook worden toegepast op biogas dat door anaerobe vergisting van zuiveringsslib is geproduceerd. Uitvoering is mogelijk met een externe waterstofbron waarbij de procesvoering goed vergelijkbaar zal zijn met de AddH₂ variant voor syngas uit superkritische vergassing. Een alternatief is de koolstofdioxide te verwijderen uit het biogas zoals nu al gebruikelijk is. De technische haalbaarheid van biologische methanisering van biogas is in dit project niet experimenteel onderzocht omdat er al demonstratie-installaties bestaan die deze route uitvoeren.

Door de toevoeging van waterstof aan het methaniseringsproces kan de hoeveelheid ingevoerd groen gas worden verhoogd. De extra inkomsten die hierdoor ontstaan zijn (op basis van het basisbedrag in de SDE++ regeling) echter ontoereikend om de meerkosten van methanisering op basis van extern ingekocht waterstof volledig te dekken, tenzij waterstof aanmerkelijk goedkoper kan worden ingekocht of geproduceerd dan nu het geval is. Dit geldt vooral voor de vergistingsroute, waarvoor in 2020 het SDE++-basisbedrag beduidend lager is dan voor de vergassingsroute. Methanisering van syngas via de RECO₂-route kan worden uitgevoerd tegen een significant lagere kostprijs, waardoor deze als meest aantrekkelijk wordt beoordeeld.

Via stimuleringsbeleid gericht op alternatieve energiebronnen wordt het gebruik van aardgas in Nederland de komende jaren fors teruggedrongen. Er blijft echter ook op langere termijn in bepaalde sectoren groen gas nodig (chemie, industrie) omdat opties als elektrificatie of waterstof daar niet altijd technisch haalbaar zijn. Om dit gas te leveren zonder nadelige gevolgen voor het klimaat is vergroening (bijvoorbeeld door een oplopende bijmengverplichting) essentieel. Gezien de blijvende beschikbaarheid van zuiveringsslib kan ontwikkeling van de productie van groen gas uit zuiveringsslib daarom ook op de lange termijn van strategisch belang zijn.

LIJST VAN AFKORTINGEN EN ENKELE BEGRIPPEN

| | |
|-------------|---|
| CGE | Cold Gas Efficiency: bij superkritische vergassing de fractie van de chemische energie in het zuiveringsslib die wordt teruggevonden in het vrijkomende syngas (op basis van HHV). |
| CAPEX | Investeringskosten of jaarlijks terugkerende financieringskosten (rente en aflossing) |
| ds | Droge stof |
| G-gas | Groningen gas: laagcalorisch gas (omdat het 14 % stikstof bevat) vooral afkomstig uit het aardgasveld rond Slochteren. |
| HHV | Bovenste verbrandingswaarde: De bovenste verbrandingswaarde is de energie die vrijkomt bij verbranding als de waterdamp die bij de verbranding ontstaat wordt gecondenseerd tot vloeibare vorm. Het verschil tussen de onderste en bovenste verbrandingswaarde is de condensatiewarmte van de bij het verbrandingsproces vrijkomende waterdamp. |
| HTL-net | Hoofdtransportleidingnet, druk 67 bar en hoger |
| IE | Inwonerequivalent, de gemiddelde hoeveelheid vervuiling (in termen van zuurstofbindende stoffen) in het afvalwater die een persoon in huis veroorzaakt. De formule voor de berekening hiervan gaat uit van een totaal zuurstofverbruik (TZV) van 150 gram. |
| L-gas | Hoogcalorisch gas |
| LHV | Onderste verbrandingswaarde of stookwaarde. In de praktijk wordt bij verbrandingsprocessen waterdamp gevormd. De warmte die vrijkomt na afkoeling van de bij verbranding gevormde rookgassen zonder deze waterdamp te condenseren is de onderste verbrandingswaarde |
| MBR | Methaanvormingssnelheid (methane building rate) |
| Methaanslip | Het verlies van methaan naar de omgeving, in dit geval omdat het onbedoeld met het verwijderen van koolstofdioxide uit het productgas mee wordt afgevoerd. |
| OPEX | Jaarlijkse operationele kosten, gerelateerd aan het gebruik van de installatie |
| PEM | Proton Exchange Membrane |
| RNB-net | Gasnetwerk van regionale netbeheerders, druk 8 bar |
| RTL-net | Regionale transportleidingnet, max. druk 40 bar |
| RVO | Rijksdienst voor Ondernemend Nederland |
| RWZI | Rioolwaterzuiveringsinstallatie |
| SDE++ | Stimuleringsregeling Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie |

| | |
|--------------|---|
| SKV | Superkritische vergassing |
| Spark spread | De spark spread is de brutomarge tussen de marktprijzen voor aardgas en elektriciteit. Bij een gasgestookte centrale moet de geproduceerde elektriciteit voor een hogere waarde worden verkocht dan de inkoopkosten van aardgas. Bij methanisering van syngas of biogas m.b.v. uit elektriciteit geproduceerd waterstof moet de marktwaarde van aardgas(methaan) in ieder geval hoger zijn dan de waarde van elektriciteit. |
| STOWA | Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer |
| Syngas | Het gas dat ontstaat als product bij de superkritische vergassing van slib |
| VERENA | De VERENA-plant is een pilot plant bij het Karlsruhe Institute of Technology (KIT) voor het superkritisch vergassen van natte biomassastromen, met een capaciteit tot 100 kg/uur met een ds-gehalte van max. 20 %. De maximale druk is 35 MPa en de maximale temperatuur 700 °C. |

DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoeklijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.

TOEPASSING VAN BIOLOGISCHE METHANISERING OP RIOOLWATERZUIVERINGEN

INHOUD

| | | |
|----------|---|-----------|
| | TEN GELEIDE | |
| | SAMENVATTING | |
| | LIJST VAN AFKORTINGEN EN ENKELE BEGRIPPEN | |
| | DE STOWA IN HET KORT | |
| 1 | INLEIDING | 1 |
| | 1.1 Achtergrond en doelstelling | 1 |
| | 1.2 Superkritische vergassing (SKV) | 1 |
| | 1.3 Financiering | 2 |
| | 1.4 Uitvoerende partijen | 3 |
| | 1.5 Het onderzoek | 3 |
| 2 | METHANISERING VAN SYNGAS EN BIOGAS | 5 |
| | 2.1 Toepassingen voor de methaniseringsreactie | 5 |
| | 2.2 Katalytische versus biologische methanisering | 7 |
| 3 | HET MARKTPOTENTIEEL VOOR BIOLOGISCHE METHANISERING OP RWZI'S | 9 |
| | 3.1 Hoeveelheden slib | 9 |
| | 3.2 Potentiële productie groen gas via biogasroute | 9 |
| | 3.3 Potentiële productie groen gas via superkritische vergassing | 10 |
| | 3.4 Samenvatting potentiële groengasproductie en bijbehorende energiestromen uit slib | 10 |
| 4 | BIOLOGISCHE METHANISERING VOLGENS HET BION®- CONCEPT | 11 |
| | 4.1 Inleiding | 11 |
| | 4.2 Elektrolyse | 11 |
| | 4.3 Biologische methanisering | 12 |
| | 4.4 Gasbehandeling | 13 |
| | 4.5 Biologische methanisering: twee hoofdroutes | 14 |
| | 4.5.1 AddH2 concept | 14 |
| | 4.5.2 RECO2 concept | 15 |
| 5 | UITGANGSPUNTEN VOOR HET EXPERIMENTEEL ONDERZOEK EN DE EVALUATIE | 16 |
| | 5.1 Inleiding | 16 |
| | 5.2 Gassenstelling | 16 |
| | 5.3 Capaciteitskeuze voor de evaluatie | 17 |
| | 5.4 Slibsoorten | 17 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 6 | RESULTATEN BATCHTESTS | 18 |
| 6.1 | Doel van de batchtesten | 18 |
| 6.2 | Omschrijving van de batchtesten | 18 |
| 6.3 | Geschiktheid van slib als substraat | 19 |
| 6.4 | Geschiktheid van syngas voor methanisering | 19 |
| 7 | RESULTATEN DUURPROEVEN IN DE CONTINUE BION® -OPSTELLING | 21 |
| 7.1 | Doel en uitvoering | 21 |
| 7.2 | Resultaten van de duurproeven | 23 |
| 8 | DIMENSIONERING VAN EEN METHANISERINGSINSTALLATIE VOOR SYNGAS | 25 |
| 8.1 | Massa- en energiestromen | 25 |
| 8.2 | Massabalansen | 25 |
| 8.3 | Energiebalansen | 26 |
| 8.4 | Plant lay-out en ruimtebeslag | 28 |
| 9 | BEREIKTE GASKWALITEIT EN EISEN VOOR INJECTIE IN HET GASNET | 31 |
| 10 | ECONOMISCHE ASPECTEN | 35 |
| 10.1 | Inleiding | 35 |
| 10.2 | Kapitaalkosten | 35 |
| 10.3 | Operationele kosten | 36 |
| 10.4 | Productiekosten en opbrengsten groen gas | 36 |
| 10.5 | Gevoeligheidsanalyse | 37 |
| 11 | INTEGRALE ANALYSE VAN VOORDELEN EN NADELEN VAN ADDH2 EN RECO2 | 39 |
| 11.1 | Productiekosten | 39 |
| 11.2 | Gascomponenten met remmende werking op de methanisering | 39 |
| 11.3 | Compatibiliteit met de eisen voor invoeding | 39 |
| 11.4 | Stabiliteit van het biologische proces | 39 |
| 11.5 | Totaal-productievolume | 40 |
| 11.6 | Energetisch conversierendement | 40 |
| 11.7 | Beschikbaarheid van technische voorzieningen | 40 |
| 11.8 | Ruimtebeslag | 40 |
| 11.9 | Vrijkomende broeikasgassen | 40 |
| 11.10 | Overzicht / integrale afweging | 40 |
| 12 | METHANISERING VAN BIOGAS | 42 |
| 12.1 | Inleiding | 42 |
| 12.2 | Investeringskosten | 43 |
| 12.3 | Operationele kosten | 43 |
| 12.4 | Financiële haalbaarheid | 44 |
| 13 | MOGELIJKE TOEPASSINGEN VAN METHANISERING OP EEN RWZI | 46 |
| 13.1 | Het Limeco-project in Zwitserland | 46 |
| 13.2 | Ontwikkelingen in de beschikbaarheid van waterstof | 48 |
| 14 | PERSPECTIEF VOOR GROEN GAS DOOR BIOLOGISCHE METHANISERING | 51 |
| 15 | CONCLUSIES | 53 |
| 16 | REFERENTIES | 55 |

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND EN DOELSTELLING

Dit rapport beschrijft onderzoek en studie naar toepassingsmogelijkheden van de biologische methanisering op rioolwaterzuiveringsinstallaties. Twee maatschappelijke ontwikkelingen liggen aan de basis van deze studie:

- Nederland heeft besloten de winning van aardgas snel terug te schroeven. Omdat niet alle verbruikers meteen kunnen overschakelen naar alternatieve bronnen van hernieuwbare energie, bestaat het voornemen om opties te ontwikkelen om ook groen gas in te zetten, geproduceerd uit hernieuwbare bronnen. Volgens de minister van Economische Zaken zal de toename in groengasproductie op basis van de plannen van de groengassector uit het Klimaatakkoord voor ongeveer 80-90% plaatsvinden op basis van natte biomassa, zoals GFT-afval, agrarische reststromen, reststromen uit de voedsel- en genotsmiddelenindustrie, dierlijke mest en zuiveringsslib. Het sectorstreven gaat indicatief uit van circa 25 PJ aan groen gas via vergisting, 5 PJ via thermische vergassing en 40 PJ via superkritische vergassing in 2030 [1].
- De wens van de waterschappen om de RWZI's zo efficiënt mogelijk te bedrijven en zo mogelijk om te vormen tot een energiefabriek in plaats van een energieverbruiker¹. Van oudsher wordt zuiveringsslib gebruikt als energiebron door het te vergisten. Een alternatief proces is superkritische vergassing. Dit proces wordt momenteel in een pilot plant onderzocht op de zuiveringsinstallatie in Heeswijk-Dinther. In beide gevallen, vergisting of superkritische vergassing, kan het productgas met behulp van biologische methanisering geschikt worden gemaakt voor injectie in het aardgasnet. Dit onderzoek is geïnitieerd vanuit het project SuperSludge. Binnen SuperSludge wordt een technologie voor superkritische vergassing van zuiveringsslib ontwikkeld. Biologische methanisering van het geproduceerde syngas kan aansluitend de verwaarding van het syngas optimaliseren.

De belangrijkste doelstelling van dit project is te onderzoeken of biologische methanisering van syngas uit superkritische vergassing van slib een interessante route is voor de productie van groen gas. Ook is onderzocht, maar niet experimenteel, of dit geldt voor biogas uit conventionele slibvergistingsinstallaties.

1.2 SUPERKRITISCHE VERGASSING (SKV)

Bij superkritische vergassing kunnen natte organische afvalstromen worden opgewaardeerd tot energierijk gas. Door zowel temperatuur als druk voldoende lang boven het superkritieke punt te brengen (bijvoorbeeld 600 °C en 300 bar) kan een vrijwel volledige omzetting van het organische materiaal worden bereikt. Het productgas gas bevat waterstof, methaan en koolstofdioxide als belangrijkste componenten naast enkele hogere koolwaterstoffen. Dit productgas wordt in dit rapport verder als syngas aangeduid.

¹ De waterschappen geven hieraan vorm door het initiatief Energie- en grondstoffenfabriek (www.egf.nl) waaruit onder andere het onderzoek naar superkritische vergassing voortkomt.

Verschillende marktpartijen werken momenteel parallel aan de ontwikkeling van deze technologie voor de verwerking van natte organische reststromen, waarbij de focus van ontwikkelende partijen op de specifieke markttoepassing, technologie en schaalgrootte uiteen kan lopen.

Hoewel de resultaten van deze studie naar methanisering breder toepasbaar zijn en via dit rapport openbaar beschikbaar worden gesteld, sluit het onderzoek inhoudelijk wel direct aan bij het nog lopende pilotonderzoek dat wordt uitgevoerd op de RWZI Heeswijk-Dinther. In deze proefinstallatie wordt tot 150 kg/h aan nat slib bij hoge druk (350 Bar) en temperatuur (650 °C) vergast tot syngas terwijl fosfaat en nitraatrijke stromen in respectievelijk een zoutfase en een waterfase worden afgescheiden uit het proces. Dit onderzoek wordt uitgevoerd door het SuperSludge-consortium, bestaande uit de waterschappen Aa en Maas en de Dommel, de SNB, ProBiomass en Electron met financiële steun van RVO en de STOWA.

Uit een eerder door RHDHV uitgevoerde business case studie bleek dat een goed werkende en kosteneffectieve methanisering belangrijk is voor een optimale business case van het SuperSludge concept. Dit is voor ProBiomass aanleiding geweest een nader onderzoek te initiëren naar de technische en economische haalbaarheid daarvan.

FIGUUR 1 DE PILOTINSTALLATIE VOOR SUPERKRITISCHE VERGASSING VAN HET SUPERSLUDGE CONSORTIUM IN DINTHER



1.3 FINANCIERING

Onderhavig onderzoek is mede mogelijk gemaakt door financiële bijdragen van GasTerra en de STOWA.

GasTerra is groothandelaar in aardgas en groen gas. GasTerra koopt gas van binnen- en buitenlandse producenten en op de vrije gasmarkt. De klantenkring bestaat uit energiebedrijven, industrieën en andere grootafnemers. GasTerra is een belangrijke schakel in de Nederlandse

en West-Europese energievoorziening. GasTerra streeft ernaar de groengasproductie te verhogen om de vermindering van de Nederlandse gasproductie deels te compenseren.

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Optimalisatie van de slibbehandeling gericht op een maximale energieproductie is een belangrijke doelstelling. Onderzoek naar onder andere superkritisch vergassen en biologische methanisering past hierin.

1.4 UITVOERENDE PARTIJEN

Het onderzoek is uitgevoerd door ProBiomass in samenwerking met microbEnergy als onderaannemer.

ProBiomass voert contractresearch uit en levert consultancydiensten om de ontwikkeling en toepassing te bevorderen van thermochemische processen gericht op het gebruik van biomassa voor een verduurzaming van de energiesector. ProBiomass is partner in het SuperSludge consortium (met de Waterschappen Aa en Maas en de Dommel, SNB en Electron Thermal Processing Equipment BV). Het consortium heeft op de rioolwaterzuivering Heeswijk-Dinther een pilot plant gerealiseerd voor de superkritische vergassing van zuiveringsslib. ProBiomass is daarbij verantwoordelijk voor de procesmatige optimalisatie. In onderhavig project voert ProBiomass de coördinatie en penvoering uit en levert de informatie over superkritische vergassing en over Nederlandse situatie betreffende bijvoorbeeld praktische aspecten van integratie in een RWZI, eigenschappen van het zuiveringsslib, eisen aan invoeding in het gasnet, etc.

MicrobEnergy GmbH en haar zusterbedrijf Schmack Biogas services GmbH zijn beide onderdeel van de Viessmann groep. Zij richten zich in Europa op de productie van energiedragers als waterstof en methaan langs niet-fossiele, groene routes. De bedrijven hebben meer dan 20 jaar kennis en ervaring opgebouwd op het gebied van constructie, onderhoud, operatie en biologische optimalisatie. Hun visie is om partners in staat te stellen om duurzaam gas te produceren met innovatieve en betrouwbare technologie. Biologische methanisering is één van haar specialisaties en microbEnergy beschikt over laboratorium faciliteiten, een pilot plant en een demonstratieplant om hieraan verder onderzoek te doen. In dit project doet microbEnergy onderzoek aan de methanisering van synthese gas en levert het de informatie over de financiële aspecten, de investerings- en operationele kosten voor de evaluatie van alternatieve routes en de business case.

Om de praktische toepasbaarheid van de resultaten voor de waterschappen te waarborgen is een begeleidingscommissie samengesteld, bestaande uit vertegenwoordigers van verschillende waterschappen, STOWA, GasTerra en Gasunie.

1.5 HET ONDERZOEK

Het uitgevoerde onderzoek bestond uit de volgende stappen:

- Een verkenning van de toepassingsmogelijkheden voor biologische methanisering van syngas en biogas bij waterzuiveringsinstallaties

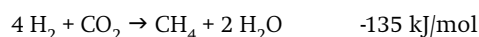
- Experimenteel onderzoek om de mogelijkheid van methanisering van syngas uit superkritische vergassing vast te stellen en ontwerpgegevens te verkrijgen
 - Batchtesten op laboratoriumschaal om vast te stellen of het syngas in combinatie met zuiveringsslib in groengas kan worden omgezet en er geen remming optreedt door componenten zoals CO in het syngas. Verschillende soorten slib worden getest.
 - Experimenten in een continue methaniseringopstelling om de omzettingssnelheid te bepalen en zo de uitgangspunten vast te stellen voor een ontwerp
- Uitwerken van een globaal ontwerp voor een methaniseringinstallatie aansluitend op een superkritische vergassingsinstallatie. Voor verschillende mogelijke varianten is een techno-economische evaluatie uitgevoerd.
- Analyse van de financiële aspecten van de methanisering van biogas, zoals nu al op praktijkschaal wordt uitgevoerd.

