

Duurzaam synthesegas

Een brug naar een duurzame energie- en grondstoffenvoorziening

H. den Uil
 R. van Ree
 A. van der Drift
 H. Boerrigter

| Revisies | | |
|--------------------------------------|---|--------------|
| A | | |
| B | | |
| Opgesteld door: H. den Uil | Goedgekeurd/vrijgegeven door: H.J. Veringa | ECN Biomassa |
| Geverifieerd door: R. van Ree | | |

Verantwoording

Dit rapport is geschreven in opdracht van de Nederlandse Organisatie Voor Energie en Milieu (Novem) in het kader van het deelproject Modernisering Energieketens van het PIT-2 programma. Het Novem projectnummer voor dit rapport is 5005-03-03-08-001 en het ECN projectnummer 8.20292.

Abstract

Synthesis gas is currently primarily used in the (petro)chemical industry and for the production of liquid fuels. Smaller amounts are being used for electricity and synthetic natural gas (=SNG) production. Finite fossil resources, the dependence on political instable regimes and the Kyoto-protocol are drivers for the attention for renewable synthesis gas. In this report the market for, production of, use of and economy of renewable synthesis gas are analysed.

Current synthesis gas use is limited to about 3% of the Dutch primary energy consumption; worldwide this is about 2%. Driven by the targets for renewable energy and the wide range of possible uses, the market for renewable synthesis gas has a large potential. When using synthesis gas for the production of SNG, electricity, liquid fuels and chemicals, the Dutch market for renewable synthesis gas can be 150 PJ in 2010, doubling about every decade to 1500 PJ in 2040. SNG and electricity, together about 80%. To reach these market volumes, import of biomass will be required due to the limited availability of local biomass resources in the Netherlands.

The specifications for synthesis gas are dependent on the application. For (petro)chemical use and the production of liquid fuels high H₂ and CO concentrations are required, for SNG and electricity production high CH₄ concentrations are preferred. Due to the different specifications the names synthesis gas and product gas are used in this study. The name synthesis gas is claimed for a large number of gasification processes under development. But only for a number of processes this claim is justified. The gasification temperature determines the type of gas produced. At high temperatures, above 1300 °C, synthesis gas is produced, at low temperatures, 700-1000 °C, so-called product gas is being produced.

Entrained-flow gasification is the only possibility for large-scale synthesis gas production in one step. For this process the particle size of the feed has to be small. However, the electricity consumption of size reduction of the feedstock prior to gasification is a bottleneck. When the electricity consumption is too high, conversion of biomass into an intermediate product will be required, using techniques as torrefaction, flash pyrolysis or low temperature gasification.. Apart from the large-scale processes, a number of processes have been/developed and are still under development for small scale.

Contaminants present in the gas produced by gasification must be removed to very low levels to protect downstream equipment. By a combination of scrubbers and guard beds the required levels can be obtained. Once cleaned, the gas composition must be modified in order to meet the specifications of downstream processes using existing commercial processes.

The cost of synthesis gas production from imported biomass has been analysed. For biomass imported from the Baltic states the cost of synthesis gas will be about 10 €/GJ. About 55% of the costs originate from biomass, about 25% from transportation, storage and transshipment and only 20% from synthesis gas production. Use of the synthesis gas for the production of Fischer-Tropsch diesel will give a product price of 0.44 €/litre, about twice the cost of fossil diesel. A significant increase in crude oil prices or tax exemptions are required to make products out of renewable synthesis gas competitive with fossil fuel derived products.

INHOUD

| | |
|--|----|
| INHOUD | 3 |
| LIJST VAN TABELLEN | 5 |
| LIJST VAN FIGUREN | 5 |
| LIJST VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN | 6 |
| SAMENVATTING | 7 |
| 1. INLEIDING | 9 |
| 1.1 Achtergrond | 9 |
| 1.2 Doelstelling | 10 |
| 1.3 Opbouw rapport | 10 |
| 2. HET GEBRUIK VAN SYNTHESSEGAS | 11 |
| 2.1 Toepassingen syntheseegas | 12 |
| 2.1.1 Waterstof voor raffinaderijen | 12 |
| 2.1.2 Ammoniak | 12 |
| 2.1.3 Methanol | 12 |
| 2.1.4 Fischer-Tropsch synthese | 13 |
| 2.1.5 Synthetisch aardgas | 14 |
| 2.1.6 Elektriciteit | 14 |
| 2.1.7 Overige toepassingen | 15 |
| 2.2 Eisen gebruikers syntheseegas | 16 |
| 2.2.1 Bulksamenstelling | 16 |
| 2.2.2 Verontreinigingen | 17 |
| 2.2.3 Schaalgrootte | 18 |
| 2.3 Conditioneren van syntheseegas | 18 |
| 2.3.1 Water-gas-shift | 19 |
| 2.3.2 H ₂ -productie | 19 |
| 2.3.3 Overige toepassingen | 20 |
| 3. POTENTIEEL DUURZAAM SYNTHESSEGAS | 21 |
| 3.1 Marktomvang syntheseegas | 21 |
| 3.1.1 Huidige markt | 21 |
| 3.1.2 Toekomstige markt | 21 |
| 3.2 Classificatie, beschikbaarheid en contracteerbaarheid biomassa | 22 |
| 3.2.1 Classificatie biomassa | 22 |
| 3.2.2 Binnenlandse beschikbaarheid/contracteerbaarheid organische reststromen | 23 |
| 3.2.3 Binnenlandse beschikbaarheid /contracteerbaarheid energie(teelt)gewassen | 23 |
| 3.2.4 Importmogelijkheden van binnen/buiten de EU | 24 |
| 3.2.5 Totaal potentieel en prijsstelling | 25 |
| 3.3 Potentieel duurzaam syntheseegas | 25 |
| 3.3.1 Kader | 25 |
| 3.3.2 BioSyngas markt | 26 |
| 3.3.3 BioSyngas markt versus biomassa contracteerbaarheid | 28 |
| 3.3.4 Inkadering BioSyngas in Transitiepaden | 29 |
| 4. PRODUCTIE VAN DUURZAAM SYNTHESSEGAS | 30 |
| 4.1 Logistiek, opslag en voorbewerking van biomassa | 30 |
| 4.1.1 Logistiek en opslag | 30 |
| 4.1.2 Drogen | 30 |
| 4.1.3 Verkleinen | 31 |
| 4.2 Vergassing van biomassa | 31 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2.1 | Technieken | 31 |
| 4.2.2 | Systemen | 32 |
| 4.2.3 | Vergelijking en evaluatie | 35 |
| 4.3 | Reinigen van synthese gas | 36 |
| 4.3.1 | Natte reiniging | 36 |
| 4.3.2. | Teerverwijdering | 37 |
| 5. | ECONOMIE VAN DUURZAAM SYNTHESE GAS | 39 |
| 5.1. | Synthesegas uit geïmporteerde biomassa | 39 |
| 5.1.1. | Systeembeschrijving | 39 |
| 5.1.2. | Cumulatieve synthese gaskosten | 40 |
| 5.1.3. | Opmerkingen | 42 |
| 5.2. | Alternatieve routes | 43 |
| 5.3. | Concurrentiepositie duurzame synthese gas | 43 |
| 5.3.1. | Fischer-Tropsch diesel versus fossiele diesel | 43 |
| 5.3.2. | Opmerkingen | 44 |
| 6. | CONCLUSIES EN DISCUSSIE | 45 |
| 6.1 | Conclusies | 45 |
| 6.2 | Discussie | 47 |
| 6.3 | Aanbevelingen | 48 |
| 7. | LITERATUURLIJST | 49 |
| | APPENDIX 1: BESCHIKBAARHEID EN CONTRACTEERBAARHEID BIOMASSASTROMEN | 52 |
| | APPENDIX 2: VERGASSING | 59 |
| | APPENDIX 3: ENTRAINED FLOW VERGASSING | 63 |
| | APPENDIX 4: WERVELBEDVERGASSING | 65 |
| | APPENDIX 5: HET OMEGA-PROCES VAN OXYTEC | 66 |
| | APPENDIX 6: HET CARBO-V PROCES VAN CHOREN | 68 |

LIJST VAN TABELLEN

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabel 1: | Overzicht van eisen van synthesesegas gebruikers aan de bulkgassamenstelling | 16 |
| Tabel 2: | Verwijderingniveaus voor verontreinigingen in het synthesesegas | 17 |
| Tabel 3: | Typische schaalgrootte van gebruikers van synthesesegas | 18 |
| Tabel 4: | Typische gassamenstellingen (in vol.%) voor synthesesegas productie processen | 19 |
| Tabel 5: | Huidig verbruik van synthesesegas (in PJ/jaar) in de wereld | 21 |
| Tabel 6: | Huidig verbruik van synthesesegas (in PJ/jaar) in Nederland | 21 |
| Tabel 7: | Mogelijk alternatieve toepassingen van synthesesegas in de toekomst | 22 |
| Tabel 8: | Biosyngaspotentieel op grond van duurzame energiedoelstellingen (in PJ _{th} vermeden primaire energie) | 28 |
| Tabel 9: | Typische samenstelling van het gas bij de vergassing van hout op 850°C in een op zuurstof bedreven circulerend wervelbed (CFB) vergasser | 37 |
| Tabel 10: | Productie/beschikbaarheid biomassa-/afvalstromen voor de Nederlandse energievoorziening. | 53 |
| Tabel 11: | Verschijningsvorm reststromen VGI | 54 |
| Tabel 12: | Totale biomassa"productie" in Nederland, gerealiseerde inzet voor energieproductie in 1999 en beschikbare hoeveelheden binnenlandse biomassastromen voor energieproductie in NL | 54 |
| Tabel 13: | Geraamd importpotentieel biomassastromen voor de Nederlandse energievoorziening vanuit EU en de rest van de wereld | 55 |
| Tabel 14: | Beschikbaarheid van biomassa voor de Nederlandse energievoorziening vergeleken met de voorspelde potentiële beschikbaarheid voor 2020 (scenario-studie) | 55 |
| Tabel 15: | Energieteelt projecten in Nederland. | 57 |
| Tabel 16: | Energiebalans, typische waarden voor vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow | 60 |
| Tabel 17: | Massabalans, typische waarden voor vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow | 60 |
| Tabel 18: | Gassamenstelling en verbrandingswaarde, typische waarden voor gas afkomstig uit enkele vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow | 61 |
| Tabel 19: | Bijdrage van componenten in het gas aan de verbrandingswaarde van het gas, typische waarden voor gas afkomstig uit enkele vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow | 61 |

LIJST VAN FIGUREN

| | | |
|-----------|---|----|
| Figuur 1: | De belangrijkste huidige en toekomstige toepassingen van synthesesegas | 11 |
| Figuur 2: | Potentieel van duurzaam synthesesegas | 28 |
| Figuur 3: | Diverse opties voor het maken van synthesesegas uit biomassa met globale rendementen, zie tekst voor beschrijving van de opties | 35 |
| Figuur 4: | Schematische beschrijving van een "natte" gasreiniging voor de verwijdering van anorganische verontreinigingen uit synthesesegas. De verwijderde verbindingen staan aangegeven. | 36 |
| Figuur 5: | Integraal systeem voor de productie van synthesesegas uit geïmporteerde biomassa. | 39 |
| Figuur 6: | Cumulatieve productiekosten van synthesesegas uit biomassa van de Baltische landen voor drie productieopties (zie tekst voor toelichting) | 40 |
| Figuur 7: | Effect op de cumulatieve synthesesegas productiekosten van het overallrendement van biomassa-naar-synthesesegas voor de CFB+EF optie | 42 |

| | |
|---|----|
| Figuur 8: Opbouw diesel verkoopprijs, voor (van links naar rechts) fossiele diesel uit aardolieraffinage; FT diesel uit biomassa; idem, bij accijnsvrijstellingen van respectievelijk 40, 70 en 100%. | 44 |
| Figuur 9: Schematische voorstelling van een E-gas (voorheen DESTEC) entrained flow reactor (links) en een vergasser van Future Energy (rechts) | 64 |
| Figuur 10: Schematisch weergave van de OMEGA-vergasser van Oxytec | 66 |
| Figuur 11: Uitvoeringsvorm van het Carbo-V-concept | 68 |

LIJST VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

| | |
|--------------|--|
| Biosyngas | Synthesegas geproduceerd uit biomassa |
| BTX | De groep verbindingen benzeen, toluen en xylenen. |
| CFB | Circulerend wervelbed; een type vergasser. |
| d.s. | Droge stof |
| DEA | DiEthanolAmine |
| DIPA | DiIsoPropanolAmine |
| DME | DiMethylEther |
| EF | Entrained-flow; een type vergasser |
| EOS | Energie Onderzoek Strategie |
| EU25 | De huidige Europese Unie inclusief de 10 nieuwe lidstaten |
| FT | Fischer-Tropsch; syntheseproces waarin uit synthesegas lineaire koolwaterstoffen worden geproduceerd die kunnen worden opgewerkt tot bijvoorbeeld diesel. |
| HGP | Hydrocarbon Gasification Processing |
| LHV | Lower heating value; (lagere) stookwaarde, verbrandingswaarde; energie-inhoud. |
| MEA | MonoEthanolAmine |
| m_n^3 | Kubieke meter gas bij normale condities; normaal condities worden gebruikt als een referentieconditie en gelden bij een druk van 1 atmosfeer en een temperatuur van 298 K (~25°C). |
| MTBE | Methyl Tertair Butyl Ether |
| MW_{th} | MegaWatt thermisch; het vermogen van de plant berekend op thermische input (de LHV) van de brandstof. |
| n.b. | Natte basis |
| NTA | Nederlandse Technische Afspraak |
| Oxygenate | Zuurstofhoudende verbinding die wordt toegevoegd aan benzine om een schonere verbranding te krijgen |
| ppbv | Parts per billion by volume; één op een miljard deeltjes |
| ppmv | Parts per million by volume; één op een miljoen deeltjes |
| SDE | Samenwerkingsverband Duurzame Energie |
| SNG | Substitute Natural Gas; synthetisch aardgas. |
| STEG-eenheid | SToom En Gasturbine eenheid |
| UKR | Unieke Kansen Regeling |
| VGI | Voedings- en Genotsmiddelen Industrie |

SAMENVATTING

Synthesegas wordt op dit moment voornamelijk gebruikt voor de productie van een grote verscheidenheid aan chemicaliën en voor de productie van vloeibare transportbrandstoffen. In kleinere hoeveelheden wordt synthesegas tevens gebruikt voor de productie van elektriciteit en synthetisch aardgas (=SNG). De belangrijkste grondstof voor synthesegas is op dit moment aardgas. Daarnaast worden kolen, aardolieresiduen en afval als grondstof gebruikt.

De eindigheid van de voorraden fossiele brandstoffen, de economische afhankelijkheid van politiek instabiele regio's en daarnaast het Kyoto verdrag zijn drijfveren voor de interesse voor duurzaam synthesegas. De belangstelling voor duurzaam synthesegas vindt zijn weerslag in zowel nationale als internationale onderzoeksprogramma's. Gedreven door de belangstelling voor duurzaam synthesegas ontstaan verschillende verhalen en daardoor verwarring over het potentieel, de productie, het gebruik en de economie van duurzaam synthesegas. Doel van dit rapport is het presenteren van een overzicht van deze aspecten van duurzaam synthesegas.

In Nederland zijn de belangrijkste gebruikers van synthesegas de ammoniak- en methanol-synthese en de productie van waterstof voor raffinaderijen. Synthesegas wordt in Nederland tevens gebruikt voor elektriciteitsproductie. In het buitenland wordt synthesegas tevens gebruikt voor de productie van vloeibare transportbrandstoffen (via Fischer-Tropsch synthese) en synthetisch aardgas. Het aantal directe toepassingen van synthesegas is weliswaar gering, maar via ammoniak en methanol, speelt synthesegas een belangrijke rol in productieketens van vele producten waar we in het dagelijks leven mee wordt geconfronteerd. Methanol kan door (relatief) nieuwe processen bovendien worden omgezet in de belangrijkste organische basischemicaliën. Synthesegas wordt gebruikt op een schaalgrootte van enkele honderden MW_{th} voor (petro)chemische toepassingen en elektriciteitsproductie en op een schaal van enkele duizenden MW_{th} voor de productie van transportbrandstoffen en SNG.

De markt voor synthesegas is op dit moment beperkt en bedraagt circa 3% van het Nederlandse primaire energieverbruik. Voor de hele wereld ligt dit percentage op circa 2%. Gedreven door de doelstellingen op het gebied van duurzame energie en de vele mogelijke toepassingen van synthesegas kan de markt voor duurzaam synthesegas op termijn zeer groot worden. Door inzet van synthesegas voor de productie van SNG, elektriciteit, vloeibare transportbrandstoffen en chemicaliën kan de markt voor duurzaam synthesegas in 2010 150 PJ bedragen en zich ongeveer elk decennium verdubbelen tot 1500 PJ in 2040. Het grootste aandeel (~80%) in deze markt hebben de sectoren SNG en elektriciteitsproductie. De contracteerbaarheid van binnenlandse biomassa (reststromen of teelt) zal al snel onvoldoende worden. Verwacht wordt dat het aanbod van biomassa uit Nederland beperkt blijft tot maximaal 180 PJ in 2020. Op de lange termijn is import van biomassa dus onontkoombaar.

De eisen die aan bulksamenstelling van het synthesegas worden gesteld verschillen sterk. Voor de productie van chemicaliën en transportbrandstoffen is een gas met hoge H₂ en CO concentraties vereist, in dit rapport *synthesegas* genoemd. *Synthesegas* kan ook worden gebruikt voor de productie van elektriciteit en SNG, maar voor deze toepassingen voldoet ook een gas met hoge concentraties methaan, in dit rapport *productgas* genoemd. Ook voor synthesegas uit fossiele bronnen geldt vaak dat het gas niet aan de eisen van de gebruiker voldoet. Er is dan ook een aantal commercieel verkrijgbare processen om het gas op de gewenste specificaties te brengen. Indien deze processen voor duurzaam synthesegas worden gebruikt, kunnen bestaande katalysatoren worden gebruikt voor de conversie van het synthesegas.

Naast eisen aan de bulkgassamenstelling worden er tevens eisen aan de concentraties verontreinigingen gesteld. Deze variëren van streng (<1 ppmv) voor zwavel en stikstofverbindingen, tot zeer streng (<10 ppbv) voor halogeniden en alkalimetalen. Door het gebruik van één of meerdere gaswassers en politiefilters/"guard bedden" kunnen de concentraties verontreinigingen in duurzaam synthesegas probleemloos tot vereiste waarden worden gereduceerd. Hiervoor kunnen bestaande systemen worden gebouwd.

Voor een groot aantal verschillende processen die in ontwikkeling zijn, wordt geclaimd dat ze *synthesegas* produceren. Voor slechts een beperkt aantal is deze claim gerechtvaardigd, in een groot aantal gevallen wordt een *productgas* geproduceerd. Het type gas dat door een vergasser wordt geproduceerd wordt grotendeels bepaald door de procestemperatuur. Bij hoge temperatuur vergassing (boven de 1300 °C) wordt *synthesegas* (voornamelijk H₂ en CO) geproduceerd, bij lage temperatuur vergassing (700-1000 °C) is dat een *productgas*.

De hoge temperatuur processen zijn de enige mogelijkheid voor de productie van synthesegas in één stap. Voor grootschalige synthesegasproductie is stofwolk/entrained flow het enige hoge temperatuur proces. Stofwolkvergassing vraagt een biomassavoeding met een bepaalde, geringe, deeltjesgrootte. Het elektriciteitsverbruik van het malen van de biomassa is een mogelijk knelpunt voor de implementatie van stofwolkvergassing. Indien de vereiste deeltjesgrootte te klein is zal het malen van de biomassa relatief veel elektriciteit vragen. Conversie van de biomassa door torrefactie, flash pyrolyse of lage temperatuur vergassing is dan een noodzakelijke voorbewerking om het elektriciteitsverbruik binnen de perken te houden. Daarnaast is/wordt een aantal kleinschalige processen ontwikkeld voor synthesegasproductie.

Voor import van biomassa uit de Baltische staten is de kostprijs van duurzaam synthesegas bepaald. De kostprijs van duurzaam synthesegas geproduceerd in Rotterdam is circa 10 €/GJ. Ongeveer 55% van de kosten wordt veroorzaakt door biomassa, een kwart door transport, opslag en overslag van biomassa en circa 20% door de daadwerkelijke conversie naar synthesegas (voorbewerking, vergassings, gasreiniging en -conditionering). Indien het geproduceerde synthesegas wordt gebruikt voor de productie van diesel (via Fischer-Tropsch synthese) dan ligt de kostprijs van de Fischer-Tropsch diesel op 0,44 €/liter. Dit is ruim tweemaal zo hoog als de kostprijs van fossiele diesel van 0,21 €/liter. Sterk stijgende aardolieprijzen of significante accijnsvrijstellingen zijn noodzakelijk om de prijs aan de pomp gelijk te maken. Alhoewel deze conclusie gebaseerd is op één enkele case studie, geldt de conclusie generiek voor de producten die uit synthesegas gemaakt kunnen worden. Indien uitgegaan wordt van relatief goedkope lokale organische reststromen bestaan er voor kleinschalige productie van synthesegas uit biomassa op de korte termijn mogelijk marktniches. De perspectieven van de toepassingen zullen per geval onderzocht moeten worden.

De aspecten van duurzaam synthesegas die in dit rapport worden behandeld laten een veelheid van keuze mogelijkheden zien die het te kiezen pad voor onderzoek, ontwikkeling en demonstratie en implementatie van duurzaam synthesegas beïnvloeden. Een analyse van de mogelijke paden is noodzakelijk om te bepalen welke weg bewandeld moet worden om het beoogde doel, een verhoging van het aandeel van duurzame bronnen in de energievoorziening, dichterbij te brengen.

Binnen het Energietransitieproject van het ministerie van Economische Zaken zijn zowel binnen de hoofdlijnen Biomassa, Duurzaam Rijnmond (R3) als Met Energie Naar Duurzaam Produceren (MEK-II) bio-synthesegas gerelateerde activiteiten voorgesteld. Het is aan te bevelen de voorgestelde activiteiten - inclusief actoren - te bundelen tot één breed ondersteund en goed afgestemd RD&D traject ter bespoediging van de uiteindelijke marktimplementatie.

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

Synthesegas is een mengsel van gassen dat als voeding voor katalytische syntheseprocessen kan worden gebruikt. Op dit moment wordt synthesegas voornamelijk gebruikt voor de productie van vloeibare transportbrandstoffen en chemicaliën. Daarnaast wordt synthesegas gebruikt voor de productie van elektriciteit en synthetisch aardgas. In de toekomst kan de rol van synthesegas in al deze sectoren sterk toenemen. Synthesegas wordt nu (voor ~85%) voornamelijk uit aardgas geproduceerd, daarnaast worden kolen, aardolieresiduen en afval gebruikt.

Het verminderen van de afhankelijkheid van aardolie importen en de reductie van lokale emissies¹ zijn drijfveren voor een toenemend belang van synthesegas binnen de energievoorziening. Het klimaatprobleem veroorzaakt door het broeikasgaseffect en de eindigheid van de voorraden fossiele energiedragers zijn drijfveren voor de belangstelling voor duurzaam synthesegas.

Duurzaam synthesegas staat derhalve in de belangstelling van zowel internationale als nationale onderzoekprogramma's. In het 6^e kader programma van de Europese Unie zijn twee geïntegreerde projecten gericht op de productie van synthesegas uit biomassa:

- In het door Volkswagen geleide Renew-project is synthesegasproductie ten behoeven van Fischer-Tropsch, DME en methanol synthese onderwerp van onderzoek
- In het Chrisgas project is gericht op synthesegas productie met de Värnamö biomassa vergasser in Zweden.

Daarnaast zal synthesegas binnen het EU Network of Excellence "Overcoming Barriers to Bioenergy" ook een onderwerp zijn binnen het werkpakket gericht op vloeibare bio-transportbrandstoffen.

In Nederland is de productie van synthesegas onderwerp geweest in een aantal projecten binnen het SDE programma. Binnen het project "Transitie naar een duurzame energiehuishouding" van het ministerie van Economische Zaken heeft duurzaam synthesegas een centrale rol binnen de transitiepaden BioSyngas (Biomassa) en Duurzaam Syngas (Modernisering Energieketens). Daarnaast wordt duurzaam synthesegas zijdelings genoemd in de paden Productie van gasvormige energiedragers (Nieuw gas), De realisatie van een Duurzame Energie demopark in de Rijnmond (R3), Waterstof uit biomassa (Biomassa) en Bioraffinage (Biomassa).

