

Rijden en varen op gas

Kosten en milieueffecten van aardgas en groen gas in transport

Rapport

Delft, juni 2010

Opgesteld door:

B.E. (Bettina) Kampman

H.J. (Harry) Croezen

G.M. (Gijs) Verbraak

F.P.E. (Femke) Brouwer

In opdracht van:

Energietransitie - Platform Nieuw Gas



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

B.E. (Bettina) Kampman, H.J. (Harry) Croezen, G.M. (Gijs) Verbaak, F.P.E. (Femke) Brouwer
Rijden en varen op gas
Kosten en milieueffecten van aardgas en groen gas in transport
Delft, CE Delft, juni 2010

Vervoer / Wegverkeer / Scheepvaart / Brandstoffen / Duurzame energie / Gas / Milieu /
Effecten / Kosten

Publicatienummer: 10.4124.43

Opdrachtgever: Agentschap NL.

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl.

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Bettina Kampman.

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.



Inhoud

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Samenvatting | 5 |
| 1 | Inleiding | 7 |
| 1.1 | Aanleiding van deze studie | 7 |
| 1.2 | Doel van het onderzoek | 7 |
| 1.3 | Leeswijzer | 9 |
| 2 | Opties voor transport op gasvormige energiedragers | 11 |
| 2.1 | Inleiding | 11 |
| 2.2 | De verschillende gasvormige energiedragers | 11 |
| 2.3 | Benodigde aanpassingen aan voertuigen en distributie | 13 |
| 2.4 | De referentiebrandstoffen: diesel, biodiesel en bio-ethanol | 19 |
| 3 | Kosten van rijden op gas | 21 |
| 3.1 | Inleiding | 21 |
| 3.2 | Bepalen van de kosten | 21 |
| 3.3 | Kosten van de brandstof | 22 |
| 3.4 | Kosten van vulstations | 29 |
| 3.5 | Kosten van voer- en vaartuigen | 31 |
| 3.6 | Conclusies | 34 |
| 4 | Milieueffecten | 37 |
| 4.1 | Inleiding | 37 |
| 4.2 | Bepalen van de milieueffecten | 37 |
| 4.3 | Emissies van de brandstofproductie | 37 |
| 4.4 | Emissies van de voertuigen | 42 |
| 4.5 | Conclusies | 48 |
| 5 | Cases | 51 |
| 5.1 | Inleiding | 51 |
| 5.2 | Case 1: Personenauto op CNG en bio-CNG | 51 |
| 5.3 | Case 2: Bussen op CNG en bio-CNG | 53 |
| 5.4 | Case 3: Lichte vrachtauto op CNG en bio-CNG | 56 |
| 5.5 | Case 4: Vrachtauto op LNG en bio-LNG | 57 |
| 5.6 | Conclusies van de cases | 59 |
| 6 | Conclusies en aanbevelingen | 63 |
| 6.1 | Vergelijking van de opties: kosten | 63 |
| 6.2 | Vergelijking van de opties: milieu | 64 |
| 6.3 | Kosteneffectiviteit CO ₂ -reductie met deze brandstoffen | 65 |
| 6.4 | Aanbevelingen | 67 |
| | Referenties | 69 |



| | | |
|------------------|---|------------|
| Bijlage A | Terminologie verschillende gassoorten | 75 |
| Bijlage B | Beschrijving aardgasketen en LNG-productie | 77 |
| B.1 | Aardgasketen - van put tot pomp | 77 |
| B.2 | Milieu-effecten | 79 |
| B.3 | Kosten | 80 |
| Bijlage C | Maïsteelt en transport van kuilmaïs | 83 |
| C.1 | Gegevens voor maïsteelt | 83 |
| C.2 | Gegevens voor transport van kuilmaïs | 84 |
| Bijlage D | Vergisting | 87 |
| D.1 | Procesbeschrijving | 87 |
| D.2 | Massabalans, energiebalans | 89 |
| D.3 | Milieubelasting | 90 |
| D.4 | Kosten | 91 |
| Bijlage E | Biogas en stortgas opwerken | 97 |
| Bijlage F | Bio-LNG- en bio-CNG-productie | 101 |
| F.1 | Bio-LNG-productie | 101 |
| F.2 | Bio-CNG-productie | 102 |



Samenvatting

Inleiding

Benzine en diesel hebben verreweg het grootste aandeel in de transportbrandstoffen maar er zijn een aantal alternatieven in opkomst. Dit rapport, dat is geschreven in opdracht van het Platform Nieuw Gas, onderdeel van EnergieTransitie, beschouwt een aantal van de belangrijkste gasvormige alternatieven die nu beschikbaar zijn:

- Compressed Natural Gas (CNG), aardgas onder druk;
- Liquefied Natural Gas (LNG), vloeibaar aardgas;
- bio-CNG en bio-LNG, beiden geproduceerd uit biogas en groen gas¹.

De kosten en milieueffecten van deze brandstoffen zijn in kaart gebracht voor verschillende toepassingen in verkeer: CNG en bio-CNG in personenauto's, kleine vrachtauto's en bussen, en LNG en bio-LNG in vrachtauto's, bussen en binnenvaartschepen. Deze zijn vervolgens vergeleken met de kosten en milieueffecten van diesel, biodiesel en bio-ethanol.

Bij de bio-CNG- en bio-LNG-routes zijn twee verschillende grondstoffen voor het groene gas opgenomen: stortgas en co-vergisting van maïs en mest (in de verhouding 1:1).

Kosten van rijden en varen op gas

Bij het vergelijken van de kosten is gekeken naar kosten van brandstof, vulstations en voertuigen. Alle kosten zijn exclusief heffingen, belastingen en subsidies². Uit de kostenvergelijkingen blijkt dat de groen gas-routes in de huidige omstandigheden in de meeste gevallen duurder zijn dan de diesel-route. De enige uitzondering is rijden op bio-CNG uit stortgas, in het geval de meerkosten van het voertuig beperkt zijn³. Bij personenauto's op bio-CNG zijn de kosten vergelijkbaar of lager dan die van biodiesel en bio-ethanol uit tarwe, bij het zwaardere vervoer zijn de kosten van de groen gas-routes hoger.

Per kostenpost zijn de resultaten als volgt.

- *Brandstofkosten:* De kale brandstofkosten van CNG en LNG zijn in de huidige situatie vergelijkbaar met die van diesel. De kosten van bio-CNG en bio-LNG uit co-vergisting liggen 30-75% hoger dan de huidige dieselprijs, maar de groen gas-routes uit stortgas zijn ca. 50-65% goedkoper dan diesel. Bij de groen gas-routes zijn de kosten sterk afhankelijk van de schaal-grootte van de vergister.
- *Kosten vulstation:* Wagenparkbeheerders zullen in sommige gevallen zelf investeren in een CNG- of LNG-vulpunt. De kosten hiervan variëren met de hoeveelheid brandstof die wordt afgenomen en bedragen ruwweg tussen € 300.000 en € 2 miljoen.

¹ Dit rapport gaat niet in op LPG. Dit is weliswaar ook een gasvormige brandstof, maar is een restproduct van olieraffinage en wordt niet geproduceerd uit aardgas of biogas.

² Voor beleidsmakers en vanuit macro-economisch oogpunt zijn deze kale kosten vaak leidend. Bij het berekenen van de kosten voor gebruikers van het gas (consumenten en bedrijven) moeten deze natuurlijk wel worden meegenomen. De resultaten kunnen dan geheel anders uitkomen.

³ De cases die zijn doorgerekend laten zien dat dit alleen het geval is bij personenauto's.



- *Kosten voertuigen:* Personenauto's op CNG zijn vaak tegen beperkte of geen meerkosten te verkrijgen, maar in het zwaardere segment en voor LNG moet een meerprijs worden betaald, in de orde van € 40.000 voor een stadsbus op CNG en € 65.000 voor een zware vrachtauto op LNG.

Er is overigens wel potentieel om de kosten van de gasvormige routes op termijn te verlagen. Zo zien we dat de voertuigkosten de laatste jaren dalen omdat de productievolumes toenemen. Bovendien nemen over enkele jaren de kosten van dieselauto's en -schepen waarschijnlijk toe door de steeds strenger wordende emissie-eisen. De gasvoertuigen en -schepen voldoen al aan die normen. De brandstofkosten van bio-CNG en bio-LNG kunnen nog dalen als de schaalgrootte van biogasproductie toeneemt.

Milieueffecten

De CO₂-uitstoot van de groen gas-routes is, over de gehele keten bekeken, aanmerkelijk lager dan van diesel (80-90% reductie). De aardgasroutes kunnen ook een CO₂-besparing opleveren, maar die is beperkter (ca. 15-35% bij de huidige aardgasmix in Nederland). De emissiereducties hangen sterk af van herkomst van het aardgas, en in mindere mate van de wijze van biogasproductie. Bio-CNG- en bio-LNG-productie op basis van stortgas scoort iets beter dan co-vergisting.

Als we de groen gas-routes vergelijken met de andere biobrandstoffen die op dit moment worden ingezet (biodiesel en bio-ethanol) dan zien we dat de CO₂-besparing van bio-CNG en bio-LNG aanzienlijk groter is dan van biodiesel en bio-ethanol uit tarwe, en vergelijkbaar of hoger is dan die van bio-ethanol uit suikerriet⁴.

De luchtvervuilende emissies NO_x en PM₁₀ worden sterk gereduceerd bij een overstap van diesel naar gasvormige brandstoffen, in veel gevallen met 50 tot 90%.

Aanbevelingen

Het is aan te bevelen om de resultaten van deze studie in een breder kader te zetten en te vergelijken met kosten en baten van toepassing van groen gas in andere sectoren. Daarnaast is het goed om de komende jaren de kostenontwikkelingen in de gaten te houden. Gezien de redelijk snelle groei in toepassing die we zien is het goed mogelijk dat met name de kosten van de voertuigen in de toekomst gaan dalen terwijl de kosten van de referentievoertuigen en -schepen zullen stijgen als nieuwe emissie-eisen van kracht worden.

⁴ Eventuele broeikasgasemissies ten gevolge van indirecte verandering van landgebruik zijn in dit rapport niet meegenomen. Deze zouden kunnen optreden bij deze vloeibare bio-brandstoffen, en bij de maisteelt voor co-vergisting.



1 Inleiding

1.1 Aanleiding van deze studie

Verreweg het grootste deel van de brandstoffen die op dit moment in het wegverkeer en de binnenvaart worden ingezet zijn benzine en diesel en, in mindere mate, gasolie. Personenauto's, vrachtauto's, bussen en binnenvaartschepen zijn dan ook vrijwel volledig toegerust op deze vloeibare brandstoffen. De afgelopen jaren is de roep om ook naar alternatieven te kijken echter gegroeid, om een aantal redenen:

- om de uitstoot van luchtvervuilende stoffen zoals NO_x en fijn stof te verminderen en de lokale luchtkwaliteit te verbeteren;
- om minder afhankelijk te worden van olie-import en van olieproducerende landen;
- vanwege lagere kosten; of
- een lagere CO₂-uitstoot.

Een aantal van de alternatieven hebben eigenschappen die sterk op die van benzine en diesel lijken: biodiesel, bio-ethanol en nog een aantal biobrandstoffen kunnen tot bepaalde percentages direct worden bijgemengd bij diesel en benzine en in het huidige wagenpark worden toegepast. Hogere percentages kunnen ook worden ingezet, maar vereisen vaak dat de motoren worden aangepast. Op termijn lijken elektrische auto's, of elektrische auto's met een kleinere verbrandingsmotor, ook een kansrijk alternatief voor een deel van de huidige vloot, met name voor personen- en bestelauto's en distributieverkeer. Wellicht dat waterstof ook nog een kansrijke optie is voor de toekomst. Zowel elektrische als ook waterstofvoertuigen kunnen op alle vormen van energie rijden, variërend van kolen- en kernstroom tot hernieuwbare energie. Daarnaast zijn er de gasvormige alternatieven op basis van methaan, zoals aardgas en groen gas dat als Compressed Natural Gas (CNG) wordt toegepast in bijv. personenauto's en bussen, en in de scheepvaart en het zware transport ook als Liquefied Natural Gas (LNG) of bio-LNG wordt ingezet⁵.

In dit rapport nemen we deze gasvormige alternatieven onder de loep: aardgas dat als CNG en LNG kan worden ingezet in transport, en groen gas (opgewerkt biogas) dat als bio-CNG en bio-LNG kan worden toegepast. De kosten en milieueffecten van de toepassing van deze typen gas in de transportsector zijn hiervoor in kaart gebracht en vergeleken met het gebruik van diesel, biodiesel of bio-ethanol. De studie is uitgevoerd in opdracht van het Platform Nieuw Gas, onderdeel van EnergieTransitie.

1.2 Doel van het onderzoek

De belangrijkste doelen van dit onderzoek zijn het in kaart brengen van

- a De kosten van vervoer op alternatieve gasvormige energiedragers.
- b De milieueffecten over de brandstofketens, met name de uitstoot van broeikasgassen en de luchtvervuilende emissies (NO_x, PM₁₀, etc.).

⁵ LPG is ook gasvormig, maar is een restproduct van de olieraffinage en wordt niet geproduceerd uit aardgas of biogas.



Bij de kosten kijken we naar de maatschappelijke kosten, dat wil zeggen de kosten exclusief heffingen, belastingen en subsidies. Dit onderzoek wijkt daarmee af van business case analyses, waarin naar kosten voor consumenten en afnemers wordt gekeken. Voor de overheid en vanuit meer algemeen (macro-) economisch oogpunt zijn maatschappelijke kosten daarentegen vaak leidend, en worden heffingen en subsidies veelal gezien als een verdelingsvraagstuk.

Deze kosten en milieueffecten moeten vervolgens worden vergeleken met de kosten en emissies van brandstoffen in de betreffende vervoerswijze die hierdoor worden vervangen, ofwel diesel, biodiesel of bio-ethanol.

Concreet gaat het om de volgende energiedragers en toepassingen:

Tabel 1 De energiedragers en toepassingen waar we in deze studie naar kijken

| Energiedrager | | Toepassing |
|--------------------------------|---|--|
| CNG | Compressed Natural Gas, o.b.v. aardgas, methaangehalte varieert maar is meestal > 88% | Kleine vrachtauto/bus/ personenauto |
| Bio-CNG * | Geproduceerd o.b.v. biogas, methaangehalte > 88% | Kleine vrachtauto/bus/ personenauto |
| LNG | Liquefied Natural Gas, o.b.v. aardgas, methaangehalte > 97% | Vrachtauto/binnenvaartschip/bus |
| Bio-LNG ** | Op basis van tot biomethaan gezuiverd biogas, methaangehalte > 97% | Vrachtauto/binnenvaartschip/bus |
| Referentiebrandstoffen: | | |
| Diesel | | |
| Biodiesel | | |
| Bio-ethanol | | |

* Wordt ook wel aangeduid met CBM (Compressed Biomethane).

** Wordt ook wel aangeduid met LBM (Liquefied Biomethane).

Er zijn voor de diverse gasvormige energiedragers verschillende namen in omloop, in dit rapport proberen we zoveel mogelijk de afkortingen te gebruiken die in Tabel 1 staan: CNG, bio-CNG, LNG en bio-LNG. Een overzicht van de definities van de diverse gassen die in dit rapport voorkomen is gegeven in Bijlage A.

We kijken in deze studie naar twee verschillende grondstoffen voor het groene gas: stortgas en co-vergisting van maïs (50% mest, 50% maïs). Hiervoor is gekozen omdat dit enerzijds bestaande routes zijn, anderzijds omdat we hiermee het speelveld grotendeels in kaart kunnen brengen, zowel qua kosten als ook qua milieuwinst. In de praktijk is een zeer groot aantal verschillende grondstoffen mogelijk voor groen gas productie, die elk tot andere kosten en milieuwinst zullen leiden.

De studie richt zich verder op de Nederlandse markt.

Biogas, groen gas en biomethaan: vergelijkbaar, maar toch anders

In het volgende lichten we deze drie termen kort toe, waarbij we vooral focussen op het voor dit onderzoek belangrijkste component van deze gassen: het methaangehalte. Het methaan is de component in deze gassen dat de energie voor verbanding levert: hoe hoger het methaangehalte van het gas, hoe hoger de energiedichtheid (per kg of m³ gas), hoe verder een voertuig op één m³ of kg kan rijden.

- **Biogas** is een brandstof die wordt geproduceerd uit biologische grondstoffen, d.m.v. vergisting of vergassing. Het methaangehalte varieert tussen ca. 55 en 65%, de rest van het gas (ca. 35%) is grotendeels CO₂.
- Dit biogas kan worden opgewaardeerd tot **groen gas**. Hierbij wordt het CO₂ grotendeels verwijderd, waardoor het methaangehalte toeneemt. Ook moeten siloxanen, organisch actief materiaal, chloor, zwavel, etc. verwijderd worden. Het gas wordt daarmee van Nederlandse aardgaskwaliteit (het zogenaamde L-gas, Slochterenkwaliteit) en mag worden bijgemengd in het aardgasnetwerk. Groen gas kan in de verkeerssector worden ingezet als bio-CNG. Het methaangehalte van dit groene gas is ca. 89%.
- **Biomethaan** noemen we het gas dat ontstaat als het biogas of het groene gas wordt opgewaardeerd naar een methaangehalte van meer dan 97%. Dit methaangehalte komt overeen met de standaard aardgaskwaliteit die in bijv. Duitsland en Zweden wordt gehanteerd, het zogenaamde H-gas. Biomethaan kan in de verkeerssector worden ingezet als bio-CNG of bio-LNG.

1.3 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd.

- Hoofdstuk 2 geeft een algemeen overzicht van de gasvormige energiedragers voor transport en een beknopte beschrijving van wat er voor aanpassingen nodig zijn aan voertuigen en distributie om op deze brandstoffen te rijden.
- Hoofdstuk 3 brengt de kosten van rijden en varen op gas in kaart. Deze kosten worden vervolgens vergeleken met die van rijden en varen op diesel, biodiesel of bio-ethanol.
- In hoofdstuk 4 worden de milieueffecten berekend en onderling vergeleken. De focus ligt hierbij op de CO₂-emissies over de keten van de brandstoffen, maar we besteden ook aandacht aan de gevolgen voor luchtvervuilende emissies.
- In hoofdstuk 5 kijken we naar wat de resultaten uit de vorige hoofdstukken concreet betekenen voor een aantal specifieke cases.
- Conclusies en aanbevelingen worden in hoofdstuk 6 gegeven.





2 Opties voor transport op gasvormige energiedragers

2.1 Inleiding

Voordat we de kosten en milieueffecten van deze gasvormige energiedragers voor transport in kaart brengen, geven we in dit hoofdstuk eerst een wat algemenere, technische uitleg van de verschillende opties. Wat zijn de verschillen, welke grondstoffen en productieroutes worden er toegepast, hoe moeten de voertuigen en schepen worden aangepast, etc. We beschrijven hier achtereenvolgens CNG uit aardgas, bio-CNG uit groen gas, LNG en bio-LNG.

2.2 De verschillende gasvormige energiedragers

2.2.1 CNG (Compressed Natural Gas)

Nadat aardgas is gewonnen, wordt het behandeld om aan de eisen van de afnemers te voldoen en getransporteerd in hoge druk pijpleidingen. Nederland produceert aardgas op verschillende locaties, waarbij Slochteren ongetwijfeld de grootste en meest bekende is. Andere grote aardgasproducerende landen zijn bijv. Rusland, het Midden-Oosten, Noorwegen en Algerije. Dat gas wordt ook naar Nederland getransporteerd, via pijpleidingen of LNG-tankers (zie verderop). Op dit moment maken vooral andere landen binnen de EU veel gebruik van aardgasimport. In Nederland is het aandeel nog relatief beperkt, bovendien is de Nederlandse export van aardgas groter dan de import⁶. De komende jaren zal het aandeel geïmporteerd aardgas echter toenemen, omdat de Nederlandse voorraden langzaam maar zeker afnemen, en daarmee ook de productievolumes.

Aardgas dat is opgewerkt tot een bepaalde kwaliteit en vervolgens onder druk is opgeslagen (CNG, Compressed Natural Gas) kan in verkeer worden toegepast, als vervanger voor diesel of benzine.

Vanwege de eigen aardgasvoorraden, kan een overstap op aardgas voordelen bieden t.a.v. energievoorzieningszekerheid. Daarnaast beschikt Nederland over een uitgebreid aardgasnetwerk. Dit aardgasnetwerk kan naast haar huidige functie ook ingezet worden voor de distributie van aardgas en groen gas (opgevaardeerd biogas) voor toepassing als voertuigbrandstof. Het netwerk zal volgens JEC (2007) capabel zijn om aan extra vraag vanuit transport te voldoen.

Ondanks de op zich gunstige condities in Nederland voor de toepassing van aardgas als transportbrandstof blijven de ontwikkelingen achter ten opzicht van een aantal andere landen. Zo beschikt een redelijk aantal landen over uitgebreide distributienetwerken waarvan door een groot aantal gebruikers gebruik van wordt gemaakt. Wereldwijd wordt CNG in meer dan 11 miljoen voertuigen toegepast (2008-data, <http://www.iangv.org/>). Echte koplopers bevinden zich in zowel Zuid-Amerika (Argentinië: 1,7 miljoen voertuigen, Brazilië: 1,6 miljoen) als in Azië (Pakistan: 1,6 miljoen) om op grote afstand

⁶ www.cbs.nl .



gevolgd te worden door Europa (1,1 miljoen)⁷. Omdat een overstap van benzine en diesel naar aardgas de nodige investeringen vergt, gaat deze niet vanzelf en zien we dat de succesvolle ontwikkelingen in de verschillende landen gepaard gaan met gericht overheidsbeleid.

Een uitgebreidere beschrijving van de aardgasketen is gegeven in Bijlage A, een nadere toelichting over de toepassing in verkeer volgt in paragraaf 2.3.1.

2.2.2 Bio-CNG

Bio-CNG wordt geproduceerd uit biogas, dat allereerst wordt opgewerkt tot aardgaskwaliteit - we noemen het dan 'groen gas'. Dit wordt vervolgens gecompriëerd. Het biogas kan worden geproduceerd uit verschillende organische grondstoffen (biomassa). In dit rapport kijken we naar twee routes: biogas uit stortgas en uit co-vergisting van mais en mest.

Bij vergisting worden de in biomassa aanwezige suikers, zetmeel, eiwitten, vetten, cellulose en hemicellulose omgezet in biogas: een mengsel van methaan en kooldioxide. Natte biomassa is hier bij uitstek geschikt voor, omdat de microbiologische reacties zich in de waterfase afspelen. Naast biogas worden dan ook bijproducten afgescheiden, met daarin een groot gedeelte van de nutriënten die de biomassa bevat. Deze worden dan geschikte meststof. Dit zogenaamde digestaat kan ook worden verbrand of vergast.

Vergisting is geen nieuwe technologie en is ook commercieel verkrijgbaar, maar het is nog niet uitontwikkeld. Diverse landen zoals Zweden en Denemarken hebben er al veel ervaring mee opgedaan, waarbij met name op relatief kleine, lokale schaal biogas wordt geproduceerd. Schaalvergroting kan de kosten waarschijnlijk nog flink drukken, daar wordt voor de toekomst nog veel van verwacht.

Zowel in Nederland als in het buitenland is de toepassing van groen gas of biomethaan als voertuigbrandstof nog vrij ongebruikelijk. Slechts enkele openbare pompstations bieden dit gas aan, daarnaast rijdt een deel van de busvloot op groen gas. In het buitenland zijn al meer projecten opgezet, in onder meer Lille, Stockholm en Bern rijden enkele honderden bussen op biomethaan (PDM, 2009). Landen die beschikken over een uitgebreid distributienetwerk en aardgaswagenvoerlijn kunnen, indien genoeg groen gas beschikbaar komt, vrij gemakkelijk en geleidelijk overschakelen.

Het biogas moet dan wel eerst worden opgewaardeerd naar aardgaskwaliteit (zie bijv. EnergieTransitie (2007) voor een introductie in de verschillende manieren van opwaardering). De levering van dit 'groene gas' heeft als groot voordeel dat het in het bestaande aardgasnetwerk kan worden geïnjecteerd en er geen aparte infrastructuur voor nodig is. Doordat bio-CNG en CNG op elkaar lijken kan een deel van de voertuigen en schepen geleidelijk overschakelen van CNG naar bio-CNG, of een mix van beide. Het motormanagement moet hier wel op voorbereid zijn, om problemen met de motor te voorkomen.

Dit kan ofwel direct, ofwel virtueel: de gebruiker rijdt dan op aardgas, het equivalent aan groen gas wordt elders in het land aan het aardgasnet toegevoegd en afgenomen (PDM, 2009). Hier is een certificeringssysteem voor opgezet (zie bijv. www.vertogas.nl).

⁷ Actuele mondiale CNG-voertuigstatistieken zijn te vinden op <http://www.iangv.org/tools-resources/statistics.html>



Als groen gas wordt toegepast in verkeer kan het meetellen bij het halen van de biobrandstofdoelstelling van de overheid. De afgelopen jaren zijn verschillende biobrandstoffen op de Nederlandse markt gekomen, gestimuleerd door een verplichting die aan de oliemaatschappijen is opgelegd om bepaalde percentages biobrandstof te verkopen. Tot nog toe zijn de gestelde doelen voornamelijk gehaald door bijmenging van biodiesel en bio-ethanol aan de gangbare diesel en benzine. Pas recentelijk is er ook in Nederland concrete aandacht voor groen gas. Ten opzichte van biodiesel en bio-ethanol heeft groen gas het voordeel dat het uit reststromen kan worden geproduceerd⁸. Dat leidt in het algemeen tot veel of zelfs zeer veel CO₂-reductie (veelal meer dan 75% over de keten), het concurreert niet met de voedselindustrie en er is ook geen vruchtbare grond nodig om de gewassen te telen. Dit voordeel is uiteraard het grootst bij groen gas uit stortgas, maar wordt kleiner in het geval van co-vergisting, waarbij geteelde snijmais wordt toegevoegd aan mest. Als het biogas uit afvalstromen wordt geproduceerd voldoet het automatisch aan de duurzaamheidseisen voor biobrandstoffen die door de EU zijn opgesteld, en mag het bovendien dubbel tellen voor de doelstelling voor hernieuwbare energie in transport, zowel in Nederland als in de EU (EC, 2009). Groen gas veroorzaakt daarnaast veel minder luchtvervuilende emissies.

2.2.3 LNG (Liquid Natural Gas) en en bio-LNG

LNG-productie behelst het afkoelen van het behandelde aardgas, tot -162°C, iets lager dan het kookpunt van het hoofdbestanddeel van het gas, methaan. Het gas wordt dan vloeibaar, waardoor de energiedichtheid aanzienlijk toeneemt. Het methaangehalte van LNG is meer dan 97%.

Dit LNG kan worden getransporteerd met geïsoleerde tankers, die het onderweg verdampte LNG (boil off) gebruiken voor de aandrijving (soms naast zware stookolie). Op de plek van bestemming kan de LNG vervolgens worden overgepompt naar opslagtanks van een LNG-terminal, of verder worden gedistribueerd naar een depot of bunkerstation. Het LNG kan ook geschikt gemaakt worden voor verdere distributie met het aardgasnet, via compressie tot typisch 80 bar en verdamping.

Bio-LNG wordt op dezelfde manier geproduceerd, maar dan uit biomethaan i.p.v. uit aardgas.

2.3 Benodigde aanpassingen aan voertuigen en distributie

2.3.1 Rijden op CNG en bio-CNG

In Nederland wordt aardgas als voertuigbrandstof nog maar beperkt gebruikt, er zijn ruim 2.000 aardgasvoertuigen op de weg: 1.350 personenauto's, ca. 540 bussen en 140 trucks (Gas Vehicles Report, 2009). Het aantal is echter wel aan het toenemen. Ook de infrastructuur voor het rijden op aardgas bevindt zich nog in de beginfase, maar is groeiende. Momenteel zijn er in Nederland in totaal 43 openbare en 14 niet publieke tankstations operationeel (www.aardgasmobiel.nl, 1 februari 2010) waar CNG kan worden getankt. Stadsbussen zijn een belangrijke sector waarin aardgas op dit moment wordt toegepast, de planning was dat eind 2009 10% van de Nederlandse OV-bussen op aardgas of groen gas rijdt (PDM, 2009)⁹.

⁸ NB. Biodiesel kan en wordt deels ook uit reststromen geproduceerd, namelijk uit gebruikt frituurvet.

⁹ Ons is op dit moment niet bekend of deze doelstelling inderdaad is gehaald.



Achtergrond hiervan is met name de wens van de lokale en regionale overheden om de lokale luchtkwaliteit te verbeteren, daarnaast speelt ook klimaatbeleid een rol.

Een duidelijke barrière voor een groei van de aandelen aardgas en groen gas in transport is het kip-ei-probleem: zolang het aardgaspomppstationnetwerk in Nederland beperkt is, zullen autokopers niet snel besluiten tot aanschaf van een dergelijk voertuig, overeenkomstig geldt voor pomphouders die overwegen om aardgasvulpunten aan te bieden dat er groei moet zijn in het aantal aardgasvoertuigen. Investeringskosten kunnen pas bij voldoende afname worden terugverdiend.

Wel vinden er momenteel bijvoorbeeld door Agentschap NL¹⁰ gesteunde proefprojecten plaats met bussen en taxi's, bij deze voertuigen kan worden volstaan met een beperkt aantal vulpunten. Daarnaast zijn er projecten met afvalinzamelingvoertuigen die het ingezamelde biogene afval omzetten in biogas. In dit project wordt bio-CNG middels een openbare pomp op de markt gebracht, daarnaast wordt het gas toegepast in de huisvuilwagens. In een aantal steden in andere landen zijn al eerder soortgelijke projecten opgezet: onder meer in Lille, Stockholm en Bern rijden enkele honderden bussen op groen gas (PDM, 2009).

Door een aantal redenen (relatief lage energiedichtheid van het CNG of bio-CNG¹¹, hoog gewicht van de tanks en soms lastig inpassing in het voertuig vanwege beperkingen t.a.v. de vorm van de tank) is de actieradius van deze voertuigen relatief beperkt. Bij voertuigen die lange afstanden afleggen kan dit een belemmering zijn. De brandstof is dus vooral toepasbaar bij voertuigen die een beperkt aantal kilometers rijden of bij voertuigen die vaak terugkomen bij het tankstation (bijv. bussen in stedelijk gebied).

Door aardgas of groen gas aangedreven voertuigen komen technisch grotendeels overeen met conventionele aandrijflijnen. Vrijwel alle fabrikanten brengen een groeiend aanbod van aardgas aangedreven voertuigen op de markt (Fuelswitch, 2009). Personenauto's worden aangeboden door o.a. Volkswagen, Fiat, Mercedes, Volvo, Ford en Citroen, bussen en vrachtwagens door o.a. MAN, Iveco en Mercedes. Daarnaast is het ook mogelijk om een bestaande benzine- of dieselmotor om te bouwen (retrofit) naar een aardgas-/groen gas-motor (Courage, 2009).

Er zijn drie verschillende configuraties mogelijk;

- *bi-fuel motoren*: rijden op ofwel 100% gas, ofwel 100% benzine;
- *dual-fuel motoren*: rijden op een mix van gas en diesel (tussen 0 en meer dan 80% gas)¹²;
- *gasmotoren*: rijden alleen op 100% gas (aardgas en/of groen gas).

Aardgaspersonenvoertuigen die door fabrikanten op de markt worden gebracht maken doorgaans gebruik van bi-fuel motoren waarbij door de gebruiker de gewenste brandstof kan worden geselecteerd. Het betreft hier aangepaste benzinemodellen. Het voordeel van deze motoren is dat men minder afhankelijk is van de beschikbaarheid van CNG/bio-CNG, in geval van nood kan

¹⁰ http://www.senternovem.nl/eos/infotheek/projectencatalogus/Projecten/uneke_kansen_regeling/rijden_op_biogas_in_nederland.asp .

¹¹ Energiedichtheid is gedefinieerd als de hoeveelheid energie per volume-eenheid.

¹² Zie bijv. <http://www.unece.org/trans/doc/2001/wp29grpe/TRANS-WP29-GRPE-42-inf18.pdf> voor meer informatie over dual-fuel motoren.



toch op benzine verder worden gereden tot aan een aardgas pomp. Daarbij is het goed om op te merken dat sommige fabrikanten hun modellen voor aardgas hebben geoptimaliseerd terwijl andere merken dit voor benzine hebben gedaan. Hierdoor ontstaan verschillen in verbruiks- en emissiecijfers.

Bij vrachtauto's wordt er naast dedicated aardgas motoren ook gebruik gemaakt van dual-fuel motoren. Omdat dieselmotoren werken op basis van compressie dient er in deze voertuigen naast gas altijd ook een deel diesel ingespoten te worden. Bij alleen gas inspuiting zou verbranding door compressie niet tot stand komen. Volvo is er onlangs (als eerste) in geslaagd om een dual-fuel vrachtauto binnen de Euro 5-norm te brengen, deze wordt de komende tijd in de praktijk getest¹³.

Ongeacht het motor- of gastype dient het gas te worden opgeslagen onder hoge druk, ca. 200-250 bar (JEC, 2007). Door de hoge druk is een ander type tank benodigd dan voor de opslag van diesel of LPG. Voor de veiligheid is deze voorzien van een overdrukventiel.

Aardgas motoren zijn speciaal ontwikkeld om aardgas als brandstof te gebruiken. De (milieu)prestaties van een gasmotor zijn dan ook beter dan bij dual-fuel toepassing omdat de motor geoptimaliseerd kan worden voor de brandstof (JEC, 2007).

Vanwege de lagere energiedichtheid van CNG/bio-CNG ten opzichte van diesel is ook een grotere tank nodig om de actieradius te behouden. Dit vertaalt zich echter in een hoger gewicht, bij eenzelfde actieradius. De tank kan van staal of aluminium met kunststof of volledig van kunststoffen worden vervaardigd (JEC, 2007), waarbij de laatste ca. 70% lichter is. Als het in de toekomst mogelijk wordt om aardgas te tanken met een hoge dichtheid onder lagere druk door de toepassing van absorbtietechnologie is het mogelijk te besparen in ruimte. Bij lagere druk volstaat het gebruik van minder sterke en daardoor minder dure brandstoftank, daar staat echter tegenover dat een dure vulling moet worden toegepast.

Bij retrofit-voertuigen gaat de installatie van de CNG/bio-CNG-tank vaak ten koste van laadruimte in een auto, en soms ook ten koste van de fabrieksgarantie van het voertuig. Bij af-fabriek voertuigen kan de tank door de verplaatsing van onderdelen zo geplaatst worden dat er geen of minder ruimte verloren gaat. Vaak wordt bij deze procedure de capaciteit van de benzine-tank verkleind omdat deze minder belangrijk wordt. Daarnaast zijn een aantal andere aanpassingen aan de motor nodig.

2.3.2 Distributie van CNG en bio-CNG

Zoals aangegeven zijn er in Nederland momenteel een beperkt aantal vulstations voor gas, dit netwerk wordt echter wel gestaag uitgebreid. De distributie van CNG/bio-CNG kan op vele verschillende wijzen worden vormgegeven, in het volgende worden de diverse opties beschreven.

Distributie van CNG/bio-CNG per tankwagen

Het aardgas of biomethaan wordt gecomprimeerd (200-250 bar) op de locatie waar het wordt gewonnen cq. geproduceerd. Vervolgens wordt het gecomprimeerde gas met eigen aangelegde pijpleidingen of met tankwagens gedistribueerd naar de pompstations (Holland Innovation Team, 2008).