2

METHANISERING VAN SYNGAS EN BIOGAS

2.1 TOEPASSINGEN VOOR DE METHANISERINGSREACTIE

De algemene methaniseringsreactie waarbij duurzaam geproduceerd waterstof (H₂) en koolstofdioxide (CO₂) reageren tot methaan is als volgt:



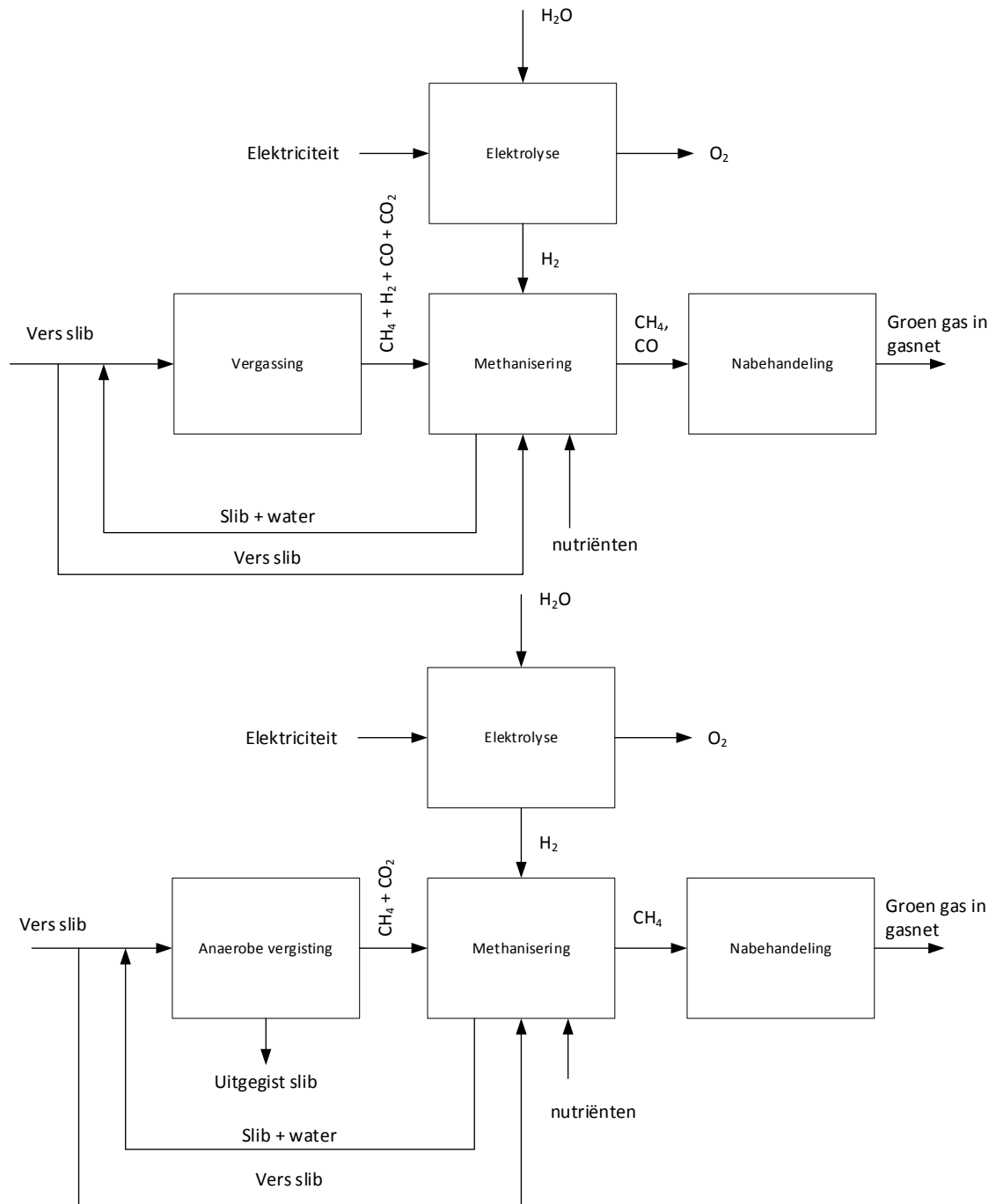
Bij deze licht exotherme reactie wordt uit 4 delen waterstof en 1 deel koolstofdioxide 1 deel methaan gevormd naast 2 delen water. Het op deze wijze geproduceerde methaan kan in principe als groen gas via het bestaande gasnet worden gedistribueerd.

Een voorwaarde om het gas ook als groen gas aan te merken is dat de waterstof op hernieuwbare wijze wordt geproduceerd, bijvoorbeeld door elektrolyse met behulp van groene stroom. Situaties waarin dit kan worden toegepast zijn bijvoorbeeld:

1. Wind en zon kunnen stroom produceren op momenten dat de vraag lager is dan het aanbod. Met de overtollige elektriciteit kan waterstof worden geproduceerd, dat via deze methaniseringsreactie in groen gas kan worden omgezet en ingevoerd in de bestaande gas-infrastructuur ter vermijding van fossiel aardgas. Door de toenemende productiecapaciteit van zonnepanelen en windmolens wordt aan deze toepassing momenteel veel aandacht besteed [3].
2. Met het op duurzame wijze geproduceerde waterstof kunnen gasmengsels die rijk zijn aan koolstofdioxide worden omgezet in groen gas dat in het gasnet kan worden geïnjecteerd. Op rioolwaterzuiveringsinstallaties betreft dit bijvoorbeeld biogas of in de toekomst productgas van superkritische vergassinginstallaties. De methaniseringsreactie is dan een alternatief voor het verwijderen van koolstofdioxide uit het gasmengsel voorafgaand aan het invoeden met als voordeel dat de hoeveelheid groen gas toeneemt. Bij superkritische vergassing is een deel van de benodigde waterstof al voorhanden in het beschikbare gasmengsel. Weliswaar is de hoeveelheid niet voldoende voor volledige omzetting van het aanwezige koolstofdioxide. Er kan echter voor worden gekozen om extra waterstof toe te voegen uit elektrolyse om volledige omzetting van het aanwezige koolstofdioxide te verkrijgen. Een andere variant is het achteraf alsnog verwijderen van overtollig koolstofdioxide na methanisering. Beide varianten zijn onderzocht in deze studie.

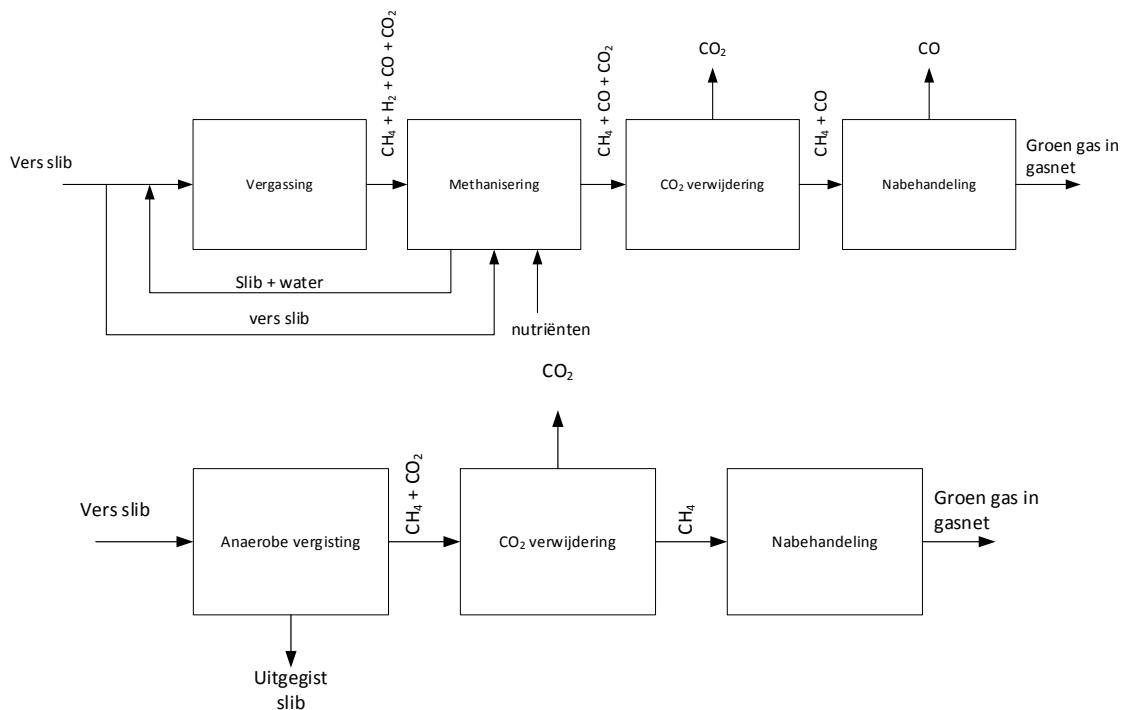
Zuiveringsslib is een vorm van biomassa welke als hernieuwbare energiebron kan worden ingezet door het te vergisten of te vergassen in een reactor onder superkritische condities. In beide gevallen bevat het productgas aanzienlijke hoeveelheden koolstofdioxide die kan worden benut om de opbrengst aan groen gas te maximaliseren met behulp van de methaniseringsreactie. Figuur 2 geeft een overzicht van de mogelijke routes om uit zuiveringsslib groen gas te produceren.

FIGUUR 2 ROUTES VOOR DE PRODUCTIE VAN GROEN GAS UIT SLIB VIA VERGASSING EN ANAEROBE VERGISTING EN ANAEROBE VERGISTING IN DE ADDH2 VARIANT, NAAR [4]



De methaniseringsreactie vormt een alternatief voor het concept waarbij koolstofdioxide juist wordt verwijderd uit het gasmengsel voordat het kan worden ingevoerd (Figuur 3). Dit concept wordt nu al toegepast bij de opwerking van biogas voor invoeding in het gasnet.

FIGUUR 3 PRINCIPESHEMA'S VOOR DE PRODUCTIE VAN GROEN GAS UIT SLIB VIA VERGASSING (BOVEN) EN ANAEROBE VERGISTING (ONDER) IN DE RECO₂ ROUTE. OMDAT ER GEEN WATERSTOF VAN BUITENAF WORDT TOEGEVOERD MOET OVERTOLLIG KOOLOSTOFDIOXIDE WORDEN VERWIJDERD



2.2 KATALYTISCHE VERSUS BIOLOGISCHE METHANISERING

Er zijn twee belangrijke procesroutes voor de methanisering van koolstofdioxidehoudend gas:

Biologische methanisering: de reactie vindt plaats in vloeibaar water met behulp van methaanvormende Archeabacteriën bij een temperatuur van circa 65 °C.

Katalytische methanisering: de reactie vindt plaats in de gasfase, gebruikmakend van een – vaak op nikkel of platina/ruthenium gebaseerde - katalysator. De temperatuur varieert van 300-500 °C, de druk van 1 tot 100 bar.

In het algemeen is katalytische methanisering gevoeliger voor verontreinigingen in het gas dan biologische methanisering. Met name zwavelverbinding in het gas – onvermijdelijk aanwezig bij vergisting of vergassing van slib vormen een probleem voor katalytische methanisering. Bij het biologische proces daarentegen is het lastiger om de geproduceerde warmte efficiënt te benutten. Biologische omzetting vereist grotere volumina door lagere omzettingssnelheden. Katalytische methanisering is weliswaar complex maar ook compact en daardoor vooral geschikt voor grotere capaciteiten. Het katalytische proces heeft zich al op grote schaal bewezen, terwijl het biologische proces nog in de demonstratiefase zit.

Een vergelijkende kostenstudie [5] laat zien dat katalytische methanisering financieel aantrekkelijker is bij grotere capaciteiten, bijvoorbeeld groter dan 5 MW groen gas productie. Ter vergelijking: de grootste afvalwaterzuiveringsinstallatie van Nederland in Harnaspolder

produceert 15.500 Nm³/d biogas waaruit een even groot volume methaan kan worden geproduceerd. Het vermogen aan methaan bedraagt in dat geval 7 MW_{HHV} methaan [6].

Op grond van de typische schaal van afvalwaterzuiveringen, de flexibiliteit tegenover verontreinigingen in het gas en de technologische verwantschap tussen biologische methanisering en de biologische afvalwaterzuivering is in dit project voor de toepassing op RWZI's gekozen voor de biologische methaniseringsroute.

TABEL 1 BELANGRIJKE VERSCHILLEN TUSSEN KATALYTISCHE EN BIOLOGISCHE METHANISERING [5]

| Technologie | Katalytische methanisering | Biologische methanisering (BiON®) |
|--------------------|--|--|
| TRL | 9 | 8- 9 |
| Voordelen | Goed schaalbaar Hoogwaardige restwarmte beschikbaar | Robuust, ongevoelig voor zwavel Flexibel Korte responstijd |
| Nadelen | Hoge zuiverheidsgraad van het ingaande gas nodig Relatief lage flexibiliteit Dure materialen nodig | Nog weinig praktijkervaring met grootschalige installaties |

Een aantal recent uitgevoerde studies geven een goed overzicht van methaniseringsprocessen, bijvoorbeeld de STOWA studie van BlueTerra [7].

3

HET MARKTPOTENTIEEL VOOR BIOLOGISCHE METHANISERING OP RWZI'S

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de hoeveelheid groen gas die in potentie met behulp van methanisering uit zuiveringsslib kan worden geproduceerd indien al het slib op deze wijze wordt verwerkt. Naast de slibproductie van de zuiveringsinstallaties van waterschappen wordt ook de productie door zuiveringsinstallaties van bedrijven meegenomen. De genoemde data zijn afkomstig van het CBS tenzij anders vermeld.

3.1 HOEVEELHEDEN SLIB

In 2018 werd er vanuit de rwzi's van de waterschappen 317 kton droge stof (ds) zuiveringsslib afgevoerd [8], waarvan ongeveer 75% uit vergistingsinstallaties afkomstig is. Hieruit volgt een jaarlijkse slibproductie van circa 400 kton ds ongegist zuiveringsslib. De biogasproductie bedroeg in 2019 123 miljoen m³ [18].

Daarnaast is er de slibproductie van de zuiveringsinstallaties van bedrijven. Deze bedroeg in 2016 127 kton droge stof. In totaal is er jaarlijks daarom in orde van grootte 530 kton ds aan ongegist slib beschikbaar.

De verbrandingswaarde (LHV) van ongegist maar ovendroog slib uit een RWZI bedraagt 23,3 MJ/kg ds [9]. Dit is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij verbranding wanneer de rookgassen niet worden gecondenseerd. De chemische energie-inhoud (de HHV) bevat deze condensatiewarmte nog wel en is daarom iets hoger, hiervoor wordt in dit rapport 25 MJ/kg ds aangenomen. De energie-inhoud van al het slib in Nederland bedraagt dan 13 PJ (HHV).

3.2 POTENTIËLE PRODUCTIE GROEN GAS VIA BIOGASROUTE

Aangenomen wordt dat de specifieke productie van biogas uit rwzi-slib ongeveer gelijk is aan die van industrieel slib. Bij een typische biogasproductie van 0,33 m³/kg slib ds [9] volgt een biogasproductie van 150 miljoen m³ per jaar². De hoeveelheid groen gas die hieruit kan worden geproduceerd bedraagt 110 miljoen m³/jaar bij verwijdering van de koolstofdioxide (3,4 PJ HHV), of 175 miljoen m³/jaar na methanisering van alle koolstofdioxide in biogas (5,7 PJ HHV). Bij deze laatste route is wel 240 miljoen m³ aan waterstof nodig om alle koolstofdioxide om te zetten.

² Met mogelijkheden om deze specifieke gasproductie met thermische voorbehandelingen te verhogen is hier geen rekening gehouden.

3.3 POTENTIËLE PRODUCTIE GROEN GAS VIA SUPERKRITISCHE VERGASSING

Bij experimenten met het superkritisch vergassen van zuiveringsslib in het kader van het SuperSludge project heeft het Karlsruhe Institute of Technology (KIT) een *cold gas efficiency* behaald van 91%; dat wil zeggen dat 91% van de energie (op basis van HHV) in het zuiveringsslib wordt overgedragen aan het vrijkomende syngas. De HHV van het geproduceerde synthese gas zoals aangenomen in deze studie (Tabel 9) is gemiddeld 22 MJ/m³, zodat er jaarlijks 540 miljoen m³ syngas geproduceerd kan worden, waarvan 400 miljoen m³ uit zuiveringsslib van de waterschappen. Op basis van de opgestelde massabalansen (zie hoofdstuk 8) kan per ton zuiveringsslib (droge stof) ongeveer 500 m³ groen gas worden geproduceerd volgens het AddH2 scenario (waarbij extra waterstof wordt toegevoegd om al het aanwezige koolstofdioxide om te zetten) en 330 m³ volgens het RECO2 concept (indien dit niet gebeurt en het koolstofdioxide juist wordt verwijderd).

De potentiële jaarlijkse productie groen gas bedraagt dan:

- Volgens de AddH2 route:
 - Uit slib van de waterschappen: 325 miljoen m³
 - Uit industrieel slib 105 miljoen m³
- Volgens de RECO2 route:
 - Uit slib van de waterschappen 205 miljoen m³
 - Uit industrieel slib 65 miljoen m³

3.4 SAMENVATTING POTENTIËLE GROENGASPRODUCTIE EN BIJBEHORENDE ENERGIESTROMEN UIT SLIB

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de potentiële bijdrage van industrieel en communale zuiveringsslib aan de productie van groen gas via anaerobe vergisting en superkritische vergassing.

TABEL 2 OVERZICHT POTENTIËLE GASPRODUCTIE EN ENERGIESTROMEN UIT ZUIVERINGSSLIB IN NEDERLAND

| Overzicht | Potentie | MJ HHV/m ³ of kg | Energie (PJ HHV) |
|---|----------|--------------------------------|---------------------|
| Beschikbaarheid slib | | | |
| Waterschappen | 400 | kton ds/a | 25 |
| Bedrijven | 127 | kton ds/a | 25 |
| Totaal | 527 | kton ds/a | 25 |
| Potentiële methaanproductie | | | |
| Uit biogas door koolstofdioxide- verwijdering | 110 | Mm ³ /a | 37,8 |
| Uit biogas door methanisering | 175 | Mm ³ /a | 37,8 |
| Waterstoftoevoer | 280 | Mm ³ /a | 12,7 |
| Via superkritische vergassing | | | |
| Geen externe waterstof, met koolstofdioxideverwijdering | 270 | Mm ³ /a | 44,0 |
| Met volledige methanisering | 430 | Mm ³ /a | 42,5 |
| Waterstoftoevoer | 520 | Mm ³ /a | 12,7 |

Bovenstaande getallen dienen enkel te worden beschouwd als indicatief. Zo kan de productie via de biogasroute worden vergroot door betere ontsluiting met thermische technieken.

4

BIOLOGISCHE METHANISERING VOLGENS HET BION[®]- CONCEPT

4.1 INLEIDING

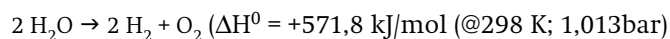
De gepresenteerde resultaten in deze studie zijn gebaseerd op de door microbEnergy ontwikkelde variant van biologische methanisering: het zgn. BiON[®] concept. MicrobEnergy heeft in het kader van dit project experimenteel onderzoek uitgevoerd naar de methanisering van productgas van de superkritische vergassing van zuiveringsslib. Op basis van deze experimentele resultaten is ook de verdere evaluatie uitgevoerd.

De route van syngas of biogas naar groen gas, geschikt voor injectie in het gasnet omvat de volgende deelprocessen:

1. Elektrolyse voor de productie van eventueel benodigde waterstof
2. Biologische methanisering voor de productie van methaan uit waterstof en koolstofdioxide
3. Gasreiniging van het groen gas tot een gaskwaliteit welke geschikt is voor injectie in het gasnet

4.2 ELEKTROLYSE

Om alle koolstofdioxide in syngas van de superkritische vergassing volledig om te zetten is het nodig om (aanvullend op mogelijk reeds in het syngas aanwezig waterstof) waterstof van buitenaf toe te voegen (het ADDH2 scenario). Dit waterstof kan lokaal worden gemaakt door elektrolyse van water. Dit verloopt volgens de volgende reactievergelijking:



Twee technologieën voor elektrolyse zijn commercieel verkrijgbaar: de alkalische elektrolyse en de PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolysetechnologie. Welke technologie de voorkeur verdient hangt af van omstandigheden en het gekozen business model. Tabel 3 geeft een overzicht van de voor- en nadelen.

TABEL 3 BELANGRIJKSTE VERSCHILLEN TUSSEN ALKALISCHE EN PEM-ELEKTROLYSER{11}

| Technologie | Alkalisch | Proton Exchange Membrane |
|-------------|--|--|
| TRL | 9 | 8-9 |
| Voordeel | Kosteneffectief Grootschalig toepasbaar Bewezen technologie Lange levensduur Eenvoudige waterbehandeling | Compact Goed dynamisch gedrag Goed schaalbaar Geen corrosie |
| Uitdagingen | Operatie met koude start en in deellast Hoog drukniveau | Dure en hoogwaardige materialen nodig |

De keuze voor de meest geschikte technologie wordt bepaald door de specifieke praktijkcondities. Voor volcontinue processen met lage eisen aan de flexibiliteit is het alkalische systeem toereikend en kosteneffectief. Als het elektrolyse-apparaat bijvoorbeeld binnen de eisen van energiemarkt functioneert en snel moet reageren op veranderende omstandigheden is een grote dynamiek vereist en heeft de PEM-technologie belangrijke voordelen.

In deze studie wordt uitgegaan van een PEM-elektrolyser. Deze is iets duurder dan de alkalische variant maar de flexibiliteit geeft voordelen bij variabele energieprijzen en de waterstof wordt onder druk geproduceerd zodat gascompressie achteraf achterwege kan blijven. Door rendementsverliezen wordt daarbij warmte geproduceerd welke kan worden afgevoerd met behulp van een luchtkoeler. Er is ook de mogelijkheid de afvalwarmte te benutten, waarvoor een extra warmtewisselaar in het schema is opgenomen. Het temperatuurniveau is echter laag (zie hoofdstuk 8).