Synthesegas is formeel gesproken een mengsel van gassen dat als grondstof kan worden gebruikt voor katalytische syntheseprocessen. In de praktijk betekent dit in de meeste gevallen dat synthesegas een mengsel is van voornamelijk H₂ en CO. Door de belangstelling voor duurzaam synthesegas wordt de benaming synthesegas ook vaak gebruikt voor gasmengsels die niet of slechts gedeeltelijk aan deze karakteristiek voldoet. In dit rapport wordt een onderscheid gemaakt tussen *synthesegas* en *productgas*:

- *Synthesegas*: wordt geproduceerd door vergassing van biomassa bij hoge temperatuur (>1300 °C). Het gas bevat voornamelijk H₂ en CO.
- *Productgas*: wordt geproduceerd door vergassing van biomassa bij lage temperatuur (700-1000 °C). Het gas bevat naast H₂ en CO aanzienlijke concentraties CH₄ en andere koolwaterstoffen.

Op de plaatsen waar het onderscheid relevant is worden de termen *cursief* weergegeven. Het rapport heeft betrekking op het potentieel, de productie en het gebruik van zowel *synthesegas* als *productgas*.

¹ Uit synthesegas kunnen schone, zwavel- en aromaatvrije, vloeibare transportbrandstoffen worden geproduceerd. Door het gebruik van deze brandstoffen kunnen de lokale emissies aanzienlijk worden gereduceerd.

Intermezzo

Naast de twee genoemde gasmengsels wordt bij de productie van duurzame energie uit biomassa ook vaak gesproken over biogas en stortgas:

- Biogas: wordt geproduceerd door vergisting van biomassa. Bio-gas is een mengsel van CH₄ en CO₂. Het gas bevat verder een aantal verontreinigingen, zoals H₂S en NH₃. Bio-gas wordt gebruikt voor de productie van elektriciteit en warmte. In Nederland wordt bio-gas o.a. geproduceerd uit de organische fractie van huishoudelijk afval bij de Vagron in Groningen.
- Stortgas: wordt geproduceerd door vergisting in van organisch materiaal in afvalstortplaatsen. Stortgas is (net als biogas) een mengsel van CH₄ en CO₂. Op dit moment wordt op enkele tientallen lokaties stortgas gewonnen. Nieuwe projecten worden niet verwacht.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit rapport is het presenteren van een overzicht van het potentieel, de productie, de mogelijkheden voor het gebruik en de economie van duurzaam synthesesegas.

1.3 Opbouw rapport

In hoofdstuk 2 wordt het gebruik van synthesesegas beschreven. Zowel de huidige als mogelijke toekomstige toepassingen van synthesesegas worden beschreven. Vervolgens worden de eisen beschreven die aan de bulkgassamenstelling en concentraties verontreinigingen worden gesteld. Tevens wordt aangegeven wat de typische schaalgrootte is waarop synthesesegas wordt gebruikt. Het synthesesegas dat wordt geproduceerd voldoet in een groot aantal gevallen niet aan de eisen van gebruikers. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een beschrijving van de processtappen die gebruikt kunnen worden om het gas aan de vereiste specificaties te laten voldoen.

In hoofdstuk 3 wordt de omvang van de markt voor duurzaam synthesesegas bepaald en afgezet tegen de nationale en internationale beschikbaarheid van biomassa. Gestart wordt met een analyse van het huidige gebruik van synthesesegas. Vervolgens wordt het aanbod van biomassa in Nederland en buiten Nederland geanalyseerd. Op basis van de omvang van de mogelijke marktsegmenten waar duurzaam synthesesegas ingezet kan worden en op basis van aannames van het aandeel dat duurzaam synthesesegas mogelijk in deze markten kan bereiken, wordt vervolgens het potentieel van duurzaam synthesesegas afgeschat.

In hoofdstuk 4 wordt de keten voor de productie van duurzaam synthesesegas beschreven. De beschrijving start met een beschouwing over de logistiek, opslag en voorbewerking van biomassa. Vervolgens wordt beschreven op welke wijze biomassa in synthesesegas kan worden omgezet en hoe het synthesesegas kan worden gereinigd.

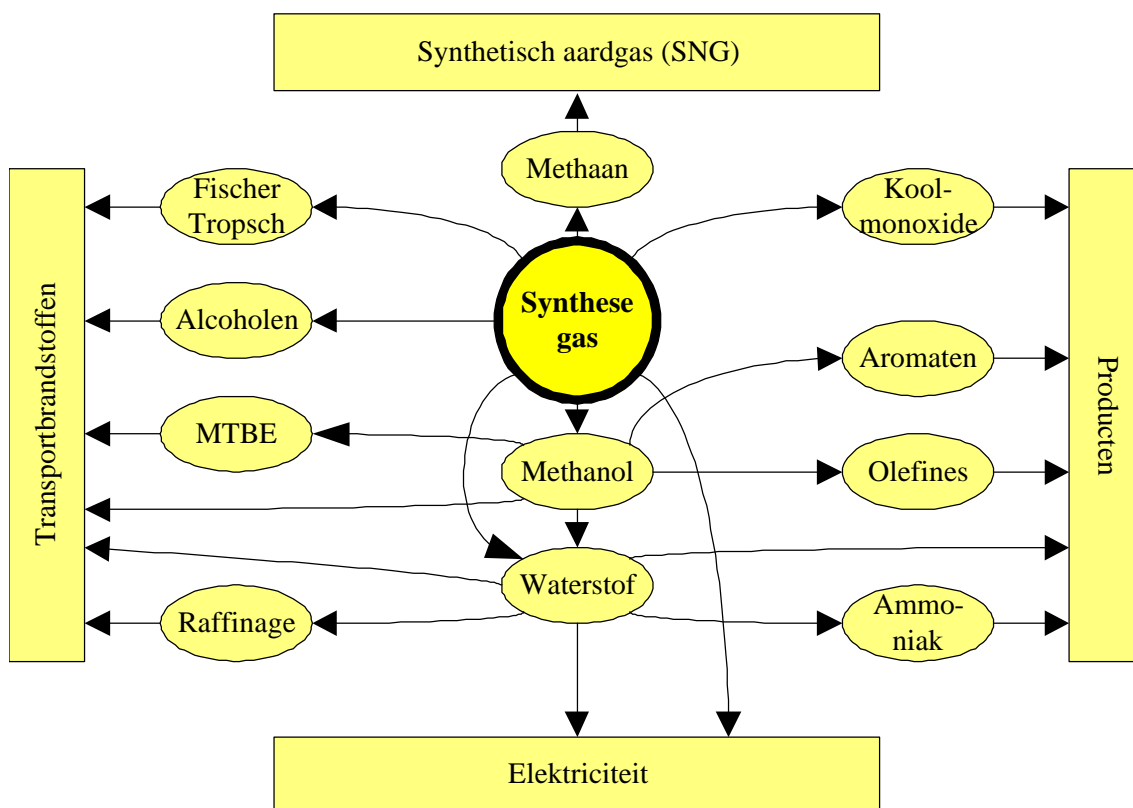
In het hoofdstuk 5 wordt de economie van duurzaam synthesesegas beschreven. Aan de hand van een voorbeeld, de productie van Fischer-Tropsch diesel, zal worden bepaald onder welke condities de daadwerkelijk implementatie van duurzaam synthesesegas verwacht mag worden.

Het rapport wordt afgesloten met een aantal conclusies en een discussie.

2. HET GEBRUIK VAN SYNTHESSEGAS

Synthesegas kan zowel direct worden gebruikt als voor de productie van waterstof (H_2) en koolmonoxide (CO). In ketenanalyses wordt synthesegas vaak ten onrechte niet als een product gezien. Het is weliswaar geen eindproduct maar wel een multifunctioneel tussenproduct dat wordt ver- en gekocht en wordt gedistribueerd via leidingnetwerken. In het Rotterdamse havengebied worden zowel H_2 , CO als synthesegas via leidingnetwerken verspreid (Air Products, 2001).

Er bestaat een zeer grote verscheidenheid aan gebruikers van synthesegas: van relatief grootschalige (bijv. de productie van ammoniak) tot relatief kleinschalige (bijv. de productie van metaalpoeders). De hoeveelheid synthesegas die wordt gebruikt wordt voornamelijk bepaald door de grootschalige gebruikers. De belangrijkste huidige en toekomstige grootschalige gebruikers van synthesegas worden gegeven in Figuur 1.



Figuur 1: De belangrijkste huidige en toekomstige toepassingen van synthesegas

In paragraaf 2.1 worden de processen besproken die synthesegas gebruiken en in paragraaf 2.2 worden de eisen die aan synthesegas worden gesteld besproken. Vervolgens worden in paragraaf 2.3 de mogelijkheden om de bulksamenstelling van synthesegas aan te passen behandeld.

2.1 Toepassingen synthesesgas

2.1.1 Waterstof voor raffinaderijen

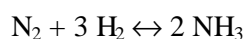
In raffinaderijen wordt H₂ gebruikt voor het ontzwavelen en stabiliseren van productstromen (hydrotreating) en voor de conversie van zware aardoliefracties (hydroprocessing). In elke raffinaderij zijn meerdere hydrotreating installaties aanwezig om de verschillende productfracties (benzine, kerosine, diesel en stookolie) te behandelen. Hydroprocessing wordt enkel in geavanceerde raffinaderijen gebruikt. Afhankelijk van het type voeding dat wordt gebruikt wordt een onderscheid gemaakt tussen hydrocracking en hydroconversion. In Nederland wordt hydrocracking gebruikt bij Esso in Rotterdam en Total in Vlissingen en hydroconversion bij Shell in Pernis.

In Nederland wordt H₂ bij verschillende raffinaderijen geproduceerd uit restgassen² die in de raffinaderij vrijkomen, door stoom reformen van aardgas en bij Shell in Pernis door vergassing van zware aardoliefracties. Daarnaast ligt in het Rotterdamse havengebied een leidingnetwerk voor het transport van waterstof tussen verschillende gebruikers en producenten.

2.1.2 Ammoniak

Ammoniak (NH₃) wordt voor ongeveer 85% gebruikt voor de productie van kunstmest (Ullmann, 1999), de overige 15% wordt voor een breed scala aan toepassingen gebruikt. Elk stikstofatoom in industrieel geproduceerde chemicaliën is direct of indirect afkomstig van ammoniak. Ammoniak wordt, eventueel na conversie naar salpeterzuur, gebruikt voor de productie van kunststoffen en -vezels zoals: polyurethaan, polyamides en polyacrylonitrile. Verder wordt ammoniak gebruikt bij de productie van explosieven en veevoer. In Nederland wordt ammoniak geproduceerd bij Hydro Agri in Sluiskil en DSM in Geleen.

Ammoniak synthese is een katalytisch proces dat wordt uitgevoerd bij procesdrukken van 100-250 bar en temperaturen van 350-550 °C, volgens de reactie:



Voor ammoniak synthese worden ijzeroxide katalysatoren gebruikt. Ammoniak synthese is een thermodynamisch gelimiteerd proces; om hoge conversies te behalen wordt het niet omgezette gas (gedeeltelijk) gerecirculeerd.

2.1.3 Methanol

Tot het begin van de 20^e eeuw was methanol (CH₃OH) een commercieel bijproduct van houtskoolproductie en werd het dus uit biomassa gemaakt (Ullmann, 1999). Met de ontwikkeling van een katalytisch syntheseproces in het begin van de 20^e eeuw werden fossiele energiedragers de belangrijkste grondstof.

Ongeveer driekwart van de methanol productie wordt gebruikt voor chemische toepassingen. Methanol is een chemische bouwsteen die in een groot aantal productieketens wordt gebruikt. De belangrijkste toepassingen in de chemische industrie zijn als grondstof voor formaldehyde en azijnzuur, samen goed voor ruim 40% van het totale wereldwijde methanol verbruik. Daarnaast wordt methanol gebruikt voor de productie van o.a.: dimethylether, methylesters, methylchloride en dimethyltereftalaat. Direct of indirect wordt methanol gebruikt voor talloze producten die we in het dagelijks leven tegenkomen zoals: harsen, kleefstoffen, verf, inkt, schuimen, siliconen, plastic flessen, oplosmiddelen, enz.

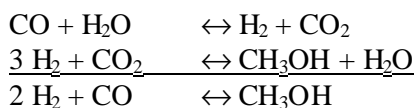
² Bijvoorbeeld bij het katalytisch reformen van benzine

Ongeveer een kwart van de methanol productie wordt gebruikt voor de productie van methyltertiairbutylether (=MTBE). MTBE wordt gebruikt als octaanverhoger en “oxygenate” in benzine. In Californië en aantal andere staten van de VS staat het gebruik van MTBE op dit moment onder druk omdat in een aantal drinkwaterbronnen een te hoge concentratie van het moeilijk afbreekbare MTBE is aangetroffen.

In de toekomst kan het belang van methanol toenemen: methanol speelt een centrale rol in de zogenaamde C1-chemie en kan o.a. worden gebruikt voor de productie van olefines en aromaten, zie paragraaf 2.1.7. Als transportbrandstof kan methanol in de toekomst ook een belangrijke rol gaan spelen, vooral de productie van H₂ uit methanol in door brandstofcellen aangedreven auto's lijkt perspectieven te bieden.

In Nederland wordt methanol geproduceerd door Methanor in Delfzijl. In het GAVE programma wordt door een consortium bestaande uit onder andere HGP en Methanor de mogelijkheid onderzocht de productie van methanol uit biomassa te demonstreren.

In commerciële processen wordt methanol synthese uitgevoerd bij 200-280 °C en 50-100 bar met een koper-zink katalysator. De volgende reacties treden hierbij op:



Net als ammoniak synthese is ook methanol synthese thermodynamisch gelimiteerd, het gas dat de synthesesreactor verlaat wordt gedeeltelijk gerecirculeerd om hoge conversies te bereiken.

2.1.4 Fischer-Tropsch synthese

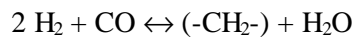
Fischer-Tropsch synthese wordt gebruikt voor de conversie van synthesesgas in koolwaterstoffen. De geproduceerde koolwaterstoffen worden gebruikt als transportbrandstof en voor specifieke chemische producten. Op dit moment vindt Fischer-Tropsch synthese op commerciële schaal enkel plaats op basis van synthesesgas uit aardgas in Bintulu, Maleisië en Mossel Bay, Zuid-Afrika en op basis van synthesesgas uit kolen in het Sasol complex in Zuid-Afrika. De totale productiecapaciteit van deze drie complexen is ongeveer 185.000 vaten per dag³.

Voor Fischer-Tropsch synthese op basis van aardgas zijn de komende jaren aanzienlijke uitbreidingen van de capaciteit te verwachten. Qatar Petroleum en Qatar Shell plannen de bouw van een 140.000 vaten per dag Fischer-Tropsch fabriek die aardgas als grondstof gebruikt (Shell Qatar, 2004). Daarnaast is er een groot aantal andere initiatieven in een ver of minder ver gevorderd stadium. Al deze initiatieven hebben gemeen dat relatief goedkoop aardgas wordt gebruikt waar anders géén toepassing voor is, zogenaamd “stranded gas”.

In het GAVE programma zijn door twee consortia onder leiding van respectievelijk SDE en TNO-MEP de mogelijkheden onderzocht om Fischer-Tropsch synthese op basis van synthesesgas uit biomassa te demonstreren. In het SDE programma is een project uitgevoerd gericht op Fischer-Tropsch synthese op basis van synthesesgas uit biomassa. In 2002 zijn in dit project bij ECN voor de eerste keer in de historie ook Fischer-Tropsch producten uit biomassa gemaakt.

³ 1 vat ~ 159 liter, 185.000 vaten per dag is gelijk aan circa 15% van de capaciteit voor aardolieraffinage in Nederland

Fischer-Tropsch synthese wordt uitgevoerd bij temperaturen van 225-365 °C en drukken van 5-40 bar. De volgende reactie vindt hierbij plaats:



Door herhaling van deze reactie groeit de koolwaterstofketen. Door de aanwezigheid van waterstof kan de ketengroei ook worden beëindigd. Als gevolg van deze twee concurrerende reacties ontstaat een mengsel van koolwaterstoffen met verschillende ketenlengtes. De samenstelling van het productmengsel wordt beïnvloed door de procescondities. Voor commerciële Fischer-Tropsch synthese worden ijzer of kobalt katalysatoren gebruikt.

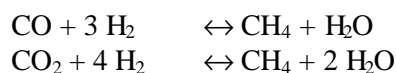
Een specifieke eigenschap van Fischer-Tropsch synthese is de beperkte selectiviteit voor de gewenste producten, vloeibare koolwaterstoffen. Afhankelijk van de procesconfiguratie en -omstandigheden is de selectiviteit voor vloeibare producten beperkt tot 80-90%. In commerciële Fischer-Tropsch fabrieken worden de gasvormige bijproducten opnieuw omgezet in synthesegas en samen met het niet omgezet gas teruggevoerd naar de Fischer-Tropsch synthese.

2.1.5 Synthetisch aardgas

Aardgas is een belangrijke primaire energiebron die op vele plaatsen in de energievoorziening wordt gebruikt. Door methanering kan synthesegas worden omgezet in synthetisch aardgas (=SNG). Op dit moment wordt slechts op één locatie in de wereld op deze wijze synthetisch aardgas geproduceerd. In de Great Plains Synfuels plant in North Dakota, Verenigde Staten wordt kolen vergast in vast-bed vergassers gevolgd door methanering voor de productie van SNG. De Great Plains Synfuels plant is sinds 1984 in bedrijf en produceert ~1,5 miljard m³ SNG (Dakota Gasification Company, 2004), dit is gelijk aan circa 3% van het jaarlijkse Nederlandse aardgasverbruik.

In het GAVE programma is de mogelijkheid van SNG productie uit bio-synthesegas onderzocht door 2 consortia onder leiding van respectievelijk Gastec en TNO-MEP. In het transitiepad "Nieuw gas" wordt een experiment met de productie van SNG uit biomassa overwogen. Eind 2003 is bij ECN synthesegas uit biomassa gebruikt voor de productie van SNG door methanering.

Methanering vindt plaats bij temperaturen van 300-700 °C met nikkel katalysatoren:



2.1.6 Elektriciteit

Elektriciteit is een belangrijke secundaire energiedrager in de huidige energievoorziening. Synthegas kan in een STEG-eenheid worden omgezet in elektriciteit. Er is in Nederland een aantal aardgas gestookte STEG-eenheden. Een tweetal STEG-eenheden wordt op synthesegas bedreven. In de Prins Willem-Alexander centrale van Nuon in Buggenum wordt een 253 MW_e STEG-eenheid bedreven op synthesegas geproduceerd uit kolen en biomassa en bij Shell in Pernis wordt een 127 MW_e STEG-eenheid bedreven op synthesegas geproduceerd uit zware aardoliefracties. Dit betekent dat een kleine 2% van de opgestelde capaciteit voor elektriciteitsproductie in Nederland ontworpen is voor bedrijf op synthesegas. Wereldwijd wordt circa 10000 MW_{th} synthesegas geproduceerd ten behoeve van elektriciteitsproductie (Simbeck en Johnson, 2001).

2.1.7 Overige toepassingen

Naast de tot nu toe besproken toepassingen is er nog een aantal andere toepassingen waarvan de omvang van de markt relatief beperkt is of die zich op dit moment nog in een ontwikkelingsfase bevinden.

Alcoholen

Net als dat Fischer-Tropsch synthese een mengsel van koolwaterstoffen met verschillende ketenlengtes produceert, kan in een katalytisch proces ook een mengsel van alcoholen met verschillende ketenlengtes worden geproduceerd. De heren Fischer en Tropsch hebben al mengsels van alcoholen geproduceerd toen hun katalysator met alkali metalen was verontreinigd (Mills, 1994). Voor en in de Tweede Wereldoorlog zijn in Duitsland mengsels van alcoholen geproduceerd met ijzer metalen die alkali metalen bevatten (Wender, 1996). In de tweede helft van de 20^e eeuw zijn er verschillende projecten uitgevoerd door de industrie. Snamprogetti/Haldar Topsoe heeft dit proces gedemonstreerd in een 50 ton/dag fabriek (Fox, 1993), voor de rest hebben deze projecten niet geleid tot industriële activiteiten (Wender, 1996).

Waarschijnlijk als gevolg van de activiteiten op het gebied van bio-ethanol in de Verenigde Staten is het onderwerp weer opgepakt. Power Energy Fuels, Inc. in Denver, Colorado wil een proces vermarkten dat een mengsel van alcoholen produceert. Voor het alcoholmengsel gebruiken ze de naam EcaleneTM (Power Energy Fuels, 2004). Details over de procesconfiguratie en eisen aan de gassamenstelling zijn onbekend.

Koolmonoxide

De productie van koolmonoxide is qua hoeveelheid zeer beperkt ten opzichte van de synthesesgasconsumptie voor andere toepassingen. De belangrijkste gebruikers van koolmonoxide zijn de productie van azijnzuur en fosgeen. Beide producten worden o.a. gebruikt bij de productie van kunststoffen. Daarnaast is er een grote hoeveelheid aan kleinere gebruikers van koolmonoxide.

In een chemische industrie die in toenemende mate andere grondstoffen dan aardolie gebruikt zal de zogenaamde C1 chemie mogelijk een grotere rol gaan spelen. De rol van koolmonoxide in chemische industrie kan dan mogelijk toenemen.

Olefines en aromaten

De belangrijkste basischemicaliën in de organisch chemische industrie zijn de olefines en aromaten. Er wordt al sinds decennia onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om deze producten rechtstreeks uit synthesesgas te maken (Haag en Kuo, 1987; Wender, 1996; Mills, 1994). Tot nu toe hebben deze pogingen nog relatief weinig succes opgeleverd. Processen waarbij deze chemicaliën uit methanol, een product van synthesesgas, worden gemaakt lijken wel perspectief te bieden.

In processen waarbij zeolieten als katalysator worden gebruikt kan methanol worden omgezet naar diverse producten. Door Mobil is een aantal verschillende processen met een zeoliet katalysator ontwikkeld. In het methanol-to-gasoline (=MTG) proces wordt methanol omgezet naar benzine. Deze benzine bevat ongeveer 15 gew.% aromaten (Tabak en Yurchak, 1990). Met conventionele technieken voor het afscheiden van aromaten uit aardoliefracties zouden op deze wijze aromaten uit biomassa kunnen worden geproduceerd. Voor het MTG proces is op een schaalgrootte van 14500 vaten per dag een fabriek gebouwd en vanaf 1985 bedreven in Nieuw-Zeeland (Tabak en Yurchak, 1990). Doordat het op deze wijze produceren van benzine niet meer economische verantwoord was, is deze fabriek in 1997 gesloten (Methanex, 2004). In een variant op dit proces, het methanol-to-olefines (=MTO), wordt methanol met een zeoliet katalysator omgezet naar olefines. Dit proces is op kleine schaal, 100 vaten/dag, getest in Duitsland (Tabak en Yurchak, 1990).

Elektriciteit uit waterstof

Met behulp van brandstofcellen kan met een hoog rendement elektriciteit uit waterstof worden geproduceerd. In een zogenaamde waterstofeconomie wordt dit gezien als de aangewezen methode van elektriciteitsproductie. Op de korte termijn lijken de meeste perspectieven te liggen in het gebruik van waterstof (en brandstofcellen) in de vervoerssector. Een aantal grote automobielfabrikanten (o.a. Daimler-Chrysler, Toyota) is reeds bezig met de ontwikkeling en demonstratie van prototypes. Het is nog onduidelijk of waterstof getankt zal worden of dat waterstof aan boord zal worden geproduceerd uit een vloeibare brandstof (methanol, benzine of ethanol).

2.2 Eisen gebruikers synthese gas

2.2.1 Bulksamenstelling

In Tabel 1 worden de eisen gegeven die door de belangrijkste gebruikers aan de bulksamenstelling van synthese gas worden gesteld. De achtergrond van deze eisen wordt beschreven door Den Uil (2003). Voor elektriciteitsproductie in een STEG-eenheid worden in Tabel 1 géén eisen gegeven. Er zijn weliswaar eisen aan de voeding voor een STEG-eenheid te stellen, maar deze zijn niet te vertalen in eenduidige eisen aan de gassamenstelling.

Samenvattend geldt dat voor alle in Tabel 1 vermelde toepassingen hoge H_2 concentraties (boven de 60 vol.%) vereist zijn. Verder dient in alle gevallen het gehalte aan inerte gassen zo laag mogelijk te zijn. Alleen als het gas voor de elektriciteits- of SNG-productie wordt gebruikt, is de aanwezigheid van CH_4 in het gas gewenst. In alle andere gevallen geldt CH_4 als een inert gas. Voor ammoniak, methanol en Fischer-Tropsch synthese en voor H_2 voor raffinaderijen is dus *synthesegas* nodig en voor de productie van SNG en elektriciteit een *productgas*.