¹³ pnt.volvo.com/e/getPdf.aspx?id=8102 .



Aardgasnetwerk/injectie bio-CNG

Daarnaast kan aardgas ook gedistribueerd worden met behulp van het bestaande aardgasnetwerk. Groen gas kan worden geïnjecteerd in het aardgasnetwerk als het voldoet aan de eisen en als er genoeg afnamecapaciteit beschikbaar is. De beschikbare capaciteit voor de inspuiting van groen gas in lage druknetten kan in sommige gevallen een beperkende factor zijn, omdat de inspuiting niet groter mag zijn dan het verbruik op enig moment (EnergieTransitie, 2009). Bij levering via het netwerk wordt het gas onder druk gebracht op locatie.

Deze optie kan in veel gebieden goedkoper zijn dan distributie per tankwagen of speciale pijpleiding. Doordat het gas mengt in de leidingen en het aandeel groen gas in het eindproduct niet meetbaar is, moet administratief worden bepaald welk percentage groen gas worden geleverd aan de individuele brandstofpompen. Door een certificatenstelsel (zie hieronder) kan het groen gasdeel van de mix vervolgens wel als bio-CNG worden vermarkt en geregistreerd.

Virtueel groen gasgebruik, d.m.v. certificaten

Naar aardgas specificaties opgewerkt biogas (groen gas) kan in het aardgasnetwerk worden geïnjecteerd. Door middel van een certificatenstelsel (enigszins analoog aan het stelsel van groene stroom) is het mogelijk om dit groene gas dan toch in transport te vermarkten, terwijl de voertuigen zelf op aardgas rijden (zie www.vertogas.nl). Het certificatenstelsel zorgt ervoor dat de hoeveelheid als groen gas vermarkt gas gelijk is (of in elk geval niet meer is dan) de geïnjecteerde hoeveelheid groen gas (Courage, 2009; PDM, 2009).

Distributie van LNG en bio-LNG per tankwagen

Als alternatief voor distributie van CNG/bio-CNG naar de vulpunten kan er ook worden gekozen om de stations met LNG/bio-LNG te bevoorraden met behulp van tankwagens. Doordat de LNG/bio-LNG minder volumineus is dan CNG/bio-CNG zijn bij de levering in vloeistofvorm minder voertuigen nodig per tankstation voor eenzelfde hoeveelheid gas. Op de tankstations kan de LNG/bio-LNG vervolgens als zodanig worden verkocht, of worden omgezet in CNG/bio-CNG. Combinatie van LNG/bio-LNG met CNG/bio-CNG kan als logisch worden beschouwd doordat er dan aan beide categorieën aardgasauto's kan worden geleverd. Bovendien is het methaangehalte van de zo geproduceerde CNG/bio-CNG hoger dan bij aardgas of groen gas van Slochterenkwiteit, omdat LNG/bio-LNG een methaangehalte van minimaal 97% bevat (tegen ca. 88% bij 'gewoon' aardgas of groen gas). Dit komt de actieradius ten goede. Deze route biedt ook interessante mogelijkheden om CNG/bio-CNG te leveren op plaatsen ver van een aardgasnet aansluiting.

Privé aansluiting aardgasnetwerk

Bedrijven kunnen het wagenpark ook vullen vanaf het bestaande aardgasnetwerk, door hierop een compressorstation aan te sluiten. Een dergelijk thuisvulstation kan ook worden aangeschaft voor privé gebruik (Courage, 2009). Momenteel wordt namelijk onderzocht of er ook gebruik kan worden gemaakt van sponsachtige materialen waarmee het gas in grote dichtheden onder lage druk kan worden opgeslagen. Deze manier van distributie zou zowel extra compressie onnodig maken waardoor er direct uit het hogedruk aardgasnetwerk kan worden getankt.

Ook bij de levering via privéaansluitingen kan groen gas worden getankt via het certificatenstelsel.



Distributie bio-CNG op productielocatie

Aangezien de productie van biogas veelal decentraal plaatsvindt kan er ook voor worden gekozen om de brandstof dichtbij de productielocaties aan de pomp aan te bieden. Het geproduceerde gas kan dan decentraal worden opgewerkt en gecompriëerd naar CNG-kwaliteit, of verwerkt tot bio-LNG.

2.3.3 Rijden op LNG en bio-LNG

Er wordt wereldwijd nog op relatief beperkte schaal gebruik gemaakt van LNG als brandstof voor bussen en auto's, in landen als Amerika, het Verenigd Koninkrijk, Spanje, Australië en China. Vergeleken met CNG/bio-CNG is het gebruik vooral interessant voor voertuigen die grotere afstanden afleggen en daardoor een behoefte hebben aan een grotere energiedichtheid, vergeleken met CNG/bio-CNG. Bij eenzelfde hoeveelheid gas heeft LNG een drie keer kleiner volume dan CNG. De actieradius van LNG/bio-LNG-vrachtwagens is door deze grotere energiedichtheid met 900-1.400 km beduidend hoger dan de 300-500 km bij CNG/bio-CNG (Courage, 2009). Daar staat echter tegenover dat de kosten van rijden op LNG/bio-LNG hoger zijn dan bij CNG/bio-CNG, omdat de gasinstallatie duurder uitvalt.

Voertuigen die op LNG of bio-LNG willen rijden, moeten op verschillende punten worden aangepast. Speciale geïsoleerde tanks moeten worden geïnstalleerd om gasvorming en drukopbouw door opwarming te voorkomen. Daarnaast moeten ventielen op de tank overdruk voorkomen in het geval de druk in de tank door bijv. langdurige stilstand te hoog is opgelopen. Er zal ook meer ruimte moeten worden gereserveerd in het voertuig voor de inpassing van de tank. Doordat de energiedichtheid van (bio-) LNG 40% lager ligt dan die van diesel is een brandstoftank nodig die 1,7 maal zo groot is als bij diesel, bij eenzelfde actieradius.

Voordat de brandstof ingespoten kan worden in de motor wordt deze verdampt en op de juiste druk gebracht. Het verkregen gas kan vervolgens worden toegepast in één van de motortypen die in paragraaf 2.3.1 zijn beschreven.

2.3.4 Varen op LNG en bio-LNG

Wereldwijd wordt er al op beperkte schaal gebruik gemaakt van LNG om zeeschepen aan te drijven. Allereerst zijn er een aantal LNG-tankers in de vaart die de boil-off van de LNG-lading gebruiken voor de aandrijving. Aangezien de vraag naar LNG wereldwijd toeneemt (het aantal LNG-terminals groeit¹⁴), kan worden verwacht dat dit soort schepen in aantal toe zal nemen.

Daarnaast wordt LNG ook steeds vaker als brandstof voor veerdiensten en de kustvaart toegepast. Noorwegen neemt bij deze toepassing de rol van koploper in met op dit moment 16 schepen in de vaart die door LNG worden aangedreven¹⁵, een aantal nieuwe veerboten op LNG zijn recent van stapel gelopen¹⁶. Door de lagere energiedichtheid van LNG ten opzichte van diesel en stookolie (één liter diesel heeft 40% meer energie-inhoud dan één liter LNG) wordt bij LNG hoofdzakelijk in de kustvaart toegepast (met uitzondering van de hierboven genoemde LNG-tankers).

¹⁴ <http://www.energy.ca.gov/lng/international.html> .

¹⁵ <http://www.ngvgroup.com/pdf/gvr94-112009.pdf> .

¹⁶ http://www.csrwire.com/press/press_release/28234-Fjord1-with-new-LNG-ferries- .



Ondanks de toenemende toepassing in zeeschepen is het gebruik van LNG in de binnenvaartsector nieuw. In Nederland zijn enkele innovatieve projecten recent opgestart, met als doel om LNG in de binnenvaart te introduceren¹⁷.

LNG kan in de scheepvaart ook worden ingezet als alternatieve brandstof voor stroomproductie aan boord met behulp van hulpmotoren, of een rol spelen in de productie van walstroom (HIT, 2008). Aangezien walstroom een substituuut is voor de elektriciteitsproductie aan boord kan dit ook worden beschouwd als een alternatief traject voor schepen.

De benodigde aanpassingen aan binnenvaartschepen lijken op de aanpassingen in het wegtransport: LNG moet onder zeer lage temperaturen worden opgeslagen, zodat speciale tanks moeten worden geïnstalleerd. Daarnaast zijn, in vergelijking met diesel, grotere of meer tanks nodig om eenzelfde actieradius te behouden. Bij schepen die een grote actieradius nodig hebben kan de ruimte die deze tanks aan boord in beslag nemen dan ook een belemmering zijn.

Ook brengt het gebruik van LNG extra veiligheidseisen met zich mee. Vanwege veiligheidsrisico's is de uitwendige inpassing van brandstoftanks bij personenvervoer verboden (EnergieTransitie, 2009). Machinekamers dienen vanwege veiligheidsmaatregelen anders te worden gebouwd of te worden aangepast. Zo wordt in bepaald ontwerpen gebruik gemaakt van onderdruk in de machinekamer (EnergieTransitie, 2009). Regelgeving van de International Maritime Organisation (IMO) vereist dat er gebruik wordt gemaakt van dubbele leidingen waarbij eventuele lekkages door de tweede buis worden afgezogen (EnergieTransitie, 2009).

Voordat LNG ingespoten kan worden in de motor voor verbranding dient de vloeistof omgezet te worden naar (gecomprimeerd) gas. De vloeistof moet daarvoor worden verdampt en op de juiste druk gebracht worden.

Naast nieuwbouwschepen is het mogelijk bestaande motoren om te bouwen voor de toepassing van LNG. Er moet dan wel ruimte worden gevonden voor de LNG-opslag. De configuraties die toegepast worden in de scheepvaart zijn de dual-fuel motoren en gasmotoren die al eerder (in paragraaf 2.3.1) zijn besproken. In de huidige schepen wordt naast de installatie van gasmotor(en) vaak ook nog een dieselback-up systeem gemonteerd. Dit heeft naast een praktische ook een wettelijke achtergrond, niet overal kan zonder vergunning op LNG of CNG worden gevaren.

2.3.5 Distributie van LNG en bio-LNG

Er zijn op dit moment nog geen mogelijkheden in Nederland om LNG of bio-LNG te tanken. Er zijn wel een aantal initiatieven om een LNG-netwerk op te zetten, bijv. door Rolande LNG¹⁸ (een eerste LNG-tankstation is in aanbouw) en Ballast Nedam IPM¹⁹. Daarnaast wordt wel gewerkt aan een LNG-terminal op de Maasvlakte, maar deze Gate terminal is bedoeld voor de aanvoer, opslag en levering van aardgas voor het Nederlandse aardgasnet. Naar verwachting zal de terminal in de tweede helft van 2011 operationeel zijn (www.gate.nl). Daarnaast zijn nog een aantal andere initiatieven, maar die bevinden zich noch in de plannings- en onderzoeksfase ('t Hart, 2009). In Zeebrugge, België,

¹⁷ <http://www.informatie.binnenvaart.nl/innovatie/techniek/256-lng-dual-fuel-project.html>, en <http://www.schipcobv.eu/schipconl.html> .

¹⁸ <http://www.rolandelng.nl/> .

¹⁹ <http://www.bnipm.nl/> .



is al wel een LNG-terminal operationeel, op vrij korte afstand van Nederland. Een deel van dit gas wordt ook al via trucks gedistribueerd naar diverse gebruikers.

Er zijn plannen geweest om een LNG-tankstations in Oss te bouwen, dat via de Zeebrugge terminal van LNG zou worden voorzien. De geïnteresseerde logistieke ondernemers, waaronder Den Hartogh en Vos Logistics, hebben hun ontwikkelingen op dit gebied echter stilgezet vanwege de crisis, waardoor de ontwikkeling van dit tankstation ook is gestopt ('t Hart, 2009). Er wordt nu gezocht naar alternatieve locaties.

Een alternatieve optie is om LNG per schip te laten aanvoeren, bijvoorbeeld vanuit Noorwegen. Dit gebeurt nu ook al voor het Verenigd Koninkrijk en Zweden ('t Hart, 2009).

Er zijn in principe twee mogelijkheden voor de distributie van het LNG en bio-LNG naar de eindgebruikers.

Distributie van LNG en bio-LNG met tankwagens of bunkerschepen

Deze optie is al eerder beschreven, in paragraaf 2.3.2. Voor binnenvaart-schepen kan de levering plaatsvinden met tussenkomst van een opslagplaats op de wal, of via een bunkerschip. In Noorwegen is al veel ervaring met deze vorm van LNG-distributie (Gasnor AS, 2008).

Aardgasnetwerken/bio-CNG-injectie

Het is in bepaalde gevallen mogelijk om gebruik te maken van het bestaande aardgasnetwerk, en het aardgas of (geïnjecteerde) groen gas vervolgens op locatie te verwerken tot LNG/bio-LNG. Voor deze optie dient naast andere factoren de capaciteit van de gasnetwerken toereikend te zijn. Deze optie zou aantrekkelijk kunnen zijn als er een aardgasnetwerk ontwikkeld is maar in de buurt geen LNG productie of import plaatsvindt, maar de kosten kunnen een belemmering zijn. Voor het vermarkten van bio-LNG kan dan net als bij bio-CNG gebruik worden gemaakt van certificaten.

2.4 De referentiebrandstoffen: diesel, biodiesel en bio-ethanol

Om de kosten en effecten van de gasvormige brandstoffen te bepalen moet natuurlijk ook goed worden gekeken naar de vraag welke brandstoffen erdoor worden vervangen.

In de huidige praktijk lijkt dat ze vooral diesel vervangen, allereerst omdat dit verreweg de meest gangbare brandstof is voor bussen en vrachtauto's (www.cbs.nl), daarnaast ook omdat de meeste luchtkwaliteitswinst kan worden behaald door dieselvoertuigen te vervangen, de NO_x- en PM₁₀-uistoot van dieselauto's ligt aanzienlijk hoger dan bij benzineauto's (al zal dit verschil het komende decennium verder verminderen door aanscherping van de emissie-eisen voor dieselvoertuigen).

Zodra het groene gas echter ook meetelt voor de Nederlandse biobrandstofdoelstelling zal het gas voornamelijk leiden tot een verlaging van de inzet van andere biobrandstoffen. Aangezien deze duurder zijn dan benzine en diesel, is niet te verwachten dat de brandstoffenindustrie meer biobrandstoffen zal verkopen dan nodig om het doel te halen. Meer groen gas betekent dan dat minder biodiesel of bio-ethanol wordt bijgemengd (bij gelijkblijvende doelen). Op dit moment mag groen gas dat via certificaten in de transportsector wordt ingezet (en dus eigenlijk in het aardgasnet wordt bijgemengd)



inderdaad meetellen voor de transportdoelstelling, het is echter nog niet duidelijk of dit in de toekomst ook zo zal blijven.

In dit rapport vergelijken we daarom CNG en LNG met diesel, en bio-CNG en bio-LNG met zowel diesel als ook met bio-ethanol en biodiesel²⁰. Omdat deze laatste twee duurder zijn dan diesel, komt de kostenvergelijking dan positiever uit. De CO₂-winst wordt echter kleiner, omdat we ervan uit gaan dat bio-ethanol en biodiesel ook een lagere CO₂-uitstoot hebben dan diesel (zie paragraaf 4.3.3).

Omdat toepassing van de CNG/bio-CNG/LNG en bio-LNG vooral in nieuwe voertuigen en schepen wordt overwogen, vergelijken we deze brandstoffen met de kosten en emissies van nieuwe diesellovoertuigen en schepen die aan de huidige geldende emissie-eisen van de specifieke modaliteiten voldoen (Euro 5). De milieueffecten zullen ten opzichte van het gemiddelde voertuigenpark groter zijn, omdat oudere voertuigen en schepen gemiddeld vervuilender zijn dan nieuwere.

Diesel wordt met behulp van binnenvaartschepen en tankwagens bezorgd bij tankstations en grootverbruikers. Personenauto's tanken vooral bij openbare pompstations. Bedrijfsvoertuigen gebruiken zowel particuliere als openbare pompstations. Bio-ethanol en biodiesel wordt voornamelijk bijgemengd bij de fossiele benzine en diesel. De biobrandstofpercentages zijn op dit moment nog beperkt (doelstelling voor 2010 is 4%, op energiebasis) zodat deze blends zonder problemen aan de pomp als standaard brandstof kunnen worden verkocht.

Binnenvaartschepen varen in Nederland vrijwel uitsluitend op dieselolie. Deze wijkt vaak wel af van de diesel die in het wegvervoer wordt ingezet, met name wat betreft het zwavelgehalte. Naast de gebruikelijke dieselolie wordt er momenteel door een selecte groep schepen gevaren op laagzwavelige dieselolie (EN 590)²¹. De gehele sector zal in 2011 overgaan op het gebruik van zwavelvrije dieselolie EN 590²².

In deze studie gebruiken we een schip als referentie dat aan de huidige emissienormen voor schepen voldoet.

Voor de distributie van dieselolie naar binnenvaartschepen wordt de dieselolie allereerst getransporteerd naar bunkerstations, per schip of per tankwagen. Vanaf hier worden de schepen van brandstof voorzien met behulp van bunkerstations en bunkerschepen.

²⁰ Daarbij houden we er rekening mee dat bio-ethanol in de praktijk benzine vervangt en biodiesel een vervanger is van diesel. We gaan er verder vanuit dat als het groene gas meetelt voor de biobrandstoffendoelstelling, dit gas één van deze twee biobrandstoffen zal vervangen. Welke dat zal zijn hangt af van de specifieke situatie, m.a.w. van prijs en beschikbaarheid van bio-ethanol en biodiesel, en evt. technische overwegingen.

²¹ http://www.portofrotterdam.com/en/news/pressreleases/2007/15032007_01.jsp .

²² <http://informatie.binnenvaart.nl/en590.php> .



3 Kosten van rijden op gas

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk brengen we de kosten van de verschillende routes in kaart. We beginnen met een korte toelichting van de gebruikte methodiek, in de volgende paragraaf. Vervolgens bepalen we de kosten van de verschillende brandstoffen in paragraaf 3.3, de kosten van vulstations voor deze brandstoffen in paragraaf 3.4, en de eventuele meerkosten van de voertuigen en binnenvaartschepen in paragraaf 3.5.

Een overzicht van het totale kostenplaatje is te vinden in hoofdstuk 5, waar we een aantal concrete cases doorrekenen.

3.2 Bepalen van de kosten

Bedrijven die willen kiezen voor een bepaalde brandstof zullen vooral geïnteresseerd zijn in de zogenaamde 'total cost of ownership', dat wil zeggen de som van kapitaalkosten en operationele kosten, inclusief subsidies, belastingen en andere heffingen. Dit is echter niet de insteek van deze studie.

In dit rapport kijken we naar de *maatschappelijke* kosten van de verschillende routes, zoals toegelicht in paragraaf 1.2. Hierbij worden alleen kale kosten meegenomen, exclusief eventuele heffingen en subsidies (bijv. accijns, energiebelasting, BPM, BTW, SDE-subsidies, VAMIL- en MIA-regelingen). Uit macro-economisch oogpunt zijn deze heffingen en subsidies geen daadwerkelijke kosten voor de maatschappij, maar slechts verschuivingen binnen de maatschappij.

Om de kosten van de verschillende routes eerlijk met elkaar te vergelijken, moeten de volgende kostenposten worden genomen:

- aanschafkosten van de voertuigen en schepen (evt. kosten van retrofit);
- restwaarde van de voertuigen en schepen;
- onderhoudskosten;
- inkoopkosten van de brandstoffen (d.w.z. de kosten aan de pomp als er gebruik wordt gemaakt van openbare vulpunten, of bij aflevering van de leveranciers bij een eigen vulstation);
- aanschafkosten en operationele kosten van evt. vulstations van de vervoerder (indien niet bij openbare tankstations wordt getankt).

Deze kostenposten worden bepaald voor de diverse gasopties, in vergelijking met de referentiesituatie waarin op diesel wordt gereden of gevaren. Uit oogpunt van databeschikbaarheid en efficiëntie is ervoor gekozen om de kosten van de diverse brandstoffen allemaal afzonderlijk te bepalen en deze vervolgens te vergelijken met de kosten van diesel. Bij de voertuigen, distributie en tanken zijn direct de meerkosten bepaald, ten opzichte van de referentievoertuigen op diesel.



Een ander belangrijk aspect van de kostenbepaling is de vraag naar welk jaar we kijken en met welke olieprijs we rekenen, om een aantal redenen.

- De olieprijs varieert sterk in de tijd. Het kostenplaatje van de referentie-brandstof, de diesel, varieert daardoor ook. Ook de kosten van biodiesel en bio-ethanol variëren over de tijd, afhankelijk van de marktsituatie, grondstof- en productiekosten.
- De prijzen van de gasvormige brandstoffen variëren ook over de tijd, deels vanwege ontwikkelingen in vraag en aanbod, deels ook vanwege variaties in de olieprijs.
- De referentiesituatie verandert over de tijd, bijvoorbeeld doordat de emissie-eisen van dieselvoertuigen en binnenvaartschepen over de jaren worden aangescherpt. Hierdoor kunnen de kosten van de dieselreferentie toenemen. Bijvoorbeeld, emissie-eisen die over een aantal jaren in de binnenvaart van kracht worden, hebben tot gevolg dat nieuwe dieselmotoren voor de binnenvaart moeten worden uitgerust met (relatief dure) nabehandelingstechnologie. De meerkosten van een keuze voor LNG, waarmee ook de nieuwe eisen worden gehaald, worden dan relatief lager dan bij een vergelijking met een schip zonder deze nabehandeling.
- De kosten van (nieuwe) technologieën zijn vaak hoog in het begin van een ontwikkeling en nemen af naarmate de kennis en ervaring met de technologie toeneemt. Kosten zijn vaak ook sterk gekoppeld aan productievolumes: de eerste voertuigen op aardgas moeten met de hand worden omgebouwd, naarmate de productievolumes toenemen zullen de productielijnen worden aangepast waardoor de kosten afnemen.

De kosten van een optie en de meerkosten t.o.v. de referentie zijn dan ook geen statische eigenschappen, maar kunnen veranderen over de tijd.

In het volgende schetsen we de kosten van de komende jaren, wanneer rijden op gas nog een relatief beperkt marktaandeel heeft. Kostenschattingen voor de langere termijn zijn helaas niet beschikbaar. Het is echter goed om in het achterhoofd te houden dat de hierboven genoemde drie punten de kostenvergelijking op de langere termijn zullen beïnvloeden.

Uitgangspunt bij deze berekeningen is verder een discontovoet van 5%.

3.3 Kosten van de brandstof

3.3.1 CNG

De kosten voor de CNG bestaan uit kosten voor

- het aanleveren van het aardgas bij de tanklocatie; en
- het comprimeren van het aardgas tot CNG.

De kosten voor aardgas aanlevering zijn opgebouwd uit de commodityprijs en distributiekosten. Voor kleinverbruikers met een consumptie tot 150.000 m³/jaar tellen deze kosten op tot 16,2 €/GJ excl. heffingen (BTW en REB). Het verdere verloop van de leveringskosten is geschat als functie van het afgenomen aardgasdebiet, de resultaten zijn gegeven in Figuur 1.

De kosten van opwerken van het aardgas (CO₂ verwijderen) zijn ca. 2 €/GJ, vervolgens moet het worden gecomprimeerd tegen ca. 2-2,5 €/GJ. Deze kosten moeten bij de aardgaskosten worden opgeteld waarmee de kosten voor kleinverbruikers uitkomen op ca. 20,2-20,7 €/GJ, voor grootverbruikers op ca. 12-16 €/GJ, sterk afhankelijk van de jaarlijkse afname.

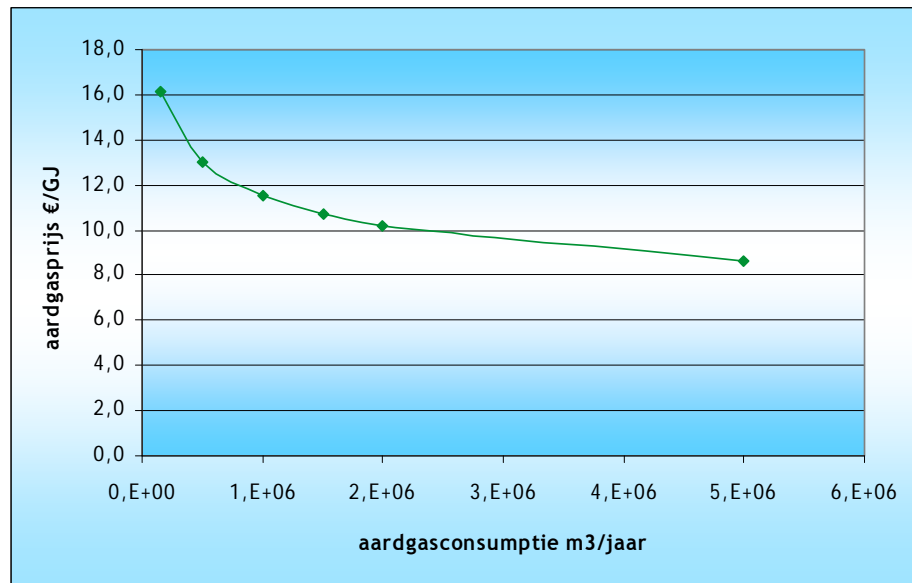


Ter vergelijking:

- de huidige (kale) dieselprijs aan de pomp is ca. 13 €/GJ (stand 5 februari 2010);
- in de praktijk liggen de prijzen van CNG aan de pomp op dit moment rond de 13,5 €/GJ, excl. heffingen (bron: www.fuelswitch.nl, geraadpleegd op 5 februari 2010).

Verdere achtergrondinformatie over de kostenberekeningen is te vinden in Bijlage A.

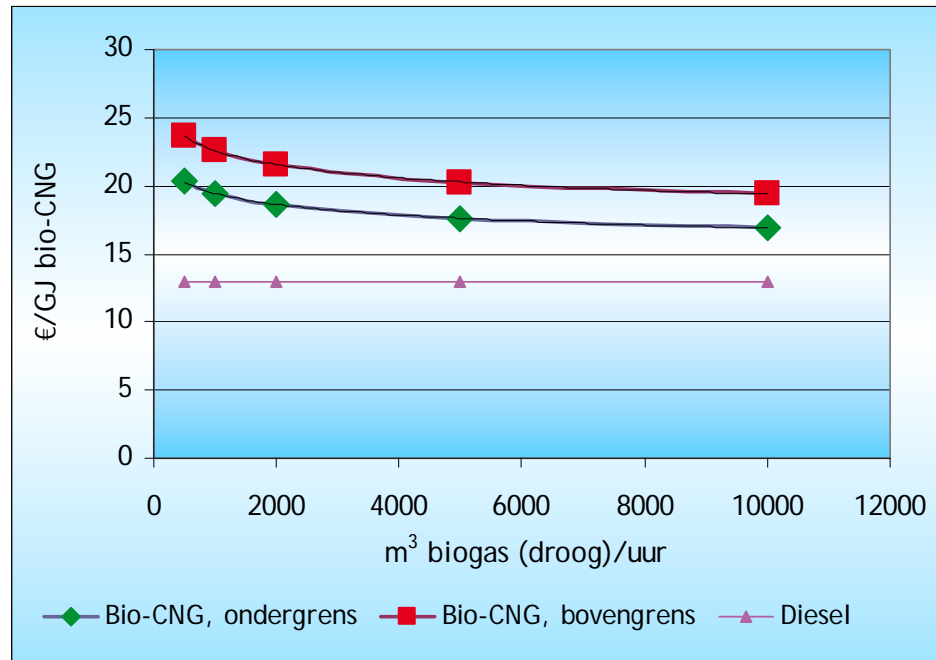
Figuur 1 Huidige prijs van aardgas, als functie van de jaarlijkse afname



3.3.2 Bio-CNG

Voor bio-CNG uit co-vergisting van mest en mais is de in Figuur 2 gegeven bandbreedte van de productiekosten als functie van de schaalgrootte van het productiesysteem geschat (zie Bijlage C en Bijlage D voor meer achtergrondinformatie). Ter vergelijking is de huidige kale dieselprijs ook in de figuur opgenomen. Het bio-CNG uit co-vergisting is ca. 30-80% duurder, afhankelijk van de schaalgrootte van de vergisting en enkele andere factoren.

Figuur 2 Kosten van bio-CNG uit co-vergisting van maïs en mest, afhankelijk van de productieschaal (volume), in vergelijking met de huidige dieselprijs (alles excl. heffingen)



NB. In de figuur gegeven gasvolume betreft ruwe biogasproductie.

De kosten omvatten:

- biogasproductie;
- opwerken van biogas tot groen gas;
- groen gascompressie voor injectie op middendruk gasleiding (8-40 bar).

Biogasproductie maakt in de regel 80-90% van de totale productiekosten uit. De productiekosten van biogas zijn hoog vanwege de hoge investeringskosten voor vergistinginstallaties, maar ook vanwege de hoge kosten voor co-substraat en de hoge afvoerkosten voor digestaat²³. In deze studie gaan we ervan uit dat alle digestaat wordt afgevoerd tegen kosten van 20 €/ton, representatief voor grootschalige centrale vergisters en reststof vergisting bij bedrijven e.d. Voor het co-substraat is conform PPO (2008) een inkoopprijs van 21 €/ton aangehouden.

Conform ECN (2009) hebben de meeste bestaande co-vergistingsinstallaties in Nederland een schaalgrootte van circa 500 m³/uur. De verwachting is echter dat de schaalgrootte zal toenemen tot mogelijk een tienvoudige productiecapaciteit (circa 5.000 m³/uur). De kosten van het proces zullen daarmee dalen.

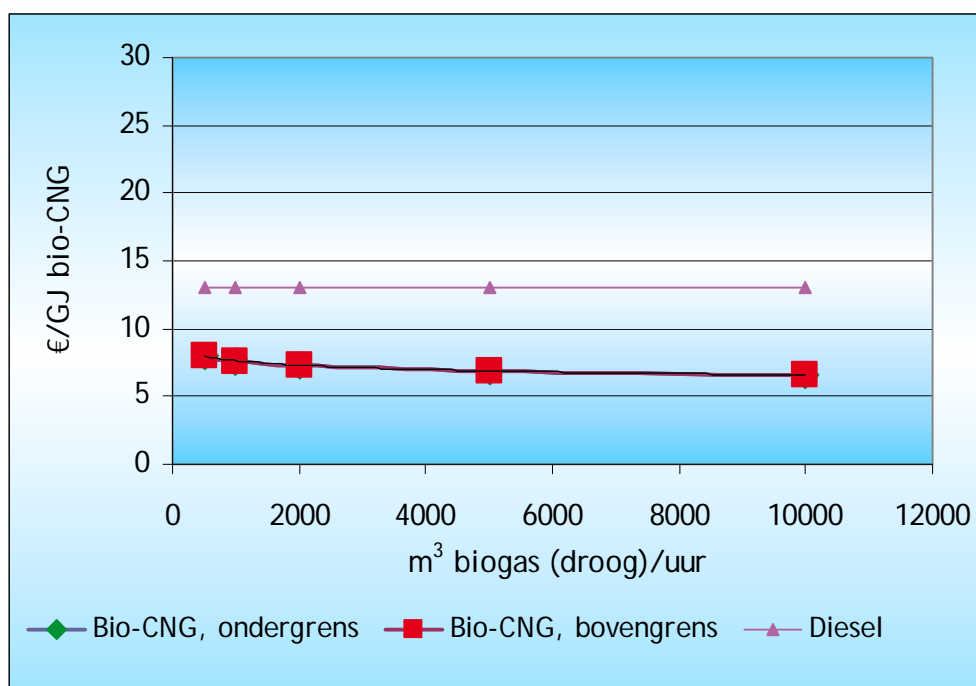
Kosten voor biogas uit het opwerken van stortgas zijn aanzienlijk lager, zie Figuur 3. Vooral omdat het stortgas tegen een veel lagere prijs - 3 €/GJ (ECN, 2009) - beschikbaar is. De kosten van deze bio-CNG zijn daardoor zelfs lager dan van de huidige diesel.

²³ In deze studie gaan we ervan uit dat alle digestaat wordt afgevoerd tegen 20 €/ton, representatief voor grootschalige centrale vergisters en reststofvergistings bij bedrijven, e.d. Voor de prijs van cosubstraat snijmaïs silage is gekozen voor 21 €/ton.



In de Nederlandse praktijk is de schaalgrootte voor stortgasinstallaties globaal tussen de 500 en de 2.000 m³/uur aan ruw stortgas.

Figuur 3 Kosten van bio-CNG uit stortgas, afhankelijk van de productieschaal (volume), in vergelijking met de huidige dieselprijs (alles excl. heffingen)



Verdere informatie over deze berekeningen zijn te vinden in Bijlage C (Co-vergisting), Bijlage D (Stortgas) en Bijlage E (opwerking biogas naar bio-CNG).

Ter vergelijking enkele kostencijfers uit andere bronnen, en consumentenprijzen (allen zonder heffingen en BTW):

- Eind 2009 was er één groen gaspomp in Nederland operationeel, waar het groene gas op dat moment tegen aardgasprijs werd aangeboden, ca. 13,8 €/GJ (www.fuelswitch.nl, geraadpleegd op 5 februari 2010). Sinds begin 2010 biedt ook Orangegas groen gas aan bij haar aardgaspompen, met een adviesprijs rond 16,6 €/GJ (€ 0,75 per kg)²⁴.
- In JEC (2007) zijn de kosten van twee groen gas-routes ingeschat: groen gas van vloeibare mest, en van organisch afval. Dit resulteerde in een kostenrange van 16,8-23,1 €/GJ.
- MuConsult B.V. & CE Delft (2008) schat de kosten op 10,1-12,0 €/GJ.
- CE (2007) werkt ook met 12 €/GJ.
- ECN (2009) geeft als basisbedragen voor de SD-regeling voor groen gasproductie uit mest-co-vergisting (300 m³/uur groen gas) en uit stortgas (150 m³/uur) productiekosten van respectievelijk € 29 en 12 per GJ.

²⁴ <http://www.orangegas.nl/page.php?nodeld=6>, geraadpleegd op 9.4.2010.



Schaalvergroting via een biogas 'Hub'

In Noord-Nederland wordt momenteel gewerkt aan creatie van zogenaamde biogas 'Hubs', in feite biogas pijpleidingnetwerken waarop meerdere biogas producenten en consumenten zijn aangesloten. Doel van de hubs is om:

- biogas aan te voeren van ver van afnemers afgelegde kleinere producenten - zodat het biogas energetisch optimaler kan worden benut;
- kosten gerelateerd aan opwerking (biomethaan productie) en inzet (bijvoorbeeld WKK-gasmotor) door middel van schaalvergroting te reduceren.

Een concreet voorbeeld is de voor M€ 10 aan te leggen biogasleiding vanaf Dokkum naar Leeuwarden van 32 km met een beoogd transportvolume van 63 miljoen m³ biogas/jaar.



Creatie van een 'Hub' in de vorm van een pijpleidingsysteem zal echter kosten voor vergisting niet significant reduceren omdat het geen verandering geeft in de schaalgrootte van de toegepaste vergisters. Om ook vergisting goedkoper te maken zou in het concept van de 'Hub' overgang van decentrale naar centrale vergisting moeten worden voorzien. Dergelijke 'Hubs' zijn vooral in Denemarken en Zweden gerealiseerd. De aantrekkelijkheid van centrale vergistingsinstallaties voor mest-co-vergisting is echter klein vanwege de bestaande mestwetgeving en het verbod op terugvoer van afgevoerde mest naar de mestleverende agrariër.