4.3 BIOLOGISCHE METHANISERING

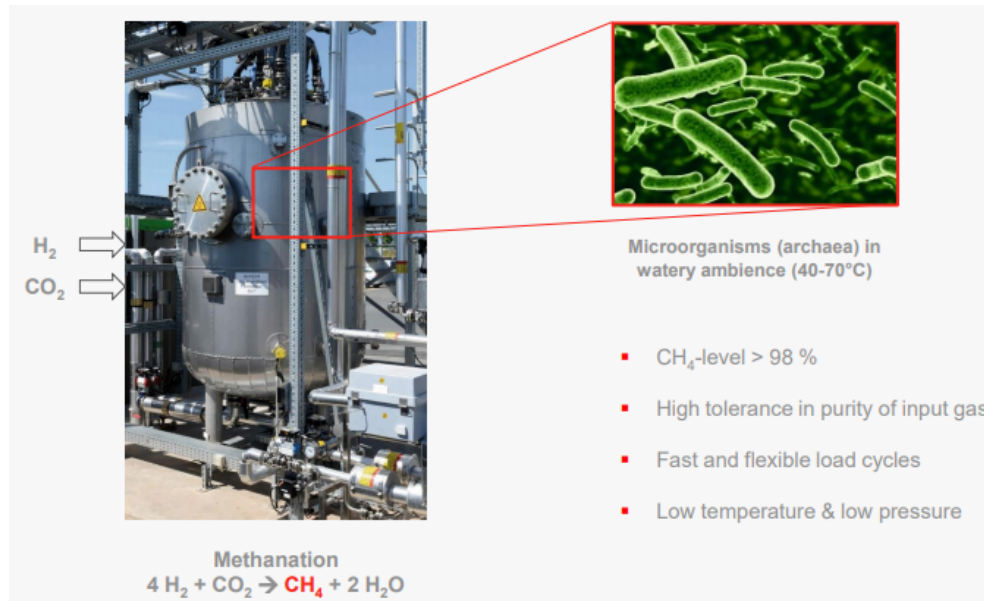
Bij biologische methanisering worden waterstof en koolstofdioxide in een reactor in contact gebracht met Archea organismen in water onder anaerobe condities. Door gunstige omstandigheden te kiezen wordt de conversiesnelheid geoptimaliseerd. Archea zijn actief tussen 30 en 110 °C maar in praktijk is de procestemperatuur veelal 65 °C. Door de geringe oplosbaarheid van waterstof onder atmosferische omstandigheden is de overdracht van waterstof naar de waterfase de snelheidsbepalende stap. De snelheid wordt dan ook verhoogd door de reactie onder verhoogde druk uit te voeren en de reactorinhoud intensief te mengen. MicrobEnergy hanteert 5 tot 10 barg als optimale druk bij een licht alkalische pH tussen 6,8 en 8,5.

Figuur 4 laat de 150 kW methaanreactor zien van microbEnergy, die opereert volgens het principe van een ideaal gemengde tank. Dit kan leiden tot een hoge restconcentratie waterstof in het productgas (die later moet worden verwijderd voor de invoeding in het net), maar de menging verhoogt de methaanvormingssnelheid. De bouw van een eerste industriële installatie in Zwitserland is in 2020 van start gegaan (zie ook 13.1).

De methanisering van biogas kan ook in de slibvergister worden uitgevoerd maar in het algemeen wordt voor een aparte methaniseringsreactor gekozen omdat dit optimalisatie van de procescondities mogelijk maakt ten aanzien van temperatuur, druk en toevoeging van gewenste nutriënten. Hierdoor worden hogere omzettingssnelheden bereikt en een hogere conversie van de koolstofdioxide bereikt.

FIGUUR 4

METHANISERINGSREACTOR 150 KW PILOT INSTALLATIE IN ALLENDORF (D), BRON: MICROBENERGY



Waterstof uit de elektrolyser en syngas uit de superkritische vergasser komen bij verhoogde druk beschikbaar waardoor er geen energie nodig is voor de compressie van dit gas naar de gewenste 10 barg. Om een goede processtabiliteit te verkrijgen is een goede bewaking en regeling van de ratio waterstof: koolstofdioxide noodzakelijk. Dit gebeurt door de regeling van de hoeveelheid toe te voeren waterstof op basis van de gemeten samenstelling van het toegevoerd gas. De bioreactor wordt intensief geroerd. Ook de hoge gasdruk bevordert het contact. De vullingsgraad van de bioreactor is 80%. Regelmatig wordt vers slib toegevoerd om uitgespoelde mineralen en micro-organismen aan te vullen. Voor een stabiele procesvoering is toevoeging van enkele hulpstoffen noodzakelijk: loog voor pH-correctie, antischuimmiddel en nutriënten en sporenelementen. De methanisering is exotherm waardoor warmte moet worden afgevoerd. Hiervoor wordt vaak een luchtkoeler gebruikt of een warmtewisselaar waardoor de warmte kan worden hergebruikt.

4.4 GASBEHANDELING

Voordat het geproduceerde gas kan worden ingevoerd in het gasnet moet het aan de samenstellingseisen hiervoor voldoen. De eisen voor invoeding hangen af van het type net (RNB/RTL/HTL) en het type gas (hoogcalorisch/laagcalorisch).

De eerste stap van de gasbehandeling bestaat ammonia- en schuimverwijdering in een waskolom. Daarna volgt de droogstap door koeling van het gas. Hierna wordt het gas weer opgewarmd voor de ontzwaveling in absorptiekolommen gevuld met actieve kool. Hierin kan naast voornamelijk waterstofsulfide ook een aantal andere componenten verwijderd worden zoals siloxanen en cyclische koolwaterstoffen.

Hierna wordt de overmaat waterstof verwijderd met een membraansysteem tot een niveau van minder dan 0,5% in het gas. Een verdere verlaging is kostbaar en gecompliceerd. Finale vochtverwijdering vindt vervolgens plaats met behulp van een absorptiedroger.

De laatste stap van de procesroute is de flow- en kwaliteitsmeting van het gas waarna het in het gasnet kan worden opgenomen via een invoedingsunit

Bij de procesroute waarbij geen externe waterstof wordt toegevoerd om alle koolstofdioxide om te zetten bevat het gas nog een aanzienlijke hoeveelheid koolstofdioxide die moet worden verwijderd. Hiervoor zijn verschillende technologieën op de markt. Tabel 4 geeft een overzicht. Al deze technologieën zijn in staat een groen gas te produceren dat geschikt is voor invoeding in het Nederlandse net.

TABEL 4 OVERZICHT VAN ENKELE KOOLSTOFDIOXIDEVERWIJDERINGSPROCESSEN

| Technologie | Pressure Swing Adsorptie (PSA) | Chemische wasser | Membraantechnologie |
|-------------|---|-------------------------------------|---|
| TRL | 9 | 9 | 9 |
| Voordeel | Geen warmtebehoefte Geen chemicaliën nodig | Lage werkdruk Weinig methaanslip | Eenvoudig te integreren Geen chemicaliën nodig Waterstofafscheiding van methaan |
| Nadeel | Relatief hoge methaanslip | Chemicaliën nodig | |

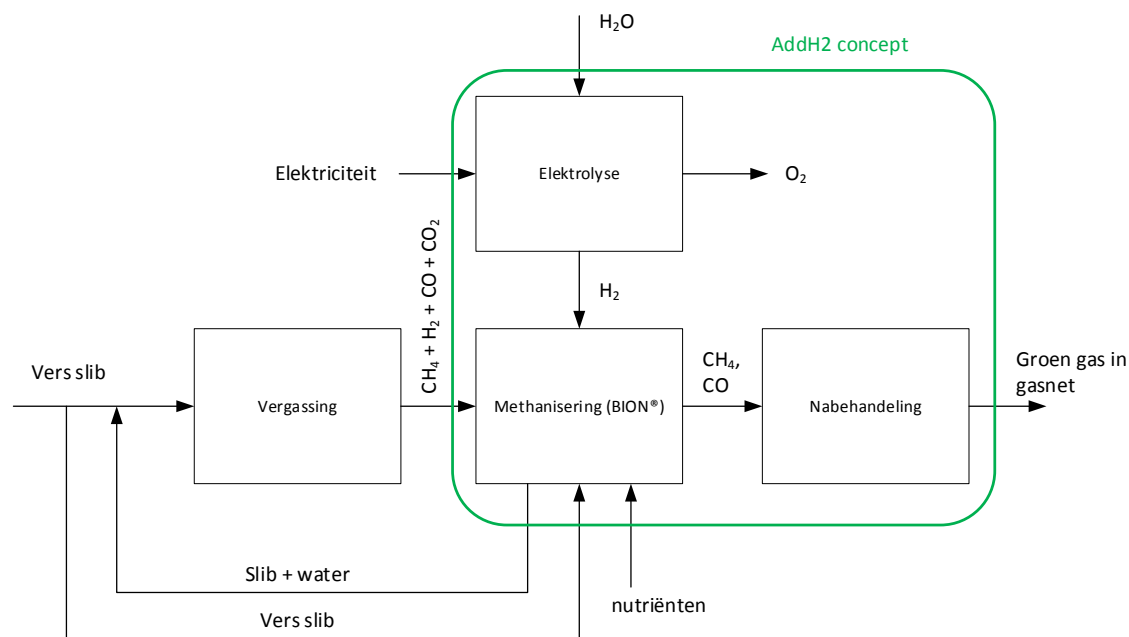
4.5 BIOLOGISCHE METHANISERING: TWEE HOOFDRUTES

Twee conceptuele benaderingen zijn uitgewerkt om met behulp van superkritische vergassing en biologische methanisering zuiveringsslib om te zetten in groen gas dat kan voldoen aan de Nederlandse eisen voor invoeding in het gasnet. De concepten geven beide een oplossing voor het probleem dat waterstof en koolstofdioxide niet in de gewenste moleculaire verhouding van 4:1 aanwezig zijn in syngas waarbij volledige omzetting van zowel waterstof als koolstofdioxide in methaan mogelijk is. De gemeten waarden liggen rond 0,5 : 1 tot 0,7 : 1. Er is daarom extra waterstof nodig voor volledige omzetting van aanwezig koolstofdioxide.

4.5.1 ADDH2 CONCEPT

De AddH2 plant bestaat uit drie hoofdonderdelen: de elektrolyser, de biologische methanisering en de gasopwerking.

FIGUUR 5 HET ADDH2 CONCEPT ALS ONDERDEEL VAN HET TOTALE PROCES



De elektrolyser splitst gedemineraliseerd water in waterstof en zuurstof. Na droging van de waterstof en verwijdering van enige restzuurstof is de waterstof geschikt voor de methaniseringsreactor.

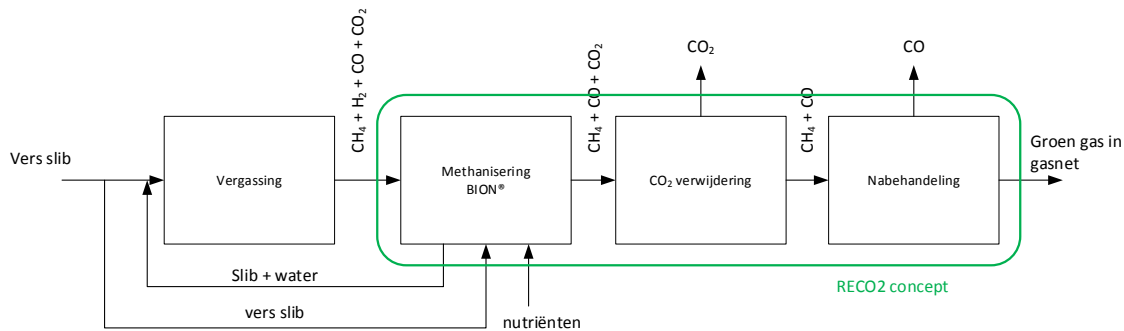
De tweede module omvat de biologische methanisering volgens het BiON[®] concept, met als belangrijkste onderdeel de bioreactor. De input bestaat uit syngas van de superkritische vergassing dat waterstof, koolstofdioxide en methaan bevat naast hogere gasvormige koolwaterstoffen. Daarnaast wordt waterstof uit de elektrolyser toegevoerd.

Het gas uit de methaniseringsreactor wordt opgewerkt in de gasreiniging om het geschikt te maken voor invoeding in het gasnet.

4.5.2 RECO2 CONCEPT

In het RECO2 concept heeft de methanisering ook een centrale plaats. Er is echter geen externe waterstofbron aanwezig, waardoor er onvoldoende waterstof aanwezig is om het koolstofdioxide volledig om te zetten. Daardoor is koolstofdioxide in het syngas in overmaat aanwezig. De overmaat koolstofdioxide moet worden verwijderd om het te kunnen invoeden.

FIGUUR 6 HET RECO2 CONCEPT MET Koolstofdioxideverwijdering ALS ONDERDEEL VAN HET TOTALE PROCES



In het RECO2-concept wordt minder groen gas geproduceerd dan in het AddH2 concept maar er zijn geen investeringen nodig in een elektrolyser of aankoopkosten van waterstof.

De waterstof in het syngas reageert met de daarin ook aanwezige koolstofdioxide. De grote overmaat koolstofdioxide wordt niet omgezet in methaan en moet worden verwijderd in de gasopwerkingsstap. Er zijn daarom twee hoofdelementen: de methanisering en de gasopwerking.

De technische uitvoering van de methanisering is vergelijkbaar met die in het AddH2-systeem. De toevoer van extra waterstof wordt achterwege gelaten.

De gasopwerking moet worden uitgebreid met een koolstofdioxideafscheiding. Daarnaast is het gewenst om koolstofmonoxide uit het syngas te verwijderen. De scheidingsunits worden geplaatst na de eerste droogstap en de ontzwaveling.

5

UITGANGSPUNTEN VOOR HET EXPERIMENTEEL ONDERZOEK EN DE EVALUATIE

5.1 INLEIDING

Om de technische haalbaarheid van de methaniseringsroute voor superkritische vergassing vast te stellen is experimenteel onderzoek uitgevoerd in de onderzoeksfaciliteiten van microbEnergy. De resultaten vormen het uitgangspunt voor een globaal ontwerp en zijn gebruikt om de business case uit te werken.

1. In kleinschalige batchtesten is vastgesteld of het geproduceerde syngas gemethaniseerd kan worden in combinatie met slib. In een eerste serie experimenten is vastgesteld of er componenten in het gas aanwezig zijn die mogelijk toxisch zijn voor de micro-organismen of de omzetting remmen. Vervolgens is ook de invloed van het slib als substraat getest in een tweede serie batchproeven. Daarbij zijn verschillende slibsoorten getest die geschikt lijken om in praktijk te worden gebruikt voor de biomethanisatie.
2. In een continue pilot opstelling is vervolgens in duurproeven onderzocht welke methaanvormingssnelheid mogelijk is met de geselecteerde slibsoort. Beide scenario's, AddH₂ en RECO₂, zijn onderzocht.

Voor de evaluatie van de twee hoofdprocesroutes AddH₂ en RECO₂ is uitgegaan van een bepaalde capaciteit van de RWZI met bijbehorende syngasproductie.

Hieronder wordt aangegeven welke slibsoorten, gassamenstellingen en zuiveringscapaciteit als uitgangspunten zijn genomen voor het onderzoek.

5.2 GASSAMENSTELLING

Voor de batchtesten zijn twee gasmengels aangemaakt met de samenstellingen zoals aangeven in Tabel 5. Daarmee is de samenstelling van deze gesynthetiseerde gassen vrijwel identiek aan die van vergassingsproeven met slib afkomstig van de afvalwaterzuiveringen Ooijen en Lelystad met de VERENA installatie bij het Karlsruhe Institute of Technology [12]. De zogenoemde VERENA-installatie is vergelijkbaar met de SuperSludge-installatie.

De keuze voor deze gassamenstellingen is genomen na afstemming met verschillende partijen in Nederland die werken aan superkritische vergassing. Naast het SuperSludge consortium betreft dit o.a. SCW systems met een installatie in Alkmaar en het consortium rond de "Yellow Gas Machine" met een pilot installatie. Het consortium rond de "Yellow Gas Machine" heeft

enige informatie over de verkregen gassamenstelling beschikbaar gesteld; het SCW consortium heeft geen data gedeeld over de gassamenstelling maar heeft verklaard dat het zich kan vinden in de gekozen gassamenstellingen.

TABEL 5 SYNGASSAMENSTELLING VOOR BATCHTESTEN (VOL%)

| Component | Gas 1 | Gas 2 |
|-------------------------------|-------|-------|
| H ₂ | 18 | 24 |
| CO | 2 | 1 |
| CO ₂ | 34 | 36,6 |
| CH ₄ | 34 | 26 |
| C ₂ H ₄ | 0,7 | 1 |
| C ₂ H ₆ | 11 | 10 |
| C ₃ H ₆ | 0,1 | 0,4 |
| C ₃ H ₈ | 0,2 | 1 |

Opgemerkt wordt dat de gebruikte gassamenstellingen niet zijn gebaseerd op onderzoek dat erop gericht is de samenstelling te optimaliseren voor de methanisering, verwacht wordt dat door optimalisatie van de condities tijdens het vergassingsproces een gas resulteert met een meer gunstige samenstelling voor de methanisering.

5.3 CAPACITEITSKEUZE VOOR DE EVALUATIE

Voor de bedrijfseconomische evaluatie van de twee hoofdroutes voor methanisering is de slibproductie van een rioolwaterzuiveringsinstallatie met een capaciteit van 200.000 IE als uitgangspunt gekozen. De bijbehorende slibproductie bedraagt ruwweg 330 kg/h ds waaruit door superkritische vergassing 300 m³/h syngas verkregen worden, overeenkomend met een vermogen van 2 MW. Deze gasproductie is als uitgangspunt voor de evaluatie van de methaniseringroutes gekozen.

5.4 SLIBSOORTEN

Bij de batchtesten zijn twee slibsoorten getest op hun geschiktheid voor de methanisering. Dit zijn uitgegist slib en ingedikt (niet gegist) surplusslib, beide afkomstig van de RWZI Land van Cuijk. Beide slibsoorten hebben een drogestofgehalte van ca 6%.

Uiteindelijk is het van belang dat de technologie ook werkt voor niet gegist slib, omdat er bij toepassing van superkritische vergassing geen vergistingsinstallatie meer aanwezig is. Na validatie in kleinschalige batchtesten (zie h 6) is bij de continue test daarom gebruik gemaakt van ingedikt (niet gegist) surplusslib (zie h 7).

6

RESULTATEN BATCHTESTS

6.1 DOEL VAN DE BATCHTESTEN

Batchtesten zijn uitgevoerd om twee onderwerpen te onderzoeken. In de eerste plaats om te zien of het syngas van de superkritische installatie bepaalde componenten bevat zoals koolstofmonoxide of hogere koolwaterstoffen welke toxisch zijn of de methanisering remmen. In de tweede plaats zijn batchtesten uitgevoerd om de geschiktheid van slib te testen als bron van nutriënten voor het methaniseringsproces.

Voorafgaand aan de experimenten zijn eerste conclusies getrokken over de geschiktheid van de beproefde slibsoorten voor de biologische methanisering op basis van gemaakte slibanalyses. Vervolgens zijn de geselecteerde slibsoorten in kleine batchopstellingen getest om de methaanvormingssnelheid vast te stellen.

6.2 OMSCHRIJVING VAN DE BATCHTESTEN

In de batchtesten is 20 ml slib toegevoegd aan een 120 ml serumfles en onder druk gebracht door de introductie van een mengsel van koolstofdioxide en waterstofgas in de ideale verhouding.

FIGUUR 7

SERUM FLESSEN VOOR BATCHTEST



Omdat 4 delen waterstof en 1 deel koolstofdioxide samen reageren tot 1 deel methaan (naast vloeibaar water) daalt de totale druk in de serumflessen tijdens de methanisering. Uit de drukdaling kan worden afgeleid hoeveel methaan is gevormd. Elke test omvat een aantal cycli van drukdaling en weer gas toevoeren om uiteindelijk de totale methaanvormingssnelheid (methane building rate, MBR) vast te stellen.

6.3 GESCHIKTHEID VAN SLIB ALS SUBSTRAAT

Analyses en testen zijn uitgevoerd met de twee geselecteerde slibsoorten, respectievelijk vergist slib en surpluslib van de zuivering Land van Cuijk. Uit de analyses blijkt dat het zwavelgehalte in de onderzochte slibsoorten te laag is voor een optimale werking van de Archea zodat aanvulling wenselijk is.

De volgende tabel toont de methaanvormingssnelheden die zijn vastgesteld in de batchonderzoeken. Elke test is in triplo uitgevoerd. Bij elke test zijn tot 10 cycli van drukreductie en hernieuwde gastoevoer uitgevoerd. Als referentie is een test met gesteriliseerd slib uitgevoerd.

TABEL 6 GEMETEN METHAANFORMINGSSNELHEID MBR IN BATCHTEST (EENHEID: NM³/DAG PER M³ REACTORVOLUME). DEZE WAARDES GELDEN SPECIFIEK VOOR DE UITGEVOERDE MEETMETHODE EN ZIJN DAAROM NIET OVERDRAAGBAAR OP ANDERE - BIJVOORBEELD CONTINU OPERERENDE - SYSTEMEN.

| Uitgegist slib | Surpluslib | Verdund uitgegist slib (1:1) | Verdund surpluslib (1:1) |
|----------------|------------|------------------------------|--------------------------|
| 29 | 26 | 20 | 20 |

Een vergelijking van deze waarden met eerder gemeten methaanvormingssnelheden geeft aan dat beide soorten zeer geschikt zijn voor het methaniseringsproces. Enkel de toevoeging van zwavel als nutriënt en enkele sporenelementen is toereikend.

Omdat bovenstaande MBR waarden niet bruikbaar zijn betrouwbare grondslag voor het uitvoeringsontwerp van een methaniseringsreactor in de praktijk, is het wel nodig om meer langdurig onderzoek uit te voeren in een continue opstelling (de BION Check).

6.4 GESCHIKTHEID VAN SYNGAS VOOR METHANISERING

De batchtesten zijn ook gebruikt om de geschiktheid van het syngas voor methanisering vast te stellen.

