

stowa



Agentschap NL  
Ministerie van Economische Zaken,  
Landbouw en Innovatie



# OPTIMALISATIE WKK EN BIOGASBENUTTING



RAPPORT

2011  
33

OPTIMALISATIE WKK EN BIOGASBENUTTING

**RAPPORT**

2011

**33**

ISBN 978.90.5773.549.3



Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

## PROJECTUITVOERING

Patricia Clevering-Loeffen  
Nard Klaassens  
Ferd Schelleman  
Bert Geraats

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Arne Boswinkel (Agentschap NL)  
Rob van Doorn (Waterschap Vallei en Eem)  
Jos Jogems (Waterschap Regge en Dinkel)  
Henri Maas (Waterschap Brabantse Delta)  
Ruud Peeters (Waterschap de Dommel)  
Peter Piekema (Waternet)  
Dave Philo (Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpernerwaard)  
Hans Schepman (Waterschap Groot Salland)  
Cora Uijterlinde (STOWA)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2011-33

ISBN 978.90.5773.549.3

**COPYRIGHT** De informatie uit dit rapport mag worden overgenomen, mits met bronvermelding. De in het rapport ontwikkelde, dan wel verzamelde kennis is om niet verkrijgbaar. De eventuele kosten die STOWA voor publicaties in rekening brengt, zijn uitsluitend kosten voor het vormgeven, vermenigvuldigen en verzenden.

**DISCLAIMER** Dit rapport is gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteurs en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit dit rapport.

# SAMENVATTING

## BIOGAS BIJ WATERZUIVERINGEN

De waterschappen in Nederland produceren al vaak biogas via slibvergistingsinstallaties. Doorgaans wordt het biogas benut in een WKK die elektriciteit voor de RWZI produceert. Door het hoge elektriciteitsverbruik van een RWZI en de warmtebehoefte van de slibvergister is dit een rendabele aanpak waarmee een aanzienlijke energiebesparing wordt gerealiseerd. Er komen echter nieuwe energietechnieken op de markt (ORC, brandstofcel) terwijl er vanuit het energiebeleid steeds meer nadruk wordt gelegd op de productie van groen gas. In diverse studies zijn de duurzaamheid en de haalbaarheid van deze routes al eerder onderzocht. Een systematische vergelijking van de verschillende mogelijkheden was echter nog niet beschikbaar. De vraagstelling voor deze studie luidt als volgt:

- 1 Hoe kan de bedrijfsvoering van WKK's bij RWZI's worden verbeterd?
- 2 Wat is de meest gunstige route voor biogasbenutting bij RWZI's?

## BEDRIJFSVOERING WKK'S

De bedrijfsvoering van WKK's, met name de gasmotoren, wordt sterk beïnvloed door de kwaliteit van het biogas en het draaien in deellast. Bij vollast leveren gasmotoren het hoogste elektrisch rendement, wat bij deellast enigszins kan teruglopen, met 1 tot 2% punten. Deellastbedrijf zal nodig zijn wanneer er onvoldoende biogas wordt geproduceerd voor de vollast-situatie. Onderstaande tabel laat zien wat de invloed van deellastbedrijf op het rendement is.

TABEL 1

BELASTINGSSITUATIES GASMOTOR 265 KW

Belasting (% vollast)	100	75	50
$\eta_{\text{Mechanisch}}$	40,5	39,2	37,7
$\eta_{\text{Elektrisch}}$	38,3	37,2	35,7
$\eta_{\text{Thermisch}}$	49,6	50,2	52,6
$\eta_{\text{Totaal}}$	87,9	87,4	88,3

## SAMENSTELLING BIOGAS

Het biogas bevat een aantal componenten die de bedrijfsvoering van de WKK negatief kunnen beïnvloeden: waterdamp, waterstofsulfide en siloxanen. Bij het verbranden van siloxanen ontstaat kwarts dat zich hecht aan inwendige onderdelen en daarop een ongewenste laag vormt. Problemen die hierdoor kunnen ontstaan zijn onder andere:

- Een niet of moeilijk te regelen ontsteking;
- Slechte koeling van de oppervlakken van de verbrandingskamer en kleppen;
- Harde verbrandingsproducten die schade toebrengen aan koppen, kleppen, veren en lagers;
- De-activering van een eventuele uitlaatgaskatalysator.

De oplossing voor het siloxanen probleem ligt in reiniging van het biogas voor het de gasmotor ingaat. Daarmee worden dan ook andere schadelijke componenten verwijderd. De bedrijfsvoering van de WKK wordt hiermee naar verwachting verbeterd.

## GASREINIGING

Reiniging van het biogas kan plaatsvinden met twee methodes:

- Reiniging met een actief-kool filter (AK-filter);
- Reiniging door middel van diepkoeling met condensatie van de schadelijke componenten in het gas.

Voordelen van een AK-filter zijn de lage kosten bij kleinere gasdebieten. Nadeel is dat niet alle componenten worden verwijderd en dat bij hogere concentraties de filtervulling vaak vervangen moet worden of het filter zeer groot wordt. Het type actief kool bepaalt welke componenten worden verwijderd en in welke mate. Diepkoeling wordt toegepast als een AK-filter onvoldoende reinigingscapaciteit oplevert. Voordeel is dat verwijdering van siloxanen altijd plaatsvindt, er vindt geen verzadiging plaats, ook niet bij hoge concentraties. Kostengegevens van deze methoden zijn samengevat in Tabel 2.

TABEL 2 KOSTEN GASREINIGING

Schaalgrootte	Investering Aktief-kool (€)	Vervanging filtervulling (€/j)	Investering diepkoeling (€)	Onderhoud + energie diepkoeling (€/j)
45 m <sup>3</sup> /h	47.600,-	7.100,-	167.000,-	9.000,-
115 m <sup>3</sup> /h	95.200,-	12.000,-	179.000,-	12.800,-
285 m <sup>3</sup> /h	154.700,-	25.000,-	300.000,-	22.000,-

## EMISSIE EISEN

Sinds 1 april 2010 is het BEMS van kracht voor nieuwe WKK's, met daarin strengere emissie eisen dan voorheen. Vanaf 1 januari 2017 gelden deze eisen ook voor bestaande installaties. De strengere emissie eisen kunnen nadelige gevolgen hebben voor de investeringskosten van WKK's en wellicht ook voor het rendement. Ook bij een aanzienlijke kostenverhoging (25%) zal een WKK doorgaans rendabel kunnen worden bedreven.

## AANBEVELINGEN VOOR DE BEDRIJFSVOERING VAN WKK'S

Voor wat betreft de bedrijfsvoering van WKK's kunnen de volgende aanbevelingen worden geformuleerd:

- Draag er zorg voor dat de dagelijkse inspecties en onderhoudswerkzaamheden goed en zorgvuldig worden uitgevoerd en dat proceswaarden en bijzonderheden worden geregistreerd;
- Draag zorg voor voldoende, tijdig en regelmatig gepland onderhoud;
- Controleer bij de uitvoering van onderhoud door derden of originele reserveonderdelen worden gebruikt;
- Laat met regelmatige intervallen olieanalyses uitvoeren op, onder andere, zuurgraad en de hoeveelheid aanwezige siliciumverbindingen;
- Met meerdere gasmotoren in een installatie die op deellast draait, is het mogelijk load sharing toe te passen;
- Het afsluiten van een prestatiecontract voor onderhoud en beheer met de leverancier van de WKK-installatie kan voordelig zijn.

## BIOGASBENUTTING

Naast een analyse van de bedrijfsvoering van WKK's zijn de volgende routes voor biogasbenutting vergeleken:

- Biogas naar een WKK met warmte- en elektriciteitsproductie;
  - Aardgasbijstook in de WKK;

- Reiniging van het biogas voor de WKK;
- WKK gecombineerd met een ORC voor extra elektriciteitsproductie.
- Biogas naar een brandstofcel;
- Biogas opwaarderen naar groen gas met invoeding in het aardgasnet;
- Biogas opwaarderen naar transportbrandstof, bio-CNG, af te leveren via een eigen tankstation.

Bovengenoemde 7 benuttingsroutes zijn vergeleken op drie indicatoren:

- Energie-opbrengst: de netto-energieopbrengst die wordt gerealiseerd met het biogas, bestaande uit de energiebesparing door benutte warmte en/of elektriciteit of door levering van groen gas of transportbrandstof, ten opzichte van de energie-inhoud van het biogas;
- Duurzaamheid: de vermeden CO<sub>2</sub>-emissies die resulteren uit de warmte- en elektriciteitsbenutting of door besparing op transbrandstof, ten opzichte van de CO<sub>2</sub>-emissie die zou zijn ontstaan als het biogas zou zijn verbrand;
- Economie: de terugverdientijd berekend uit de investeringskosten gedeeld door de netto opbrengsten voor iedere route.

De vergelijking voor de verschillende routes zijn gemaakt voor drie capaciteiten van biogasproductie: 400.000 m<sup>3</sup>, 1 mln. m<sup>3</sup> en 2,5 mln. m<sup>3</sup> per jaar, ongeveer overeenkomend met het biogas afkomstig van respectievelijk 80.000, 200.000 en 500.000 i.e.

### UITGANGSPUNTEN

De belangrijkste uitgangspunten voor het analyseren van de verschillende routes en het berekenen van de indicatoren zijn afkomstig uit het rapport "Energie-onder-één-noemer". (ref. 4)

TABEL 3

#### ALGEMENE UITGANGSPUNTEN EN KENTALLEN

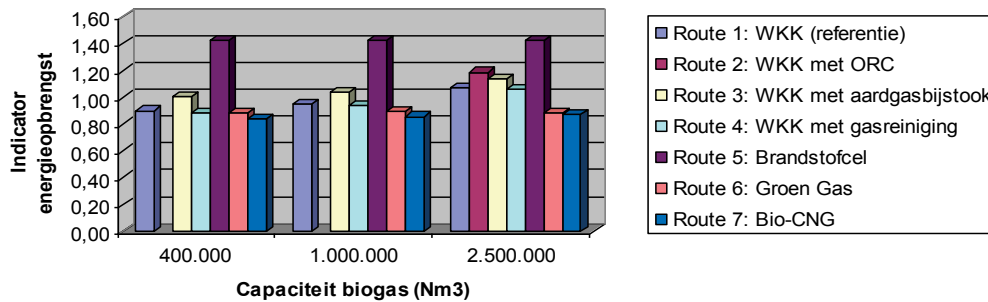
Parameter	Eenheid:	Waarde:
Primair energieverbruik voor elektriciteitsproductie	MJ/kWh	9,0
Energie inhoud biogas	MJ/Nm <sup>3</sup>	23,3
Energie inhoud aardgas	MJ/Nm <sup>3</sup>	31,65
Energie inhoud diesel	MJ/liter	35,87
Methaangehalte biogas	%	65
Rendement verwarmingsketel	%	100
Benutting van de geproduceerde elektriciteit	%	100
Benuttingsgraad van de geproduceerde warmte	%	60
Methaanslip	%	1
Kosten elektriciteit	€/kWh	0,11
Kosten aardgas	€/Nm <sup>3</sup>	0,50
Rentevoet	%	5
Afschrijvingstermijn	jaar	15
Specifieke CO <sub>2</sub> emissie elektriciteitsproductie	kg CO <sub>2</sub> /kWh	0,67
Specifieke CO <sub>2</sub> emissie aardgasverbruik	kg CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	1,8
CO <sub>2</sub> -emissie diesel brandstof	kg CO <sub>2</sub> /liter	2,6
Equivalent CO <sub>2</sub> emissie van methaan	kg CO <sub>2</sub> /kg	20,9

## RESULTATEN

De resultaten voor de verschillende routes zijn weergegeven in figuren 2 t/m 4.

FIGUUR 2

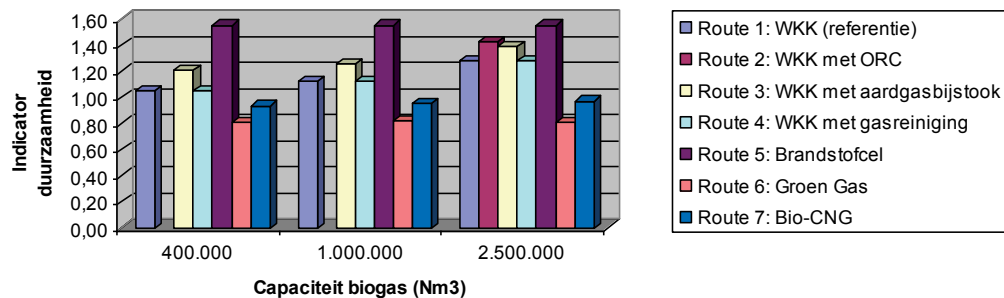
VERGELIJKING VAN DE ENERGIEOPBRENGST



De energieopbrengst is duidelijk het beste voor de brandstofcel en vervolgens de WKK-routes met de ORC variant als beste. Ook het bijstoken van aardgas verbetert de energieopbrengst van de WKK. De routes voor groen gas en transportbrandstof scoren slechter vanwege het energieverbruik tijdens de opwerking. Daarnaast profiteren deze routes niet van de terugrekening naar primair energieverbruik bij de elektriciteitsproductie wat bij de WKK varianten wel het geval is.

FIGUUR 3

VERGELIJKING VAN DE DUURZAAMHEID

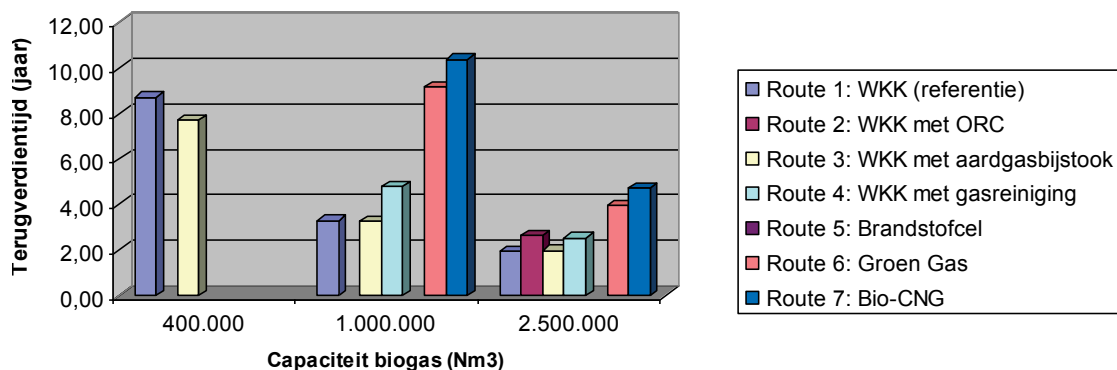


De vergelijking op duurzaamheid geeft logischerwijs grotendeels hetzelfde beeld als voor de energieopbrengst. De bio-CNG route, route 7, scoort beter dan groen gas in het aardgasnet, vanwege de vermeden CO<sub>2</sub>-emissie ten opzichte van diesel voor transport.

Ook wat betreft de economie (terugverdiendtijd) scoren de WKK varianten beter dan groen gas of transportbrandstof. De economie voor deze laatste varianten wordt sterk bepaald door de prijzen die worden verkregen voor het aan het net geleverde gas of voor de transportbrandstof. In dit rapport is rekening gehouden met een prijs van € 0,341 voor gaslevering aan het net. Dit komt overeen met de SDE+ basisprijs inclusief BTW. Voor de prijs voor transportbrandstof is uitgegaan van € 0,60 per Nm<sup>3</sup>, incl. BTW. Dit komt ongeveer overeen met een verkoopprijs van € 0,92 per kg aardgas, rekeninghoudend met de brandstofaccijns die hierin is opgenomen.

Op economie scoort de brandstofcel slecht. Deze optie is op dit moment niet haalbaar. Verdere ontwikkeling zal moeten plaatsvinden om deze optie interessant te maken.

FIGUUR 4 VERGELIJKING VAN DE ECONOMIE



### AANBEVELINGEN VOOR BIOGASBENUTTING

Wat betreft de routes voor biogasbenutting wordt het volgende aanbevolen:

- De conventionele WKK route scoort op de drie indicatoren het beste, waarbij de WKK met ORC het hoogste scoort op energieopbrengst en duurzaamheid. In de WKK routes kunnen verbeteringen worden aangebracht door:
  - Toepassen van gasreiniging wanneer het biogas verontreinigd blijkt met bijvoorbeeld siloxanen of H<sub>2</sub>S. Gasreiniging verlaagt dan de onderhoudskosten en verbetert de bedrijfsvoering waardoor gemiddeld over het jaar een hoger rendement kan worden gerealiseerd;
  - Toepassen van slibvoorverwarming door hergebruik van de warmte in het slib na de vergister. Dit is vooral zinvol indien warmte kan worden geleverd aan derden;
- Optimaliseer de bedrijfsvoering van de vergister met de WKK of opwerkingsinstallatie zodat de hoeveelheid biogas die nu wordt afgefakkeld wordt verminderd. Er zijn RWZI's waar minder dan 0,5% van het biogas wordt afgefakkeld.
- Aardgasbijstook leidt tot een beter elektrisch rendement van de WKK en verbetert daardoor de WKK route op alle indicatoren. De economie verandert nauwelijks;
- De route voor groen gas productie kan worden verbeterd door:
  - Toepassen van slibvoorverwarming met de restwarmte in het slib na de vergister. Daardoor is minder biogas nodig voor de CV-ketel en resteert dus meer gas voor groen gas levering;
  - Onderhandel met de afnemer van het groen gas over groen gas certificaten (mogelijke opbrengst van € 0,02 tot € 0,06);
  - Onderhandel met het netwerkbedrijf over een regiokorting in verband met vermeden transportkosten van het aardgas;
  - Vraag SDE+ subsidie aan. SDE+ gaat uit van een bepaalde basisprijs (nu € 0,287, excl. BTW). DE SDE+ subsidie wordt berekend aan de hand van de ENDEX gasprijs en deze basisprijs. De subsidie wordt verkregen bovenop bijv. de vergoeding voor groen gas certificaten of de regiokorting.
  - Overweeg een zogenaamde hybride variant: warmteproductie door middel van een WKK bij groen gas productie. Dit vermindert de hoeveelheid biogas beschikbaar voor groen gas productie maar verbetert de energieopbrengst, de duurzaamheid en de economie van de installatie.



# DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: [stowa@stowa.nl](mailto:stowa@stowa.nl).

Website: [www.stowa.nl](http://www.stowa.nl)

# OPTIMALISATIE WKK EN BIOGASBENUTTING

## INHOUD

	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Gebruikte informatie	2
1.4	Schaalgroottes	2
1.5	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>BEHEER EN BEDRIJFSVOERING WKK'S</b>	<b>3</b>
2.1	Inleiding en aanpak	3
2.2	Prestaties van bestaande WKK's	3
2.2.1	Elektrisch rendement	3
2.2.2	Thermisch rendement	4
2.2.3	Kosten per draaiuur (onderhoud)	4
2.2.4	Verhouding draaiuren op vollast en deellast	5
2.2.5	Stand der techniek	5
2.3	Ontwerp van een WKK-installatie	6
2.3.1	Spreiding biogasopbrengst en warmtevraag	6
2.3.2	Locatie	7

<b>2.4</b>	Bedrijfsomstandigheden van bestaande WKK's	7
2.4.1	Storingen	7
2.4.2	Samenstelling biogas	8
2.4.3	Siloxanen	8
2.4.4	Zwavel	10
2.4.5	Overige vervuiling	10
2.4.6	Gasreiniging	10
2.4.7	Emissie-eisen	11
2.4.8	(Aandacht voor) onderhoud	12
2.4.9	Dual-fuel	13
<b>3</b>	<b>BIOGASBENUTTINGSROUTES</b>	14
<b>3.1</b>	Inleiding en aanpak	14
<b>3.2</b>	Beschrijving scenario's	14
<b>3.3</b>	Uitgangspunten	16
3.3.1	Capaciteit	16
3.3.2	Gebruikte kentallen	18
3.3.3	Overig	19
<b>3.4</b>	Uitwerking biogasbenuttingsroutes	19
3.4.1	WKK route conventioneel (referentiescenario)	19
3.4.2	WKK route met ORC	22
3.4.3	WKK met aardgasbijstook	25
3.4.4	WKK route met gasreiniging	27
3.4.5	Brandstofcel	28
3.4.6	Opwerking biogas naar groen gas	32
3.4.7	Biogasbenutting voor transport	36
<b>3.5</b>	Biogas afzetten bij afnemer in de omgeving	37
<b>4</b>	<b>GEVOELIGHEIDSANALYSE</b>	38
<b>4.1</b>	E-rendement gasmotor	38
<b>4.2</b>	Verkoopprijs groen gas	39
<b>4.3</b>	Warmtevraag slibgisting	41
<b>4.4</b>	Hogere investeringskosten voor de WKK	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	43
<b>5.1</b>	Conclusies	43
<b>5.2</b>	Aanbevelingen	46
<b>6</b>	<b>LITERATUURLIJST</b>	48
	BIJLAGE	
1	VRAGENLIJST BEHEER EN BEDRIJFSVOERING WKK	49

# 1

## INLEIDING

### 1.1 AANLEIDING

Productie van biogas uit zuiveringsslib en effectieve benutting van dit biogas is belangrijk in het kader van het behalen van de doelstellingen van de MJA-3 energie afspraken van de sector afvalwaterzuiveringsbeheer en het klimaatakkoord van de waterschappen.

#### **KLIMAATAKKOORD (ONDERTEKEND IN 2010)**

De belangrijkste ambities van het klimaatakkoord tussen Unie van Waterschappen en Rijk zijn kort samengevat:

- 30% energie-efficiënter werken tussen 2005 en 2020
- 40% zelfvoorzienend door eigen duurzame energieproductie in 2020
- 30% minder uitstoot van broeikasgas tussen 1990 en 2020
- 100% duurzame inkoop in 2015

#### **MJA3 (ONDERTEKEND IN 2008)**

Het belangrijkste streven van MJA3 is 30% energie-efficiënter en zuiniger werken tussen 2005 en 2020. De maatregelen om dit te bereiken richten zich op procesefficiëntie, duurzame energie opwekking en ketenefficiëntie.