Tabel 1: Overzicht van eisen van synthese gas gebruikers aan de bulkgassamenstelling

| | H_2 voor raffinaderijen | Ammoniak synthese | Methanol synthese | Fischer Tropsch synthese | Synthetisch aardgas |
|---------------------------|--|--|--|---|---|
| - H_2 (vol.%) | >98 | 75 ⁴ | 71 ⁵ | 60 ⁶ | 60 ⁷ |
| - CO (vol.%) | <10-50 ppmv | CO+CO ₂ +O ₂ <20 ppmv | 19 ⁵ | 30 ⁶ | 20 ⁷ |
| - CO ₂ (vol.%) | <10-50 ppmv | | 4-8 | | |
| - O ₂ (vol.%) | <100 ppmv | | | | |
| - N ₂ (vol.%) | | 25 ⁴ | | | |
| - CH ₄ | | | | | Zo hoog mogelijk |
| - Inert | N ₂ , Ar en CH ₄ : Balans | Ar en CH ₄ : Zo laag mogelijk | N ₂ , Ar en CH ₄ : Zo laag mogelijk | CO ₂ , N ₂ , Ar en CH ₄ : Zo laag mogelijk | N ₂ en Ar: Zo laag mogelijk |
| - H_2/N_2 (mol/mol) | | $H_2/N_2 \sim 3$ | $SN^8 = 1,3-1,4$ | $H_2/CO = 0,6-2$ | $H_2/CO \sim 3$ |
| Procesdruk (bar) | >50 | 100-250 | 50-100 | 5-40 | >15 |

⁴ Gebaseerd op een verhouding van $H_2/N_2=3$ en afwezigheid van andere (inerte) gassen.

⁵ Bij een CH_4 concentratie van 5 vol.% en een CO_2 concentratie van 5 vol.%. Bij andere concentraties aan inerte gassen en CO_2 veranderen deze getallen.

⁶ Bij een concentratie aan inerte gassen van 10 vol.% en een vereiste H_2/CO verhouding van 2. Bij andere concentraties aan inerte gassen en eisen aan de H_2/CO verhouding veranderen deze getallen.

⁷ Bij bijvoorbeeld een CH_4 concentratie van 10 vol.%. Bij andere CH_4 -concentraties veranderen deze getallen.

⁸ $SN = H_2/(2*CO+3*CO_2)$. Bij een verhouding van $SN=1$ zijn de reactanten in stoichiometrisch verhoudingen aanwezig. Bij een SN boven de 1 is een overmaat H_2 aanwezig.

2.2.2 Verontreinigingen

Synthesegas wordt meestal toegepast in katalytische processen. Katalysatoren zijn intrinsiek gevoelig voor verontreinigingen in het gas waardoor ze ‘vergiftigd’ worden en de prestaties van de katalysator (zoals de omzettingsgraad en de selectiviteit) achteruit gaan. In commerciële processen gaan de katalysatorprestaties na verloop van tijd achteruit en daarom worden katalysatoren normaal gesproken na een bepaalde tijd vervangen of geregenereerd. Vanuit dit oogpunt is het definiëren van limieten voor verontreinigingen een economische afweging: de kosten voor het installeren van extra gasreiniging moet worden afgewogen tegen het verlies aan productie door vergiftiging van de katalysator. Dientengevolge zullen de maximale concentraties verontreinigingen die in het gas geaccepteerd kunnen worden per proces en zelfs per fabriek verschillen.

Op basis van algemene informatie kan wel een aantal vuistregels voor toelaatbare concentraties van verontreinigingen worden opgesteld, zie Tabel 2. Deze zijn afgeleid van de specificaties die gelden voor het Fischer-Tropsch proces (Boerrigter, 2003a; Boerrigter en Den Uil, 2003b). Zwavel is een sterk gif voor bijna alle katalysatoren. Van de zwavelverbindingen is waterstofsulfide (H_2S) meestal in de hoogste concentraties aanwezig, met lagere concentraties aan carbonylsulfide (COS) en koolstofdissulfide (CS_2). Normaal gesproken is H_2S in de hoogste concentratie aanwezig; de concentratie COS is factoren lager, terwijl de concentratie CS_2 doorgaans verwaarloosbaar is. De som van deze zwavelbevattende verbindingen moet beneden de 1 ppmv zijn. Hierbij wordt opgemerkt dat er voor speciale processen soms katalysatoren toegepast worden die juist H_2S nodig hebben om optimaal te werken. Voor de stikstofhoudende verontreinigingen ammoniak (NH_3) en waterstofcyanide (HCN) geldt eenzelfde verwijderingsniveau.

Tabel 2: Verwijderingsniveaus voor verontreinigingen in het synthesegas (Boerrigter, 2003a)

| Verontreiniging | Verwijderingsniveau |
|---|----------------------|
| $H_2S + COS + CS_2$ | < 1 ppmv |
| $NH_3 + HCN$ | < 1 ppmv |
| HCl + HBr + HF (halogeniden) | < 10 ppbv |
| alkali metalen (natrium en kalium) | < 10 ppbv |
| deeltjes (stof, roet, as) | nagenoeg compleet |
| Organische componenten (met name teren) | beneden het dauwpunt |
| - met hetero atomen (klasse 2 teren) | < 1 ppmv |

Voor de gasvormige halogeniden gelden veel strengere verwijderingsniveaus, namelijk 10 ppbv. Waterstofchloride (HCl), -bromide (HBr) en -fluoride (HF) zijn zuren en kunnen de katalysator corroderen wat een zeer sterk negatieve invloed heeft op de prestaties. Doorgaans is alleen HCl aanwezig en zijn de concentraties HBr en HF verwaarloosbaar. Dezelfde lage verwijderingsniveaus gelden voor de alkalimetalen natrium en kalium die als gasvormige verbindingen in het gas aanwezig kunnen. Deze metalen kunnen reageren met het katalysatormateriaal waardoor de eigenschappen volledig veranderen. Vaste deeltjes in het gas, zoals stof, roet en as moeten in principe volledig verwijderd worden omdat deze kunnen leiden tot vervuiling en verstopping in het systeem. Dit geldt zeker als een vast-bed reactor wordt gebruikt voor het syntheseprocess.

Naast de genoemde anorganische verontreinigingen kunnen er ook organische verbindingen in het gas aanwezig zijn die een verontreinigend of vergiftigend effect op de katalysator hebben. Naast benzeen en toluen zijn dit de “teren”. Met de omschrijving “teer” of “teren” wordt een breed scala van organische aromatische componenten aangeduid met kookpunten tussen de 80 en 400°C. Voor de beschrijving van deze componenten is een classificatiesysteem ontwikkeld op basis van de chemische eigenschappen (Van Paasen, 2002). Voor deze organische verbindingen geldt dat deze in principe niet problematisch zijn zolang ze in de gasfase aanwezig zijn. Dit betekent dat ze tot dusdanig niveau verwijderd moeten worden zodat ze bij de druk en temperatuur van het syntheseproces niet condenseren; de verbindingen moeten verwijderd worden tot beneden het dauwpunt⁹ bij die condities. Bij vergassing van biomassa kunnen ook teren worden gevormd die heteroatomen bevatten (zwavel, stikstof of zuurstof). Voor de concentraties van deze verbindingen geldt een zelfde criterium als voor de anorganische zwavel- en stikstofverbindingen, namelijk verwijdering tot beneden 1 ppmv.

2.2.3 Schaalgrootte

Naast de eisen die aan de bulkgassamenstelling en de concentraties van verontreinigingen in synthese gas is ook de hoeveelheid synthese gas die nodig is van belang. De typische schaalgrootte van de belangrijkste gebruikers van synthese gas wordt gegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Typische schaalgrootte van gebruikers van synthese gas

| | H ₂ voor raffinaderijen | Ammoniak synthese | Methanol synthese | Fischer Tropsch synthese | Synthetisch aardgas |
|-----------------------------------|--|-------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Schaalgrootte | 0-3,2 miljoen m _n ³ /dag | 1000-1500 ton/dag | 500-1000 kton/jaar | 80000 vaten/dag | 1900 MW _{th} ¹⁰ |
| Referentie | IPTS, 2001 | EFMA, 2000 | Chung en Kung, 1994 | Corke, 1998 | Simbeck en Johnson, 2001 |
| Schaalgrootte (MW _{th}) | 12-400 | 300-450 | 400-800 | 6000 | 1900 |

De getallen in Tabel 3 geven een indruk van de hoeveelheid synthese gas die wordt gevraagd door de gebruiker. Afhankelijk van de schaalgrootte en de grondstof kunnen deze hoeveelheden door meerder individuele installaties worden geleverd. Indien steenkolen of aardolieresiduen worden gebruikt is het bekend dat meerdere vergassers worden gebruikt. Bij het Great Plain Synfuels project staan voor de productie van SNG staan bijvoorbeeld 14 kolenvergassers opgesteld. Eén van de redenen om het synthese gas door meerdere installaties te laten leveren is het verhogen van de betrouwbaarheid. Indien meerdere vergassers beschikbaar zijn neemt de kans dat er géén synthese gas wordt geproduceerd sterk af.

Voor H₂ productie voor raffinaderijen en voor ammoniak en methanol synthese is de typische schaalgrootte van de gebruikers enkele honderden MW_{th}. Voor Fischer-Tropsch synthese en SNG-productie is de typische schaalgrootte enkele duizenden MW_{th}.

2.3 Conditioneren van synthese gas

Synthese gas wordt op dit moment voornamelijk geproduceerd uit aardgas, kolen en aardolieresiduen. Voor deze grondstoffen is een groot aantal verschillende processen ontwikkeld. Voor een aantal van deze processen is in Tabel 4 de samenstelling van het geproduceerde synthese gas gegeven (Ullmann, 1999).

⁹ Het dauwpunt is de temperatuur waarop bij de gegeven concentratie van de organische verbinding deze begint te condenseren. Zolang de procestemperatuur boven het dauwpunt ligt zijn de verbindingen in de gasfase aanwezig. Wanneer de concentratie wordt verlaagd door gasreiniging zal het dauwpunt overeenkomstig dalen. Meer informatie over teerdauwpunten kan gevonden worden op www.thersites.nl, de ECN teerdauwpunt website.

¹⁰ De schaalgrootte van de Great Plains Synfuels fabriek voor de productie van SNG, met drie van dergelijke fabrieken in Nederland kan ongeveer 10% van het Nederlandse aardgasverbruik geproduceerd worden.

Tabel 4: Typische gassamenstellingen (in vol.%) voor synthesegas productie processen

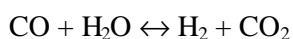
| | Stoom reformen aardgas | Autotherm reformen aardgas | Partiële oxidatie aardgas | Vergassing aardolie residuen | Texaco stofwolk vergassing kolen | Lurgi vast bed vergassing kolen |
|-----------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| H ₂ | 73 | 63 | 60 | 45 | 37 | 43 |
| CO | 16 | 17 | 35 | 49 | 41 | 12 |
| CO ₂ | 7 | 13 | 4 | 5 | 21 | 32 |
| CH ₄ | 4 | 1,1 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 12 |
| N ₂ | - | 0,7 | 0,4 | 0,2 | 0,6 | 0,3 |
| Ar | - | 4,8 | - | - | - | - |

Vergelijking van de gassamenstellingen in Tabel 4 met de eisen aan de bulkgassamenstelling in Tabel 1 laat zien dat slechts voor een beperkt aantal combinaties van synthesegas productie en gebruik het geproduceerde gas aan de gestelde eisen van de gebruiker voldoet: bijv. het gas dat wordt geproduceerd door stoom reformen van aardgas voldoet aan de specificaties voor methanol synthese.

Voor de overige combinaties van synthesegas productie en gebruik dient de samenstelling in één of meerdere stappen aan de eisen van de gebruiker worden aangepast. Hiervoor is een aantal commercieel verkrijgbare processen beschikbaar. Als de samenstelling van het "ruwe" synthesegas met deze processen is aangepast, dan zijn de katalysatoren die op dit moment door de gebruikers van synthesegas worden toegepast geschikt voor het toepassen van duurzaam synthesegas.

2.3.1 Water-gas-shift

Om de verhouding H₂/CO te verhogen of voor H₂ productie wordt de water-gas-shift reactie gebruikt:



Afhankelijk van het doel wordt de water-gas-shift in één stap of twee stappen uitgevoerd. In de eerste stap bij 300-550 °C wordt het grootste gedeelte van het CO, eventueel gedeeltelijk, met een hoge snelheid omgezet naar H₂. De concentratie CO na de hoge temperatuur stap is minimaal 1-2 vol.%. Voor deze stap worden ijzer/chroom of kobalt/molybdeen katalysatoren gebruikt. Voor H₂ productie volgt nog een tweede stap bij 200-250 °C. De concentratie CO na de lage temperatuurstep is 0,2-0,5 vol.%. Voor deze stap worden koperoxide katalysatoren gebruikt.

2.3.2 H₂-productie

Voor H₂ productie voor raffinaderijen of voor ammoniak synthese bestaat het gas na de water-gas-shift voornamelijk uit H₂ en CO₂. Voor de productie van H₂ voor raffinaderijen worden twee verschillende routes gebruikt om het gas op specificatie te brengen:

- CO₂ absorptie gevolgd door methanering
- Adsorptie

In het eerste geval zal door absorptie van kooldioxide in een vloeistof de concentratie kooldioxide worden gereduceerd tot circa 0,1 vol.%. Afhankelijk van de partiële spanning kooldioxide in het productgas zal chemische of fysische absorptie, of combinaties hiervan, worden toegepast. Voor chemische absorptie worden in commerciële processen o.a. amines (MEA, DEA, DIPA, enz.) gebruikt en voor fysische absorptie methanol, dimethylether, polyethyleenglycol, enz. Door absorptie wordt voornamelijk kooldioxide uit het gas verwijderd. De verwijdering van kooldioxide wordt over het algemeen gevolgd door methanering, zie paragraaf 2.1.5, om sporen koolmonoxide en kooldioxide om te zetten naar methaan. Na methanering bevat het gas 5-10 ppmv CO en CO₂.

Indien het gas naast H₂ en CO₂ aanzienlijke concentraties van andere gassen bevat, dan is absorptie géén geschikte methode voor de productie van H₂ uit synthesesgas. In dat geval zal de tweede optie, adsorptie, worden toegepast. De in het gas aanwezige CO₂ kan ook worden afgescheiden door adsorptie aan vaste stoffen. Adsorbentia die worden toegepast zijn o.a. silica gel, actieve kool, zeolieten en moleculaire zeven. Door de eigenschappen van H₂ wordt dit gas, in tegenstelling tot andere gassen, niet of nauwelijks geadsorbeerd. Adsorptie is dus een effectieve manier om H₂ van andere gassen te scheiden. De adsorptiestap vindt plaats bij lage temperatuur en hoge druk. De regeneratie van het adsorbens vindt plaats bij hoge temperatuur (TSA=Thermal Swing Adsorption) of lage druk (PSA=Pressure Swing Adsorption). Het type adsorptiemiddel dat wordt gebruikt is afhankelijk van de gassen die verwijderd moeten worden. De waterstofconcentratie in het voedingsgas moet voor een economisch verantwoord proces minimaal 50 vol.% zijn en het productgas heeft een waterstofconcentratie van minimaal 99,9 vol.%.

Voor de H₂-productie voor ammoniak synthese worden eveneens twee verschillende routes gebruikt. Indien aardgas wordt gebruikt als grondstof zal bij de synthesesgas productie lucht worden gebruikt waardoor de vereiste N₂ al in het gas aanwezig is. De conditionering van het gas, na de water-gas-shift, zal dan bestaan uit CO₂-verwijdering door absorptie gevolgd door methanering, zie de beschrijving van H₂-productie voor raffinaderijen.

Als aardolieresiduen of kolen als grondstof worden gebruikt voor ammoniak productie dan zal de conditionering van het gas bestaan uit de water-gas-shift reactie gevolgd door CO₂-verwijdering door absorptie en wassen met vloeibaar N₂. Voordeel hierbij is dat ook andere componenten grotendeels uit het gas worden verwijderd en dat daardoor de concentratie aan inerte componenten lager wordt. Het wassen met vloeibaar N₂ dient te worden voorafgegaan door CO₂ verwijdering om bevrozing van CO₂ te voorkomen. Door het wassen met vloeibare N₂ (-180 °C) worden gassen zoals CO en CH₄ verwijderd. Op deze wijze wordt tevens de N₂ toegevoegd die benodigd is voor de ammoniak synthese.

2.3.3 Overige toepassingen

Voor de overige toepassingen (methanol en Fischer-Tropsch synthese en de productie van synthetisch aardgas) dient de H₂/CO verhouding op de gewenste waarde gebracht te worden via de water-gas-shift reactie. Vervolgens dient CO₂ ofwel verwijderd te worden omdat het een inerte component is ofwel dient de CO₂ concentratie te worden gereduceerd tot de gewenste concentratie. De CO₂ verwijdering vindt plaats door chemische of fysische absorptie in een vloeistof, zie paragraaf 2.3.2.

3. POTENTIEEL DUURZAAM SYNTHESEGAS

3.1 Marktomvang syntheseegas

3.1.1 Huidige markt

Syntheseegas uit fossiele bronnen (voornamelijk H₂ en CO) wordt thans voornamelijk aangewend als:

- “H₂-bron” voor o.a. de aardolieraffinage, de productie van ammoniak, hydrogeneringsprocessen,
- “Syntheseegas-bron” voor o.a. methanolsynthese, Fischer-Tropsch synthese, hydroformuleringsprocessen,
- “CO-bron” voor o.a. de productie van azijn en fosgeen.

Tabel 5: Huidig verbruik van syntheseegas (in PJ/jaar) in de wereld

| Syngas -> limited amount of main products -> variety of secondary products (methanol, acetic acid -> synthetic materials; ammonia -> artificial fertiliser; ...) | | | | | |
|--|----|----------------|------|----------------------------|------|
| Carbon monoxide (CO) | | Syngas | | Hydrogen (H ₂) | |
| • Acetic acid | | • Methanol | 684 | • Ammonia | 3250 |
| • Phosgene | | • FT-synthesis | 484 | • Oil refining | 1400 |
| • Others | | • Hydro-form. | | • Hydrogenation | |
| | | • Others | 50 | • Others | |
| | 12 | | 1218 | | 4650 |
| Total use fossil derived syngas: appr. 5880 PJ _{th} /year (2% total primary energy consumption) About 16% (950 PJ _{th}) by coal/oil gasification, 84% from natural gas | | | | | |

Het mondiale verbruik van syntheseegas bedraagt thans ca. 5850 PJ_{th}/jaar, waarvan ca. 15% middels vergassing van olie/steenkool wordt geproduceerd en ca. 85% middels stoomreforming van aardgas, zie Tabel 5.

In Nederland wordt syntheseegas thans voornamelijk ingezet voor de productie van ammoniak (NH₃), in raffinaderijen en voor de productie van methanol. Het totale verbruik bedraagt ca. 100 PJ_{th}/jaar, oftewel ca. 3% van het totale primaire energiegebruik in Nederland, zie Tabel 6.

Tabel 6: Huidig verbruik van syntheseegas (in PJ/jaar) in Nederland

| Current Dutch fossil derived syngas use [PJ _{th} /year] | | | | | |
|---|----|----------------|----|------------|----|
| • Ammonia | 62 | • Oil refining | 15 | • Methanol | 22 |
| Total use fossil derived syngas: appr. 100 PJ _{th} /year (3% total primary energy consumption) | | | | | |

3.1.2 Toekomstige markt

Om aan gestelde beleidsdoelstellingen (zie par. 3.3) te kunnen voldoen is het uitermate belangrijk dat de inzet van biomassa plaatsvindt in een groot aantal marktsectoren, waarbij hoogwaardige inzet (“producten” > chemicaliën/transportbrandstoffen/”Groen aardgas” > elektriciteitsproductie > warmteproductie) de voorkeur zou moeten krijgen boven meer laagwaardige toepassingen. Behalve de inzet ter substitutie van thans aangewend fossiel syntheseegas (zie 3.1.1) is de verwachting dat biosyngas met name een belangrijke rol zal vervullen bij de verduurzaming van de transportsector, de gasector, de industriële sector en de elektriciteitsproductiesector.

Ook is de verwachting dat de productie van biosyngas op de lange-termijn zal plaatsvinden via hoog-efficiënte thermo-chemische raffinageprocessen, waarbij via fractionering een scala aan producten, waaronder biosyngas, uit biomassa zal worden geproduceerd.

Tabel 7: Mogelijk alternatieve toepassingen van synthesesgas in de toekomst

| Future potential alternative syngas applications | |
|--|---|
| Syngas -> (intermediates ->) base chemicals, transportation fuels, SNG, power production | |
| Base chemicals | Transportation fuels |
| <ul style="list-style-type: none"> • Aromatics (benzene, toluene, xylene) • Olefins (ethylene, propylene, butadiene) | <ul style="list-style-type: none"> • Methanol • Gasoline (MTG process) • Dimethylether (DME) • Fischer-Tropsch (FT) diesel • Mixture of alcohols • H₂ -> fuel cells |
| Substitute Natural Gas (SNG) production | Advanced power production (BIG/CCs) |

3.2 Classificatie, beschikbaarheid en contracteerbaarheid biomassa

3.2.1 Classificatie biomassa

In de duurzame energie- en milieudoelstellingen van de Nederlandse overheid is een aanzienlijke rol voorzien voor biomassa als brand- en/of grondstof. De verwachting is dat er een biomassahandel zal gaan ontstaan, waarin ook andere dan de meer conventionele biomassastromen worden betrokken. Een voorbeeld van de grote variëteit aan biomassastromen en de diversiteit aan samenstellingen is terug te vinden in de vrij toegankelijke ECN-database Phyllis (Phyllis, 2004).

Langzamerhand is de behoefte ontstaan aan een duidelijk informatiesysteem, waarin de variëteit aan biomassastromen op een heldere wijze worden geclassificeerd. Dit classificatiesysteem is in de loop van 2000 door een werkgroep, bestaande uit een groot aantal marktpartijen, in opdracht van Novem ontwikkeld. Het (voorlopige) classificatiesysteem is vastgelegd in de vorm van een Nederlandse Technische Afspraak (NTA, 2001). De tekst van deze NTA is opgesteld door de werkgroep "Classificatie Biomassa" (TNO-MEP, NVA, ECN, Kema, TNO-Bouw, Novem, BRBS, NEN) en goedgekeurd door normcommissie 310029 "Vaste Biobrandstoffen". In de NTA (2001) wordt een classificatiesysteem beschreven voor het indelen en classificeren van biomassastromen als brandstoffen voor energiewinning. Het classificatiesysteem deelt biomassastromen in op basis van een viertal hoofdcriteria:

- typologie en herkomst (-> 3-cijferig groepsnummer),
- vochtgehalte (massapercentage a.r.),
- stookwaarde (MJ/kg a.r.) en
- verschijningsvorm¹¹ (omschrijving + afmeting [cm]).

Op dit moment (januari 2004) is de NTA onder revisie waarbij naast vaste biobrandstoffen ook vloeibare biobrandstoffen worden toegevoegd (NEN, 2004). Momenteel wordt gewerkt aan een Europees Classificatiesysteem (CEN-TC-335) voor vaste biobrandstoffen (CEN, 2003). Het document bevindt zich in de afrondende fase en zal naar verwachting als technische specificatie worden gepubliceerd. Overigens is alleen zogenaamde schone biomassa opgenomen in deze pre-standaard. Dit in tegenstelling tot de Nederlandse NTA waarin bijvoorbeeld wel sloophout en slib is opgenomen.

¹¹ Bijvoorbeeld: pellets, briketten, balen, chips, korrels, slurry, zaagsel, ...

Een onderverdeling van biomassa-stromen in schoon en vervuild is te vinden op de zogenaamde witte en gele lijsten van het Ministerie van VROM. Deze zijn van toepassing op het toe te passen emissieregime van de biomassa conversie-installatie (VROM, 2002).

In het algemeen kunnen biomassa-stromen worden ingedeeld in organische reststromen (houtresiduen, slib, mest, reststromen voedings-/genotmiddelenindustrie (VGI), ...) en specifiek geteelde (energie)gewassen; waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen binnenlands beschikbare stromen en potentieel te importeren stromen van binnen en buiten de EU. Tevens kan onderscheid gemaakt worden tussen de beschikbaarheid en de contracteerbaarheid van biomassa-stromen. Vanwege concurrerende toepassingen (bijv. voedsel, veevoer, ...) is vaak slechts een deel van de beschikbare biomassa ook daadwerkelijk contracteerbaar voor "non-food" toepassingen, zoals grondstof voor productie van synthese-gas.