De gebruikte gasmengsels zijn speciaal op specificatie gemaakt voor deze experimenten; zie Tabel 5 voor de samenstelling. Aan de gesynthetiseerde gasmengsels is waterstof toegevoegd totdat de verhouding waterstof/koolstofdioxide in het gas 4 werd. Dit is noodzakelijk omdat anders de methaanhoeveelheid die wordt gevormd te gering is om nauwkeurig te kunnen meten. De methaanvormingssnelheid (MBR) wordt afgeleid uit de individuele drukreductiecurves.

Als referentie is een serumfles onderzocht waaraan geen syngas maar enkel waterstof en koolstofdioxide zijn toegevoegd. Ook is een proef met gesteriliseerd slib uitgevoerd. De bepalingen zijn in tweevoud uitgevoerd. Er zijn tot 10 cycli per test uitgevoerd.

De volgende tabel vat de bepaalde methaanvormingssnelheden samen.

TABEL 7

METHAANVORMINGSSNELHEID MBR GEMETEN MET VERSCHILLENDE GASSOORTEN (EENHEID: NM³/DAG PER M³ REACTORVOLUME)

| Surpluslib H ₂ /CO ₂ | Surpluslib met Gas 1 | Surpluslib met Gas 2 |
|--|----------------------|----------------------|
| 16 | 15 | 13 |

De gemeten MBR-waarden zijn gemeten met niet vergist surpluslib. Gasmengsel 2 laat een wat lagere waarde zien dan de overige gasmengsels maar het verschil ligt binnen de grenzen van de gebruikelijke fluctuaties. Een remmend of toxisch effect van gascomponenten in het synthese gas is niet waargenomen.

De resultaten van de deze testen om de methaanvormingssnelheid te meten kunnen niet worden vergeleken met de resultaten van de BION Check-methode die verderop wordt beschreven omdat de omstandigheden verschillen (waterstofconcentratie, menging, overdracht van waterstof naar waterfase, etc.).

De conclusie is dat het syngas geschikt is om gemethaniseerd te worden. De inerte gascomponenten in het syngas die niet deelnemen aan de methanisering kunnen tot een geringe verlaging van de methaanvormingssnelheid leiden door hun negatieve impact op het massatransport, maar zijn niet remmend voor de methanisering

7

RESULTATEN DUURPROEVEN IN DE CONTINUE BION[®] -OPSTELLING

7.1 DOEL EN UITVOERING

MicrobEnergy beschikt over een continu opererende pilot plant. De bioreactor werkt volledig geautomatiseerd en is voorzien van alle noodzakelijke monitor- en analyseapparatuur zoals mass flow controllers en weegmodules. De BiON[®] Check duurproeven leveren de noodzakelijke informatie om een goed technisch ontwerp te maken van de methaniseringsreactor en de gasopwerking.

FIGUUR 8 GEAUTOMATISEERDE PILOT PLANT VOOR BIOLOGISCHE METHANISERING



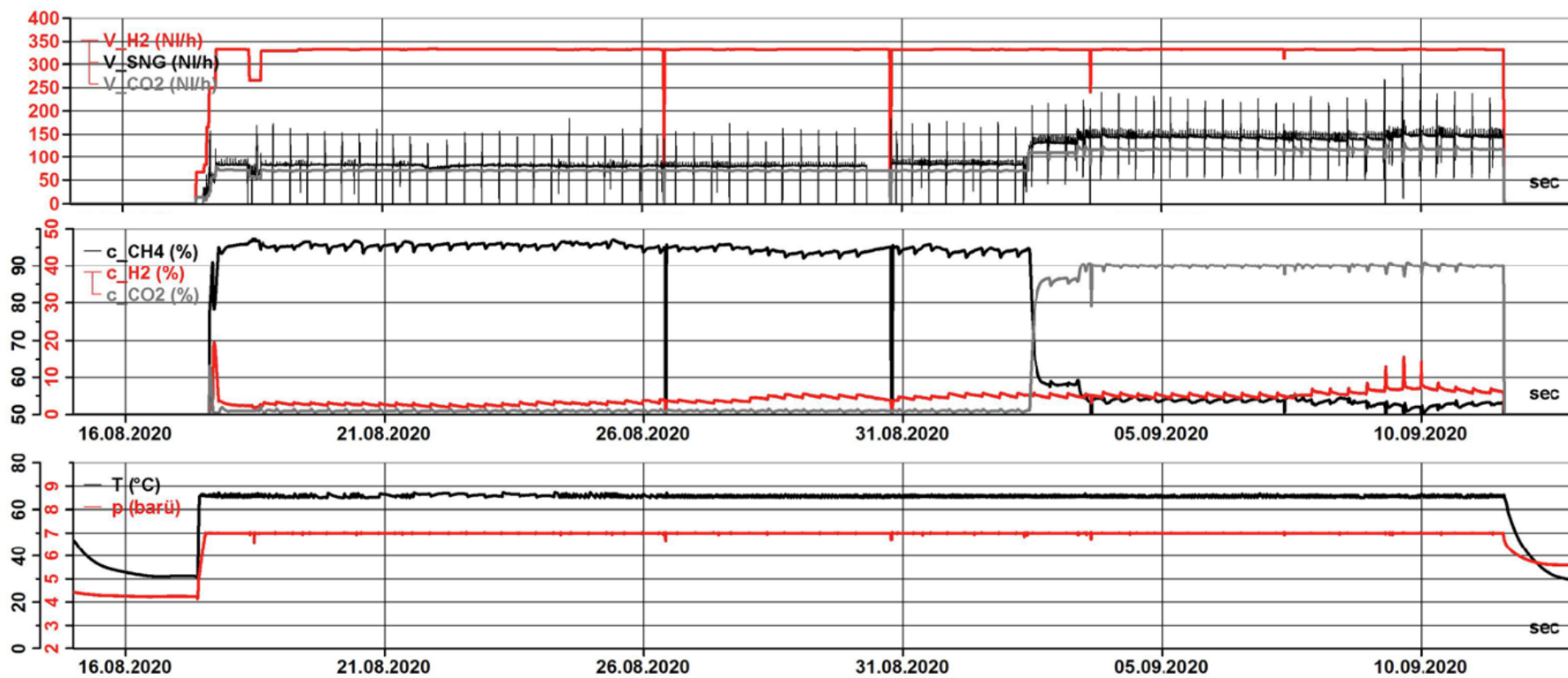
Aan de continue methaniseringsreactor wordt periodiek slib toegevoerd om de uitspoeling van nutriënten te compenseren. Deze uitspoeling treedt op omdat tijdens de methaniseringsreactie gevormd water moet worden afgevoerd, waarmee onbedoeld ook slib en nutriënten worden afgevoerd. Het vers toegevoerde slib is niet bedoeld als entmateriaal omdat de hoge groeisnelheid van de Archea ruimschoots de uitspoeling van Archea compenseert. Het gebruikte slib is surplusslib, aangevoerd uit de RWZI Land van Cuijk. De hoeveelheid additioneel toe te voeren nutriënten en sporenelementen is gering.

Methaan, waterstof en koolstofdioxidegehalten in het productgas worden continue gemeten. Ammonia en waterstofsulfide gehalten worden periodiek gemeten met gasdetectiebuisjes. De resultaten van de online gasmeting waren in goede overeenstemming met waarden die met een gaschromatograaf zijn gemeten. Ook zijn de resultaten van gasanalyses gevalideerd door een analyse bij een extern laboratorium.

7.2 RESULTATEN VAN DE DUURPROEVEN

De experimenten hebben 4 weken geduurd. Onderstaande figuur geeft een overzicht van de complete testperiode in de pilot plant.

FIGUUR 9 BION-CHECK: OVERZICHT TESTPERIODE (SNG = UITGAANDE GASSTROOM, INCL EVT OVERTOLLIG CO₂)



In de eerste periode (12-18 aug) start de methanisering en worden de in te stellen parameters voor de operatie van de bioreactor met surplusslib bepaald.

In de tweede periode (19-aug - 2 sept) is een duurttest uitgevoerd met de ingestelde parameters om een stabiele operatie te verkrijgen waarbij een optimale verhouding van koolstofdioxide en waterstof wordt toegevoerd (AddH₂). De continue toevoer van koolstofdioxide en waterstof start op 17 augustus. De toevoersnelheid daarvan is trapsgewijs opgevoerd. Loogdosering is niet nodig geweest. Het doel van deze testperiode was om een stabiele biologische methanisering te laten zien gedurende een langere periode. Het geproduceerde gas bevatte 94 tot 96% methaan en 2,5 tot 5% waterstof. De lage pH van het surplusslib is opgelopen naar een waarde rond 7 zonder loogdosering.

In de derde periode (2-12 sept) is een overmaat aan koolstofdioxide gedoseerd, overeenkomstig het RECO₂ concept. Hierdoor loopt de koolstofdioxideconcentratie in het productgas na verloop van tijd op naar circa 40 vol-%. Daarbij werd de methaanconcentratie 54 vol.% en het waterstofgehalte 5%, later oplopend naar 7 vol-%. De pH liep na de verhoging van de koolstofdioxidedosering snel terug van 7 naar de oorspronkelijke waarde van 6,2. De pH bleef daarna vrijwel constant tot de laatste dagen van het testprogramma waar de pH zakte tot onder 6,0 en het proces instabiel werd.

Een overzicht van de resultaten bij benadering is hieronder weergegeven.

TABEL 8

VOLUMEDEBIET AAN GASINPUT EN OUTPUT EN MACROSAMENSTELLING TIJDENS DE BION® EXPERIMENTEN

| | Gas input (l/h) | | Gas output (l/h) | Samenstelling (%) | | |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | H ₂ | CO ₂ | Totaal | CO ₂ | CH ₄ | H ₂ |
| periode 1 (AddH ₂) | 330 | 80 | 80 | 0% | 95% | <5% |
| periode 2 (RECO ₂) | 330 | 110 | 150 | 40% | 55% | 5% |

Samenvattend kan worden gezegd dat de biologische methanisering zeer stabiel verloopt als de waterstof en koolstofdioxideconcentraties in optimale hoeveelheden worden toegevoerd. De methanisering werkt ook met een overmaat aan koolstofdioxide, tenminste in de gemeten periode. De indruk bestaat echter dat de processtabiliteit na verloop van tijd enigszins vermindert, hoewel de bioreactor de inhoud buffert rond een pH van 6,2. De methaanvormingssnelheid is in beide perioden vergelijkbaar.

8

DIMENSIONERING VAN EEN METHANISERINGSINSTALLATIE VOOR SYNGAS

8.1 MASSA- EN ENERGIESTROMEN

In deze paragraaf worden de relevante massa- en energiestromen weergegeven voor een praktijkinstallatie voor het methaniseren van syngas. Dit geldt voor beide scenario's AddH₂ en RECO₂. De systeemgrenzen zijn hiervoor gedefinieerd in de blokdiagrammen.

8.2 MASSABALANSEN

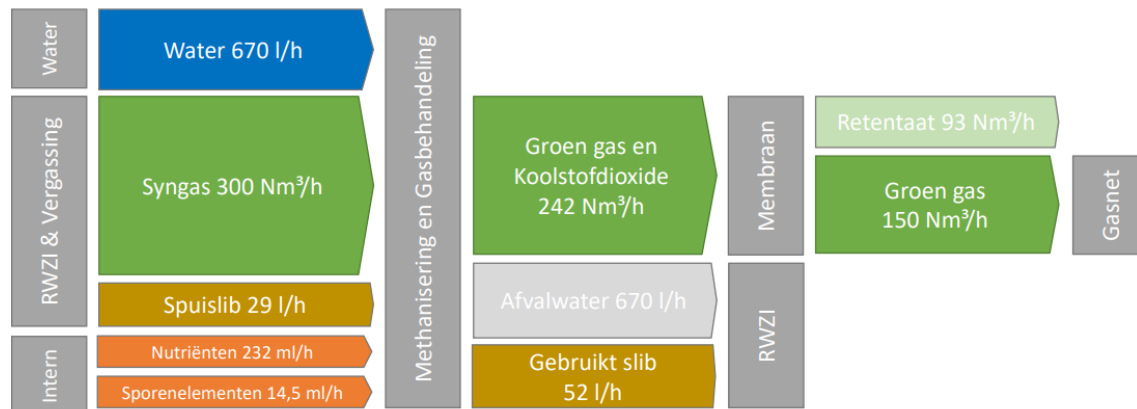
Bij de berekening is uitgegaan van een gemiddelde samenstelling van het ruwe syngas die in onderstaande tabel vermeld is.

TABEL 9 GASSAMENSTELLING SYNGAS

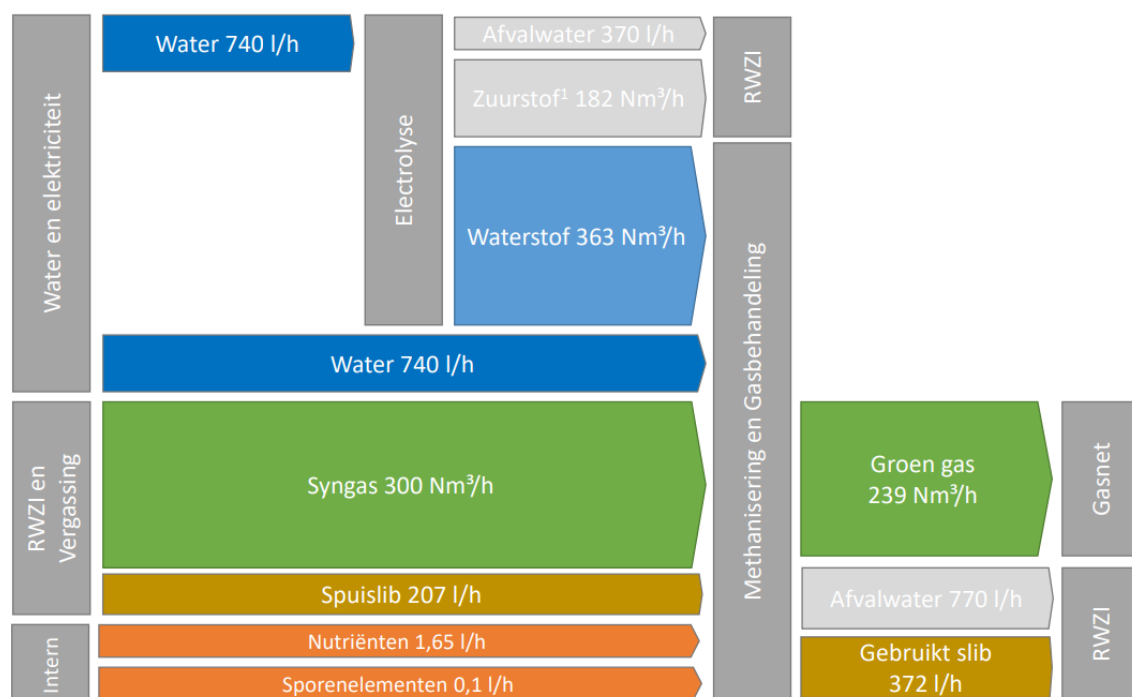
| Parameter | Syngas samenstelling vol% |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Waterstof | 21,0 |
| Koolstofdioxide | 35,3 |
| Methaan | 30,0 |
| Koolmonoxide | 1,5 |
| Etheen | 0,9 |
| Ethaan | 10,5 |
| Propeen | 0,3 |
| Propaan | 0,6 |
| H ₂ :CO ₂ ratio | 0,59 |

De massabalansen voor de scenario's AddH₂ en RECO₂ zijn samengevat in onderstaande figuren. Door de inzet van waterstof stijgt de productie van groen gas met ongeveer 60%. De productie van waterstof via elektrolyse in het AddH₂ scenario gaat gepaard met een productie aan zuurstof. In de situatie als in Figuur 11 wordt door elektrolyse aanvullend circa 180 Nm³/h zuurstof geproduceerd. Hiervoor is geen benutting in de methaniseringsinstallatie, maar er zijn wellicht situaties denkbaar in de praktijk waar het beschikbare zuurstof kan worden ingezet, bijvoorbeeld ter aanvulling van de zuurstoftoevoer bij beluchters.

FIGUUR 10 MASSABALANS VOOR HET RECO2 CONCEPT



FIGUUR 11 MASSABALANS VOOR HET ADDH2 CONCEPT



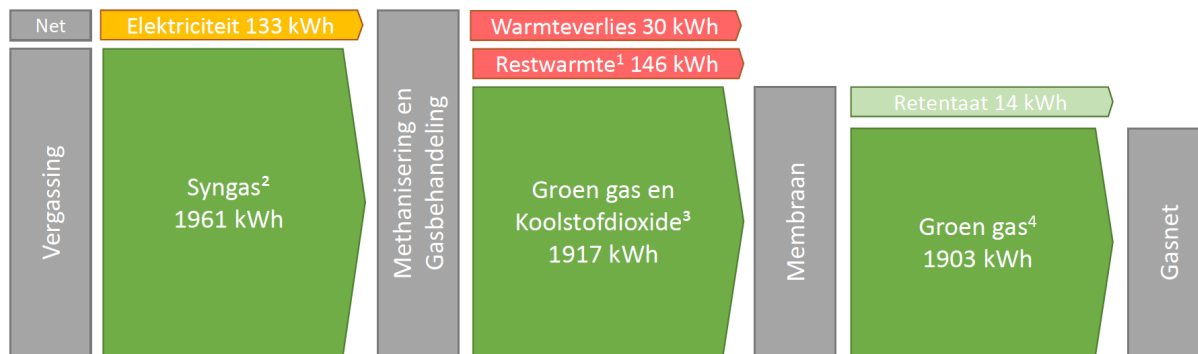
¹Theoretisch mogelijk

8.3 ENERGIEBALANSEN

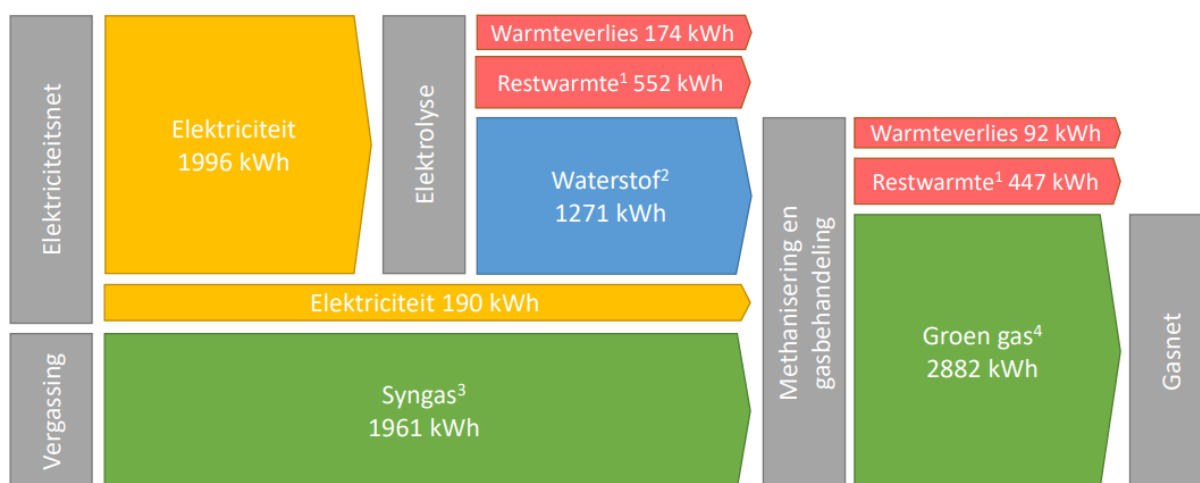
De energiebalansen in beide scenario's zijn in onderstaande figuren samengevat. In het AddH2 concept is een vermogen van ca. 2 MW_{el} nodig voor de elektrolyser. De elektriciteitsbehoefte van het RECO2 scenario is daarom aanmerkelijk lager.

De elektrolyser en de methaniseringsinstallatie produceren beiden restwarmte. Er is van uitgegaan dat restwarmte met een temperatuur boven de 55 °C nuttig kan worden toegepast, meer laagwaardige warmte niet.

FIGUUR 12 ENERGIESTROMEN (UURBASIS) IN HET RECO2 SCENARIO

¹Bij temperatuurniveau 50-55 °C²Syngas: HHV is 6,53 kWh/Nm³ bij 25°C en 101,325 kPa³Groen gas en Koolstofdioxide: HHV is 7,92 kWh/Nm³ at 25°C and 101,325 kPa excl. LPG dosering⁴Groen gas: HHV is 12,65 kWh/Nm³ at 25°C and 101,325 kPa excl. LPG dosering

FIGUUR 13 ENERGIESTROMEN (UURBASIS) IN HET ADDH2 CONCEPT

¹Bij temperatuurniveau 50-55 °C²Waterstof: HHV 3,5 kWh/Nm³ bij 25°C en 101,325 kPa³Syngas: HHV is 6,53 kWh/Nm³ bij 25°C en 101,325 kPa⁴Groen gas: HHV is 12,08 kWh/Nm³ at 25°C and 101,325 kPa excl. LPG dosering

Het energierendementen van beide routes is in de tabellen hieronder weergegeven. De verschillen worden veroorzaakt door het beperkte rendement van de waterstofproductie (ongeveer 60%) en de mogelijkheid om restwarmte al dan niet te benutten. Verder wordt er in het AddH2 concept met de waterstofproductie ook zuurstof gevormd die mogelijk kan worden benut.