Uit het project “De Energiefabriek” is als onderzoeksvoorstel een studie voortgekomen naar de optimalisatie van biogasbenutting. De vraagstelling betreft de optimale route voor biogas voor bestaande en “groene weide” situaties en heeft betrekking op biogas voor:

- WKK installaties
- brandstofcel
- opwerken naar aardgaskwaliteit
- opwerken naar transportbrandstof
- voor industriële toepassingen

In deze rapportage zijn de resultaten van de studie naar optimalisatie van de WKK en de biogasbenutting beschreven.

### 1.2 DOELSTELLING

Doel van het onderzoek is vast te stellen welke mogelijkheden er zijn voor de benutting van bio-gas met de hoogst mogelijke opbrengst voor energie, tevens dienen de kosten en baten in beeld gebracht te worden. De verschillende routes (scenario's) voor biogasbenutting worden beoordeeld op energie opbrengst, duurzaamheid en kosten.

Een tweede doel van dit onderzoek is om handvatten aan te reiken voor procesoptimalisatie van bestaande WKK-installaties.

### 1.3 GEBRUIKTE INFORMATIE

Voor dit rapport zijn diverse informatiebronnen gebruikt. Een aantal rapporten rond de Energiefabriek zijn aangeleverd door de leden van de begeleidingscommissie. Ook is via internet en leveranciers benodigde informatie verzameld en is eigen Grontmij kennis gebruikt. Daarnaast is voor het verzamelen van informatie over het beheer en de bedrijfsvoering van WKK's een vragenlijst opgesteld die ingevuld is door een aantal leden van de begeleidingscommissie. De gebruikte informatie is in de tekst aangegeven en in hoofdstuk 6 is een literatuurlijst opgenomen.

### 1.4 SCHAALGROOTTES

Er is in dit rapport uitgegaan van drie schaalgroottes gebaseerd op de biogasproductie:

- Klein: 400.000 m<sup>3</sup> biogas per jaar (ca. 80.000 i.e.);
- Middel: 1.000.000 m<sup>3</sup> biogas per jaar (ca. 200.000 i.e.);
- Groot: 2.500.000 m<sup>3</sup> biogas per jaar (ca. 500.000 i.e.).

Deze schaalgroottes zijn een afspiegeling van de schaalgroottes in Nederland. In paragraaf 3.3.1 is de keuze voor deze schaalgroottes toegelicht.

### 1.5 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 wordt het beheer en de bedrijfsvoering van WKK's toegelicht. Vervolgens worden in hoofdstuk 2 verschillende biogasroutes beschreven en uitgewerkt op het vlak van netto energieopwekking, economie en duurzaamheid. Hoofdstuk 4 beschrijft de gevoeligheidsanalyse. Ten slotte zijn in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen gegeven. Hoofdstuk 6 bevat een lijst met gebruikte literatuur.

# 2

## BEHEER EN BEDRIJFSVOERING WKK'S

### 2.1 INLEIDING EN AANPAK

In dit hoofdstuk wordt informatie aangereikt over de prestaties en het functioneren van WKK's bij RWZI's. Dit is gebaseerd op de volgende informatie:

- Analyse van beschikbaar gesteld onderzoek bij waterschappen over huidige installaties en het functioneren van de bestaande WKK's;
- Aanvulling van deze gegevens met informatie verzameld door middel van een vragenlijst die onder de leden van de begeleidingscommissie is verspreid (zie Bijlage 1).
- Aanvulling van deze gegevens met kennis en ervaring beschikbaar bij Grontmij vanuit andere RWZI's;
- Invulling van lacunes via overleg met beheerders van RWZI's en fabrikanten van WKK's.

In dit hoofdstuk komt achtereenvolgens aan bod:

- Overzicht van de prestaties van de bestaande WKK's bij waterschappen
- Overzicht van de bedrijfsomstandigheden waaronder deze WKK's functioneren en een beschrijving van de invloed van deze omstandigheden op de prestaties.
- Visie op het ontwerp, beheer en de bedrijfsvoering van WKK-installaties.

Analoog aan de schaalgroottes voor de gistingen zijn ook drie schaalgroottes WKK aangehouden waarbij diverse onderwerpen worden uitgediept. Deze schaalgroottes zijn als volgt:

- 120 kWe;
- 300 kWe;
- 750 kWe.

Uiteraard is het bij de grotere vermogens ook mogelijk te kiezen voor een opstelling met meerdere motoren. In deze studie is ervan uitgegaan dat dat het geval is voor de 300 en 750 kWe varianten. Mede op basis hiervan zijn de rendementen van de WKK's en de investeringskosten geraamd.

### 2.2 PRESTATIES VAN BESTAANDE WKK'S

#### 2.2.1 ELEKTRISCH RENDEMENT

Onder het elektrisch rendement van een generatorset wordt verstaan het product van het mechanisch rendement van de gasmotor en het elektrisch rendement van de generator. Het elektrisch rendement van bestaande installaties is sterk afhankelijk van de leeftijd en onderhoudstoestand van de installatie. Rendementen variëren tussen de 25% (schatting) voor oudere installaties en bijna 40% voor nieuwe installaties.

Voor WKK-toepassingen worden speciale generatoren geleverd met een hoger rendement dan generatoren geschikt voor eilandbedrijf. Eilandbedrijf is de situatie dat één of meerdere gasmotoren de enige elektriciteitsvoorziening van een installatie (in dit geval een zuivering) zijn.

Er is dan dus geen koppeling tussen de elektrische installatie van de zuivering en het elektriciteitsnet. Aangezien eilandbedrijf in dit rapport niet wordt beschouwd, is hier het uitgangspunt aangehouden dat deze speciale generatoren niet worden gebruikt.

De grootte van gasmotor en generator zijn mede bepalend voor het rendement, waarbij het rendement stijgt met de grootte.

Voor de verschillende schaalgrootten zijn in onderstaande tabel gemiddelde mechanische en elektrische rendementen opgenomen van moderne gasmotor-generatorsets, gebaseerd op gegevens van verschillende fabrikanten van gasmotoren met vergelijkbare vermogens:

TABEL 2-1

RENDEMENTEN BIJ VERSCHILLENDE SCHAALGROOTTES

Vermogen WKK (kWe)	120	300	750
$\eta_{\text{Mechanisch}}$ (%)	39	40	42
$\eta_{\text{Elektrisch generator}}$ (%)	94	95	96
$\eta_{\text{Totaal}}$ (%)	37	38	40

### 2.2.2 THERMISCH RENDEMENT

Het maximaal haalbare thermisch rendement van bestaande installaties varieert tussen de 49% en 54%. Dit houdt in dat 49-54% van de toegevoerde energie in het biogas als mogelijk benutbare thermische energie vrijkomt, hetgeen niet wil zeggen dat deze energie in alle omstandigheden ook wordt benut.

In tegenstelling tot het elektrisch rendement neemt het thermisch rendement van een WKK-installatie over het algemeen toe bij deellastbedrijf (oftewel de verliezen nemen toe).

### 2.2.3 KOSTEN PER DRAAIUUR (ONDERHOUD)

De op RWZI's toegepaste grotere gasmotoren (> 60 kW) zijn meestal afgeleid van industriële motoren die ontworpen zijn voor een lange levensduur en lage toerentallen. Een grote revisiebeurt vindt doorgaans iedere 20.000 tot 30.000 draaiuren plaats.

Veel waterschappen hebben het onderhoud van de installatie ondergebracht bij een gespecialiseerde onderhoudsfirmas. De zaken die normaliter in een onderhoudscontract zijn opgenomen, zijn als volgt:

- Preventief onderhoud;
- Correctief onderhoud;
- Onderdelen (bougies etc.), originele reservedelen en olie;
- Groot onderhoud (revisies);
- Storingsrespons;
- Olie- en koelwateranalyses.

Eventueel horen hier ook nog bij:

- Machinebreukbeveiliging;
- Materiaal voor DeNOx-installatie (ureum).

Als richtbedrag voor het onderhoud van WKK-installaties door gespecialiseerde firma's worden de bedragen opgegeven zoals opgenomen in onderstaande tabel. Deze bedragen zijn gangbare marktprijzen, gebaseerd op gegevens van diverse fabrikanten die vergelijkbare vermogensgroottes op de markt brengen:

TABEL 2-2

## ONDERHOUDSKOSTEN

Vermogen WKK (kWe)	120	300	750
onderhoudskosten (in €/draaiuur excl. BTW)	3,-	4,-	8,-

De kosten per draaiuur zullen uiteraard stijgen wanneer de concentraties H<sub>2</sub>S, siloxanen of andere sporenelementen in het biogas toenemen. In extreme situaties kan het bijvoorbeeld mogelijk zijn dat de onderhoudsintervallen met een factor vier verkort moeten worden om de installatie in stand te houden.

Wanneer de concentraties sporenelementen bekend is, kan worden bepaald of de grenzen die worden gesteld door de (beoogde) motorenfabrikant niet worden overschreden. Hierna kan worden afgewogen of, en in welke vorm, siloxaanverwijdering financieel haalbaar is.

#### 2.2.4 VERHOUDING DRAAIUREN OP VOLLAST EN DEELLAST

In deellast nemen het mechanisch rendement van een gasmotor en elektrisch rendement van een generator af. Tegelijk hiermee neemt het thermisch rendement iets toe. Dit houdt in dat, bij een toepassing waarbij de WKK met name wordt geïnstalleerd om elektriciteit op te wekken en waarbij niet de restwarmte volledig kan worden benut, de grootte van de WKK zorgvuldig moet worden gekozen.

Bij het opvragen van rendementen bij fabrikanten moet worden nagegaan of deze rendementen zijn opgegeven bij bedrijfsomstandigheden waarbij de WKK-installatie voldoet aan de eisen zoals gesteld in de BEMS. Deellastbedrijf wordt over het algemeen toegestaan tot ongeveer 40 à 50% van vollast, echter veel fabrikanten garanderen het niet overschrijden van de emissie-eisen vaak pas vanaf een belasting van 50 tot 60%.

Ter illustratie is een belastingtabel opgenomen met de rendementen van een gasmotor van 265 kWm (mechanisch asvermogen) bij verschillende belastingssituaties (bron: MAN Rollo, koelwaterkoeling tot 50°C, Emissie-eisen volgens TÜV).

TABEL 2-3

## BELASTINGSSITUATIES GASMOTOR 265 KWM

Belasting (% vollast)	100	75	50
$\eta_{\text{Mechanisch}}$	40,5	39,2	37,7
$\eta_{\text{Elektrisch}}$	38,3	37,2	35,7
$\eta_{\text{Thermisch}}$	49,6	50,2	52,6
$\eta_{\text{Totaal}}$	87,9	87,4	88,3

#### 2.2.5 STAND DER TECHNIEK

Optimalisering van de verbranding en betere regelingen (voor bijvoorbeeld het afstemmen van gas/luchtverhouding op het methaangehalte of voor de ontsteking van het mengsel) zorgen nog steeds voor een gestage stijging van de behaalde rendementen. De afgelopen 15 jaar zijn de rendementen van gasmotoren gestegen van ongeveer 30% naar bijna 40%.

Voor gasmotoren vanaf 5 MW worden inmiddels al mechanische rendementen gehaald van bijna 51% (he = 48%). Uiteraard is dit formaat voor een RWZI niet relevant, maar dit illustreert wel het belang van schaalgrootte (over het algemeen geldt: hoe groter de motor, des te hoger het elektrisch rendement).



## 2.3 ONTWERP VAN EEN WKK-INSTALLATIE

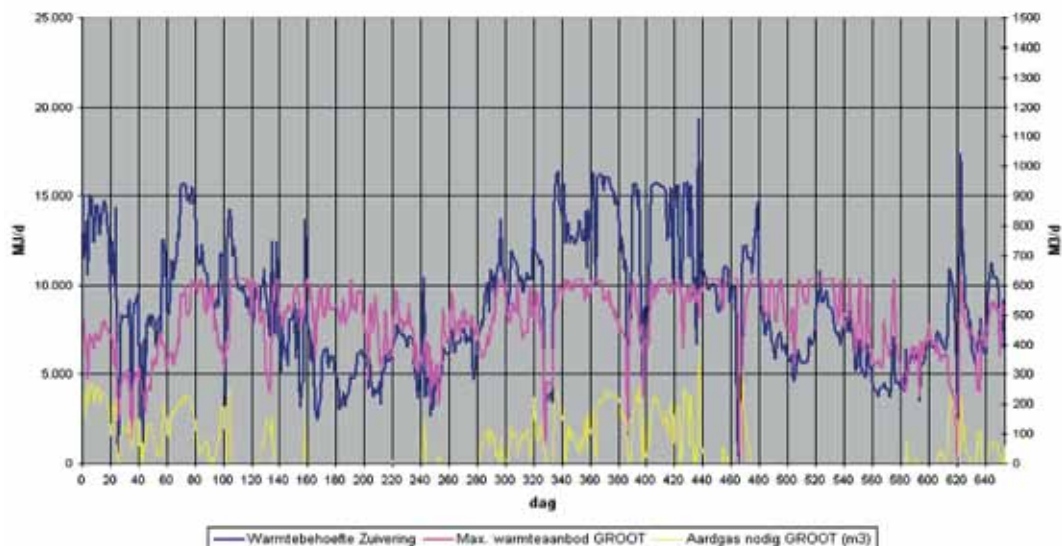
Bij het ontwerp van een WKK-installatie moet, onder andere, aandacht worden besteed aan de volgende zaken:

- de spreiding van de biogasopbrengst (hiervoor kan, indien beschikbaar, de historie van de gasdebietmetingen worden gebruikt);
- de gewenste dekkingsgraad (hoeveel van de totale biogasopbrengst moet kunnen worden ingezet);
- warmtevraag van de installatie;
- mogelijkheid om energie terug te leveren aan het net (bij een grotere elektriciteitsopbrengst dan het eigen verbruik van de RWZI);
- buffervolume van de gashouder (bepaalt de minimale bedrijfsduur per start, doorgaans wordt hier een volume voor aangehouden van 3 tot 5 uur maximale productie van de gisting);
- Gewenste/vereiste redundantie van de installatie (aantal motoren).

### 2.3.1 SPREIDING BIOGASOPBRENGST EN WARMTEVRAAG

Figuur 2-1 geeft een grafiek weer van de warmtebehoefte en de opgewekte warmte met het beschikbare biogas op de RWZI Dronten (2006 en 2007).

FIGUUR 2-1 WARMTEBEHOEFTE EN OPGEWekte WARMTE MET HET OP DE RWZI DRONTEN BESCHIKBARE BIOGAS IN 2006 EN 2007



In de figuur is te zien is dat er perioden zijn waar de door de WKK opgewekte warmte moet worden weggekoeld en dat er periodes zijn waarbij moet worden bijgestookt met aardgas in een CV-ketel.

Een en ander houdt in dat goed moet worden gelet op:

- voorkomen dat te veel aardgas moet worden bijgestookt om aan de warmtevraag van de RWZI te voldoen;
- voorkomen dat een te grote WKK wordt geselecteerd, waardoor de installatie te veel in deellast wordt bedreven.

### 2.3.2 LOCATIE

Een WKK-installatie kan worden opgesteld op verschillende locaties. Bij het aanpassen van een bestaande ruimte is het met name van belang veel aandacht te besteden aan ventilatie, geluid en beschikbare ruimte en toegang voor onderhoud.

Ter illustratie van de verschillende mogelijkheden die er zijn voor opstelling van een WKK-unit, zijn onderstaand nog enkele voorbeelden opgenomen.

FIGUUR 2-2 BUITENOPSTELLING VAN EEN NIEUWE WKK OP DE RWZI DRONTEN



FIGUUR 2-3 BINNENOPSTELLING VAN WKK OP RWZI DEN BOSCH (IN AANBOUW)



## 2.4 BEDRIJFSOMSTANDIGHEDEN VAN BESTAANDE WKK'S

### 2.4.1 STORINGEN

Het aantal storingen is over het algemeen goed te beperken door het uitvoeren van voldoende en regelmatig onderhoud. De aandacht die wordt besteed aan de dagelijkse onderhoudswerkzaamheden en het tijdig verrichten van gepland onderhoud is dan ook, naast een goed ontwerp, de meest bepalende factor voor het aantal en de ernst van storingen. Zie in dit kader ook paragraaf 2.4.8.

Met name het beperken van H<sub>2</sub>S in het biogas is van belang om verzuring van de smeerolie en lage-temperatuurcorrosie (LTC) in het uitlaatgassensysteem te voorkomen. Het is belangrijk om de uittrede temperatuur op 200 °C te houden. Een lagere temperatuur kan vorming van H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tot gevolg hebben. Het regelmatig analyseren van de smeerolie (alkaliniteit) is erg belangrijk: smeerolie wordt voorzien van zogenaamde 'dopes': alkalische toevoegingen om te voorkomen dat de zuurgraad van de olie niet te snel afneemt. Deze dopes kunnen het uiteindelijk verzuren van olie echter niet tegengaan.

De prestatie van een gasmotor is in grote mate afhankelijk van de staat van de motor: slijtage van lagers en lekkage van zuigerveren, kleppen en dergelijke hebben uiteraard een grote invloed op het rendement van een machine.

#### 2.4.2 SAMENSTELLING BIOGAS

Biogas is samengesteld uit verschillende afzonderlijke componenten. Het betreft daarbij hoofdcomponenten (CH<sub>4</sub> / CO<sub>2</sub>) en sporenstoffen. De samenstelling van het biogas is verschillend voor de diverse biogasproductie-installaties. De samenstelling voor de belangrijkste bestanddelen is weergegeven in Tabel 2-4:

TABEL 2-4: TYPISCHE SAMENSTELLING VAN BIOGAS (BRON: [HTTP://NL.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/BIOGAS](http://nl.wikipedia.org/wiki/Biogas))

Product	Molecuul formule	%
Methaan	CH <sub>4</sub>	60 (range 45-75)
Koolstofdioxide	CO <sub>2</sub>	35 (range 24-45)
Waterstofsulfide	H <sub>2</sub> S	0-2
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	0-2
Waterdamp	H <sub>2</sub> O	2-7

De hoofdcomponenten zijn noodzakelijk ter bepaling van de voor het fysieke motorbedrijf relevante brandstofeigenschappen (bijv. calorische waarde, verbrandingsluchtverhouding, verbrandingstemperatuur, laminaire vlamsnelheid, ontstekingsgrenzen, klopvastheid). Deze componenten worden gewoonlijk in Vol.% aangeduid. Bij sporenstoffen betreft het normaliter verontreinigingen die optreden in relatief kleine hoeveelheden (ppm's). In tegenstelling tot de effecten van de hoofdcomponenten worden de effecten van sporenstoffen pas na een bepaalde looptijd van de motor merkbaar. Deze effecten kunnen echter wel van grote invloed zijn op het onderhoud en de bedrijfszekerheid van installaties.

#### 2.4.3 SILOXANEN

De problematiek rondom één van de sporenstoffen, te weten siloxanen, verdient speciale aandacht wanneer het gaat om storingen en problemen met WKK-installaties op rioolwaterzuiveringen. Siloxanen zijn organische zuurstofverbindingen met silicium en komen voor in het afvalwater via de chemische, textiel- en levensmiddelenindustrie. Ook komen siloxanen veel voor in wasmiddel en shampoo. Siloxanen hebben een relatief laag kookpunt en verdampen bij de gisting van slib.

FIGUUR 2-4

AFZETTING OP WKK (RWZI ZEIST)



Bij het verbranden van siloxanen ontstaat kwarts: een harde afzetting van siliciumdioxide die zich hecht aan de inwendige onderdelen van motor en uitlaatgassensysteem. Hierdoor vervuilen sondes, vervuult de smeeroilie en ontstaat afzetting in verbrandingsruimten. Tevens is kwarts een thermische isolator. Als gevolg hiervan kunnen, onder andere, de volgende problemen ontstaan:

- een niet of moeilijk te regelen ontsteking;
- slechte koeling van de oppervlakken van verbrandingskamer en kleppen;
- harde verbrandingsproducten die schade veroorzaken aan bijvoorbeeld koppen, kleppen, veren en lagers;
- deactivering van een eventuele uitlaatgassenkatalysator.

De landelijk gemiddelde siloxaanconcentratie voor biogas uit gistinginstallaties van communaal RWZI-slib is in 2008 bepaald en ligt in de orde van grootte van 2 - 5 ppm (KIWA).

Sporen van vluchtige oxideerbare siliciumverbindingen in het biogas kunnen worden aangetoond doormiddel van een gasanalyse. Helaas is een gasanalyse relatief kostbaar en is het resultaat slechts een momentopname. Een indicatie van de mate waarin siloxanen bij bestaande installaties voor problemen (kunnen) gaan zorgen is snel te krijgen door oliemonsters te analyseren. Jenbacher, een bekende producent van gasmotoren, hanteert hiervoor bijvoorbeeld een berekening, waarmee een goede indicatie kan worden geconstateerd tussen het gehalte Si-verbindingen in het stookgas en het Siliciumgehalte in de afvalolie van de motor. Om dit te kunnen beoordelen, wordt er een verband gelegd tussen de verandering van het siliciumgehalte in de motorolie en de inzetduur hiervan.

De oplossing voor problemen met siloxanen is het reinigen van het aan de WKK toegevoerde gas om zo de siloxanen uit de gasstroom te verwijderen. Zie hiervoor paragraaf 2.4.6.

Het niet verwijderen van de siloxanen uit biogas kan grote gevolgen hebben voor het benodigde onderhoud: verviervoudiging van het onderhoud (kleine beurten, maar ook grote revisies!) is in de praktijk al meermalen voorgekomen.

Geadviseerd wordt om in alle gevallen de (opbouw van) siloxanen in de smeeroilie van gasmotoren te monitoren.

#### 2.4.4 ZWAVEL

Zwavel in biogas bestaat voornamelijk uit H<sub>2</sub>S. Dit is een schadelijk gas dat vanaf 1,6 ppm (MAC-waarde) gezondheidsproblemen veroorzaakt en bij concentraties boven 200 ppm dodelijk kan zijn. Tot 1 januari 2007 was de MAC-waarde 10 ppm. Sindsdien is deze verlaagd naar 1,6 ppm.