3.2.2 Binnenlandse beschikbaarheid/contracteerbaarheid organische reststromen

In het kader van de toenemende belangstelling voor de toepassing van biomassa/afval als alternatieve brandstoffen zijn er de laatste jaren diverse studies uitgevoerd naar de beschikbaarheid en contracteerbaarheid van deze stromen. Een uitgebreide beschrijving en een presentatie van de resultaten van deze studies vindt plaats in appendix 1, terwijl in deze paragraaf wordt volstaan met een indicatieve inschatting van het totale potentieel.

Uit de zogenaamde "Marsroutes-studie" (Zeevalkink, 2000) resulteert dat de totale beschikbaarheid van biomassa voor energiedoeleinden in Nederland in 1999 ruim 12.000 kton natte basis, oftewel ca. 105 PJ_{th} per jaar bedroeg (76 PJ_{th} uit binnenland en 29 PJ_{th} import uit EU). Het binnenlandse aanbod bestaat voor driekwart uit biomassa afvalstromen (=reststromen uit productieprocessen, bijv. resthout, slib, afval voedings-/genotmiddelenindustrie (VGI), ...) en voor een kwart uit biomassa bijproducten (=bijproducten uit land- en bosbouw, bijv. dunningshout, mest, stro, ...).

Met name de VGI blijkt met een productie-omvang aan (organische) reststromen van ca. 10.000 kton n.b./jaar een interessante markt met betrekking tot het aanbod van biomassa(rest)stromen (Arcadis, 2001 en Elbersen, 2002). Voor ruim 20% (2.150 kton n.b./jaar) blijkt alternatieve afzet (bijv. voor energie-doeleinden) tot de mogelijkheden te behoren.

Het importaandeel bestaat grotendeels (ca. 90%) uit biomassa bijproducten en voor een klein deel (ca. 10%) uit biomassa afvalstromen. Op grond van een gedetailleerde scenario-analyse werd bepaald dat deze beschikbaarheid, afhankelijk van een groot aantal criteria, mogelijk zou kunnen groeien tot ruim 120 PJ_{th} (incl. import EU) in 2020 (40% bijproducten en 60% afvalstromen).

De ca. 120 PJ_{th} aan potentieel beschikbare organische reststromen voor energiedoeleinden is bij lange na niet voldoende om aan de verwachte vraag naar biomassa op de lange termijn (zie o.a. paragraaf 3.3) te voldoen. Binnenlandse teelt van energiegewassen en/of buitenlandse teelt met import van de ruwe gewassen of tussenproducten met een hogere energiedichtheid (char, olie) is derhalve onontkoombaar.

3.2.3 Binnenlandse beschikbaarheid /contracteerbaarheid energie(teelt)gewassen

Teelt van energiegewassen binnen Nederland kan op twee manieren plaatsvinden, te weten:

- Teelt op cultuurgronden in de land-/akkerbouwsector.
- Combinatieteelt, d.w.z. teelt in combinatie met andere landgebruiksfuncties buiten de land- en akkerbouwsector.

In beide gevallen kan gebruik worden gemaakt van de teelt van monoculturen (bijv. wilg, populier, olifantsgras, etc.) en de teelt van multifunctionele gewassen (bijv. graansoorten, hennep, etc.). Bij monoculturen wordt het volledige gewas aangewend als energiegewas; terwijl bij multifunctionele gewassen slechts een deel van het gewas wordt aangewend als energiegewas. Het andere deel wordt aangewend voor gebruiksdoeleinden met een veelal hoge toegevoegde waarde. Het voordeel van het gebruik van multifunctionele gewassen is dat de hoge toegevoegde waarde van het niet-energiedeel van het gewas bijdraagt aan een reductie van de productiekosten van het resterende gewasdeel dat wordt aangewend als energiegewas.

Door teelt te combineren met andere landgebruiksfuncties (combinatieteelt, multifunctioneel landgebruik) is het mogelijk de netto teeltkosten te minimaliseren. Door de grondkosten volledig toe te rekenen aan de andere gebruiksfunctie van het land behoeven deze niet in de teeltkosten te worden verdisconteerd. Daar de grondkosten in een dichtbevolkt land, zoals Nederland, een aanzienlijk aandeel van de teeltkosten voor haar rekening nemen, leidt combinatieteelt tot een significante reductie van de netto productiekosten en dus tot een betere concurrentiepositie t.o.v. de toepassing van bepaalde organische reststromen en de import van gewassen voor de Nederlandse energievoorziening.

In Nederland staat energieteelt nog in de kinderschoenen en beperken de activiteiten zich tot het bedrijf van enkele proefvelden voor olifantsgras, wilg en populier.

Minnesma (2003) schetst in het rapport “Biomassa – een wenkend perspectief” een beeld van het perspectief voor teelt van energiegewassen in Nederland en de rol die het ministerie van landbouw, natuur en voedselkwaliteit zou kunnen spelen om dit potentieel daadwerkelijk te ontsluiten. Afhankelijk van een groot aantal met name beleids-gerelateerde randvoorwaarden wordt geschat dat het potentieel beschikbare binnenlandse landoppervlak voor teelt van energiegewassen in 2020 varieert van minimaal 20.000 tot maximaal 300.000 ha, waarmee naar de mening van ECN Biomassa een energiepotentieel van ca. 45-60 PJ_{th}/jaar (aannames: 8-12 ton d.s./ha.jr en 18 GJ_{th}/ton d.s.) kan worden gerealiseerd. Vanwege de relatief hoge productiekosten - als potentiële productiekosten worden genoemd 40-125 €/ton d.s., oftewel ca. 2-7 €/GJ_{th} - van energieteeltgewassen in Nederland, zal de bijdrage aan de energievoorziening, voornamelijk in de vorm van teelt van multifunctionele gewassen in combinatieteelt culturen, beperkt blijven tot benutting in niche markten.

3.2.4 Importmogelijkheden van binnen/buiten de EU

In het (recente) verleden is een aantal studies uitgevoerd waarbij is geanalyseerd wat de importmogelijkheden van biomassa uit met name de Baltische Staten en Zuid-Amerika zijn (Wasser, 1995, Bestebroer, 1996, Venendaal, 1998). Uit deze studies volgt dat import vanuit kostenoverwegingen potentieel voordeliger is dan binnenlandse teelt. Punten van aandacht op dit gebied zijn: 1) de “optimale” vorm voor biomassa voor lange-afstand transport (“ruw” of als olie/char/LNG (hoge-energiedichtheid)) en 2) de teeltcondities in genoemde landen (is e.e.a. wel duurzaam?).

Uit de GRAIN-studie (Lysen, 2000) resulteert dat mondiaal gezien ruim 800 EJ_{th}¹² aan energiegewassen op landbouwgronden kan worden geproduceerd, zonder de wereldvoedselproductie in gevaar te brengen. Het gebruik van braakland kan hieraan nog eens 150 EJ_{th} toevoegen. Inclusief organische reststromen, zou de bovengrens van het potentieel aan beschikbare biobrandstoffen meer dan 1000 EJ_{th} per jaar kunnen bedragen.

¹² 1 EJ=1000 PJ

In de praktijk geldt dat de potentiële mondiale contracteerbaarheid van biomassa o.a. afhangt van de bevolkingsgroei, het voedselconsumptiepatroon en de toekomstige landbouwproductiviteit. De schattingen van de contracteerbaarheid variëren van 15-85% van het verwachte mondiale energiegebruik in 2050 (Van den Broek, 2003). Het importpotentieel vanuit de EU25 zal met name afhangen van de gevoerde landbouwpolitiek. Indien Nederland tijdig in dit (mondiale) marktpotentieel participeert, bestaat de mogelijkheid door middel van grootschalige import, een aanzienlijke hoeveelheid relatief schone biobrandstoffen te contracteren. Voor de korte-termijn lijkt import vanuit de EU25 meer voor de hand liggend, dan import vanuit ontwikkelingslanden.

Op dit moment wordt als onderdeel van een groot EU-project “VIEWLS geanalyseerd wat de beschikbaarheid en contracteerbaarheid van biomassastromen (zowel organische reststromen als teeltgewassen) binnen de EU en de kandidaat lidstaten is en op de lange-termijn kan zijn. Tevens wordt geanalyseerd hoe het transport van biomassa (gerelateerde energiedragers) binnen de EU zal kunnen worden georganiseerd (“biomass trading scenarios”).

De duurzaamheid van grootschalige import van biomassa is binnen het Transitieproject Biomassa Internationaal geadresseerd als een kritische succesfactor voor de grootschalige implementatie van biomassa in de Nederlandse economie. Dit punt wordt in breed kader uitgewerkt en dient uiteindelijk te resulteren in een soort van duurzaamheidskeurmerk voor biomassa (ingevulde set van duurzaamheidsindicatoren).

3.2.5 Totaal potentieel en prijsstelling

Het totale potentieel van biomassa(rest)stromen dat op termijn (2020) beschikbaar komt voor Nederlandse energiedoelinden, kan als volgt worden samengevat:

- Binnenlandse organische reststromen : 120 PJ_{th}
- Binnenlandse teelt : 45-60 PJ_{th}
- Totaal binnenland : 165-180 PJ_{th}
- Import vanuit binnen/buiten de EU : aandeel van mondiale 1000.000 PJ_{th}

De prijsstelling van biomassastromen is nog onduidelijk. Relatief “vuile” organische reststromen (bijv. slib, mest, ...) zijn qua prijs (negatief, vanwege vermeden afvoerkosten) het interessants om te benutten, echter beperkt inzetbaar. De schonere organische reststromen (bijv. dunningshout, reststromen VGI, ...) zijn, vanwege concurrerende toepassingsmogelijkheden, reeds minder interessant. Import van energiegewassen vanuit binnen/buiten de EU biedt uit kostentechnisch en capaciteitsoogpunt meer perspectieven dan binnenlandse teelt. De invloed die een toenemende (mondiale) vraag naar (schone) biobrandstoffen op de daadwerkelijke contracteerbaarheid en de prijsstelling heeft, verdient nader onderzoek.

3.3 Potentieel duurzaam syntheseegas

3.3.1 Kader

In de Biomassa Visie, zoals opgesteld in het kader van het Transitietraject Biomassa Internationaal (EZ, 2003), dient in 2040:

1. 30% van het fossiele brandstofgebruik in de transport- en elektriciteitsproductiesector én
2. 20-45% van het fossiele grondstoffengebruik in de (chemische) industriële sector te zijn gesubstitueerd door biomassa-gerelateerde alternatieven.

Verwacht wordt dat (schoon en stikstofvrij) synthesesgas uit biomassa "BioSyngas" een essentiële en onontkoombare rol als multi-functioneel intermediair zal spelen bij de grootschalige introductie van biomassa in genoemde sectoren van de Nederlandse economie. Biosyngas (vnl. CO en H₂) wordt geproduceerd middels vergassing (verbranding met een ondermaat zuurstof) van biomassa. Het ruwe biosyngas dient verregaand te worden gereinigd, alvorens synthese en/of afscheiding van een variëteit aan eindproducten kan plaatsvinden.

Producten die op deze wijze kunnen worden geproduceerd zijn o.a.: gasvormige energiedragers (CO, H₂, "Groen aardgas" (SNG)), vloeibare energiedragers/transportbrandstoffen (FT-diesel, biomethanol, bioethanol, MTBE, DME, enz.) en producten (basis- en fijnchemicaliën, polymeren, enz.). Om aan de Visie-doelstellingen van 2040 te kunnen voldoen is de uiteindelijke realisatie van biosyngasproductieplatformen, waarbij gebruik wordt gemaakt van optimale vergassingsconcepten (bijv. O₂-geblazen wervelbedvergassing, O₂-geblazen entrained-flow vergassing, zie paragraaf 4.2) op zeer grote schaal ("economy-of-scale") onontkoombaar. Daar genoemde technologieën nog in ontwikkeling zijn, is essentieel de ontwikkelingstrajecten te steunen/versnellen om er zorg voor te dragen dat marktimplementatie z.s.m. kan plaatsvinden.

Naast grootschalige biosyngasproductie (implementatie beperkt tot 2-3 plants in Nederland, daar waar aanvoer van grote hoeveelheden biomassa mogelijk is: Rotterdam, Amsterdam, Eemshaven) is de verwachting dat tevens een significant aantal kleinschaliger decentrale biosyngasproductie-eenheden zullen worden geïmplementeerd. Doordat deze eenheden in redelijke getale zullen worden geproduceerd en toegepast ("economy-of-multiplication") en deze gebruik zullen maken van relatief goedkope biomassa(rest)stromen, is de verwachting dat ook biosyngas-productie op decentrale schaal financieel-economisch tot de mogelijkheid zal behoren.

3.3.2 BioSyngas markt

Om aan gestelde beleidsdoelstellingen te kunnen voldoen is het uitermate belangrijk dat de inzet van biomassa plaatsvindt in een groot aantal marktsectoren. Behalve de inzet ter substitutie van thans aangewend fossiel synthesesgas, zie paragraaf 3.1.1, is de verwachting dat biosyngas met name een belangrijke rol zal vervullen bij de verduurzaming van de transportsector, de gasector, de industriële sector en de elektriciteitsproductiesector.

Ook is de verwachting dat de productie van biosyngas op de lange-termijn zal plaatsvinden via hoog-efficiënte thermo-chemische raffinageprocessen, waarbij via fractionering een scala aan producten, waaronder biosyngas, uit biomassa zal worden geproduceerd.

Streefbeeld(en) biosyngas

Het streefbeeld met betrekking tot de inzet van biosyngas in de Nederlandse samenleving kan worden opgebouwd uit een 5-tal subbeelden, die elk de potentie van biosyngas in een bepaalde marktsector/toepassingsgebied vertegenwoordigen. Onderstaande data zijn gebaseerd op de energiebalans van Nederland 2001 (ECN, 2001).

a) Gasector (alternatieve gasvormige energiedragers)

Uitgaande van de huidige inzet van aardgas in de Nederland (1508 PJ_{th}) en een verwachte stijging in het verbruik van 2%/jaar, bedraagt het verwachte verbruik in 2010, 2020 en 2040 1800 PJ_{th}, 2200 PJ_{th} en 3250 PJ_{th} (dit is meer dan het totale Nederlandse primaire energiegebruik in 2001 van 3145 PJ_{th}, zodat de genoemde bijdrage in 2040 als zeer speculatief mag worden verondersteld). Indien we aannemen dat de duurzame energiedoelstellingen (5% in 2010, 10% in 2020 en 30% in 2040 (EZ, 2003)) gelijkwaardig door de diverse sectoren (lees inzet fossiele energiedragers) moeten worden gedragen, dan bedraagt het aandeel aardgas dat door een "Groen alternatief" moet worden ingevuld 90 PJ_{th} in 2010, 220 PJ_{th} in 2020 en 980 PJ_{th} in 2040.

b) Transportsector (alternatieve transportbrandstoffen)

Uitgaande van de huidige inzet van transportbrandstoffen (benzine + diesel, 50/50) in de Nederland (462 PJ_{th}) en een verwachte stijging in het verbruik van 2%/jaar, bedraagt het verwacht verbruik in 2010, 2020 en 2040 550 PJ_{th}, 700 PJ_{th} en 1000 PJ_{th} (zeer speculatief). Indien we aannemen dat aan de Europese beleidsdoelstellingen moet worden voldaan (5,75% substitutie in 2010, 10% substitutie in 2020 (aanne) en 30% substitutie in 2040 (BM Visie doelstelling Transitietraject Biomassa Internationaal)) dan bedraagt het aandeel fossiele transportbrandstoffen dat door biotransportbrandstoffen moet worden ingevuld 32 PJ_{th} in 2010, 67 PJ_{th} in 2020 en 300 PJ_{th} in 2040. Indien we hierbij aannemen de doelstelling voor 2005 (2,75% substitutie, oftewel 14 PJ_{th}) wordt ingevuld met conventionele biotransportbrandstoffen (conventionele bioethanol als benzinesubstituut en biodiesel als dieselsubstituut) dan dient alleen het additionele benodigd substitutie-aandeel met alternatieven te worden ingevuld. Als benzinesubstituut biedt cellulose-bioethanol via fermentatieprocessen het meeste perspectief; terwijl als dieselsubstituut Fischer-Tropsch (FT) diesel het meest perspectiefvol is. In de toekomstige vraag naar FT-diesel als dieselsubstituut moet worden voorzien middels de geschetste biomassavergassings- en gasreinigings-technologieën, waarbij geproduceerd synthesegas met een efficiency van ca. 70% in FT-diesel wordt geconverteerd. Op grond van deze argumenten kan worden berekend dat de toekomstige syngasvraag voor de productie van FT-diesel bedraagt: 13 PJ_{th} in 2010, 39 PJ_{th} in 2020 en 204 PJ_{th} in 2040. Indien ook het benzinesubstituut bioethanol middels de productie van biosyngas zou geschieden, dan resulteert dit zelfs in een verdubbeling van de bovengenoemde syngasvraag.

c) Industriële sector (alternatieve producten)

Uitgaande van de huidige (2001) inzet van aardolie in de Nederlandse chemische industrie (390 PJ_{th}) en ervan uitgaande dat dit verbruik verder niet zal stijgen bedragen de verwachte verbruiksgedragingen in 2010, 2020 en 2040 ook 390 PJ_{th}. Indien we aannemen dat de doelstellingen (5% in 2010, 10% in 2020 en 30% in 2040 (EZ, 2003)) gelijkwaardig door de diverse sectoren (lees inzet fossiele energiedragers) moeten worden gedragen dan bedraagt het aandeel aardolie dat door een "Groen alternatief" (lees syngas) moet worden ingevuld 18 PJ_{th} in 2010, 39 PJ_{th} in 2020 en 117 PJ_{th} in 2040.

d) Elektriciteitsproductiesector

In de elektriciteitssector zijn in 2001 de volgende primaire energiedragers ingezet: steenkool (262 PJ_{th}), aardolie (202 PJ_{th}), aardgas (474 PJ_{th}) en kernenergie (41 PJ_{th}), resulterend in een totale inzet van 979 PJ_{th}. Daar het aardgasaandeel dat voor substitutie in aanmerking komt reeds is verdisconteerd in de gassector resteert als substitutiepotentieel voor synthesegas, ter vervanging van de overige primaire fossiele energiedragers steenkool en aardolie 464 PJ_{th}. Bij een stijging van 2%/jaar komt dit overeen met 555 PJ_{th} in 2010, 675 PJ_{th} in 2020 en 1005 PJ_{th} in 2040. Bij toepassing van de bekende duurzame energie doelstellingen resulteert dit in een biosyngassubstitutie-potentieel van 28 PJ_{th} in 2010, 55 PJ_{th} in 2020 en 166 PJ_{th} in 2040.

e) Rol thermo-chemische bioraffinage

Een belangrijk streefbeeld voor de lange-termijn is dat biomassa grootschalig zal worden verwerkt in zeer efficiënte thermo-chemische raffinage processen. Dit houdt in dat de ruwe biomassa in opeenvolgende stappen zal worden gefractioneerd in een scala producten. Een voorbeeld van een dergelijke proces is: biomassa -> voorbehandeling -> vergassing -> gasreiniging/-conditionering -> biosyngas -> synthese/afscheiding -> WKK-productie. Bij elk der samenstellende substappen worden producten met een hoge toegevoegde waarde afgescheiden, waarna de restfractie het proces verder doorloopt. Het thermo-chemische raffinage-concept integreert de diverse marktsectoren a) t/m d) in één geïntegreerd concept en mag derhalve als uiteindelijk lange-termijn streefbeeld niet ontbreken.

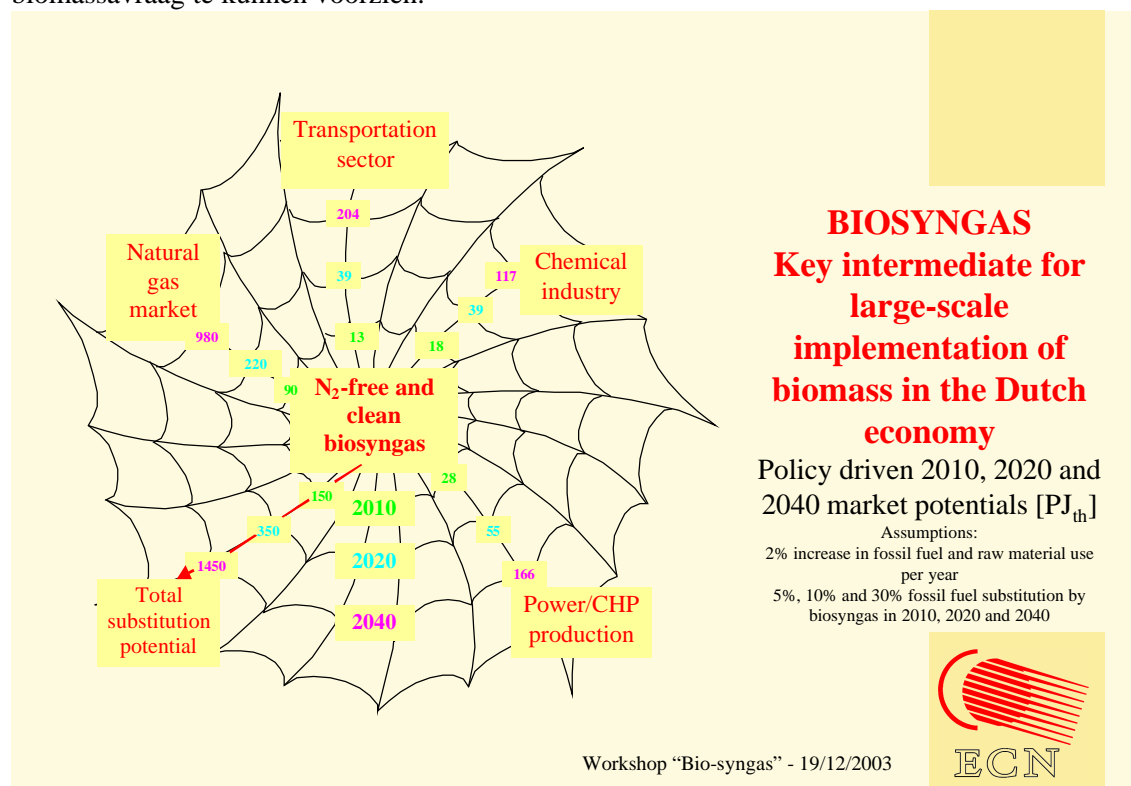
Tabel 8: Biosyngaspotentieel op grond van duurzame energiedoelstellingen (in PJ_{th} vermeden primaire energie)

| Sector | 2010 | 2020 | 2040 |
|------------------|---------|---------|-----------|
| Gassector | 90 | 220 | 980 |
| Transportsector | 13-26 | 39-78 | 204-408 |
| Chemische sector | 18 | 39 | 117 |
| E-sector | 28 | 55 | 166 |
| Totaal | 150-160 | 350-400 | 1450-1650 |

3.3.3 BioSyngas markt versus biomassa contracteerbaarheid

De toekomstig verwachte vraag naar BioSyngas ter vergroening van de Nederlandse Economie is enorm. De vergroening van de aardgassector is de grootste substitutiemarkt, gevolgd door de transportsector, de E-sector en de chemische sector.

Met een totaal mogelijke BioSyngas vraag van 150-160 PJ_{th} in 2010, 350-400 PJ_{th} in 2020 en 1450-1650 PJ_{th} in 2040 (zeer speculatief) is direct duidelijk dat deze vraag de binnenlandse contracteerbaarheid van organische reststromen (120 PJ_{th} in 2020) voor energiedoelinden aanzienlijk overstijgt. Import van binnen en buiten de EU, alsmede binnenlandse teelt van energiegewassen voor niche toepassingen, is derhalve onontkoombaar om aan in de verwachte biomassavraag te kunnen voorzien.



Figuur 2: Potentieel van duurzaam sythesegas

Grootschalige import van biomassa zal naar verwachting worden gecombineerd met de realisatie van een gering aantal grootschalige BioSyngasproductieplatforms, voor de productie van een variëteit aan eindproducten op plaatsen van de aanvoer en op-/overslag van grote hoeveelheden biomassa voor de hand ligt (bijv. Amsterdam, Rijnmond, Eemshaven). Tevens zullen naar verwachting tevens een aantal decentrale BioSyngasproductie-eenheden worden gerealiseerd voor de productie van een specifiek eindproduct, gebruikmakende van ter plekke beschikbare relatief goedkope organische reststromen.