TABEL 10 ENERGETISCH RENDEMENT VAN DE ADDH2 EN RECO2 CONCEPTEN

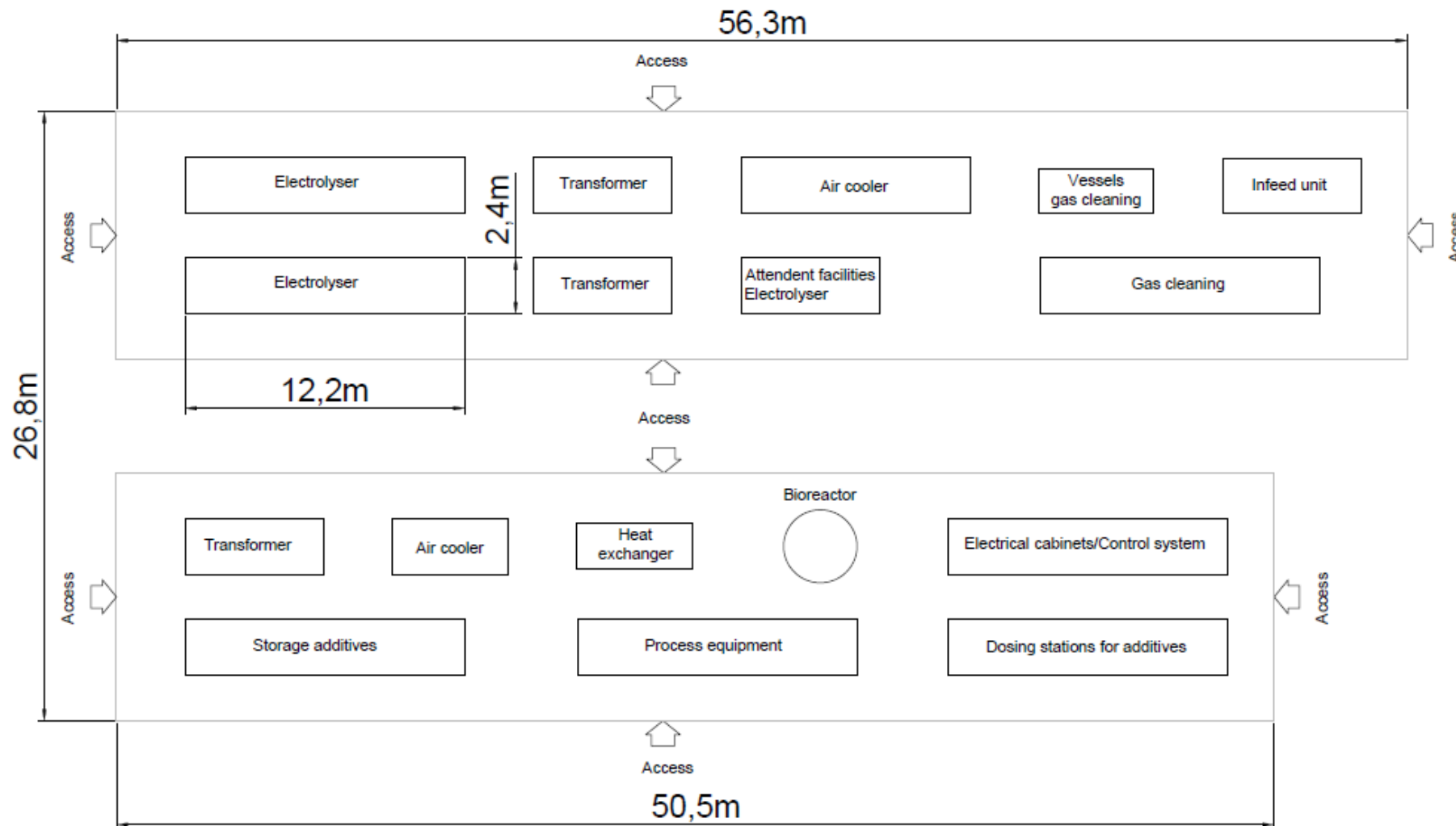
| | ADDH2 | RECO2 |
|----------------------------------|-------|-------|
| Rendement met warmtebenutting | 94% | 98% |
| Rendement zonder warmtebenutting | 69% | 91% |

8.4 PLANT LAY-OUT EN RUIMTEBESLAG

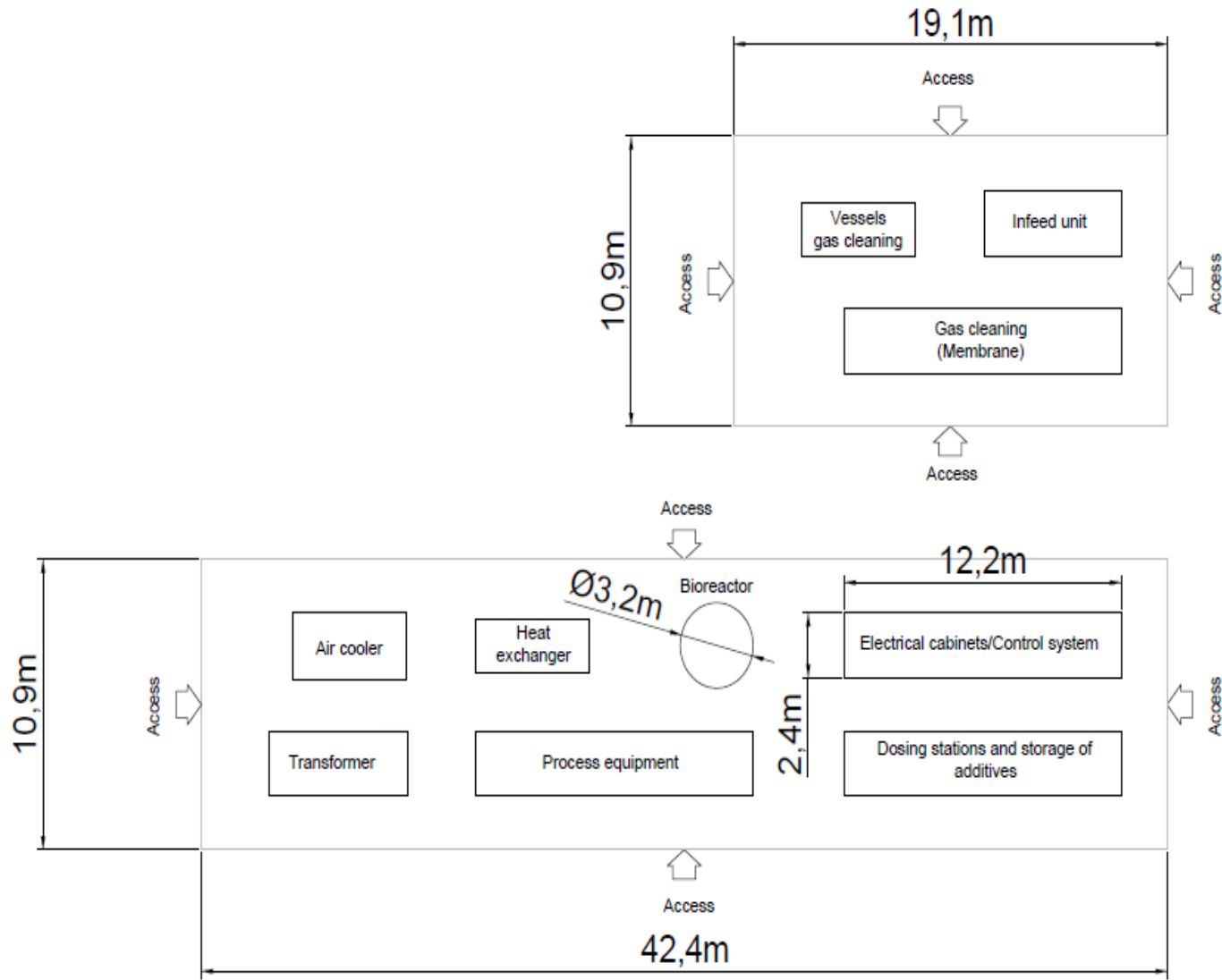
Voor de apparatuur in beide concepten is een lay-out opgesteld om een indruk te krijgen van het ruimtebeslag, zie de figuren hieronder. Het benodigde oppervlak voor de AddH2 route bedraagt ongeveer 1500 m². Voor de RECO2 route bedraagt het benodigd oppervlak ongeveer 675 m².

28

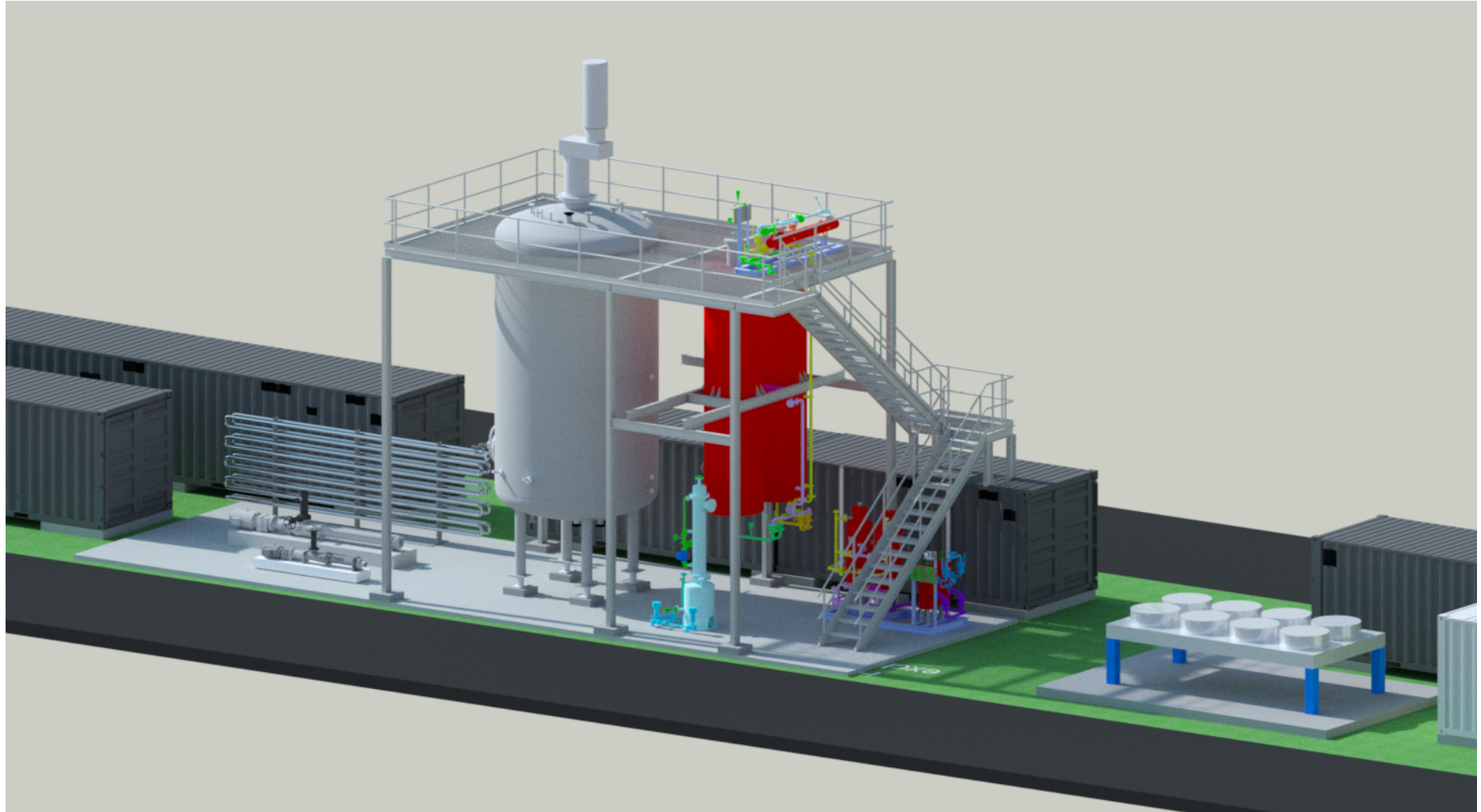
FIGUUR 14 PLANT LAY-OUT ADDH2 ROUTE



FIGUUR 15 PLANT LAY-OUT VOOR HET RECO2 CONCEPT



FIGUUR 16 3D-VISUALISATIE VAN DE BIOREACTOR SET UP



9

BEREIKTE GASKWALITEIT EN EISEN VOOR INJECTIE IN HET GASNET

Dit hoofdstuk geeft een vergelijking van de verwachte samenstelling van het groen gas zoals dat na de methanisering aan het gasnet geleverd kan worden en de daaraan in Nederland gestelde kwaliteitseisen. Het transportnet voor aardgas in Nederland (beheerd door Gasunie) is schematisch weergegeven in Figuur 17. De kleuren geven de verschillende drukniveaus en samenstellingen weer (Groningen gas (G) en hoogcalorisch (H)):

FIGUUR 17

OVERZICHT VAN ALLE LEIDINGEN IN BEHEER DOOR N.V. NEDERLANDSE GASUNIE IN NEDERLAND (NEDERLANDSE GASUNIE [17])



- Blauw: Regionaal Transport Leiding (RTL) met maximaal 40 bar druk op basis van G-gas, m.u.v. een deel van de Rotterdamse haven en het Chemelot terrein bij Geleen waarbij H-gas wordt gebruikt.
- Bruin: HTL leiding, 66,2 bar (g)
- Geel: HTL leiding, 66,2 - 76 bar (g)
- Rood: HTL leiding, meer dan 76 bar (g).
- Groen: minder dan 40 bar. Dit is enkel het "Waalhaven" systeem in Rotterdam, met een samenstelling die ongeveer overeenkomt met H-gas.

Om de mogelijkheden voor invoeding van groen gas in het aardgasnet te beoordelen, zijn de transportcapaciteit en het drukk niveau van het invoedpunt relevant. Bij een hoger drukk niveau is het mogelijk om een groter volume in te voeden, echter er is ook meer energie nodig om het geproduceerde gas op een hoger drukk niveau in te voeden. Daarnaast gelden afhankelijk van drukk niveau en type gasleiding waarop wordt ingevoerd verschillende eisen aan de samenstelling van het groen gas.

In dit onderzoek is de verwachte samenstelling van het groen gas na methanisering afgeleid van de samenstelling van het ruwe syngas, de eisen die het methaniseringproces zelf aan de gassamenstelling stelt, de gemeten omzetting in de methaniseringreactor en de resultaten die verwacht mogen worden van een kosteneffectieve gasopwerking. De resultaten zijn samen met de technische eisen samengevat in onderstaande tabellen voor beide routes, AddH₂ en RECO₂.

Uit de tabellen blijkt dat dat de berekende samenstellingseisen niet zonder meer voldoen aan alle gestelde eisen in de richtlijnen voor gasinjectie. De gearceerde eisen vereisen specifieke aandacht, dit betreft met name het aantal propaanequivalenten, het koolstofmonoxidegehalte en de waterstofconcentratie. Dat betekent dat in concrete situaties moet worden gezocht naar aanpassingen in het productieproces, de nabehandeling van het gas of mogelijke verruiming van kwaliteitseisen.

Tijdens het proces van superkritische vergassing hebben de procesomstandigheden een belangrijke invloed op de gassamenstelling. Verwacht wordt dat door optimalisatie van de procescondities het aandeel CO en hogere koolwaterstoffen kan worden verlaagd. Onderzocht moet worden of daarmee kan worden voldaan aan de eisen voor invoeding in de praktijk, of dat er aanvullende maatregelen nodig zijn.

Ten aanzien van de te hoge waterstofconcentratie kan worden onderzocht in welke mate dit een probleem vormt voor het lokale gasnet. Verwacht wordt dat de maximaal toelaatbare concentratie waterstof voor invoeding in het gasnet in de toekomst kan worden verruimd.

TABEL 11 VERGELIJKING VAN DE VERWACHTE SAMENSTELLING VAN HET GROEN GAS IN HET ADDH2 CONCEPT MET DE NEDERLANDSE EISEN VOOR INJECTIE IN HET NET [2]. DE EIS VOOR CO (~2900 MG/M³) KOMT OVEREEN MET 0,23 VOL-%

| Parameter | Eenheid | Groen gas (nominale waarde) | G-Gas | | | H-Gas | | |
|-------------------------|---|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | RNB | RTL | HTL | RNB | RTL | HTL |
| Wobbe-index | MJ/m ³ (n) | 55,9 | 43,46 - 44,41 | 43,46 - 44,41 | 43,46 - 44,41 | 49,9 - 55,7 | 49,9 - 55,7 | 49,9 - 55,7 |
| Dauwpunt | °C @ bar(a) | ≤ -10 @ 8 | ≤ -10 @ 8 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 |
| Propaanequivalent | Mol-% | 8,3 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | | | |
| Gascondensaat | mg/m ³ (n) @ -3°C | ≤ 5 | ≤ 80 | ≤ 80 | ≤ 80 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Temperatuur | °C | 5 - 20 | 5 - 20 | 5 - 30 | 5 - 30 | 5 - 30 | 5 - 30 | 5 - 30 |
| Zuurstof | Mol-% | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,0005 | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,0005 |
| Koolstofdioxide | Mol-% | ≤ 1 | ≤ 10,35 | ≤ 10,35 | ≤ 3 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 |
| Koolstofmonoxide | mg/m ³ (n) | 1,9 vol. % | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 |
| Organisch chloor | mg Cl/m ³ (n) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Organisch fluoride | mg F/m ³ (n) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Waterstof | Mol-% | 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 |
| Stof | mg/m ³ (n) | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 |
| Pathogene microben | aantal/m ³ (n) | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 |
| Anorganisch zwavel | H ₂ S+COS, (mg S/m ³ (n)) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Alkylthiolen | mg S/m ³ (n) | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 |
| Zwavel, voor odorisatie | mg S/m ³ (n) | ≤ 5,5 | ≤ 5,5 | ≤ 5,5 | ≤ 5,5 | ≤ 30 | ≤ 30 | ≤ 30 |
| Zwavel na odorisatie | mg S/m ³ (n) | ≤ 16,5 | ≤ 16,5 | ≤ 16,5 | ≤ 16,5 | ≤ 41 | ≤ 41 | ≤ 41 |
| Tetrahydrothiopheen | odorant, mg THT/m ³ (n) | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 0 |
| Silicium | mg Si/m ³ (n) | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 |

TABEL 12 VERGELIJKING VAN DE VERWACHTE SAMENSTELLING VAN HET GROEN GAS IN HET RECO2 CONCEPT MET DE NEDERLANDSE EISEN VOOR INJECTIE IN HET NET [2]. DE EIS VOOR CO (<2900 MG/M³) KOMT OVEREEN MET 0,23 VOL.%

| Parameter | Eenheid | Groen gas (nominale waarde) | G-Gas | | | H-Gas | | |
|----------------------|--|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | RNB | RTL | HTL | RNB | RTL | HTL |
| Wobbe-index | MJ/m ³ (n) | 55,4 | 43,46 - 44,41 | 43,46 - 44,41 | 43,46 - 44,41 | 49,9 - 55,7 | 49,9 - 55,7 | 49,9 - 55,7 |
| Dauwpunt | °C @ bar(a) | ≤ -10 @ 8 | ≤ -10 @ 8 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 | ≤ -8 @ 70 |
| Propaanequiv. | Mol-% | 13,2 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | | | |
| Gascondensaat | mg/m ³ (n) @ -3°C | ≤ 5 | ≤ 80 | ≤ 80 | ≤ 80 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Temperatuur | °C | 5 - 20 | 5 - 20 | 5 - 30 | 5 - 30 | 5 - 30 | 5 - 30 | 5 - 30 |
| Zuurstof | Mol-% | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,0005 | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,0005 |
| Koolstofdioxide | Mol-% | 2,5 | ≤ 10,35 | ≤ 10,35 | ≤ 3 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 | ≤ 2,5 |
| Koolstofmonoxide | mg/m ³ (n) | 3 vol. % | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 | ≤ 2900 |
| Organisch chloor | mg Cl/m ³ (n) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Organisch fluoride | mg F/m ³ (n) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Waterstof | Mol-% | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,5 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 |
| Stof | mg/m ³ (n) | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 | ≤ 100 |
| Pathogene microben | aantal/m ³ (n) | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 | ≤ 500 |
| Anorganisch zwavel | H ₂ S+CO ₂ , (mg S/m ³ (n)) | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 | ≤ 5 |
| Alkylthiolen | mg S/m ³ (n) | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 | ≤ 6 |
| Zwavel voor odoris. | mg S/m ³ (n) | ≤ 5,5 | ≤ 5,5 | ≤ 5,5 | ≤ 5,5 | ≤ 30 | ≤ 30 | ≤ 30 |
| Zwavel na odorisatie | mg S/m ³ (n) | ≤ 16,5 | ≤ 16,5 | ≤ 16,5 | ≤ 16,5 | ≤ 41 | ≤ 41 | ≤ 41 |
| Tetrahydro-thiopheen | odorant, mg THT/m ³ (n) | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 10 - 40 | 0 |
| Silicium | mg Si/m ³ (n) | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 | ≤ 0,1 |

10

ECONOMISCHE ASPECTEN

10.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de kosten uitgewerkt van de methanisering van syngas van superkritische vergassing, uitgedrukt in kapitaalkosten en operationele kosten. De nauwkeurigheid van de berekeningen is $\pm 20\%$.