Daarnaast veroorzaakt H<sub>2</sub>S corrosie in leidingen en (motor)onderdelen van zowel blowers en WKK's als verwarmingsketels wanneer het in contact komt met water waardoor het zwavelzuur vormt. Verwijdering van zwavel kan bijvoorbeeld door middel van actiefkoolfiltratie.

#### 2.4.5 OVERIGE VERVUILING

Van grote invloed op het aantal en de aard van storingen is de gaskwaliteit: zaken als stof, zwavel, en siloxanen kunnen een groot nadelig effect hebben op de levensduur van de installatie en de onderhoudskosten.

Ten aanzien van vocht is het van belang om te zorgen dat goede condensafscheiders zijn geïnstalleerd om te voorkomen dat zich vocht ophoopt in leidingwerk. Het frequent starten en stoppen van motoren wordt afgeraden om te voorkomen dat zich vocht in de olie ophoopt (corrosie): het is zaak dat de motor na elke start de kans krijgt om enige tijd (uren) op bedrijfstemperatuur te werken. Het vochtgehalte in de olie wordt doorgaans ook geanalyseerd.

De maximaal toegestane concentratie sporenstoffen in het biogas bij intrede in de gasstraat van een gasmotor varieert per fabrikant. De reden hiervoor is vaak dat fabrikanten er voor kiezen om een veilige marge aan te houden ter voorkoming van problemen tijdens de levensduur van de machine.

##### 2.4.5.1 Vervuiling in deellast-situaties

Een verbrandingsmotor gaat bij gebruik in deellast vervuilen. Deze vervuiling uit zich als roetvorming en koolaanslag op kleppen, uitlaatgassensysteem en turbo. Het continu bedienen van een motor in deellast heeft een nadelig effect op levensduur en onderhoud en moet dus worden vermeden.

In situaties waarbij er te weinig gas beschikbaar is om alle aanwezige motoren van een installatie op vollast te kunnen bedienen, is het daarom raadzaam om de belasting van het systeem te rouleren tussen de verschillende motoren. Dit houdt in dat bijvoorbeeld één motor 10 minuten op vollast draait en de andere op deellast, waarna de op deellast draaiende machine de volledige belasting op zich neemt voor de volgende 10 minuten. Dit proces herhaalt zich na een in te stellen interval. Deze werking wordt 'load sharing' genoemd.

Als alternatief op load sharing, of indien slechts één gasmotor aanwezig is, is een aan-uit regeling van de gasmotor(en) een optie. Hierbij is het echter van groot belang om na te gaan hoe lang de minimale bedrijfsduur na elke start moet zijn om de gegarandeerde onderhoudsintervallen van een fabrikant niet te overschrijden. Geadviseerd wordt om een start-stop regeling altijd uit te voeren in overleg met de gasmotorleverancier.

#### 2.4.6 GASREINIGING

Doormiddel van gasreiniging kunnen eventueel zwavel, siloxanen, ammoniak en stof uit het biogas worden verwijderd. Welke componenten worden verwijderd hangt af van het type gasreiniging.

Gasreiniging is mogelijk met twee methodes:

- 1 Reiniging door middel van een actief-koolfilter (AK-filter);
- 2 Reiniging door middel van condensatie van de schadelijke delen uit het gas middels diepkoeling.

De voordelen van AK-filtratie zijn met name de lagere kosten bij kleinere gasdebieten (investering, milieubelasting, energie en onderhoud).

Nadelen van deze techniek zijn dat niet alle elementen (volledig) uit het gas verwijderd worden en dat bij hogere concentraties vervuiling de filtervulling (te) vaak vervangen moet worden. Het type actief kool bepaalt welke componenten worden verwijderd en in welke mate.

Diepkoeling wordt, over het algemeen, toegepast wanneer AK-filtratie niet of onvoldoende reinigingscapaciteit oplevert. Voordeel is dat de verwijdering van siloxanen altijd plaatsvindt: er vind geen verzadiging (en doorslag) van filtermateriaal en dergelijke plaats, ook niet bij hoge inlaatconcentraties. Dit is bij actief kool wel het geval.

In onderstaande tabel is een overzicht weergegeven van investerings- en onderhoudskosten voor gasreinigingssystemen (bron: Gas Treatment Services; uitgaande van 8000 draaiuren):

TABEL 2-5 KOSTEN GASREINIGINGSINSTALLATIES (OPGAVE LEVERANCIERS; INCL. BTW)

Schaalgrootte	Investering Aktief-kool (€)	Vervanging filtervulling (€/j)	Investering diepkoeling (€)	Onderhoud + energie diepkoeling (€/j)
45 m <sup>3</sup> /h	47.600,-	7.100,-	167.000,-	9.000,-
115 m <sup>3</sup> /h	95.200,-	12.000,-	179.000,-	12.800,-
285 m <sup>3</sup> /h	154.700,-	25.000,-	300.000,-	22.000,-

#### 2.4.7 EMISSIE-EISEN

Gasmotoren vielen tot voor kort onder het Besluit emissie-eisen stookinstallaties B (BEES-B). Op 1 april 2010 is het Bees B ingetrokken en vervangen door het Besluit emissie-eisen middelgrote stookinstallaties (BEMS). Hierin zijn eisen opgenomen voor de NO<sub>x</sub>-, SO<sub>2</sub>- en stofemissies. Voor gasmotorinstallaties worden ook eisen aan de emissie van onverbrande koolwaterstoffen gesteld.

Voor nieuwe installaties, dat zijn installaties die na 1 april 2010 in bedrijf worden genomen, gelden de emissie-eisen direct. Op een aantal uitzonderingen na worden de emissie-eisen voor bestaande installaties op 1 januari 2017 van kracht. Tot die datum blijven de eisen in het Besluit emissie-eisen stookinstallaties B (Bees B) of de vergunning van kracht. Een ondergrens aan het vermogen is niet gesteld.

Voor toepassing van het BEMS is een informatieblad beschikbaar waarin de verschillende aspecten nader zijn toegelicht en uitgewerkt. Met behulp van BEMS-digitaal kan worden vastgesteld of de emissies van een stookinstallatie onder het BEMS vallen en welke emissie-eisen er gelden [<http://www.infomil.nl>]. Aangezien het BEMS duidelijk is afgekaderd en strenger is dan de NeR wordt de BEMS gesteld als emissieplafond voor bepaalde verontreinigingen wanneer aan het gebruik van het biogas voor de gezochte toepassing verder geen aanvullende eisen worden gesteld.

De eisen van BEMS zijn strenger dan de emissie-eisen in de ons omringende landen. Om deze reden kan het voorkomen dat een gasmotor, die doorgaans ontwikkeld wordt voor een bredere markt, af fabriek niet aan de Nederlandse eisen voldoet. Mogelijke aanvullende maatregelen om alsnog aan BEMS te voldoen zijn dan bijvoorbeeld het toepassen van een katalysator of

DeNOx-installatie: een katalysator waarbij met behulp van een hulpstof, zoals bijvoorbeeld ureum, NO<sub>x</sub> wordt omgezet in stikstof en water.

Hierbij is het belangrijk te letten op eventuele sporenelementen in het gas, aangezien deze een nadelige invloed kunnen hebben op de levensduur van een nageschakelde installatie. Of een denox-installatie nodig is, hangt af van het fabrikaat en het type motor.

#### 2.4.8 (AANDACHT VOOR) ONDERHOUD

Het belangrijkste voor het behoud van een voltooide WKK-installatie is dagelijks onderhoud: bekendheid krijgen en houden met de installatie is van groot belang om veranderingen snel op te merken. Enkel op deze manier worden zaken zoals lekkages, trillingen of (bij)geluiden waargenomen. Van belang hierbij is dat het personeel de installatie regelmatig bezoekt om bekend te worden met de 'normale' situatie. Hierdoor worden afwijkingen van deze normale situatie eerder opgemerkt. Het schoonhouden van de installatie en het tijdig verrichten van klein onderhoud (smeren etc.) maakt hier onderdeel van uit.

Het zeer regelmatig controleren en registreren van proceswaarden wordt sterk geadviseerd. Het is belangrijk om niet alleen gebruik te maken van automatische registratie van waarden (bijvoorbeeld via het BBS), maar vooral de waarden 'in het veld' te controleren. Hierdoor wordt tevens een ronde gemaakt langs de gehele installatie. Op deze manier worden ook zaken waargenomen die niet van afstand zichtbaar zijn (bijgeluiden, geur, trillingen, lekkages, etc.) en kan men een gevoel krijgen voor de normale bedrijfsomstandigheden, waardoor afwijkingen eerder worden opgemerkt en tijdig kan worden ingegrepen. Op deze manier kunnen stilstand en grote onderhoudskosten worden verminderd.

Het veranderen van proceswaarden van de installatie kan het gevolg zijn van een veranderende bedrijfstoestand, maar kan ook duiden op een defect. Een verhoging van het vermogen van deellast naar vollast, bijvoorbeeld, heeft zowel een stijging van het gasdebiet als van de uitlaatgastemperatuur tot gevolg. Een vervuild luchtfilter heeft echter ook deze symptomen, maar leidt niet tot een verhoogd vermogen en is dus een ongewenste situatie. Het verschil hiertussen wordt echter alleen opgemerkt als de proceswaarden regelmatig worden gecontroleerd en geregistreerd.

Registratie van onderhoud is tevens van belang om trends te kunnen ontdekken (meerdere malen zelfde klacht duidt vaak op een onderliggend probleem). Een onderhoudsbeheerssysteem kan hierbij van grote ondersteunende waarde zijn. Wel wordt hierbij opgemerkt dat een onderhoudsbeheerssysteem over het algemeen slechts na enige tijd zijn waarde gaat bewijzen: de eerste tijd is men enkel bezig met het vullen van het systeem met data, voordat deze data kunnen worden benut. Tot zo'n onderhoudsbeheerssysteem kan ook het regelmatig (bijv. jaarlijks) laten uitvoeren van een gasanalyse van het biogas behoren.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van een onderhoudscontract is het van groot belang dat de beheerder van een installatie controleert of bij vervanging van onderdelen originele reserveonderdelen worden gebruikt: het is voor een onderhoudspartij soms goedkoper om 'B-merk'-onderdelen te installeren, echter dit kan een groot effect hebben op de levensduur.

Vóór regulier onderhoud aan de WKK's wordt over het algemeen de gashouder zo ver mogelijk leeggedraaid, om deze tijdens stilstand te kunnen vullen. Op deze manier hoeft zo min mogelijk gas te worden afgefakkeld.

#### **2.4.9 DUAL-FUEL**

Een dual-fuel motor is gebaseerd op het principe van een dieselmotor. De motor gebruikt gas als hoofdbrandstof waarbij aan het begin van de arbeidsslag een kleine hoeveelheid dieselolie (ongeveer 6% van de totale energiehoeveelheid) gebruikt wordt voor de ontsteking van het gas.

Het grootste voordeel van een dual-fuel systeem, te weten een hoger rendement, komt met name naar voren bij een lager methaangehalte in het gas dan bij veel zuiveringen het geval is. Tevens blijkt het lastig te zijn de emissie-eisen te halen bij dual-fuel motoren en blijkt in de praktijk dat bij het ouder worden van de installaties het oliegebruik toeneemt en het rendement af.

Om deze redenen wordt dual-fuel niet vaak meer toegepast.



# 3

## BIOGASBENUTTINGSROUTES

### 3.1 INLEIDING EN AANPAK

In dit hoofdstuk zijn voor iedere biogasbenuttingsroute (voortaan route genoemd) drie indicatoren uitgewerkt op basis van de rapportages en informatie die is verzameld. Waar nodig is verdere literatuurstudie gedaan wat in voorkomende getallen bij iedere route wordt vermeld. Voor iedere route zijn de volgende indicatoren berekend:

- 1 Netto-energieopbrengst: de energieopbrengst die het resultaat is van de benutting van het biogas, ten opzichte van de energie-inhoud van het biogas zelf. De energiebesparing bestaat bijvoorbeeld uit vermeden aardgasinkoop op de zuivering voor de slibverwarming en verwarming van gebouwen, uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie door de elektriciteitsproductie van de WKK (gasmotor; gasmotor met ORC of brandstofcel), aardgasbesparing bij de eindgebruiker door levering van groengas en/of brandstofbesparing bij de eindgebruiker door levering van bio-CNG, gecomprimeerd groen gas met een hoog methaangehalte (98%). De netto-energieopbrengst is hier gedefinieerd als het deel van de energie-inhoud van het geproduceerde biogas dat ook daadwerkelijk wordt benut: totale netto-besparing op primaire energie ten opzichte van de energie-inhoud van het geproduceerde biogas;
- 2 Duurzaamheid: de reductie van broeikasgasemissies door de besparing op aardgas of primaire energiedragers minus de CO<sub>2</sub>-emissies ten gevolge van het energieverbruik in de verschillende processtappen, vergeleken met de CO<sub>2</sub>-emissiereductie die zou worden gerealiseerd als al het geproduceerde biogas direct als aardgas zou zijn ingezet: totale CO<sub>2</sub>-emissiereductie door vermeden aardgas- of andere primaire energie ten opzichte van de energie-inhoud van het geproduceerde biogas;
- 3 Economie: Berekening van een eenvoudige terugverdientijd (investeringskosten gedeeld door jaarlijkse netto-opbrengst)

Door voor iedere route bovengenoemde indicatoren op dezelfde wijze te berekenen ontstaat een goede vergelijkbaarheid op deze aspecten van de verschillende routes.

Doorrekening geschiedt voor iedere route voor drie schaalgroottes (zie paragraaf 3.3), welke een representatieve doorsnede vormen voor de biogasproductie en -benutting bij de waterschappen in Nederland.

### 3.2 BESCHRIJVING SCENARIO'S

Er is voorgesteld om zes scenario's uit te werken, deze zijn schematisch weergegeven in Figuur 3-1:

- 1 WKK route conventioneel (referentiescenario)  
Hierin is de directe route van biogasproductie naar warmte- en elektriciteitsproductie met een gasmotor opgenomen. In een variant hierop die hier ook zal worden onderzocht, wordt brandstoftoevoeging (aardgas) toegevoegd om de gasmotor optimaal, continu op vollast, te kunnen laten draaien. Dit is scenario 1b.

## 2 WKK route met ORC

Hierin is de directe route van biogasproductie naar warmte- en elektriciteitsproductie met een gasmotor in combinatie met een ORC (Organic Rankine Cycle) opgenomen. Dit scenario benut de (rest)warmte van de gasmotor voor elektriciteitsproductie.

## 3 Brandstofcel

Als alternatief voor de gasmotor is in dit scenario de brandstofcel opgenomen. Hierbij is vooral gekeken naar de zogenaamde molten carbonate brandstofcel omdat deze in staat is methaan intern om te zetten naar waterstof, de uiteindelijke brandstof voor de brandstofcel.

## 4 Opwerking biogas naar groen gas

In dit scenario wordt het biogas opgewerkt tot aardgaskwaliteit (groen gas) en vervolgens geïnjecteerd in het aardgasnet.

## 5 Biogasbenutting voor transport

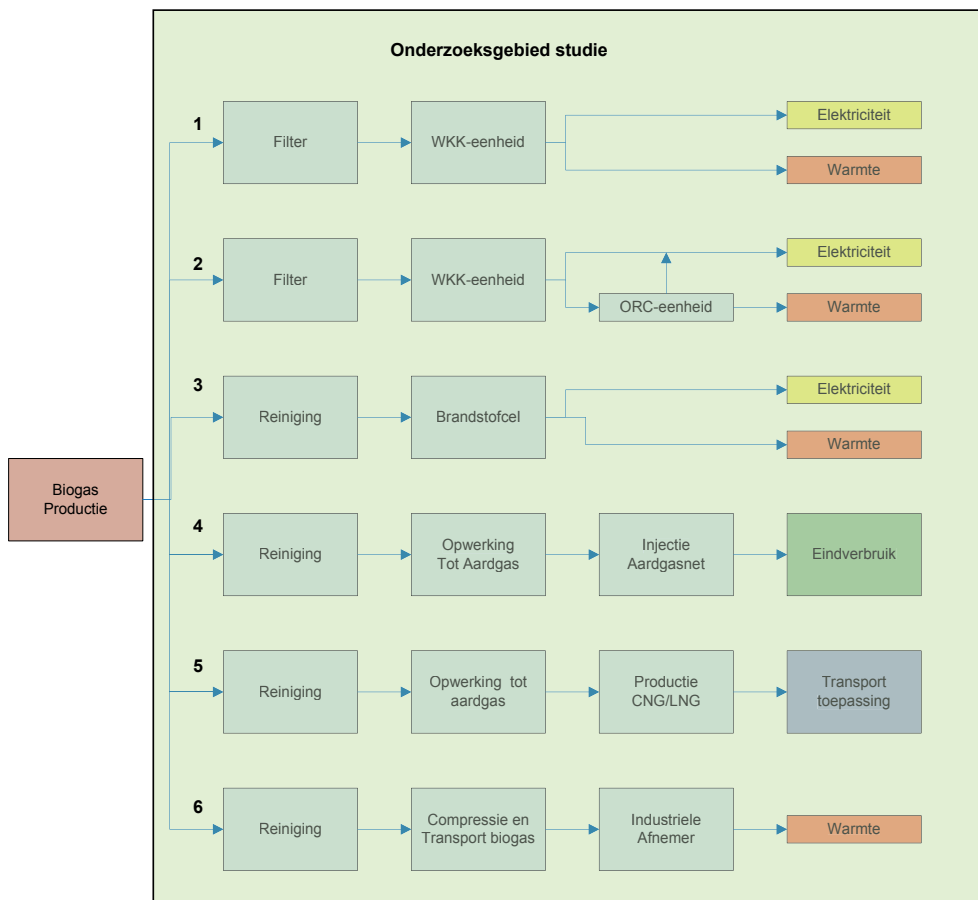
Dit scenario richt zich op de benutting van biogas voor transport. Dit kan als gecompriemd gas (CNG of CBG) of als vloeibaar gas (LNG of LBG). Het biogas zal hierbij worden opgewerkt naar een hoog methaangehalte wat aantrekkelijker is voor de toepassing voor transport dan aardgas.

## 6 Biogas inzetten voor warmte bij afnemer in de omgeving

Het laatste scenario onderzoekt de route waarbij het gereinigde, maar niet opgewerkte biogas direct wordt ingezet bij een (industriële) afnemer in de omgeving. Dit scenario is uiteindelijk niet doorgerekend omdat niet kon worden vastgesteld aan wat voor gebruiker geleverd zou kunnen worden onder welke voorwaarden en voor welke vergoeding voor de warmte. In plaats van uitwerking van dit scenario is een WKK-variant met aardgasbijstook doorgerekend.

FIGUUR 3-1

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE ZES SCENARIO'S



### 3.3 UITGANGSPUNTEN

#### 3.3.1 CAPACITEIT

Op basis van de CD rom behorende bij het rapport Inventarisatie Biogas RWZI's (ref 1, Agent-schapNL, 2010), zijn de volgende drie biogasproductiehoeveelheden geselecteerd:

- Klein: 400.000 m<sup>3</sup> biogas per jaar (ca. 80.000 i.e.);
- Middel: 1.000.000 m<sup>3</sup> biogas per jaar (ca. 200.000 i.e.);
- Groot: 2.500.000 m<sup>3</sup> biogas per jaar (ca. 500.000 i.e.).

De keuze voor deze capaciteiten is hieronder toegelicht. Elk van de hoeveelheden heeft een eigen haalbaarheid (energieopbrengst, duurzaamheid, economie) voor de verschillende bio-gasroutes die uitgewerkt worden en geven een goed beeld van het grote scala aan capaciteiten beschikbaar in Nederland.

##### **KLEIN**

Op basis van de data zijn Figuur 3-2 en Figuur 3-3 gegenereerd. Uit Figuur 3-2 blijkt dat ongeveer 40% van alle gistingstanks een biogasproductie hebben van 500.000 m<sup>3</sup> biogas/jaar of lager. Daarnaast blijken de meeste installaties een omvang te hebben van circa 500.000 m<sup>3</sup> biogas/jaar (26%). Wanneer gekeken wordt naar het aandeel op de totale jaarlijkse biogaspro-ductie leveren deze gistingstanks samen ongeveer 7% van de hoeveelheid biogas die jaarlijks wordt geproduceerd (zie Figuur 3-3). Dit betekent dat er relatief veel gistingstanks zijn van een 'lagere capaciteit' (ongeveer 400.000 m<sup>3</sup>/jaar), maar dat deze op de totale biogasproductie een klein aandeel hebben.

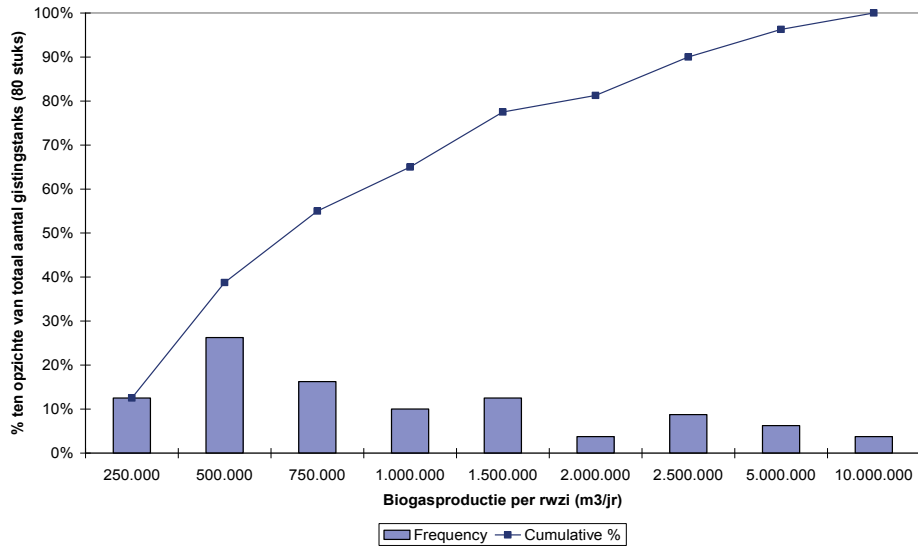
##### **MIDDEL**

Een aanzienlijk deel van de gistingstanks (ongeveer 65%, zie Figuur 3-2) heeft een productie van 1 miljoen of lager, dit is ongeveer 28% van de totale hoeveelheid biogas die jaarlijks wordt geproduceerd (geproduceerd (zie Figuur 3-3). Daarnaast blijkt uit Figuur 3-2 dat ongeveer 22% van de gistingstanks een productie heeft tussen 750.000 en 1.500.000 m<sup>3</sup>/jaar.