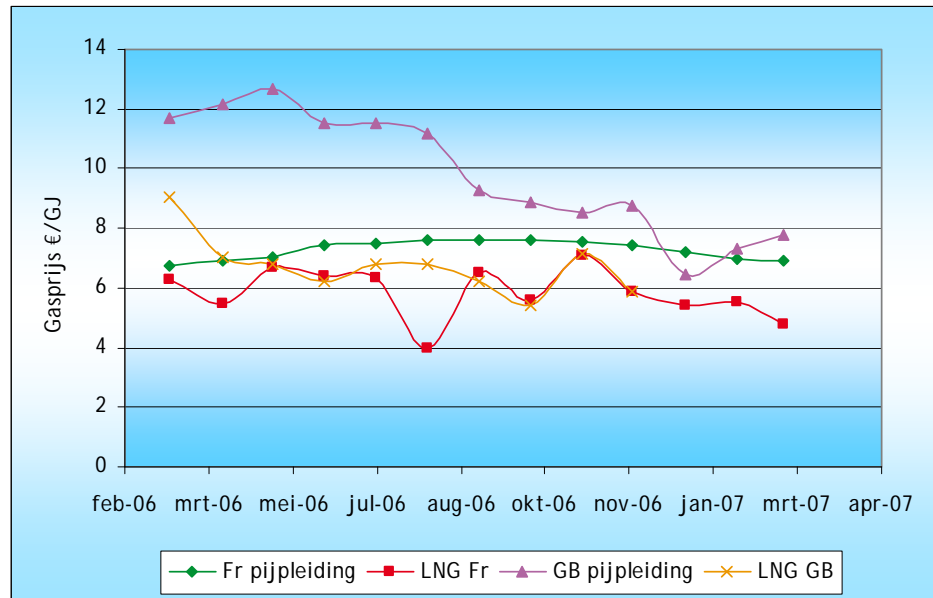
3.3.3 LNG

Het prijsniveau in Nederland voor LNG zoals geleverd aan de transportsector is lastig in te schatten vanwege het ontbreken van concrete praktijkcijfers. Er zijn in Nederland wel diverse grote LNG-terminals gepland, maar er is er nog geen operationeel. In het algemeen kan gesteld worden dat de prijs voor een afnemer in de transportsector is samengesteld uit de prijs voor het gas en de prijs voor de logistiek en distributie naar de afnemer.

Informatie over de verhouding tussen prijzen voor LNG en pijpleidinggas in omliggende landen (zie Figuur 4) doet vermoeden dat LNG tegen vergelijkbare prijzen op de markt belandt als pijpleidinggas - de prijs voor LNG zoals aangeleverd bij de LNG-terminals in Groot-Brittannië en Frankrijk is steeds

lager dan de prijs voor bij de grens van deze landen aangeleverd pijpleidinggas. We nemen daarom aan dat LNG in principe tegen een met pijpleiding aardgas concurrerende prijs zal worden aangeboden (bron: Argus, 2007) - zie paragraaf 3.3.1. Dit is ook redelijk in lijn met de verwachtingen in BMA (2010). Een uitgebreide analyse van de te verwachten LNG-kosten voor de scheepvaart is te vinden in Marintek (2008).

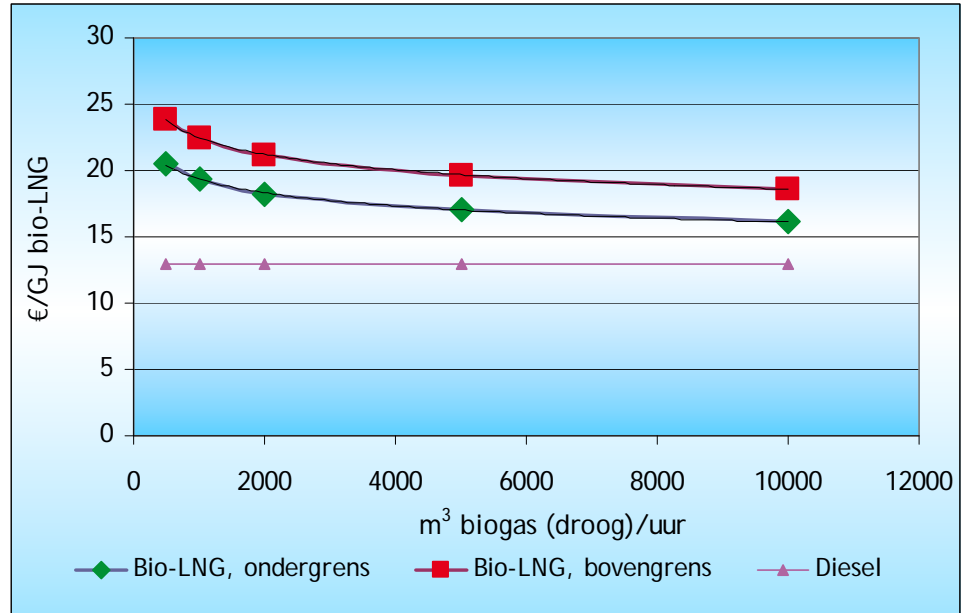
Figuur 4 Ontwikkeling van prijzen van aardgas en LNG in Frankrijk en Groot Brittannië



3.3.4 Bio-LNG

Voor bio-LNG uit co-vergisting van mest en maïs is de in Figuur 5 gegeven bandbreedte van de productiekosten geschat, als functie van de schaalgrootte van het productiesysteem.

Figuur 5 Kosten van bio-LNG uit co-vergisting van maïs en mest, afhankelijk van de productieschaal (volume), in vergelijking met de huidige dieselprijs (alles excl. heffingen)



NB. In de figuur gegeven gasvolume betreft ruw biogasproductie.

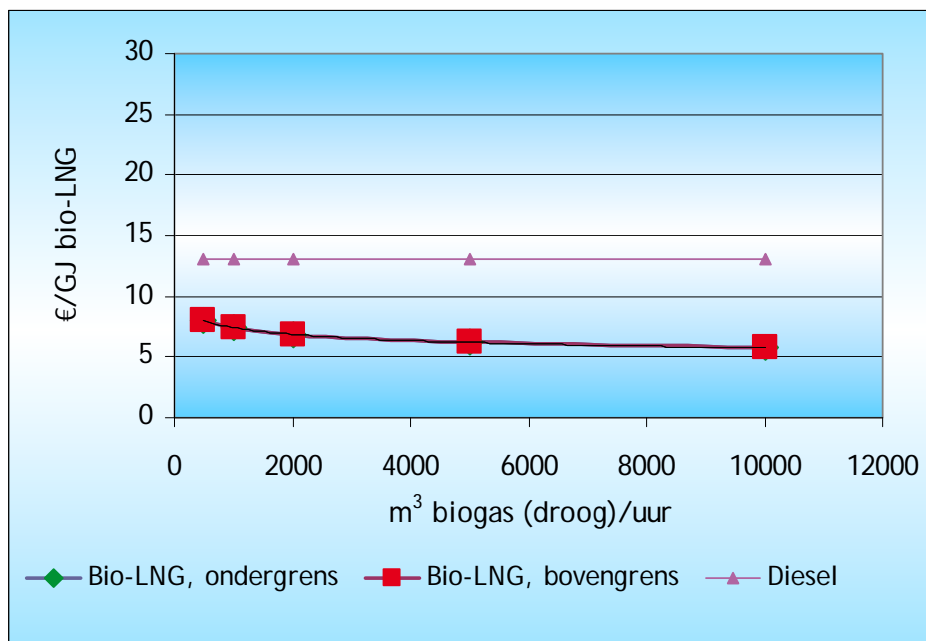
De kosten omvatten:

- biogasproductie;
- opwerken van biogas tot biomethaan;
- biomethaan liquefactie.

Biogasproductie maakt ook voor bio-LNG-productiekosten in de regel 70-80% van de totale productiekosten uit (zie de kostenberekeningen van de verschillende stappen in de bijlagen). Conform (ECN, 2009) hebben de meeste bestaande co-vergistingsinstallaties in Nederland een schaalgrootte van circa 250-500 m³/uur. De verwachting is echter dat de schaalgrootte voor centrale vergistingsinstallaties en vergistingsinstallaties bij industriële bedrijven zal toenemen tot mogelijk een tienvoudige productiecapaciteit (circa 5.000 m³/uur).



Figuur 6 Kosten van bio-LNG uit stortgas, afhankelijk van de productieschaal (volume), in vergelijking met de huidige dieselprijs (alles excl. heffingen)



3.3.5 Diesel, biodiesel en bio-ethanol

We gaan in deze studie uit van een dieselprijs van 13 €/GJ, dat komt neer op 46 €ct/l excl. heffingen (gemiddelde prijsniveau 1 december 2009, bron: EU Oil Bulletin).

De consumentenprijzen van biodiesel en bio-ethanol zijn minder goed bekend, omdat deze brandstoffen grotendeels worden bijgemengd bij diesel en benzine, en er maar weinig pompen zijn die hogere blends verkopen. Bovendien wordt er een importheffing geheven bij de import van Braziliaanse ethanol, zodat de marktprijs in Nederland niet de werkelijke (maatschappelijke) kosten van de ethanol weergeeft. In Brazilië zelf ligt de prijs van deze ethanol iets beneden de prijs van benzine. Er is in deze studie voor gekozen om gebruik te maken van de prijzen die ECN (2008) heeft bepaald voor 2010, op basis van diverse bronnen: een biodieselprijs van 22,7 €/GJ (0,74 €/l), een bio-ethanolprijs van 27,4 €/GJ (0,58 €/l), excl. heffingen en BTW. Dit laatste is vermoedelijk voornamelijk de prijs van bio-ethanol uit tarwe, de kale prijs van bio-ethanol uit suikerriet schatten we op 17 €/GJ (excl. import- en overige heffingen, ruwe schatting o.b.v. prijs in Brazilië en geschatte kosten van transport en distributie).

3.4 Kosten van vulstations

3.4.1 Voor CNG en bio-CNG

CNG en bio-CNG hebben speciale vulstations nodig, op dit moment is hun aantal nog beperkt. Als een ondernemer, particulier of overheid overweegt om over te stappen op CNG of bio-CNG, is het dus belangrijk dat er ofwel voldoende openbare vulstations beschikbaar zijn in de omgeving of langs de routes die worden gereden, ofwel dat er een toegewijd vulstation wordt gebouwd voor het desbetreffende wagenpark.

Allereerst is er de mogelijkheid om een particuliere vulstation aan te schaffen, dat gebruik maakt van het bestaande aardgasnetwerk. Deze zijn beschikbaar vanaf € 3.000 (Courage, 2009) en kunnen op kleine schaal CNG produceren.

Vulstations met grotere capaciteit kunnen ofwel openbaar zijn, of alleen specifiek een bepaald wagenpark van CNG of bio-CNG voorzien (zogenaamde toegewijde stations). Openbaar vervoeraanbieders maken bijvoorbeeld veelal gebruik van vulstations in eigen beheer (niet openbaar). Touringcar bedrijven maken daarnaast ook gebruik van openbare vulstations vanwege lange routes.

Courage (2009) gaat in een businesscase voor vrachtwagens in de melkveehouderij²⁵ uit van een kostenpost van € 900.000, voor een toegewijd vulstation dat 19 vrachtauto's voorziet van aardgas en groen gas (ca. 2,9 miljoen m³/jr). Deze kosten zijn ook gebruikt in CE (2007), waarbij is uitgegaan van een vulstation met een capaciteit van rond de 1.000 m³/uur. De kosten kunnen flink oplopen naarmate de capaciteit toeneemt: MuConsult B.V. & CE Delft, (2008) komt op ca. € 850.000 per vulstation van ca. 1.000 m³/uur, goed voor 20-40 bussen, en € 1.400.000 voor een vulstation voor ruim 80 bussen. BMA (2010) komt op ca. € 380.000 uit voor een CNG-vulpunt voor ca. 10-15 vrachtauto's, een aanzienlijk lager kostenniveau dan de andere studies²⁶.

De kosten van openbare vulstations die qua capaciteit en snelheid kunnen concurreren met conventionele benzine- en dieselpompen zijn nog niet geheel duidelijk. Courage (2009) stelt dat de kosten van openbare vulstations hoger zijn dan die van toegewijde stations. HIT (2009) gaat daarentegen uit van veel lagere investeringskosten, € 300.000, voor gemiddelde openbare CNG/bio-CNG-vulstations, BMA (2010) schat de kosten in of € 250.000-400.000. Hierbij wordt wel vermeld dat de operationele kosten van CNG/bio-CNG-tankstations hoger liggen dan de kosten van normale tankstations. Courage gaat uit van € 3.300/maand onderhoudskosten, en 0,20 kWh/Nm³ elektriciteitsverbruik, bij € 0.14/kWh. (BMA, 2010) verwacht € 8.000 /jr onderhoudskosten, en € 3.000/jr elektriciteitskosten.

Een ander belangrijk aspect bij deze kostenpost is de afschrijftermijn van het vulstation. Bij OV concessieverleningen moeten deze investeringskosten waarschijnlijk worden afgeschreven over de concessieperiode, tenzij vooraf al duidelijk is dat er ook na afloop van de concessie met aardgas of groen gas wordt gereden. Bij andere projecten zal het van de specifieke situatie en lange termijn strategie afhangen. De restwaarde zal in alle gevallen verwaarloosbaar zijn.

3.4.2 Voor LNG en bio-LNG

De onzekerheid omtrent kosten van LNG-vulstations is op dit moment nog vrij hoog, omdat de praktijkervaring beperkt is. Daadwerkelijke praktijkcijfers hebben we dan ook niet gevonden, wel een aantal kostenschattingen.

HIT (2009) geeft op basis van data uit de VS gemiddelde kosten voor een LNG-tankstation tussen de \$ 600.000 en 2.000.000, afhankelijk van de doorzet. In Zweden lijken de kosten aanzienlijk lager uit te komen, een schatting van Vattenfall komt uit ca. € 380.000 voor een LCNG-station (dat zowel LNG als CNG verkoopt) dat deel uitmaakt van in totaal 24 stations (Vattenfall, 2006).

²⁵ Vrachtwagens voor RMO-transport, dat is het laden van rauwe melk bij veehouders en transporteren naar productielocaties.

²⁶ Deze orde grootte wordt bevestigd door Ballast Nedam IPM.



(BMA, 2010) geeft kosten op van ca. € 410.000-650.000 uit voor L(C)NG-vulpunten die ca. 20-25 vrachtauto's kunnen bedienen, op basis van kostenopgaven van enkele aanbieders. Onderhoudskosten worden door BMA geschat op ca. € 5.000-10.000 per jaar, afhankelijk van de vraag of het vulpunt alleen LNG aanbiedt of ook CNG levert.

3.5 Kosten van voer- en vaartuigen

3.5.1 Voor CNG en bio-CNG

Personenauto's

De af-fabriek CNG- en bio-CNG-personenauto's die op de markt worden gebracht zijn vaak iets duurder dan vergelijkbare modellen op benzine of diesel. De meerprijs is afhankelijk van het merk en het model auto en bedraagt tussen de € 2.000-3.000 (DHV, 2008; Cenex, 2008; zie bijv. ook prijslijsten van dealers zoals die van Fiat die de Fiat Panda ook in aardgas-uitvoering aanbiedt, voor een netto meerprijs van ca. € 2.900). De meerprijs is minder t.o.v. dieselveertuigen dan t.o.v. benzineversies omdat dieselveertuigen duurder zijn dan benzine - de meerprijs t.o.v. vergelijkbare dieselauto's is ca. € 0-1.000 (pers. comm. PON). De meerprijs t.o.v. diesel neemt overigens af zodra dieselauto's aan Euro 6-emissie-eisen moeten voldoen (dit brengt extra kosten met zich mee). CNG/bio-CNG-auto's, die ook aan Euro 6 voldoen, kunnen dan goedkoper uitkomen dan de dieselvarianten.

Achteraf ombouwen van auto's is ook mogelijk, maar duurder dan af-fabriek versies. Bovendien is het motorsysteem en -management dan niet geoptimaliseerd op het rijden op gas, waardoor bijv. het verbruik iets hoger uit kan komen en het gewenste emissieniveau niet wordt gehaald.

Er is nog te weinig ervaring om concrete uitspraken te doen over de restwaarde van de CNG/bio-CNG personenauto's, een belangrijke factor bij het bepalen van de jaarlijkse kosten van het voertuig. Zeker als het om bi-fuel voertuigen gaat is de verwachting in de markt dat de restwaarde vergelijkbaar is met die van de benzine- en dieselauto's, in termen van percentage afschrijving per jaar. Dit zal ongetwijfeld afhangen van bijv. de ontwikkeling in de beschikbaarheid van CNG/bio-CNG-tankstations.

De onderhoudskosten lijken vergelijkbaar te zijn met de benzineauto's (PON).

De kosten per gereden kilometer op CNG en bio-CNG hangen af van de kosten van de brandstof (zie paragraaf 3.3).

Bussen

Bussen die rijden op CNG/bio-CNG zijn beschikbaar, de meerkosten van deze voertuigen ten opzichte van Euro 5-versies wordt geschat op ca. 10-20% (PON, en MuConsult B.V. & CE, 2008; Cenex, 2008). MuConsult B.V. & CE, 2008 gaat ervan uit dat een 12 meter stads- of streekbus op aardgas of groen gas ca. € 240.000 kost, een 18 meter lange bus ca. € 360.000, tegen € 200.000 en € 300.000 voor Euro 5-bussen van deze maten. Duin (2009) geeft meer-kosten van € 45.000-50.000.

MuConsult B.V. & CE (2008) betoogt dat de restwaarde van de bussen lager zal liggen dan van een vergelijkbare dieselbus, vanwege de beperkte vraag naar aardgas en groen gasbussen, en de beperkte beschikbaarheid van deze brandstoffen. Dit hangt echter af van de toekomstige ontwikkelingen in het busvervoer, en van de vraag of CNG ook in de toekomst zal doorzetten als



brandstof voor bussen. Het risico dat deze onzekerheid oplevert voor OV-bedrijven kan overigens worden weggenomen door een terugkoopgarantie van de busfabrikant (PON).

De onderhoudskosten van CNG/bio-CN-bussen zijn gemiddeld hoger dan die van Euro 5-bussen aangezien vaker onderdelen dienen te worden vervangen. Aangenomen wordt dat de meerkosten ten opzichte van een Euro 5-bus 0,02 €/km zijn, de onderhoudskosten liggen hiermee ca. 13% hoger (CE Delft, 2008).

De brandstofkosten hangen af van het verschil in brandstofprijs, zie de vorige paragraaf.

Ook de personeelskosten kunnen toenemen doordat er vaker getankt dient te worden. Daarnaast zal in sommige gevallen voor het tanken omgereden moeten worden, vanwege het nog beperkte netwerk.

Vrachtauto's

Diverse fabrikanten leveren CNG/bio-CNG-vrachtauto's aan, de meerkosten voor ten opzicht van diesel aangedreven concurrenten ligt tussen de 10-20% (PON) of 20-30% (Courage, 2009), Cenex (2008) geeft schattingen van ca. € 20.000 meerkosten voor een kleine vrachtauto, tot ca. € 20.000-30.000 voor een middelgrote vrachtauto. CNG-vrachtauto's worden vaak vooral in het kleinere, lichtere segment aangeboden, de actieradius is voor het zwaardere en lange afstandsvervoer onvoldoende.

Ook hier hangen de kosten van het gebruik af van de brandstofkosten, zie de vorige paragraaf.

3.5.2 Voor LNG en bio-LNG

Bussen

Er is nog maar weinig informatie over meerkosten van LNG/bio-LNG-bussen gevonden. De overheid in de VS rapporteert een meerprijs van ca. \$ 40.000 per bus bij een proef met 15 LNG-bussen in 1999²⁷, daarnaast geven de meerkosten van vrachtauto's (hieronder) wellicht ook een ruwe indicatie.

Vrachtauto's

Bij vrachtauto's op LNG en bio-LNG zal in Europa vooral gebruik gemaakt worden van dual-fuel en gasmotoren.

Een overzicht van de marktsituatie en de beschikbaarheid van LNG-vrachtauto's dat BMA in opdracht van de provincie Gelderland heeft gemaakt (BMA, 2010) laat zien dat op dit moment slechts enkele vrachtauto-producenten LNG-voertuigen aanbieden of ontwikkelen. Gegevens over meerkosten van deze voertuigen zijn dan ook beperkt en kunnen nog veranderen de komende jaren. De enige vrachtauto die op dit moment in LNG-uitvoering wordt aangeboden is de Mercedes Econic, de verwachting is dat IVECO in de loop van 2010 ook een LNG-vrachtauto aanbiedt. De meerprijs van de Mercedes vrachtauto op LNG is ca. € 65.000 (ten opzichte van de vergelijkbare dieselvariant (BMA, 2010) en excl. eventuele subsidies), de prijs van de IVECO-truck is nog niet bekend. Voor de LNG-truck wordt volgens dit rapport iets hogere onderhoudskosten verwacht dan bij de diesel variant, ca. € 0,05 per km t.o.v. € 0,04 per km.

²⁷ <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/fleetest/pdfs/28739.pdf> .



Omdat deze ontwikkelingen nog maar op kleine schaal plaats vinden gaan we ervan uit dat de meerkosten op termijn zouden kunnen dalen, als het lukt om grotere aantallen te produceren en om de technologie verder te ontwikkelen.

Binnenvaartschepen

Er zijn nog geen investeringsgegevens beschikbaar voor LNG in de binnenvaart, een eerste proefproject is op dit moment nog in de ontwikkelingsfase: een project waarin Deen Shipping, Pon Power en INEC een dual-fuel binnenvaart-schip ontwikkelen en realiseren²⁸. Dit project wordt gesteund door de Subsidieregeling Innovatie Binnenvaart van het ministerie van Verkeer en Waterstaat. Omdat deze ontwikkeling nog relatief pril is, is het maken van een realistische kostenschattning op basis van de huidige situatie lastig.

Ter indicatie geven we hier daarom gegevens over LNG-toepassingen in de (Noorse) kustvaart en een studie naar ombouwkosten voor de visserij.

In de kustvaart liggen de investeringskosten van LNG-aangedreven schepen rond de 5-15% hoger dan die van vergelijkbare diesel aangedreven varianten (Marintek, 2008). Deze meerkosten worden veroorzaakt door hogere kosten van de brandstofopslag, de gasmotor, veiligheidssystemen en keuring. Ter illustratie: de aanschafkosten van een typisch RORO-schip van 5.600 DWT en een lengte van 130 m zijn ca. € 3 miljoen hoger in de LNG-uitvoering dan in de standaard uitvoering.

Net als bij de vrachtauto's wordt de hoogte van de meerkosten ook hier door de huidige geringe toepassing beïnvloed. Mogelijk kan door schaalvergroting op termijn de meerprijs omlaag worden gebracht. Daarnaast is ook te verwachten dat de meerkosten in de toekomst afnemen doordat de dieselschepen meer geavanceerde nabehandeling nodig hebben om aan toekomstige emissie-eisen te voldoen.

Het is daarnaast ook mogelijk bestaande schepen om te bouwen naar LNG. Doordat er bij de bouw van het schip geen rekening is gehouden met LNG zal het extra inspanning en investeringen vergen om een LNG-systeem in een bestaand schip in te bouwen. Voor de inbouw in bestaande schepen zal daarom gerekend worden op een meerprijs ten opzichte van inpassing in een nieuw schip. De meerkosten kunnen bij retrofit driemaal zo hoog liggen als de meerkosten bij nieuwbouw.

Ombouw van een boomkorkotter (gebruikt voor de Noordzeevervisserij) naar LNG (dual fuel) wordt in 't Hart (2009) geschat op ca. € 700.000.

Er zijn nog geen gegevens bekend over eventuele operationele meerkosten bij gebruik van LNG in de scheepvaart.

²⁸ <http://www.pon-cat.com/en/Pon-Power--Pon-Equipment/Pon-Power/Pon-Power-Netherlands/Caterpillar-dealer-Pon-Power-Netherlands/Nieuws/Nieuws-actueel/-Articles-/Deen-Shipping-en-Pon-Power-starten-Dual-Fuel-project-voor-binnenvaart/> .



3.6 Conclusies

In de onderstaande tabellen geven we een overzicht van de resultaten uit dit hoofdstuk: de geschatte kosten van de brandstoffen en vulpunten en de meerkosten van de voertuigen en schepen.

Bij groen gas uit co-vergisting hangen de brandstofkosten (Tabel 2) sterk af van de schaalgrootte van de vergisting. Op dit moment zijn er in Nederland nog slechts kleinschalige vergisters operationeel en in de planning, schaalvergroting biedt daarom potentieel voor kostenreducties. Ook bij grootschalige productie verwachten we dat het bio-CNG en bio-LNG duurder blijft dan diesel, de kosten worden dan wel lager dan de andere biobrandstoffen, en zelfs vergelijkbaar met die van Braziliaanse ethanol. Groen gas uit stortgas is nu al aanzienlijk goedkoper dan diesel, per GJ.

Tabel 2 Overzicht kale brandstofprijzen aan de pomp

| Brandstofprijzen | | | Opmerkingen/databron |
|------------------------------------|------|------|--|
| Diesel | 13 | €/GJ | D.d. 5.2.2010 |
| CNG praktisch, aan de pomp | 13,5 | €/GJ | Fuelswitch, d.d. 5.2.2010 |
| CNG kosten kleinafnemers | 20 | €/GJ | Tot 150.000 m ³ /jaar |
| CNG medium verbruikers | 16 | €/GJ | Ca. 800.000 m ³ /jr |
| CNG grootverbruiker | 12 | €/GJ | Ca. 3 mln m ³ /jr |
| Bio-CNG co-vergisting kleinschalig | 23 | €/GJ | |
| Bio-CNG co-vergisting grootschalig | 17 | €/GJ | |
| Bio-CNG stortgas kleinschalig | 8 | €/GJ | |
| Bio-CNG stortgas grootschalig | 7 | €/GJ | |
| LNG | 13,5 | €/GJ | Gelijk aan CNG (aannname, op basis van marktprijzen) |
| Bio-LNG co-vergisting kleinschalig | 23 | €/GJ | |
| Bio-LNG co-vergisting grootschalig | 17 | €/GJ | |
| Bio-LNG stortgas kleinschalig | 8 | €/GJ | |
| Bio-LNG stortgas grootschalig | 7 | €/GJ | |
| Biodiesel | 22,7 | €/GJ | |
| Bio-ethanol uit tarwe | 27,4 | €/GJ | |
| Bio-ethanol uit suikerriet | 17 | €/GJ | |

De kosten van vulstations voor de gasvormige brandstoffen staan in Tabel 3. De kosten hangen vrij sterk af van de beoogde afzet van het station, de kosten per m³ (of per vrachtauto/bus) lijken wel af te nemen naarmate de schaalgrootte toeneemt.



Tabel 3 Overzicht kosten van vulpunten voor gasvormige brandstoffen (NB. kosten kunnen sterk afhangen van gewenste opslag- en pompcapaciteit en de exacte configuratie)

| Vulstations (onzeker) | | Opmerkingen/databron |
|---|-------------|--|
| CNG/bio-CNG Toegewijd vulstation | 900.000 € | Ca. 19 vrachtauto's melkveehouderij, of 20-40 stadsbussen, ca. 3mln m ³ /jr |
| CNG/bio-CNG Toegewijd vulstation groter | 1.400.000 € | Ruim 80 bussen |
| CNG/bio-CNG Openbaar vulstation hoog volume | 1.500.000 € | O.b.v. Courage, 2009 |
| CNG/bio-CNG Openbaar vulstation beperkt volume | 300.000 € | O.b.v. HIT, 2009 |
| LNG/bio-LNG vulstation groot volume | 2.000.000 € | O.b.v. HIT, 2009 |
| LNG/bio-LNG vulstation beperkt volume | 350.000 € | O.b.v. BMA, 2010 |

De meerkosten van CNG voertuigen (in Tabel 4) nemen toe naarmate het voertuig zwaarder wordt, bij personenauto's is er niet veel verschil meer ten opzichte van diesel. Er is nog wel enige onzekerheid t.a.v. restwaardeontwikkeling en onderhoudskosten, we verwachten dat hier de komende jaren meer (praktijk)informatie over beschikbaar komt. Kosten van LNG-voertuigen en binnenvaartschepen zijn nog niet goed bekend, deze toepassing staat nog redelijk aan het begin van de leercurve.

Tabel 4 Overzicht meerkosten van voertuigen op gasvormige brandstoffen

| Voertuigen en schepen | | |
|---|-------------|---|
| CNG/bio-CNG Personenauto's hoog meerkosten | 3.000 € | O.b.v. CENEX, 2008 en DHV, 2008, prijslijsten dealers |
| CNG/bio-CNG Personenauto's laag meerkosten | - € | T.o.v. diesel, PON info |
| Bussen | +10 tot 20% | In € afh. van grootte van de bus |
| Voorbeeld: 12 m stadsbus meerkosten | 40.000 € | O.b.v. MuConsult B.V. & CE, 2008 |
| Onderhoud meerkosten bussen | 0,02 €/km | Ca. 13% hoger dan diesel, o.b.v. CE, 2008 |
| CNG/bio-CNG Kleine vrachtauto meerkosten | 20.000 € | Ca. 10-30% meerkosten, o.b.v. Cenex, 2008, Courage, 2009, PON |
| LNG/bio-LNG bussen | ? | Geen data gevonden |
| LNG/bio-LNG vrachtauto | 65.000 € | O.b.v. 1 aanbieder |
| Onderhoud meerkosten LNG vrachtauto | 0,01 €/km | O.b.v. BMA, 2010 |
| LNG/bio-LNG binnenvaartschip meerkosten | +5 tot 15% | O.b.v. kustvaartdata, Marintek, 2008 |

NB. Restwaardeontwikkeling van al deze voertuigen nog onzeker. Kosten van LNG-voertuigen zijn nog zeer onzeker, en zullen naar verwachting dalen in de toekomst.





4 Milieueffecten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we in op de milieueffecten van de gasvormige brandstoffen, ten opzichte van de referentiebrandstof diesel. We kijken daarbij naar de gehele brandstofketen, dus van de winning van de brandstof c.q. de teelt van maïs en de opvang en zuivering van stortgas, tot aan het gebruik in het voertuig of schip.

In het volgende geven we eerst een korte beschrijving van de gebruikte methodiek. Daarna gaan we in op de emissies in de brandstofketen. Dit zijn met name CO₂- en andere broeikasgasemissies. Vervolgens kijken we naar de effecten op de uitstoot van de voertuigen. Hierbij spelen vooral NO_x en PM₁₀ een belangrijke rol.

4.2 Bepalen van de milieueffecten

Bij deze berekeningen kijken we, zoals gezegd, naar de gehele keten van de brandstofwinning of -productie, tot verbranding in het voertuig. We kijken naar broeikasgasemissies en naar luchtvervuilende emissies (met name NO_x en PM₁₀, in de binnenvaart ook SO_x).

Hiervoor sluiten we zoveel mogelijk aan bij de standaard levenscyclusanalyse- (LCA)methodiek die bijvoorbeeld ook voor de ontwikkeling van de Nederlandse CO₂-tool voor biobrandstoffen is gebruikt (Agentschap NL). Dit betekent onder andere dat we ook vermeden emissies meenemen - zo nemen we bijvoorbeeld bij mestvergisting mee dat er uit de mest broeikasgassen vrij waren gekomen, als deze niet was vergist. Deze vermeden emissies tellen als emissiereductie mee in onze berekeningen. We nemen daarnaast ook emissies mee ten gevolge van bijv. de kunstmestproductie voor maïsteelt, en emissies die vrijkomen bij aardgasproductie. De groen gas-routes die we in deze studie analyseren zijn overigens (nog) niet in de CO₂-tool opgenomen.

4.3 Emissies van de brandstofproductie

4.3.1 CNG- en LNG-productie

Emissies voor winning, opwerking en transport van aardgas en LNG zijn gegeven in Tabel 5 (zie Bijlage A voor meer informatie). De emissiecijfers zijn bepaald op basis van de gezaghebbende Simapro LCA-database en bij CE Delft bekende emissiegegevens (zie ook IGU, 2006).



Tabel 5 Milieubelasting voor aardgas van verschillende landen van herkomst

| Emissies (kg/GJ) | Nederlands gas | Russisch gas | Algerijns gas | Noors pijpleiding gas | Algerijnse LNG | Midden Oosten LNG |
|------------------|----------------|--------------|---------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| CO ₂ | 0,81 | 6,87 | 4,77 | 2,06 | 12,47 | 14,10 |
| CH ₄ | 0,01 | 0,23 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| N ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SO ₂ | | | | 0,00 | 0,02 | 0,07 |
| NO _x | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,15 |
| NH ₃ | | | | | | |
| HCl | | | | | | |
| HF | | | | | | |
| CO | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| PM ₁₀ | | | | | | |
| PM < 2.5 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| PM 2.5 - 10 | | | | | | |
| VOC | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Bronnen: IGU (2006), VME (2009), MJA (2005), EcolInvent (2007).

LNG-productie geeft een hogere broeikasgasemissie per GJ aangeleverd product vanwege het hoge energiegebruik bij productie, waarbij circa 10% van de energie-inhoud wordt gebruikt. Bij aardgas voor pijpleiding transport wordt 1-2% van de energie-inhoud gebruikt voor opwerken en compressie.

4.3.2 Bio-CNG- en bio-LNG-productie

Emissies in de keten van bio-CNG en bio-LNG worden hoofdzakelijk veroorzaakt door de productie van biogas en de teelt van het co-substraat.

Tabel 6 Milieubelasting voor bio-CNG, uitgesplitst naar ketenstap

| | Mobiele werktuigen landbouw | Transport maïs en mest | Toepassing kunstmest | Indirecte N ₂ O-emissies | Boiler emissies | Netto uitgespaarde emissies mestopslag | Totaal | |
|---------------------|-----------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------|--|---------|--------------|
| | | | | | | | kg/ha | kg/GJ Biogas |
| Lucht | | | | | | | | |
| CO | 1,28 | 0,44 | | | | | 1,72 | 9,80E-03 |
| VOS (verbranding) | 0,26 | 0,09 | | | | | 0,35 | 1,98E-03 |
| NO _x | 1,87 | 0,65 | | | 0,21 | | 2,73 | 1,55E-02 |
| Aërosolen | 0,15 | 0,05 | | | | | 0,20 | 1,14E-03 |
| SO ₂ | 0,16 | 0,06 | | | | | 0,21 | 1,22E-03 |
| Lood | | | | | | | | |
| CO ₂ | 166 | 58 | | | | | 224 | 1 |
| N ₂ O | 0,0013 | 0,0005 | 4,83 | 0,30 | | -0,41 | 4,72 | 2,69E-02 |
| CH ₄ | 0,01 | 0,004 | | | | -138 | -137,92 | -0,78 |
| NMVOS (verbranding) | 0,25 | 0,09 | | | | | 0,33 | 1,89E-03 |
| NH ₃ | 0,0005 | 0,0002 | 4,49 | | | -5,28 | -0,78 | -4,45E-03 |
| Bodem | | | | | | | | |
| NO ₃ | | | 27,49 | | | | 27,49 | 0,16 |

De emissieschattingen zijn gebaseerd op de berekeningmethodiek en de emissiecijfers uit WUR (2006) en de biobrandstoffen CO₂-tool (SN, 2008).