10.2 KAPITAALKOSTEN

De totale investering voor de methanisering in een turn key op te leveren installatie bestaat uit twee componenten: de eventuele elektrolyser (in het geval van de AddH2 variant) en de methanisering inclusief gasreiniging. In beide gevallen wordt uitgegaan van een plant die is opgebouwd uit containerunits voor buitenopstelling.

De 2 MW elektrolyser is een functionele eenheid uitgerust met middenspanningstransformatoren, de stacks, componenten voor water en gasbehandeling en relevante bijkomende apparatuur. Deze investering wordt begroot op 2,97 mio Euro. De onderdelen methanisering en gasopwerking bestaan uit een volledig uitgeruste methaniseringsreactor (50 m³ reactorinhoud) met complete gasopwerkingstrein. In het geval van de AddH2 variant is deze investering begroot op 4,0 mio Euro. Dit resulteert in een totale investering van 6,97 mio Euro. In deze kostenopstelling zijn begrepen de bouw, de levering, de opbouw ter plaatse en de inbedrijfstelling. Bij de berekening van de kapitaalslasten wordt uitgegaan van 15 jaar aflossing tegen 3% rente. Op basis daarvan zijn de jaarlijkse kapitaalslasten begroot op 570.000 Euro.

Op vergelijkbare wijze en met dezelfde uitgangspunten voor rente en afschrijvingstermijn zijn de kosten voor de ReCO2 variant uitgerekend, die bestaat uit een methaniseringsplant en een complete gasopwerkeenheid inclusief koolstofdioxideverwijdering. Deze is begroot op 4,2 miljoen Euro. In deze kosten zijn begrepen de bouw, de levering, de opbouw ter plaatse en de inbedrijfstelling. Bij dezelfde financieringsvoorwaarden zijn de kapitaalslasten 343.000 Euro per jaar.

De kosten zijn berekend op basis van een turn key-levering. Niet inbegrepen zijn kosten voor het gereedmaken van de locatie, bouwkundige voorbereiding en het benodigde station voor de invoeding van het gas in het net. Evenmin zijn de BTW en kosten voor vergunningverlening inbegrepen.

TABEL 13

INVESTERINGSKOSTEN EN KAPITAALS LASTEN VOOR DE BEIDE VARIANTEN (EURO EX BTW)

| | AddH2 | ReCO2 |
|-------------------------------------|-----------|-----------|
| Elektrolyser | 2.970.000 | |
| Methanisering en gasopwerking | 4.000.000 | 4.200.000 |
| Totale investering | 6.970.000 | 4.200.000 |
| Kapitaalslasten (15 jaar, 3% rente) | 570.000 | 343.000 |

10.3 OPERATIONELE KOSTEN

In de operationele kosten zijn alle uitgaven begrepen die zijn gerelateerd aan het bedrijven van de plant en de gasopwerking. Kostenelementen van de superkritische vergassing zelf zijn niet inbegrepen. De operationele kosten omvatten zowel de vaste jaarlijkse kosten voor de instandhouding van de installatie (bijv. kalibraties, staf en jaarlijkse inspecties) als de variabele kosten van hulpstoffen en energie die verbonden zijn met het aantal operationele uren. In onderstaande kostenopstelling is uitgegaan van 8.000 operationele uren per jaar.

TABEL 14 OPERATIONELE KOSTEN VAN METHANISERING VIA DE ADDH2 ROUTE

| Component | Euro/jaar |
|---|------------------|
| Elektriciteit (8000 uur per jaar; 12 Cent/kWh) | 1.920.000 |
| Personeel incl. O & M | 63.000 |
| Water (0,79 EUR/m ³) | 5.000 |
| Verzekering (4 ‰ van investering) | 12.000 |
| Totale OPEX elektrolyse | 2.000.000 |
| Elektriciteit (8000 uur/jaar; 12 Cent/kWh) | 182.000 |
| Personeel incl. O & M | 107.000 |
| Water (0,79 EUR/m ³) | 5.000 |
| Chemicaliën incl. actieve kool | 59.000 |
| Verzekering (4 ‰ van investering) | 16.000 |
| Totale OPEX methanisering en gasopwerking | 369.000 |
| Totale OPEX elektrolyse, methanisering en gasopwerking | 2.369.000 |

TABEL 15 OPERATIONELE KOSTEN VAN METHANISERING VIA DE RECO2 ROUTE

| Component | Euro/jaar |
|--|----------------|
| Elektriciteit (8000 uur per jaar; 12 Cent/kWh) | 128.000 |
| Personeel incl. O & M | 107.000 |
| Water (0,79 EUR/m ³) | 4.000 |
| Chemicaliën incl. actieve kool | 18.000 |
| Verzekering (4 ‰ van investering) | 17.000 |
| Totale OPEX methanisering en gasopwerking | 274.000 |

10.4 PRODUCTIEKOSTEN EN OPBRENGSTEN GROEN GAS

Hieronder zijn de totale jaarlijkse kosten samengevat voor de beide methaniseringroutes voor de verwerking van 2 MW syngas en 8.000 draaiuren per jaar. Uit deze gegevens blijkt dat de specifieke kosten van methanisering in de variant RECO2 aanzienlijk lager zijn dan in de AddH2 variant, echter het productievolume is ook aanzienlijk lager.

In de tabel zijn de kosten van alleen de methaniseringstap vergeleken met de opbrengsten, uitgedrukt als het basisbedrag voor groen gas via vergassing in de SDE+ regeling voor 2020: 0,073 Euro/kWh[13]. Het basisbedrag kan worden beschouwd als de typische optelsom van invoedvergoeding en subsidie. Een andere opbrengst wordt gevormd door de vermeden kosten van slibafvoer.

De slibproductie van de RWZI die als uitgangspunt is gekozen met een capaciteit van 200.000 IE bedraagt ongeveer 2.900 ton droge stof per jaar. De kosten van slibverwerking van RWZI's lopen uiteen, maar afzetkosten in orde van grootte 80 – 100 Euro/ton slibkoek (ca 400 Euro/ton ds) zijn gangbaar. De besparing op jaarbasis is daarmee ca 1.2 miljoen Euro, omgerekend ca. 0,05 of 0,08 Euro/kWh in resp. het AddH2- en het RECO2- scenario. Dit is onvoldoende om

de AddH2 variant rendabel te maken; voor de RECO2 blijft er 0,11 Euro/kWh syngas over om de vergassingstechnologie rendabel te maken.

TABEL 16 TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN EN OPBRENGSTEN METHANISERINGSROUTES

| | AddH2 | RECO2 |
|--|------------|------------|
| CAPEX methanisering (Euro) | 570.000 | 343.000 |
| Totale OPEX kosten methanisering incl elektriciteit (Euro) | 2.369.000 | 274.000 |
| Totale kosten (Euro) | 2.939.000 | 617.000 |
| Groen gas productie (Nm ³ /jaar) | 1.908.000 | 1.203.600 |
| Groen gas productie (kWh) | 23.048.640 | 15.225.540 |
| Methaniseringskosten (Euro/Nm ³ groen gas) | 1,54 | 0,51 |
| Methaniseringskosten (Euro/kWh groen gas) | 0,13 | 0,04 |
| Vergoeding als basisbedrag groen gas SDE++ (Euro/kWh) | 0,073 | 0,073 |
| Besparing slibverwerkingskosten (Euro/kWh) | 0,05 | 0,08 |
| Resterende maximale kostprijs syngas (Euro/kWh) | -0,01 | 0,11 |

10.5 GEVOELIGHEIDSANALYSE

Bovenstaande berekeningen zijn gebaseerd op inschattingen van typische opbrengsten en kosten welke in de praktijk aanzienlijk uiteen kunnen lopen; daarom is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

De resultaten voor het AddH2-scenario zijn samengevat in onderstaande Tabel 17 die laat zien hoe de kosten van methanisering afhankelijk zijn van variaties in de prijs van de waterstof en de productiekosten van de superkritische slibvergassing. Daarbij wordt 0,3-0,4 Euro/Nm³ als typische productiekosten voor syngas aangenomen. In de praktijk kunnen deze kosten aanzienlijk variëren afhankelijk van de lokale omstandigheden en gekozen technologie.

TABEL 17 KOSTEN VAN METHANISERING (EUR/KWH) IN HET ADDH2 SCENARIO, AFHANKELIJK VAN DE KOSTEN VAN SYNGASPRODUCTIE EN DE WATERSTOFFPRIJS. DE ROOD OMKADERDE WAARDES IN DE TABELLEN REFLECTEREN DE UITGANGSPUNTEN IN DEZE STUDIE. HET "GROENE" GEDEELTE LINKSBOVEN DE BLAUWE LIJN GEEFT HET GEBIED AAN WAARIN ER SPRAKE ZOU ZIJN VAN EEN POSITIEVE BUSINESS CASE

| | | Hydrogen [EUR/kWh] | | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,24 |
| Syngas in [EUR/Nm ³] | 0,00 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,14 |
| | 0,10 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,15 |
| | 0,20 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 |
| | 0,30 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,17 |
| | 0,40 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,18 |
| | 0,50 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,19 |
| | 0,60 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,20 |

Tabel 18 laat de afhankelijkheid zien van de investeringskosten in de methaniseringsplant en de waterstofprijs. De optelsom van opbrengsten uit de SDE++-regeling en de vermeden slibverwerkingskosten bedraagt circa 0,12 €/kWh.

TABEL 18 KOSTEN VAN METHANISERING (EUR/KWH) IN HET ADDH2 SCENARIO, AFHANKELIJK VAN DE BENODIGDE INVESTERING EN DE WATERSTOFPRIJS. DE ROOD OMKADERDE WAARDES IN DE TABELLEN REFLECTEREN DE UITGANGSPUNTEN IN DEZE STUDIE. HET "GROENE" GEDEELTE LINKSBOVEN DE BLAUWE LIJN GEEFT HET GEBIED AAN WAARIN ER SPRAKE IS VAN EEN POSITIEVE BUSINESS CASE

| | | Hydrogen [EUR/kWh] | | | | | | | |
|----------------|-----------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,24 |
| CAPEX in [EUR] | 450.000 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,17 |
| | 1.125.000 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,18 |
| | 1.800.000 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,18 |
| | 2.475.000 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,18 |
| | 3.150.000 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,17 | 0,18 |
| | 3.825.000 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,17 | 0,18 |
| | 4.500.000 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,19 |

Duidelijk in het oog springt de grote afhankelijkheid van de waterstofprijs, en daarom ook van de elektriciteitsprijs wanneer de waterstof lokaal wordt geproduceerd met een elektrolyser. Een waterstofprijs lager dan ongeveer 0,15 EUR/kWh (6 Euro/kg) is gewenst om de methanisering via de AddH2-route aantrekkelijk te maken. Wordt rekening gehouden met de kosten van slibvergassing dan is een waterstofprijs van minder dan 0,10 EUR/kWh (4 Euro/kg) noodzakelijk.

Tabel 19 geeft tenslotte de gevoeligheidsanalyse weer voor de productiekosten van syngas en de investeringshoogte in de RECO2-variant. Het prijsverschil tussen AddH2 en RECO2-scenario bevestigt de grote invloed van de (productie)kosten van waterstof. In hoofdstuk 13 worden een aantal concrete situaties beschreven waarbij methanisering een rol kan spelen op RWZI's.

TABEL 19 KOSTEN VAN METHANISERING (EUR/KWH) IN HET RECO2 SCENARIO, AFHANKELIJK VAN DE KOSTEN VAN SYNGASPRODUCTIE EN DE HOOGTE VAN DE INVESTERING. DE ROOD OMKADERDE WAARDES IN DE TABELLEN REFLECTEREN DE UITGANGSPUNTEN IN DEZE STUDIE. HET "GROENE" GEDEELTE LINKSBOVEN DE BLAUWE LIJN GEEFT HET GEBIED AAN WAARIN ER SPRAKE IS VAN EEN POSITIEVE BUSINESS CASE

| | | CAPEX in [EUR] | | | | | | | |
|----------------------------------|------|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 300.000 | 900.000 | 1.500.000 | 2.100.000 | 2.700.000 | 3.300.000 | 3.900.000 | 4.500.000 |
| Syngas in [EUR/Nm ³] | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| | 0,10 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 |
| | 0,20 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |
| | 0,30 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,09 |
| | 0,40 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,11 |
| | 0,50 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,12 |
| | 0,60 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,14 |

11

INTEGRALE ANALYSE VAN VOORDELEN EN NADELEN VAN ADDH₂ EN RECO₂

In dit hoofdstuk wordt een integrale analyse gemaakt van de verschillende voordelen en nadelen van beide varianten, waarbij niet alleen wordt gekeken naar kosten en de bereikte productiecapaciteit maar ook naar andere, meer kwalitatieve factoren. Op basis hiervan kan een meer integrale afweging worden gemaakt.

11.1 PRODUCTIEKOSTEN

Bij de financiële evaluatie blijkt het RECO₂ concept duidelijke voordelen te hebben waar het gaat om de hoogte van de investering en de operationele kosten per m³ geproduceerd groen gas.

11.2 GASCOMPONENTEN MET REMMENDE WERKING OP DE METHANISERING

Het syngas bevat een aantal componenten waarvan bekend is dat ze mogelijk remmend kunnen werken op het proces van methanisering, zoals koolstofmonoxide en hogere koolwaterstoffen. In het AddH₂ proces wordt syngas verdund met een grotere hoeveelheid waterstof dan in de RECO₂-variant, waardoor het remmende effect hier minder snel optreedt. Storende componenten in ruw syngas lijken daarom minder invloed te hebben in de AddH₂ variant dan in de RECO₂ variant.

11.3 COMPATIBILITEIT MET DE EISEN VOOR INVOEDING

Het groen gas geproduceerd in de AddH₂ route voldoet op meer punten aan de technische eisen voor invoeding in het gasnet dan het RECO₂ gas. De oorzaak is dat het aandeel methaan in dit gas hoger is dan bij RECO₂ waardoor storende componenten een kleinere invloed hebben. Aan de eisen voor invoeding kan daardoor gemakkelijker en met een hogere betrouwbaarheid worden voldaan.

11.4 STABILITEIT VAN HET BIOLOGISCHE PROCES

De stabiliteit van het proces is afhankelijk van de procesomstandigheden. De samenstelling van het gas heeft hierop invloed. Bij de experimenten in de BION reactor is gebleken dat de methanisering stabiel verloopt wanneer de molverhouding van waterstof en koolstofdioxide ratio optimaal is. Onder de condities van het RECO₂ concept is de methanisering mogelijk maar minder stabiel.

11.5 TOTAAL-PRODUCTIEVOLUME

Groen gas als energiedrager kan een rol spelen bij een efficiënte verduurzaming van de energievoorziening in onze samenleving. Deze bijdrage is groter bij een hogere productie. Dit is het geval in het AddH2 concept omdat daarbij alle koolstofdioxide wordt omgezet in methaan. Om dit mogelijk te maken dient wel waterstof uit hernieuwbare herkomst beschikbaar te komen.

11.6 ENERGETISCH CONVERSIERENDEMENT

Het energetisch conversierendement geeft weer hoeveel van de gebruikte energie wordt omgezet naar groen gas of bruikbare surplus warmte. De gedane berekeningen laten weinig verschil tussen beide varianten zien indien de restwarmte nuttig kan worden ingezet.

11.7 BESCHIKBAARHEID VAN TECHNISCHE VOORZIENINGEN

Een aantal technische voorzieningen zijn vereist om methanisering op een bepaalde locatie te kunnen realiseren. Dit betreft o.a. voldoende elektriciteit, waterstof, water en een invoedingspunt voor groen gas. Deze factoren kunnen per locatie sterk verschillen. Het RECO2 proces is hierin wat meer onafhankelijk vanwege de geringere behoefte aan (groene) stroom of waterstof.

11.8 RUIMTEBESLAG

Voor de toepassing op een waterzuiveringsinstallatie wordt het ruimtebeslag van de benodigde installatie niet of nauwelijks relevant geacht. Beide typen proces kunnen worden opgebouwd uit een aantal containers voor buitenopstelling. De set-up voor de methanisering en de gasopwerking is voor beide varianten vergelijkbaar. Het ruimtebeslag van de RECO2 variant (675 m²) is lager dan dat van AddH2 (met 1500 m²) door het achterwege blijven van een elektrolyser unit.

11.9 VRIJKOMENDE BROEIKASGASSEN

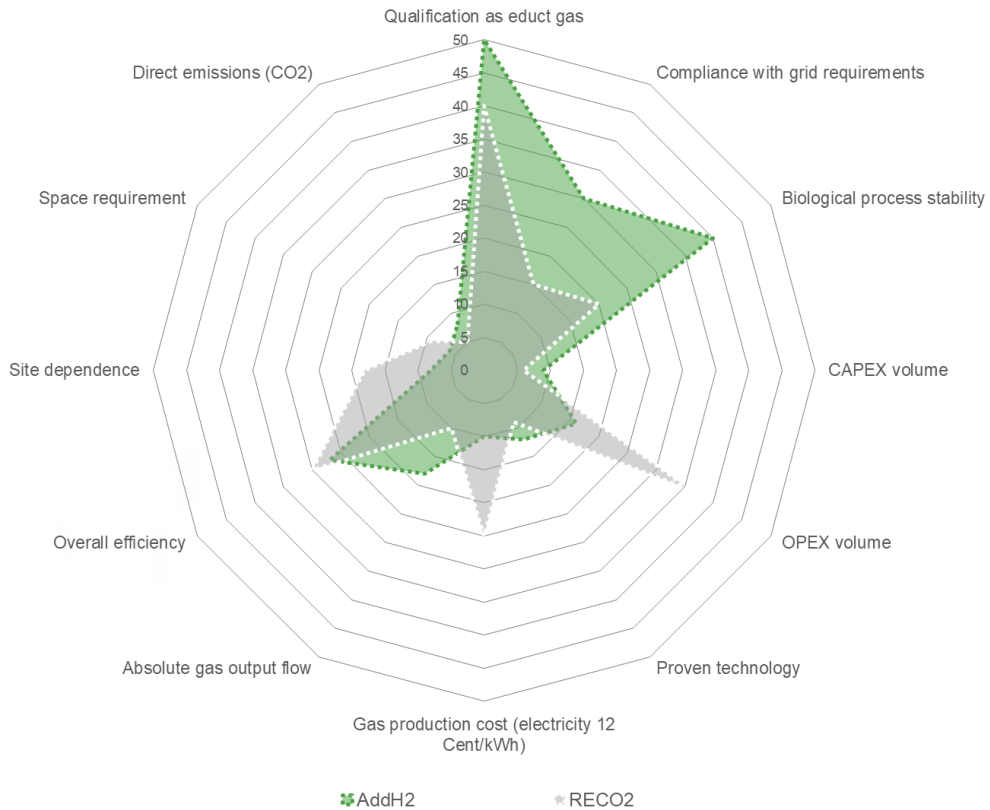
Gassen als koolstofdioxide, methaan of langere koolwaterstoffen zijn broeikasgassen. Onder normale omstandigheden worden dergelijke gassen bij toepassing van de AddH2 variant vrijwel niet uitgestoten. Het RECO2 concept vereist een efficiënte koolstofdioxideverwijderingstechnologie om het verlies van methaan of calorierijk gas te minimaliseren. Bij de RECO2 variant wordt de koolstofdioxide afgevangen en kan ze worden hergebruikt.

11.10 OVERZICHT / INTEGRALE AFWEGING

De volgende figuur geeft een visueel overzicht van de besproken criteria. Door de toevoeging van waterstof tot de ideale molverhouding met koolstofdioxide wordt het AddH2 concept gekenmerkt door een betere processtabiliteit met een hogere opbrengst dan de ReCO2 variant. Ook wordt beter voldaan aan de technische eisen voor invoeding in het gasnet. Afhankelijk van de werkelijke samenstelling van het syngas dat de superkritische vergasser produceert zullen in beide concepten bijstellingen aan de gassamenstelling moeten plaatsvinden. Deze betreffen vooral de Wobbe-index en het gehalte aan propaanequivalenten. De noodzaak tot aanpassingen is bij de AddH2 variant minder aanwezig dan bij de ReCO2 variant.

FIGUUR 18

CRITERIA BIJ AFWEGING TUSSEN ADDH2 EN RECO2



Het belangrijkste nadeel van de AddH2 variant is de hogere kostprijs vanwege de behoefte aan waterstof. De hieraan gerelateerde meerinvestering en het hogere stroomverbruik wegen normaliter niet op tegen de extra opbrengsten van een hogere productie groen gas.

De voordelen van RECO2 liggen dan ook vooral aan de kostenkant en de afwezigheid van de noodzaak een additionele waterstofbron te realiseren waardoor stand-alone functioneren relatief eenvoudig te verwezenlijken is. De bedrijfsvoering zal echter meer aandacht vragen door een wat geringere processtabiliteit en de grotere moeite die het kost om aan de eisen voor invoeding te voldoen.