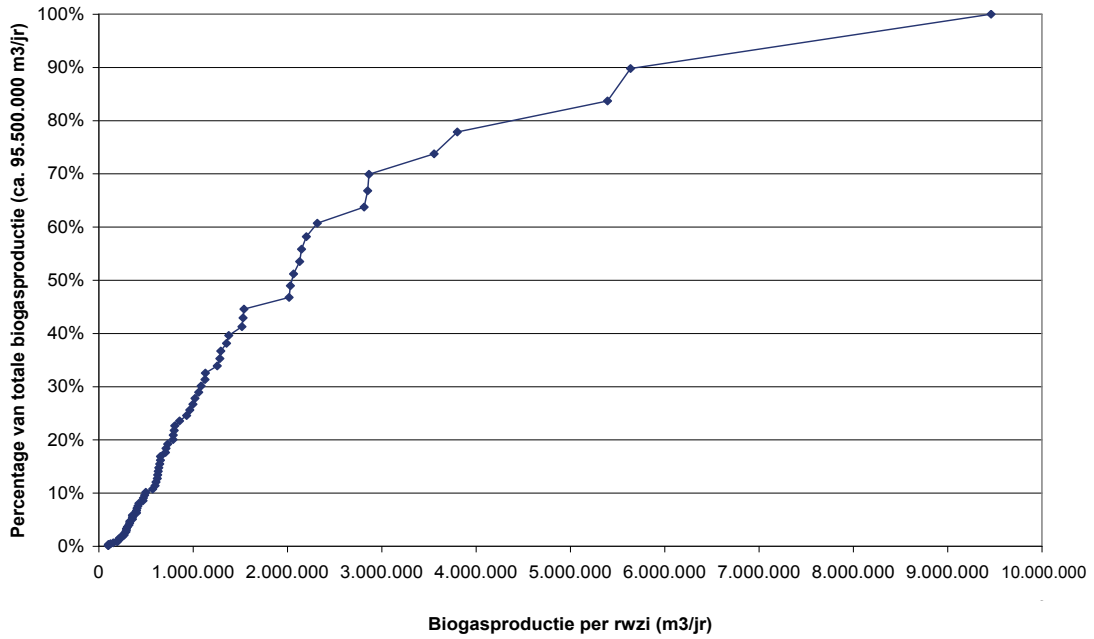
##### **GROOT**

Ook blijkt uit de figuren dat ongeveer 90% van de gistingstanks een productie heeft van 2,5 miljoen of lager. De capaciteit tussen 2 en 5 miljoen m<sup>3</sup> biogas per jaar bestaat uit 15% van de gistingstanks en zorgen voor 30% van de totale biogasproductie in Nederland. Dit betekent dat er relatief weinig gistingstanks van deze grootte aanwezig zijn, maar dat deze wel zorgen voor een aanzienlijk deel van de biogasproductie.

FIGUUR 3-2 VERDELING BIOGASPRODUCTIE PER RWZI TEN OPZICHT VAN HET TOTAAL AANTAL GISTINGSTANKS



FIGUUR 3-3 AANDEEL VAN DE TOTALE JAARLIJKSE BIOGASPRODUCTIE AFGEZET TEGEN DE BIOGASPRODUCTIE PER RWZI



### 3.3.2 GEBRUIKTE KENTALLEN

De volgende kentallen zijn gebruikt voor de berekeningen. Deze kentallen zijn ook gebruikt in eerdere rapporten binnen het project De Energiefabriek en komen overeen met de kentallen in het rapport “Energie-onder-een-Noemer”(ref. 4):

• Energie-inhoud			
• Elektriciteit	3,6	MJ/kWh	
• Elektriciteit	9,0	MJ <sub>primair</sub> /kWh (40% rendement centrale)	
• Biogas	23,3	MJ <sub>primair</sub> /Nm <sup>3</sup>	
• Aardgas	31,65	MJ <sub>primair</sub> /Nm <sup>3</sup>	
• Diesel	42,7	GJ <sub>primair</sub> /ton	
• Rendement HR-CV	100	%	
• WKK (eventueel met ORC)			
• Rendement WKK			
• Elektrisch	34 - 37	% (afhankelijk van capaciteit)	
• Thermisch	50	%	
• Rendement WKK met ORC			
• Elektrisch	42	%	
• Thermisch	45	%	
• Benuttingsgraad elektriciteit uit WKK	100	%	
• Benuttingsgraad warmte uit WKK		50 % (voor gebouwen en slibgisting)	
• Naar fakkel (klein; middel; groot)		12%; 10%; 5%	
• Onverbrand biogas in gasmotor	1%		
• Opwerking biogas naar groen gas			
• Energieverbruik opwerkingsinstallatie	0,22	kWh/m <sup>3</sup> biogas	
• Gas van aardgaskwaliteit uit biogas	70	%	
• Opwerking biogas naar brandstof			
• Energieverbruik opwerking naar LBG	0,45	kWh/m <sup>3</sup> biogas	
• Energieverbruik LBG compressie tov CNG	0,5	kWh/m <sup>3</sup> biogas	
• CO <sub>2</sub> emissie			
• CO <sub>2</sub> emissie elektriciteit:	0,67	kg CO <sub>2</sub> /kWh	
• CO <sub>2</sub> emissie aardgas	1,8	kg CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup>	
• CO <sub>2</sub> emissie diesel	2,6	kg CO <sub>2</sub> /ltr	
• Equivalente CO <sub>2</sub> emissie van methaan	20,9	kg CO <sub>2</sub> /kg	
• Prijzen:			
• Elektriciteit inkoop	0,11	€/kWh	
• Aardgas inkoop	0,50	€/Nm <sup>3</sup>	
• ENDEX gasprijs	0,24	€/Nm <sup>3</sup> (incl. BTW; zie ook par. 3.4.6)	
• Groen gas verkoop met SDE+	0,341	€/Nm <sup>3</sup> (incl. BTW; zie ook par. 3.4.6)	
• Opslag groen gas certificaten	0,024 - 0,072	€/Nm <sup>3</sup>	
•		(incl. BTW; zie ook par. 3.4.6)	
• Bio-CNG verkoop	0,60	€/Nm <sup>3</sup> (incl. BTW; zie ook par. 3.4.7)	
• Warmte verkoop		Zeer afhankelijk van lokale situatie	
• Rente	5	%	
• Afschrijvingstermijn	15	jaar, voor alle installaties.	

Alle hierna genoemde investeringskosten zijn inclusief BTW en inclusief een factor 1,6 voor onvoorzien, risico-opslag, projectmanagement en toezicht tijdens de realisatie e.d. Aan de onderhouds- en beheerskosten zoals die door leveranciers zijn aangegeven is alleen BTW toegevoegd. Ook de prijzen voor elektriciteit en aardgas zijn incl. BTW.

### 3.3.3 OVERIG

Om de verschillende aspecten van energieopbrengst en –verbruik goed en evenwichtig in beeld te brengen voor de verschillende scenario's is de volgende afbakening gehanteerd:

- Voor ieder scenario vormt de productie van ruw biogas zoals het uit de vergister komt het startpunt.
- In iedere vervolgstap (reiniging; opwerking; op druk brengen c.q. vloeibaar maken; eindgebruik) is het energieverbruik en emissies (afval; emissies naar lucht en water) meegenomen;
- Bij het eindverbruik (brandstof in WKK; benutting als aardgas; transportbrandstof e.d.) zijn de rendementen en emissies met de besparing aan primaire energie die wordt gerealiseerd vergeleken met de daarbij behorende CO<sub>2</sub>-emissies;
- Als referentiescenario is de momenteel meest gangbare route gehanteerd: biogasbenutting in een WKK met elektriciteit en warmtebenutting op de RWZI.

## 3.4 UITWERKING BIOGASBENUTTINGSROUTES

### 3.4.1 WKK ROUTE CONVENTIONEEL (REFERENTIE SCENARIO)

Het geproduceerde biogas wordt in dit scenario via een WKK omgezet in elektrische energie en warmte. Alle elektriciteit wordt ingezet op de zuivering. De warmte wordt gedeeltelijk benut voor verwarming van het slib en gebouwen. De uitgangspunten voor de berekeningen, voor zover nog niet opgenomen in paragraaf 3.3, zijn gegeven in Tabel 3-1.

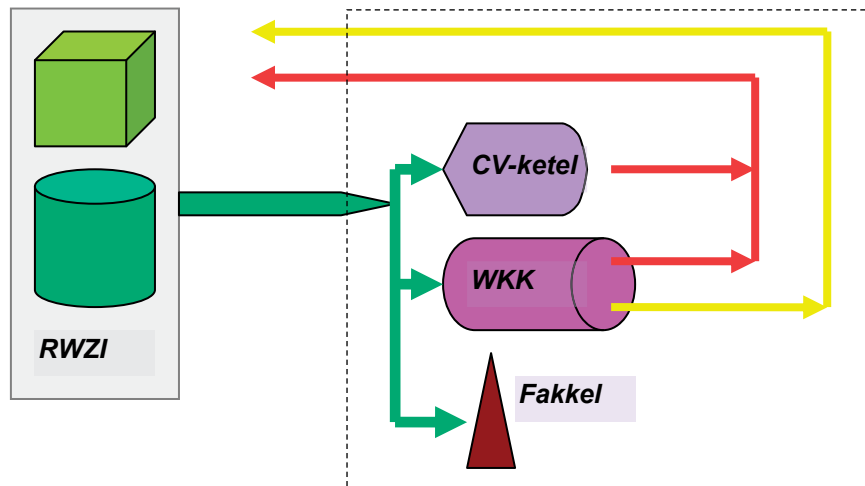
Er is van uitgegaan dat bij een steeds hogere biogasproductie het rendement van de WKK ook hoger wordt. Dit omdat een grotere WKK doorgaans een hoger rendement kan realiseren. Daarnaast kan met 2 WKK's beter ingespeeld worden op de gasproductie en de energievraag, zodat de motoren vaker in een gunstig bereik draaien.

TABEL 3-1 UITGANGSPUNTEN SCENARIO

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Aantal WKK's	1x 120 kW	1 x 300 kW of 1 x 125 en 1x 175 kW	2x 375 kW
Elektrisch rendement WKK	34 %	35 %	37 %
Thermisch rendement WKK	50 %	50 %	50 %
Afgevakeld percentage biogas t.o.v. biogasproductie	12 %	10 %	5 %
Warmte nodig voor gisting en gebouwen t.o.v. warmteproductie	50 %	50 %	50 %
Type biogasreiniging	geen	geen	geen

FIGUUR 3-4

SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 1: REFERENTIESCENARIO: CONVENTIONELE WKK



Ten gevolge van de bedrijfsvoering van de WKK en bijvoorbeeld stilstand in verband met onderhoud kan een deel van de tijd het biogas niet worden ingezet en moet het worden afgefakkeld. Er is van uitgegaan dat dit ongeveer 10% van het geproduceerde biogas is (CBS-gegevens). De in de WKK geproduceerde elektriciteit wordt volledig en de warmte wordt gedeeltelijk (50%) benut. Een beperkt deel van het biogas wordt via de CV-ketel voor verwarming van slib en gebouwen ingezet, vooral op die momenten dat de WKK niet in bedrijf is door onderhoud.

Alleen de daadwerkelijk nuttig ingezette energie uit de in de WKK geproduceerde elektriciteit en warmte ligt ten grondslag aan de energieopbrengst. De berekende netto-energieopbrengst van scenario 1 komt boven de 1 uit voor de grootste capaciteit vanwege de uitgespaarde primaire energie bij de elektriciteitsproductie samen met de uitgespaarde aardgasbehoefte voor warmte. De energieopbrengst is het hoogst voor de hoogste capaciteit van de gasmotor vanwege het hogere rendement van de gasmotor (37%). De opbrengst valt iets lager uit voor de kleinere capaciteiten omdat daar een iets lager rendement voor de gasmotor is toegepast.

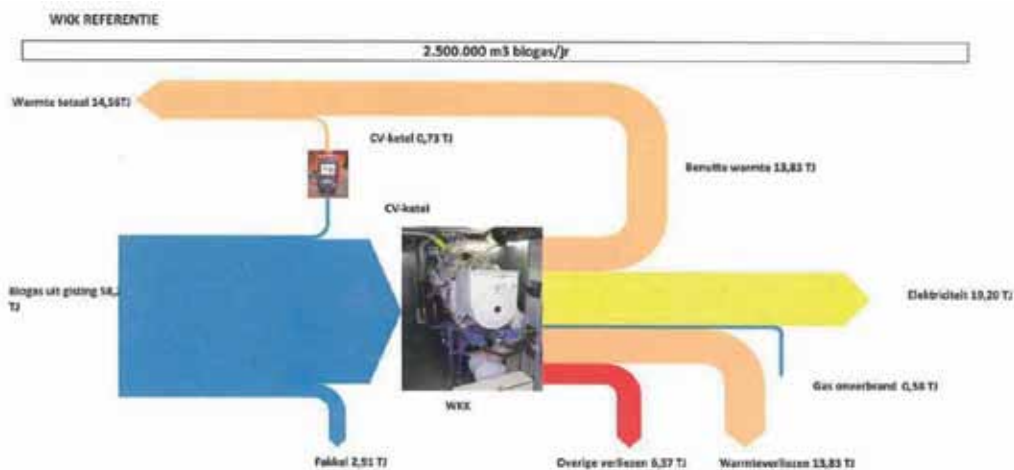
TABEL 3-2

ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ/jaar):	9,32	23,30	58,25
Methaanslip (TJ/jaar)	0,08	0,21	0,55
Naar fakkelt (TJ/jaar)	1,12	2,33	2,91
Via CV-ketel (TJ/jaar)	0,12	0,29	0,73
Benutting elektriciteit (TJ/jaar)	2,42	6,51	19,20
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	2,33	5,83	14,56
Uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	6,05	16,28	47,99
Netto primaire energieopbrengst (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	8,38	22,11	62,55
<b>Energie indicator</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>1,07</b>

De gegevens in Tabel 3-2 zijn eveneens samengevat in onderstaand sankey-diagram (volgende pagina).

FIGUUR 3-5 SANKEY DIAGRAM CONVENTIONELE WKK ROUTE



De CO<sub>2</sub>-emissiereductie wordt berekend op basis van de aan de RWZI teruggeleverde elektriciteit en warmte en de daardoor uitgespaarde CO<sub>2</sub>-emissies bij aardgasinzet en elektriciteitsopwekking. Ook wat betreft duurzaamheid scoort de referentieroute goed vanwege de uitgespaarde CO<sub>2</sub>-emissies bij de elektriciteitsproductie.

TABEL 3-3 DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ/jaar):	9,32	23,30	58,25
CO <sub>2</sub> -emissiereductie bij volledige inzet als aardgas:	530	1.325	3.313
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)	2,42	6,51	19,20
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ/jaar):	2,33	5,83	14,56
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	133	331	828
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. vermeden elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	450	1.212	3.572
CO <sub>2</sub> -emissie equivalenten ten gevolge van methaanslip (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	25	63	158
Totaal CO <sub>2</sub> -emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	557	1.480	4.242
<b>Duurzaamheid:</b>	<b>1,05</b>	<b>1,12</b>	<b>1,28</b>

De economie van de referentieroute is uiteraard het beste voor de grootste capaciteit. Voor de kleinste capaciteit wordt een terugverdientijd van bijna 10 jaar berekend, uitgaande van de hier genoemde kostenniveaus.

TABEL 3-4 ECONOMIE

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten (€)	€ 325.000	€ 650.000	€ 1.300.000
Rente (€/jaar)	€ 16.250	€ 32.500	€ 65.000
Onderhoud en beheer (€/jaar)	€ 57.120	€ 61.880	€ 88.060
Totaal jaarlijkse kosten (€/jaar)	€ 73.370	€ 94.380	€ 153.060
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop (€/jaar)	€ 36.810	€ 92.020	€ 230.060
Opbrengsten vermeden elektriciteitsinkoop (€/jaar)	€ 73.920	€ 199.030	€ 586.520
Totaal jaarlijkse inkomsten (€/jaar)	€ 37.360	€ 196.670	€ 663.520
<b>Economie (terugverdientijd in jaar):</b>	<b>8,70</b>	<b>3,31</b>	<b>1,96</b>



### 3.4.2 WKK ROUTE MET ORC

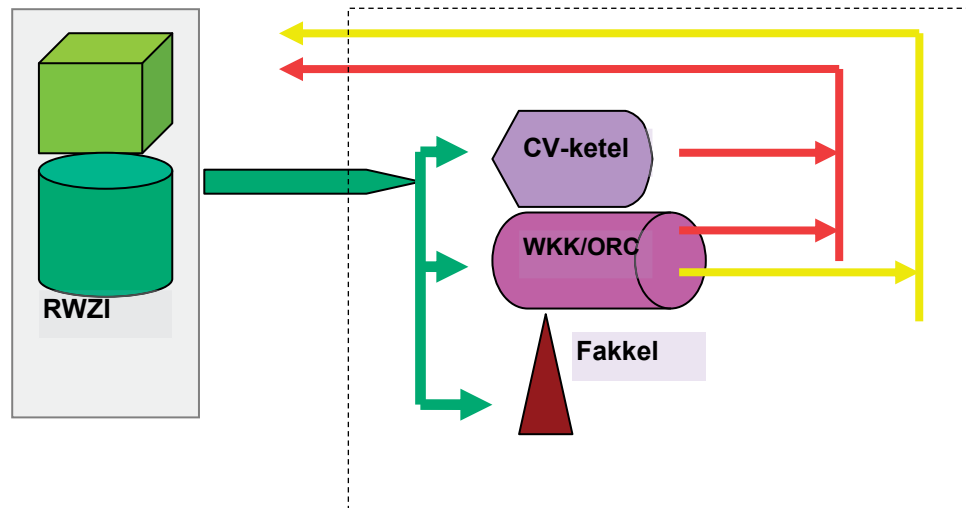
Het belangrijkste verschil met de referentieroute betreft het toevoegen van een ORC waarmee extra elektriciteit wordt geproduceerd uit de rookgassen van de gasmotor. Daardoor zijn er minder warmteverliezen en vindt hergebruik van warmte plaats. Het overall rendement neemt daarmee toe met ca. 5%-punten. Deze route is alleen mogelijk vanaf de grootste capaciteit van 2.500.000 m<sup>3</sup> biogas/jaar. Er zijn geen gegevens gevonden voor ORC's voor kleinere installaties dan ca. 1 MWe.

Een Organic Rankine Cycle (ORC) is een manier om warmte om te zetten in elektriciteit.

De ORC is vergelijkbaar met een stoomturbine installatie die bestaat uit een turbine, een generator en een pomp. In plaats van stoom, wordt gebruik gemaakt van een organische vloeistof. Door de ORC na te schakelen aan een gasmotor of gasturbine kan met de warmte in de uitlaatgassen van de gasmotor, die warmer is dan 350°C, extra elektriciteit worden geproduceerd, bij een vergelijkbare biogasinput. Gasmotor en ORC dienen normaliter als combinatie te worden aangeschaft en geïnstalleerd omdat ze nauw op elkaar moeten worden afgestemd.

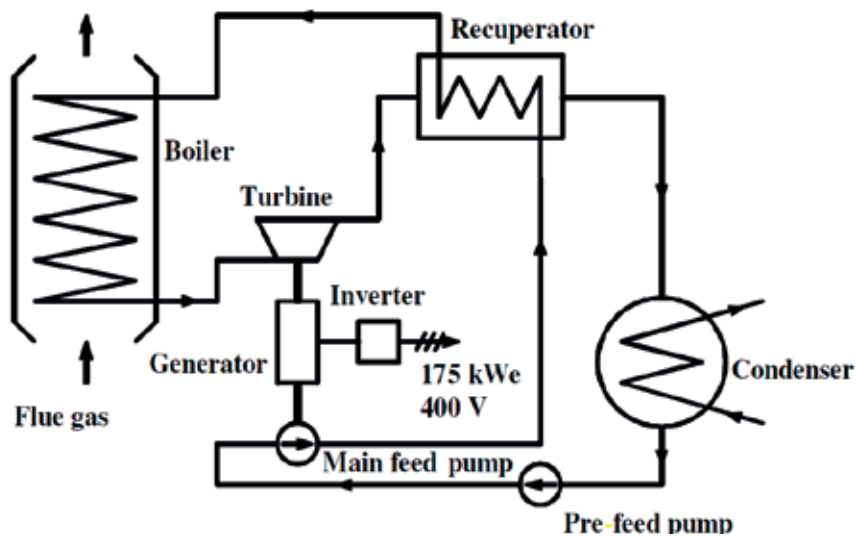
FIGUUR 3-6

SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 2: WKK MET ORC



FIGUUR 3-7

PRINCIPE VAN ORC (COGEN PROJECTS, 2004)



## HET ORC PRINCIPE

Het principe van het ORC systeem is weergegeven in Figuur 3-7: uitlaatgassen van motoren of gasturbines, de verbrandingsgassen van de verbranding van bio - of restbrandstoffen of fluïda met restwarmte uit industriële processen worden door een verdamper geleid. Het vloeibare werkmedium (tolueen) verdampt bij een druk van ca 32 bar. De onstane licht oververhitte toluendamp expandeert in de turbine, die rechtstreeks een hoogtoeren generator aandrijft. Het gas wordt na expansie in een recuperator verder afgekoeld in tegenstroom met het vloeibare toluene dat naar de verdamper stroomt. Vervolgens wordt het zo afgekoelde gas in een condensor vloeibaar gemaakt. Een op de as van de turbogenerator gemonteerde pomp brengt dan de vloeistof weer op druk. Via de recuperator stroomt het naar de verdamper, waarna de gehele cyclus weer opnieuw doorlopen wordt. Afhankelijk van de temperatuur in verdamper en condensor is het maximale rendement van het ORC proces ca. 20 %. (Cogen Projects, 2004)

De uitgangspunten voor de berekeningen, voor zover nog niet opgenomen in paragraaf 3.3, zijn gegeven in Tabel 3-15.