3.3.4 Inkadering BioSyngas in Transitiepaden

BioSyngas vormt een centrale rol in de gedefinieerde Transitiepaden:

- C7: BioSyngas (onderdeel: Biomassa Internationaal)
- D3: Duurzaam Syngas (onderdeel: Modernisering Energie Ketens)

en zijdelings bij die genoemd in de paden:

- A4: Productie van gasvormige energiedragers (onderdeel: Nieuw Gas)
- B3: De realisatie van een Duurzame Energie demo-park in de Rijnmond (onderdeel: Duurzaam Rijnmond (R3))
- C9: Waterstof uit biomassa (onderdeel: Biomassa Internationaal)
- C10: Bioraffinage (onderdeel: Biomassa Internationaal)

Voor al deze Transitiepaden is een RD&D-traject in voorbereiding dat in EOS en/of de UKR ter subsidiëring zal worden voorgelegd. ECN Biomassa is de trekkende partij voor een aantal van deze activiteiten (C7, C9); terwijl het bij de overige activiteiten (A4, B3, C10) een significante rol vervuld. ECN Biomassa lijkt derhalve dé partij te zijn om de BioSyngas-activiteiten te coördineren/structureren, zodat de diverse Trajecten zo optimaal mogelijk (synergy) kunnen worden uitgevoerd, waardoor de daadwerkelijke implementatie zal worden bespoedigd.

Om het BioSyngas RD&D-traject verder te specificeren heeft ECN Biomassa i.s.m. SDE en TechnoInvent BV in de BSE-regeling Ondersteuning Transitie-Coalities het project “BIOSYNGAS: multifunctioneel intermediair voor de productie van gasvormige energiedragers, transportbrandstoffen, chemicaliën, kracht en/of warmte uit biomassa” ingediend. In dit project zullen de volgende items worden geadresseerd:

1. installatie (industriële) klankbordgroep (hiervoor zal een scala aan geïnteresseerde partijen worden uitgenodigd),
2. uitwerking O&O-traject en coalitievorming grootschalige BioSyngas productie,
3. ondersteuning demonstratie decentrale BioSyngas productie,
4. analyse internationaal speelveld/actoren,
5. uitwerking integrale ketenaspecten en
6. analyse van de kritische succesfactoren.

De activiteiten dienen te resulteren in een samenhangend geheel van experimenten en onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten die in de UKR en EOS zullen worden uitgewerkt ter bespoediging van de uiteindelijke marktimplementatie.

4. PRODUCTIE VAN DUURZAAM SYNTHESGAS

4.1 Logistiek, opslag en voorbereiding van biomassa

4.1.1 Logistiek en opslag

Synthesegasproductie vindt plaats op een schaal van meer dan enkele duizenden MW_{th} of enkele honderden MW_{th} afhankelijk van de toepassing van het gas, zie paragraaf 2.2.3. Dit komt overeen met circa 30 resp. 3 PJ/jaar aan biomassa. Gezien de beperkte beschikbaarheid van biomassa in Nederland van 165-180 PJ/jaar (zie paragraaf 3.2.5) betekent dit voor de grote installaties van enkele duizenden MW_{th} dat biomassa zal moeten worden geïmporteerd. Voor de kleinere installaties zal mogelijk lokale biomassa beschikbaar zijn.

Bij grootschalige import van biomassa wordt gebruik gemaakt van vervoer per boot. In een afgeronde studie van ECN met Shell, BTG, Universiteit Utrecht en Ecofys is gerekend aan een systeem waarbij schone biomassa wordt verzameld in de Baltische Staten, vervolgens per vrachtauto wordt getransporteerd naar een haven en per boot naar de Maasvlakte wordt gebracht (Calis, 2002). Aangenomen is dat op elke “knoop” de brandstof wordt overgeslagen en er een tijdelijke opslagmogelijkheid is. Uitgedrukt als prijs per GJ brandstof blijken de overslagkosten totaal 0,7 €/GJ te bedragen, de opslagkosten minder dan 0,1 €/GJ, het wegtransport (gemiddeld 70 km) 0,3 €/GJ en het zeetransport (circa 2500 km) 0,6 €/GJ. Totaal kost het traject van lokale levering in de Baltische Staten tot de aankomst op de Maasvlakte dus 1,7 €/GJ (overeenkomend met bijna 20 €/ton brandstof). In de gemelde studie is uitgegaan van een prijs van biomassa bij aflevering in de Baltische Staten van 4 €/GJ, bij aankomst in Nederland is dat dus 5,7 €/GJ.

Voor kleinschalige installaties kan mogelijk gebruik worden gemaakt van lokaal in Nederland aanwezige biomassa. Ten opzichte van de grootschalige import, betekent dit minder keren laden/lossen en tevens is op minder plaatsen een opslag. Daar staat echter tegenover dat het laden/lossen en ook het wegtransport minder grootschalig kan plaatsvinden. In een recente ECN-studie is, met lokale biomassa als uitgangspunt, een vergelijking is gemaakt tussen centrale conversie (groot, relatief goedkoop en efficiënt) met lange transportafstanden en decentrale conversie met geringere transportkosten (Van der Drift, 2002). Bij een gemiddelde afstand van 70 km af te leggen per vrachtauto, zijn de totale logistieke kosten ruim 3 €/GJ brandstof ofwel ruim 20 €/ton brandstof. De kosten uitgedrukt per energiewaarde zijn relatief hoog omdat lokale biomassa relatief nat is en dus een lage verbrandingswaarde heeft.

4.1.2 Drogen

Verse biomassa is in het algemeen nat. Hout kan tot circa 60% aan water bevatten, bij grasachtigen is het nog meer. Het drogen van biomassa is in het algemeen een noodzakelijke voorbereiding voor vergassing. Het rendement van de vergasser is namelijk sterk afhankelijk van het vochtgehalte van de brandstof. Veelal wordt 15% vocht als een streefwaarde genomen. Voor grootschalige toepassing loont het echter de moeite nog verder te drogen.

De eerste droogstap is relatief eenvoudig. Binnen enkele maanden kunnen houtstammen, mits opgestapeld op de juiste wijze, op natuurlijke wijze drogen tot circa 30% vocht. Het verder drogen dient in het algemeen geforceerd te gebeuren. De meest bekende techniek hiervoor is de trommeldroger. Als energiebron kan aardgas worden gebruikt, maar gunstiger is het om (lage-temperatuur) restwarmte in te zetten.

Het drogen van biomassa van 30% naar 10% vocht in een reële drooginstallatie vergt circa 7% (0,07 MW warmte per MW_{th}) verbrandingsenergie van het hout. Dit is vaak ruimschoots aanwezig. Alleen al bij het productieproces van Fischer-Tropsch diesel uit synthesegas, dat is verkregen na vergassing van hout met 10% vocht, komt meer dan 15% aan warmte vrij op de juiste temperatuur. Het grootschalig drogen kost circa 0,1 €GJ als gebruik kan worden gemaakt van restwarmte.

4.1.3 Verkleinen

In alle gevallen dient de biomassa te worden verkleind tot zogenaamde chips van enkele centimeters. Dit kost, inclusief een gering elektriciteitsverbruik, circa 0,1 €GJ als het grootschalig kan plaatsvinden. Het eventueel verder verkleinen van biomassa is in sommige gevallen noodzakelijk, zie paragraaf 4.2. Met name de verkleining tot deeltjes onder 1 mm kost veel elektriciteit.

4.2 Vergassing van biomassa

4.2.1 Technieken

Vergassing is het proces waarbij een vloeibare of vaste brandstof wordt omgezet in een brandbaar gas. Het doel van vergassing is in het algemeen om zoveel mogelijk verbrandingsenergie uit de brandstof om te zetten in een brandbaar gas. In tegenstelling tot vergisting, verloopt vergassing bij relatief hoge temperaturen, in de praktijk circa 700°C of hoger. Deze temperatuur wordt meestal bereikt door met lucht of zuurstof een deel van de brandstof of het geproduceerde gas te verbranden.

Hoge temperatuur vergassing

De temperatuur waarbij het vergassingsproces plaatsvindt, bepaalt in hoge mate welke gassen worden geproduceerd. Boven temperaturen van circa 1300°C worden alle verbindingen afgebroken tot H₂ en CO (en H₂O en CO₂). Het geproduceerde gas wordt *synthesegas* genoemd. Het synthesegas dient zo min mogelijk N₂ te bevatten, zie paragraaf 2.2.1.

Het vergassen van vaste brandstoffen bij hoge temperatuur kan plaatsvinden in een *entrained flow* reactor, ook wel stofwolkvergasser genoemd. Momenteel is er een aantal soorten entrained flow vergassers op de markt. In Nederland staat een kolenvergasser van dit type in Buggenum in Limburg voor de productie van circa 253 MW_e elektriciteit. Een entrained flow reactor kenmerkt zich, naast een hoge temperatuur, door korte verblijftijden, grote schaal en in het algemeen bedrijf met zuurstof en op druk. Er zijn entrained flow vergassers voor vaste brandstoffen, vloeistoffen (en slurries) en gassen. Bij vaste brandstoffen worden eisen gesteld aan de maximale deeltjesgrootte. Te grote deeltjes worden namelijk onvoldoende omgezet in de korte tijd. Kolen worden in het algemeen gemalen tot deeltjes van 50-100 µm. In appendix 3 wordt de entrained flow vergasser nader toegelicht.

Lage temperatuur vergassing

Het alternatief van het vergassen bij hoge temperatuur is het vergassen bij relatief lage temperaturen. In de praktijk is dit bij 700-1000°C, waarbij de reactiesnelheid voldoende hoog is om een redelijke omzettingsgraad te bereiken. Het geproduceerde gas bevat in dit geval (grote hoeveelheden) koolwaterstoffen, met name methaan. Het gas wordt *productgas* genoemd. In de praktijk is het onvermijdelijk dat naast kleine koolwaterstoffen zoals methaan en etheen, tevens grote koolwaterstoffen zoals teer in het productgas zitten. Veelal vertegenwoordigen de koolwaterstoffen in het productgas een groot deel van de verbrandingswaarde van het gas. Het gas is daarom minder geschikt als *synthesegas*. *Productgas* is echter juist zeer geschikt voor de synthese van SNG (synthetisch aardgas), waarbij kleine koolwaterstoffen het gewenste eindproduct zijn, en voor de productie van elektriciteit in een STEG. Het wordt meestal ingezet als brandstof voor een gasmotor, gasturbine of om bij te stoken in een kolencentrale. Het koolwaterstofrijke productgas kan echter ook worden omgezet in synthesegas door de koolwaterstoffen af te breken. Dit kan thermisch (verhitten tot temperaturen van circa 1300°C, analoog aan de directe productie van synthesegas) of katalytisch.

Vergassing bij lage temperatuur (700-1000°C) kan op vele wijzen. De bekendste soort is de wervelbedreactor, zie appendix 4. Met name voor de grotere schaal is het *circulerend wervelbed* (CFB: circulating fluidised bed) populair. Essent bezit een 85 MW_{th} CFB-vergasser waarin sloophout wordt vergast en het gas wordt bijgestookt in de kolencentrale Amer-9 in Geertruidenberg. Deze wordt bedreven bij atmosferische druk en met lucht. In Zweden staat de enige CFB-vergasser op druk (Ståhl, 2001). Commerciële CFB-vergassers bedreven met zuivere zuurstof zijn er nog niet.

Een andere soort wervelbedvergasser is de indirecte vergasser. Hierbij wordt de brandstof verhit zonder zuurstof (of lucht) en wordt de energie hiervoor meestal onttrokken uit de verbranding van het koolstof-rijke residu van genoemde verhitting. De verbranding vindt plaats in een gescheiden reactor en de rookgassen worden apart afgevoerd. Een indirecte vergasser bestaat dus altijd uit minimaal twee reactoren en produceert een N₂-arm productgas en een rookgas. Het gebruik van zuivere zuurstof is niet nodig. De bekendste indirecte vergasser staat in Güssing (Oostenrijk) en is gebouwd volgens het door de TU-Wenen ontwikkelde FICFB-principe (ECN, 2002) en geleverd door Repotec. Het is een atmosferische vergasser, heeft een vermogen van 8 MW_{th} en produceert circa 2 MW_e elektriciteit. Een ander voorbeeld is de reactor ontwikkeld door Battelle, later FERCO. Het proces is genaamd SilvaGas. Hiervan staat een exemplaar van 40 MW_{th} in Burlington (Vermont, USA) (Paisley, 2001).

4.2.2 Systemen

In de vorige paragraaf is toegelicht dat voor de productie van *synthesegas* (veel H₂ en CO) een hoge temperatuur noodzakelijk is, 1300°C of hoger. De meest voor de hand liggende technologie hiervoor is de entrained flow vergasser. Dit is een voor kolen en vloeistoffen bewezen techniek en beschikbaar op grote schaal bij diverse leveranciers. Met biomassa als brandstof is er echter veel minder ervaring. Verwacht wordt echter door de experts dat dit geen principiële problemen met zich meebrengt, zie appendix 3. Het grootste probleem wordt verwacht stroomopwaarts van de vergasser: de voorbereiding en het voeden van de biomassa-brandstof aan de entrained flow vergasser. De volgende vier opties verschillen op dit punt.

Optie 1: entrained flow zonder voorbereiding

Biomassa wordt gemalen tot deeltjes voldoende klein om (nagenoeg) volledig te worden omgezet in een entrained flow vergasser. Hoewel het systeem van optie 1 simpel is, is het malen van biomassa problematisch. In tegenstelling tot de brosse kolen is biomassa namelijk taai en vezelachtig. Het malen kost hierdoor zeer veel (elektrische) energie. Metingen bij ECN tonen aan dat het malen tot 200 µm circa 0,05 kW_e kost per kW_{th} verbrandingsenergie van de gemalen biomassa (Bergman, 2003) (Boerrigter, 2004). Dit is meer dan 10% als terugerekend wordt naar primaire energie!

Optie 2: biomassa bewerken tot “kolen” t.b.v. entrained flow vergasser

Biomassa wordt voorafgaande aan het malen bros gemaakt. Gebleken is uit onderzoek bij ECN dat een hittebehandeling bij 250-300°C de biomassa bros maakt en de energieconsumptie bij het malen met meer dan 80% wordt gereduceerd. Het proces heet torrefactie. Naast de enorme besparing op het malen staat een (gering) energieverlies vanwege de benodigde energie voor de torrefactie. Uit testen bij ECN blijkt dat dit beperkt kan blijven tot 4% van de verbrandingsenergie van de biomassa (Bergman, 2003; Boerrigter, 2004).

Optie 3: biomassa bewerken tot vloeistof t.b.v. entrained flow vergasser

Biomassa wordt behandeld middels zogenaamde flash-pyrolyse. Hierin wordt in korte tijd bij circa 500°C biomassa omgezet in een teerachtige vloeistof (Bridge & Bridgwater, 1989; Meier, 1999; Venderbosch, 1999). De vloeistof is eenvoudig te voeden aan een entrained flow reactor. Een extra voordeel is het geringe energieverbruik bij het op druk brengen van vloeistoffen. Daar tegenover staat echter dat de olie-opbrengst beperkt is, maximaal circa 70 massa%. Dit nadeel kan deels worden gereduceerd door de gelijktijdig geproduceerde char¹³ in de olie bij te mengen. Het energetisch rendement naar een olie/char-slurrie is circa 85% (Venderbosch, 2002; Henrich, 2002).

Optie 4: biomassa bewerken tot gas t.b.v. entrained flow vergasser

Biomassa wordt voorafgaande aan de introductie in de entrained flow reactor bij een lage temperatuur vergast. Dit resulteert feitelijk in een nieuwe brandstofvorm die buitengewoon geschikt is voor de hoge-temperatuur entrained flow vergasser: gas. De meest voor de hand liggende lage-temperatuur vergasser is een wervelbedvergasser. Deze is beschikbaar op redelijk grote schaal en stelt geen hoge eisen aan de brandstofgrootte (tot vele centimeters). Wervelbedvergassers blijken in de praktijk niet in staat de brandstof volledig om te zetten in gas. Vaak blijft circa 10% over in de vorm van char (houtskool) (Van der Drift, 2002). Dit deel is echter per definitie klein en ook zeer geschikt als brandstof voor een entrained flow vergasser.

Bovengenoemde vier opties zijn allen gericht op het geschikt maken van biomassa als brandstof voor een hoge-temperatuur entrained flow reactor. Bij de hoge temperatuur wordt voornamelijk H₂ en CO geproduceerd als brandbare componenten. Het gas is daarmee geschikt als synthesesgas. Bij het gebruik van een katalysator is een hoge temperatuur echter niet noodzakelijk. Optie 5 is de katalytische route.

Optie 5: katalytische upgrading

Biomassa wordt vergast bij lage temperatuur. Evenals bij optie 3 lijkt hiervoor een wervelbedvergasser de meest geschikte techniek. Het geproduceerde productgas bevat grote hoeveelheden koolwaterstoffen (zie appendix 4). Analoog aan de synthesesgasproductie uit aardgas wordt dit productgas katalytisch afgebroken tot synthesesgas. Voorafgaande aan deze katalytische reformer dient het gas te worden ontdaan van grote koolwaterstoffen (teer) omdat deze in de reformer aanleiding geven tot roetvorming. Voor de verwijdering van teer is de bij ECN ontwikkelde OLGA een goede optie (Bergman, 2002; Boerrigter, 2003).

¹³ Char is de algemene naam voor het koolstof-rijke residu na ontgassing van het originele biomassa-materiaal (houtskool is de Nederlandse naam voor char als hout het originele materiaal is).

Naast bovengenoemde meer algemene methoden om synthesegas te maken uit biomassa, zijn er enkele specifieke processen ontwikkeld voor de productie van synthesegas uit biomassa. De volgende twee opties kunnen genoemd worden. Gerealiseerd dient te worden dat beide processen slechts tot een maximale schaal van circa 50 MW_{th} kunnen worden toegepast. Wel zijn beide opties op redelijk korte termijn te realiseren. Het voordeel van kleinschalige systemen ligt in het feit dat goedkope lokale brandstoffen kunnen worden gebruikt. Het nadeel is dat de bijdrage aan de duurzame energie doelstellingen beperkt is.

Optie 6: Carbo-V

Sinds 1993 wordt gewerkt aan de ontwikkeling van het Carbo-V-proces door Choren (het vroegere UET) in Freiberg in Duitsland, zie appendix 6. Choren heeft een atmosferische 1 MW_{th} testfaciliteit tot haar beschikking. In september 2003 is de nieuwe installatie met een capaciteit van circa 30 MW_{th} in bedrijf genomen. Het Carbo-V concept lijkt in eerste instantie op boven beschreven optie 3: de brandstof wordt vergast om vervolgens bij hoge temperatuur in een entrained flow vergasser te worden omgezet in synthesegas. Het belangrijke verschil wordt echter gevormd door de stap ná de entrained flow vergasser. Bij Carbo-V wordt fijne char geïnjecteerd dat zal vergassen en daarbij de temperatuur van het gas verlaagt ten gunste van brandbare moleculen zoals H₂ en CO. Deze zogenaamde *chemische quench* is mogelijk omdat in het Carbo-V concept de vergassing plaatsvindt bij zeer lage temperatuur (400-500°C) waardoor relatief veel char wordt geproduceerd. Het Carbo-V-concept is beperkt opschaalbaar. De reden hiervoor is de keuze van de vergasser (trommeloven) en de eisen die gesteld worden aan de char-injectie. Verder is het bedrijven van de Carbo-V reactor op zuivere zuurstof nog niet experimenteel aangetoond. Hoogstwaarschijnlijk is dit in de voorbehandeling (de vergasser) problematisch en is het synthesegas dan niet geheel N₂-vrij.

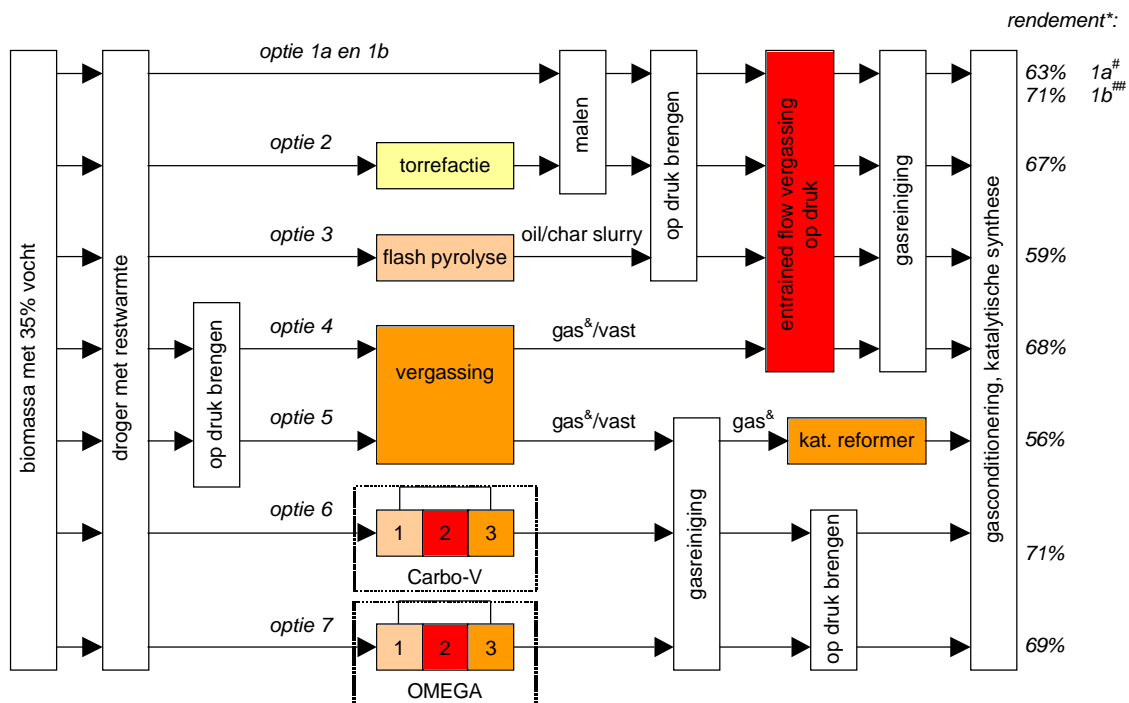
Optie 7: OMEGA

Oxytec in Leipzig heeft de OMEGA¹⁴-vergasser ontwikkeld (voorheen 2SV-reactor) (Oxytec Energy, 2003), zie appendix 5. Oxytec heeft een testinstallatie van enkele MW_{th}. De OMEGA-vergasser is een zogenaamde vastbedreactor waarin brandstof bovenin wordt toegevoegd en het gas de reactor onderin verlaat. Ergens halverwege wordt zuurstof (of lucht) toegevoegd en plaatselijk een zeer hoge temperatuur gecreëerd. In principe wordt hierbij het synthesegas geproduceerd. Vanwege de relatief geringe reactiviteit van char, zal dit de hoge temperatuur "overleven" en als chemische quench dienen, zie ook optie 6. Helemaal onderin worden de assen gesmolten om als slak te kunnen worden afgetapt. De OMEGA-vergasser combineert dus meerdere processen in één reactor. De OMEGA-vergasser is beperkt opschaalbaar. Het is echter zeer flexibel wat betreft brandstof en eventuele verontreinigingen.

Bovengenoemde zeven opties zijn schematisch weergegeven in Figuur 3. Op dit moment worden genoemde routes bij ECN uitgebreid gemodelleerd om een uitspraak te kunnen doen over de verschillen in rendementen en economie. Duidelijk is wel dat het rendement een zeer grote invloed heeft op de economie (prijs van het eindproduct) als wordt uitgegaan van schone en dus dure biomassa. In Hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de economische aspecten van routes 1, 3 en 4.

Ter indicatie is in Figuur 3 van de verschillende opties aangegeven wat de typische rendementen zijn. Hierin is bij optie 1 onderscheid gemaakt tussen de zogenaamde 200 µm en 1 mm route, zijnde de typische biomassagrootte die vereist wordt door de entrained flow vergasser. De 200 µm route is een conservatieve route en heeft een maximale analogie met kolen. De 1 mm route veronderstelt dat biomassa aanzienlijk groter kan zijn dan kolen vanwege de relatief hoge reactiviteit van biomassa. Er zijn aanwijzingen dat biomassa van 1 mm voldoende kan worden omgezet bij 1300-1500°C in een entrained flow vergasser.

¹⁴ OMEGA: Oxygen MEltinG ASification



legenda:

| |
|--------------|
| 1300-1500° C |
| 700-1000° C |
| 400-600° C |
| 250-300° C |

*: rendement: $LHV \text{ synthesesgas} / (LHV \text{ hout} + \text{energieverbruik malen} + \text{energieverbruik O}_2\text{-productie} + \text{energieverbruik compressie O}_2 \text{ en CO}_2 \text{ of syngas}) [MW/MW]$, elektriciteit is "teruggerekend" naar primaire energie

#: optie 1a: malen tot 200 mm

##: optie 1b: malen tot 1 mm

&: productgas

LHV: (onderste) verbrandingswaarde of stookwaarde

Figuur 3: Diverse opties voor het maken van synthesesgas uit biomassa met globale rendementen, zie tekst voor beschrijving van de opties

4.2.3 Vergelijking en evaluatie

Uit de gegeven rendementen zoals gegeven in Figuur 3 is duidelijk dat synthesesgas gemaakt kan worden uit hout met een overall rendement van rond de 70%. Hierin zit niet verwerkt de elektriciteit die geproduceerd kan worden in het systeem door gebruik te maken van de hogetemperatuur warmte die vrijkomt. Dit kan het rendement fors verhogen.