Overige emissies - feitelijk alleen broeikasgasemissies - en de energiebalansen voor de productie van bio-CNG en bio-LNG uit biogas/stortgas zijn gegeven in Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 9.

De stroomschema's beschrijven van boven naar beneden de door het biogas afgelegde weg vanaf productie tot inzet:

- van biogas productie door vergisting bovenaan;
- via gasopwerking (reiniging, afscheiding CO₂);
- tot compressie tot bio-CNG of liquifactie tot bio-LNG.

Donkergroene schakels betreffen biogas gerelateerde processen, lichtgroene schakels betreffen energie hoeveelheden, uitgedrukt ten opzichte van de energie-inhoud van het ruwe biogas geproduceerd bij vergisting. Emissies van biogas zijn met leverkleurige en lichtgele schakels weergegeven²⁹.

Elektriciteitgebruiken zijn eveneens uitgedrukt ten opzichte van de energie-inhoud van geproduceerd ruw biogas.

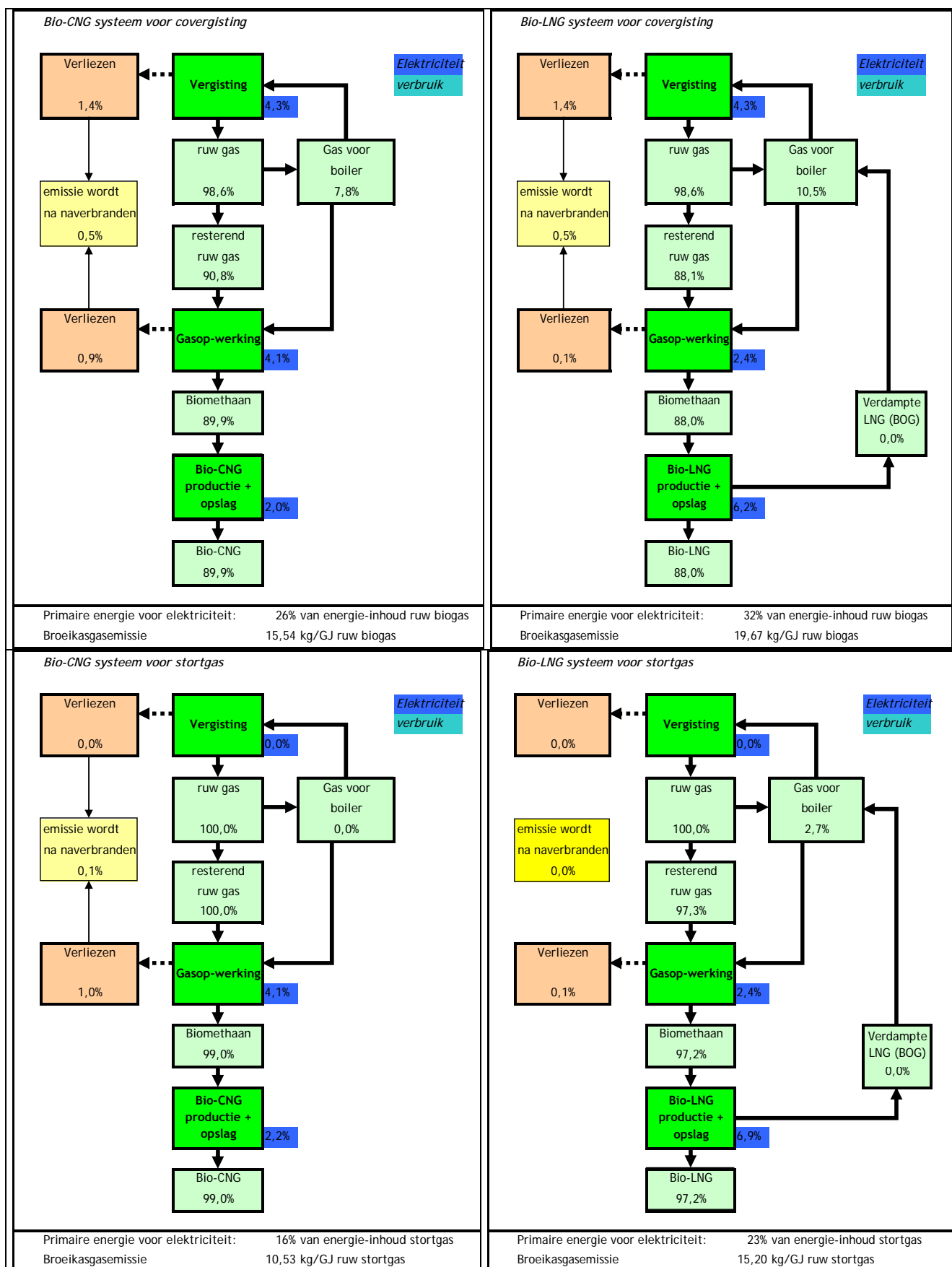
Vergelijkbare stroomschema's voor aardgas en LNG zijn gegeven in Figuur 8. Een overzicht van de netto bijdrage per GJ product aan klimaatverandering zijn gegeven in paragraaf 4.5, Figuur 13.

Meer informatie over de achtergrond van deze cijfers zijn te vinden in de bijlagen.

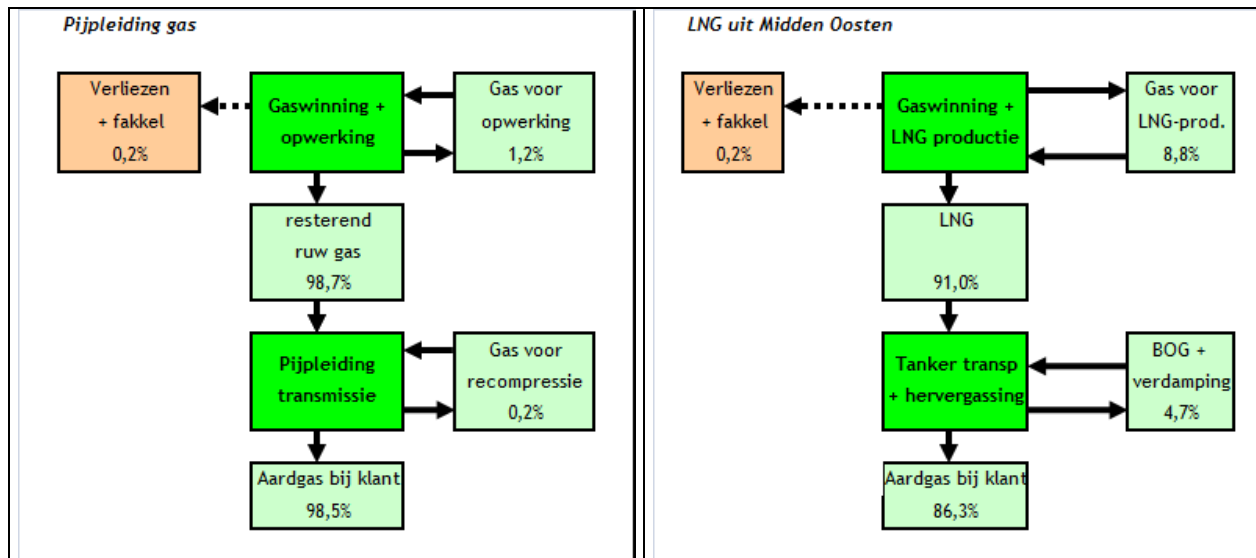
²⁹ Bij vergisting kan in principe ook gebruik worden gemaakt van restwarmte voor het verwarmen van het vergistingsproces. Er zijn voor zover wij weten echter nog geen praktijkvoorbeelden in Nederland waarbij restwarmte als warmtebron voor vergisting wordt gebruikt.



Figuur 7 Energiebalans voor productie van bio-CNG en bio-LNG uit stortgas en co-vergisting



Figuur 8 Energiebalans voor productie van CNG en LNG



BOG = boil off gas.

4.3.3 De referentiebrandstoffen: diesel, biodiesel en bio-ethanol

De broeikasgasemissies van de gasvormige brandstoffen kunnen vervolgens worden vergeleken met die van de referentiebrandstoffen.

De CO_{2eq.}-emissies van benzine bedragen ca. 86 kg CO₂-eq./GJ over de hele keten, voor diesel is dit ca. 88 kg CO₂-eq./GJ (JEC, 2007). Ca. 15% van deze emissies komen vrij bij winning, transport en raffinage van de olie, de rest komt vrij bij verbranding in het voertuig.

De broeikasgasemissies voor de biobrandstoffen zijn wat minder eenduidig te bepalen. Deze kunnen sterk variëren, en zijn met name afhankelijk van de gebruikte biomassa (o.a. de hoeveelheid benodigde kunstmest), van mogelijke emissies ten gevolge van landgebruiksverandering (bijv. bij conversie van grasland, bos of regenwoud naar landbouw, om aan de groeiende vraag naar grondstoffen voor biobrandstoffen te voldoen), etc.

In deze studie gaan we uit van de gemiddelde CO₂-emissies voor een drietal biobrandstoffen die vermoedelijk in Nederland de meest toegepaste biobrandstoffen zijn op dit moment:

- bio-ethanol uit tarwe die in Nederland of Duitsland is geteeld;
- bio-ethanol die is geïmporteerd uit Brazilië, en daar is geproduceerd o.b.v. suikerriet;
- biodiesel uit koolzaadolie, uit Nederland of Duitsland.

We hebben de ketenemissies van deze biobrandstoffen bepaald met de door Ecofys en CE Delft ontwikkelde CO₂-calculator (SenterNovem, 2008). De resultaten zijn dan:

- 38 kg CO₂-eq./GJ voor bio-ethanol uit tarwe;
- 10 kg CO₂-eq./GJ voor bio-ethanol uit Braziliaans suikerriet;
- 53 kg CO₂-eq./GJ voor biodiesel uit koolzaadolie.

De Braziliaanse bio-ethanolroute scoort gunstig omdat biomassa reststromen voor de energieproductie voor het ethanol conversieproces worden ingezet.

Bij deze cijfers moet overigens wel het volgende worden opgemerkt:

- De onzekerheid in de cijfers is vrij groot, de emissiereducties zijn ruwweg +/-15%.
- Eventuele broeikasgasemissies van indirecte landgebruiksveranderingen zijn niet meegenomen in deze cijfers. Het gaat dan bijv. om conversie van grasland, bos of regenwoud naar landbouw, om aan de groeiende vraag naar grondstoffen voor biobrandstoffen te voldoen. Deze effecten kunnen nog niet worden meegenomen omdat ze nog niet goed zijn gekwantificeerd, maar er zijn duidelijke indicaties dat ze significant kunnen zijn. De emissies per GJ biobrandstof zouden hierdoor duidelijk toe kunnen nemen.

4.4 Emissies van de voertuigen

De uitstoot van luchtverontreinigende stoffen door aardgas en groen gasvoertuigen is over het algemeen veel lager dan die van hun dieselvariant. De grootte van het verschil is afhankelijk van het voertuigtype, en de afstelling van het motormanagement waar de fabrikant voor kiest. Bij CO₂ is het verschil kleiner: de emissies per MJ aardgas zijn lager dan per MJ diesel, daar staat echter tegenover dat dieselmotoren efficiënter zijn dan aardgasmotoren. Dit verschil wordt bij de af-fabriek voertuigen overigens steeds kleiner door verbeteringen in het motormanagement. Hierdoor liggen de CO₂-uitstoot van diesel- en aardgasvoertuigen dicht bij elkaar. Ook hier treden er verschillen op t.g.v. keuzes van fabrikanten bij de afstelling van de motor.

Hieronder wordt per voertuigtype besproken wat de bijbehorende emissies zijn. Het gaat hierbij om de zogenaamde Tank-to-Wheel emissies, dit zijn alleen de emissies die vrijkomen bij verbranding en die dus uit de uitlaat komen. De cijfers voor CNG en bio-CNG zijn bij deze ketenstap dan ook identiek (bij gelijk methaangehalte), omdat deze twee brandstoffen in het voertuig vrijwel dezelfde eigenschappen hebben.

De CO₂-data in deze paragraaf betreffen derhalve alleen de uitstoot van het voertuig en zijn niet representatief voor de totale ketenemissies. Die komen in de volgende paragraaf aan bod.

In deze paragraaf gaan we naast CO₂- en PM- ook in op NO_x-emissies. Hierbij hebben we geen onderscheid kunnen maken tussen NO_x en NO₂, al hebben deze twee stoffen een verschillend effect op de luchtkwaliteit, en zal het aandeel NO₂ in de NO_x-uitstoot verschillen tussen dieselveertuigen en aardgasvoertuigen. Omdat het aandeel NO₂ echter maar beperkt is onderzocht en er veel meer data voorhanden is over NO_x-emissies van voertuigen, gaan we in deze studie uit van NO_x-emissies. Ondanks dat deze het effect op de plaatselijke luchtkwaliteit niet precies weergeven, geven zij wel een goede indicatie van dit effect.

Personenauto's

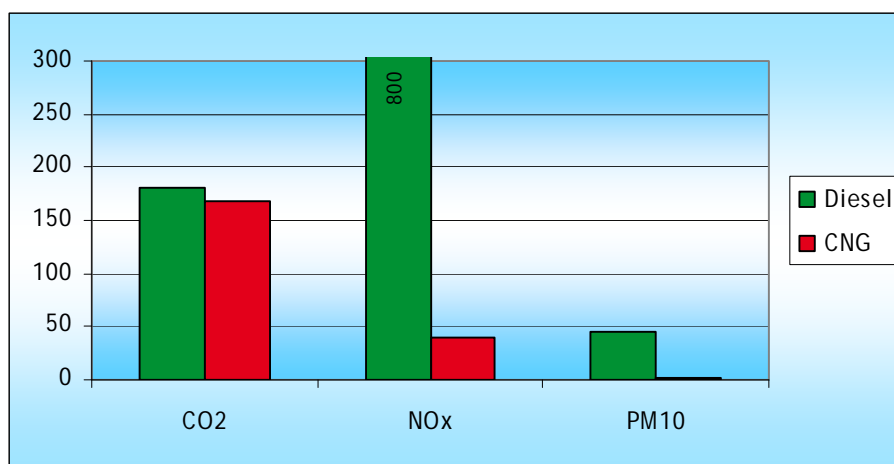
Voor personenauto's zijn weinig studies beschikbaar waarin diesel- en CNGvoertuigen één op één vergeleken worden. Er zijn ons geen studies bekend waarin de luchtvervuilende emissies van een representatief aantal CNGvoertuigen zijn gemeten. De enige beschikbare bronnen zijn TNO (2003), waarin de emissies van een (beperkt aantal) dieselauto's en CNG-auto's in kaart zijn gebracht, en TNO (2009), waarin de koolwaterstof en NO_x-emissies van een (beperkt) aantal af-fabriek en retrofit CNGvoertuigen zijn gemeten. Omdat het eerste onderzoek in 2003 is uitgevoerd, betreft dit echter wel een



dieselauto die aan de toenmalige emissie-eisen voldeed (Euro 3), nieuwe auto's uit 2010 moeten aan strengere eisen voldoen. Het onderzoek uit 2009 heeft aan Euro 4-voertuigen gemeten, maar focust op methaanemissies, niet op de uitstoot van NO_x en PM_{10} die voor de luchtkwaliteit het meest relevant is.

In TNO (2003) zijn verschillende ritpatronen van CNG- en dieselveertuigen met elkaar vergeleken. Figuur 9 en Tabel 7 geven de emissies voor het patroon 'average driver' voor diesel- en CNG-auto's.

Figuur 9 Emissies van CNG/ bio-CNG- en Euro 3-dieselpersonenauto's (CO_2 in g/km, NO_x en PM in kg/km) TTW



Uit deze data kan geconcludeerd worden dat de gemiddelde automobilist minder uitstoot in een aardgas of groen gasvoertuig dan in een dieselveertuig. Ook voor de andere ritpatronen die zijn onderzocht (business driver en local driver) scoort CNG beter dan diesel wat betreft CO_2 -, NO_x - en PM-emissies. Omdat deze conclusies echter slechts op één onderzoek berusten waarin een beperkt aantal voertuigen zijn vergeleken (voor generieke conclusies zijn meer testvoertuigen nodig) zal verder onderzoek uit moeten wijzen hoe de emissies van aardgasvoertuigen zich daadwerkelijk verhouden tegenover die van conventionele personenauto's.

Zoals eerder aangegeven worden in de vergelijking hierboven aardgasvoertuigen vergeleken met Euro 3-dieselveertuigen. Om een eerlijke vergelijking te maken met de referentievoertuigen van deze studie, zouden aardgasvoertuigen vergeleken moeten worden met nieuwe dieselauto's (Euro 5). Er zijn ons geen studies bekend waarin deze voertuigen rechtstreeks vergeleken worden. We kunnen er echter wel iets over zeggen op basis van de verhouding tussen Euro 5- en Euro 3-voertuigen uit bovenstaande studie (TNO, 2003): Euro 5-voertuigen geven een reductie van ca. 58% van de NO_x -emissies en 93% van de PM-uitstoot ten opzichte van Euro 3. Gasvormige brandstoffen zorgen hiermee voor een emissiereductie van ca. 88% voor NO_x en 38% voor PM (Tabel 7).

Tabel 7 Emissies CNG/bio-CNG en Euro 3- en Euro 5-dieselpersonenauto's (waarbij Euro 5 indicatief) - TTW

| | Eenheid | Euro 3 | Euro 5 | CNG | Besparing t.o.v. Euro 3 | Besparing t.o.v. Euro 5 |
|------------------|---------|--------|--------|--------|----------------------------|----------------------------|
| Verbruik | MJ/km | 2,5 | 2,5 | 3,0 | | |
| CO ₂ | g/MJ | 73,3 | 73,3 | 56,2 | 23% | 23% |
| | g/km | 181 | 181 | 169 | 7% | 7% |
| NO _x | g/MJ | 0,325 | 0,136 | 0,013 | 96% | 90% |
| | g/km | 0,80 | 0,34 | 0,04 | 95% | 88% |
| PM ₁₀ | g/MJ | 0,019 | 0,0013 | 0,0007 | 97% | 49% |
| | g/km | 0,046 | 0,0032 | 0,002 | 96% | 38% |

Overigens is het brandstofverbruik in MJ/km voor aardgas significant hoger dan voor diesel door het lagere rendement van de voor verbranding van aardgas gebruikte Otto-motor en door het hogere gewicht van de auto als gevolg van de aardgastanks. De CO₂-emissies per kilometer zijn desondanks iets lager vanwege de lagere C/H-verhouding van aardgas, waardoor per MJ energie minder CO₂ wordt uitgestoten.

TNO (2009) geeft een indicatie van de NO_x-emissies van een beperkt aantal CNG-voertuigen: de emissies van het af-fabriek CNG-voertuig liggen onder de Euro 4-NO_x-norm voor benzinevoertuigen (0,08 gr/km) en komen uit rond 0,02 gr/km, de retrofit voertuigen laten hogere emissies zien, rond de 0,07-0,09 gr/km. Het aantal geteste voertuigen is echter te klein om hier generieke conclusies uit te trekken.

Ter vergelijking: (Cenex, 2009) geeft gegevens van de fabrikant van een bestelauto (een Iveco Daily), waarin de emissies van de CNG-versie worden vergeleken met die van de Euro 6-versie: de NO_x- en P_M-emissies van de CNG-versie komen hier resp. 30% and 53 % lager uit dan bij Euro 6.

Bussen

Praktijkgegevens over de uitstoot en het brandstofverbruik van bussen zijn slecht onderling vergelijkbaar omdat deze waarden sterk afhankelijk zijn van het voertuiggebruik. Gereden routes, snelheidsprofielen, verdeling van de gereden kilometers over verschillende wegtypen, beladingsgraad en het aantal stops die een bus maakt hebben grote invloed.

In CE (2007) zijn de emissies van een dieselbus die aan de EEV-norm voldeed vergeleken met die van een aardgasbus. De emissie- en verbruikswaarden zijn bepaald in laboratoriumtesten zodat verkeersomstandigheden geen invloed hebben. Zowel de aardgas- als de dieselbus was afkomstig van MAN, de simulaties zijn uitgevoerd over een voor de Nederlandse situatie representatieve stadsbuscyclus. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 10 en Tabel 8. Uit de testresultaten blijkt dat aardgasbussen beter scoren wat betreft de NO_x-uitstoot, maar dat EEV-dieselbussen minder CO₂ en PM₁₀ uitstoten.

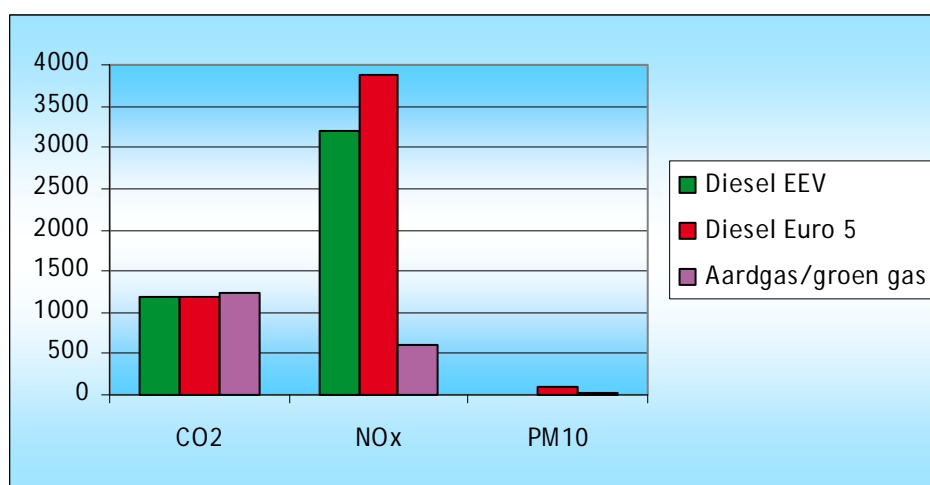
EEV-dieselbussen zijn echter niet representatief voor het huidige buspark. De aardgasbus zal veelal een Euro 5-dieselbus vervangen. Ter vergelijking geven Figuur 10 en Tabel 8 daarom ook de emissies van een Euro 5-bus op stadswegen. Deze waarden zijn ter indicatie, omdat de emissiefactoren over andere ritcycli en met andere modellen zijn bepaald kan een directe vergelijking niet gemaakt worden. Er is geen data specifiek voor de



CO₂-uitstoot van Euro 5-bussen beschikbaar, vermoedelijk zal dit niet sterk afwijken van EEV-dieselbussen.

Uit deze (beperkte) data kan geconcludeerd worden dat aardgasbussen qua CO₂ een iets hogere uitstoot hebben dan dieselbussen. Aardgasbussen stoten beduidend minder NO_x uit dan dieselbussen (EEV). De PM₁₀-emissies van EEV-dieselbussen liggen zo'n 40% lager dan die van aardgasbussen. Aardgasbussen stoten echter ca. 87% minder PM₁₀ uit dan de huidige dieselbussen. Overall kan geconcludeerd worden dat de inzet van aardgasbussen een positief effect heeft op de plaatselijke luchtkwaliteit maar wellicht leidt tot een beperkte toename van de uitstoot van broeikasgassen. Bio-CNG en bio-LNG kunnen deze emissies echter ruimschoots compenseren in de keten (zie volgende paragraaf).

Figuur 10 Emissiefactoren bussen (CO₂ in g/km, NO_x en PM₁₀ in mg/km) - TTW



Tabel 8 Emissies dieselbussen, vergeleken met CNG/bio-CNG-bussen - TTW

| | Eenheid | Diesel EEV | Diesel Euro 5 | CNG/bio-CNG | % Besparing gas t.o.v. diesel EEV | % Besparing gas t.o.v. Euro 5 |
|------------------|---------|------------|---------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Verbruik | MJ/km | 16,3 | | 21,7 | -33% | |
| CO ₂ | g/MJ | 73,3 | | 56,2 | 23% | |
| | g/km | 1184 | | 1233 | -4% | |
| NO _x | g/MJ | 0,196 | | 0,028 | 86% | |
| | g/km | 3,2 | 3,9 | 0,6 | 81% | 85% |
| PM ₁₀ | g/MJ | 0,00042 | | 0,00060 | -42% | |
| | g/km | 0,0069 | 0,100 | 0,013 | -88% | 87% |

PM- en NO_x-emissies van bussen kunnen ook met elkaar vergeleken worden met de zogenaamde bussenknop in het CAR II-model. Deze knop geeft een schalingsfactor voor verschillende bustypen ten opzichte van het gemiddelde. Hieruit blijkt dat CNG-bussen 78% minder NO_x uitstoten dan de gemiddelde bus in 2010 en 13-23% minder dan een EEV-dieselbus. Zij stoten daarnaast 63-81% minder PM uit dan het huidige bussenpark en enkele procenten meer dan een EEV-dieselbus. De range in deze data wordt veroorzaakt door de verhoudingen op verschillende wegtypes. Ondanks dat deze percentages sterk verschillen van de data in Tabel 8, blijven de conclusies overeind. Wat NO_x betreft scoren

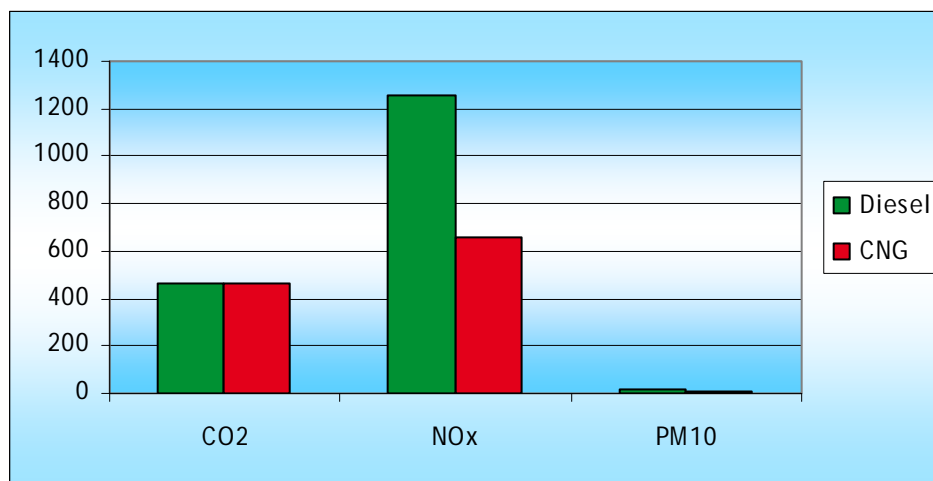


aardgasbussen beter dan de huidige en EEV-dieselbussen, wat betreft PM₁₀ zijn zij beter dan de huidige bussen, maar minder goed dan EEV-dieselbussen.

Vrachtauto's

Er zijn nog maar weinig vrachtauto's die op aardgas rijden, dit zijn vooral kleine voertuigen. Figuur 11 en Tabel 9 geven de emissies van lichte vrachtauto's op diesel (Euro 5) en CNG.

Figuur 11 Emissiefactoren lichte vrachtauto's (Euro 5-diesel en CNG; CO₂ in g/km, NO_x en PM₁₀ in mg/km) - TTW



Bron: CE, 2008a.

Tabel 9 Emissies diesel- (Euro 5) en CNG/bio-CNG- vrachtauto's (lichte voertuigen, Euro 5) - TTW

| | Eenheid | Diesel | CNG | Besparing |
|------------------|---------|--------|-------|-----------|
| Verbruik | MJ/km | 6,38 | 8,27 | -30% |
| CO ₂ | g/MJ | 73,3 | 56,2 | 23% |
| | g/km | 467 | 465 | 1% |
| NO _x | g/MJ | 0,198 | 0,080 | 60% |
| | g/km | 1,26 | 0,658 | 48% |
| PM ₁₀ | g/MJ | 0,002 | 0,001 | 50% |
| | g/km | 0,013 | 0,008 | 35% |

Diesel- en CNG- vrachtauto's stoten ongeveer evenveel broeikasgassen uit. Wat betreft de luchtverontreinigende stoffen scoren CNG-voertuigen weer duidelijk beter. De emissies van dieselveertuigen kunnen wel nog lager worden door toepassing van roetfilters en EEV-technologie.

Uit recent onderzoek van TNO (TNO, 2009) blijkt dat NO_x-emissies van Euro 5- vrachtauto's in de praktijk veel hoger liggen dan eerder gedacht. Dit geldt vooral voor stadswegen, hier zijn de emissiefactoren voor middelzwaar verkeer 2 tot 60% hoger dan eerder gedacht. Voor zwaar verkeer zijn de NO_x-emissiefactoren zelfs 4 tot 173% hoger dan eerder bepaald. De reductie van CNG t.o.v. van Euro 5-voertuigen is voor NO_x waarschijnlijk dus groter dan 48%.

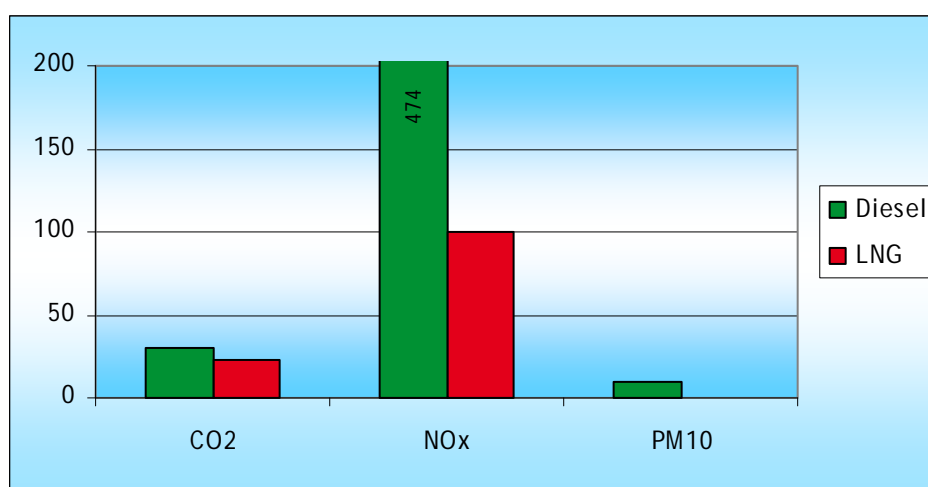
Binnenvaart

De ervaring met aardgasschepen in de binnenvaart is zeer beperkt. Om toch een beeld te geven van de te behalen reducties door de inzet van aardgas of groen gas worden hier ter indicatie emissiecijfers van de kustvaart weer-gegeven.

Creative Energy (2009) rapporteert indicatieve emissiefactoren voor typische mediumsnelheid motoren, op basis van Marintek-data (Marintek, 2008)³⁰. Deze motoren worden toegepast in kleinere schepen en zijn dus het best vergelijkbaar met de binnenvaart. De emissiefactoren zijn gegeven in gram per geleverde hoeveelheid energie, door deze te vermenigvuldigen met het energiegebruik per km voor een typisch binnenvaartschip (Rhine Herne Canal Ship, 412 MJ/km uit CE, 2008), komen we op de emissies per km.

Figuur 12 en Tabel 10 geven de emissies voor schepen op laagzwavelige diesel en aardgas.

Figuur 12 Emissiefactoren schepen (CO₂ in kg/km, NO_x en PM₁₀ in g/km) - TTW



Tabel 10 Emissiefactoren scheepvaart - TTW

| | Eenheid | Diesel (S<0,1%) | LNG | Besparing |
|------------------|---------|-----------------|-------|-----------|
| Verbruik | MJ/km | 412 | 404 | |
| CO ₂ | g/MJ | 73,3 | 56,2 | 23% |
| | g/km | 30200 | 22712 | 25% |
| NO _x | g/MJ | 1,15 | 0,25 | 79% |
| | g/km | 474 | 100 | 79% |
| PM ₁₀ | g/MJ | 0,024 | ~0 | 100% |
| | g/km | 9,99 | ~0 | 100% |

Op basis van EnergieTransitie, 2009.

Bij de meestal gebruikte dual-fuel motoren zullen de daadwerkelijke emissies overigens sterk afhangen van het percentage diesel dat wordt toegepast.

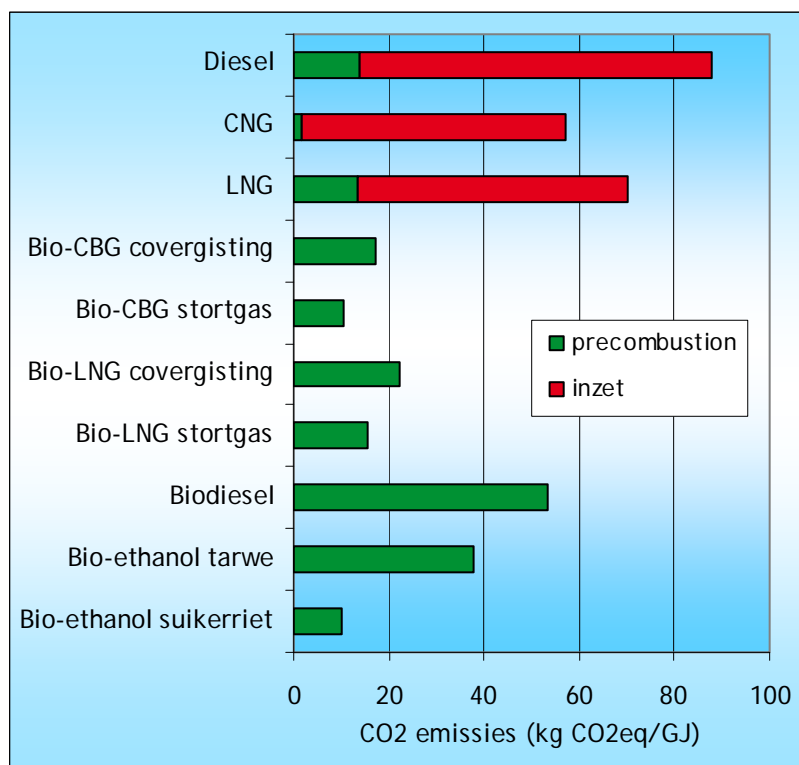
³⁰ NB. In de kustvaart is Marine Destillate Oil (MDO) de meest gangbare brandstof. De emissievergelijkingen in Marintek (2008) zijn dan ook niet direct te gebruiken voor de binnenvaart, waar op diesel of gasolie wordt gevaren.

Zowel luchtverontreinigende emissies als CO₂-emissies nemen dus af bij het gebruik van aardgas. De daling van de uitstoot van broeikasgassen zal (deels) gecompenseerd worden door methaanslip bij lage motorbelasting. Door toekomstige aanpassingen aan het motorontwerp zou de vorming van dit slip echter kunnen worden teruggedrongen (Marintek, 2008).

4.5 Conclusies

Een overzicht van de CO₂-emissies van de diverse routes, per GJ brandstof, is gegeven in Figuur 13. In de fossiele ketens is onderscheid gemaakt tussen emissies die vrijkomen in de precombustionfase, dat is de keten vanaf winning of productie van het gas of de olie t/m aflevering bij de eindgebruiker in een vorm waarin het geschikt is voor eindgebruik³¹ en de emissies die vrijkomen bij de verbranding zelf. Bij de bioroutes wordt de CO₂ van verbranding gelijk gesteld aan nul, omdat deze CO₂ relatief kort daarvoor is opgenomen door de biomassa zelf.