TABEL 3-5

## UITGANGSPUNTEN SCENARIO WKK MET ORC

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Elektrisch rendement WKK + ORC			42 %
Thermisch rendement WKK + ORC			45 %
Afgefakkeld percentage biogas t.o.v. biogasproductie			10 %
Warmte nodig voor gisting en gebouwen t.o.v. warmteproductie			50 %
Type biogasreiniging			geen

De energieopbrengst is hier uiteraard hoger dan voor de referentieroute. De ORC voegt extra elektriciteitsproductie toe waarmee primaire energie wordt bespaard.

TABEL 3-6

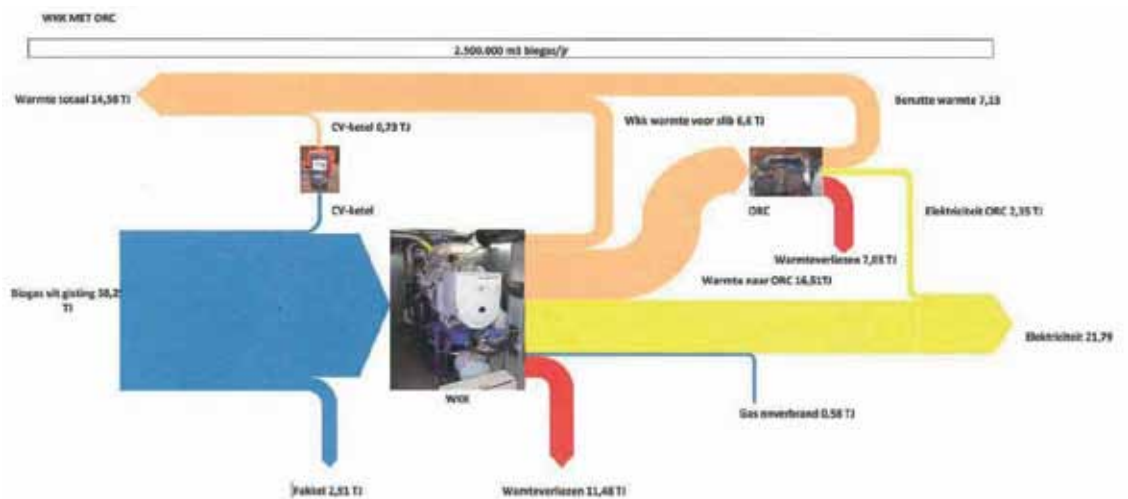
## ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):			58,25
Methaanslip (TJ/jaar)			0,55
Naar fakkel (TJ/jaar)			2,91
Via CV-ketel (TJ/jaar)			0,73
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)			21,79
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ <sub>primair</sub> /jaar):			14,56
Uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie (TJ <sub>primair</sub> /jaar):			54,47
Netto primaire energieopbrengst (TJ <sub>primair</sub> /jaar):			69,04
<b>Energie indicator</b>			<b>1,19</b>

De resultaten in bovenstaande tabel zijn ook samengevat in onderstaand sankey diagram.

FIGUUR 3-8

## SANKEY DIAGRAM WKK MET ORC ROUTE



Ook de CO<sub>2</sub>-emissiereductie in deze route is hoger dan in de referentieroute louter omdat er meer elektriciteit wordt geproduceerd.

TABEL 3-7

## DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):			58,25
CO <sub>2</sub> -emissiereductie bij volledige inzet als aardgas:			3.313
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)			21,79
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ/jaar):			14,56
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):			828
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. vermeden elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jaar)			4.055
CO <sub>2</sub> -emissie equivalenten tgv methaanslip (ton CO <sub>2</sub> /jaar)			158
Totaal CO <sub>2</sub> -emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jaar)			4.725
<b>Duurzaamheid:</b>			<b>1,43</b>

De terugverdientijd van de WKK-ORC route is wat langer dan in de referentiesituatie omdat de totale investeringskosten hoger zijn. De opbrengsten zijn ook ongeveer vergelijkbaar hoger.

TABEL 3-8

ECONOMIE			
Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten (€)			€ 1.825.000
Rente (€/jaar)			€ 91.250
Onderhoud en beheer (€/jaar)			€ 114.240
Totaal jaarlijkse kosten (€/jaar)			€ 205.490
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop (€/jaar)			€ 230.060
Opbrengsten vermeden elektriciteitsinkoop (€/jaar)			€ 665.780
Totaal jaarlijkse inkomsten (€/jaar)			€ 690.350
<b>Economie (terugverdientijd in jaar)</b>			<b>2,64</b>

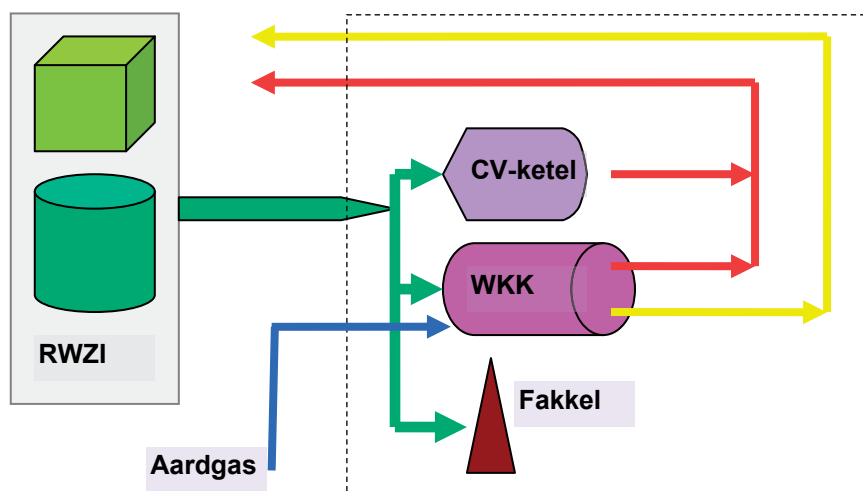
### 3.4.3 WKK MET AARDGASBIJSTOOK

Het geproduceerde biogas wordt in dit scenario volledig via een WKK omgezet in elektrische energie en warmte, aangevuld met aardgas wanneer er onvoldoende biogas beschikbaar is om op vollast te kunnen draaien. De WKK draait daardoor in feite altijd op vollast, 8.000 uur per jaar. Alle elektriciteit wordt ingezet op de zuivering. De warmte wordt gedeeltelijk benut voor verwarming van het slib en gebouwen.

Er is van uitgegaan dat bij een steeds hogere biogasproductie het rendement van de WKK ook hoger wordt. In deze variant is daarom het rendement van de WKK 1 procentpunt hoger aangenomen dan in de conventionele WKK variant, route 1.

FIGUUR 3-9

SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 3: WKK MET AARDGASBIJSTOOK



Verder gelden voor deze route dezelfde aannames en uitgangspunten als voor de referentieroute. Alle geproduceerde elektriciteit wordt op de zuivering ingezet. Voor slibverwarming en verwarming van gebouwen is dezelfde hoeveelheid warmte nodig. De warmteverliezen nemen dus iets toe. Omdat ook het biogas nu met een iets hoger rendement wordt ingezet neemt de energieopbrengst in deze variant toe.

TABEL 3-9

## ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Aardgasbijstook (TJ/jaar)	0,64	1,66	4,47
Methaanslip (TJ/jaar)	0,10	0,25	0,63
Via CV ketel (TJ/jaar)	0,12	0,29	0,73
Naar fakkel (TJ/jaar)	1,12	2,33	2,91
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)	3,05	8,04	22,45
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	2,33	5,83	14,56
Uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	7,64	20,10	56,13
Netto primaire energieopbrengst (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	9,32	24,27	66,22
<b>Energie indicator</b>	<b>1,00</b>	<b>1,04</b>	<b>1,14</b>

De CO<sub>2</sub>-emissiereductie wordt berekend op basis van de aan de RWZI terug geleverde elektriciteit en warmte en de daardoor uitgespaarde CO<sub>2</sub>-emissies bij aardgasinzet en elektriciteitsopwekking. Ook wat betreft duurzaamheid scoort deze route beter dan de referentieroute vooral vanwege het iets hogere e-rendement van de WKK en de daardoor extra uitgespaarde CO<sub>2</sub>-emissies bij de elektriciteitsproductie.

TABEL 3-10

## DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Methaanslip	0,10	0,25	0,63
CO <sub>2</sub> -emissiereductie bij volledige inzet als aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	530	1.325	3.313
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	96	237	574
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. vermeden elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	568	1497	4178
CO <sub>2</sub> -emissie equivalenten ten gevolge van methaanslip (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	27	68	170
Totaal CO <sub>2</sub> -emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	637	1666	4582
<b>Duurzaamheid:</b>	<b>1,20</b>	<b>1,26</b>	<b>1,38</b>

De economie van deze route is nagenoeg even goed als voor de referentieroute. Omdat enige kosten voor het mogelijk maken van aardgasbijstook zijn geraamd komt de terugverdientijd iets langer uit omdat blijkbaar de iets hogere inkomsten uit besparing op elektriciteitsinkoop hier net niet tegenop wegen.

TABEL 3-11

## ECONOMIE

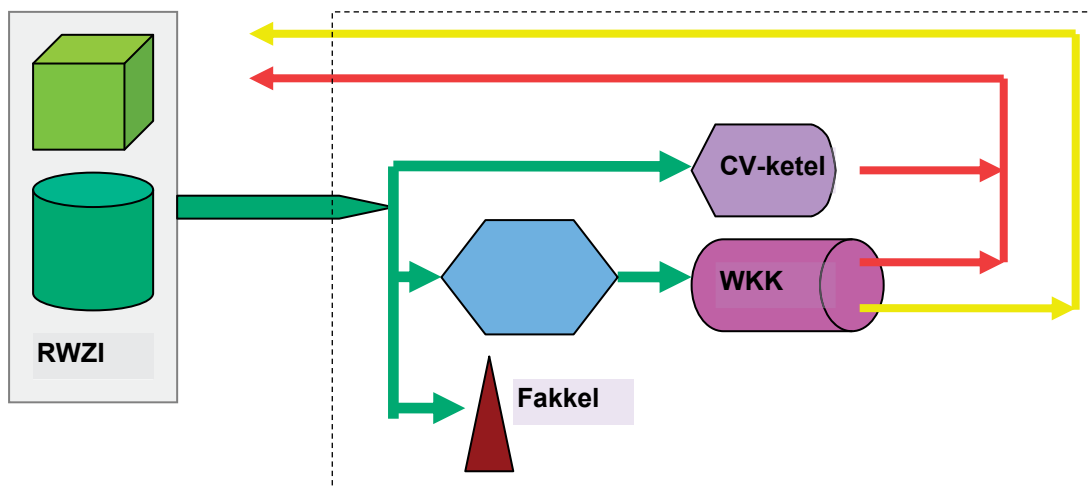
Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten (€)	€ 350.000	€ 700.000	€ 1.370.000
Rente (€/jaar)	€ 17.500	€ 35.000	€ 68.500
Onderhoud en beheer (€/jaar)	€ 57.120	€ 61.880	€ 88.060
Totaal jaarlijkse kosten (€/jaar)	€ 74.620	€ 96.880	€ 156.560
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop (€/jaar)	€ 26.670	€ 65.810	€ 159.420
Opbrengsten vermeden elektriciteitsinkoop (€/jaar)	€ 93.330	€ 245.720	€ 685.990
Totaal jaarlijkse inkomsten (€/jaar)	€ 45.380	€ 214.650	€ 688.850
<b>Economie (terugverdientijd in jaar):</b>	<b>7,71</b>	<b>3,26</b>	<b>1,99</b>

### 3.4.4 WKK ROUTE MET GASREINIGING

Als variant op bovenstaande, conventionele WKK route is gekeken naar dezelfde route waarbij ook gasreiniging wordt ingezet om de problemen van siloxanen te voorkomen. Daarnaast zijn er ervaringen bij waterschappen waarbij in de gasmotor hogere rendementen werden bereikt met gereinigd biogas. Daarnaast leidt gasreiniging ook tot minder onderhoud van de gasmotoren en in ieder geval tot een verminderd risico van vroegtijdig groot onderhoud. Omdat geen kwantitatieve gegevens beschikbaar waren over de verminderde onderhoudskosten, kon hiermee in de onderstaande berekeningen (nog) geen rekening gehouden.

Gasreiniging vraagt enige extra elektrische energie waardoor het rendement enigszins wordt beïnvloed wat ook effect heeft op de duurzaamheid.

FIGUUR 3-10 SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 4: CONVENTIONELE WKK MET GASREINIGING



De netto-energieopbrengst is enigszins lager dan voor de referentieroute vanwege het elektriciteitsgebruik van de gasreiniging. Dit heeft een vergelijkbare invloed op de duurzaamheid omdat nu iets minder elektriciteit wordt geleverd en er dus iets minder besparing is op de primaire brandstofinzet bij elektriciteitsproductie.

TABEL 3-12

#### ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Methaanslip (TJ/jaar)	0,09	0,23	0,58
Naar fakkel (TJ/jaar)	1,12	2,33	2,91
Via CV ketel (TJ/jaar)	0,12	0,29	0,73
Elektriciteitsverbruik gasreiniging (TJ/jaar)	0,04	0,11	0,27
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)	2,42	6,51	19,20
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	2,33	5,83	14,56
Uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	5,94	16,01	47,31
Netto primaire energieopbrengst (TJ <sub>primair</sub> /jaar):	8,27	21,84	61,88
<b>Energie indicator</b>	<b>0,89</b>	<b>0,94</b>	<b>1,06</b>

De CO<sub>2</sub>-emissiereductie wordt berekend op basis van de aan de RWZI teruggeleverde elektriciteit en warmte. Ook wat betreft duurzaamheid scoort deze route goed vanwege vooral de uitgespaarde CO<sub>2</sub>-emissies bij de elektriciteitsproductie.

TABEL 3-13 DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
CO <sub>2</sub> -emissiereductie bij volledige inzet als aardgas:	530	1.325	3.313
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)	2,42	6,51	19,20
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ/jaar):	2,33	5,83	14,56
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	133	331	828
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. vermeden elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	450	1.212	3.572
CO <sub>2</sub> -emissie equivalenten tgv methaanslip (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	25	63	158
Totaal CO <sub>2</sub> -emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	557	1.480	4.242
<b>Duurzaamheid:</b>	<b>1,05</b>	<b>1,12</b>	<b>1,28</b>

De economie van de route met gasreiniging is uiteraard wat slechter dan voor de referentieroute. Voor de kleinste capaciteit wordt een terugverdientijd ruim 20 jaar berekend, uitgaande van de hier genoemde kostenniveaus. De economie is nog steeds goed te noemen voor de grotere capaciteiten.

TABEL 3-14 ECONOMIE

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten (€)	€ 465.000	€ 850.000	€ 1.600.000
Rente (€/jaar)	€ 23.250	€ 42.500	€ 80.000
Onderhoud en beheer (€/jaar)	€ 65.450	€ 71.400	€ 103.530
Totaal jaarlijkse kosten (€/jaar)	€ 88.700	€ 113.900	€ 183.530
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop (€/jaar)	€ 36.810	€ 92.020	€ 230.060
Opbrengsten vermeden elektriciteitsinkoop (€/jaar)	€ 73.920	€ 199.030	€ 586.520
Totaal jaarlijkse inkomsten (€/jaar)	€ 22.030	€ 177.150	€ 633.050
<b>Economie (terugverdientijd in jaar):</b>	<b>21,11</b>	<b>4,80</b>	<b>2,53</b>

De verwachting is dat toepassing van gasreiniging voor de WKK een positieve invloed zal hebben op de bedrijfsvoering en vooral op vermindering van onderhoudskosten. De WKK zal minder uit bedrijf zijn waardoor er ook minder biogas afgefakkeld hoeft te worden. Er zijn momenteel echter onvoldoende praktijkgegevens beschikbaar zodat deze mogelijke effecten niet konden worden meegenomen in de analyse.

### 3.4.5 BRANDSTOFCEL

In plaats van een WKK wordt in deze route een brandstofcel ingezet voor productie van elektriciteit en warmte. De verschillen zitten vooral in het hogere rendement naar elektriciteit van de brandstofcel en de (veel) hogere investeringskosten en jaarlijkse kosten ten gevolge van de korte levensduur (5 jaar) van de stacks, de kern van de brandstofcel.

Een brandstofcel is een elektrochemisch apparaat, dat chemische energie rechtstreeks omzet in elektriciteit. Omdat er geen thermodynamische cyclus wordt doorlopen, heeft de brandstofcel in vergelijking tot bestaande energie opwekkers daardoor een hoger theoretisch elektrisch rendement van 35 -60%.

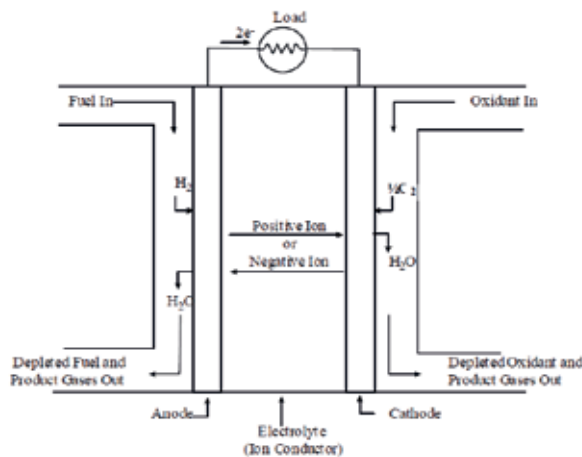
### HET PRINCIPE VAN DE BRANDSTOFCEL

Brandstofcellen bestaan uit twee elektrodes, een anode en een kathode, gescheiden door een elektrolyt laag. Pure waterstof wordt aan één kant van het systeem geïntroduceerd (anode), waar het wordt gescheiden in protonen en elektronen (het elektrolyt geleidt protonen, echter geen elektronen). Door elektrochemische reacties ontstaat een spanningsverschil tussen de anode en de kathode. Door een stroomkring aan te brengen kan elektrische energie onttrokken worden aan de reacties. Eén enkele brandstofcel produceert ca 0,7 V. Om voldoende voltage te krijgen worden er meerdere brandstofcellen bij elkaar geplaatst en elektrisch in serie geschakeld. Dit heet dan een brandstofcel stack. Deze combinatie levert naast elektriciteit water en warmte. Brandstofcellen produceren geen geluid (geen bewegende delen) en ze zijn vrijwel emissievrij. De warmte komt vrij als twee warme/hete afgassen en kan, afhankelijk van de temperatuur en condities, nuttig aangewend worden. Op deze manier kan een brandstofcel als WKK worden gebruikt.

De “brandstof” van een brandstofcel is in het algemeen waterstof van een koolwaterstof bron, zoals aardgas, propaan gas of methanol. Ook biogas is in principe geschikt als brandstof dankzij de methaan. De grootste verschillen tussen het gebruik van biogas en aardgas zijn:

- Het biogas moet worden gereinigd, o.a. verwijdering van waterdamp, deeltjes,  $H_2S$  en ammonia.
- De compositie van het biogas (methaan en kooldioxide gehalte) varieert.
- (BTG, 2007).

FIGUUR 3-11: PRINCIPE VAN EEN BRANDSTOFCEL



Voor stationaire toepassingen lijkt de zogenaamde Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) het meest in aanmerking te komen voor gebruik met biogas. De SOFC functioneert op een hoge temperatuur van 800 tot 1000 °C zodat het omzetten van methaan naar waterstof (reforming) met warmte in de brandstofcel kan plaatsvinden.

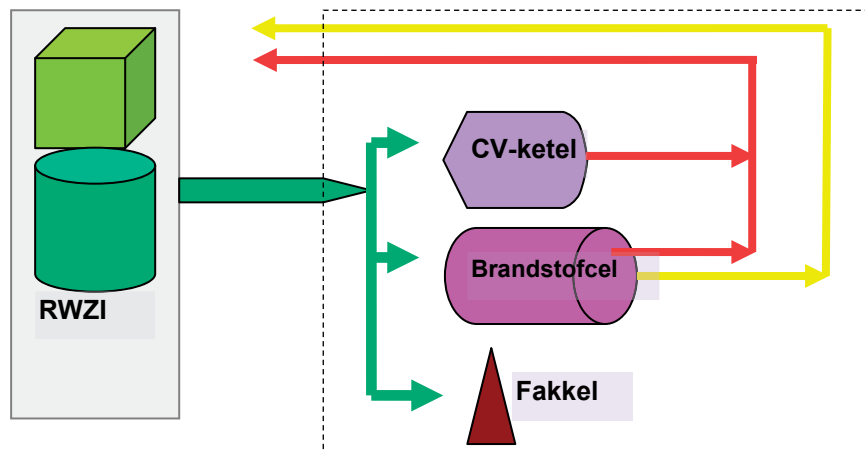
Zwavel en siloxanen moeten vooraf worden verwijderd, van de overige componenten heeft de SOFC vanwege de hoge temperatuur geen last.

Door de hoge temperatuur van de afgassen kunnen deze nog voor verschillende doeleinden worden gebruikt: absorptiekoeling, ORC, stoomturbine en vervolgens lage temperatuurtoepassingen als stoom, warmwatervoorziening en/of ruimteverwarming.



FIGUUR 3-12

SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 5: BRANDSTOFCEL



Door de hoge temperatuur moeten zeer hoogwaardige materialen worden gebruikt en is de constructie zeer complex. De investeringskosten zijn vooralsnog erg hoog. In demonstratieprojecten is een goede levensduur aangetoond, een beperkte rendementsreductie (minder dan 0,1% per 1.000 draaiuren). Er zijn SOFC demonstratieprojecten met meer dan 80.000 draaiuren zonder merkbare rendementsverslechtering.