Er kan worden geconcludeerd dat de opties 1b (malen tot 1 mm), 2 en 4 de meest efficiënte grootschalige routes zijn om biomassa om te zetten in synthesesgas. Als optie 1b technisch mogelijk is, dan is dit economisch de aantrekkelijkste optie omdat in opties 2 en 4 geïnvesteerd dient te worden in extra installaties. ECN is momenteel de mogelijkheden van het vergassen van relatief grote biomassadeeltjes direct in een entrained flow reactor (optie 1b) aan het onderzoeken.

Van de beide kleinschalige routes (opties 6 en 7) kan gezegd worden dat het totale rendement niet achterblijft bij de grootschalige varianten. Dat is met name een gevolg van de eerder genoemde "chemische quench".

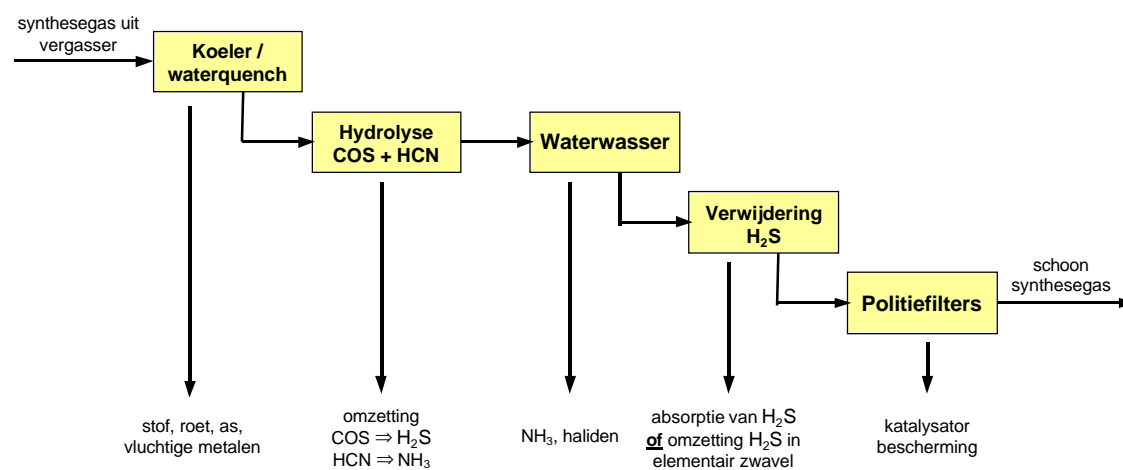
4.3 Reinigen van synthese gas

In de vorige paragraaf is een zevental opties beschreven om via vergassing *synthesegas* uit biomassa te produceren. In zes van de concepten wordt de biomassa, al dan niet na een voorbehandeling, op een hoge temperatuur gebracht waarbij het *synthesegas* wordt gevormd. Doordat het gas op een temperatuur van rond de 1300 tot 1500°C is geweest zijn alle organische componenten volledig afgebroken. Het gas uit de vergasser zal in essentie alleen H₂, CO, CO₂ en H₂O als hoofdcomponenten bevatten. De anorganische componenten uit de biomassa zitten nog wel in het gas en deze moeten verwijderd worden om het gas op specificatie te brengen.

In optie 5 wordt de biomassa op een lagere temperatuur vergast en niet op een hoge temperatuur gebracht. Het *productgas* bevat daardoor ook nog verbindingen als methaan (CH₄), hogere lineaire koolwaterstoffen (C_xH_y), benzeen, toluen en teren, naast de genoemde hoofdcomponenten en de anorganische verontreinigingen. In de katalytische synthesegasproductie (“reformer”) worden CH₄ en de koolwaterstoffen omgezet in de synthesegascomponenten H₂ en CO. Voorafgaand aan de reformingsreactor moet het gas van de teren en de anorganische verontreinigingen worden ontdaan.

4.3.1 Natte reiniging

Anorganische componenten die in het gas aanwezig kunnen zijn betreffen de zwavelverbindingen H₂S, COS en CS₂, de stikstofverbindingen NH₃ en HCN, de halogeniden HCl, HBr en HF, vluchtige natrium en kalium verbindingen (alkalimetalen) en daarnaast stof, roet en asdeeltjes (vergelijk Tabel 2). Voor de verwijdering van anorganische verontreinigingen uit synthesegas zoals dat in een entrained-flow vergasser wordt geproduceerd zijn commerciële processen beschikbaar. Hierbij is het uitgangspunt dat het gas geen andere (organische) verbindingen bevat. Een typisch voorbeeld van complete gasreiniging wordt weergegeven in Figuur 4 - aangezien het systeem gebaseerd is op koelen en wassen met water wordt het ook wel “natte” reiniging genoemd.



Figuur 4: Schematische beschrijving van een “natte” gasreiniging voor de verwijdering van anorganische verontreinigingen uit synthesegas. De verwijderde verbindingen staan aangegeven.

Het hete gas uit de vergasser wordt door het injecteren van water in een waterquench snel afgekoeld, eventueel nadat eerst een deel van de warmte in het gas is teruggewonnen met een gaskoeler. Het stof, roet en de asdeeltjes in het gas worden onder in de waterquench afgescheiden. Door de afkoeling zijn ook de vluchtige metalen vast geworden en deze verontreinigingen worden daarmee ook in deze stap afgescheiden. De basis van de gasreiniging vormt de waterwaster waarmee de wateroplosbare anorganische verontreinigingen worden verwijderd. Zowel COS als HCN lossen echter langzaam op in water waardoor zeer grote wassers noodzakelijk zouden zijn om de vereiste verwijderingniveaus te halen. Daarom worden eerst in een katalytische hydrolysestap deze verbindingen omgezet in respectievelijk H₂S en NH₃. In de waterwaster die bedreven wordt op een temperatuur rond de 40°C wordt al het NH₃ en de halogeniden (vnl. HCl) verwijderd. Als laatste wordt het H₂S verwijderd. Afhankelijk van de concentratie van het H₂S wordt gekozen door verwijdering met absorptentia als zinkoxide of voor de installatie van een zwavelverwijderingsproces waarin het H₂S wordt omgezet in elementair zwavel. Bij lage concentraties wordt in de regel voor absorptentia gekozen. Wanneer de concentraties zo hoog zijn dat de verversingsfrequentie (en de daaruit voorkomende kosten) te hoog wordt, dan loont het om een separaat proces te installeren. Het synthesegas is nu gereinigd en geschikt voor toepassing. Als laatste stap worden echter vaak politiefilters in de vorm van actiefkoolfilters geplaatst om de katalysator van het nageschakelde syntheseproces te beschermen tegen 'doorslag' van verontreinigingen bij eventuele storingen in de gasreiniging.

Met de hierboven beschreven natte reiniging kunnen typisch verwijderingniveaus tot < 10 ppbv worden bereikt - ruimschoots beneden de noodzakelijke verwijderingniveaus (zie Tabel 2). Het reinigen van synthesegas van biomassa vergassing kan dus met bestaande en commercieel beschikbare technologieën worden gerealiseerd.

4.3.2. Teerverwijdering

Wanneer biomassa op lagere temperaturen wordt vergast dan zal het *productgas* van de vergassing naast de hoofdcomponenten H₂, CO, CO₂, H₂O en de anorganische verontreinigingen, ook CH₄, lineaire koolwaterstoffen (C_xH_y), benzeen, toluen en teren bevatten. In Tabel 9 is een typische productgassamenstelling weergegeven die wordt verkregen bij het vergassen van hout in een op zuurstof bedreven circulerend wervelbed (CFB) vergasser.

Tabel 9: Typische samenstelling van het gas bij de vergassing van hout op 850°C in een op zuurstof bedreven circulerend wervelbed (CFB) vergasser

| Hoofdcomponenten | [vol%] _{droog} | Verontreinigingen | [mg/m _n ³] |
|---|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| CO | 30 | NH ₃ | 2500 |
| H ₂ | 27 | HCl | 150 |
| CO ₂ | 26 | H ₂ S | 200 |
| H ₂ O (relatief op droog gas) | 13 | COS, CS ₂ , HCN, HBr (elk) | < 25 |
| N ₂ | 4,0 | stof, roet en as (totaal) | 2500 |
| CH ₄ | 8,9 | | |
| C ₂ H ₂ (acetyleen) | 0,09 | Teren per klasse | [mg/m_n³] |
| | | (Van Paasen, 2002) | |
| C ₂ H ₄ (etheen) | 2,8 | klasse 2 (heteroatomen) | 400 |
| C ₂ H ₆ (ethaan) | 0,16 | - <i>fenol</i> | 200 |
| benzeen | 0,69 | klasse 3 (1-ring, excl. BTX) | 400 |
| tolueen (BTX) | 0,10 | klasse 4 (2,3-ring) | 6000 |
| xylenen | 0,06 | - <i>naftaleen</i> | 2500 |
| som teren | 0,20 | klasse 5 (≥ 4-ring) | 750 |
| TOTAL | 100 | klasse 1 (ongeïdentificeerd) | 400 |

Hoewel de concentratie teren relatief laag is - ze vormen maar 0,2 vol% van het gas - zijn deze verbindingen wel bepalend voor de uitvoering van de gasreiniging. Bij afkoeling van het gas voor de natte reiniging zullen de teren beginnen met condenseren waardoor ze het systeem en het water vervuilen wat uiteindelijk kan resulteren in uitval van het systeem. Teren moeten dus voor de natte reiniging verwijderd worden. Het vereiste verwijderingsniveau wordt opgelegd door de dauwpuntspecificatie (zie Tabel 2): namelijk geen condensatie bij de druk en (laagste) temperatuur van het proces waarin het synthesesgas wordt toegepast. Voor bijvoorbeeld een proces op 40 bar bij 20°C betekent dit dat de concentratie van de belangrijke teerverbinding naftaleen maximaal 2 ppmv mag zijn en voor benzeen geldt een maximum van ongeveer 2500 ppmv (Boerrigter, 2003a).

Voor de teerverwijdering¹⁵ tot deze lage niveaus bestaat maar één proces, namelijk het OLGA-proces waarin de teren (en BTX) worden verwijderd door het gas te wassen met een speciale wasolie (n.b. OLGA staat voor OLIe-GASwasser).¹⁶ De wasolie wordt in het proces weer geregenereerd zodat het oliegebruik minimaal is. De afgescheiden teren worden gerecycled naar de vergasser en daar afgebroken zodat er geen teerafvalstroom ontstaat en de energiewaarde van de teren terugkomt in het gas. Met het OLGA-proces worden typisch teerdauwpunten van minder dan -15°C bereikt (Bergman, 2002).

Het OLGA-proces wordt sinds 2000 ontwikkeld door het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) in samenwerking met apparatenbouwer Technisch Bureau Dahlman met medefinanciering vanuit verschillende Novem programma's. De ontwikkeling van het OLGA-proces voor toepassing in systemen voor elektriciteit- en warmteproductie bevindt zich op dit moment (begin 2004) in de fase van testen op pilot-schaal (Boerrigter, 2003). In laboratoriumtesten is het OLGA-proces eveneens succesvol gedemonstreerd voor teerverwijdering uit gas waarbij het gereinigde gas vervolgens als voeding werd gebruikt voor Fischer-Tropsch synthese (Boerrigter, 2003c) en voor methaniseringssynthese gericht op de productie van synthetisch aardgas (SNG).

Na de teerverwijdering met het OLGA-proces is het gas nagenoeg vrij van organische verbindingen en kan zonder problemen de eerder beschreven natte reiniging worden toegepast voor de verwijdering van de anorganische verontreinigingen.

¹⁵ Alternatief voor de teerverwijdering is teerafbraak; dit is feitelijk de situatie in het synthesesgas productiesysteem met de entrained-flow vergasser en de voorgeschakelde wervelbedvergasser (optie 4 in Figuur 3).

¹⁶ In Güssing (Oostenrijk) staat een biomassavergasser die elektriciteit en warmte produceert. De installatie is eigendom van Repotec en gebaseerd op de technologie ontwikkeld door de Technische Universiteit van Wenen (TUV). De Güssing installatie heeft als onderdeel van de gasreiniging eveneens een speciale wasolie; deze werkt echter op koolzaadolie en de olie wordt niet geregenereerd. Met deze wasolie worden typisch teerdauwpunten van 40°C gerealiseerd (wat overeenkomt met teerconcentraties van 0,5 tot 2 g/m³): genoeg voor toepassing in een gasmotor maar onvoldoende om aan de specificaties voor synthesesgas te voldoen. (Hofbauer, 2003)

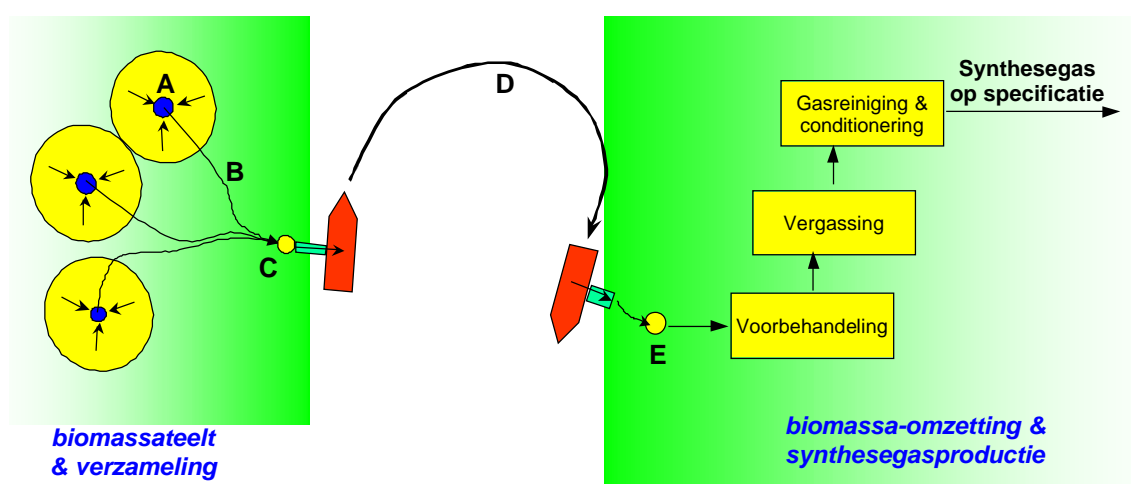
5. ECONOMIE VAN DUURZAAM SYNTHESSEGAS

Zoals in paragraaf 2.2.3 is besproken ligt de typische schaalgrootte van de belangrijkste processen die synthese gas gebruiken in de orde van enkele honderden (bij ammoniak- en methanolproductie) tot enkele duizenden MW_{th} (bij SNG productie en Fischer-Tropsch synthese). Behoudens nichetoeepassingen waar sprake is van een kleine synthese gasvraag, zal synthese gas in principe dus altijd grootschalig worden geproduceerd. Om de ambitieuze doelstellingen voor de inzet duurzame energie, brandstoffen en chemicaliën te halen moeten grote hoeveelheden duurzaam synthese gas worden geproduceerd. Aangezien de hoeveelheid beschikbare biomassa in Nederland onvoldoende is om de vraag te voldoen zal biomassa op grote schaal worden geïmporteerd (zie hoofdstuk 3). In dit hoofdstuk worden de economische perspectieven besproken voor de (toekomstige) situatie van grootschalig productie van synthese gas uit geïmporteerde biomassa.

5.1. Synthese gas uit geïmporteerde biomassa

5.1.1. Systeembeschrijving

Het integrale systeem voor de import van biomassa en synthese gasproductie in Nederland is schematisch weergegeven in Figuur 5. In het biomassa producerende land wordt de biomassa geteeld en na oogst afgeleverd bij verzamel punten. Hier bevindt zich ook tussenopslag om te compenseren voor seizoensgebonden variaties in de aanvoer. De biomassa wordt per vrachtwagen naar de havens getransporteerd, overgeslagen en vervolgens per schip naar de haven in Nederland; in beide havens is ook een beperkte tussenopslag. De biomassa wordt vervolgens voorbehandeld (afhankelijk van het specifieke concept), vervolgens vergast, waarna het ruwe synthese gas wordt gereinigd en geconditioneerd tot de specificaties voor het synthese proces.



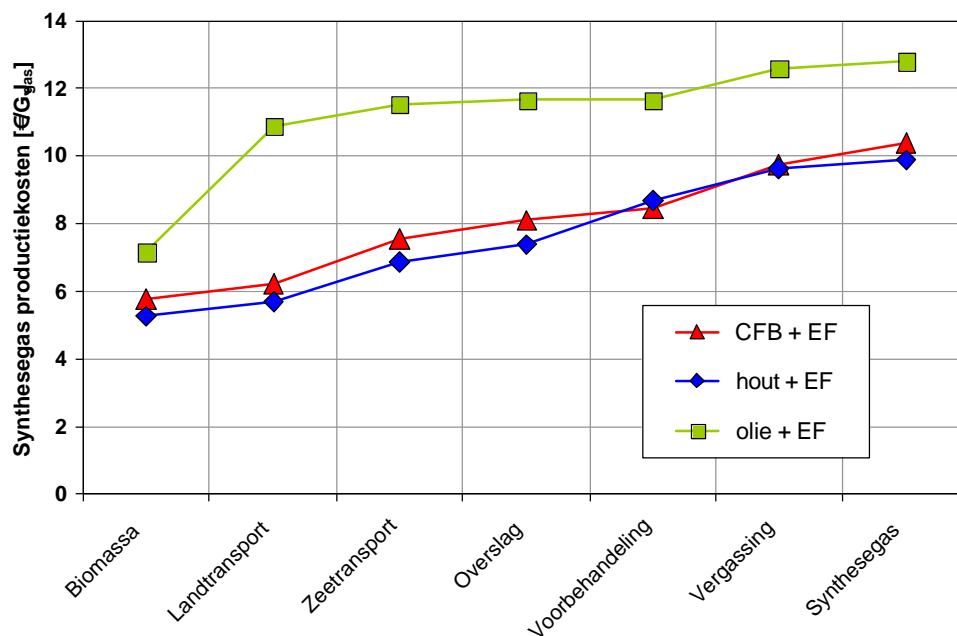
Figuur 5: Integraal systeem voor de productie van synthese gas uit geïmporteerde biomassa. A = biomassa verzamel punt en tussenopslag; B = wegtransport naar haven; C = tussenopslag en overlag; D = zeetransport; E = overslag en tussenopslag.

In 2002 hebben het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN), Shell Global Solutions en de Biomass Technology Group (BTG), met bijdragen van andere partijen een gezamenlijke studie uitgevoerd naar de economie van bovenstaand integraal systeem. Specifiek werd in de studie gekeken naar de productie van 8.000 MW_{th} synthese gas op de Rotterdamse Maasvlakte uit hout geteeld in de drie Baltische landen (Calis, 2002). In de studie werden drie van de eerder beschreven opties voor synthese gas productie met elkaar vergeleken als onderdeel van de complete biomassa-naar-synthese gas route:

- **hout+EF** (optie 1b, Figuur 3): transport van hout naar Rotterdam, houtchips maken en drogen, de chips verpoederen, de kleine houtdeeltjes vergassen in de entrained-flow vergasser (EF) en vervolgens het gas reinigen en conditioneren;
- **CFB+EF** (optie 4, Figuur 3): deze route is vergelijkbaar met de vorige, behalve dat de houtchips in een circulerend wervelbedvergasser (CFB) worden omgezet in een *productgas* dat in de entrained-flow vergasser wordt omgezet in *synthese gas*;
- **olie+EF** (optie 3, Figuur 3): in deze route wordt het hout, na chippen en drogen omgezet in pyrolyse-olie. Dit gebeurt in de biomassaverzamelpunten in de Baltische landen. De olie wordt vervolgens naar Rotterdam getransporteerd en daar in de entrained-flow vergasser omgezet in synthese gas. Het reinigen en conditioneren is hetzelfde als in de andere routes.

5.1.2. Cumulatieve synthese gaskosten

In Figuur 6 zijn de cumulatieve productiekosten van het synthese gas voor de drie opties weergegeven. De verschillende stappen komen overeen met de onderdelen van het integrale productiesysteem van Figuur 5. Nadat de eerste kosten zijn gemaakt voor de aanschaf van de biomassa, nemen de kosten cumulatief toe door het transport over land en zee (inclusief overslag en tussenopslag) naar Rotterdam, overslag, voorbehandeling, de feitelijke synthese gas productie in de entrained-flow vergasser als laatste de gasreiniging en conditionering, waarna het synthese gas (op 40 bar) klaar voor gebruik is.



Figuur 6: Cumulatieve productiekosten van synthese gas uit biomassa van de Baltische landen voor drie productieopties (zie tekst voor toelichting) (Calis, 2002)

De lijnen voor de hout+EF en CFB+EF opties zijn erg vergelijkbaar, met een paar kleine verschillen: de kosten voor de voorbehandeling in de hout+EF optie zijn hoger omdat het verpoederen van het hout erg veel elektriciteit kost, anderzijds zijn de kosten voor het vergassen lager omdat in de CFB+EF optie er twee reactoren nodig zijn. De kosten voor de laatste stap zijn ook hoger omdat in deze optie de vergassing bij 20 bar plaatsvindt en het gas nog gecompriëerd moet worden tot de benodigde 40 bar wat eveneens veel elektriciteit kost.

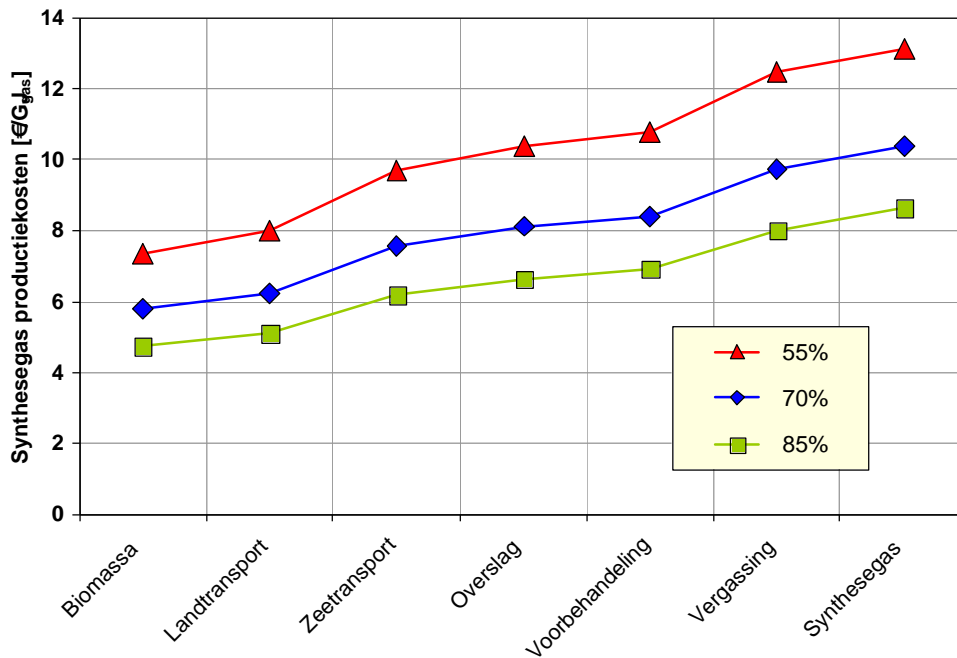
Zoals verwacht, zijn de productiekosten in olie+EF optie anders opgebouwd omdat in de biomassaverzamelpunten het hout eerst wordt omgezet in pyrolyse-olie. De eerste stap in de lijn in Figuur 6 bevat dus zowel de kosten voor chippen, drogen, pyrolyse en het transport (van de olie!) naar de havens. De bijdrage in de cumulatieve kosten is aanzienlijk omdat een groot aantal (relatief dure) kleine installaties nodig is voor de pyrolyse. Een ander nadeel van deze optie met biomassaconversie installaties op twee locaties, is dat de restwarmte van het vergassingsproces niet kan worden gebruikt voor het drogen van het hout. Die energie moet ter plekke worden geproduceerd wat ten koste gaat van het rendement. De kosten voor transport, opslag en overslag zijn wel lager omdat minder volume hoeft te worden getransporteerd (ongeveer een factor zes) in vergelijking met hout. Ook is geen voorbehandeling nodig voor de vergassing.