Om deze reden lijkt een derde variant nog het meest aantrekkelijk, nl. een waarbij de RECO2 variant wordt uitgebreid met de mogelijkheid om van buitenaf waterstof toe te voeren aan het proces. Omdat er alleen sprake is van een omzetting van CO_2 naar CH_4 is het niet nodig de methaniseringsinstallatie te vergroten, wel dienen er voorzieningen te worden aangelegd om waterstof in te voeren in de reactor. Op deze wijze kan de investering beperkt blijven omdat ene elektrolyser achterwege kan blijven, maar is er wel de mogelijkheid de gaskwaliteit te verbeteren op momenten dat de externe inkoop van waterstof betaalbaar is.

12

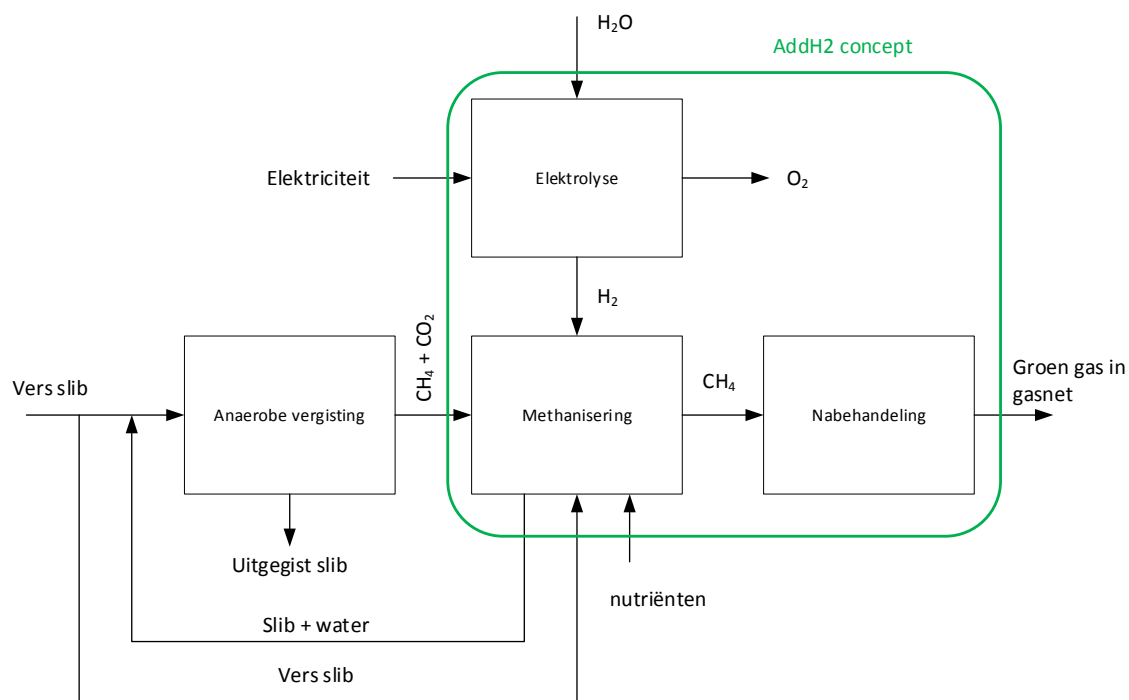
METHANISERING VAN BIOGAS

12.1 INLEIDING

Naast de mogelijke toepassing bij methanisering van syngas uit superkritische vergassing kan de technologie van biologische methanisering ook worden toegepast bij biogas. Veel RWZI's beschikken al over een eigen vergistingsinstallatie of brengen hun slib naar een centrale vergistingsinstallatie. Ongeveer 75% van het door waterschappen geproduceerde slib wordt vergist [8]. Methanisering van biogas kan voor deze zuiveringen een relatief eenvoudige optie zijn om de productie van groen gas te verhogen met ongeveer 50%, als de koolstofdioxide in het biogas wordt omgezet in methaan. In dit hoofdstuk wordt voor een bepaalde slibverwerkingscapaciteit – overeenkomend met 500.000 IE - beschreven wat de financiële consequenties hiervan zijn.

Als uitgangspunt is gekozen voor een methaniseringsinstallatie met dezelfde methaniseringcapaciteit als de eerder beschreven de situatie op basis van superkritische vergassing. Dat betekent dat dezelfde hoeveelheid koolstofdioxide wordt omgezet in methaan. Omdat de specifieke productie aan gas en koolstofdioxide per ton slib bij vergassing hoger is dan bij vergisting, zou dezelfde methaniseringsinstallatie in combinatie met een vergister dus worden toegepast bij een grotere RWZI dan in het geval van een vergassingsinstallatie. Waar de RWZI voor de eerder beschreven situatie met superkritische vergassing een capaciteit van 250.000 IE heeft, is in dit hoofdstuk de capaciteit van de RWZI voor de biogasproductie ongeveer het dubbele.

FIGUUR 5 HET ADDH2 CONCEPT ALS ONDERDEEL VAN HET TOTALE PROCES BIJ ANAEROBE VERGISTING



In het eerder onderzochte voorbeeld voor methanisering van syngas is de hoeveelheid koolstofdioxide die moet worden omgezet tot methaan in de methaniseringsinstallatie ongeveer 100 m³/h. Dat betekent dat deze methaniseringsinstallatie 250 m³/h biogas kan omzetten in groen gas. Dat komt overeen met een biogasproductie op basis van de slibproductie van ongeveer 500.000 IE.

Door het verschil in schaalgrootte is een vergelijking op kostenaspecten met de eerder beschreven vergassingssituatie niet goed mogelijk. Wel ontstaat een indruk van de financiële haalbaarheid van de methanisering van biogas, waarbij er rekening mee moet worden gehouden dat er nog steeds kosten worden gemaakt voor de afzet van het vergiste slib. Het biogas bevat geen waterstof en alle benodigde waterstof moet daarom worden ingekocht of met behulp van een elektrolyser lokaal worden geproduceerd. In vergelijking tot gemethaniseerd syngas bevat gemethaniseerd biogas echter lagere hoeveelheden problematische componenten zoals CO en hogere koolwaterstoffen.

12.2 INVESTERINGSKOSTEN

De investeringskosten in de methaniseringsinstallatie zijn praktisch gelijk aan de investeringskosten die in hoofdstuk 10.2 worden beschreven voor de AddH₂-optie omdat de capaciteit in beide gevallen hetzelfde is.

TABEL 20 INVESTERINGSKOSTEN VOOR DE METHANISERING VAN BIOGAS VOOR EEN RWZI VAN 500.000 IE

| | | |
|--------------------------------------|-----------|-----|
| Elektrolyser | 2.970.000 | EUR |
| Methanisering en gasbehandeling | 4.000.000 | EUR |
| Totale investering AddH ₂ | 6.970.000 | EUR |

De kosten zijn berekend op basis van een turn key-levering. Niet inbegrepen zijn kosten voor het gereedmaken van de locatie, bouwkundige voorbereiding en het benodigde station voor de invoeding van het gas in het net. Evenmin zijn de BTW en kosten voor vergunningverlening inbegrepen.

12.3 OPERATIONELE KOSTEN

Ook voor de operationele kosten geldt dat ze vrijwel gelijk zijn aan de AddH₂ variant in hoofdstuk 10, afgezien van enige meerkosten omdat het biogas uit zichzelf geen waterstof bevat.

TABEL 21 OPERATIONELE KOSTEN METHANISERINGSINSTALLATIE VAN BIOGAS VAN EEN RWZI MET 500.000 IE

| Component | Euro/jaar |
|--|------------------|
| Elektriciteit (8000 uur per jaar; 0,12 €/kWh) | 1.920.000 |
| Personeel incl. onderhoud en beheer | 63.000 |
| Water (0,79 EUR/m ³) | 5.000 |
| Verzekering (4 ‰ van CAPEX) | 12.000 |
| Totaal OPEX elektrolyse | 2.000.000 |
| Elektriciteit (8000 uur per jaar; 0,12 Euro/kWh) | 182.000 |
| Personeel incl. onderhoud en beheer | 107.000 |
| Water (0,79 EUR/m ³) | 5.000 |
| Chemicaliën incl. actieve kool | 59.000 |
| Verzekering (4 ‰ van CAPEX) | 16.000 |
| Totale OPEX kosten methanisering en gasbehandeling | 369.000 |
| Totale OPEX kosten elektrolyse, methanisering en gasbehandeling | 2.369.000 |

12.4 FINANCIËLE HAALBAARHEID

Door de methanisering van koolstofdioxide in biogas kan er jaarlijks in totaal 2,2 miljoen m³ methaan worden geproduceerd ofwel 24 miljoen kWh. De totale kosten van de methanisering bedragen dan 0,12 EUR/kWh (zie Tabel 22).

De totale productiekosten kunnen worden vergeleken met het basisbedrag voor groen gas via vergisting in de SDE++ regeling voor 2020: 0,030 Euro/kWh [13]. Omdat het basisbedrag kan worden beschouwd als de typische optelsom van invoedvergoeding en subsidie betekent dit dat de kosten van methaanproductie uit biogas en lokaal geproduceerd waterstof veelal hoger zijn dan de opbrengsten. Daarnaast is er ook in veel mindere mate sprake van besparing op de afvoer van slib, omdat dit door de vergisting maar voor een klein deel wordt omgezet.

TABEL 22 TOTALE JAARLIJKSE KOSTEN METHANISERING BIOGAS, RWZI 500.000 IE

| | Methanisering BIOGAS |
|---|----------------------|
| CAPEX methanisering (EURO/a) | 570.000 |
| Totale OPEX kosten methanisering incl elektriciteit (EUR/a) | 2.369.000 |
| Totale kosten (EUR/a) | 2.939.000 |
| Groen gas productie (Nm ³ /a) | 1.908.000 |
| Groen gas productie (kWh/a) | 25.000.000 |
| Methaniseringskosten (EURO/Nm ³ groen gas) | 1,33 |
| Methaniseringskosten (Euro/kWh groen gas) | 0,12 |
| Vergoeding als basisbedrag groen gas SDE++ (EURO/kWh) | 0,03 |
| Resterende maximale kostprijs biogas (EURO/kWh) | -0,09 |

In Tabel 23 en Tabel 24 zijn de resultaten van een gevoeligheidsanalyse samengevat waarbij variaties in de hoogte van de investering en de kostprijs van waterstof en biogas zijn geëvalueerd. In Tabel 23 zijn de kosten van groen gas weergegeven als functie van de waterstofprijs en het investeringsniveau. In Tabel 24 zijn de methaanproductiekosten gegeven als functie van de kosten van biogasproductie en de waterstofprijs.

TABEL 23 KOSTEN VAN METHANISERING (EUR/KWH) AFHANKELIJK VAN DE HOOGTE VAN DE INVESTERING EN DE KOSTEN VAN WATERSTOF BIJ EEN RWZI MET EEN CAPACITEIT VAN 500.000 IE. MET ROOD WORDEN DE WAARDES AANGEDUID DIE ZIJN GEBASEERD OP DE UITGANGSPUNTEN ZOALS DIE HIERBOVEN IN DE BEREKENINGEN ZIJN GEHANTEERD. HET GROENE GEBIED LINKS BOVEN DE BLAUWE LIJN GEEFT AAN BIJ WELKE COMBINATIE VAN VARIABLEN DE ECONOMIE VAN HET PROCES POSITIEF IS

| | | Hydrogen [EUR/kg] | | | | | | | |
|----------------|-----------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,00 | 2,36 | 3,55 | 4,73 | 5,91 | 7,09 | 8,27 | 9,46 |
| | | Hydrogen [EUR/kWh] | | | | | | | |
| | | 0,0 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,24 |
| CAPEX in [EUR] | 471.000 | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,16 |
| | 1.177.500 | 0,03 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,16 |
| | 1.884.000 | 0,04 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,15 | 0,16 |
| | 2.590.500 | 0,04 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 |
| | 3.297.000 | 0,04 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,17 |
| | 4.003.500 | 0,05 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,17 |
| | 4.710.000 | 0,05 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,17 |

TABEL 24 KOSTEN VAN METHANISERING (EUR/KWH) AFHANKELIJK VAN DE KOSTPRIJS VAN WATERSTOF EN BIOGAS VOOR EEN RWZI VAN 500.000 IE. MET ROOD WORDEN DE WAARDES AANGEDUID DIE ZIJN GEBASEERD OP DE UITGANGSPUNTEN ZOALS DIE HIERBOVEN IN DE BEREKENINGEN ZIJN GEHANTEERD. HET GROENE GEBIED LINKS BOVEN DE BLAUWE LIJN GEEFT AAN BIJ WELKE COMBINATIE VAN VARIABELEN DE ECONOMIE VAN HET PROCES POSITIEF IS

| | | Hydrogen [EUR/kg] | | | | | | | |
|--------------------------------------|------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,00 | 2,36 | 3,55 | 4,73 | 5,91 | 7,09 | 8,27 | 9,46 |
| | | Hydrogen [EUR/kWh] | | | | | | | |
| | | 0,0 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,24 |
| Raw biogas in [EUR/Nm ³] | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,16 |
| | 0,10 | 0,04 | 0,07 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 |
| | 0,20 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,14 | 0,16 | 0,17 |
| | 0,30 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,18 |
| | 0,40 | 0,07 | 0,10 | 0,11 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,19 |
| | 0,50 | 0,08 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,19 | 0,20 |
| | 0,60 | 0,09 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,21 |

Uit de tabellen blijkt dat vooral de kostprijs van waterstof (en daarmee de kostprijs van elektriciteit wanneer hiervoor een elektrolyser wordt ingezet) van cruciaal belang is. De bedrijfs-economische haalbaarheid van de methanisering van biogas wordt bovendien sterk beperkt doordat het basisbedrag in de huidige SDE++-regeling hier fors lager is dan bij de vergassings-route (0,03 EURO/kWh tegenover 0,073 EURO/kWh).

Dat de kostprijs van elektriciteit van cruciaal belang is, wordt nog eens onderstreept door enkele voorbeelden in het buitenland waarbij biologische methanisering reeds als extra optie is toegevoegd bij bestaande vergistingsinstallaties om alleen in geval van lage stroomprijzen voor de omzetting naar methaan te zorgen. Analoog aan het bedrijven van gasmotoren in de glastuinbouw op basis van de *spark spread* tussen de kosten van aardgas en elektriciteit kan op deze wijze ook ervoor gekozen worden om op bepaalde momenten elektriciteit om te zetten in gas (power to gas). In hoofdstuk 13 worden enkele praktijkvoorbeelden besproken waarbij de toepassing economisch haalbaar wordt gemaakt door een relatief lage kostprijs van waterstof en hoge opbrengsten voor het groen gas.

13

MOGELIJKE TOEPASSINGEN VAN METHANISERING OP EEN RWZI

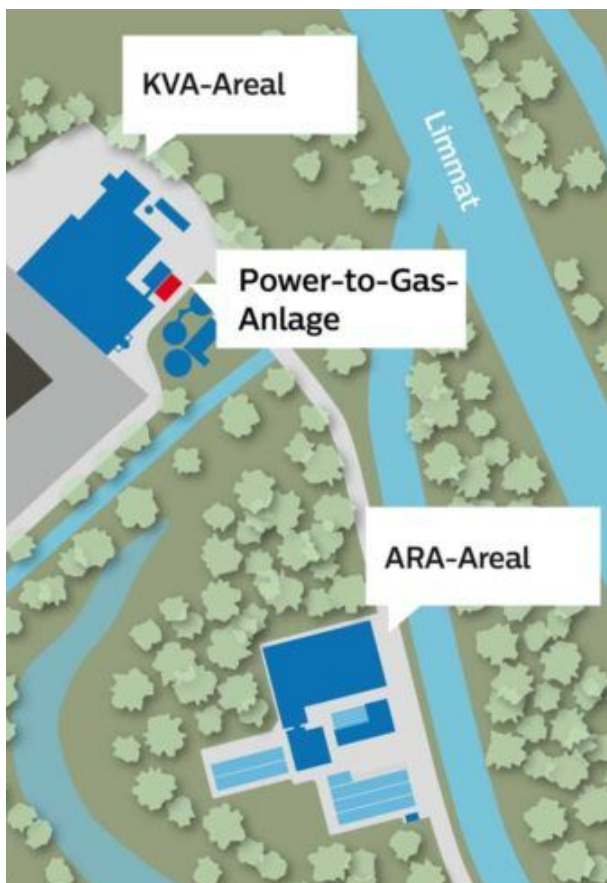
De berekeningen in de vorige hoofdstukken tonen aan dat met de huidige financiële uitgangspunten methanisering niet aantrekkelijk is. Met name is het noodzakelijk om goedkopere waterstof te gebruiken of elektriciteit indien de waterstof lokaal wordt geproduceerd. In dit hoofdstuk worden twee situaties geschetst waarin de toepassing van methanisering aantrekkelijk kan zijn.

13.1 HET LIMECO-PROJECT IN ZWITSERLAND

In het Zwitserse Dietikon wordt door microbEnergy een methaniseringsinstallatie gebouwd op een locatie waar zowel een afvalverbrandingsinstallatie als een waterzuiveringsinstallatie zijn gehuisvest. In dit zgn LIMECO project wordt biogas uit de zuiveringsinstallatie door biologische methanisering omgezet in groen gas door middel van elektriciteit uit de naastgelegen afvalverbrandingsinstallatie waaraan ook een stadsverwarmingsproject gekoppeld is [14].

FIGUUR 19

SITUATIE LIMECOPROJECT. KVA IS AFVALVERBRANDINGSINSTALLATIE; ARA IS RWZI [14]



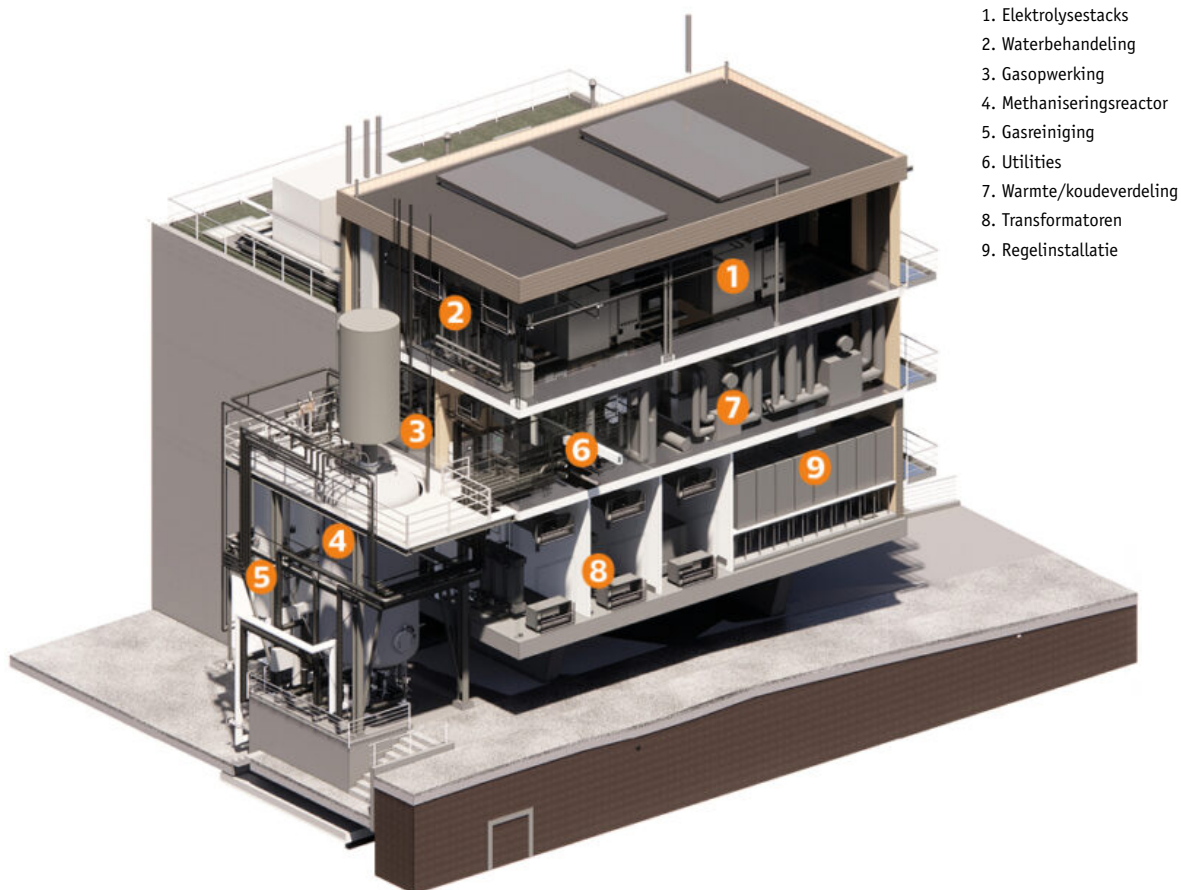
De methaniseringsinstallatie is geïntegreerd in een bestaande afvalverbranding en zuiveringsinstallatie. Het geproduceerde gas wordt ingevoerd in het aardgasnet dat vooral voor de warmtevoorziening gebruikt wordt. De waterstofproductie kan worden opgevoerd als daaraan behoefte is. Zo kan waterstof worden geproduceerd voor bijvoorbeeld directe inzet als transportbrandstof.

De bedrijfseconomische haalbaarheid van het project wordt bepaald door de relatief lage elektriciteitsprijs en de goede opbrengst aan groen gas. De elektriciteitsprijs is veelal laag omdat de AVI in basislast produceert en hiervoor een relatief lage terugleververgoeding ontvangt. Verder is er sprake van projectsubsidies en een verkoopprijs voor groen gas welke mogelijk in de toekomst hoger ligt.