TABEL 3-15

UITGANGSPUNTEN SCENARIO

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Aantal brandstofcellen	1x140 kWe	1x350 kWe	1x800 kWe
Elektrisch rendement brandstofcel	50 %	50 %	50 %
Thermisch rendement brandstofcel	45 %	45 %	45 %
Afgefakkeld percentage biogas t.o.v. biogasproductie	5%	5%	5 %
Warmte nodig voor gisting en gebouwen t.o.v. warmteproductie	60%	60%	60 %

De energieopbrengst voor de route met brandstofcel is beter dan de routes 1 en 2 omdat het elektrisch rendement van de brandstofcel hoger is (50%). In de praktijk wordt dit rendement overigens nog nauwelijks gerealiseerd.

TABEL 3-16

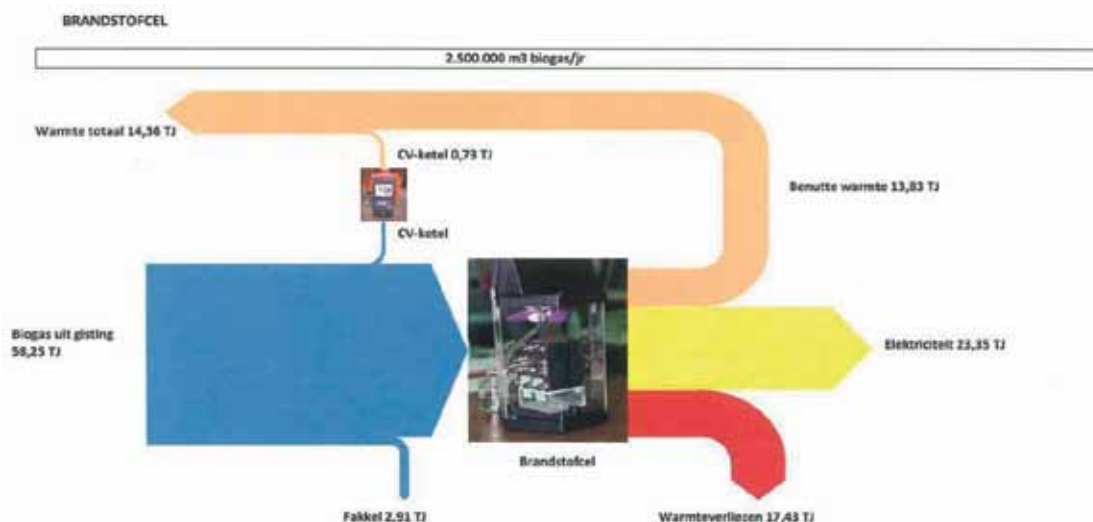
ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Biogas naar fakkels (TJ/jaar)	0,47	1,17	2,91
Biogas naar CV ketel (TJ/jaar)	0,12	0,29	0,73
Methaanslip (TJ/jaar)	0,09	0,23	0,58
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)	4,37	10,92	27,30
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ/jaar):	2,33	5,83	14,56
Uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie (TJ/jaar):	10,92	27,30	68,26
Netto energieopbrengst bij elektriciteit op basis van rendement elektriciteitsproductie (TJ/jaar):	13,25	33,13	82,82
<b>Energie indicator</b>	<b>1,42</b>	<b>1,42</b>	<b>1,42</b>

De resultaten voor deze route zoals aangegeven in Tabel 3-16 zijn ook weergegeven in onderstaand sankey diagram.

FIGUUR 3-13

SANKEY DIAGRAM BRANDSTOFCEL ROUTE



Vanwege het hogere rendement is ook de duurzaamheid beter. De vermeden CO<sub>2</sub>-emissie bij de elektriciteitsproductie is hoger dan bij de gasmotor varianten.

TABEL 3-17

DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
CO <sub>2</sub> -emissiereductie bij volledige inzet als aardgas:	530	1.325	3.313
Benutting elektriciteit (Tj/jaar)	4,37	10,92	27,30
CO <sub>2</sub> -emissie equivalenten tgv methaanslip (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	25,32	63,31	158,27
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ/jaar):	2,33	5,83	14,56
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	133	331	828
CO <sub>2</sub> -emissiereductie t.g.v. vermeden elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	813	2.033	5.082
Totaal CO <sub>2</sub> -emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jaar)	920	2.301	5.752
<b>Duurzaamheid:</b>	<b>1,74</b>	<b>1,74</b>	<b>1,74</b>

De economie van de brandstofcel is nog slecht. Onder Onderhoud en Beheer blijken vooral de kosten voor stackvervanging erg belangrijk te zijn (iedere 5 jaar nodig).

Uit alle literatuur blijkt dat brandstofcellen nog niet voldoende marktrijp zijn.

TABEL 3-18

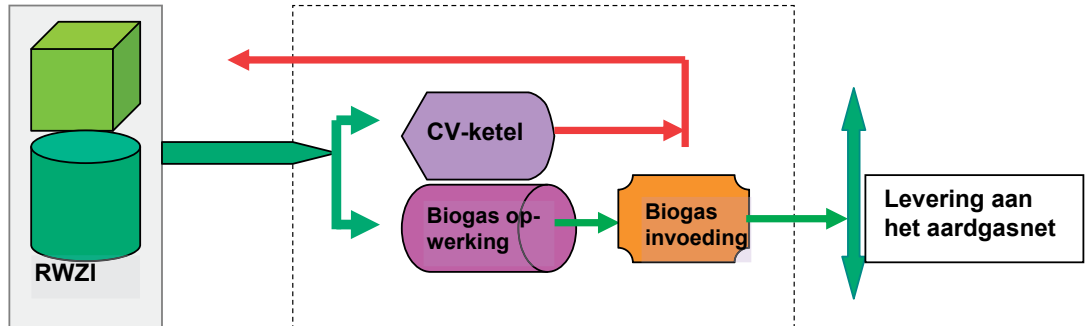
HAALBAARHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten	€ 1.035.000	€ 2.592.000	€ 6.480.000
Rente	€ 51.750	€ 129.600	€ 324.000
Onderhoud en beheer	€ 144.000	€ 288.000	€ 648.000
Totaal jaarlijkse kosten exclusief afschrijving	€ 195.750	€ 417.600	€ 972.000
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop	€ 36.810	€ 92.020	€ 230.060
Opbrengsten vermeden elektriciteitsinkoop	€ 133.490	€ 333.720	€ 834.310
Totaal jaarlijkse inkomsten	€ 25.450-	€ 8.140	€ 92.370
<b>Economie:</b>	<b>-40,67</b>	<b>318,43</b>	<b>70,15</b>

### 3.4.6 OPWERKING BIOGAS NAAR GROEN GAS

In route 4 wordt het restgas, het biogas dat overblijft nadat de interne behoefte voor verwarming (slib; gebouwen) is gedekt, geheel opgewerkt naar aardgaskwaliteit en ingevoerd in het aardgasnet. De energieopbrengst wordt bepaald door de interne warmtelevering en het aan het net geleverde aardgas. Daarnaast wordt rekening gehouden met de kosten en energieverbruik van opwerking en invoeding c.q. compressie.

FIGUUR 3-14 SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 6: OPWERKING BIOGAS NAAR GROEN GAS



In plaats van vermeden elektriciteitsverbruik bestaat de energieopbrengst nu vooral uit aan het net geleverd aardgas (groen gas). De netto energieopbrengst kan dus nooit hoger dan 1 uitkomen. Er is energieverbruik voor de opwerking en compressie van het gas nodig. Het energieverbruik is gerelateerd aan het aantal m<sup>3</sup> gas waardoor de netto energieopbrengst in alle capaciteiten even hoog is. Het energieverbruik is afhankelijk van de gekozen techniek voor opwaardering en ligt tussen 0,2 en 0,6 kWh/m<sup>3</sup> biogas (ref. 13, Persson). Voor de berekeningen is uitgegaan van 0,25 kWh/Nm<sup>3</sup> biogas, zie ook onderstaande tabel waarin een aantal prestaties van opwaarderingstechnieken worden vergeleken.

Er zijn verschillende technieken bekend om biogas te reinigen tot groen gas van aardgaskwaliteit of geschikt als transportbrandstof. Het gas moet aan een aantal eisen voldoen voordat het in het aardgasnet mag worden ingevoerd of als transportbrandstof kan worden ingezet. De belangrijkste eisen zoals die worden gehanteerd in een aantal landen zijn samengevat in tabel zijn samengevat in onderstaande tabel.

TABEL 3-19 EISEN AAN GROEN GAS IN EU-LANDEN (REF. 11)

Compound	Unit	France		Germany		Sweden	Switzerland		Austria	The Netherlands
		L gas	H gas	L gas grid	H gas grid		Lim. inject.	Unlim. Inject		
Higher Wobbe index	MJ/Nm <sup>3</sup>	42.48 – 46.8	48.24 – 56.52	37.8 – 46.8	46.1 – 56.5				47.7 – 56.5	43.46 – 44.41
Methane content	Vol-%					95 – 99	> 50	> 96		> 80
Carbon dioxide	Vol-%	< 2		< 6			< 6		≤ 2 <sup>5</sup>	
Oxygene	Vol-%			< 3			< 0.5		≤ 0.5 <sup>5</sup>	
	ppmV	< 100								
	Mol%									< 0.5
Hydrogen	Vol-%	< 6		≤ 5			< 5		≤ 4 <sup>5</sup>	< 12
CO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	Vol-%					< 5				
Water dew point	°C	< -5 <sup>1</sup>		< -4 <sup>1</sup>		< -4.5			< -8 <sup>7</sup>	-10 <sup>1</sup>
Relative humidity	p						< 80 %			
Sulphur	mg/Nm <sup>3</sup>	< 100 <sup>2</sup> < 75 <sup>3</sup>		< 30		< 23	< 30		≤ 5	< 45

Er zijn een aantal technieken waarmee aan bovenstaande eisen kan worden voldaan. De belangrijkste daarvan zijn:

- Pressure Swing Absorption: onder druk wordt CO<sub>2</sub> geadsorbeerd waarna het adsorptiemateriaal (actief kool; zeoliet) onder lagere druk wordt geregenereerd. Een PSA-installatie heeft doorgaans een aantal parallelle vaten;
- Absorptie met water (water scrubbing) of chemisch (chemical scrubbing), waarbij CO<sub>2</sub> wordt opgelost in water of een andere vloeistof;
- Membraanscheiding, met membranen die doorlatend zijn voor CO<sub>2</sub>, water en ammoniak. Ook vind gedeeltelijke scheiding van H<sub>2</sub>S en O<sub>2</sub> plaats. Het proces vindt meestal in twee stappen plaats;
- Cryogene scheiding waarbij CO<sub>2</sub>, water en siloxanen verwijderd worden. Hierbij kan ook het CO<sub>2</sub> worden teruggewonnen.

Een aantal eigenschappen van deze technieken en hun kosten zijn samengevat in onderstaande tabel (ref. 12, TU Eindhoven, 2008). Het is niet eenvoudig hieruit een duidelijke conclusie te trekken. Volgens deze studie lijkt Pressurized Water Scrubbing de meest aantrekkelijke techniek: eenvoudig, goedkoop, echter wel met een te verwerken reststroom, waarvan niet duidelijk is wat de verwerkingskosten zijn. Het opgewerkte groen gas komt onder druk beschikbaar zodat bij invoeden in het regionale aardgasnet geen extra compressiestap nodig is.

Voor de berekening van de kosten voor biogas opwerken en invoeden is overigens uitgegaan van de kosten voor investering zoals geraamd door E-kwadraat (ref. 7, E-kwadraat 2011). Deze kosten komen goed overeen met de kosten voor High Pressure Water Scrubbing zoals in bovenstaande tabel, rekening houdend met een opslag van 60% voor onvoorzien, risico's, projectmanagement en toezicht, en met 19% BTW.

De energieopbrengst voor deze route blijkt lager dan die voor de referentieroute omdat nu uiteraard energie wordt verbruikt in het opwaarderingsproces. Vanwege onderhoud aan de opwerkinstallatie wordt nog steeds rekening gehouden met een fakkel, waarin nu 5% van het biogas wordt verbrand, in plaats van 10% in de referentiesituatie. Daarnaast is elektrische energie nodig voor het opwerkingsproces.

TABEL 3-20 EIGENSCHAPPEN VERSCHILLENDE GASREINIGINGSTECHNIKEN (REF. 12, TU EINDHOVEN)

Technique	Investment cost €	Running cost €	Cost price upgraded biogas €/Nm <sup>3</sup> biogas	Maximum achievable yield %	Maximum achievable purity %	Advantages	Disadvantages
Chemical absorption	869,000	179,500	0.28	90	98	· Almost complete H <sub>2</sub> S removal	· Only removal of one component in column · <b>Expensive catalyst</b>
High pressure water scrubbing	<b>440,000</b>	120,000	<b>0.15</b>	94	98	· Removes gases and particulate matter · <b>High purity, good yield</b> · Simple technique, no special chemicals or equipment required · Neutralization of corrosive gases	· Limitation of H <sub>2</sub> S absorption due to changing pH · <b>H<sub>2</sub>S damages equipment</b> · Requires a lot of water, even with the regenerative process
Pressure swing adsorption	805,000	187,250	0.26	91	98	· More than 97% CH <sub>4</sub> enrichment · Low power demand · Low level of emissions · <b>Adsorption of N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub></b>	· Additional complex H <sub>2</sub> S removal step needed
Cryogenic separation	908,500	<b>397,500</b>	0.40	98	91	· Can produce large quantities with high purity · Easy scaling up · No chemicals used in the process	· <b>A lot of equipment is required</b>
Membrane separation	749,000	126,750	0.22	78	89.5	· Compact and light in weight · Low maintenance · Low energy requirements · <b>Easy process</b>	· <b>Relatively low CH<sub>4</sub> yield</b> · H <sub>2</sub> S removal step needed · Membranes can be expensive

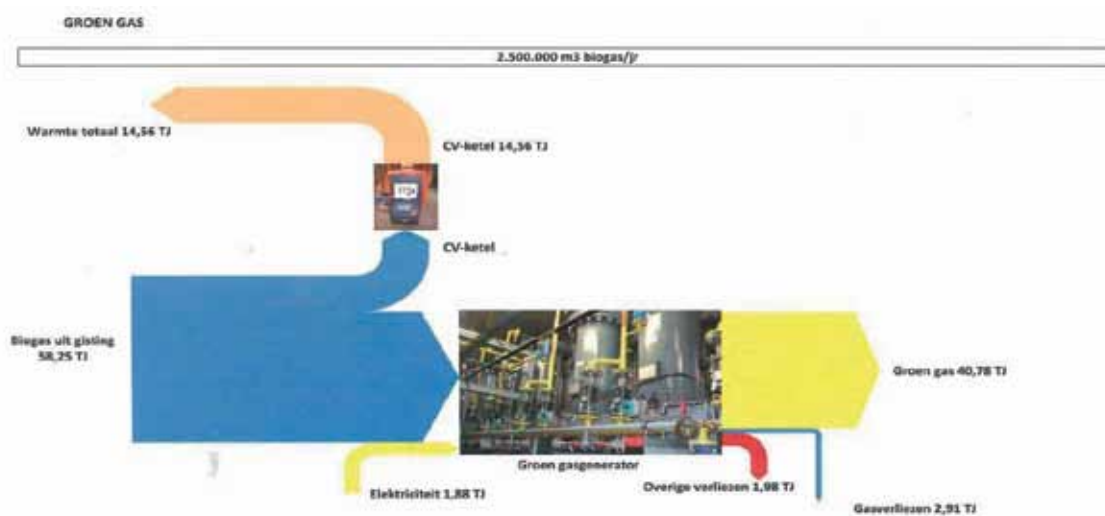
Zoals uit bovenstaande tabel blijkt, wordt een deel van het biogas niet opgewerkt. Er is verondersteld dat dit wordt afgefakkeld. Ook zijn er geen gegevens gevonden over mogelijke methaanslip, (lek)verliezen die op verschillende plaatsen in het proces kunnen plaatsvinden. Deze zijn op 1% geraamd.

TABEL 3-21 ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Verbruik biogas voor stibverwarming via CV-ketel (TJ/jaar)	2,33	5,83	14,56
Niet opgewaardeerd biogas, afgefakkeld (TJ/jaar)	0,47	0,70	0,87
Methaanslip (TJ/jaar)	0,07	0,18	0,44
Energieinhoud te leveren groen gas (TJ/jaar)	6,55	16,72	42,46
Elektriciteitsverbruik opwerking en compressie (TJ/jaar)	0,28	0,71	2,14
Uitgespaarde primaire energie voor elektriciteitsproductie (TJ/jaar):	-0,70	-1,78	-5,34
Netto energieopbrengst (TJ/jaar)	8,19	20,77	51,68
<b>Energie indicator</b>	<b>0,88</b>	<b>0,89</b>	<b>0,89</b>

De resultaten voor deze route zoals aangegeven in bovenstaande tabel zijn ook weergegeven in onderstaand sankey diagram.

FIGUUR 3-15 SANKEY DIAGRAM GROEN GAS ROUTE



Voor de CO<sub>2</sub>-emissiereductie geldt nagenoeg hetzelfde als voor de energieopbrengst. Ten gevolge van het energieverbruik voor de opwerking en compressie van het gas blijft deze indicator lager dan 1.

TABEL 3-22

## DUURZAAMHEID GROEN GAS

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
CO <sub>2</sub> emissiereductie bij volledige inzet als aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jr):	530	1.325	3.313
CO <sub>2</sub> emissiereductie t.g.v. elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jr):	-52	-133	-398
Equivalent CO <sub>2</sub> -emissie t.g.v. methaanslip (ton/jaar)	25	63	158
CO <sub>2</sub> emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jr):	133	331	828
CO <sub>2</sub> emissiereductie t.g.v. geleverd groen gas (ton CO <sub>2</sub> /jr):	373	951	2.415
Totaal CO <sub>2</sub> emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jr):	428	1.086	2.687
<b>Duurzaamheid:</b>	<b>0,81</b>	<b>0,82</b>	<b>0,81</b>

De economie van deze route wordt praktisch volledig bepaald door de vergoeding die voor het geleverde gas wordt betaald. Hier is die op € 0,287 / Nm<sup>3</sup> (excl. BTW; 0,341 incl. BTW) gesteld, overeenkomstig de SDE+-basisprijs.

De groen gas vergoeding wordt bepaald in onderhandelingen met de afnemer, normaliter het energiebedrijf. De prijs wordt bepaald door de ENDEX-gasprijs die nu op ca. € 0,21 ligt. Daarboven op kan een extra vergoeding worden verkregen vanwege de groen gas certificaten die aan het groen gas verbonden zijn. Deze extra vergoeding is afhankelijk van de markt en wordt bepaald in de onderhandelingen met het energiebedrijf. Deze vergoeding varieert momenteel tussen € 0,02 en € 0,06 en is afhankelijk van de markt c.q. de belangstelling voor groen gas. Iedere verhoging van die vergoeding heeft een direct en belangrijk effect op de economie c.q. de terugverdientijd.

De economie van deze route wordt aanzienlijk beter in het geval SDE+-subsidie wordt verkregen. Het advies van ECN voor het basisbedrag voor groen gas is € 0,287/Nm<sup>3</sup> groen gas. Indien deze vergoeding c.q. SDE+-subsidie wordt verkregen dan ziet de economie eruit als aangegeven in Tabel 3-21. De bovengenoemde vergoeding voor groen gas certificaten wordt ook verkregen bovenop de SDE+ basisprijs. De SDE+ subsidie wordt uitsluitend vastgesteld aan de hand van de ENDEX-gasprijs. Dit betekent dat de vergoeding voor het groen gas kan variëren tussen € 0,21 (de ENDEX-gasprijs) en € 0,35 (de SDE+ basisprijs plus de maximale vergoeding van € 0,06).

Met SDE+-subsidie wordt de groen gas route rendabel voor de grotere capaciteiten. Bij kleinere gas hoeveelheden, onder de 1 miljoen Nm<sup>3</sup> per jaar, lijkt de groen gas route minder aantrekkelijk vanwege de relatief hoge investerings- en beheerskosten ten opzichte van de referentieroute.

TABEL 3-23

## ECONOMIE GROEN GAS

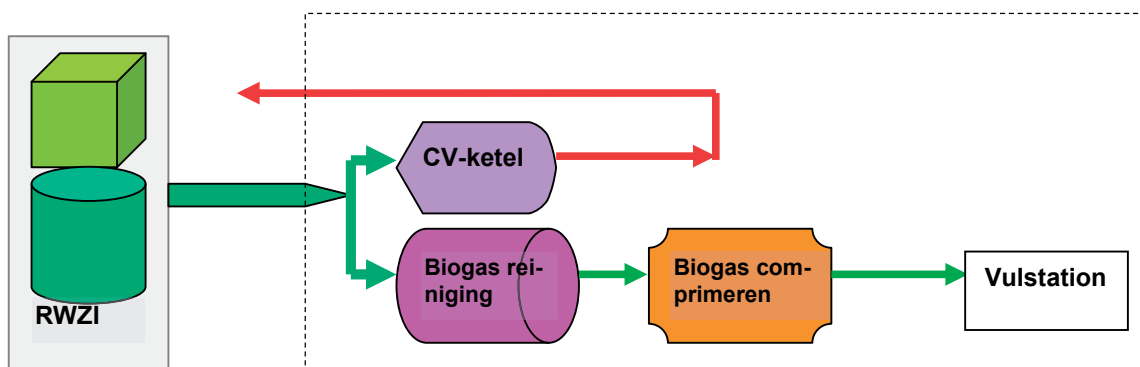
Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten (€)	€ 630.000	€ 810.000	€ 1.530.000
Rente (€/jaar)	€ 31.500	€ 40.500	€ 76.500
Onderhoud en beheer (€/jaar)	€ 76.500	€ 121.500	€ 157.500
Kosten extra elektriciteitsinkoop (€/jaar)	€ 8.520	€ 21.780	€ 65.310
Totaal jaarlijkse kosten (€/jaar)	€ 116.520	€ 183.780	€ 299.310
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop (€/jaar)	€ 36.810	€ 92.020	€ 230.060
Opbrengsten verkoop groen gas (€/jaar)	€ 70.590	€ 180.190	€ 457.450
Netto jaarlijkse inkomsten (€/jaar)	€ 9.120	€ 88.430	€ 388.200
<b>Economie (terugverdientijd in jaar)</b>	<b>-69,08</b>	<b>9,16</b>	<b>3,94</b>

## 3.4.7 BIOGASBENUTTING VOOR TRANSPORT

In deze route wordt het restgas volledig opgewerkt naar gecompriemd CH<sub>4</sub> en ingezet als transportbrandstof. Ook hier wordt rekening gehouden met de kosten en het energieverbruik van reiniging en compressie. De geleverde brandstof wordt vergeleken met diesel. Uitgangspunt is dus dat het biogas wordt benut voor de productie en aflevering van bio-CNG op locatie.