In de studie is gerekend met een (toekomstige) biomassaprijs van 4 €/GJ_{hout} bij de poort van het biomassaverzamelpunt. Ter referentie: de huidige kosten voor houtsnippers liggen in de ordegrrootte van 3 €/GJ voor houtsnippers en 6,5 €/GJ voor houtpellets (Van Sambeek, 2003). Bij het ontstaan van een grote markt naar biomassa voor grootschalige energie- en synthesesgasproductie is de verwachting dat de prijs zal stijgen.

De bijdrage van de biomassa in de productiekosten van het synthesesgas is echter hoger dan de genoemde 4 €/GJ; dit komt door het feit dat het rendement van biomassa naar synthesesgas geen 100% is. Als het overall productierendement 75% is dan is voor de productie van elke GJ aan gas $1/75\% = 1,33$ GJ aan biomassa nodig. In dit voorbeeld bedragen de biomassakosten per GJ geproduceerd synthesesgas dus $4 \text{ €/GJ}_{\text{hout}} \times 1,33 \text{ GJ}_{\text{hout}}/\text{GJ}_{\text{gas}} = 5,3 \text{ €/GJ}_{\text{gas}}$. Het verschil in de overall rendementen van de drie opties verklaart ook het verschil in de biomassakosten in Figuur 6.

De kosten voor het geproduceerde synthesesgas komen uit op respectievelijk 9,9, 10,4 en 12,8 €/GJ voor de hout+EF, CFB+EF en de olie+EF opties. Binnen de onzekerheidsmarges van de studie is het verschil tussen de eerste twee routes niet significant; de olie-optie is wel significant duurder. Belangrijkste reden hiervoor is, naast de eerder genoemde nadelen, het feit dat door de twee conversiestappen het overall rendement veel lager is dan voor beide andere routes: 57% tegenover 70 en 77% voor de CFB+EF en de hout+EF opties.

Voor de CFB+EF optie is in Figuur 7 het effect van het totale rendement op de cumulatieve productiekosten geïllustreerd voor 55-70-85% (een pessimistisch, realistisch en optimistisch scenario). Naast het feit dat de kosten voor de biomassa hoger worden bij een lager rendement, worden als gevolg daarvan ook alle andere stappen duurder omdat meer hout moet worden getransporteerd, overgeslagen, voorbereid; ook de vergassers en de gasreiniging installaties worden groter en duurder. De lijnen gaan dientengevolge verder uit elkaar lopen. Afhankelijk van het rendement komen de synthesesgas productiekosten uit tussen de 8,6 en 13,1 €/GJ (Boerrigter & Van der Drift, 2003c).



Figuur 7: Effect op de cumulatieve synthesesegas productiecosten van het overall-rendement van biomassa-naar-synthesegas voor de CFB+EF optie

De biomassakosten vormen de dominante bijdrage in de totale synthesesegaskosten (ongeveer 55% voor alle drie de opties); de kosten van de feitelijke synthesesegasproductie in de vergasser dragen maar ongeveer 7-13% bij. Feitelijk impliceert dit dat de mogelijkheid om (significant) goedkoper duurzaam synthesesegas te produceren bijna volledig wordt bepaald door de mogelijkheid om goedkopere biomassa te kunnen contracteren. Ter illustratie: in de CFB+EF optie daalt de synthesesegaprijs van 10,4 naar 7,5 of zelfs 5,3 €/G_{gas} bij biomassaprijzen van respectievelijk 2 en 0,5 €/G_{hout} (Boerrigter & Van der Drift, 2003c).

5.1.3. Opmerkingen

De hierboven beschreven studie is uitgevoerd in begin 2002 op basis de toenmalige inzichten en stand der techniek. Sindsdien is veel nieuwe kennis opgedaan en hebben de beschreven technologieën verdere ontwikkeling doorgemaakt. Daarnaast zijn ook alternatieve veelbelovende concepten voor synthesesegasproductie geïdentificeerd (zie paragraaf 4.2) en zijn mogelijkheden voor rendementverbeteringen door systeemintegratie beter in kaart gebracht. Een zelfde studie op basis van de inzichten en technologie van vandaag zal hierdoor waarschijnlijk resulteren in (iets) lagere synthesesegaskosten en mogelijk ook in gewijzigde onderlinge verhoudingen van de verschillende opties. Echter, onverminderd blijft de conclusie staan dat de biomassakosten een dominante factor zijn.

5.2. Alternatieve routes

Bovenstaande beschouwing van de productiekosten van duurzaam synthese gas is gebaseerd op de aanname dat in de toekomst de productie hoofdzakelijk grootschalig zal plaatsvinden en met geïmporteerde biomassa als brandstof. Dit neemt niet weg dat er voor toepassing in nichemarkten en op specifieke locaties andere omstandigheden kunnen gelden die leiden tot andere en kleinschalige systemen. Bijvoorbeeld als op een locatie zowel een relatief kleine synthese gas behoefte is als voldoende goedkope biomassa (of reststromen), dan kan het toch aantrekkelijk zijn om een kleine vergassingsinstallatie te bouwen. Het nadeel van de relatief dure installatie wordt dan gecompenseerd door de lagere biomassakosten. Een ander voorbeeld is de situatie waarin de biomassa niet in de buurt van een haven beschikbaar is. De transportkosten over land kunnen dan zodanig toenemen en dominant worden dat omzetting in pyrolyse-olie een economisch zinvolle optie wordt. Dit zal zeker gelden voor goedkope biomassastromen als agrarische reststromen (denk aan rijstkaf en stro).

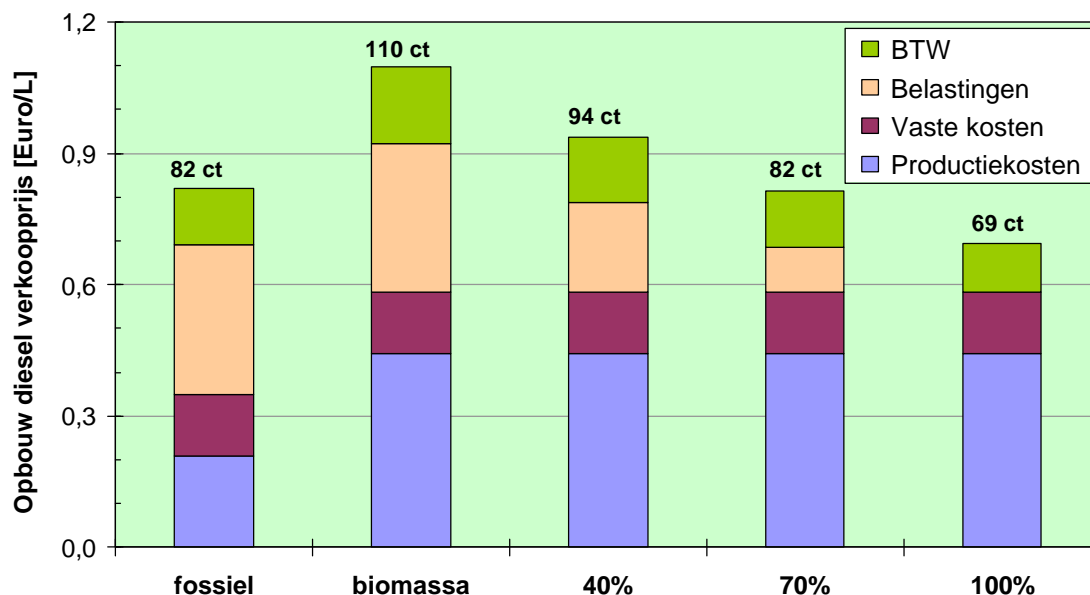
5.3. Concurrentiepositie duurzame synthese gas

Synthese gas is geen eindproduct maar een grondstof voor de synthese van producten, chemicaliën en brandstoffen. De prijs van het synthese gas bepaalt in hoge mate wat de prijs van het eindproduct wordt en daarmee ook of het duurzame product economisch kan concurreren met het product dat uit fossiele grondstoffen is geproduceerd. Aan de hand van het voorbeeld van Fischer-Tropsch diesel wordt de concurrentiepositie van duurzaam synthese gas geïllustreerd (Boerrigter, 2003d).

5.3.1. Fischer-Tropsch diesel versus fossiele diesel

Via Fischer-Tropsch (FT) synthese kunnen uit synthese gas lange koolwaterstoffen worden gemaakt, waaruit middels opwerking diesel kan worden geproduceerd, zie paragraaf 2.1.4. Onder de aannames van de studie naar grootschalige synthese gas productie uit geïmporteerde biomassa zullen de productiekosten van de FT diesel ongeveer 12 €/GJ_{diesel} bedragen (bij een biomasprijs van 4 €/GJ_{hout} en een resulterende synthese gasprijs van ~10 €/GJ_{gas}). Dit komt overeen met 44 ct€/liter; fossiele diesel uit aardolie kost gemiddeld 21 ct€/liter (Ahlvik & Brandberg, 2002) waarmee FT diesel dus meer dan twee keer zo duur is. Voor verschillende biomassa-gebaseerde synthetische brandstoffen als methanol, dimethylether en Fischer-Tropsch diesel, geldt in het algemeen dat de productiekosten op energiebasis een factor twee tot drie hoger liggen dan de kosten voor de equivalente fossiele brandstoffen (Alternative fuels contact group, 2003).

De productiekosten van diesel vormen echter maar ongeveer een kwart van de verkoopprijs van diesel (de prijs aan de pomp is 82 ct€/liter). Zoals te zien is in Figuur 8 zijn het merendeel van de kosten accijns en BTW naast de kosten voor distributie en de pomphouder. FT diesel uit biomassa zou aan de pomp 110 ct€/liter gaan kosten. Door te sturen met (gedeeltelijke) accijnsvrijstelling kan de overheid de verkoopprijs in grote mate sturen. Bij 40% accijnsvrijstelling is het verschil tussen fossiele en FT diesel al meer dan gehalveerd, terwijl bij 70% vrijstelling de verkoopprijzen gelijk zijn. Bij volledige accijnsvrijstelling is FT diesel zelfs goedkoper.



Figuur 8: Opbouw diesel verkoopprijs, voor (van links naar rechts) fossiele diesel uit aardolieraffinage; FT diesel uit biomassa; idem, bij accijnsvrijstellingen van respectievelijk 40, 70 en 100%.

5.3.2. Opmerkingen

Het hierboven besproken voorbeeld van de productie van Fischer-Tropsch diesel uit duurzaam synthesesgas laat zien dat duurzaam synthesesgas en afgeleide producten niet economisch concurrerend kunnen worden geproduceerd bij verwachte prijzen van ruwe olie (tussen 15 en 30 \$/barrel). Significante verlaging van de productkosten van duurzaam synthesesgas hoeven niet verwacht te worden omdat al is uitgegaan van geoptimaliseerde technologieën, maar met name ook door de dominantie van de biomassaprijs in de totale kosten.

Op basis van alleen economische overwegingen is daadwerkelijke implementatie van duurzaam synthesesgas op de korte termijn niet te verwachten. Alleen bij stijging van de ruwe olieprijs tot een niveau van 50-60 \$/barrel of door overheidsmaatregelen (accijnsvrijstelling op duurzame producten en/of CO₂-heffingen op fossiele producten) maakt grootschalige implementatie van duurzaam synthesesgas een kans.

6. CONCLUSIES EN DISCUSSIE

6.1 Conclusies

1. Synthesegas is een mengsel van gassen dat als voeding kan worden gebruikt voor katalytische syntheseprocessen. In de praktijk betekent dit meestal dat het gas grotendeels (minimaal 90 vol.%) bestaat uit H₂ en CO. De benaming synthesegas wordt vaak ook gebruikt voor gasmengsels die niet of slechts gedeeltelijk aan deze karakteristiek voldoen. In dit rapport wordt een onderscheid gemaakt tussen *synthesegas* en *productgas*. *Synthesegas* bestaat voornamelijk uit H₂ en CO en wordt geproduceerd uit biomassa door vergassing bij hoge temperatuur (>1300 °C). *Productgas* bevat naast H₂ en CO aanzienlijke hoeveelheden CH₄ en andere koolwaterstoffen en wordt geproduceerd door vergassing van biomassa bij lage temperatuur (700-1000 °C).
2. Synthesegas wordt voor een breed scala aan toepassingen gebruikt. De hoeveelheid synthesegas die wordt gebruikt wordt echter voornamelijk bepaald door enkele grootverbruikers. De synthese van ammoniak en methanol en de productie van H₂ voor raffinaderijen zijn op dit moment in Nederland, qua hoeveelheden, de belangrijkste gebruikers van synthesegas. Internationaal is de productie van Fischer-Tropsch (=FT) brandstoffen ook een belangrijke toepassing van synthesegas. In Nederland wordt op dit moment ongeveer 100 PJ/jaar aan synthesegas gebruikt, dit is ruim 3% van het primaire energieverbruik van 3210 PJ/jaar in Nederland. Wereldwijd bedraagt het verbruik ongeveer 6000 PJ/jaar, dit is een kleine 2% van het primaire energieverbruik van 394 EJ/jaar.
3. De rol van synthesegas in de energievoorziening kan in de toekomst toenemen via reeds bestaande en relatief nieuwe katalytische syntheseprocessen. Synthesegas biedt in de toekomst de mogelijkheid voor de productie van synthetisch aardgas (=SNG), elektriciteit, vloeibare transportbrandstoffen en de belangrijkste petrochemische basischemicaliën. De petrochemische basischemicaliën kunnen, net als nu al het geval is, worden gebruikt voor het maken van een zeer grote verscheidenheid aan chemische producten. De toekomstige markt voor deze toepassingen kan worden bepaald op basis van het huidige verbruik in deze sectoren en een groei van 2%/jaar. Samen met geformuleerde doelstellingen voor het aandeel van duurzame energiebronnen in deze sectoren kan de potentiële markt voor duurzaam synthesegas worden berekend. In 2010 is de potentiële marktomvang circa 150 PJ. De marktomvang zal zich elk decennium ongeveer verdubbelen tot circa 1500 PJ in 2040.
4. De eisen die aan de bulksamenstelling van het synthesegas worden gesteld verschillen sterk per gebruiker. Algemeen geldt dat hoge H₂ concentraties (boven de 50 vol.%) vereist zijn. Voor ammoniak, methanol en FT-synthese en de productie van H₂ voor raffinaderijen is synthesegas (volgens de definitie in dit rapport) nodig. Voor de productie van SNG en elektriciteit kan volstaan worden met *productgas*.
5. Het synthesegas dat uit biomassa wordt geproduceerd zal, net als voor synthesegas uit fossiele bronnen, vaak niet aan de eisen van gebruikers voldoen. Door het gebruik van een aantal commercieel beschikbare processtappen kan de samenstelling van het gas worden aangepast aan de eisen van de synthesegasgebruiker. Indien dit wordt gedaan, dan kunnen bestaande katalysatoren tevens worden gebruikt voor de conversie van duurzaam synthesegas.

6. Synthesegas wordt gebruikt in katalytische processen. De toelaatbare concentraties verontreinigingen zijn daardoor gering. Exacte eisen zijn niet te formuleren omdat de kosten van extra gasreiniging altijd moeten worden afgewogen tegen de kosten van een afname van de productie door verontreiniging van de katalysator. Wel is duidelijk dat eisen variëren van streng (<1 ppmv) voor zwavel en stikstofverbindingen tot zeer streng (<10 ppbv) voor halogeniden en alkali metalen. Door de juiste combinatie van gasreinigingsprocessen kunnen deze lage concentraties bereikt worden.
7. Voor de productie van vloeibare transportbrandstoffen en SNG is de vereiste schaalgrootte enkele duizenden MW_{th} synthesegas, voor de overige (petro)chemische toepassingen ligt de schaalgrootte in het bereik van enkele honderden MW_{th}. Vanwege de bedrijfszekerheid zal er meestal voor worden gekozen om het synthesegas door meerdere vergassers te laten leveren.
8. In Nederland komen jaarlijks grote hoeveelheden biomassa reststromen vrij. Slechts een gedeelte hiervan is contracteerbaar voor inzet in de energievoorziening. Op basis van verschillende studies lijkt het potentieel van biomassa reststromen te kunnen stijgen tot 120 PJ in 2020. Door biomassateelt in Nederland kan hier nog 45-60 PJ bijkomen. Voor de eerste jaren zullen deze hoeveelheden perspectief bieden om de vraag naar biomassa te dekken, maar al snel (binnen een decennium) zal deze hoeveelheid onvoldoende worden. Import van biomassa van buiten Nederland is dan onontkoombaar. Bij import van biomassa lijkt de keuze voor grootschalige productie van synthesegas voor de hand te liggen.
9. Voor de productie van synthesegas wordt een groot aantal verschillende processen ontwikkeld. Een aantal van deze processen is besproken in hoofdstuk 4. Een belangrijk onderscheid ligt in de procestemperatuur waarbij het gas wordt geproduceerd. Bij hoge temperatuur processen (boven de 1300 °C) wordt, indien zuurstof als oxidant wordt gebruikt, *synthesegas* geproduceerd. Bij lage temperatuur processen (700-1000 °C) wordt een *productgas* gemaakt. Het gas van de lage temperatuur processen (*productgas*) kan in een in een katalytisch proces lage temperatuur proces of een niet-katalytisch hoge temperatuur proces worden omgezet naar *synthesegas*.
10. Stofwolkvergassing of entrained flow vergassing is op dit moment de best ontwikkelde technologie voor grootschalige synthesegasproductie uit vast brandstoffen in een hoge temperatuurproces. Een belangrijke vraag voor het gebruik van biomassa in deze vergassers is het elektriciteitsverbruik van het maalproces dat voorafgaand aan de vergassing noodzakelijk is. Indien het maalproces te veel energie vraagt, dan kan de conversie van biomassa door torrefactie, flash pyrolyse of lage temperatuur vergassing gevolg door stofwolkvergassing een energetisch gezien betere optie zijn. Qua rendement lijken torrefactie en lage temperatuur vergassing hierbij de beste opties te zijn. Naast de hiervoor beschreven grootschalige processen wordt er ook een aantal kleinschalige processen ontwikkeld. Deze processen kunnen qua rendement concurreren met de grootschalige opties en bieden derhalve perspectieven voor kleinschalige toepassingen met lokale biomassa reststromen. Voor grootschalige toepassing zal de beperkte opschaalbaarheid echter een knelpunt zijn.
11. Het geproduceerde gas zal gereinigd moeten worden. De eerste stap in het gasreinigingsproces is de verwijdering van stof, as en roet. Voor de lage temperatuur vergassingsprocessen zal vervolgens teer verwijderd moeten worden. Teerverwijdering in een oliescrubber lijkt op dit moment het meeste perspectief te bieden. Vervolgens worden de grootste hoeveelheden verontreinigingen verwijderd in één of meerdere gaswassers. De strenge eisen die worden gesteld aan de concentraties worden uiteindelijk gehaald door zogenoemde politiefilters ('guard' bedden).

12. Op basis van import van biomassa uit de Baltische staten is de kostprijs van synthesesgas uit biomassa bepaald. Voor biomassa met een prijs van 4 €/GJ is de kostprijs van het synthesesgas in Rotterdam circa 10 €/GJ synthesesgas. Het aandeel van de biomassa kosten in de kostprijs van het synthesesgas is circa 55%. Transport, opslag en overslag van de biomassa is goed voor ongeveer 25% van de kostprijs van het synthesesgas en de conversie van biomassa naar synthesesgas (bestaande uit voorbehandeling, vergassing, gasreiniging en –conditionering) is goed voor ongeveer 20% van de kostprijs van het synthesesgas.
13. Het rendement heeft een grote invloed op de kostprijs van het synthesesgas. Bij een energetisch rendement van 70% is de kostprijs van het synthesesgas ruim 10 €/GJ. Bij rendementen van 55% en 85% bedragen de kosten van het synthesesgas ~13 respectievelijk 8,5-9 €/GJ. De exacte getallen zullen uiteraard afhankelijk zijn van de aannames die worden gemaakt, het is echter duidelijk dat het rendement en de prijs van de biomassa voeding zeer grote invloed uitoefenen op de prijs van het synthesesgas.
14. Synthesesgas is een tussenproduct. De kosten van synthesesgas zullen worden verwerkt in de prijs van het eindproduct dat wordt verkocht. In het geval dat het synthesesgas wordt gebruikt voor de productie van synthetische dieselbrandstof met Fischer-Tropsch synthese betekent dit dat de kostprijs van de synthetische diesel op circa 0,44 €/liter komt, ruim tweemaal zoveel als de kostprijs van fossiele diesel van circa 0,21 €/liter. Door (gedeeltelijke) accijnsvrijstelling kan de prijs van synthetische diesel aan de pomp gelijk worden gemaakt aan de prijs van fossiele diesel.
15. Duidelijk is dat bij een biomassaprijs van 4 €/GJ de prijs van de producten die worden gemaakt uit duurzaam synthesesgas niet kunnen concurreren met de prijs van producten uit aardolie. Een significante stijging van de aardolieprijs of een regulerend overheidsbeleid is noodzakelijk om de producten uit duurzaam synthesesgas concurrerend te maken met hun fossiele alternatieven.

6.2 Discussie

In dit rapport is een overzicht gegeven van het potentieel, de productie, het gebruik en de economie van duurzaam synthesesgas. Elk van deze aspecten van het duurzaam synthesesgas geeft argumenten die de keuze van het te volgen pad beïnvloeden.

In het rapport is aangegeven dat er een duidelijk verschil bestaat in de verschillende typen synthesesgas: *synthesegas* met een laag gehalte aan koolwaterstoffen dat typisch geschikt is voor de belangrijkste huidige toepassingen (H₂ productie en ammoniak, methanol en FT synthese) en *productgas* dat typisch geschikt is voor de productie van elektriciteit en SNG.

De analyse van toekomstig potentieel laat zien dat het grootste potentieel (80% van de markt) ligt in de sectoren (elektriciteit en SNG productie) waarvoor bij voorkeur *productgas* wordt gebruikt. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze sectoren ook *synthesegas* kunnen gebruiken.

Het overzicht van mogelijke productieroutes van synthesesgas laat zien dat er een aantal verschillende mogelijkheden is. Van typische grootschalige processen die nog onderzoek, ontwikkeling en demonstratie vragen tot typisch kleinschalige processen die al gedemonstreerd worden of rijp zijn voor demonstratie. De productieroutes kunnen bovendien zowel *synthesegas* als *productgas* produceren.

De economische analyse laat zien dat om te kunnen concurreren met synthesegas uit fossiele bronnen zelfs voor grootschalige productie van duurzaam synthesegas óf sterk stijgende prijzen van de fossiele energiedragers nodig zijn óf financiële stimuleringsmaatregelen nodig zijn. Voor kleinschalige toepassingen zijn mogelijk niche-markten aanwezig indien een biomassa voeding met een lage prijs wordt gebruikt. De beschikbaarheid van goedkope biomassa reststromen is echter gering.

Niet in dit rapport aan de orde gekomen, maar wel van belang, is de invulling van het niet-duurzame deel van de energievoorziening. Mogelijk spelen systemen met kolenvergassing en CO₂-afvangst hierin een belangrijke rol. In dat geval kan co-vergassing van kolen en biomassa, zoals nu al toegepast in Buggenum, een rol gaan spelen.

Daarnaast is de bereidheid van industriële partijen om te investeren in bepaalde routes en in RD&D voor bepaalde routes van belang. Een grote hoeveelheid keuze mogelijkheden dus die het te bewandelen pad kunnen bepalen. Een brede analyse van de mogelijke paden is noodzakelijk om te bepalen welk pad/welke paden het beste kan worden gekozen om een stap dichterbij het beoogde doel, een verduurzaming van de energie- en grondstoffenvoorziening, te komen.

6.3 Aanbevelingen

In Transitiekader zijn zowel binnen Biomassa Internationaal, Modernisering Energie Ketens (MEK) en Duurzaam Rijnmond (R3) BioSyngas-gerelateerde activiteiten voorgesteld. Het verdient aanbeveling voorgestelde activiteiten – inclusief actoren – te bundelen tot één breed ondersteund en goed afgestemd RD&D-traject, dat in de UKR en EOS-kader zal worden uitgewerkt ter bespoediging van de uiteindelijke marktimplementatie.

Met de indiening van het projectvoorstel “BIOSYNGAS: multifunctioneel intermediair voor de productie van gasvormige energiedragers, transportbrandstoffen, chemicaliën, kracht en/of warmte uit biomassa” (ECN Biomassa, SDE en TechnoInvent BV) in de BSE-regeling Ondersteuning Transitie-Coalities, is getracht hiertoe een 1^e-aanzet te geven. Direct na honorering van het voorstel zal een brede nationale/internationale klankbordgroep worden gevormd te gezamenlijke uitwerking van de benodigde activiteiten (zie paragraaf 3.3.4).