Figuur 13 Broeikasgasemissies voor gebruik van CNG, LNG, bio-CNG en bio-LNG uit stortgas en co-vergisting, in vergelijking met vloeibare (bio)brandstoffen (cijfers in kg CO₂-eq./GJ brandstof)



NB. Bij biodiesel en bio-ethanol zijn eventuele emissies van indirecte landgebruiksverandering niet meegenomen.

Voor CNG is een mengsel van 90% Nederlands gas, 5% Noors gas en 5% Russisch gas aangehouden. Noors gas wordt o.a. bij de Eemscentrale ingezet. Voor LNG is een 50% ÷ 50% mengsel van LNG uit Algerije en het Midden-Oosten aangehouden.

³¹ Voor consumenten of industriële bedrijven is dit de voordeur of de poort van het bedrijf. Voor gebruik in transport is dit het moment waarop een klant zijn brandstoftank vult met bio-CNG, nadat de uit biogas geïsoleerde biomethaan is gecompriëerd tot 200-250 bar.

We kunnen uit deze resultaten concluderen dat de aardgasroutes CNG en LNG een beperkte CO₂-reductie bereiken t.o.v. diesel, terwijl de bio-routes bio-CNG en bio-LNG zeer forse besparingen behalen. Bio-CNG- en bio-LNG-productie op basis van stortgas scoort iets beter dan co-vergisting, ondanks dat er in het laatste geval relatief veel broeikasgasemissies van mest worden uitgespaard – de emissies die vrijkomen bij de teelt van maïs zijn hoger dan de uitgespaarde mestemissies.

Als we de groen gas-routes vergelijken met de andere biobrandstoffen, biodiesel en bio-ethanol, zien we dat de CO₂-besparing van bio-CNG en bio-LNG nog flink groter is dan van biodiesel en bio-ethanol uit tarwe, en vergelijkbaar of hoger dan die van bio-ethanol uit suikerriet.

Wat luchtvervuilende emissies betreft concluderen we dat de gasvormige brandstoffen zowel de NO_x- als ook de PM₁₀-emissies deels sterk terugdringen in vergelijking met de huidige (nieuwe, Euro 5-) dieselloertuigen.

- bij personenauto's verwachten we ca. 90% lagere NO_x-emissies en ca. 40% lagere PM₁₀-emissies;
- bij bussen verwachten we rond 85% reductie in zowel NO_x- als ook PM₁₀-emissies;
- bij lichtere vrachtauto's zijn de NO_x-emissies ruim 50% lager, de PM₁₀-emissies zijn ca. 35% lager dan van Euro 5-dieselloertuigen;
- bij binnenvaartschepen verwachten we ca. 80% NO_x-reductie, en vrijwel 100% PM₁₀-reductie.

NB. Deze reductiepercentages zullen in de toekomst lager worden omdat de Euronormen van dieselloertuigen en de emissie-eisen voor binnenvaartschepen rond 2015 verder worden aangescherpt. Het is de verwachting dat de emissies van dieselmotoren dan in de buurt van die van gasmotoren uit zullen (moeten) komen.





5 Cases

5.1 Inleiding

Uit de vorige hoofdstukken blijkt dat er een vrij grote variatie is in met name de kosten van rijden op gas, en dat de onzekerheden in een aantal kostenposten en andere variabelen nog vrij groot zijn. In dit hoofdstuk rekenen we daarom een aantal concrete cases door, waarmee we kunnen laten zien wat de (maatschappelijke) kosten en milieueffecten in de praktijk kunnen zijn, afhankelijk van de specifieke situatie. De aannames waarmee we deze cases hebben opgebouwd zijn allen gebaseerd op de resultaten uit de eerdere hoofdstukken, waarbij we in de (vele) gevallen waar een bandbreedte aan kosten is opgenomen vaak zelf een keuze hebben gemaakt - vaak hebben we dan gekozen voor ofwel een middenschatting, ofwel een zo meest realistisch mogelijke waarde voor de huidige Nederlandse situatie.

Het doel van deze cases is vooral om inzicht te verschaffen in de globale verhouding tussen kosten en baten van de verschillende gasopties, in vergelijking met de referentiesituatie. Gezien de relatief grote range in kosten die we voor sommige kostenposten hebben gevonden, en de nog grote onzekerheden in de kostenontwikkeling van met name rijden en varen op LNG is het wel aan te raden om specifieke gevallen door te rekenen zodra concrete cijfers beschikbaar zijn.

5.2 Case 1: Personenauto op CNG en bio-CNG

De case betreft een personenauto op aardgas of groen gas. We gaan ervan uit dat deze auto gebruik kan maken van openbare CNG-tankstations, de kosten daarvan zijn daarom niet apart meegenomen (en worden dus verondersteld in de prijs van de CNG te zijn verwerkt).

Verdere aannames die we voor deze case gebruiken staan uitgezet in Tabel 12. Om de brandstofkosten te kunnen vergelijken met die uit hoofdstuk 3.3 hebben we deze ook in €/GJ gegeven.

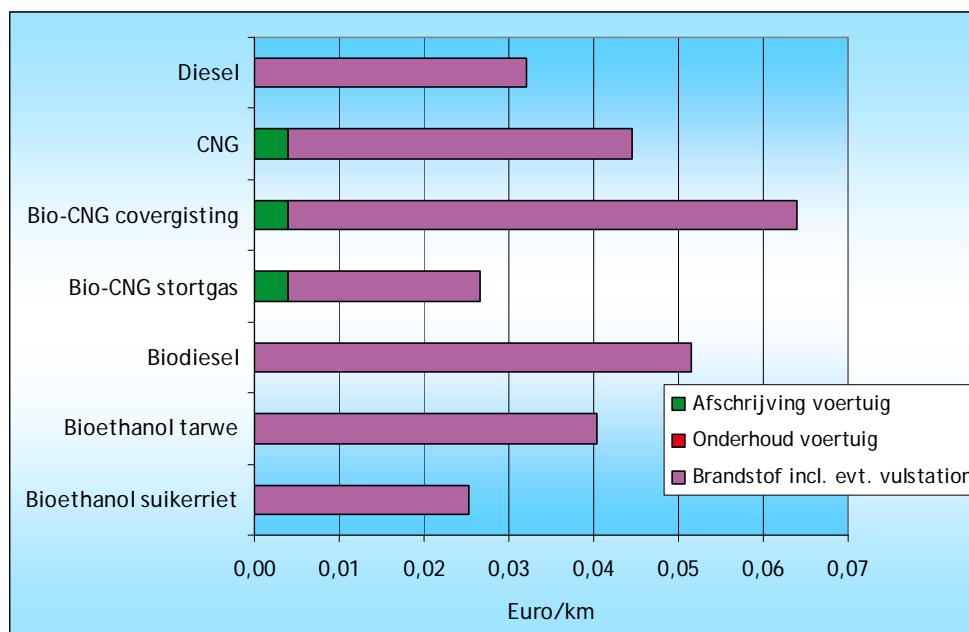
Tabel 11 Aannames case 1: personenauto op CNG of bio-CNG

| Parameter | Waarde | Opmerking |
|--------------------------------------|--------------|-----------|
| Diesel kale brandstofprijs | 0,46 €/l | |
| CNG kale brandstofprijs | 0,61 €/kg | 13,5 €/GJ |
| Bio-CNG coververgisting | 0,90 €/kg | 20 €/GJ |
| Bio-CNG stortgas | 0,34 €/kg | 7,5 €/GJ |
| Jaarkilometrage (diesel en CNG) | 25.000 km/jr | |
| Verbruik dieselauto | 0,070 l/km | |
| Meerprijs CNG/ bio-CNG auto | 1.000 € | |
| Afschrijftermijn CNG/ bio-CNG auto | 14 jaar | |
| Restwaarde CNG/ bio-CNG auto | 0 € | |
| Rentepercentage | 5% | |
| Verbruik CNG/ bio-CNG | 0,067 kg/km | |
| Meerkosten onderhoudskosten CNG auto | - | |



De resultaten voor de kosten per kilometer van de verschillende brandstoffen zijn uitgezet in Figuur 14, waarbij voor alle auto's de brandstofkosten zijn gegeven en bij de alternatieven daarnaast ook de evt. meerkosten van afschrijving en onderhoud. De afschrijving en onderhoudskosten van de diesel-auto zijn dus niet opgenomen in deze figuur. Bij de vloeibare biobrandstoffen gaan we alleen uit van de biobrandstofkosten zoals gegeven in paragraaf 3.3.5, zonder evt. extra kosten voor flex fuel of B30-voertuigen - we gaan dus uit van bijmenging in lage percentages (dit geldt voor alle cases in dit rapport).

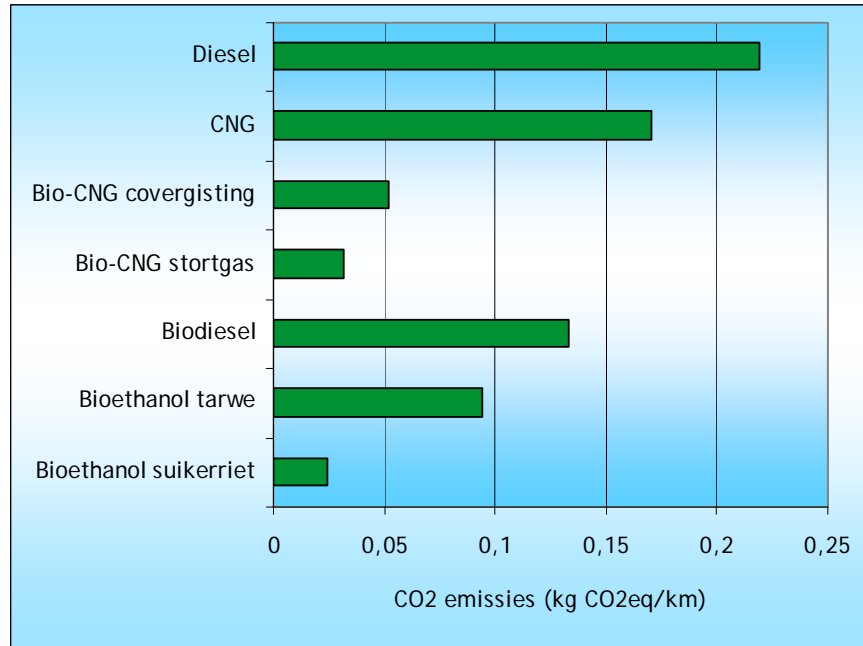
Figuur 14 Case 1: Overzicht van de brandstofkosten en evt. meerkosten voor de voertuigen



Deze resultaten laten zien dat rijden op CNG en op bio-CNG uit co-vergisting bij de gebruikte aannames duurder is dan rijden op diesel, maar dat bio-CNG uit stortgas duidelijk lagere kosten met zich meebrengt. De kosten van rijden op CNG zijn vergelijkbaar met rijden op bio-ethanol uit tarwe, de kosten van bio-CNG uit co-vergisting zijn hoger en vergelijkbaar met de kosten van bio-diesel. Kosten van bio-CNG uit stortgas zijn vergelijkbaar met de Braziliaanse bio-ethanol. Daarnaast kunnen we concluderen dat de (kale) brandstofkosten het meest bepalend zijn voor de resultaten. De meerkosten van de voertuigen zijn hier relatief beperkt.

Wat de verschillende alternatieve brandstoffen betekenen voor de CO₂-emissies over de gehele keten (per kilometer) is uitgezet in Figuur 15. We kunnen hieruit concluderen dat alle alternatieven voor diesel in deze case minder CO₂-uitstoten dan de dieselauto. Deze grafiek lijkt uiteraard sterk op de overzichtfiguur aan het eind van hoofdstuk 4, waar de CO₂-emissies per GJ brandstof zijn uitgezet.

Figuur 15 Case 1: Overzicht van de CO₂-emissies over de keten bij de verschillende alternatieven



Daarnaast verwachten we ca. 90% lagere NO_x-emissies, en 40% lagere PM₁₀-emissies bij gebruik van de gasvormige brandstoffen, in vergelijking met een Euro 5-dieselpersonenauto.

5.3 Case 2: Bussen op CNG en bio-CNG

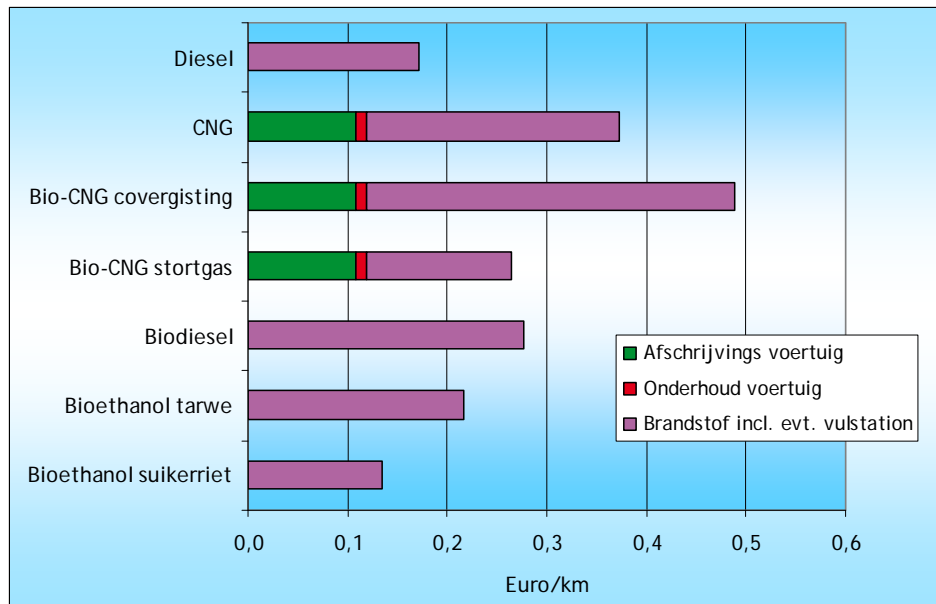
We kijken in deze case naar de kosten van een stadbus op CNG, die deel uitmaakt van een vloot van 30 CNG-bussen. Voor deze bussen wordt een toegewijd vulstation gebouwd, de kosten van dit vulstation worden afgeschreven over deze dertig bussen. We gaan er in de vergelijking vanuit dat er in de referentiecasse, bij rijden op diesel, geen investering nodig is in een vulstation (dat is er al). Verdere aannames die we voor deze case gebruiken staan uitgezet in Tabel 12. De brandstofprijzen van de CNG-varianten zijn inkoopprijzen, die lager liggen dan de prijzen aan de pomp zoals gebruikt in case 1.

Tabel 12 Aannames case 2

| Parameter | Waarde | Opmerkingen |
|--|--------------|-------------|
| Diesel kale brandstofprijs | 0,46 €/l | |
| CNG kale brandstofprijs | 0,53 €/kg | 12 €/GJ |
| Bio-CNG coververgisting | 0,83 €/kg | 18,5 €/GJ |
| Bio-CNG stortgas | 0,27 €/kg | 6 €/GJ |
| Jaarkilometrage (diesel en CNG bussen) | 65.000 km/jr | |
| Verbruik dieselbus | 0,37 l/km | |
| Meerprijs CNG/bio-CNG bus | 40.000 € | |
| Restwaarde CNG/bio-CNG bus | 8.280 € | |
| Afschrijftermijn CNG/bio-CNG bus | 8 jaar | |
| Rentepercentage | 5% | |
| Verbruik CNG/bio-CNG | 0,40 kg/km | |
| Meerkosten onderhoud CNG bus | 0,01 €/km | |
| Vulstation investeringskosten | 450.000 € | |
| Restwaarde vulstation | 0 € | |
| Afschrijftermijn vulstation | 8 jaar | |
| Elektriciteitskosten vulstation | 3.000 €/jr | |

De resultaten, in termen van kosten per kilometer, excl. aanschafkosten en onderhoud van de dieselbus, staan uitgezet in Figuur 16. De kosten van de CNG-bus zijn aanzienlijk hoger dan van de dieselbus, de meerkosten bedragen 0,23 €/km. Een groot gedeelte van deze meerkosten zijn ten gevolge van hogere aanschafprijs van de bussen (11  ct/km) en meerkosten van de brandstof (7  ct/km). De kosten van het vulstation bedragen ca. 7  ct/km.

Figuur 16 Case 2: Overzicht van de brandstofkosten en evt. meerkosten voor de voertuigen



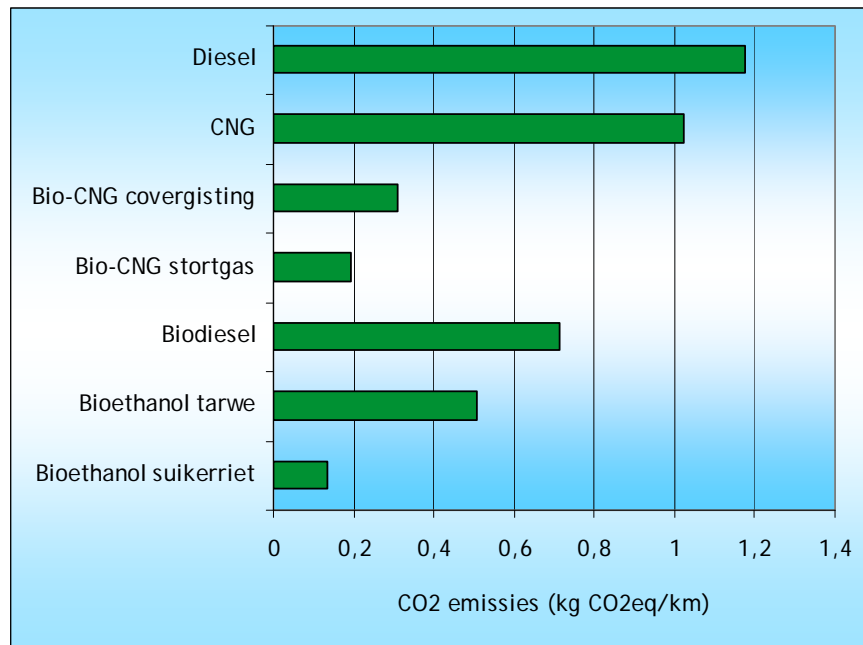
In hoeverre de kosten van rijden bio-CNG hiervan afwijken hangt volledig af van de kosten van de brandstof. Als de bio-CNG duurder, zoals in dit geval bij de bio-CNG uit co-vergisting het geval is, worden de meerkosten nog hoger. Ligger de kosten lager, zoals in geval het bio-CNG uit stortgas, nemen de meerkosten af. De meerkosten van het voertuig en het vulstation zijn in deze



gevallen gelijk aan de CNG-case, alleen de brandstofkosten variëren. De kosten van de vloeibare biobrandstoffen zijn in het geval van biodiesel en bio-ethanol uit tarwe ook hoger dan van diesel, maar lager dan de meerkosten van de gasvormige opties, met uitzondering van bio-CNG uit stortgas. Dit plaatje verandert overigens als de vloeibare biobrandstoffen niet zomaar worden bijgemengd bij diesel en benzine, maar worden ingezet in hogere blends zoals B30 (30% biodiesel) of E85 (85% ethanol). In dat geval zijn ook voor deze opties extra investeringen in flex-fuel of B30-voertuigen en infrastructuur nodig.

Tegenover deze meerkosten staat wel een reductie van de emissies van de bussen, en daarmee van de lokale luchtkwaliteit. NO_x - en PM_{10} -emissies dalen met ca. 85% t.o.v. de standaard dieselbus. De gevolgen voor de CO_2 -emissies zijn uitgezet in Figuur 17: de CO_2 -emissies per kilometer dalen iets bij gebruik van CNG i.p.v. diesel, maar veel grotere reducties worden bereikt als er bio-CNG wordt getankt uit stortgas of co-vergisting.

Figuur 17 Case 2: Overzicht van de CO_2 -emissies over de keten bij de verschillende alternatieven



5.4 Case 3: Lichte vrachtauto op CNG en bio-CNG

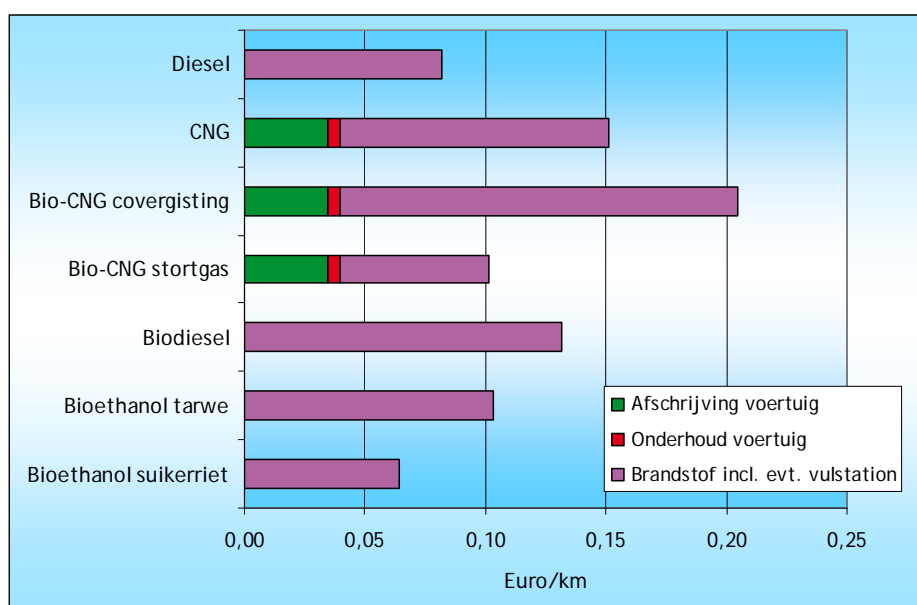
We gaan hier uit van een vrachtauto op CNG, die in openbare vulstations tankt. Verdere aannames die we voor deze case gebruiken staan in Tabel 13.

Tabel 13 Aannames case 3

| Parameter | Waarde | Opmerking |
|--|---------------|-----------|
| Diesel kale brandstofprijs | 0,46 €/l | |
| CNG kale brandstofprijs | 0,61 €/kg | 13,5 €/GJ |
| Bio-CNG coververgisting | 0,90 €/kg | 20 €/GJ |
| Bio-CNG stortgas | 0,34 €/kg | 7,5 €/GJ |
| Jaarkilometrage (diesel en CNG) | 75.000 km/jr | |
| Verbruik diesel vrachtauto | 0,18 l/km | |
| Meerprijs CNG/bio-CNG vrachtauto | 20.000 € | |
| Afschrijftermijn CNG/bio-CNG vrachtauto | 10 jaar | |
| Restwaarde CNG/bio-CNG vrachtauto | 0 € | |
| Rentepercentage | 5% | |
| Verbruik CNG/bio-CNG | 0,18 kg/km | |
| Meerkosten onderhoudskosten CNG vrachtauto | 0,005 €/ct/km | |

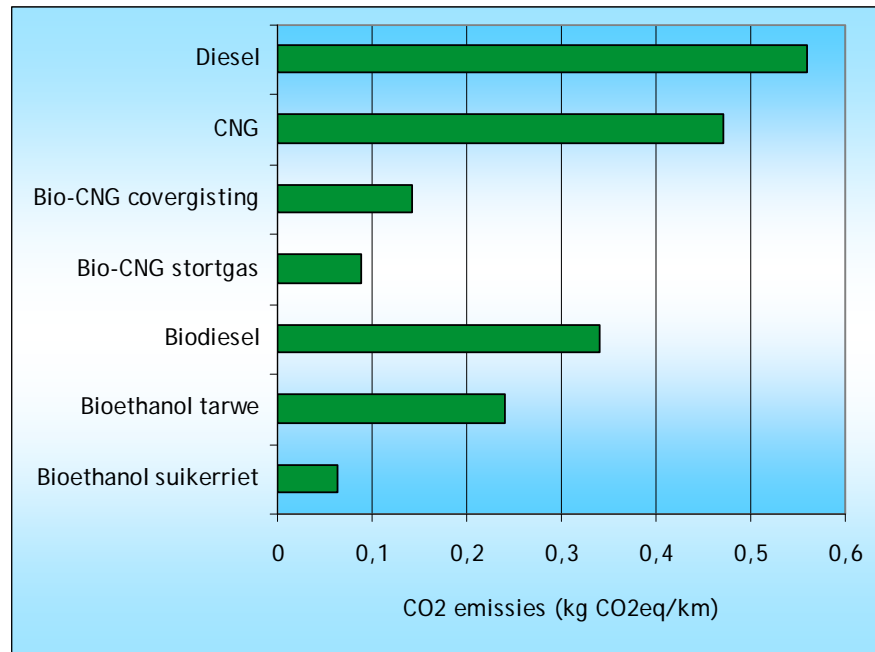
De resultaten, weer in termen van kosten per kilometer, excl. aanschaf- en onderhoudskosten van de dieselvrachtauto, staan uitgezet in Figuur 18. Ook hier zien we dat de kosten van de CNG-vrachtauto aanzienlijk hoger zijn dan van de dieseltruck, vooral vanwege de hogere kosten van de CNG-vrachtauto. Verder kunnen ruwweg dezelfde conclusies worden getrokken als bij de eerdere cases.

Figuur 18 Case 3: Overzicht van de brandstofkosten en evt. meerkosten voor de voertuigen



De gevolgen voor de CO₂-emissies over de gehele brandstofketen staan uitgezet in Figuur 19. Ook hier zien we weer dezelfde trends als in de eerdere cases. Daarnaast verwachten we een NO_x-reductie van ruim 50%, en ca. 35% minder PM₁₀-emissies bij rijden op de gasvormige brandstoffen, t.o.v. Euro 5-dieselvrachtauto.

Figuur 19 Case 3: Overzicht van de CO₂-emissies over de keten bij de verschillende alternatieven



5.5 Case 4: Vrachtauto op LNG en bio-LNG

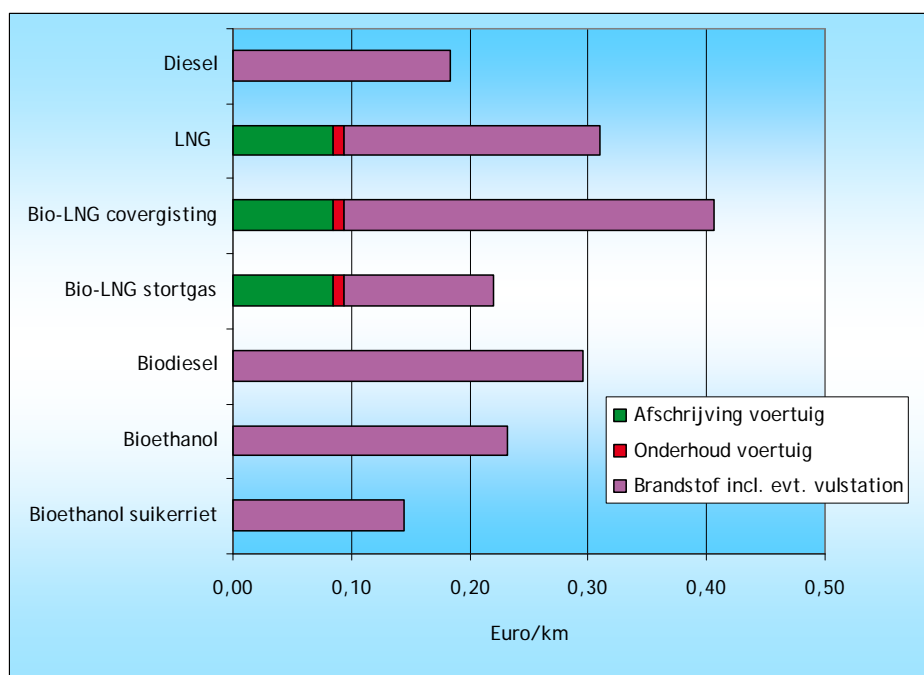
In deze case gaan we uit van een zwaardere vrachtauto die op LNG rijdt, en deel uitmaakt van een vloot van 15 soortgelijke voertuigen. Voor deze vloot wordt een LNG-vulstation gebouwd. Verdere aannames staan in Tabel 14, waarbij ook hier weer de brandstofprijzen van de LNG-varianten inkooprijzen zijn (die lager liggen dan prijzen aan de pomp).

Tabel 14 Aannames case 4

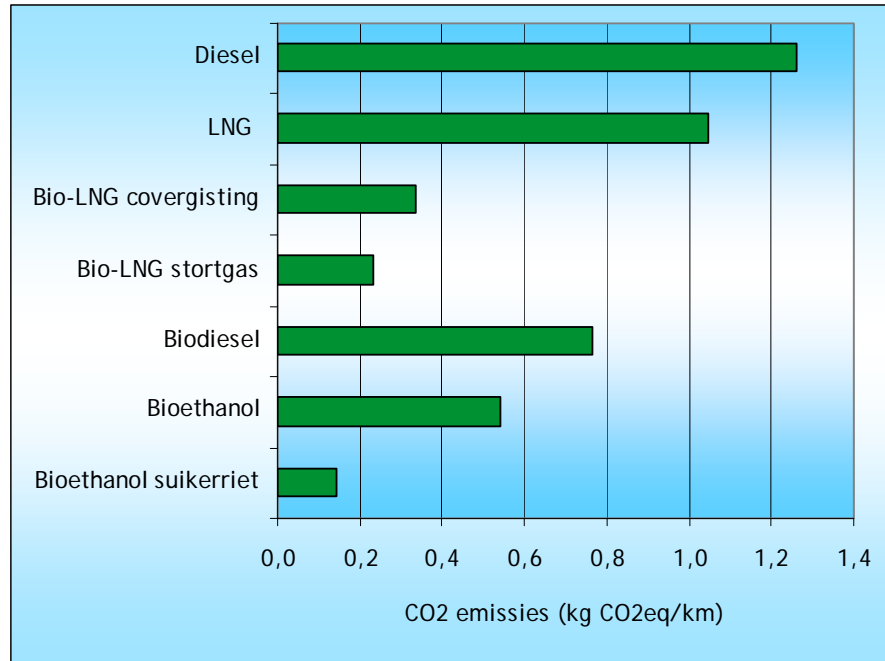
| Parameter | Waarde | Opmerkingen |
|---|---------------|-------------|
| Diesel kale brandstofprijs | 0,46 €/l | |
| LNG kale brandstofprijs | 0,53 €/kg | 12 €/GJ |
| Bio-LNG coververgisting | 0,83 €/kg | 18,5 €/GJ |
| Bio-LNG stortgas | 0,27 €/kg | 6 €/GJ |
| Jaarkilometrage (diesel en LNG) | 100.000 km/jr | |
| Verbruik dieselvrachtauto | 0,40 l/km | |
| Meerprijs LNG/bio-LNG vrachtauto | 65.000 € | |
| Restwaarde LNG/bio-LNG vrachtauto | 0 € | |
| Afschrijftermijn LNG/bio-LNG vrachtauto | 10 jaar | |
| Rentepercentage | 5% | |
| Verbruik LNG/bio-LNG | 0,33 kg/km | |
| Meerkosten onderhoud LNG/bio-LNG vrachtauto | 0,01 €/km | |
| Vulstation investeringskosten | 350.000 € | |
| Restwaarde vulstation | 0 € | |
| Afschrijftermijn vulstation | 8 jaar | |
| Elektriciteitskosten vulstation | 1.600 €/jr | |

De resultaten voor kosten en CO₂-emissies staan in Figuur 20 en Figuur 21 uitgezet.

Figuur 20 Case 4: Overzicht van de brandstofkosten en evt. meerkosten voor de voertuigen



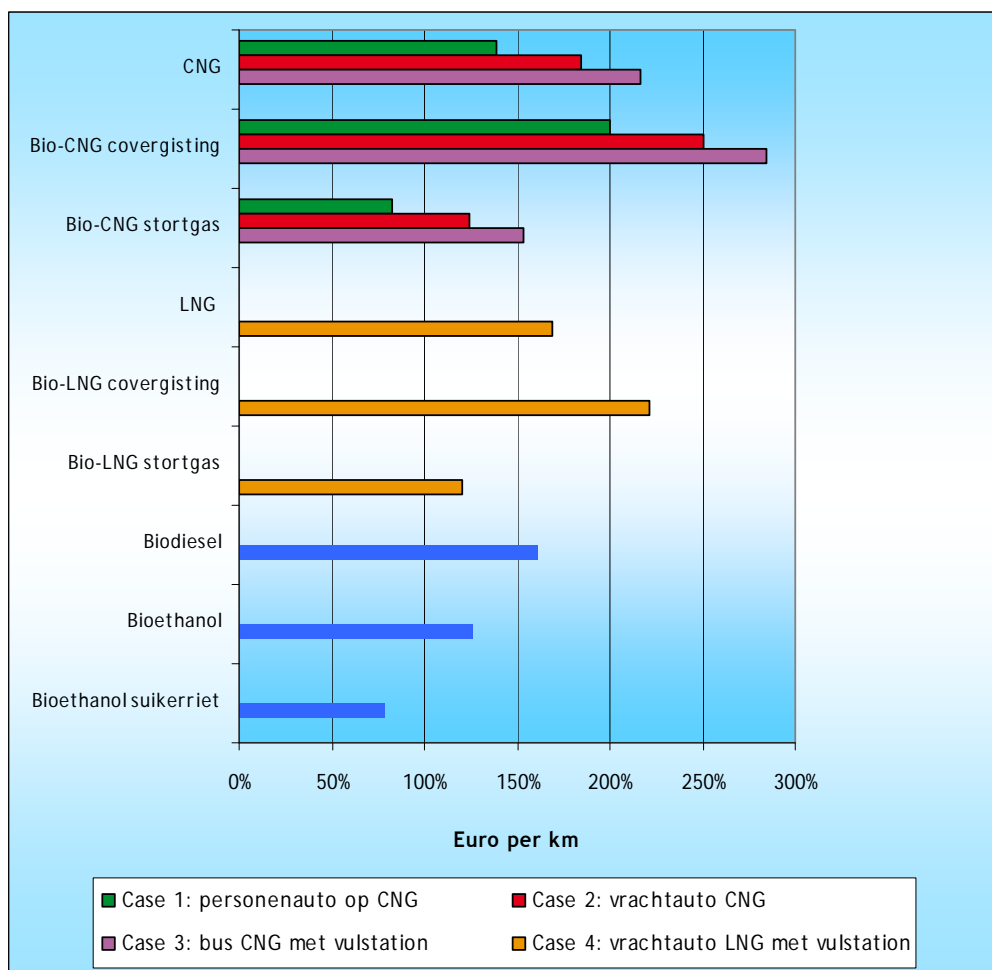
Figuur 21 Case 4: Overzicht van de CO₂-emissies over de keten bij de verschillende alternatieven



5.6 Conclusies van de cases

Een overzicht van de meerkosten per kilometer t.o.v. de brandstofkosten van diesel (alles excl. heffingen en belastingen) is gegeven in Figuur 22. Alle gasvormige alternatieven blijken duurder te zijn dan diesel, met uitzondering van case 1 met bio-CNG uit stortgas. Ook de bio-ethanol uit suikerrietroute is goedkoper dan diesel. De toename van de kosten is relatief het groots bij case 3, de CNG-bus met vulstation, de meerkosten van de CNG-personenauto zijn het laagst bij de hier gebruikte aannames. Bij de personenauto zijn de meerkosten vergelijkbaar met die van de vloeibare biobrandstoffen, waarbij zowel bio-CNG uit stortgas en bio-ethanol uit suikerriet het beste scoren.