FIGUUR 3-16

## SCHEMATISCHE WEERGAVE ROUTE 7: BIOGASBENUTTING VOOR TRANSPORT



De resultaten voor route 7 zijn wat betreft energieopbrengst vergelijkbaar aan die voor route 6. Het energieverbruik voor opwerking en compressie is hoger omdat nu naar 340 bar moet worden gecompriemd in plaats van naar 10 bar. De netto energieopbrengst valt daardoor lager uit.

TABEL 3-24

## ENERGIEOPBRENGST

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Niet opgewaardeerd biogas, afgefakkeld (TJ/jaar)	0,47	0,70	0,87
Methaanslip (TJ/jaar)	0,09	0,23	0,58
Energie-inhoud bio-CNG c.q. vermeden dieselbrandstof (TJ/jaar)	6,43	16,54	42,23
Volume bio-CNG (1000 Nm <sup>3</sup> )	176	453	1.157
Verbruik biogas voor stibverwarming via CV-ketel (TJ/jaar):	2,33	5,83	14,56
Elektriciteitsverbruik opwerking en compressie (TJ/jaar)	0,38	0,98	2,50
Uitgespaarde primaire energie voor opwerking en compressie (TJ/primair/jaar)	-0,95	-2,45	-6,25
Netto energieopbrengst (TJ/jaar):	7,81	19,92	50,55
<b>Energie indicator</b>	<b>0,84</b>	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>

De indicator duurzaamheid komt nagenoeg uit op 1 uit vanwege de vermeden CO<sub>2</sub>-emissie bij inzet van diesel voor transport.

TABEL 3-25

## DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
CO <sub>2</sub> emissiereductie bij volledige inzet als aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	530	1.325	3.313
Vermeden dieselgebruik (1000 ltr)	178	459	1.173
Benutting warmte/Uitgespaard aardgas (TJ/jaar):	2,33	5,83	14,56
Equivalent CO <sub>2</sub> -emissie t.g.v. methaanslip (ton/jaar)	25,32	63,31	158,27
CO <sub>2</sub> emissiereductie t.g.v. uitgespaard aardgas (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	133	331	828
CO <sub>2</sub> emissiereductie t.g.v. vermeden gebruik diesel (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	464	1.195	3.050
CO <sub>2</sub> emissiereductie t.g.v. elektriciteit (ton CO <sub>2</sub> /jr):	-71	-182	-465
Totaal CO <sub>2</sub> emissiereductie (ton CO <sub>2</sub> /jaar):	501	1.281	3.255
<b>Duurzaamheid:</b>	<b>0,94</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>

De economie van route 7 wordt in feite volledig bepaald door de prijs die wordt verkregen voor het bio-CNG. Die vergoeding is hier gesteld op € 0,60 per Nm<sup>3</sup>. Deze vergoeding is afgeleid van de huidige prijs van aardgas bij de tankstations. Deze is nu ca. € 0,94 per kg., incl. BTW en brandstofaccijns. De accijns op aardgas als brandstof is nu € 0,03 en wordt binnenkort verhoogd naar € 0,06. Op basis van de energie-inhoud van methaan (bio-CNG heeft ca. 98% methaan) en de dichtheid ervan, zal de vergoeding ca. € 0,60 kunnen zijn, incl. BTW. Ondanks de hogere vergoeding die voor bio-CNG wordt verkregen ten opzichte van de vergoeding voor groen gas, komt de economie toch minder goed uit vanwege de hoge extra investering in een tankstation.

TABEL 3-26

## HAALBAARHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas):	400.000	1.000.000	2.500.000
Energie-inhoud biogas (TJ):	9,32	23,30	58,25
Investeringskosten (€)	€ 1.386.000	€ 1.782.000	€ 2.736.000
Rente (€)	€ 69.300	€ 89.100	€ 136.800
Onderhoud en beheer (€)	€ 56.700	€ 72.900	€ 133.200
Totaal jaarlijkse kosten exclusief afschrijving (€)	€ 126.000	€ 162.000	€ 270.000
Opbrengsten vermeden aardgasinkoop (€)	€ 36.810	€ 92.020	€ 230.060
Opbrengsten verkoop CNG (€)	€ 105.710	€ 271.940	€ 694.210
Opbrengsten vermeden elektriciteitsinkoop (€)	€ 11.630-	€ 29.910-	€ 76.360-
Netto jaarlijkse inkomsten (€)	€ 4.890	€ 172.050	€ 577.910
<b>Economie:</b>	<b>283,44</b>	<b>10,36</b>	<b>4,73</b>

### 3.5 BIOGAS AFZETTEN BIJ AFNEMER IN DE OMGEVING

Deze route is niet verder uitgewerkt, vanwege de directe afhankelijkheid van specifieke lokale omstandigheden, c.q. een afnemer in de nabijheid van de RWZI die biogas direct kan benutten.

De resultaten kunnen niet veel afwijken van de groen gas route. Belangrijkste verschil is dat minder bewerking nodig zal zijn. De indicator Energieopbrengst zal zeer dicht bij 1 zitten. Dat zal ook het geval zijn voor de indicator Duurzaamheid. De economie van deze route zal volledig afhangen van de vergoeding/prijs die voor het biogas wordt verkregen.



# 4

## GEVOELIGHEIDSANALYSE

Voor de volgende onderwerpen zijn gevoeligheidsanalyses gemaakt:

- Elektrisch rendement van de gasmotor om na te gaan wat de invloed zal zijn van toekomstige verbeteringen in het e-rendement van WKK's op economie en energieopbrengst (variatie 34 – 42%);
- Verkoopprijs van het groen gas en van het bio-CNG om de invloed daarvan op de economie van de routes 6 en 7 vast te stellen;
- Warmtevraag gisting (variatie 35 – 65%)
- Hogere investering voor de WKK, omdat verwacht wordt dat door scherpere milieueisen de WKK's duurder zullen worden.

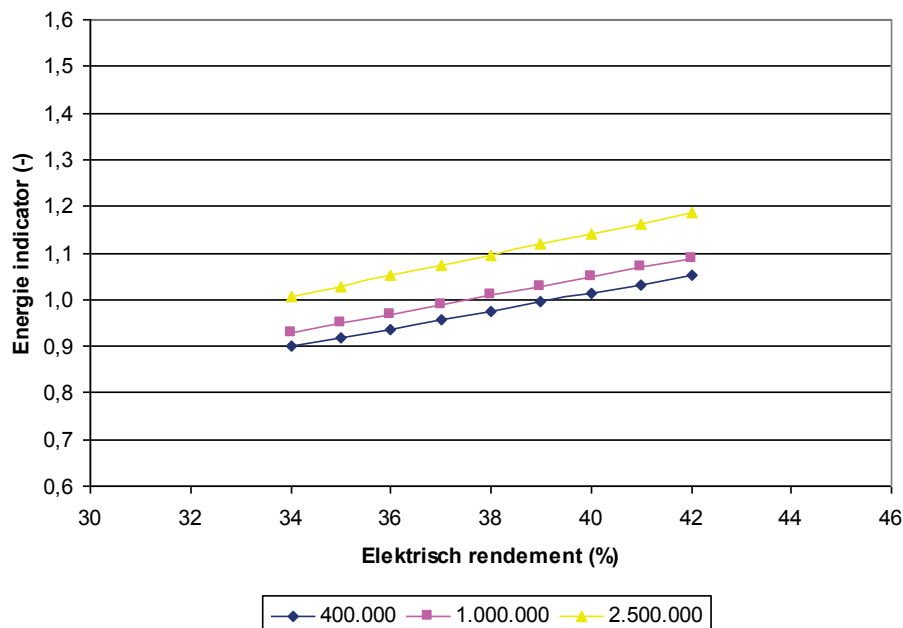
Voor bovenstaande onderwerpen zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd waarvan de resultaten hieronder worden samengevat.

### 4.1 E-RENDEMENT GASMOTOR

Het e-rendement van de gasmotor/generator combinatie is gevarieerd van 34%, in de referentie situatie het laagste rendement, tot 42% wat voorlopig voor de gehele combinatie, gemiddeld over het jaar als een maximum mag worden beschouwd.

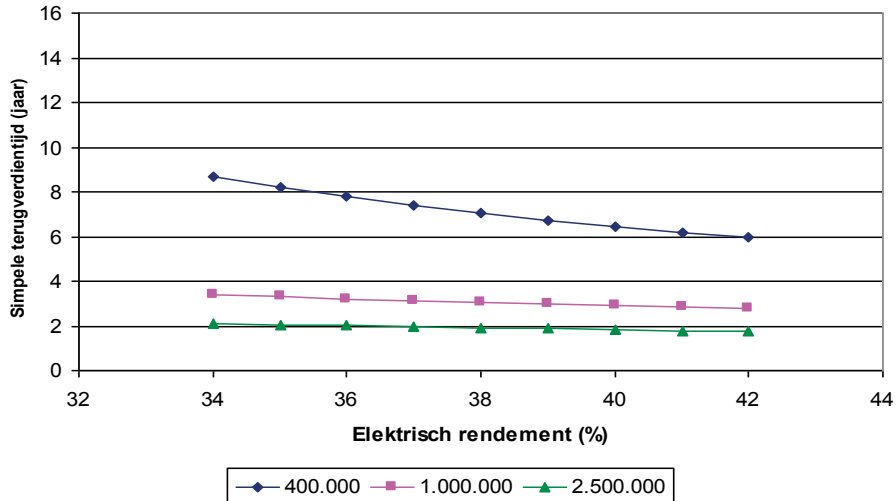
In onderstaande grafieken zijn de energieopbrengst en de economie voor deze variatie in e-rendement weergegeven.

FIGUUR 4-1 INVLOED WKK RENDEMENT OP ENERGIE-OPBRENGST



Zoals verwacht kon worden verbeterd de energieopbrengst aanzienlijk bij toename van het overall rendement van de WKK. De duurzaamheid van deze optie zal zich op dezelfde wijze verbeteren als de energieopbrengst. Voor alle drie de capaciteiten is de verbetering vergelijkbaar.

FIGUUR 4-2 INVLOED RENDEMENT OP TERUGVERDIENTTIJD



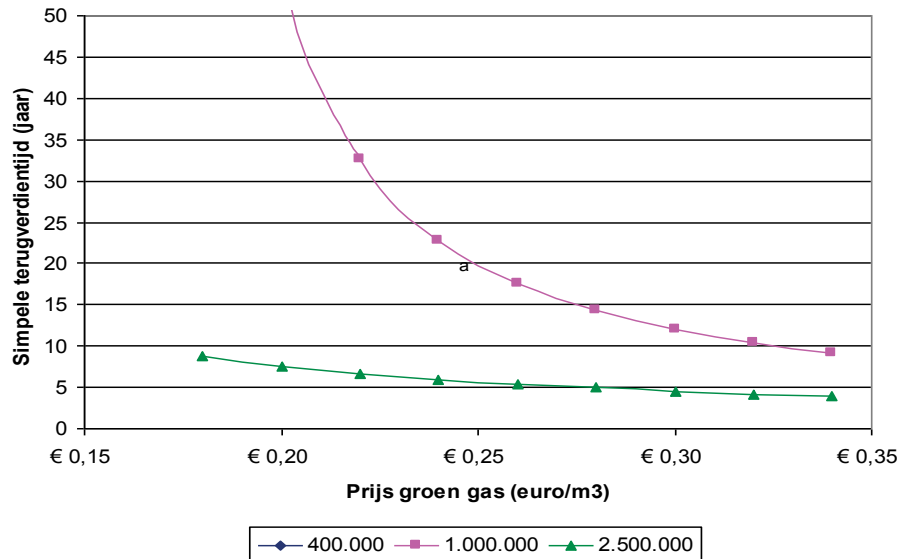
Ook de economie, verbeterd zich wat blijkt uit een steeds kortere terugverdientijd. Deze verbetering is wat minder voor de grotere capaciteiten.

#### 4.2 VERKOOPPRIJS GROEN GAS

De economie van de groen gas route wordt sterk bepaald door de verkoopprijs van het groen gas dat aan het net wordt geleverd. Hetzelfde geldt voor de bio-CNG route waarvan de economie sterk wordt bepaald door de vergoeding voor het bio-CNG.

In onderstaande grafiek is weergegeven hoe de economie van deze route zich ontwikkelt bij een stijgende verkoopprijs (de kleinste capaciteit komt niet in de grafiek voor omdat de terugverdientijd te lang of negatief is).

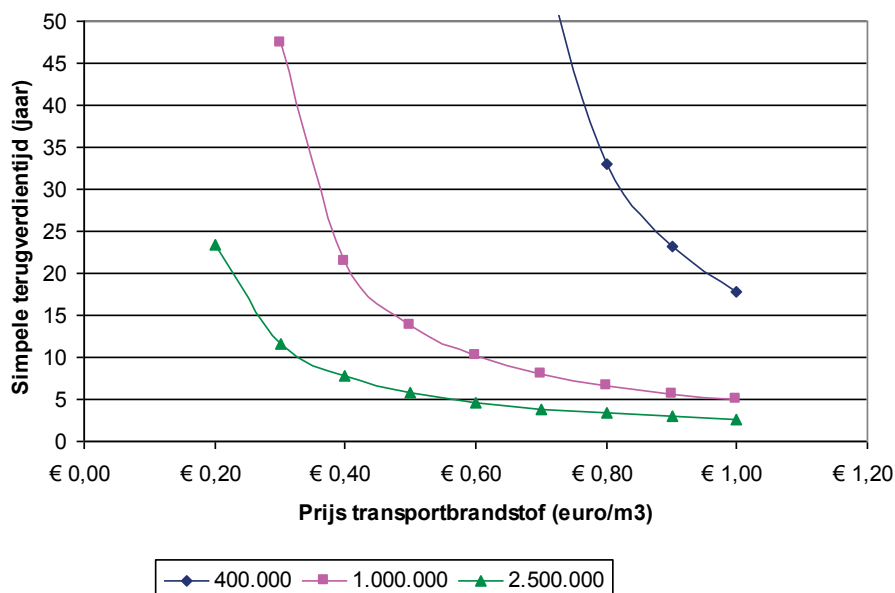
FIGUUR 4-3 INVLOED VERGOEDING VOOR GROEN GAS OP TERUGVERDIENTIJD



Zoals verwacht kon worden, verbetert de economie, c.q. de terugverdiëntijd, sterk bij oplopende prijs voor het groen gas. De variant met de kleinste capaciteit is bij deze prijzen niet economisch aantrekkelijk. De midden-variant begint aantrekkelijk te worden bij een groen gas prijs van ca. € 0,30.

Eenzelfde ontwikkeling geldt voor productie en verkoop van transportbrandstof, bio-CNG. Waar de terugverdiëntijd onder de 5 jaar komt vanaf een vergoeding van ca. € 0,60 per Nm<sup>3</sup>. Voor de kleinste variant is de terugverdiëntijd ca. 10 jaar bij een prijs voor het bio-CNG van € 1,-.

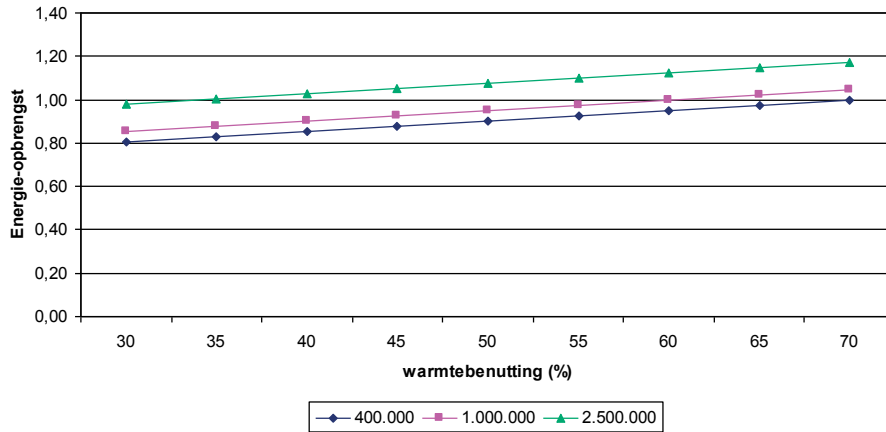
FIGUUR 4-4 INVLOED VERGOEDING VOOR TRANSPORTBRANDSTOF OP TERUGVERDIENTIJD



### 4.3 WARMTEVRAAG SLIBGISTING

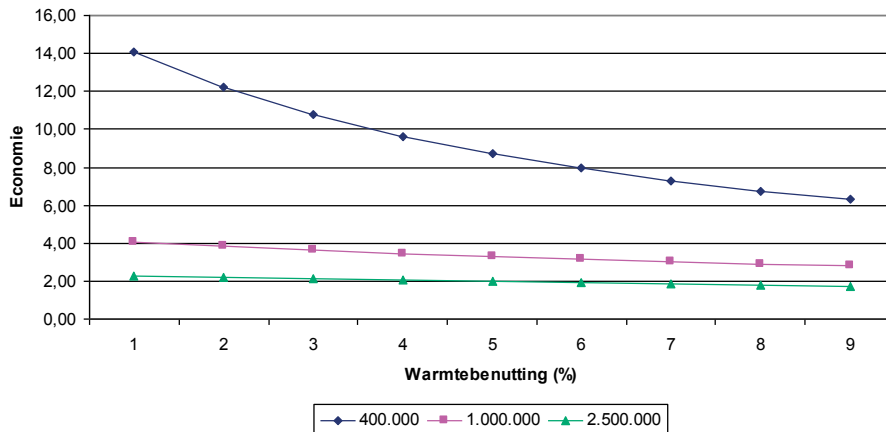
Uitgangspunt in de gevoeligheidsanalyse is geweest dat ook bij toenemende warmtebenutting, en dus toenemende warmtevraag, de WKK voldoende warmte blijft produceren om aan de warmtevraag te voldoen. Duidelijk is dat de energie-opbrengst aanzienlijk toeneemt bij toename van de warmtebenutting. Een hoge warmtebenutting c.q. warmtevraag leidt dus tot een verbetering van de energieprestaties.

FIGUUR 4-5 INVLOED WARMTEBENUTTING OP ENERGIE-OPBRENGST



Het spreekt bijna vanzelf dat ook de economie, c.q. de terugverdientijd, verbetert bij toenemende warmtebenutting, ten gevolge van de toename van uitgespaard aardgas. Vooral voor de kleinere WKK heeft dit een grote invloed op de terugverdientijd.

FIGUUR 4-6 INVLOED WARMTEBENUTTING OP TERUGVERDIENTIJD



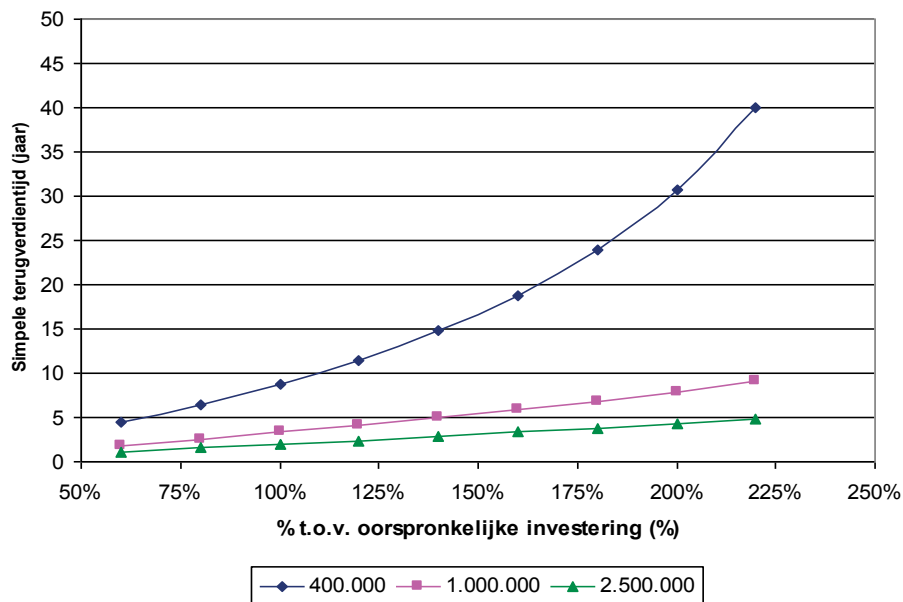
#### 4.4 HOGERE INVESTERINGSKOSTEN VOOR DE WKK

Hogere investeringskosten leiden uiteraard tot een langere terugverdientijd voor de installatie. Bij 25% toename van de investeringskosten valt dit nog mee en blijft de terugverdientijd beneden de 5 jaar voor de twee grotere varianten.

Bij 50% kostenverhoging komt de terugverdientijd voor de middenvariant ook boven de vijf jaar.

Voor de kleinste variant is de terugverdientijd dan meer dan 15 jaar waardoor inzet van een WKK niet meer interessant lijkt.