Figuur 20 geeft een beeld van het gebouw met de installatie. De installatie is in aanbouw en komt in 2021 in bedrijf [14].

FIGUUR 20

HET GEBOUW MET DE METHANISERINGSINSTALLATIE [14]



De belangrijkste kengetallen van de LIMECO installatie zijn samengevat in Tabel 25.

TABEL 25 KENGETALLEN LIMECOPROJECT IN ZWITSERLAND [14]

| | |
|---|---|
| Groen gas productie | 18.000 MWh/a |
| Vermogen elektrolyse-installatie | 2,5 MW |
| Waterstofproductie | 450 Nm ³ /h |
| Energie-efficiëntie incl. warmtebenutting | 80% |
| Energie-efficiëntie excl. warmtebenutting | 45% |
| Afvalwarmte voor stadsverwarming | 0,8 MW |
| Volume methaanreactor | 50 m ³ |
| Elektriciteit omgezet in groen gas | 10.000-15.000 MWh |
| Waterstofgehalte groen gas | 2% |
| Emissiereductie | 4.000-5.000 ton CO ₂ /a ³ |
| Minimum projectduur | 15 jaar |

13.2 ONTWIKKELINGEN IN DE BESCHIKBAARHEID VAN WATERSTOF

Op dit moment bestaat ongeveer 20 procent van het Nederlandse energiegebruik uit elektriciteit. De verwachting is dat door gedeeltelijke elektrificatie van de industrie, vervoer en verwarming van woningen kan groeien naar maximaal 40 tot 50 procent. De andere helft van onze energie zullen we moeten blijven halen uit 'moleculen', en dan vooral uit gassen. Een voordeel van duurzame gassen in vergelijking met elektriciteit is dat gas makkelijker is op te slaan, bijvoorbeeld ondergronds. Ook is gas makkelijker in grote hoeveelheden te transporteren dan elektriciteit. Juist nu onze afhankelijkheid van weersafhankelijke energiebronnen steeds meer groter wordt, is een goede vorm van energieopslag steeds belangrijker. Een teveel aan duurzame stroom kan bijvoorbeeld worden omgezet in waterstof om direct te gebruiken of op te slaan voor later gebruik. Duurzame gassen vormen zo een uitstekende combinatie met groene stroom.

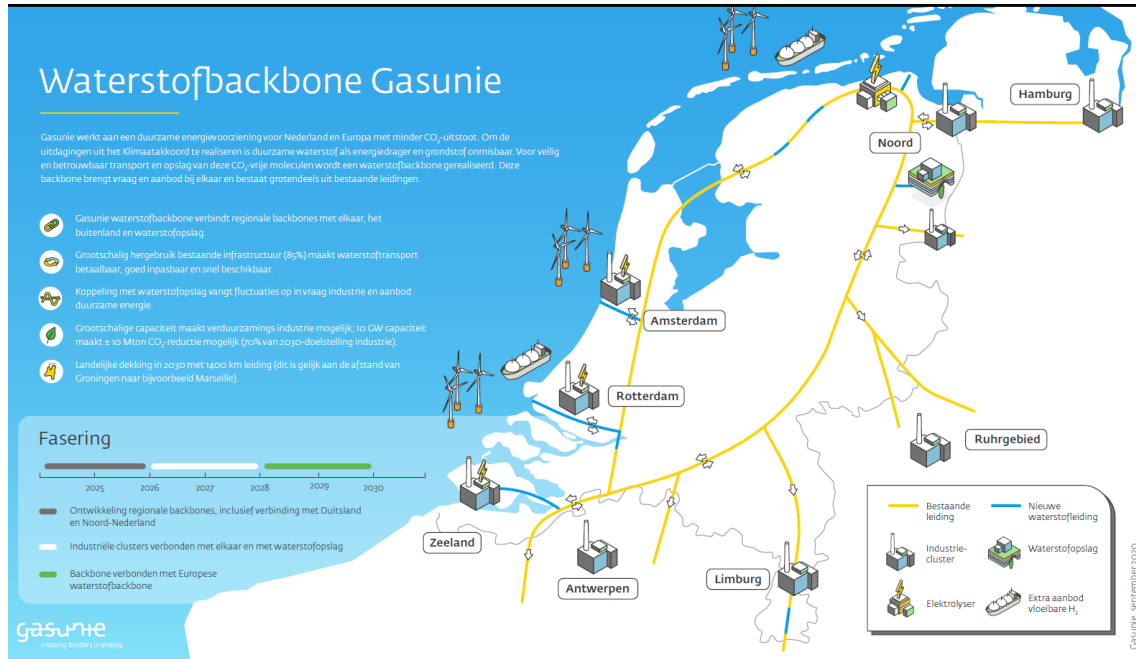
Waterstof is nu al een belangrijke grondstof voor de industrie, zoals voor de productie van kunstmest. Er zijn verschillende wijzen om waterstof te produceren:

- **Grijze** waterstof wordt gemaakt uit aardgas, hierbij komt CO₂ vrij.
- Bij **blauwe** waterstof wordt de vrijgekomen CO₂ afgevangen, opgeslagen of hergebruikt
- **Groene** waterstof via elektrolyse gemaakt uit elektriciteit afkomstig van hernieuwbare bronnen. De verwachting is dat groene waterstof een grote rol gaat spelen in de energievoorziening en blauwe waterstof zal op korte termijn helpen om de waterstofeconomie te ontwikkelen en grote stappen te zetten in het verminderen van CO₂-uitstoot.

Voor het gebruik van waterstof is een betrouwbaar netwerk nodig voor zowel transport als opslag. Gasunie denkt hierin een enorme stap te kunnen zetten door gebruik te maken van bestaande gasinfrastructuur en dat er in 2030 een basis klaar is voor transport en opslag van waterstof van en naar de grote industriële gebieden in Nederlanden richting Hamburg en het Ruhrgebied [15].

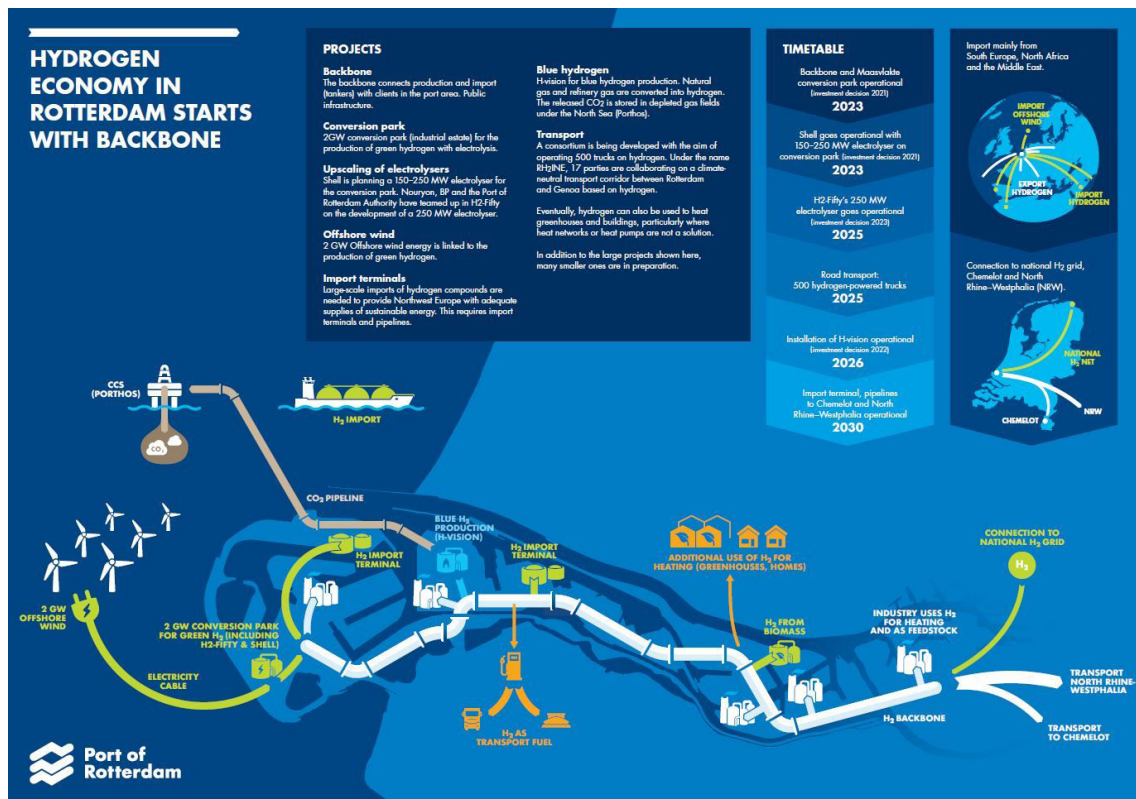
3 Volgens Zwitserse rekenmethode. In Zwitserland wordt 100% van de door een AVI geproduceerde elektriciteit aangemerkt als CO₂-neutraal. In Nederland is dit in 2020 52%.

FIGUUR 21 SCHEMATISCH BEELD PLANNEN GASUNIE VOOR EEN LANDELIJKE WATERSTOFBACKBONE [15]



The Port of Rotterdam ontwikkelt plannen voor een grootchalig elektrolyseproject in Rotterdam waarin waterstof wordt geproduceerd met behulp van elektriciteit afkomstig van windmolens. De waterstof wordt vervolgens getransporteerd naar het Rotterdamse havengebied.

FIGUUR 22 SCHEMATISCH BEELD PLANNEN ROTTERDAMSE HAVEN VOOR EEN 'HYDROGEN BACKBONE' [16]



Deze en andere plannen kunnen tot een aanbod van waterstof leiden tegen een substantieel lagere prijs dan de huidige waterstofprijs. Een prijs die bovendien kan fluctueren in de tijd en laag is op momenten van een geringe vraag. Op die momenten wordt het meer rendabel om biogas en syngas te methaniseren.

De toenemende beschikbaarheid van waterstof biedt perspectieven voor een methaniseringsinstallatie op een RWZI die niet is uitgerust met een elektrolyser, maar wel is voorbereid om waterstof te benutten. In deze variant wordt normaliter alleen gebruik gemaakt van de waterstof welke al als component aanwezig is in het syngas, zodat een overschot aan koolstofdioxide verwijderd moet worden om groen gas van acceptabele kwaliteit te produceren. Maar bij een aanbod van goedkoop waterstof kan ervoor worden gekozen om het aanwezige koolstofdioxide volledig om te zetten middels ingekocht waterstof. In dat geval wordt aanmerkelijk meer groen gas geproduceerd.

14

PERSPECTIEF VOOR GROEN GAS DOOR BIOLOGISCHE METHANISERING

De noodzaak om naast waterstof ook groen gas verder te ontwikkelen ligt enerzijds in de blijvende behoefte aan koolstofmoleculen van duurzame herkomst als grondstof in de chemie en anderzijds als een optie voor verduurzaming in situaties waarbij andere alternatieven voor fossiel gas technisch of economisch niet haalbaar zijn. Zolang de infrastructuur en de capaciteit niet voorhanden zijn om waterstof in alle omstandigheden in te zetten, is er behoefte aan aardgas of bij voorkeur een duurzame vervanger als groen gas. Ook op de langere termijn kan groen gas voordelen hebben als duurzame grondstof voor de chemische industrie.

In de Kamerbrief Routekaart Groen gas [1] wordt aangegeven dat er ook in 2050 behoefte bestaat aan groen gas naast duurzame waterstof. Het in deze brief verwoorde overheidsbeleid richt zich expliciet op het stimuleren van de productie van groen gas en het verbeteren van de randvoorwaarden hiervoor. Zo wordt de haalbaarheid onderzocht van een bijmengverplichting, waar aardgas wordt aangevuld met een verplicht percentage groen gas en een verbeterde subsidiering. Ook het Duurzaamheidskader Biograndstoffen [19] biedt een stimulans om grotere hoeveelheden duurzame biomassa te ontsluiten en beschikbaar te maken voor diverse toepassingen, waaronder groengasproductie.

Dit rapport laat zien dat de technologie van biologische methanisering daaraan een belangrijke bijdrage kan leveren. Het is robuuste technologie die de opbrengst aan groen gas van bestaande routes (vergisting) en van innovatieve routes (als superkritische vergassing) sterk kan verhogen, daarbij gebruik makend van reststromen die ook in de toekomst beschikbaar zijn.

Onder de huidige marktomstandigheden zijn de nu bekende stimuleringsinstrumenten onvoldoende om de technologie rendabel te maken. Bepalend zijn hierin de kosten van groene stroom dan wel groene waterstof. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat voor een rendabele bedrijfsvoering de kostprijs van waterstof tenminste zou moeten zakken van 8 naar ca 4-6 Euro per kg.

De enorme aandacht voor opschaling van waterstofproductie en de bouw van wind op zee bieden perspectief op kostenreductie voor waterstof en groene stroom. Tegelijkertijd laten diverse onderzoeksinitiatieven zien dat de business case voor inzet van groen gas substantieel kan worden verbeterd, bijvoorbeeld door nuttig hergebruik van CO₂ na eindgebruik. Tenslotte wordt er gewerkt aan verruiming van de kwaliteitsspecificaties voor het gasnet, met name ten aanzien van het bijmengen van waterstof, waarmee ook de invoeding van gemethaniseerd groen gas makkelijker wordt gemaakt. Ook zijn er perspectieven op aanpassing van de ruwe gassamenstelling uit superkritische vergassing zodat de mismatch met de eisen

tot invoeding wordt verkleind. Dergelijke ontwikkelingen zullen leiden tot een aanzienlijke daling in de kostprijs van de productie van groen gas ten opzichte van de in dit onderzoeksrapport gehanteerde kostencomponenten uit het heden.

Deze belangrijke constatering (van belang voor de toekomst, technisch aantrekkelijk, economisch nog niet) bieden een hoopvol én realistisch beeld voor biologische methanisering op zowel de korte als lange termijn.

15

CONCLUSIES

Dit project is opgezet om de valorisatie van syngas uit superkritische vergassing en anaerobe vergisting van zuiveringsslib te verkennen via de route van biologische methanisering. Daarmee kan de energieopbrengst van slibverwerking worden verbeterd en het aanbod van groen gas worden vergroot. In potentie kan de productie van groen gas uit zuiveringsslib op communale en industriële biologische zuiveringsinstallaties door methanisering van biogas stijgen van 3,4 naar 5,7 PJ per jaar. Hiervoor is 3,0 PJ waterstof nodig, waarvan een deel wordt gebruikt voor de groei van Archea en de productie van restwarmte. Vooral nog is er meer vraag naar aardgas dan waterstof. Ook bij een sterk toenemende vraag naar waterstof en elektrificatie van transport, industrie en bij huishoudens zal er echter ook op de langere termijn voor verschillende marktsectoren nog steeds een vraag blijven naar groen gas.

Via de route van superkritische vergassing kan per jaar in potentie 11,9 PJ groen gas worden geproduceerd, bij volledige methanisering stijgt dit naar 18,3 PJ. Ter vergelijking: 70 PJ is volgens het Ministerie van Economische zaken het streven voor de groengassector [1]. Gezien de blijvende toekomstige beschikbaarheid van slib als onomstreden uitgangsmateriaal kunnen de gezamenlijke waterschappen daarmee in potentie een belangrijke bijdrage leveren aan deze doelstelling.

De hoofdroute die in dit project verder is uitgewerkt betreft het superkritisch vergassen van zuiveringsslib met aansluitend de omzetting van de waterstof en koolstofdioxide in het syngas door een biologisch methaniseringsproces.

Tijdens de methaniseringsreactie reageren 4 delen waterstof met 1 deel koolstofdioxide tot 1 deel methaan en twee delen water. In het syngas is echter onvoldoende waterstof aanwezig om al het aanwezige koolstofdioxide om te zetten. In de AddH₂ variant wordt waterstof (bijvoorbeeld lokaal geproduceerd door elektrolyse) toegevoegd tot de ideale verhouding, in de RECO₂ variant wordt koolstofdioxide verwijderd.

In dit project is experimenteel aangetoond dat beide varianten technisch mogelijk zijn, al is in de methanisering in de AddH₂ een meer robuust en stabiel proces. Het leidt ook tot een aanzienlijke hogere productie aan groen gas.

Vanwege de doorslaggevende prijs van waterstof op de methaniseringskosten is de RECO₂ variant vooral nog bedrijfseconomisch de meest aantrekkelijke optie. Deze variant wordt gekenmerkt door een geringere investeringsbehoefte en lagere variabele kosten, vooral vanwege de afwezigheid van een elektrolyser voor waterstofproductie. Het geproduceerde groen gas wijkt echter in samenstelling wel wat meer af van de invoedingseisen voor injectie in het gasnet. Voor een meer rendabele bedrijfsvoering zou de in deze studie gehanteerde kostprijs van waterstof moeten zakken van 8 naar ca 4-6 Euro per kg.

Bij de verdere ontwikkeling is het aan te bevelen uit te gaan van het RECO₂ concept met inbegrip van de mogelijkheid om in de toekomst additioneel waterstof te doseren, zonder direct een elektrolyser te installeren. Dit verhoogt de productie van groen gas en de processtabiliteit, mocht dit later wenselijk zijn. Afhankelijk van de toekomstige beschikbaarheid van waterstof en de prijs ervan kan vervolgens de inzet van waterstof verhoogd worden. Een andere optie is om afhankelijk van de spark spread de aanvullende omzetting van elektriciteit in groen gas al dan niet te laten plaatsvinden.

Biologische methanisering kan ook worden toegepast op biogas, verkregen door anaerobe vergisting van zuiveringsslib. Dit als alternatief voor het verwijderen van koolstofdioxide om te voldoen aan de invoedingseisen. Ook hierbij kan de methanisering worden uitgevoerd met een externe waterstofbron waarbij de procesvoering goed vergelijkbaar zal zijn met die in het AddH₂ concept. De technische aspecten van de toepassing van biologische methanisering van biogas zijn in dit project niet experimenteel onderzocht omdat er al praktijkinstallaties bestaan waarin dit gebeurt.

De kosten van de biologische methanisering van biogas worden net als bij de methanisering van syngas vooral bepaald door de waterstofprijs. Methanisering is dan ook alleen aantrekkelijk bij een lage waterstofprijs of - in combinatie met een elektrolyser - een lage elektriciteitsprijs. De SDE++-basisvergoeding zoals nu van toepassing voor deze route is laag ten opzichte van de vergoeding voor het vergassingsalternatief.

Op de korte termijn kan de rentabiliteit van biologische methanisering in combinatie met superkritische vergassing worden verbeterd door een aparte SDE++-categorie met een voldoende hoog basisbedrag. Op de langere termijn zijn ook andere vormen van stimulering denkbaar zoals een bijmengverplichting voor leveranciers van aardgas analoog aan de bestaande verplichting tot bijmenging bij transportbrandstoffen.

16

REFERENTIES

1. Kamerbrief van de minister van EZK aan de Tweede Kamer over de Routekaart Groen Gas, 30 maart 2020
2. Regeling van de Minister van Economische Zaken van 16 februari 2016, nr. WJZ/15079642, tot wijziging van de Regeling gaskwaliteit, Staatscourant nr. 9333, 19 feb 2016
3. Review of power-to-gas projects in Europe. Wulf et al. Energy Procedia 155 (2018) 367-378
4. Methanation: Technological fundamentals and market overview. Samenwerking GasTerra, Gasunie en DNV GL) Report No.: OAG.19.R.10157194 Date: 12-05-2019. Te downloaden van <https://www.gasterra.nl/nieuws/methanisatietechnologie-helpt-verduurzaming-van-het-gassy-steem>
5. Bär et al Vergleich der biologischen und katalytischen Methanisierung für den Einsatz bei PtG-Konzepten. GWF Gas/Erdgas 7/2015, 644-673
6. Zie <https://www.efgf.nl/projecten/energie-grondstoffenfabriek-harnaschpolder/> EFGF Harnaschpolder | Energie en Grondstoffen Fabriek
7. Verkenning power-to-gas concepten op RWZI's, . Door Blueterra, STOWA rapport nr.71, 2018
8. Bedrijfsvergelijking Zuiveringsbeheer 2018
9. Slibketenstudie STOWA-rapport 2005-26
10. Slibketenstudie II, STOWA-rapport 2010-33
11. Technologiebeoordeling van groene waterstofproductie, studie DNV.GL ism TNO, 2018
12. STOWA rapport 16 Experimenteel onderzoek superkritisch vergassen van zuiveringsslib (2016)
13. SDE++ regeling 2020, RVO, www.rvo.nl/sde
14. Het LIMECO-project , zie www.powertogas.ch
15. Gasunie en waterstof: zie <https://www.gasunie.nl/expertise/waterstof>
16. Port of Rotterdam en waterstof, zie <https://www.portofrotterdam.com/en/doing-business/port-of-the-future/energy-transition/hydrogen-in-rotterdam>
17. Persoonlijke communicatie, M. Theelen, Nederlandse Gasunie, 2020
18. Klimaatmonitor Unie van Waterschappen Verslagjaar 2019
19. Kamerbrief van de minister van EZK aan de Tweede Kamer over het Duurzaamheidskader biograndstoffen, 16 oktober 2020