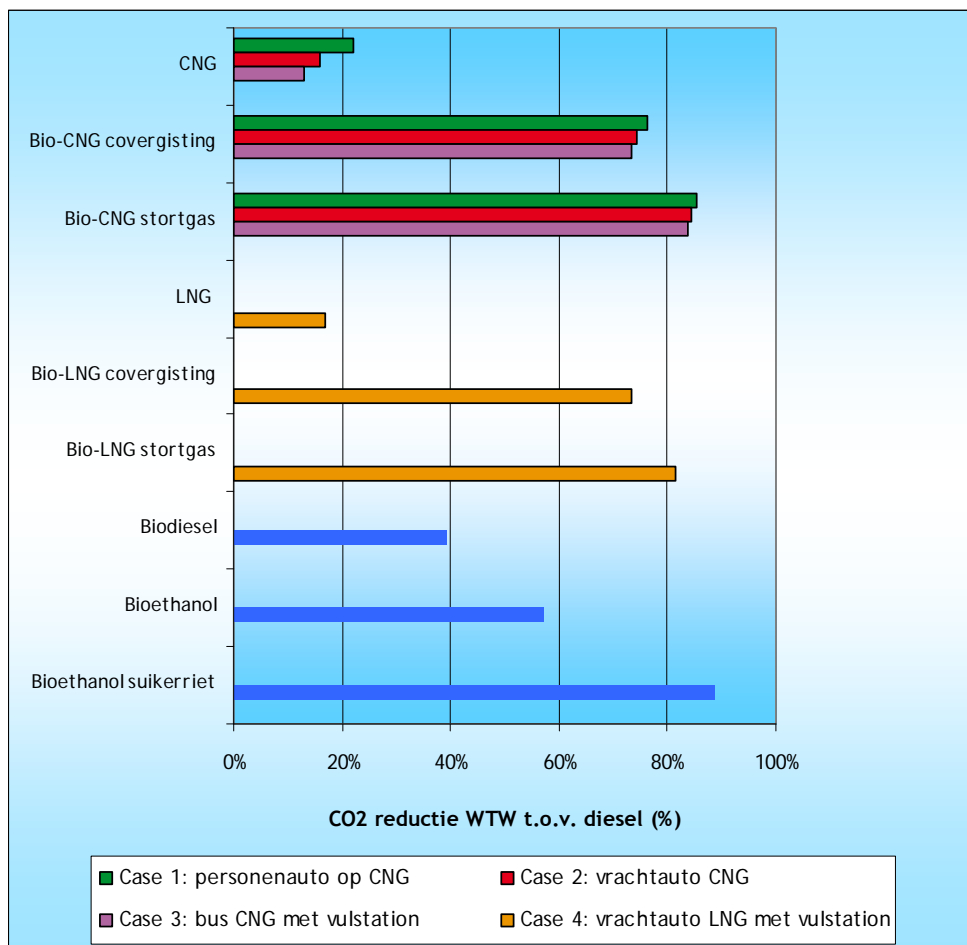
Figuur 22 Overzicht van de resultaten van de cases: meerkosten per kilometer, t.o.v. de brandstofkosten van diesel (100% = diesel). De meerkosten van andere biobrandstoffen zijn gegeven ter vergelijking



Een overzicht van de resultaten voor CO₂-emissies in de diverse cases is uitgezet in Figuur 23. Alle alternatieven blijken bij deze cases tot lagere CO₂-emissies te leiden dan de diesel referentie. De besparingen zijn fors bij de gasvormige bio-routes, deze zijn vergelijkbaar met de besparingen bij Braziliaanse ethanol. De besparingen bij de CNG- en LNG-routes zijn aanzienlijk beperkter, ca. 15-35%.



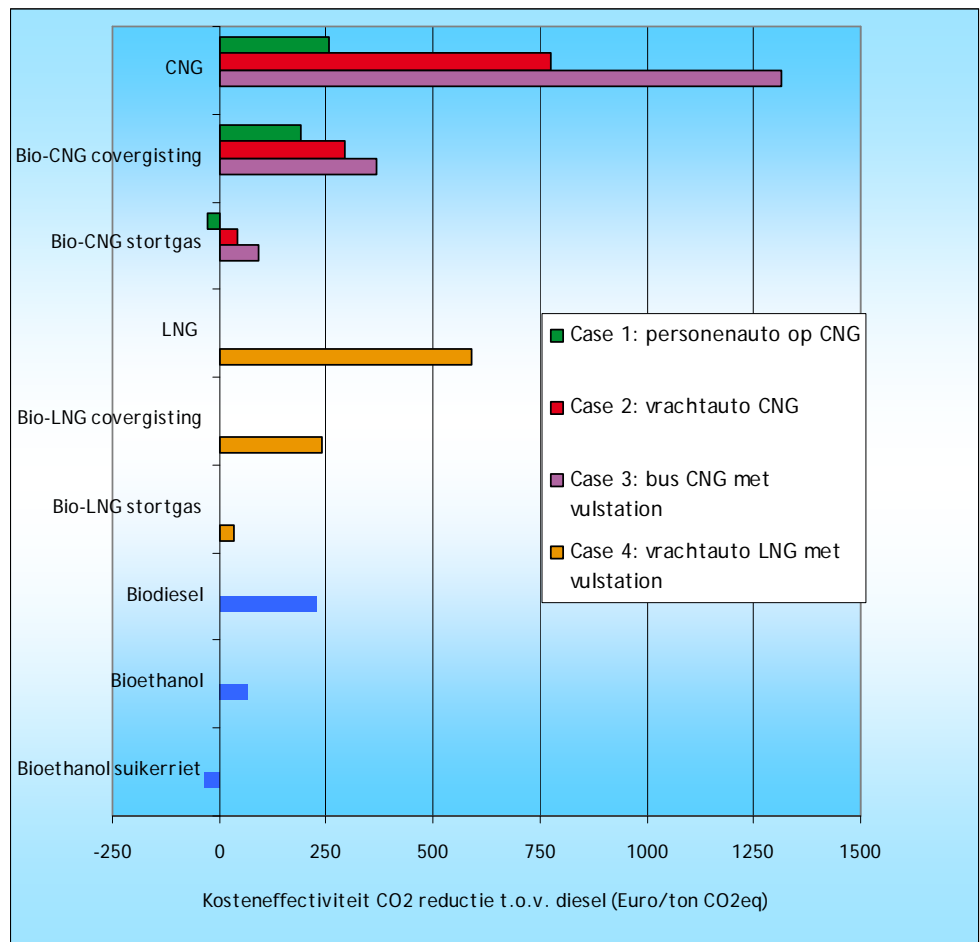
Figuur 23 Overzicht van de resultaten van de cases: CO₂-reductie t.o.v. diesel (WTW). De CO₂-reductie van andere biobrandstoffen zijn gegeven ter vergelijking



Deze resultaten kunnen we nu gebruiken om de kosteneffectiviteit van deze brandstoffen uit te zetten in termen van € per ton gereduceerde CO₂-eq. Dit is te zien in Figuur 24. Hieruit blijkt dat met name de bio-CNG en bio-LNG uit stortgasroute goed scoort, en in case 1 zelfs een negatieve kosteneffectiviteit oplevert omdat de kosten lager uitkomen dan bij diesel. Überhaupt scoren de stortgasroutes goed op kosteneffectiviteit, al nemen de kosten duidelijk toe in het geval er ook een vulstation moet worden aangeschaft. De resultaten zijn dan vergelijkbaar met die van bio-ethanol uit tarwe. Verder zien we dat de kosten per vermeden ton CO₂-eq. bij de CNG- en LNG-routes relatief hoog zijn bij de zwaardere voertuigen, bij de personenauto blijven de kosten beperkt. Bio-CNG en bio-LNG uit co-vergisting komt op een kosteneffectiviteit uit die vergelijkbaar is met die van biodiesel.



Figuur 24 Overzicht van de resultaten van de cases: kosteneffectiviteit in termen van € per ton vermeden CO₂-uitstoot. De kosteneffectiviteit van andere biobrandstoffen zijn gegeven ter vergelijking



6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Vergelijking van de opties: kosten

Bij een kostenvergelijking van de verschillende brandstofopties spelen drie kostenposten een belangrijke rol:

- de brandstofkosten;
- de meerkosten van de brandstofdistributie (met name investeringen in vulstations);
- meerkosten van de voertuigen.

In deze studie is gekeken naar de kale kosten, d.w.z. zonder heffingen en subsidies. Dit is gebruikelijk vanuit macro-economisch of overheidsperspectief, de resultaten wijken hierdoor echter af van de praktijk waar voertuigbezitters en -beheerders mee te maken hebben die deze heffingen wel moeten betalen (zie de tekstbox op de volgende pagina).

Daarnaast moet worden opgemerkt dat we ons in deze studie zoveel mogelijk hebben gebaseerd op data uit de literatuur die deels vrij beperkt is. De kosten in specifieke gevallen kunnen hier van afwijken.

Brandstofkosten

Uit de studie blijkt dat de kosten van CNG op dit moment vergelijkbaar zijn met die van diesel, per GJ brandstof. De gasvormige brandstoffen uit co-vergisting (50% mest, 50% maïs) liggen 30-75% hoger dan de huidige dieselprijs, voornamelijk afhankelijk van de schaalgrootte van het vergistingsproces. Alleen bio-CNG en bio-LNG dat is geproduceerd uit stortgas is duidelijk goedkoper per GJ dan diesel, de kosten liggen ca. 50-65% lager.

Vulstations

Nu er nog maar een beperkt aantal CNG-tankstations en zelfs nog geen enkel LNG-vulpunt in Nederland is, zullen een deel van de wagenparkbeheerders die op CNG/bio-CNG of LNG/bio-LNG willen rijden in veel gevallen zelf investeren in vulpunten voor hun eigen park. Voor sommige wagenparken zoals bussen zijn eigen vulpunten sowieso gebruikelijk. De aanlegkosten van dergelijke vulstations variëren met de hoeveelheid brandstof die wordt afgenomen en kunnen ruwweg tussen € 300.000 en € 2 miljoen bedragen.

Voertuigen

Er zijn inmiddels enkele CNG/bio-CNG-personenauto's verkrijgbaar zonder meerkosten t.o.v. diesel, maar in veel gevallen, zeker in het zwaarder voertuigsegment, zal een meerprijs moeten worden betaald. Lichte vrachtauto's op CNG kosten ca. 10-30% meer (rond de € 20.000 per voertuig), bussen op CNG zijn ook ca. 10-20% duurder dan vergelijkbare dieselbussen (ca. € 40.000 extra voor een stadsbus). LNG-voertuigen zijn ook duurder dan dieselvarianten, al zijn er nog minder praktijkgegevens van beschikbaar. Omdat met name de opslag van LNG/bio-LNG complexer is dan van CNG/bio-CNG verwachten we dat de meerkosten op een hoger niveau liggen dan bij CNG/bio-CNG-voertuigen.

Het totale kostenplaatje hebben we berekend voor een viertal cases (hoofdstuk 5). Hierbij zien we dat in alle vier de cases de gasvormige alternatieven duurder zijn dan diesel, met uitzondering van case 1 (personenauto) met bio-CNG uit stortgas. De toename van de kosten is relatief het



grootst bij case 3, de CNG-bus met vulstation, de meerkosten van de LNG-vrachtauto en de CNG-personenauto zijn het laagst, bij de hier gekozen aannames. Bij de personenauto zijn de meerkosten vergelijkbaar met die van de vloeibare biobrandstoffen.

Er is wel potentieel om de kosten van de gasvormige brandstoffen op termijn te verlagen.

- Zo zien we met name bij de voertuigen dat de meerkosten de laatste jaren dalen omdat de productievolumes toenemen. Daarmee naderen ze bij de personenauto's al de prijs van vergelijkbare dieselvoertuigen.
- De meerkosten zullen over enkele jaren waarschijnlijk nog verder dalen door de steeds strenger wordende emissie-eisen die aan dieselvoertuigen worden gesteld. De Euro 6-normen in het wegverkeer en toekomstige nieuwe normen in de binnenvaart (2016) zorgen ervoor dat dieselvoertuigen duurder worden. De gasvoertuigen en -schepen voldoen al aan die normen.
- De brandstofkosten van bio-CNG en bio-LNG kunnen nog dalen, als de schaalgrootte van biogasproductie toeneemt. Desondanks is de verwachting dat de kosten van groen gas uit co-vergisting hoger blijven dan de huidige dieselprijs.
- Indien de dieselprijs stijgt zonder dat dit kosten van de alternatieven verhoogt, zal de meerprijs ook verder kunnen dalen.

Maatschappelijke kostenanalyse versus kostencijfers in de praktijk

Bij de cijfers in dit rapport en dus ook bij deze conclusies moet worden opgemerkt dat in deze studie de kale, maatschappelijke kosten zijn geanalyseerd, dat wil zeggen exclusief heffingen zoals accijns, REB, BPM en MRB. Er is ook geen rekening gehouden met eventuele subsidies. De resultaten wijken dan ook vrij sterk af van business case analyses, waarin naar kosten voor consumenten en afnemers wordt gekeken.

Uit business case studies blijken vaak dat de aanschafkosten hoger zijn maar de gebruikskosten lager, waardoor de gasopties boven een bepaald kilometrage goedkoper uit komen. Een belangrijke oorzaak van de lagere gebruikskosten is echter het verschil in heffing op de brandstoffen. Op dit moment is de accijns ca. 43 €ct/liter diesel en 72 €ct/liter benzine versus 3,16 €ct/m³ CNG. Als deze heffingen worden weggelaten uit de analyse valt het kostenvoordeel geheel of gedeeltelijk weg.

6.2 Vergelijking van de opties: milieu

De CO₂-uitstoot van de groen gas-routes die in deze studie zijn onderzocht is, over de gehele keten bekeken, aanmerkelijk lager dan van diesel. De aardgas-routes kunnen ook een besparing opleveren, maar die is beperkter. De emissie-reducties hangen sterk af van herkomst van het aardgas, en in mindere mate van de wijze van biogasproductie. Bio-CNG- en bio-LNG-productie op basis van stortgas scoort iets beter dan co-vergisting³².

Als we de groen gas-routes vergelijken met de andere biobrandstoffen, biodiesel en bio-ethanol, zien we dat de CO₂-besparing van bio-CNG en

³² Eventuele broeikasgasemissies ten gevolge van indirecte verandering van landgebruik zijn hier niet meegenomen. Deze zouden kunnen optreden bij de co-vergisting, ten gevolge van de maïsteelt.



bio-LNG nog flink groter is dan van biodiesel en bio-ethanol uit tarwe, en vergelijkbaar of hoger dan die van bio-ethanol uit suikerriet.

De luchtvervuilende emissies NO_x en PM_{10} worden sterk gereduceerd bij een overstap van Euro 5-diesel naar gasvormige brandstoffen, in veel gevallen met 50 tot 90%. In hoeverre deze effecten de lokale luchtkwaliteit verbeteren hangt af van de specifieke lokale situatie en kan niet in zijn algemeenheid worden bepaald.

Ook de cases laten zien dat alle alternatieven tot lagere CO_2 -emissies over de keten leiden dan de dieselreferentie. De besparingen zijn fors bij de gasvormige bio-routes, deze zijn vergelijkbaar met de besparingen bij Braziliaanse ethanol (80-90%). De besparingen bij de CNG- en LNG-routes zijn aanzienlijk beperkter, ca. 15-35%.

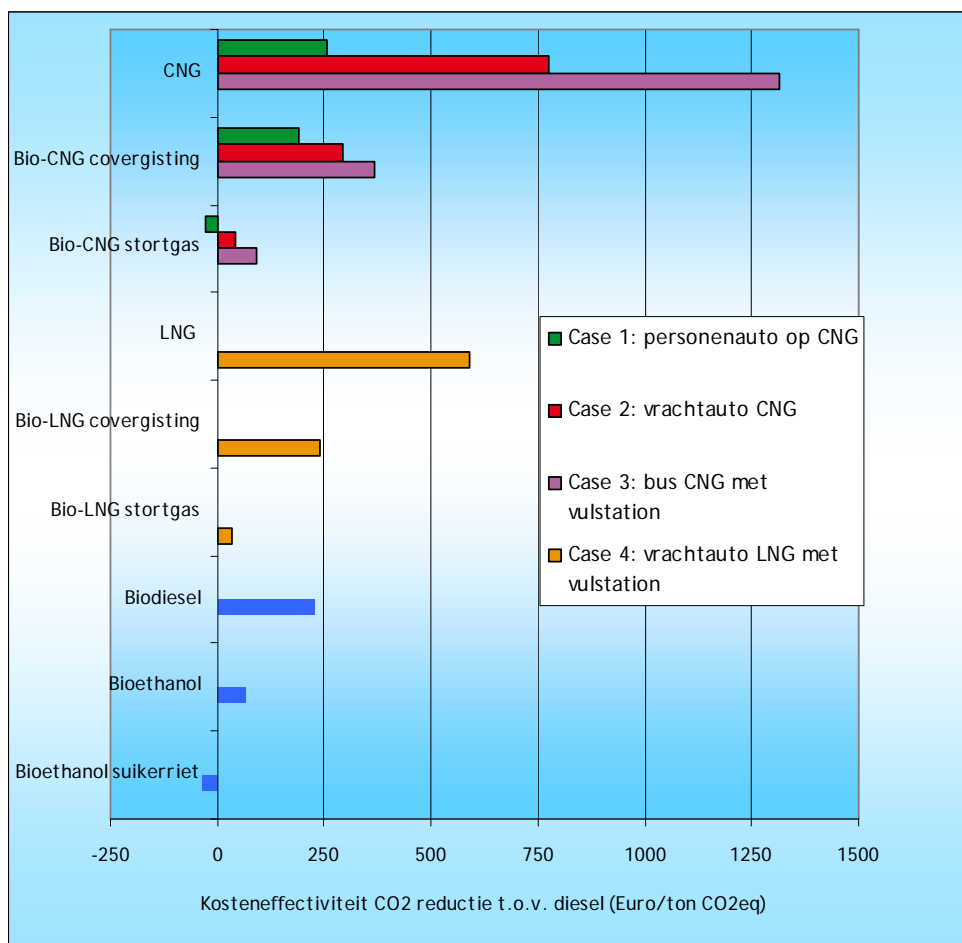
6.3 Kosteneffectiviteit CO_2 -reductie met deze brandstoffen

Het is vervolgens mogelijk om voor de specifieke cases die zijn doorgerekend de kosteneffectiviteit van deze brandstoffen te bepalen, in termen van € per ton gereduceerde CO_2 -eq. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 25.

Met name de bio-CNG en bio-LNG uit stortgasroute scoort hier goed. In case 1 levert dit zelfs een negatieve kosteneffectiviteit op omdat de kosten lager uitkomen dan bij diesel. Maar ook voor de andere cases komen de stortgasroutes goed uit deze vergelijking op kosteneffectiviteit, al nemen de kosten duidelijk toe in het geval er ook een vulstation moet worden aangeschaft. De resultaten zijn dan vergelijkbaar met die van bio-ethanol uit tarwe. Verder zien we dat de kosten per vermeden ton CO_2 bij de CNG- en LNG-routes relatief hoog zijn bij de zwaardere voertuigen, bij de personenauto blijven de kosten beperkt. Bio-CNG en bio-LNG uit co-vergisting komen in de doorgerekende cases op kosteneffectiviteiten uit die vergelijkbaar zijn met die van biodiesel.



Figuur 25 Overzicht van de resultaten van de cases: kosteneffectiviteit in termen van € per ton vermeden CO₂-uitstoot. De kosteneffectiviteit van andere biobrandstoffen zijn gegeven ter vergelijking



Potentieel van stortgas en concurrentie met andere toepassingen

Uit het bovenstaande blijkt duidelijk dat rijden op groen gas uit stortgas goed scoort, zowel op kosten als ook op CO₂-reductie. Voordat de conclusie kan worden getrokken dat de verkeerssector dus sterk op deze brandstof moet inzetten moeten echter nog wel twee vragen worden beantwoord:

1. Hoeveel van dit groene gas is er beschikbaar in Nederland, en wat is het maximum potentieel?
2. Hoe scoort toepassing in verkeer, ten opzichte van andere toepassingen zoals productie van warmte en elektriciteit?

Deze vragen vallen buiten de scope van dit onderzoek maar zijn wel relevant. Ter illustratie: op dit moment spaart stortgasinzet in WKK-motoren, als groen gas en in de vorm van direct toegepaste brandstof (bijv. bij een steenfabriek) circa 2 PJ per jaar aan fossiele energie uit; de totale productie van biogas bedraagt ruim 8 PJ (CBS-data over 2008). Het energiegebruik in het wegverkeer is op dit moment ca. 500 PJ (CBS-data). Analyses laten zien dat het potentieel voor uitbreiding van stortgasproductie beperkt is.

6.4 Aanbevelingen

Het lijkt ons aan te bevelen om de resultaten van deze studie in een breder kader te zetten, en dan met name te vergelijken met kosten en baten van toepassing van groen gas in andere sectoren. Groen gas-bijmenging in het aardgasnetwerk vergt vermoedelijk minder investeringen dan inzet in voertuigen, waar vulpunten moeten worden gerealiseerd en aparte voertuigen moeten worden aangeschaft. Daar staat echter tegenover dat toepassing in verkeer een aantrekkelijke manier zou kunnen zijn om aan biobrandstofdoelstellingen te voldoen: de CO₂-reductie is relatief hoog, in vergelijking met de nu gangbare biobrandstoffen, en de kosten zijn in sommige gevallen vergelijkbaar. Groen gas mag daarnaast deels of geheel dubbel tellen voor de biobrandstofdoelstelling, naar ratio van de mate waarin afvalstromen als grondstof zijn gebruikt.

Daarnaast bevelen we aan om de komende jaren de kostenontwikkeling van gasvormige brandstoffen, vulpunten en voertuigen in de gaten te houden. Gezien de redelijk snelle groei in toepassing die we zien is het goed mogelijk dat de kosten in de toekomst gaan dalen (met name van de voertuigen).

Het lijkt ons ook zinvol om over enkel jaren, als meer bekend is over de Euro 6-normen in het wegverkeer en de kosten die dit met zich meebrengt, de gasvormige brandstoffen met deze Euro 6-voertuigen te vergelijken. Ten opzichte van deze voertuigen zullen de meerkosten van de gasvormige brandstoffen lager uitkomen dan t.o.v. de Euro 5-voertuigen waar we in deze studie naar hebben gekeken (om aan de Euro 6-eisen te voldoen zal bij dieselvoertuigen nabehandeling van de uitlaatgassen nodig zijn, dit brengt kosten met zich mee). Hetzelfde geldt voor de strengere emissie-eisen in de binnenvaart die over enkele jaren van kracht worden, ook deze zullen de kosten van de referentie verhogen.

Daarnaast zijn we tijdens de uitvoering van dit project diverse praktische knelpunten tegengekomen. Zo is er uiteraard het 'kip-en-ei' probleem, wat inhoudt dat consumenten pas grootschalig op CNG/bio-CNG- of LNG/bio-LNG-voertuigen zullen overstappen als er voldoende vulpunten zijn, terwijl de meeste brandstofleveranciers niet zullen investeren in vulpunten als er nog maar weinig klanten zijn. Met name bij LNG spelen er ook nog een aantal technische en institutionele barrières zoals ontbrekende regelgeving voor de veiligheid bij vulpunten (wat leidt tot lastige en tijdrovende vergunningverleningstrajecten). Aan deze zaken hebben we in deze studie geen aandacht besteedt, maar zij spelen wel een belangrijke rol als aan een verdere uitrol van CNG/bio-CNG en LNG/bio-LNG wordt gewerkt.





Referenties

Argus, 2007

Argus monthly : Global LNG
Volume III, ISSUE 4, APRIL 2007

Austermann, 2007

S. Austermann, E. Archer, K.J. Whiting
Commercial assessment anaerobic digestion technology for biomass projects
Sheppards Mill : Juniper Consultancy Services Ltd, 2007

BMA, 2010

Case "Rijden op LNG"
Heiloo : BMA bv, 2010

BMVIT, 2005

D. Hornbachner, G. Hutter, D. Moor
Biogas-Netzeinspeisung, Rechtliche, wirtschaftliche und technische Voraussetzungen in Österreich
Wien : Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), 2005

BRCC, 2003

Markttechnische haalbaarheid van centrale vergisting van industriële afvalstromen
S.I. : BRCC bv, 2003

CE, 2005

Croezen et al.
Op (de) weg met pure plantenolie?
Delft : CE Delft, 2005

CE, 2007

R.T.M. Smokers, M.B.J. Otten
Vergelijking van kosten en milieu-aspecten van EEV-bussen op diesel en CNG
Delft : CE Delft, 2007

CE, 2008

L.C. den Boer, F.P.E. Brouwer, H.P. van Essen
Studie naar TRansport Emissies van Alle Modaliteiten (STREAM), versie 2.0
Delft : CE Delft, 2008.

CE, 2008a

L.C. den Boer, M,B.J. Otten
Spreadsheet bij DHL Natuurlijk (Vertrouwelijk)
Delft : CE Delft, 2008

CENEX, 2008

Biomethane in Vehicles (presentatie)
http://biogasmax.eu/media/3_biomethane_for_vehicles__082672400_1523_12122008.pdf



CENEX, 2009

Steve Carroll, Pillar Roman, Doug Leaf, John Stokes and Andrew Smith
Camden Biomethane Trial Results
Leicestershire : CENEX, 2009

Cornitius, 2006

T. Cornitius
Medium-Scale Liquefaction Technology : Presentation at Global Worldbank
Forum
Paris : Flaring Reduction and Gas Utilisation, 2006

Courage, 2009

B. Bruinsma, M.m.v. F. Linnemans & J. Greeve, (E-kwadraat)
Naar een energieneutrale zuivelketen(3) : Agrotransport op Groen gas
Zoetermeer : Courage, 2009

DBFZ, 2009

F. Müller-Langer
Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen
Energiesystem
Leipzig : Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ),
2009

EC, 2009

Directive of the European Parliament and the Council on the promotion of the
use of energy from renewable sources amending and subsequently repealing
Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
In : Official Journal of the European Union, L 140 (5.6.2009); p.16-62

ECN, 2009

S.M. Lensink, M. Mozaffarian, S.L. Luxembourg (ECN) ; J.W. Cleijne,
E.A. Pfeiffer, G.J. Stienstra (KEMA)
Conceptadvies basisbedragen 2010 voor elektriciteit en groen gas in het kader
van de SDE-regeling
Petten : ECN, 2009

ECN, 2009a

R.W.R. Zwart
Gas cleaning downstream biomass gasification, Status Report 2009
Petten : ECN, 2009

Ecofys and CE, 2008

Carlo Hamelinck , Klaas Koop , Michèle Koper (Ecofys) ; Harry Croezen,
Bettina Kampman, Geert Bergsma (CE Delft)
Technical Specification : Greenhouse Gas Calculator for Biofuels
Utrecht : Ecofys, 2008

Einang, 2008

P. M. Einang
Fremtidsbilde for norsk naturgassdistribusjon, 2015-2025
Enovas gasseminar, Trondheim 21. og 22. oktober, 2008

EnergieTransitie, 2007

Opwaarderen tot aardgaskwaliteit : Van biogas naar groen gas, brochure
S.I. : SenterNovem, Creatieve Energie, EnergieTransitie, 2007



EnergieTransitie, 2009

R. Hoogma M.m.v. M. Koopmans, R. Mellema, J. Traas, K. Ausema, L. Sluiman, K. Kerssemakers (Platform Duurzame Mobiliteit)
LNG als scheepsbrandstof: ervaringen en perspectieven uit Noorwegen
Bevindingen van studiereis 15-17 juni 2009
S.I. : SenterNovem, Creatieve Energie, Energie Transitie, 2009

Erdman, 2008

Georg Erdmann
LNG (Liquefied Natural Gas) - als Speicheroption für Erdgas
Berlin : TU Berlin, 2008

Fraunhofer Institut, 2009

W. Urban, K. Girod, H. Lohmann
Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz, Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008
Oberhausen : Fraunhofer Institut, 2009

Fuelswitch, 2009

www.fuelswitch.nl

Gasnor AS, 2008

Developing LNG as a clean fuel for ships in the Baltic and North Seas
Maritime Gas Fuel Logistics (MAGALOG project)
Bergen : Gasnor AS et al., 2008

Gas Vehicles Report, 2009

Madrid : NGVA Europe, 2009
Statistics available at: <http://www.ngvaeurope.eu/european-ngv-statistics>

GtS, 2007

Mathieu de Bas
Energie voor morgen: Biogas IN, Aardgas UIT
Presentatie op 15 November 2007, "Groen Gas en Warmte benutting"
Bergambacht : Gastreatment Services (GtS), 2007

't Hart, 2009

P. 't Hart,
Haalbaarheidsstudie 'Boomkorvissen op aardgas'
Barendrecht : Koers & Vaart BV, 2009

Held et al., 2008

J. Held, A. Mathiasson, A. Nylander
Biogas from manure, and waste products - Swedish case studies
Stockholm : Swedish Gas Centre, 2008

Holland Innovation Team, 2008

P. van der Gaag, N. Sapulette, E. Stenhuis
Productie en inzetbaarheid van Bio-LNG in de Nederlandse transportsector :
Carbon-negatief vrachtvervoer op lokale brandstof vóór 2013
S.I. : Holland Innovation Team, 2008



HoST, 2004

H. Wasser

Onderzoek naar de economische haalbaarheid van rundvee- en varkensmest-
vergisting op middelgrote bedrijven middels co-vergisting met kippenmest op
slachtkuikenbedrijven

Hengelo : HoST, 2004

JEC, 2007

JRC, Eucar, Concauwe

Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the
European context

S.l. : European Commission, Directorate-General Joint Research Centre (JEC),
2007

Jönsson, 2009

Owe Jönsson (E.ON Gas)

Biogas upgrading - Technologies, framework and experience

Presentation at MicrophiloxProject Workshop, Barcelona, 26-3-2009

Kieboom, 2009

R. Kieboom (Essent Milieu)

Presentatie congres Energiek met afval, Rotterdam 13 & 14 mei, 2009

Kunnert, 2007

S. Kunert

Verfahren zur Herstellung von LNG

Presentatie op InnoGas - November, 29th/30th 2007 Dessau, Deutschland

Lunds Tekniska Hogskola, Grontmij, 2008

Nina Johansson

Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading
technology : Description of systems and evaluations of energy balances

Lund : Lund University, 2008

MARINTEK, 2008

D. Stenersen (Marintek), Ole Svengård, Erik Jarlsby (Gasnor AS)

D 5.1 The overall Aspects of an LNG Supply Chain with Starting Point at Kolls-
nes and alternative Sources

Maritime Gas Fuel Logistics (MAGALOG project), Work Package 5

Trondheim : MARINTEK, 2008

MuConsult B.V. & CE, 2008

Schatting meerkosten alternatieve aandrijvingen concessie Veluwe :

Onderzoek in opdracht van provincie Gelderland

Amersfoort ; Delft : MuConsult B.V. & CE Delft, 2008; NGVA, 2009

NSCA, 2006

Biogas as a road transport fuel; an assessment of the potential role of biogas
as a renewable transport fuel

Brighthon : National Society for Clean Air and Environmental Protection (NSCA),
2006

OME, 2002

Manfred Hafner

Future Natural Gas Supply Options and Supply Costs for Europe

Nanterre : Observatoire Méditerranéen de l'Energie (OME), 2002



PDM, 2009

Rijden op groen gas

Den Haag : Plaform duurzame mobiliteit (PDM), Energietransitie, 2009

Persson and Wellinger, 2006

M. Persson, A. Wellinger

Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid introduction

S.l. : IEA Bioenergy , 2006

Port of Rotterdam, 2007

http://www.portofrotterdam.com/en/news/pressreleases/2007/18122007_02.jsp

PPO, 2008

Kwantitatieve Informatie Akkerbouw en Vollegrondsgroenteteelt 2008 (KWIN 2008)

Lelystad : Wageningen UR, Praktijkonderzoek Plant en Omgeving (PPO), 2008

Rebel Group Advisory, 2007

Vergisting van reststromen VG : businesscase

Rotterdam : Rebel Group Advisory, Rotterdam, 2007

SenterNovem, 2007

J.H. Welink, M. Dumont, K. Kwant

Groen Gas, Gas van aardgaskwaliteit uit biomassa (Update van de studie uit 2004)

Utrecht : SenterNovem, 2007

Swedish Gas Center, 2007

Margareta Persson

BIOGAS - a renewable fuel for the transport sector for the present and the future

Malmö : Swedish Gas Center, 2007

Syngenta Seeds, 2007

NK Biogas-Mais : Qualität zahlt sich weiter aus

Bad Salzflen : Syngenta Seeds GmbH, 2007

Thrän, 2007

D. Thrän, et al.

Possible European biogas supply strategies

Leipzig : Institut für Energetik und Umwelt, 2007

TNO, 2009

N. Ligterink, R. de Lange, R. Vermeulen, H. Dekker.

On-road NOx emissions of Euro-V trucks

Delft : TNO, 2009

Vattenfall, 2006

A. Pettersson, S. Liljemark, M. Losciale

LCNG-study : Possibilities with LNG supporting supply of methane as a vehicle fuel in Sweden

Stockholm : Vattenfall Power Consultant AB, 2006



WestStart-CALSTART, 2004

B. Rutledge

Swedish Biogas Industry Education Tour 2004: Observations and Findings

Pasadena : WestStart-CALSTART, 2004

Wulf, 2005

S. Wulf

Anaerobic digestion and biogas production

Presentation at 1st Bonner Summer School on Sustainable Agriculture,

August 2005

WUR, 2006

Kor Zwart, Diti Oudendag, Phillip Ehlert, Peter Kuikman

Duurzaamheid co-vergisting van dierlijke mest

Wageningen : WUR, 2006

WUR, 2007

J. Broeze, E. Annevelink, M. Vollebregt

Onderzoek biomassa en energie Biopark Terneuzen : TAG project Biopark

Terneuzen

Wageningen : WUR, 2007



Bijlage A Terminologie verschillende gassoorten

CNG

Compressed natural gas is aardgas dat onder druk is gebracht, tot ca. 200 bar. CNG kan in verschillende kwaliteiten worden aangeboden, waarbij we onderscheid maken naar methaangehalte. Hoe hoger het methaangehalte, hoe groter de actieradius van een auto bij eenzelfde hoeveelheid (kg of m³) CNG. CNG met een methaangehalte van 88% noemen we bijv. **CNG 88**, bij een methaangehalte van 97 gebruiken we de term **CNG 97**. De algemene term CNG wordt gebruikt als het methaangehalte niet direct relevant is.

LNG

Liquefied natural gas is vloeibaar gemaakt aardgas. Hiervoor moet het aardgas eerst worden opgewerkt tot een methaangehalte van > 97%, vervolgens wordt het gekoeld tot ca. 162°C. Ook hier geven we het methaangehalte aan in de naam als dat nodig is, zo bevatten **LNG 97** en **LNG 99** respectievelijk 97% en 99% methaan. Het voordeel van LNG t.o.v. CNG is de veel grotere energiedichtheid, waardoor een grotere actieradius mogelijk is.

SNG

Synthetic natural gas wordt geproduceerd door vergassing gevolgd door methanisatie van bijvoorbeeld steenkool.