FIGUUR 4-7 INVLOED INVESTERINGSKOSTEN OP TERUGVERDIENTIID



# 5

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 5.1 CONCLUSIES

De bedrijfsvoering van WKK's valt te verbeteren door onder andere:

- Gasreiniging toe te passen om motorproblemen ten gevolge van siloxanen en andere verontreinigingen te voorkomen. De volledige kostenaspecten van voorreiniging konden nog niet goed worden ingeschat omdat onvoldoende informatie beschikbaar is over de mogelijke vermindering van onderhoudskosten;
- Regelmatige controle van biogas en motorolie op verschillende (sporen)componenten als H<sub>2</sub>S, water en siloxanen. Bij te hoge gehalten aan siloxanen verdient het aanbeveling om gasreiniging toe te passen;
- Zodanige bedrijfsvoering (en keuze van vermogen(s) dat zo veel mogelijk op vollast kan worden gedraaid waardoor het gemiddelde rendement over het jaar hoger uitkomt;
- Nieuwe emissie-eisen kunnen nadelige gevolgen hebben voor de investeringskosten van gasmotor-WKK's en wellicht ook voor het rendement. Ook bij een aanzienlijke kostenverhoging (25%) zal een gasmotor-WKK echter doorgaans rendabel kunnen worden bedreven.

De resultaten van de berekeningen en vergelijkingen in hoofdstuk 3 voor de te onderscheiden biogas benuttingsroutes en capaciteiten zijn hieronder samengevat voor iedere indicator.

Uit de analyses blijkt dat de conventionele wijze van biogasbenutting via een WKK onder de huidige omstandigheden het meest aantrekkelijk lijkt: hoogste energie-opbrengst, beste bijdrage aan duurzaamheid en in alle varianten de beste economie c.q. de kortste terugverdientijd. De groen gas route wordt interessant wanneer een voldoende hoge vergoeding voor het gas wordt verkregen, minimaal de SDE+ basisprijs. De resultaten voor wat betreft energie opbrengst, duurzaamheid en kosten zijn samengevat in tabellen 5-1 t/m 5-3 en figuren 5-1 t/m 5-3. In de tabellen 5-1 en 5-2 en in de figuren 5-1 en 5-2 is de factor 1,0 gedefinieerd als primaire energie inhoud van het biogas resp. CO<sub>2</sub>emissie bij directe verbranding van het biogas. De resultaten van de alternatieven worden dus weergegeven ten opzichte hiervan.

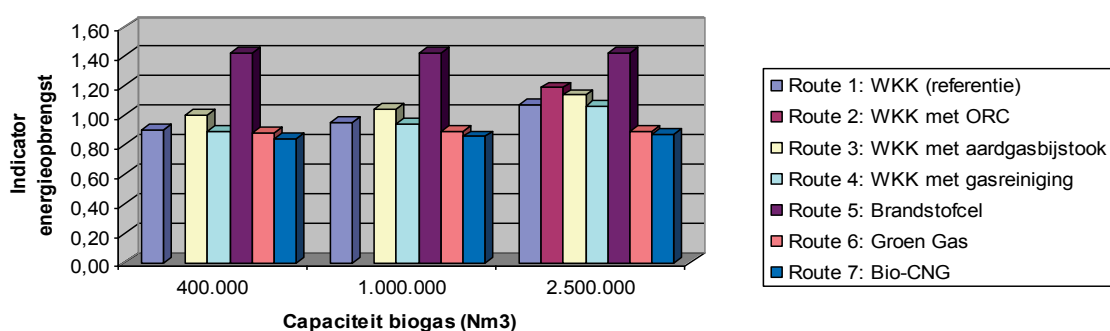
Door het hogere rendement van de brandstofcel komt deze route er wat betreft energieopbrengst ogenschijnlijk het beste uit. In de praktijk is dit echter wegens kosten nog geen realiseerbare optie. WKK met ORC (alleen doorgerekend voor de grootste capaciteit) scoort daarna als beste. Het aantal praktijktoepassingen van ORC is echter nog zeer beperkt. De meeste gerealiseerde ORC-installaties zijn gebouwd voor grotere capaciteiten.

TABEL 5-1 VERGELIJKING ENERGIEOPBRENGST (ENERGIE INDICATOR)

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas)	400.000	1.000.000	2.500.000
Route 1: WKK (referentie)	0,90	0,95	1,07
Route 2: WKK met ORC			1,19
Route 3: WKK met aardgasbijstook	1,00	1,04	1,14
Route 4: WKK met gasreiniging	0,89	0,94	1,06
Route 5: Brandstofcel	1,25	1,25	1,25
Route 6: Groen Gas	0,88	0,87	0,87
Route 7: Bio-CNG	0,83	0,83	0,83

Aardgasbijstook lijkt een aantrekkelijke optie om de energieopbrengst van de WKK te vergroten. Het iets hogere rendement van de WKK door meer vollastbedrijf leidt tot een betere benutting van het biogas, waardoor de energieopbrengst en vervolgens ook de duurzaamheid aanzienlijk verbeteren, zie tabellen 5-1 en 5-2.

FIGUUR 5-1 VERGELIJKING ENERGIEOPBRENGST (ENERGIE-INDICATOR)

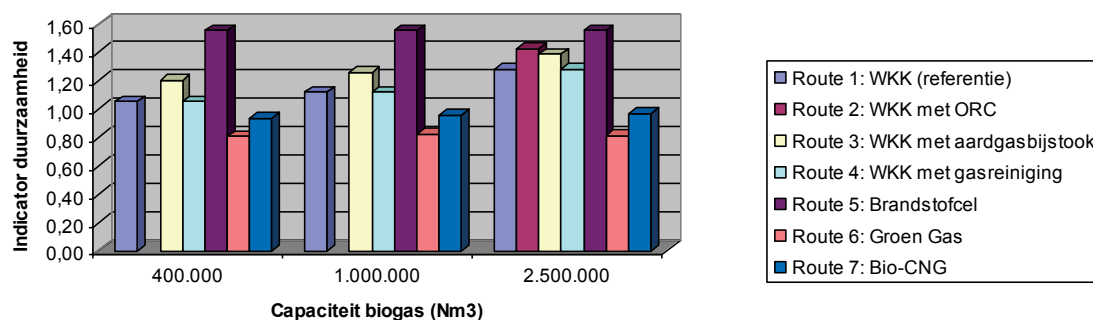


Afgezien van de brandstofcel route, blijkt de route WKK/ORC het meest duurzaam, uiteraard vanwege de hoge elektriciteitsproductie en de daarmee gepaard gaande vermeden CO<sub>2</sub>-emissie. De bio-CNG route, route 7, scoort redelijk vanwege de vermeden CO<sub>2</sub>-emissie ten opzichte van diesel voor transport. Zoals hierboven al aangegeven scoort ook aardgasbijstook goed..

TABEL 5-2 VERGELIJKING DUURZAAMHEID

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas)	400.000	1.000.000	2.500.000
Route 1: WKK (referentie)	1,05	1,12	1,28
Route 2: WKK met ORC			1,43
Route 3: WKK met aardgasbijstook	1,20	1,26	1,38
Route 4: WKK met gasreiniging	1,05	1,12	1,28
Route 5: Brandstofcel	1,55	1,55	1,55
Route 6: Groen Gas	0,85	0,85	0,84
Route 7: Bio-CNG	0,98	0,98	0,98

FIGUUR 5-2 VERGELIJKING DUURZAAMHEID



De economie van de brandstofcel is nog erg slecht. Dit nog los van de onvoldoende praktische toepassingen waardoor de techniek niet als marktrijp kan worden beschouwd. De eerstkomende 5 jaar kan de brandstofcel niet als een volwaardige techniek worden beschouwd. Wellicht dat in samenwerking met onderzoeksinstituten naar proef- en demonstratieprojecten kan worden gezocht.

Voor de grotere capaciteiten lijkt de combinatie van WKK/ORC aantrekkelijk. De terugverdientijd is wat langer dan die voor de WKK zelf maar daar staan weer betere energie- en duurzaamheidsprestaties tegenover. Eventuele toekomstige hogere rendementen van WKK's zullen ook positieve effecten hebben op de WKK/ORC combinatie.

Groen gas levering lijkt alleen zinvol met SDE+-subsidie. De economie komt dan in dezelfde orde van grootte als die voor de WKK en WKK/ORC. De economie van bio-CNG komt minder goed uit dan die voor groen gas door de extra investering in een tankstation, ondanks de hogere prijs die voor bio-CNG wordt verkregen.

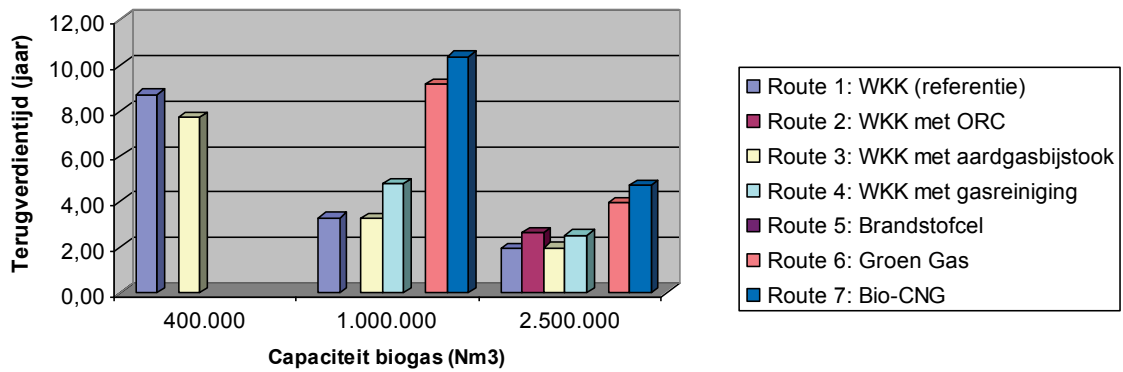
TABEL 5-3 VERGELIJKING ECONOMIE (TERUGVERDIENTTIJD IN JAAR)

Capaciteit (m <sup>3</sup> ruw biogas)	400.000	1.000.000	2.500.000
Route 1: WKK (referentie)	8,7	3,31	1,96
Route 2: WKK met ORC			2,64
Route 3: WKK met aardgasbijstook	7,7	3,26	1,99
Route 4: WKK met gasreiniging	21	4,80	2,53
Route 5: Brandstofcel	-41	318	70,15
Route 6: Groen Gas	-69	9,2	3,94
Route 7: Bio-CNG	283	10,4	4,73

In onderstaande figuur 5-3 zijn de terugverdientijden grafische weergegeven. De terugverdientijden van meer dan 10 jaar of negatief zijn niet in figuur 5-3 opgenomen.



FIGUUR 5-3 VERGELIJKING ECONOMIE (TERUGVERDIENTIJD IN JAAR)



Duidelijk is dat de economie van de groen gas en de transportbrandstof routes sterk verbeterd wordt voor de grotere capaciteiten, wat wordt veroorzaakt door de aanzienlijk lagere investeringskosten per Nm<sup>3</sup> biogas.

## 5.2 AANBEVELINGEN

### BEDRIJFSVOERING WKK'S

Voor wat betreft de bedrijfsvoering van WKK's kunnen de volgende aanbevelingen worden geformuleerd:

- Draag er zorg voor dat de dagelijkse inspecties en onderhoudswerkzaamheden goed en zorgvuldig worden uitgevoerd en dat proceswaarden en bijzonderheden worden geregistreerd;
- Draag zorg voor voldoende, tijdig en regelmatig gepland onderhoud;
- Controleer bij de uitvoering van onderhoud door derden of originele reserveonderdelen worden gebruikt;
- Laat met regelmatige intervallen olieanalyses uitvoeren op, onder andere, zuurgraad en de hoeveelheid aanwezige siliciumverbindingen;
- Met meerdere gasmotoren in een installatie die op deellast draait, is het mogelijk load sharing toe te passen;
- Het afsluiten van een prestatiecontract voor onderhoud en beheer met de leverancier van de WKK-installatie kan voordelig zijn.

### BIOGAS BENUTTINGSROUTES

Wat betreft de routes voor biogasbenutting wordt het volgende aanbevolen:

- De conventionele WKK-route scoort op de drie indicatoren het beste. In deze route kunnen verbeteringen worden aangebracht door:
  - Toepassen van gasreiniging wanneer het biogas verontreinigd blijkt met bijvoorbeeld siloxanen of H<sub>2</sub>S. Gasreiniging verlaagt dan de onderhoudskosten en verbetert de bedrijfsvoering waardoor gemiddeld over het jaar een hoger rendement kan worden gerealiseerd;
  - Toepassen van slibvoorverwarming door hergebruik van de warmte in het slib na de vergister. Dit is zinvol indien warmte kan worden geleverd aan derden;
- Optimaliseer de bedrijfsvoering zodat de hoeveelheid biogas die nu wordt afgefakkeld wordt verminderd. Er zijn RWZI's waar minder dan 0,5% van het biogas wordt afgefakkeld.

- Aardgasbijstook leidt tot een beter elektrisch rendement van de WKK en verbetert daardoor de WKK route op alle indicatoren. De economie verandert nauwelijks, uitsluitend door de kosten voor het mogelijk maken van aardgasbijstook;
- De route voor groen gas productie kan worden verbeterd door:
  - Toepassen van slibvoorverwarming met de restwarmte in het slib na de vergister. Daardoor is minder biogas nodig voor de CV-ketel en resteert dus meer gas voor groen gas levering;
  - Onderhandel met de afnemer van het groen gas over groen gas certificaten (mogelijke opbrengst van € 0,02 tot 0,06);
  - Onderhandel met het netwerkbedrijf over een regiokorting in verband met vermeden transportkosten van het aardgas;
  - Vraag SDE+ subsidie aan. SDE+ gaat uit van een bepaalde basisprijs (nu € 0,287). DE SDE+ subsidie wordt berekend aan de hand van de ENDEX gasprijs en deze basisprijs. De subsidie wordt verkregen bovenop bijv. de vergoeding voor groen gas certificaten of de regiokorting.
  - Overweeg een zgn. hybride variant: warmteproductie door middel van een WKK bij groen gas productie. Dit vermindert de hoeveelheid biogas beschikbaar voor groen gas productie maar verbetert de energieopbrengst, de duurzaamheid en waarschijnlijk ook de economie van de installatie, afhankelijk van de capaciteit van de biogas productie.

# 6

## LITERATUURLIJST

- 1 AgentschapNL (2010). Inventarisatie biogas RWZI's. Opgesteld door Witteveen+Bos, referentie UT580-2/hola/002, status definitief, d.d. 18 mei 2010. Inclusief CD rom.
- 2 BTG (2007) factsheet brandstofcel. d.d. 20-02-2007
- 3 Cogen Projects (2004) Haalbaarheidsstudie ORC in combinatie met WK; Een haalbaarheidsstudie naar de mogelijke toepassing van de combinatie van een ORC met een gasmotor of gasturbine bij hotels, ziekenhuizen, verpleeghuizen, tuinbouwbedrijven, universiteiten en industrie. Senter dossiernummer: EDI 03088, Kenmerk: Tri-0-Gen B.V./ EDI 03088, d.d. september 2004
- 4 KWR (2011). Afvalwaterzuivering: Energie onder één noemer, Eindrapport Definitief. KWR en Mirabella Mulder Waste Water Management, d.d. 30 maart 2011.
- 5 Witteveen+Bos (2009). Nieuwbouw slibverwerking RWZI Nieuwveer, project 3063, aspectenstudie biogasbenutting. Referentie BR456-4/hola/147, status definitief 04, d.d. 10 juli 2009.
- 6 Witteveen+Bos (2010). Energiefabriek RWZI Amersfoort, inventarisatie biogasbenutting RWZI's met gisting. Referentie AMF166-3, status definitief 1, d.d. 25 januari 2010.
- 7 E-Kwadraat Advies (2011) Biogas in de mobiliteit. Lokale productie, transportsystemen en kiezen transportmethodiek. Referentie 100604, d.d. 25 maart 2011.
- 8 ECN (2010) Conceptadvies basisbedragen 2011 voor elektriciteit en groen gas in et kader van de SDE-regeling. Referentie ECN-E-10-053, d.d. juli 2010.
- 9 Fuel Cell Research Centre (2010), Korea Institute of Science and Technology, Economic Feasibility Study for Molten Carbonate Fuel Cells with Biogas, d.d. 23 december 2010.
- 10 Evaluation of Upgrading Techniques for Biogas, Margareta Persson, October 2003, School of Environmental Engineering, Lund University.
- 11 IEA Bioenergy (2009) Biogas upgrading technologies – developments and innovations, Anneli Petersson, Arthur Wellinger.
- 12 TU Eindhoven (2008), Comparing different biogas upgrading techniques, J. de Hullu e.a., Eindhoven University of Technology, July 3, 2008
- 13 person, M. (2003), Evaluation of upgrading techniques for biogas, School of Environmental Engineering, Lund University, October 2003.
- 14 Kampman, B. (2010), Kosten en milieueffecten van aardgas en biogas in transport, Centrum voor Energiebesparing, Delft, juni 2010.
- 15 Coops, O. en Zundert, E (2003), Benutting biogas Waterschap valley & Eem, Grontmij Water & Reststoffen, De Bilt, 31 januari 2003.

**BIJLAGE 1**

# VRAGENLIJST BEHEER EN BEDRIJFSVOERING WKK

Vragenlijst STOWA Optimalisatie WKK			
nr	Vragen	Antwoorden	Eenheid
<i>Algemeen</i>			
0.1	Naam Waterschap		
0.2	Naam contactpersoon		
0.3	Naam RWZI		
0.4	Op welke jaren hebben de gegevens betrekking?		bv. 2008
0.5	Inkooptarief elektriciteit dagtarief		€/kWh
0.6	Inkooptarief elektriciteit nachttarief		€/kWh
0.7	Verkooptarief elektriciteit dagtarief		€/kWh
0.8	Verkooptarief elektriciteit nachttarief		€/kWh
0.9	Inkooptarief aardgas		€/Nm <sup>3</sup>
<i>Opbouw van de installatie</i>			
1.1	Hoe veel WKK-installaties heeft uw installatie?		
1.2	Hoe veel CV-ketels heeft uw installatie?		
1.3	Welk type WKK is toegepast?		
<i>Ontwerpgegevens WKK's en CV-ketels</i>			
2.1	Bouwjaar WKK-units		-
2.2	Kunnen de WKK-units ook op aardgas draaien? Zo ja, gebeurt dit in de praktijk regelmatig?		-
2.3	P <sub>ELEK</sub> WKK(s) bij vollast		kW
2.4	P <sub>TH</sub> WKK(s) bij vollast		kW
2.5	P <sub>EO</sub> WKK(s) bij vollast		kW
2.6	P <sub>BGR</sub> Biogasreiniging bij vollast		kW
2.7	P <sub>TH</sub> CV-ketel(s) bij vollast		kW
2.8	Rookgaskoeler(s) aanwezig?		
2.9	Toegepast type gasreiniging?		
2.10	Komen er siloxanen voor in het biogas? Wat is hiervan de concentratie?		mg/Nm <sup>3</sup> <sub>CH4</sub>
2.11	Wat is het H <sub>2</sub> S-gehalte in het biogas?		ppm
<i>Bedrijfsgegevens Algemeen</i>			
3.1	Hoe veel aardgas is ingekocht?		Nm <sup>3</sup> /j
3.2	Hoe veel elektriciteit is ingekocht?		kWh/j
3.3	DAGGEMIDDELDE BIOGASOPBRENGST?		m <sup>3</sup> /d
<i>Bedrijfsgegevens WKK's en CV-ketels (Indien trends beschikbaar zijn, kunnen deze worden meegestuurd)</i>			
4.1	Biogas geproduceerd per jaar TOTAAL		Nm <sup>3</sup> /j
4.2	Biogas naar WKK-units per jaar TOTAAL		Nm <sup>3</sup> /j
4.3	Biogas naar CV-ketel(s) per jaar TOTAAL		Nm <sup>3</sup> /j
4.4	Biogas naar gasfakkel per jaar TOTAAL		Nm <sup>3</sup> /j
4.5	Warmtevraag gisting per jaar TOTAAL		MJ / kWh
4.6	Warmtevraag overige warmteverbruikers per jaar		MJ / kWh
4.7	De totale met de WKK-units opgewekte energie per jaar		kWh/j
4.8	P <sub>ELEK</sub> bij vollast		kW
4.9	P <sub>TH</sub> bij vollast		kW
4.10	P <sub>EO</sub> bij vollast		kW
4.11	P <sub>BGR</sub> bij vollast		kW
4.12	Draaiuren per WKK-unit per jaar TOTAAL		h/j
4.13	Draaiuren per WKK-unit per jaar IN VOLLAST		h/j
4.14	Draaiuren per CV-ketel per jaar TOTAAL		h/j
4.15	Aantal dagen per jaar gistingstanks buiten bedrijf		d/j
4.16	Aantal dagen per jaar WKK's buiten bedrijf doordat gistingstanks buiten bedrijf zijn		d/j
4.17	Aantal keer per jaar WKK's buiten bedrijf door storingen		d/j per unit
4.18	Aantal dagen per jaar WKK's buiten bedrijf door storingen		d/j per unit
4.19	Aantal keer per jaar WKK's buiten bedrijf voor onderhoud		d/j per unit
4.20	Aantal dagen per jaar WKK's buiten bedrijf door storingen		d/j per unit
4.21	Bijzonderheden aan storingen? Wat was de oorzaak hiervan?		
4.22	Wie verricht het onderhoud?		-
4.23	Onderhoudskosten per WKK-unit per draaiuur all-in-contract		€/h
4.24	Materiaalkosten per WKK-unit per jaar		€/jr
4.25	Personeelskosten per WKK-unit per jaar		€/jr
4.26	Welke problemen komen veel voor bij de bedrijfsvoering van uw installaties, en wat zijn hiervan, volgens u, de oorzaken?		-
4.27	Welke zaken vallen op bij het onderhoud van uw installaties, en wat zijn hiervan, volgens u, de oorzaken?		-
<i>Optimalisatie WKK's en CV-ketels</i>			
5.1	Zijn er, sinds nieuwbouw, zaken ondernomen om de WKK-installatie te optimaliseren? Zo ja, welke zaken zijn dit?		-