Biogas

Biogas wordt op dit moment geproduceerd door vergisting van onder meer gewasresten en vloeibare (organische) reststromen, vaak in combinatie met dierlijke mest. Het wordt ook gewonnen bij rioolwaterzuiveringsinstallaties en als stortgas bij vuilstortplaatsen. Biogas heeft een methaaninhoud van 55-65% en een CO₂-gehalte van 35-45%. Bij opwaardering naar groen gas wordt de meeste CO₂ verwijderd, om op het kwaliteitsniveau van Nederlands aardgas te komen. Ook wordt het gas gereinigd van onder meer zwavel en organisch actief materiaal.

Bio-SNG

Bij vergassing van biomassa en opwerking tot synthetic natural gas spreken we van bio-SNG.

Groen gas

Groen gas is een verzamelterm voor opgewaardeerd biogas/stortgas en bio-SNG. Het is gas dat is opgewerkt naar Slochterenkwaliteit en kan worden ingevoerd in het netwerk. Het methaangehalte is ca. 88%.

Biomethaan

Opwaarderen van biogas/groen gas tot een methaaninhoud van meer dan 97% is ook mogelijk. Bijna zuiver methaan op basis van biomassa noemen we biomethaan.



Bio-CNG

Bio-CNG is groen gas of biomethaan dat onder druk (tot 200 bar) is gebracht, analoog aan CNG. Daarmee is het geschikt om in CNG-voertuigen te gebruiken. Ook hier kunnen we verschillende methaangehaltes onderscheiden indien nodig: **bio-CNG 88** en **bio-CNG 97** bevatten respectievelijk 88 en 97% methaan. Bio-CNG uit biomethaan, met een methaangehalte > 97%, wordt door sommige aanbieders ook wel CBM genoemd.

Bio-LNG

Biomethaan kan vloeibaar worden gemaakt door het te koelen tot -162°C . We spreken dan van bio-LNG (door sommige aanbieders ook wel LBM genoemd). Het methaangehalte is minimaal 97%. Bio-LNG kan in voertuigen en schepen worden toegepast die geschikt zijn om op LNG te rijden of varen, het kan ook worden geconverteerd naar bio-CNG 97. Het voordeel van bio-LNG t.o.v. bio-CNG is de veel grotere energiedichtheid.

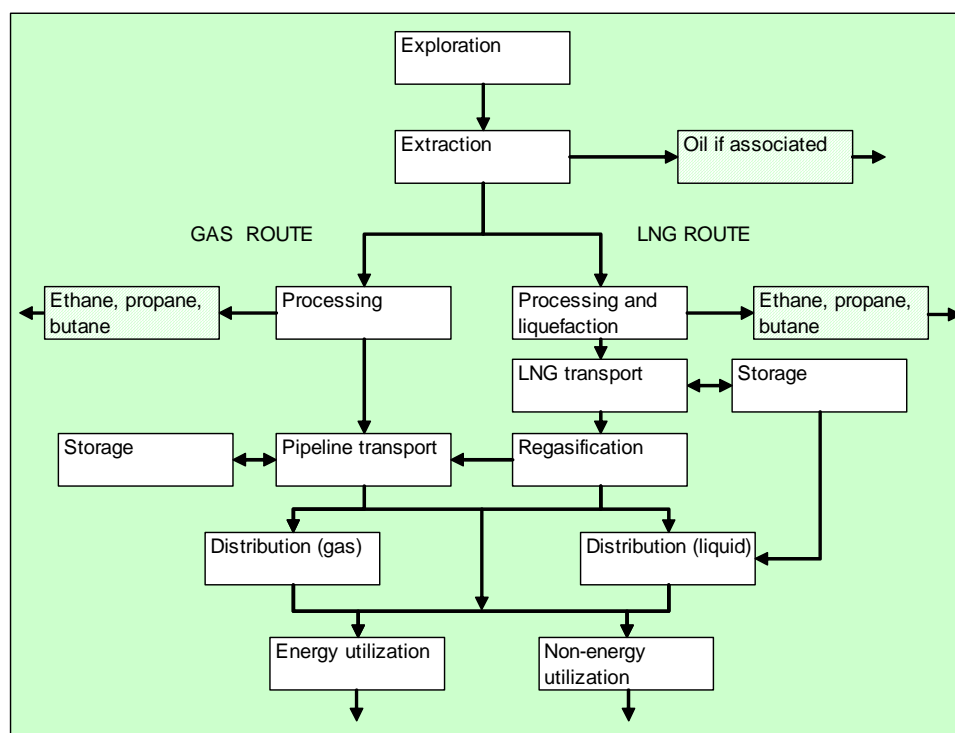


Bijlage B Beschrijving aardgasketen en LNG-productie

B.1 Aardgasketen - van put tot pomp

De keten voor aardgas bestaat, wanneer exploratie en constructie van boorputten buiten beschouwing wordt gelaten, uit de in Figuur 26 genoemde schakels.

Figuur 26 Een schematische voorstelling van de aardgasketen



Gasbehandeling (processing)

Aardgas wordt in alle gevallen ontdaan van condenseerbare koolwaterstoffen (condensaat), zwavelverbindingen, waterdamp en eventueel aanwezige kool-dioxide. Afhankelijk van de regionale markt worden eventueel ook ethaan t/m pentaan afgescheiden, bijvoorbeeld voor gebruik als grondstof voor stoomkrakers/naftakrakers. Afscheiding van hogere koolwaterstoffen vindt met name in de VS en Groot-Brittannië plaats.

Gasbehandeling vergt gebruik van elektriciteit voor aandrijven van pompen, compressoren en ventilatoren. De elektriciteit wordt in de regel geproduceerd door aardgasgestookte turbines en motoren. Alleen bij gaswinningsinstallaties en gasbehandelingsinstallaties dicht bij een bestaand elektriciteitsnet wordt elektrisch aangedreven apparatuur toegepast.

Naast elektriciteit wordt ook stoom en brandstof gebruikt, bijvoorbeeld bij het verwijderen van waterdamp of verwijdering van H_2S en CO_2 . Bij deze processen wordt een absorbers gebruikt voor het vangen van de ongewenste

gascomponenten. Dat absorbens moet vervolgens weer worden geregenereerd met warmte om opnieuw te kunnen worden gebruikt.

Processen worden in de regel direct ondervuurd, bij uitzondering vindt warmtekrachtkoppeling plaats en wordt warmte van de voor elektriciteitsopwekking ingezette gasturbines en gasmotoren toegepast. Restgassen worden soms afgeblazen, vaak afgefakkeld en soms als brandstof gebruikt bij ondervuring van warmtevragende processen.

Tijdens gasbehandeling treden ook diffuse emissies van koolwaterstoffen op. Hierboven is al het afblazen van restgassen genoemd. Daarnaast treden lekverliezen op via ventielen, flenzen, afsluiters, etc.

Pijpleiding transport

Bij onshore transport per hoge druk pijpleiding wordt het gas tot 65-75 bar gecompriemd en vindt langs het pijpleiding tracé om de 125-150 kilometer recompressie plaats.

In geval van offshore gaswinning of van onderzeese pijpleidingen - bijvoorbeeld de Balzand - Baxton Connector - is tussentijdse recompressie niet mogelijk. Dientengevolge moet het gas vaak tot een veel hogere druk worden gecompriemd om de drukval over het leidingtracé te overbruggen.

De voor recompressie gebruikte compressoren worden middels aardgasgestookte turbines aangedreven. Er treedt diffuse emissie op door lekkage via ventielen in het leiding netwerk en via de afsluiters van gasturbines en compressoren.

LNG-productie en -logistiek

LNG-productie behelst afkoelen van het behandelde aardgas tot -162°C , iets lager dan het kookpunt van methaan. Vaak worden de bij hogere temperaturen al condenserende ethaan en propaan fracties achteraf bijgemengd.

LNG wordt veelal getransporteerd met geïsoleerde tankers met een typisch laadvermogen van 100-150 kton. Tijdens transport verdampte LNG (Boil Off Gas of BOG) wordt gebruikt voor de aandrijving van de tanker. Naast BOG wordt zware stookolie als brandstof gebruikt. Op de plek van bestemming wordt de LNG vervolgens overgepompt naar de opslagtanks van de LNG-terminal en na compressie tot typisch 80 bar verdampt voor uitzending en distributie via het hoge druk netwerk. Bij de in Nederland geplande terminals zal de voor verdamping benodigde warmte grotendeels aan zeewater worden onttrokken of zal industriële restwarmte worden gebruikt. Alleen in koude periodes zal een deel van de aangelande LNG worden gebruikt voor ondervuring en verdamping van de uit te zenden LNG.

Een mogelijk alternatief voor deze route is om LNG per schip te laten aanvoeren vanuit Noorwegen, zoals dat ook nu gebeurt voor het Verenigd Koninkrijk en Zweden. De LNG kan vervolgens per binnenvaartschip of tankwagen verder worden vervoerd.

Ook bij LNG-productie wordt ruw aardgas gebruikt als brandstof in het LNG-productieproces en voor opwekking van de bij LNG-productie benodigde elektriciteit. Net als bij gasbehandeling en bij pijpleiding transport treden diffuse emissies op door afblazen van restgassen en in de vorm van lekkages van koolwaterstoffen via flenzen, ventielen en afsluiters.



B.2 Milieu-effecten

In Tabel 15 is een overzicht gegeven van emissie gerelateerd aan de ketenschakels vanaf aardgaswinning tot distributie van CNG en LNG. De milieueffecten hebben betrekking op:

- de winning en opwerking van aardgas;
- transmissie van pijpleidinggas via het hoge druk gasnet op een druk van maximaal 75 bar;
- LNG-productie, LNG-transport per tanker en opslag in de LNG-terminal.

Er is onderscheid gemaakt tussen aardgas en LNG van verschillende oorsprongen vanwege verschil in afstanden vanaf winninglocatie tot Nederland en vanwege de verschillende samenstelling van het gewonnen aardgas. Beide aspecten bepalen mede de milieubelasting per eenheid aangeleverd aardgas/LNG. Uit de tabel blijkt dat deze sterk kunnen verschillen, afhankelijk van de herkomst van het gas.

Tabel 15 Milieubelasting voor aardgas van verschillende landen van herkomst

| Emissies (kg/GJ) | Nederlands gas | Russisch gas | Algerijns gas | Noors pijpleiding gas | Algerijnse LNG | Midden-Oosten LNG |
|------------------|----------------|--------------|---------------|-----------------------|----------------|-------------------|
| CO ₂ | 0,81 | 6,87 | 4,77 | 2,06 | 12,47 | 14,10 |
| CH ₄ | 0,01 | 0,23 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| N ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SO ₂ | | | | 0,00 | 0,02 | 0,07 |
| NO _x | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,07 | 0,15 |
| NH ₃ | | | | | | |
| HCl | | | | | | |
| HF | | | | | | |
| CO | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| PM ₁₀ | | | | | | |
| PM < 2.5 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| PM 2.5 - 10 | | | | | | |
| VOC | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Bronnen: IGU (2006), VME (2009), MJA (2005), Ecolnvent (2007).

Nog niet beschouwd zijn:

- overslag van pijpleidinggas op een gasontvangststation (GOS) van hoge druk net of middendruk net op regionaal distributienet;
- de compressie van de via het regionale distributienet bij het CNG-vulstation aangeleverde aardgas tot 250 bar (JEC, 2007);
- transport van LNG vanaf de terminal.

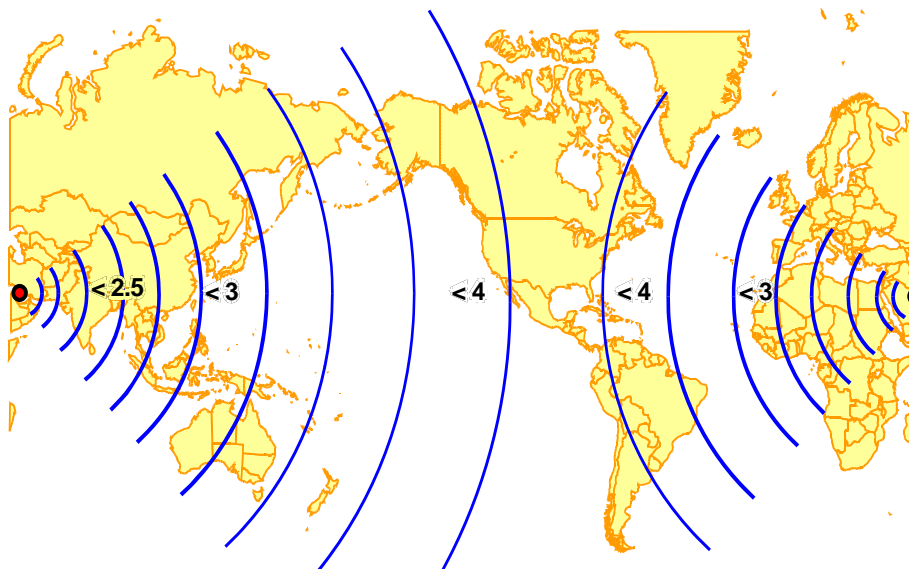
Compressie tot 250 bar vergt volgens JEC (2007) 22 MJ_e/GJ CNG.



B.3 Kosten

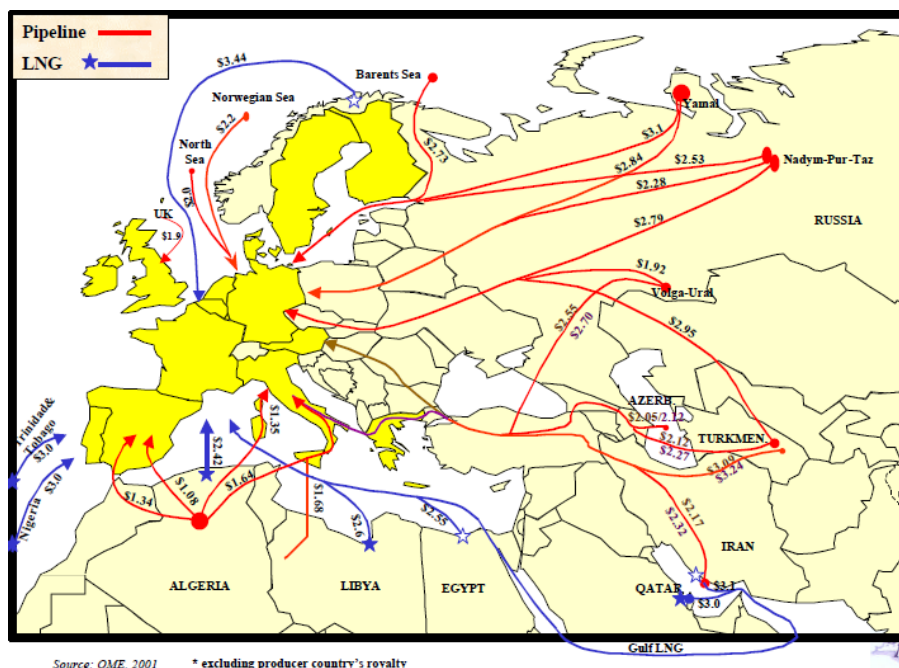
De hoogte van de aanleverkosten voor aardgas en LNG worden geïllustreerd met Figuur 27 en Figuur 28. In essentie kan aardgas als pijpleidinggas en als LNG voor minder dan \$ 4/MMBtu of minder dan € 3/GJ worden aangeleverd vanuit Rusland, Noorwegen en LNG-exportgebieden als Afrika (Nigeria, Angola), het Midden-Oosten en Latijn-Amerika (Trinidad, Peru). De commodityprijs ligt volgens ECN (2009) daarentegen op een niveau van 22 cct/Nm³ of circa 7 €/GJ. Kleinverbruikers betalen nog meer (zie Figuur 27).

Figuur 27 Prijzen voor aanlanden van LNG uit Midden Oosten (in \$/MMBtu; \$ 1/MMBtu = € 0,75/GJ)



Bron: Verberg (2006).

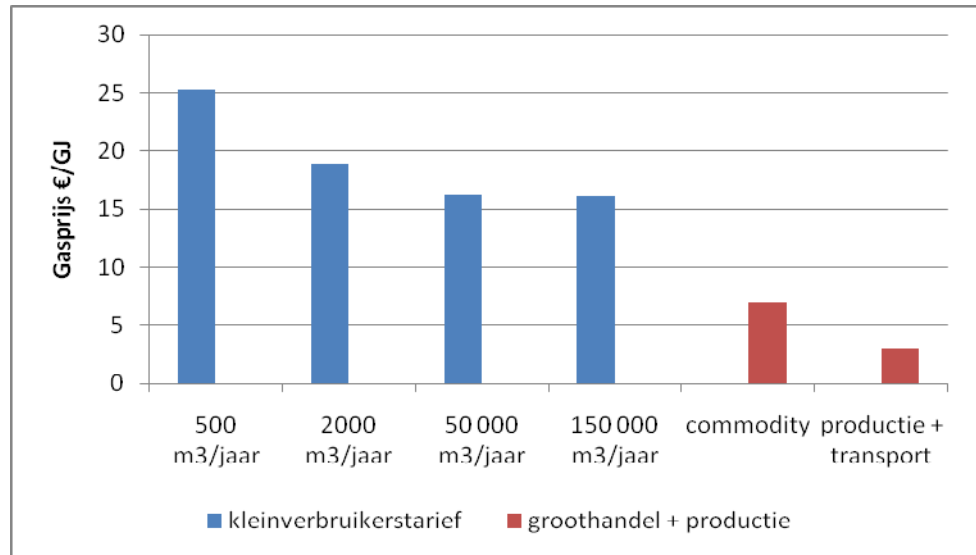
Figuur 28 Prijzen voor gasproductie en transmissie naar de EU (in \$/MMBtu; \$ 1/MMBtu = € 0,75/GJ)



Bron: Hafner (2002).



Figuur 29 Productiekosten, commodityprijs en kleinverbruikertarieven voor aardgas €/GJ



NB. Prijzen zijn exclusief BTW en REB. De REB bedraagt voor CNG toepassing 3 €ct/m³, circa 1 €/GJ. BTW tarief = 19%.





Bijlage C Maisteelt en transport van kuilmaïs

C.1 Gegevens voor maisteelt

Input en opbrengst

Gegevens voor snijmaisteelt zijn overgenomen uit PPO (2008). De gegevens zijn een gemiddelde voor teelt op goede zandgrond (80% teelt) en teelt op kleigrond. De gehanteerde gegevens zijn:

- opbrengst 14,2 ton d.s. of 47,4 ton n.s. per hectare, ingekuild (inclusief 7% verlies);
- giften:
 - 185 kg/ha N-kunstmest (KAS 27%);
 - 150 kg/ha K₂O;
 - 62,5 liter/ha diesel + smeermiddelen.

Er is conform de CO₂-toolmethodiek voor biobrandstoffen aangenomen dat enkel kunstmest wordt gebruikt. In de CO₂-tool is met opzet niet de mogelijkheid geboden om gebruik van dierlijke mest te verdisconteren. De gehanteerde stikstofgift is overigens iets hoger dan de stikstofgebruiksnorm voor bedrijven zonder derogatie op zand, löss en veen voor 2007 (Van Schooten, 2007) en zou dus eigenlijk niet mogen worden toegediend.

In andere bronnen worden overigens ook voor fosfaatbemesting waarden opgegeven van rond de 65 kg P/ha. Deze waarden zijn niet overgenomen omdat PPO als gezaghebbende bron is beschouwd.

De bruto opbrengst voor de landbouwer bedraagt volgens PPO (2008) 170 €/ton d.s., de productiekosten bedragen circa 73 €/ton d.s. De kosten zijn inclusief afvoer naar erf en inkuilen, exclusief navolgend transport naar de vergister.

Voor de economische analyse is in deze studie uitgegaan van de bruto opbrengst.

Milieueffecten

De geschatte omvang van emissies naar lucht en bodem zijn weergegeven in Tabel 16.

De emissiecijfers voor landbouw werktuig gebruik zijn bepaald aan de hand van het brandstofgebruik (zie PPO, 2008) en de emissiecijfers per eenheid brandstof zoals gegeven door de Taakgroep Verkeer voor landbouw werktuigen.

De emissies gerelateerd aan toepassing van N-kunstmest zijn geschat op basis van de stikstofbalans uit CE (2005):

- Er is uitgegaan van aanwezigheid van N uit gemineraliseerde gewasresten van de voorvrucht van 30 kg/ha (Schröder, 2005).
- Voor de depositie is een getal van 31 kg N/ha gehouden (Schröder, 2005).
- Voor de berekening van de in de snijmaïs afgevoerde hoeveelheid stikstof is uitgegaan van een stikstofgehalte van 1,35 gew% per eenheid droge stof.
- De emissies van NH₃ naar lucht zijn geschat als 2% van de stikstofgift (CE, 2005).



- De directe emissies voor N₂O zijn geschat als 1% van de stikstofgift (CO₂-tool).
- Voor de in de stoppels en wortels na de snijmaisoogst achterblijvende hoeveelheid N is een waarde van 25 kg/ha aangehouden (Schröder, 2005).
- Aangenomen is dat van het overschot aan N-aanbod (gift, depositie, gemineraliseerde gewasresten) 28% als nitraat wordt geëmitteerd (CE, 2005).

De indirecte emissies van N₂O veroorzaakt door omzetting van NH₃ en NO₃ zijn berekend conform de IPCC-methodiek (2006).

Er is geen rekening gehouden met uitspoeling van fosfaat aangezien fosfaat weinig mobiel is in de bodem.

Tabel 16 Overzicht emissies gerelateerd aan maïsteelt (kg/ha)

| | Mobiele werktuigen landbouw | Toepassing kunstmest | Indirecte N ₂ O-emissies |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------|--|
| Lucht | | | |
| CO | 1,28 | | |
| VOS (verbranding) | 0,26 | | |
| NO _x | 1,87 | | |
| Aërosolen | 0,15 | | |
| SO ₂ | 0,16 | | |
| Lood | 0,00 | | |
| CO ₂ | 165,93 | | |
| N ₂ O | 0,00 | 2,91 | 0,32 |
| CH ₄ | 0,01 | | |
| NMVOS (verbranding) | 0,25 | | |
| NH ₃ | 0,00 | 4,49 | |
| Bodem | | | |
| NO ₃ | | 29,01 | |

C.2 Gegevens voor transport van kuilmaïs

Voor transport is uitgegaan van transport met een kipwagen. De transportkosten bedragen ongeveer 1,5 €/ton n.s./uur (PPO, 2008). De gehanteerde specifieke transportkosten hebben betrekking op 'verrekenprijzen bij onderling gebruik van werktuigen', wanneer met eigen transportmiddelen wordt getransporteerd.

Bij uitbesteding van het transport aan een loonwerkbedrijf liggen de specifieke transportkosten drie en een half maal hoger.

Voor de gemiddelde snelheid is uitgegaan van 20 km/uur (Syngenta, 2007). Voor het brandstofgebruik is conform de CO₂-tool voor biobrandstoffen uitgegaan van 0,4 MJ/ton/km.

Transportafstanden zijn geschat uitgaande van de beschouwde productiecapaciteit van de vergistingsinstallaties (zie Bijlage D).

Op basis van de jaarlijkse biogasproductie is bepaald hoeveel snijmaïs en daarmee ook - uitgaande van de aangehouden opbrengst per hectare - hoeveel teeltareaal nodig is. Er is aangenomen dat het snijmaïsareaal maximaal 20% van het landoppervlak vormt en dat door de structuur van het wegennet een



twee maal langere afstand als de luchtlijn vergt. Dit geeft de in Tabel 17 gegeven brandstofverbruiken en transportkosten.

Tabel 17 Gebruikte data m.b.t. transport van snijmais

| Voor biogasproductie m ³ /uur = | 500 | 1.000 | 2.000 | 5.000 |
|---|--------|--------|---------|---------|
| - ton mest | 23.013 | 46.026 | 92.052 | 230.131 |
| - ton mais | 23.013 | 46.026 | 92.052 | 230.131 |
| Totaal | 46.026 | 92.052 | 184.105 | 460.262 |
| Hectaren snijmais | 485 | 971 | 1.941 | 4.853 |
| Hectaren betrekkinggebied | 2.426 | 4.853 | 9.706 | 24.264 |
| Transportafstand: | 4 | 6 | 8 | 12 |
| Brandstofgebruik (l/ha) | 4,1 | 5,8 | 8,2 | 13,0 |
| Emissies naar lucht (kg/ha) | | | | |
| CO | 0,08 | 0,12 | 0,17 | 0,27 |
| VOS (verbranding) | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,05 |
| NO _x | 0,12 | 0,17 | 0,25 | 0,39 |
| Aërosolen | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 |
| SO ₂ | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 |
| Lood | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CO ₂ | 10,93 | 15,46 | 21,86 | 34,57 |
| N ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CH ₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| NMVOS (verbranding) | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,05 |
| NH ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Transportkosten (€/ton) | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 2,0 |
| - uur transport (heen-terug) | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,3 |





Bijlage D Vergisting

D.1 Procesbeschrijving

D.1.1 Algemeen

In principe zijn er twee routes voor de productie van biogas en groen gas:

- via vergisting;
- via vergassing.

In deze studie wordt vanwege het doel van het onderzoek alleen vergisting beschouwd.

Vergisting is een microbiologisch proces waarin micro-organismen de in de bio-massa aanwezige suikers, zetmeel, eiwitten en vetten maar ook cellulose en hemicellulose omzetten in biogas. Biogas is een mengsel van methaan en kooldioxide.

Het proces heeft enkele kenmerkende eigenschappen:

- De microbiologische reacties spelen zich af in de waterfase, waardoor het proces ook geschikt is voor de verwerking van natte biomassa.
- Omdat de voor vergisting verantwoordelijke micro-organismen anders als bij fermentatie ook cellulose en hemicellulose kunnen omzetten heeft vergisting een hoger conversierendement als productie van ethanol uit dezelfde biomassa.
- Vanwege het niet kunnen omzetten van lignine is het proces niet geschikt voor houtachtig materiaal, tenzij de houtachtige structuur door voorbewerking (enzymatisch, oplossen in zuur of alkali, met stoomexplosies) wordt afgebroken en de in de structuur aanwezige vergistbare componenten bereikbaar worden voor de micro-organismen.

Als bijproducten van vergisting ontstaan verontreinigd water en digestaat, het residu aan onvergiste biomassa. De bijproducten bevatten vrijwel alle in de oorspronkelijke biomassa aanwezige nutriënten in een voor planten opneembare vorm waardoor ze kunnen worden gebruikt als meststof. Dit maakt in principe het sluiten van de nutriëntenkringloop mogelijk en biedt daarmee de mogelijkheid voor energieteelt met minimale milieubelasting. Digestaat kan eventueel ook worden verbrand of vergast, zoals bijvoorbeeld wordt overwogen bij een project in Venlo.

Biogas wordt bij gebruik als groen gas gereinigd van verontreinigingen daarna met een membraan, absorptie aan moleculaire zeef of door wassen met water gescheiden in methaan en kooldioxide. Afgescheiden kooldioxide zou eventueel ondergronds kunnen worden opgeslagen.

D.1.2 Stand van de technische ontwikkeling en indicatieve productiekosten

Vergistingstechnologie wordt commercieel aangeboden, maar is nog niet uitontwikkeld. Er wordt gewerkt aan verbetering van conversierendementen middels voorbehandeling van de te vergisten biomassa met verhoogde druk of verhitting en middels toepassing van ultrasoon-geluid tijdens vergisting. Verlaging van proceskosten kan mogelijk worden gerealiseerd door toepassen van nieuwe typen reactoren en door zo vroeg mogelijk afscheiden van niet vergistbaar materiaal.



Vergisting wordt al sinds ruim twee decennia op industriële schaal toegepast in Denemarken en Zweden. In diverse regio's in Zweden (o.a. Göteborg) zijn lokale systemen voor vergisting, opwerken van biogas en lokale distributie van het geproduceerde biomethaan naar tankstations.

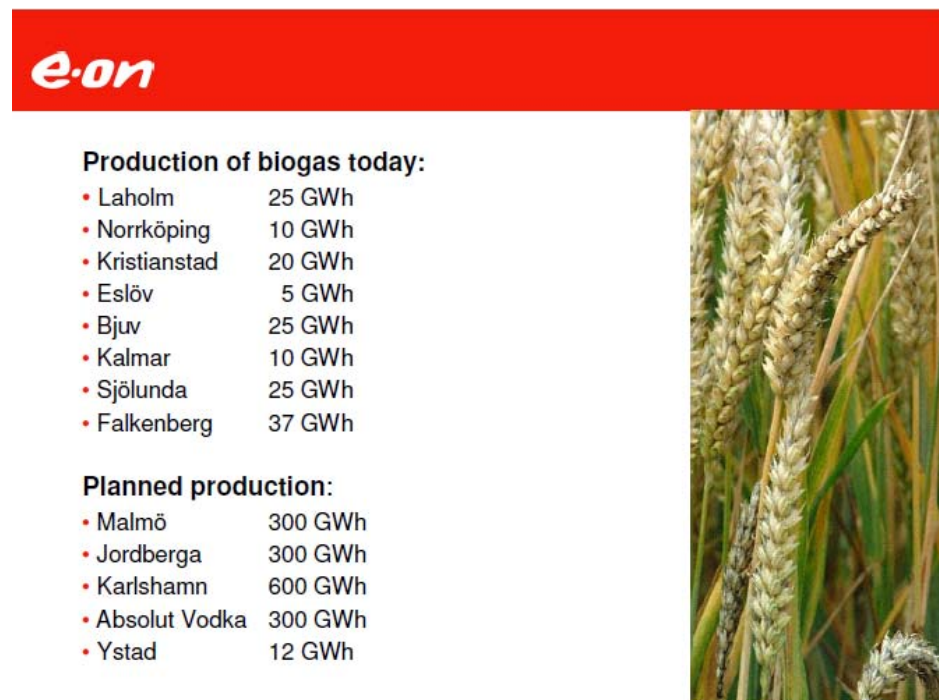
De gebruikelijke schaalgrootte voor een industriële vergistinginstallatie is op dit moment 100-150 kton/jaar aan biomassa en een biogasproductie van 10-18 miljoen Nm³/jaar (Juliper, 2007). Hieruit kan netto (na aftrek van eigen gebruik) 6,5-8,5 miljoen Nm³/jaar aan groen gas worden geproduceerd.

D.1.3 Trends

Op gebied van vergisting zal de trend van schaalvergroting doorzetten. In Zweden zijn bijvoorbeeld enkele zeer grote vergisters met een productiecapaciteit van 55·10⁶ m³ tot 110·10⁶ m³ biogas/jaar of 6.000-12.500 m³ biogas/uur gepland^{33, 34}

Mogelijk vinden daarnaast diverse technieken voor het verhogen van de biogasopbrengst per eenheid substraat (thermische voorbehandeling - hydrolyse, stoomexplosie - en toepassing van ultrasoon-geluid, drukverhoging) meer ingang.

Figuur 30 Overzicht geplande vergistingcapaciteit E'On Zweden



Bron: E'On (2009a).

Gezien de geplande schaalvergroting zijn in deze studie niet alleen de in Nederland gangbare productiecapaciteit van 500 en 1.000 m³ biogas/uur beschouwd, maar ook grotere productiecapaciteiten van 2.000, 5.000 en 10.000 m³ biogas/uur.

³³ <http://www.eon-nordic.mobi/templates/Eon2TextPage.aspx?id=61548&epslanguage=EN> .

³⁴ <http://www.rug.nl/energyconvention/edc/archive/edc2008/presentations2008/Kreisel.pdf> .

D.2 Massabalans, energiebalans

In deze studie wordt biogasproductie op basis van een 50% ÷ 50% gew% mengsel van mest en snijmais cosubstraat beschouwd. In deze studie gehanteerde specificaties van deze stromen is gegeven in Tabel 18.

Tabel 18 Gehanteerde substraat specificaties

| | Maïs | RDM ³⁵ | VDM ³⁶ | Mestmengsel |
|--------------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------|
| m ³ Biogas/ton o.s. | 575 | 300 | 350 | |
| m ³ Biogas/ton vers | 165,6 | 22,5 | 20 | 21,25 |
| Percentage CH ₄ | 55% | 60% | 60% | 0,6 |
| Gehalte o.s. | 28,8% | 7,5% | 5,7% | 6,6% |
| Percentage o.s. in d.s. | 96% | 71% | 73% | 72,2% |
| Percentage d.s. in mengsel | | | | |
| Verhouding mestsoorten | | 50% | 50% | |

Bronnen: Zwart (2006), Wulf (2005), Ghekiere (2004), Ghekiere (2008), etc.

Bij vergisting is warmte nodig om het proces op gang te houden. De hoeveelheid warmte hangt af van:

- het droge stofgehalte in het vergistingsmedium;
- de temperatuur waarop het proces wordt gevoerd en het verschil met de gemiddelde buitentemperatuur;
- de mate waarin de vergister is geïsoleerd;
- de verblijftijd van het substraat in de vergister.

De warmtevraag bestaat grotendeels uit de warmte die moet worden toegevoegd om het ingaande substraat en water op de reactortemperatuur te brengen. Warmteverliezen via de wand zijn beperkt en worden in BCMM (2003) bijvoorbeeld verwaarloosd.

In deze studie is aangenomen dat $0,08 \text{ MJ}_{\text{th}}/\text{MJ}_{\text{ruw biogas}}$ ³⁸ nodig is om de warmtebehoefte van het proces te dekken (gebaseerd op BRCC, 2003). De warmte kan op basis van biogas worden opgewekt in een ketel met een rendement van 95% voor de productie van laagwaardige warmte (zie PMDE³⁷) of kan worden geproduceerd door W/K-koppeling in een gasmotor.

Er is daarnaast circa $0,043 \text{ MJ}_e/\text{MJ}_{\text{biogas}}$ ³⁸ elektriciteit nodig voor pompen, roerders, ventilatoren en ander randapparatuur (JEC, 2007).

Verder is aangenomen dat elektriciteit wordt ingekocht en de warmtebehoefte wordt gedekt door productie van laagwaardige warmte in een biogas gestookte ketel.

Er is in de analyse verder rekening gehouden met een totaal verlies aan biogas uit substraatopslag en uit de vergister zelf van 1,4% van de bruto biogasproductie (zie WUR, 2007).

³⁵ RDM = runder drijfmest.

³⁶ VDM = varkens drijfmest.

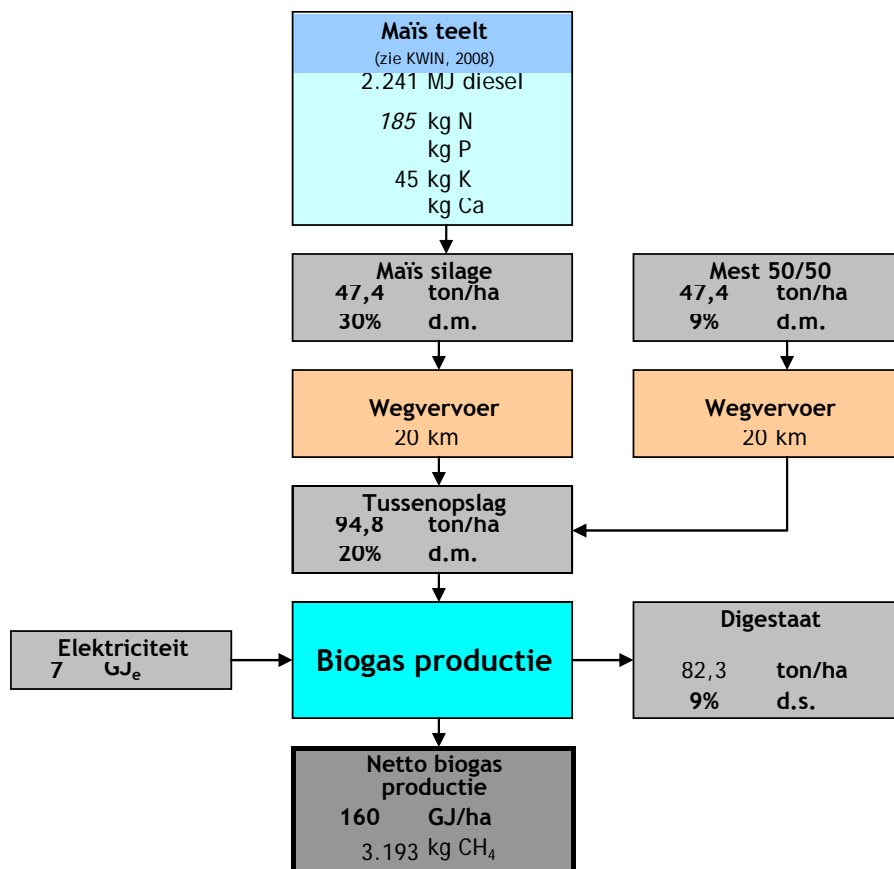
³⁷ PMDE = Protocol Monitoring Duurzame Energie (2006).

³⁸ Bij alle genoemde energiegebruiken betreft het steeds MJ ruw biogas.



De resulterende massabalans is gegeven in Figuur 31.

Figuur 31 Massabalans en energiebalans voor co-vergisting van snijmaïs en mest



D.3 Milieubelasting

Bij het schatten van de aan vergisting gerelateerde milieubelasting zijn de volgende typen emissies beschouwd:

- emissies naar lucht van broeikasgasemissies en verzurende emissies uit de vergister en de substraatopslag;
- emissies door de inzet van biogas voor warmteproductie;
- indirecte emissies gerelateerd aan het gebruik van elektriciteit;
- uitgespaarde emissies door voorkomen van diffuse emissies uit mestopslag bij referentie mestopslag.

De uitgespaarde emissies in de referentiesituatie hebben betrekking op de emissies die optreden wanneer de mest gedurende meerdere maanden zou worden opgeslagen in een mestopslag. Daarbij vergist een deel van de mest spontaan, waarna het biogas naar de lucht ontsnapt en emissies van methaan, ammoniak en lachgas geeft.

De emissies uit vergister en substraatopslag en de uitgespaarde emissies door het voorkomen van emissies uit mestopslag zijn bepaald conform WUR (2006). Voor gebruik van biogas is uitgegaan van een emissiefactor voor NO_x van 15 g/GJ.

Alle cijfers zijn in kg/ha vanwege de consistentie met de gegevens voor de teelt van snijmais

Tabel 19 Overzicht milieubelasting vergisting (kg/ha snijmais)

| | Mobiele werktuigen landbouw | Transport maïs en mest | Toepassing kunstmest | Indirecte N ₂ O emissies | Boiler emissies | Netto uit- gespaarde emissies mestopslag | Totaal kg/ha |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|---|--------------------|---|-----------------|
| Lucht | | | | | | | |
| CO | 1,28 | 0,44 | | | | | 1,72 |
| VOS (verbranding) | 0,26 | 0,09 | | | | | 0,35 |
| NO _x | 1,87 | 0,65 | | | 0,36 | | 2,88 |
| Aërosolen | 0,15 | 0,05 | | | | | 0,20 |
| SO ₂ | 0,16 | 0,06 | | | | | 0,21 |
| Lood | | | | | | | |
| CO ₂ | 166 | 58 | | | | | 224 |
| N ₂ O | 0,00 | 0,00 | 4,83 | 0,30 | | -0,41 | 4,72 |
| CH ₄ | 0,01 | 0,00 | | | | -138 | -137,92 |
| NMVO (verbranding) | 0,25 | 0,09 | | | | | 0,33 |
| NH ₃ | 0,00 | 0,00 | 4,49 | | | -5,28 | -0,78 |
| Bodem | | | | | | | |
| NO ₃ | | | | | | | 27,49 |

D.4 Kosten

Investeringskosten

In Figuur 32 is een overzicht gegeven van de specifieke investeringskosten zoals gevonden in de literatuur. Alle kosten hebben betrekking op mesofiele vergisting, de meest gebruikte vergistingstechniek.

De specifieke investeringen genoemd voor Austermann (2007) hebben betrekking op een case studie waarvoor Juniper offerte heeft aangevraagd bij een aantal gerenommeerde technologieaanbieders voor een organische reststromen uit de V & G-industrie verwerkende installatie met een biogas-productiecapaciteit van ongeveer 500 m³/uur.

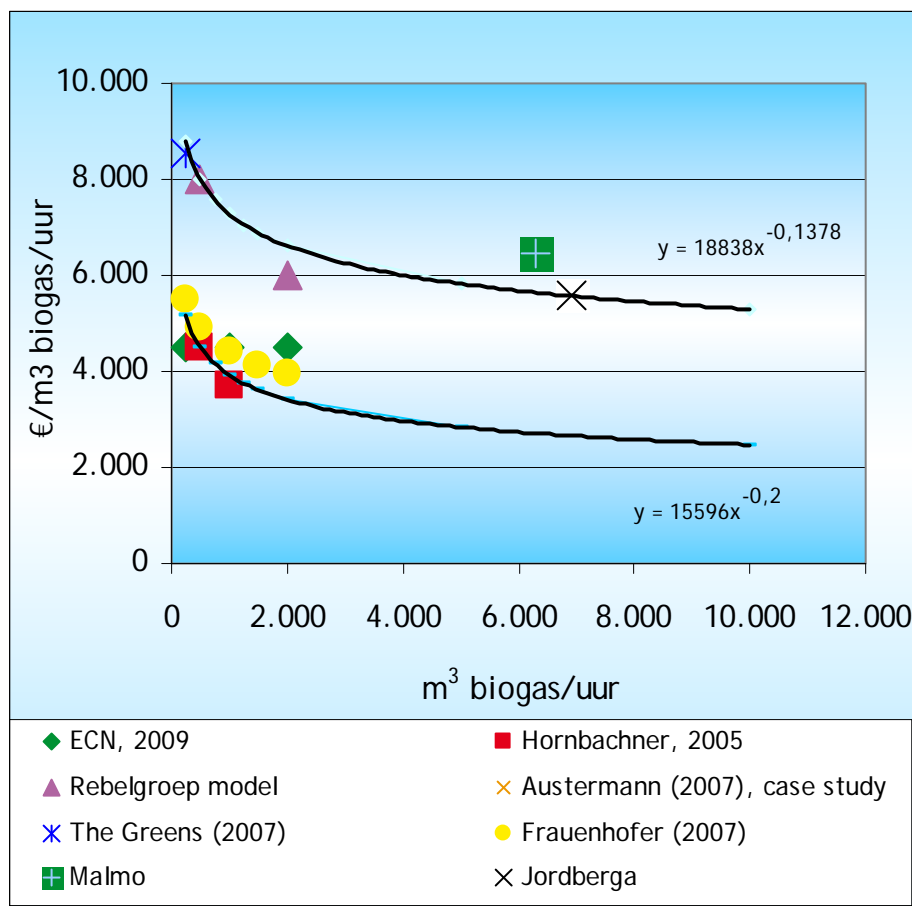
Er is daarnaast gebruik gemaakt van de achtergrondgegevens uit een door REBEL-groep voor SenterNovem ontwikkeld kosten/baten model voor vergisting, bedoeld voor gebruik door V & G-industriebedrijven.

Voor grootschalige vergisters zijn twee investeringsbedragen gevonden voor grootschalige mestvergisters die door E'On zullen worden gerealiseerd in Malmö en Jordberga in Zweden.

De overige bronnen betreffen cijfers uit bureaustudies. De getallen uit ECN (2009) zijn gebruikt voor het bepalen van de SDE-subsidie voor groen gas en elektriciteit uit biogas.



Figuur 32 Overzicht in de geraadpleegde bronnen gegeven investeringskosten en de in deze studie aangehouden ondergrens en bovengrens



Zoals geïllustreerd zijn er grote verschillen in specifieke investeringen, zowel voor de kleinere schaalgroottes (500 m³/uur) als voor installaties van 2.000 en > 5.000 m³/uur. Uit de geraadpleegde bronnen is niet altijd op te maken wat onder de investeringskosten valt en wat niet.

Tabel 20 geeft een overzicht van verschillen in wat wel en niet is meegenomen in de voor Juniper gedefinieerde case-studie aangeboden offertes. De tabel geeft daarmee wel een indicatie van de oorzaak in verschillen in investeringen, maar de beschikbare informatie is - vanwege het ontbreken van investeringsbedragen per onderdeel van de installatie - niet specifiek genoeg om het verschil in kosten voldoende in de berekeningen in deze studie te kunnen verdisconteren.

Tabel 20 Verschillende offertes en hun dekking voor een 500 m³ biogas/uur vergister

| | Bioscan | Green-finch | MT-Energie | Ros Roca | Schmack | WEDA |
|---|---------|-------------|------------|----------|---------|-------|
| Investeringsen (€/m³ biogas/uur), inclusief | 6.514 | 13.350 | 5.456 | 9.573 | 7.795 | 9.373 |
| - Gas opslag | X | X | | | | |
| - Digestaat opslag | | X | X | | X | |
| - Vergister volume | | 4.100 | 8.000 | 7.000 | 4.800 | 4.450 |
| - Retentietijd | | 24 | 35 | 27 | > 40 | 40 |
| - Type proces | | meso | meso | meso | meso | meso |
| - Civils + construction | | | X | | X | |

Bron: Austermann (2007).

Vanwege de grote verschillen in specifieke investeringskosten en het niet nader kunnen verklaren van die verschillen is in deze studie voor het schatten van de productiekosten voor biogas een bandbreedte in investeringskosten gehanteerd, aangegeven met beide stippellijnen.

Operationele kosten, exclusief substraat, digestaatafvoer en eigen energiegebruik

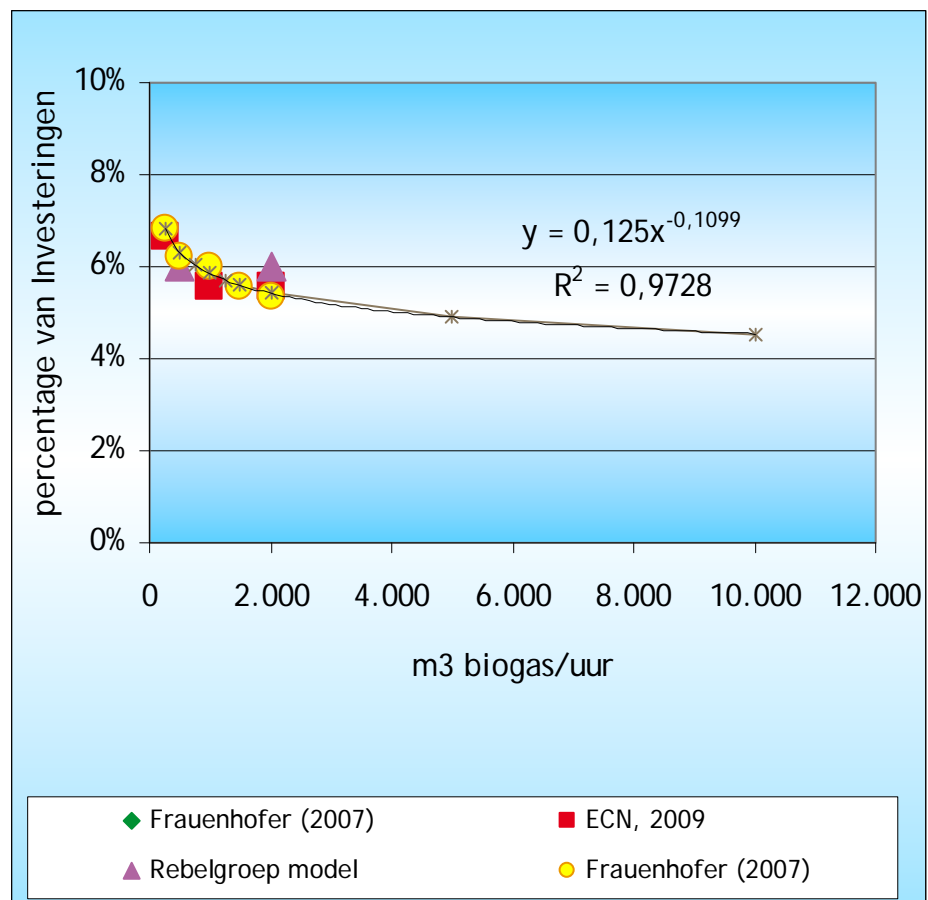
De operationele kosten exclusief kosten voor substraataankoop, digestaatafvoer en eigen energiegebruik omvatten:

- kosten voor personeel;
- onderhoudskosten;
- kosten voor waterzuiveringsheffing;
- kosten voor chemicaliën.

Voor de operationele kosten worden alleen in Fraunhofer Institut (2009) specifieke kosten per afzonderlijke - hierboven genoemde - kostenpost gegeven. De jaarlijkse operationele kosten variëren van bijna 7% van de investeringen voor kleine installaties tot bijna 5% voor grootschalige installaties.

In het door REBEL-groep ontwikkelde model is aangenomen dat de operationele kosten steeds 6% van de investeringen bedragen. De operationele kosten gehanteerd voor de SDE-subsidie zijn verder niet gespecificeerd in ECN (2009).

Figuur 33 In geraadpleegde literatuur en in deze studie aangehouden jaarlijkse operationele kosten, als percentage van de investeringen



Om recht te doen aan het feit dat met toenemende schaalgrootte relatief minder personeel nodig is, is er voor gekozen om de Fraunhofer (2007) percentages aan te houden. De bij deze cijfers horende trendlijn is ook in de grafiek weergegeven.

Substraatkosten, digestaat afvoer en elektriciteitinkoop

Om productiekosten per m³ biogas te kunnen schatten is het nodig kosten voor substraatinkoop, digestaatafvoer en elektriciteitinkoop te bepalen.

Voor de kosten voor substraat is uitgegaan van de marktwaarde genoemd in PPO (2008) - 17 €/ton n.s. Transportkosten voor substraat zijn op 1€/ton n.s. gezet.

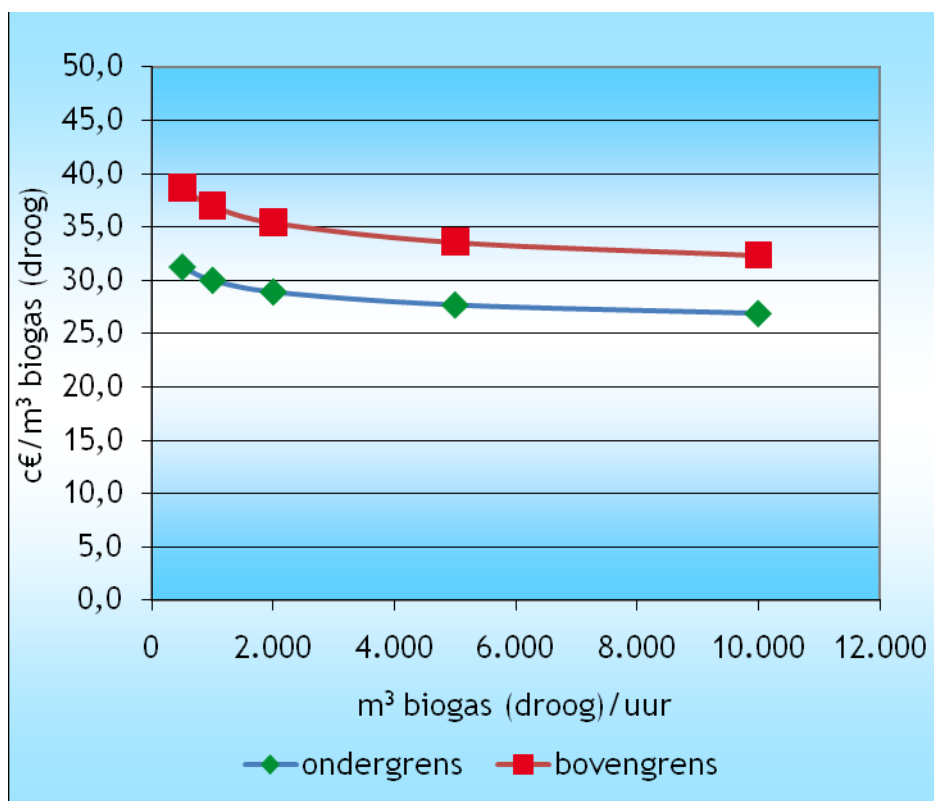
De digestaat is verondersteld volledig te moeten worden afgevoerd. Voor de afzet is een gemiddelde kostprijs van 20 €/ton n.s. aangehouden, ruwweg het gemiddelde voor de afzetkosten in Zuid-Nederland (30 €/ton) en Noord- en Oost-Nederland (5 €/ton).

Voor het inkooptarief voor elektriciteit is een prijs van 14 €/kWh_e aangehouden (ECN, 2009).

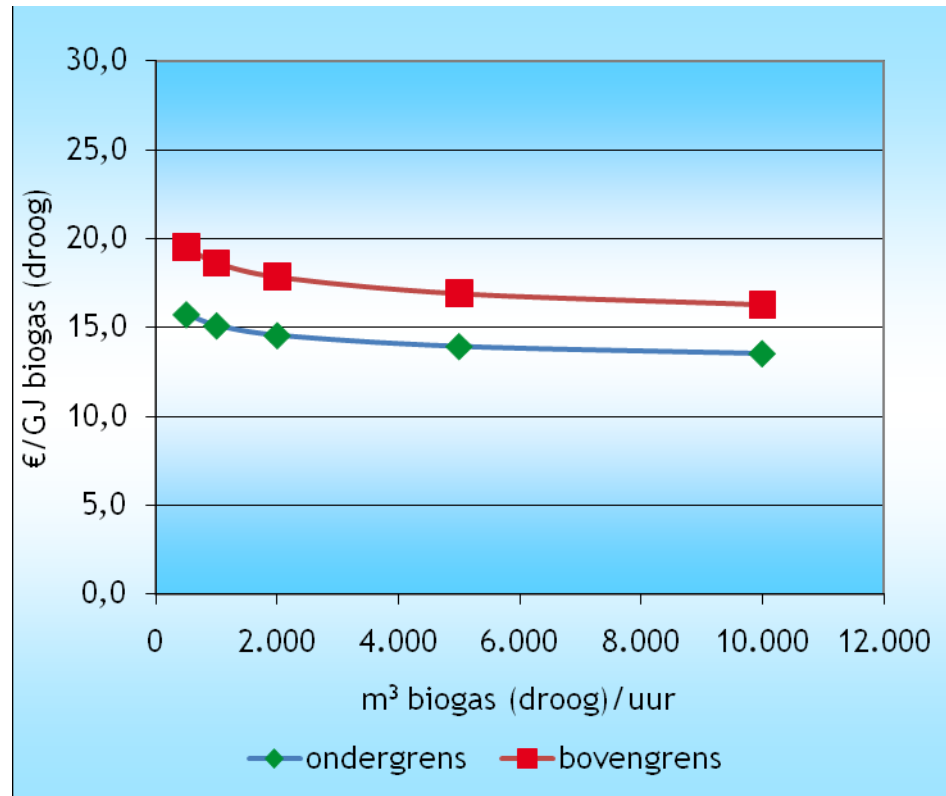
Resulterende kosten per m³ biogas

De resulterende kosten per m³ en GJ geproduceerd droog biogas (netto productie - na aftrek eigen gebruik) zijn gegeven in Figuur 34 en Figuur 35. De twee lijnen geven de bandbreedte waarbinnen de productiekosten naar onze inschatting vallen, als functie van schaalgrootte, substraatprijzen en digestaatkosten.

Figuur 34 Biogaskosten per m³, afhankelijk van de schaalgrootte van de vergister



Figuur 35 Biogaskosten per GJ, afhankelijk van de schaalgrootte van de vergister





Bijlage E Biogas en stortgas opwerken

Opwerking van biogas en stortgas betreft het verwijderen van alle niet voor de toepassing gewenste componenten en verontreinigingen. Voor opwerking tot biomethaan betreft dit:

- H₂S, mercaptanen, siloxanen;
- NH₃ en hogere koolwaterstoffen (bijvoorbeeld (H)CFK's);
- waterdamp;
- CO₂ (en N₂ en O₂ bij stortgas).

Over het algemeen worden meerdere technieken gecombineerd om het gas te kunnen opwerken tot pijpleidingaardgas of LNG omdat er - afgezien van diepe koeling zoals in het GPP-proces - niet één techniek is die alle verschillende categorieën verontreinigingen kan elimineren. Veel gebruikte technieken zijn gaswassers met water, amine of selexol als wasvloeistof, membranen, PSA en actieve koolabsorptie.

De schaalgrootte van de opwerkingsinstallaties varieert van enkele honderden m³ gas per uur tot meerdere duizenden m³ gas per uur. De grootste installaties voor opwerking zijn gerealiseerd in de VS en variëren van 4.000 m³/uur tot 13.000 m³/uur aan behandeld biogas. In de EU gerealiseerde installaties waren kleinschaliger in capaciteit, vaak liggend in een bereik van 500-1.500 m³/uur aan biogas. De in 2007 gerealiseerde opwerkingsinstallatie in Madrid (4.000 m³/uur) en de geplande installaties in Zweden zijn van een vergelijkbare schaalgrootte als de installaties gerealiseerd in de VS.

In Europa is er een duidelijke voorkeur voor de toepassing van waterscrubbers en in mindere mate PSA's als techniek voor de verwijdering van CO₂. In de VS worden bij de grotere installaties ook selexol wassers gebruikt.

In deze studie zijn voor CNG-productie en LNG-productie twee verschillende opwerkingsinstallaties beschouwd:

- Voor opwerking tot pijpleidingkwaliteit is uitgegaan van een gaswasser met water als wasvloeistof voor CO₂-verwijdering, gecombineerd met aanvullende gasreinigingsprocessen voor het drogen van het gas en voor het verwijderen van hogere koolwaterstoffen, mercaptanen en siloxanen. Complete installaties worden aangeboden door bijvoorbeeld DMT (NL), Malmberg (SE), Flotech (SE) en Ros Roca (ESP).
- Voor de opwerking van biogas voor bio-LNG-productie is uitgegaan van toepassing van amine wassing gecombineerd met een PSA voor het drogen van het biogas. Voor de amine wassing is uitgegaan van de door Cirmac (NL) aangeboden Coaab-technologie, toegepast in onder andere de opwerkingsinstallaties in Borås en Gothenburg (1.600 m³ biogas/uur) in Zweden. De door Cirmac aangeboden en geïnstalleerde procesinstallaties zijn inclusief ontwaveling met actieve kool en drogen van geproduceerde biomethaan met VPSA.

De door Gas Technology Services aangeboden GPP Plus-technologie lijkt vanwege het gebruik van koude een logisch alternatief voor LNG-productie. Er is echter nog te weinig praktijkinformatie over deze technologie om deze in de studie te kunnen meenemen. Er zijn bijvoorbeeld nog geen praktijkwaarden voor investeringskosten bekend voor cryogene gasscheiding, waardoor het niet goed mogelijk is om voor deze techniek een kostenschatting te maken. Daarnaast is de combinatie van aminewassing en PSA standaard technologie bij



grootschalige LNG-productieinstallaties, terwijl de cryogene opwerking nog moet worden bewezen in combinatie met LNG-productie.

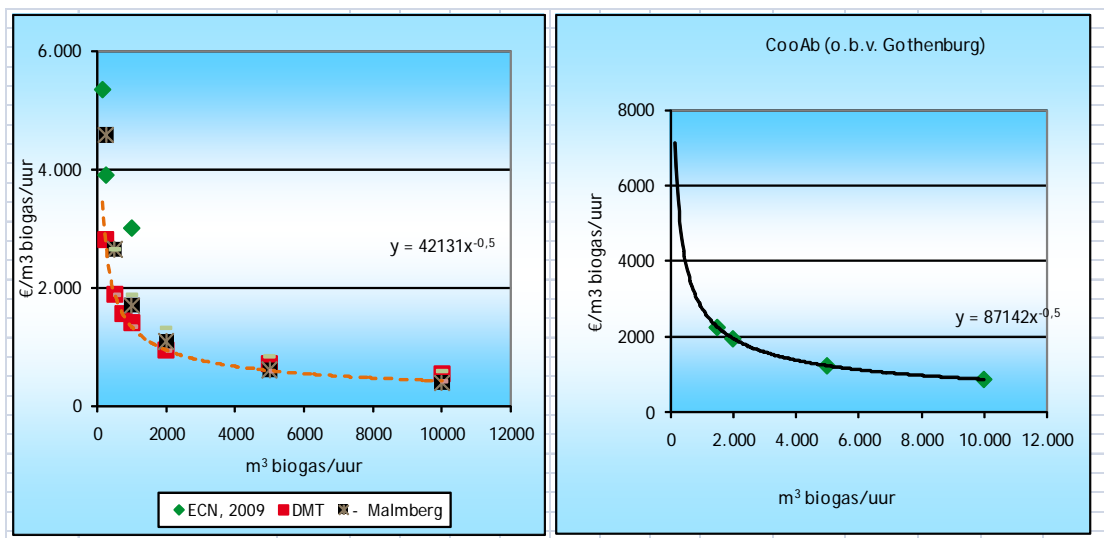
Voor de beide opwerkingsinstallaties zijn de volgende parameters aangehouden.

Tabel 21 Gebruikte gegevens voor opwerking

| | LNG-productie | CNG-productie |
|--|---------------|--------------------------------|
| Technische specificaties | | |
| Methaanverlies | 0,1% | 1% |
| Reductie methaanemissies | Naverbrander | Naverbrander |
| CO ₂ -afscheiding | 99,99% | 98% |
| Eigen gebruik (kWh/m ³ biogas) | | |
| – Elektriciteit | 0,25 | 0,15 |
| – Warmte | | 0,4-w.v. 75% recupereerbaar |
| Druk productgas (bar) | 4 | 4 |
| Economische kentallen | | |
| Economische levensduur (jaar) | 15 | 15 |
| O & M kosten (als percentage van investering) | 5% | 5% |

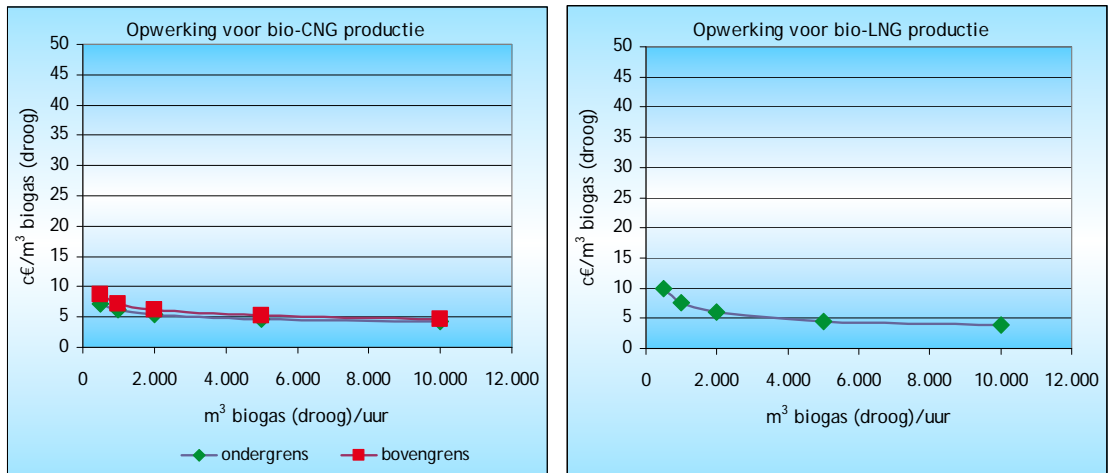
Voor de investeringskosten is op basis van literatuur de volgende relaties geschat.

Figuur 36 Investeringskosten opwerking



Uitgaande van de aangehouden investeringskosten en operationele kosten en de in de SDE-regeling aangehouden parameters voor cash flow berekeningen voor biogasproductie (zie ECN, 2009)³⁹ zijn de in getoonde specifieke opwerkingskosten als functie van de schaalgrootte van de opwerkingsinstallatie geschat.

Figuur 37 Totale opwerkingskosten voor bio-CNG en bio-LNG



³⁹ Rente lening = 6%, vereiste return on equity = 15%, Equity share in investering incl. EIA effect = 50%, Debt share in investering incl. EIA effect = 50%, Vennootschapsbelasting = 26%.





Bijlage F Bio-LNG- en bio-CNG-productie

F.1 Bio-LNG-productie

Voor productie van vloeibare methaan op kleine schaal - zogenaamde mini LNG-installaties - is relatief weinig informatie te vinden, zowel wat betreft elektriciteitgebruik als kosten.

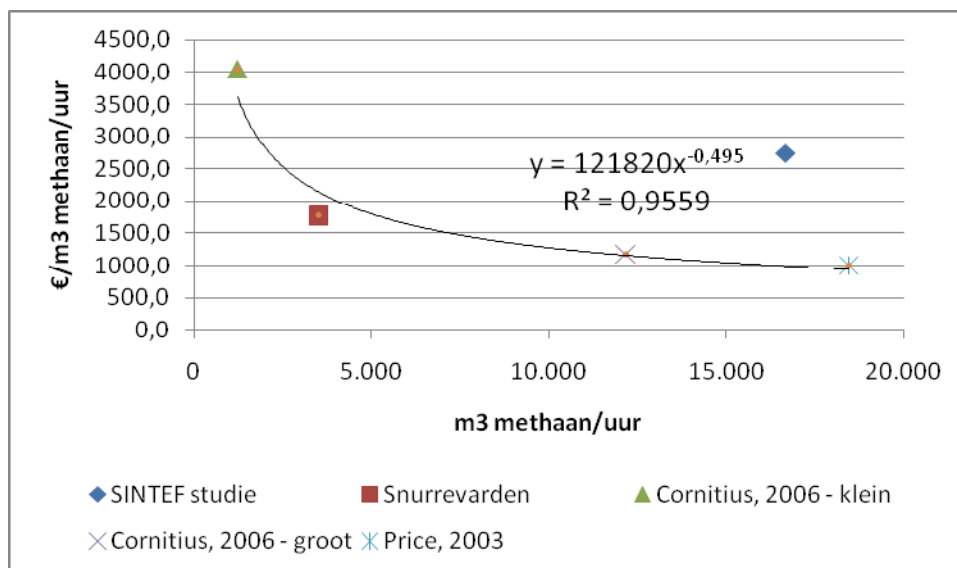
Voor elektriciteitgebruik hebben we de volgende informatie kunnen vinden:

- SINTEF-paper (SINTEF, 2008), 0,6-0,9 kWhe/kg LNG; voor aardgas van 30°C;
- SINTEF-presentatie (SINTEF, 2009), 0,45 kWhe/kg LNG voor BOG reliquifactie installatie (gas op -40°C);
- Snurrevarden mini LNG-installatie in Noorwegen (Hamworthy 2007), 0,80 kWhe/kg LNG; proces inclusief drogen, CO₂-verwijdering, ontzwaveling;
- Johansson (2008), 0,45-0,65 kWhe/Nm³ CH₄ (0,65-0,95 kWhe/kg LNG).

In deze studie is uitgegaan van een verbruik van 0,7 kWhe/kg LNG. Waarden van 0,8-0,95 lijken - gezien het verbruik van de Snurrevarden installatie - representatiever voor LNG-installaties inclusief gasreiniging. De aan dit elektriciteitgebruik gerelateerde broeikasgasemissie bedraagt 8,3 kg CO₂-eq./GJ

Voor de investeringskosten hebben we de volgende indicaties gevonden:

Figuur 38 Investeringskosten bio-LNG-productie

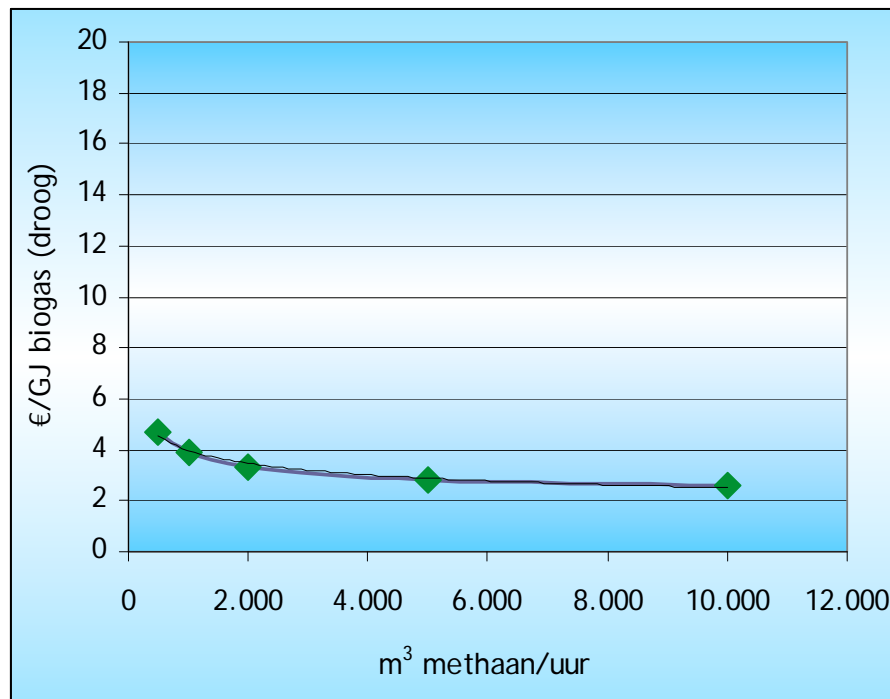


De gevonden waarden hebben betrekking op uiteenlopende configuraties, waarbij ook impliciet investeringen voor gasopwerking of infrastructurele werken als een kade voor zeeschepen is meegenomen. Dat maakt het soms lastig een goede inschatting van de opbouw van de genoemde investeringen te kunnen maken. De meest transparante opbouw wordt gegeven in Amerikaanse vakliteratuur waarin investeringen in opslag en liquifactie eenheid apart worden gegeven als functie van de schaalgrootte van beide.

Operationele kosten worden in Marintek (2008) gegeven als 3% van de investeringen.

De specifieke bio-LNG-productiekosten als functie van schaalgrootte zijn gegeven in Figuur 39.

Figuur 39 Bio-LNG-productiekosten, als functie van de schaalgrootte



F.2 Bio-CNG-productie

Volgens JEC (2007) vergt compressie van methaan van 4 naar 250 bar 22 MJ_e/GJ methaan. De overeenkomstige broeikasgassenemissie bedraagt 3,6 kg CO₂-eq./GJ.

Specifieke kosten kentallen voor compressie tot bio-CNG-druk zijn in de geraadpleegde literatuur niet gevonden. In plaats daarvan zijn investeringskosten kentallen voor gascompressoren uit DACE (2002) overgenomen. Kosten voor onderhoud zijn geschat op 4% van de investeringskosten.

Tabel 22 Investeringskosten compressie

| Biogas debiet (m ³ /uur) | Investering € (compressieverhouding = 3,5) |
|-------------------------------------|--|
| 500 | 30.000 |
| 1.000 | 50.000 |
| 2.000 | 75.000 |
| 5.000 | 175.000 |