7. LITERATUURLIJST

- Ahlvik, P. & Brandberg, A. (2002): *Sustainable fuels (Introduction to biofuels)*. Ecotrafic ERD AB, Publication number 2002:144
- Air Products (2001): *Our pipelines provide reliable, economical gas supply*. Air Products and Chemicals, Inc., Product Information Sheet
- Alternative fuels contact group (2003): *Market development of alternative fuels*. Report of the alternative fuels contact group, December 2003
- Arcadis IMD (2001), *Hergebruik van Reststromen uit de VGI*, IMD/MA01/5838/55237 voor LNV, Den Haag.
- Arts P.A.M., van Beek A. en Benner J.H.B. (1999): *BIO-MASSTERCLASS: Een Overzicht van de Stroom en een Aanzet tot Prijs-indexering*, Bureau voor Communicatie en Advies over Energie en Milieu B.V. (CEA), Novem-EWAB 9916, Rotterdam
- Bergman, P. C. A.; et al (2003) *Final report in preparation, Torrefaction for entrained flow gasification of biomass (Torrefactie ten behoeve van entrained-flow vergassing van biomassa), carried out in 2003 by ECN and TU/e with financial support of SDE*.
- Bergman, P. C. A.; van Paasen, S. V. B. & Boerrigter, H. (2002): *The novel "OLGA" technology for complete tar removal from biomass producer gas*, Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, 30 Sept.-1 Oct. 2002, Strasbourg, France, France.
- Bestebroer S.I. et al. (1996): *Bijstoken van Geïmporteerde Biomassa uit Estland in de Centrale Maasvlakte (EZH) en de Centrale Borssele (EPZ): Economische Haalbaarheid*. KEMA/BTG, Arnhem
- Boerrigter, H.; van der Drift, A. & van Ree, R. (2004): *Biosyngas; markets, production technologies, and production concepts for biomass-based syngas*, ECN-CX-04-013.
- Boerrigter, H.; van Paasen, S. V. B. & Bergman, P. C. A. (2003): *Status update of OLGA technology development, pilot demonstration of tar removal, complete test facility and new OLGA research topic*, ECN-RX-03-063.
- Boerrigter, H et. al. (2003a): *Green diesel from biomass via Fischer-Tropsch synthesis: new insights in gas cleaning and process design*. Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, Bridgewater, A.V. (ed.), CPL press, Newbury, United Kingdom, 371-383.
- Boerrigter, H. (2003d): *'Green' diesel production with Fischer-Tropsch synthesis*. Energy research Centre of the Netherlands (ECN), Petten, The Netherlands, ECN RX--03-014
- Boerrigter, H. en Den Uil, H., (2003b): *Green diesel from biomass by Fischer-Tropsch synthesis: new insights in gas cleaning and process design*. ECN RX--03-047
- Boerrigter, H. & Van der Drift, A. (2003c): *Liquid fuels from solid biomass: The ECN concept(s) for integrated FT-diesel production systems*. ECN RX--03-060
- Bridge, S. A. & Bridgewater, A. V. (1989): *Flash pyrolysis of biomass for liquid fuels*, Pyrolysis and gasification, Elsevier Applied Science, London, pp. 541-546.
- Calis, H. P. A.; Haan, H.; Boerrigter, H.; van der Drift, A.; Peppink, G.; van den Broek, R.; Faaij, A. & Venderbosch, R. H. (2002) *Preliminary techno-economic analysis of large-scale synthesis gas manufacturing from imported biomass*, Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, Expert Meeting, 30 september - 1 October 2002, Strasbourg, France, 403-418
- CEN (2003): *Solid Biofuels – Fuel Specifications and Classes*. CEN-TC-335, N45-Draft 5.0, April 2002.
- Chung, W.H. en Kung, H.H. (1994): *Methanol production and use*. Marcel Dekker Inc., New York
- Corke (1998): *GTL technologies focus on lowering costs*. Oil & gas journal, Sept. 21, 71-77
- Dakato Gasification Company (2004): <http://www.dakotagas.com>

- De Boer M. en van Doorn J., *Inventarisatie van Vaste Industriële Reststromen uit de VGI*, ECN-C--96-093, Petten, juni 1997.
- Den Uil, H. (2003): *Processen voor de productie van synthese gas uit biomassa (reststromen): analyse van de huidige status en perspectieven*. ECN-CX--03-105
- ECN (2000) *Informatie n.a.v. bezoek UET/Carbo-V op 15 juni 2000*.
- ECN (2002) *Information gathered during Thermonet-meeting in Graz and visit to FICFB system in Güssing in Austria on 11 January 2002*.
- EFMA (2000): *Production of Ammonia, best available techniques for pollution prevention and control in the European Fertilizer Industry*, booklet no. 1 of 8, European Fertilizers Manufacturers's Association, Brussels
- Elbersen H.W., Kappen F., Hiddink J. (2002): *Quickscan Hoogwaardige Toepassingen voor Rest- en Nevenstromen uit de VGI*, Wageningen
- EZ (2003): *Visie op biomassa: de rol van biomassa in de Nederlandse energievoorziening 2040*. Minsiterie van Economische Zaken, Publicatienummer 03I37
- Ferrero, G. L. (2000) *Biomass gasification, version 1, LIOR CD-ROM collection, renewable energy series*, LIOR International, Brussels, Belgium, ISBN 2-930243-06-6.
- Fox, J.M. (1993): *The different catalytic routes for methane valorization: an assessment of processes for liquid fuels*. Catal. Rev. Sci. Eng., 35(2), 169-212
- Future Energy (2003): *Gasification technology, the entrained flow gasification technology of Future Energy GmbH*. Brochure
- Haag, W.O en Kuo, J.C. (1987): *Gasification for the syntheses of fuels and chemicals*. Energy, 12 (8/9), 689-728
- Henrich, E.; Dinjus, E. & Meier, D. (2002): *Entrained flow gasification of fluid pyrolysis products at high pressure: a new concept for biomass gasification*, DGMK Tagungsbericht 2002-2/Beitraege zur DGMK-Fachbereichstagung "Energetische Nutzung von Biomassen", 2002, pp. 95-102.
- Hofbauer, H.; Rauch, R.; Bosche, K.; Koch, R.; Aichernig, C. (2003): *Biomass CHP plant Güssing - A success story*. Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, Bridgewater, A.V. (ed.), CPL press, Newbury, United Kingdom, 527-536.
- IPTS (2001): *Reference document on best available techniques for mineral oil and gas refineries*. Institute for prospective technological studies, Technologies for sustainable development European IPCC bureau, Seville
- Ising, M.; Gil, J. & Unger, C. (2000) *Gasification of biomass in a circulating fluidized bed with special respect to tar reduction*, Biomass for energy and industry. Proc. 1st World conference and exhibition, Conference held in Sevilla (Spain), 5-9 June 2000, EnergiaTA, Florence (Italy).
- Jaeger, M.; Mayer, M. (2000) *The Noell Conversion Process - a gasification process for the pollutant-free disposal of sewage sludge and the recovery of energy and materials*, Water Science and Technology 41/8, pp. 37-44.
- Koppejan J. et al., *EWAB Marsroutes Taak 1: Formats voor Biomassa en Afval*, TNO-MEP, Novem-EWAB 00xx, Apeldoorn, 2000.
- Lysen, E.H. (2000): *Beschikbaarheid Biomassa voor Energie-opwekking, GRAIN: Global Restrictions on Biomass Availability for Import to the Netherlands*. Novem-EWAB 2EWAB00.27 / GAVE 2GAVE00.01, Utrecht
- Meier, D.; Oasmaa, A. & Peacocke, G. V. C. (1999): *Properties of fast pyrolysis liquids: status of test methods*, eds. A. Bridgewater, S. Czernik, J. Diebold, D. Meier, A. Oasmaa, C. Peacocke, J. Piskorz & D. Radlein, Fast pyrolysis of biomass: A handbook, Anon., CPL Press, Newbury (UK), pp. 75-91.
- Methanex (2004): <http://www.methanex.com/corporateinformation/newzealand.htm>
- Mills, G.A. (1994): *Status and opportunities for conversion of synthesis gas to liquid fuels*. Fuel, 73(8), 1243-1279

- Neeft, J. P. A. (2000) *Teren uit thermische conversie van biomassa en reststromen. Definities, vorming, eigenschappen, en bemonstering en analyse*, ECN, Petten, ECN-C--99-102.
- NEN (2004): *Classificatie van biomassa voor energietoepassing*. NTA 8003:2004, NEN, Delft, (moet nog gepubliceerd worden)
- Novem, *Bioenergie: De Stand van Zaken 1999*, Duurzame Energie, april 2000.
- NTA (2001): *Classificatie van Biomassa voor Energietoepassing*. NTA: 8003:2001
- Oxytec Energy (2003): www.oxytec-energy.com.
- Paisley, M. A.; Irving, J. & Overend, R. P. (2001) *A promising power option, the FERCO SILVAGAS biomass gasification process, operating experience at the Burlington gasifier*, Proceeding of the ASME TURBO EXPO, 4-7 June 2001, New Orleans, Louisiana.
- Phyllis (2004): <http://www.ecn.nl/phyllis/>
- Power Energy Fuels (2004): <http://www.powerenergy.com>
- Rudloff, M. (2003a) *ChorenFuel aus dem Carbo-V-vergaser*, Biomassa-vergasung, Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?, 1-2 October 2003, Leipzig.
- Rudloff, M. (2003b) *CHORENfuel, from vision to reality*, 4th European Motor BioFuels Forum, 24-26 November 2003, Berlin, Germany.
- Shell Qatar (2004): <http://www.shell.com/qatar>
- Siemens R.V. en Kolk H., *Energiegewassen in Nederland: Scenariostudie met het Oog op een Duurzame Energievoorziening*, Novem-EWAB 9928 / GAVE 9912, Enschede, december 1999.
- Simbeck, D. en Johnson, H. (2001): *World gasification survey: industry trends & developments*. Presented at the Gasification Technologies 2001 Conference, San Francisco, California
- Ståhl, K. (2001) *Värnamo demonstration plant, the demonstration programme, 1996-2000*, Sydkraft, Malmö (Sweden).
- Tabak, S.A. en Yurchak, S. (1990): *Conversion of methanol over ZSM-5 to fuels and chemicals*. Catalysis Today, 6(3), 307-327
- UET (2000) *Carbo-V-Verfahren. Statusbericht über den Stand der Entwicklung*, Umwelt- und Energietechnik, Freiberg (Germany).
- Van der Drift, A. (2002): *Waarom decentrale biomassavergasning? (vertrouwelijk rapport)*. ECN, Petten, ECN-CX-02-140.
- Van der Drift, A. v. d.; Meijden, C. M. v. d. & Strating, S. D. (2002): *Hogere koolstofconversie in CFB-biomassavergasers*, ECN, Petten, ECN-C-02-095.
- Van Sambeek, E.J.W.; De Lange, T.J.; Ruijgrok, W.J.A.; Pfeiffer, E.A. (2003): *Technisch-economische parameters van duurzame elektriciteitsopties, concept advies inzake de aannames voor de onrendabele topberekeningen ten behoeve van de vaststelling van de MEP-subsidies voor 2004 en 2005*. ECN C—03-078
- Venderbosch, R. H.; Wagenaar, B. M. & Prins, W. (1999): *Productie van bio-olie door snelle pyrolyse van biomassa*, Nederlandse duurzame energie conferentie 1999, 1999, Congressbureau Van Namen & Westerlaken, Nijmegen, pp. 218-219.
- Venderbosch, R. H.; Wagenaar, B. M.; Gansekoele, E. & Florijn, J. H. (2002): *BioSlurry for co-firing and gasification*, Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, 30 Sept.-1 Oct. 2002, Strasbourg, France.
- VROM (2002): *Circulaire Emissiebeleid voor energiewinning uit biomassa en afval*. Ministerie van VROM, Den Haag
- Zuideveld, P. L.; de Graaf, J. (2003) *Overview of Shell global solutions' worldwide gasification developments*, Gasification Technologies, San Fransisco, October 12-15, 2003.

APPENDIX 1: BESCHIKBAARHEID EN CONTRACTEERBAARHEID BIOMASSASTROMEN

In het algemeen kunnen biomassastromen worden ingedeeld in organische reststromen (houtresiduen, slib, mest, reststromen voedings-/genotmiddelenindustrie (VGI), ...) en specifiek geteelde (energie)gewassen; waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen binnenlands beschikbare stromen en potentieel te importeren stromen vanuit binnen en buiten de EU. Tevens kan onderscheid gemaakt worden tussen de beschikbaarheid en de contracteerbaarheid van biomassastromen. Vanwege concurrerende toepassingen (bijv. voedsel, veevoer, ...) is vaak slechts een deel van de beschikbare biomassa ook daadwerkelijk contracteerbaar voor “non-food” toepassingen, zoals grondstof voor syngasproductieprocessen.

ORGANISCHE RESTSTROMEN

In het kader van de toenemende belangstelling voor de toepassing van biomassa/afval als alternatieve brandstoffen zijn er de laatste jaren diverse studies uitgevoerd naar de beschikbaarheid/contracteerbaarheid van deze stromen.

In (De Boer en Van Doorn, 1997) worden de volgende organische reststromen onderscheiden:

1. Afvalwater (< 1 gew% d.s.).
2. Slib van afvalwaterzuivering (1<gew% d.s.<10).
3. Natte reststromen (10<gew% d.s.<80).
4. Droge reststromen (> 80 gew% d.s.).

De totale hoeveelheid afvalwater en slib die in de VGI vrijkomt bedraagt naar schatting 89 Nm^3 oftewel ca. 730 kt n.b. per jaar. De hoeveelheid natte respectievelijk droge reststromen bedragen 3500 en 4900 kt n.b. per jaar, oftewel ca. 13 en 70 PJ_{th} per jaar. Voorbeelden van potentieel interessante deelstromen zijn: schroot van de oliën-/vettenproductie (3860 kt n.b., 55 PJ_{th}), afval uit de meelindustrie (300 kt n.b., 4,5 PJ_{th}), pulp en melasse uit de suikerbereiding (665 kt n.b., 10 PJ_{th}) en afval uit de cacao-industrie (65 kt n.b., 1 PJ_{th}). Het overgrote deel van deze reststromen wordt thans voor een redelijke vergoeding afgezet als veevoer, als meststof in de landbouw of als grondstof in de industrie. De contracteerbaarheid voor energiedoeleinden middels thermische conversie-systemen is derhalve relatief laag ingeschat (3 PJ_{th} /jaar). Indien tevens de “natte” stromen voor biochemische conversiedoeleinden (vergisting, fermentatie) worden beschouwd ligt het contracteerbare energetische potentieel aanzienlijk hoger.

Volgens (Arts, 1999) bedraagt het totale productievolume van biomassastromen in Nederland 23,1 Mt d.s./jaar oftewel ca. 313 PJ_{th} /jaar (1998). De omvang van de korte-termijn beschikbare biomassastromen is ingeschat op 3,6 Mt d.s./jaar (63 PJ_{th} /jaar) en die van contracteerbare biomassastromen voor energiedoeleinden 1,9 Mt d.s./jaar (34 PJ_{th} /jaar). Qua totaal beschikbaar productievolume zijn 1) organische reststromen uit de VGI en 2) mest de stromen met de meeste potentie. Daar deze stromen reeds voor een groot deel in de industrie en landbouw worden benut, is de contracteerbaarheid voor energiedoeleinden laag ingeschat. Een gemodificeerd overheidsbeleid kan hierop echter van grote invloed zijn. Voor de korte-termijn is de contracteerbaarheid van hout voor energiedoeleinden het meest perspectiefvol, gevolgd door: slib, gras en stro.

In (Weterings, 1999 en Zeevalkink, 2000) is geanalyseerd wat de 1999 en de potentieel toekomstige (2020) bijdrage van biomassastromen voor de Nederlandse energievoorziening is/kan zijn. Hierbij zijn zowel binnenlandse stromen (energiegewassen, bijproducten uit de land-/bosbouw en biomassa en niet-biomassa rest-/afvalstromen uit industriële processen) als de mogelijkheden voor import uit de EU en de rest van de wereld beschouwd. Een tabel met een gedetailleerd overzicht van de analyseresultaten wordt weergegeven op de volgende pagina.

Tabel 10: Productie/beschikbaarheid biomassa-/afvalstromen voor de Nederlandse energievoorziening.

| | Productie | | | Beschikbaarheid voor energieopwekking | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------|-----------|---------|---------------------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----|-------------------------------------|---------|--------------|--------------|--|
| | 2000 | | 2020 | 2000 | | scenario 2 (basispad), 2020 | | | | | scen 1, 2020 | scen 3, 2020 | |
| | NL | EU | NL | uit NL | uit EU | NL | uit EU | Ov | Beperkende factor | NL max | NL | uit NL | |
| Korte omloop hout | 2 | 200 | 2 | 2 | 200 | | | | -opp. meerv. functiegebruik | 200 | | 300 | |
| Hout uit fruitsector en boomkwekerij | 294 | 635 | 294 | 100 | 294 | | | | -geen | 294 | | 294 | |
| Bosbouwbijproducten | 2.400 | 38800 | ? | 425 | 550 | 500 | 50 | 50 | biodiversiteit, kosten, Lansink | 1.000 | 425 | 600 | |
| Schoon resthout (incl. bast), vers | 600 | 50970 | ? | 270 | 150 | 600 | | 300 | -geen | 600 | | | |
| Koolzaad (zaad) | 4 | 11892 | ? | | | | 50 | | -kosten teelt | | | | |
| Miscanthus | 1 | 3 | ? | 1 | | 200 | | | -bep. opp. meerv. functiegebruik | 200 | | 300 | |
| Bermgras | 468 | ? | 468 | 468 | 468 | | | | -geen | 468 | | | |
| Stro (granen) | 708 | 103100 | ? | | 1.500 | 1.500 | | | -conc. met veevoeder | 708 | | 350 | |
| Koolzaadstro | 15 | 9400 | ? | | 150 | 150 | | | -conc. met veevoeder | 15 | | 15 | |
| Hennep en vlas, vezels en kern | 5 | 358 | ? | 5 | 24 | | | | -conc. met veevoeder | 5 | | 50 | |
| Hooi van graszaden | 138 | 0 | ? | | | | | | -conc. met veevoeder | 138 | | 100 | |
| Pluimveemest | 2.461 | 27549 | 2.500 | 1.500 | 2.500 | | | | -geen | 2.500 | | | |
| Rundermest en varkensmest | 74.000 | 1370000 | ? | 15.000 | | | | | -geen mestoverschot meer | 74.000 | | | |
| RWZI slib | 1.400 | 0 | 1.604 | 630 | | 1.604 | | | -geen | 1.604 | 802 | 1.604 | |
| Swill | 216 | 0 | 216 | | | 146 | | | -inzamellogistiek | 216 | | 146 | |
| Voedings- en genotmiddelenind. | 9.564 | 386000 | 9.564 | 1.534 | 1.500 | | | | -conc. met veevoeder | 9.564 | 600 | 3.500 | |
| Dierlijk afval | 1.535 | 0 | 1.535 | 1.486 | 1.300 | | | | | 1.535 | 600 | 1.300 | |
| Overig VGI | 8.029 | 0 | 8.029 | 48 | 200 | | | | | 8.029 | | 2.200 | |
| Gesch. Ingez. GFT | 1.569 | 0 | 1.874 | 100 | | | | | -stand technologie, Lansink | 1.874 | | 3.280 | |
| Gesch. Ingez. Oud papier en karton | 2.020 | 0 | 2.587 | | | 2.100 | | | -ladder van Lansink | 3.100 | | | |
| Gesch. Ingez. Kunststoffen | 171 | 0 | 833 | | | 600 | | | -ladder van Lansink | 1.000 | | | |
| Gesch. Ingez. Textiel | 67 | 0 | 231 | 15 | 100 | | | | -ladder van Lansink | 400 | | 50 | |
| Gesch. Ingez. Oud en bewerkt hout | 464 | 0 | 1.005 | 400 | 1.000 | | | | -ladder van Lansink | 1.000 | | | |
| Gebruikte autobanden | 70 | 0 | 103 | 27 | 103 | | | | -geen | 103 | 52 | | |
| Restfractie van huishoudelijk afval | 3.495 | 0 | 4.660 | 3.495 | 4.665 | | | | -geen | 4.352 | 3.770 | 3.271 | |
| GFT | 1.077 | 0 | 2.031 | 1.077 | 2.344 | | | | | 2.031 | 1.591 | 853 | |
| Papier | 1.223 | 0 | 1.915 | 1.223 | 1.484 | | | | | 1.484 | 1.624 | 1.568 | |
| Hout | 78 | 0 | 10 | 78 | 10 | | | | | 10 | 18 | 23 | |
| Kunststoffen | 386 | 0 | 72 | 386 | 44 | | | | | 44 | 80 | 44 | |
| textiel, tapijt, matten | 123 | 0 | 93 | 123 | 29 | | | | | 29 | 81 | 29 | |
| overig brandbaar | 175 | 0 | | 175 | 216 | | | | | 216 | 108 | 216 | |
| inert, bijzonder afval en KCA | 433 | 0 | 537 | 433 | 537 | | | | | 537 | 269 | 537 | |
| Restfractie van grof huish. Afval | 643 | 0 | 729 | 643 | 647 | | | | -geen (alles) | 636 | 724 | 817 | |
| GFT | 68 | 0 | 70 | 68 | 81 | | | | | 70 | 55 | 29 | |
| Papier | 28 | 0 | 33 | 28 | 26 | | | | | 26 | 28 | 27 | |
| Hout | 188 | 0 | 173 | 188 | 175 | | | | | 175 | 308 | 395 | |
| Kunststoffen | 82 | 0 | 145 | 82 | 89 | | | | | 89 | 161 | 89 | |
| textiel, tapijt, matten | 47 | 0 | 49 | 47 | 15 | | | | | 15 | 42 | 15 | |
| overig brandbaar | 14 | 0 | 30 | 14 | 30 | | | | | 30 | 15 | 30 | |
| inert, bijzonder afval en KCA | 216 | 0 | 230 | 216 | 230 | | | | | 230 | 115 | 230 | |
| Restfractie van bouw- en slooafval | 1.275 | 0 | 1.269 | 1.275 | 1.243 | | | | -geen | 1.243 | 861 | 1.424 | |
| Papier | 38 | 0 | 15 | 38 | 12 | | | | | 12 | 13 | 12 | |
| Hout | 210 | 21998 | 142 | 210 | 144 | | | | | 144 | 253 | 324 | |
| Kunststoffen | 76 | 0 | 65 | 76 | 40 | | | | | 40 | 72 | 40 | |
| overig brandbaar | 52 | 0 | 65 | 52 | 65 | | | | | 65 | 33 | 65 | |
| inert, bijzonder afval en KCA | 899 | 0 | 982 | 899 | 982 | | | | | 982 | 491 | 982 | |
| Restfractie van industrieel afval | 2.079 | 0 | 1.127 | 2.079 | 1.108 | | | | -geen | 1.108 | 689 | 1.163 | |
| GFT | 6 | 0 | | 6 | | | | | | | | | |
| Papier | 390 | 0 | 87 | 390 | 67 | | | | | 67 | 74 | 71 | |
| Hout | 150 | 0 | 40 | 150 | 41 | | | | | 41 | 71 | 91 | |
| Kunststoffen | 101 | 0 | 34 | 101 | 21 | | | | | 21 | 38 | 21 | |
| textiel, tapijt, matten | 60 | 0 | 23 | 60 | 7 | | | | | 7 | 20 | 7 | |
| overig brandbaar | 33 | 0 | 12 | 33 | 41 | | | | | 41 | 21 | 41 | |
| inert, bijzonder afval en KCA | 1.340 | 0 | 931 | 1.340 | 931 | | | | | 931 | 466 | 931 | |
| Restfractie van kwd-afval | 1.949 | 0 | 1.163 | 1.949 | 1.073 | | | | -geen | 1.023 | 899 | 880 | |
| GFT | 626 | 0 | 324 | 626 | 374 | | | | | 324 | 254 | 136 | |
| Papier | 563 | 0 | 230 | 563 | 178 | | | | | 178 | 195 | 188 | |
| Hout | 77 | 0 | 28 | 77 | 28 | | | | | 28 | 50 | 64 | |
| Kunststoffen | 216 | 0 | 120 | 216 | 74 | | | | | 74 | 133 | 74 | |
| textiel, tapijt, matten | 73 | 0 | 82 | 73 | 26 | | | | | 26 | 71 | 26 | |
| overig brandbaar | 80 | 0 | 91 | 80 | 107 | | | | | 107 | 54 | 107 | |
| inert, bijzonder afval en KCA | 314 | 0 | 285 | 314 | 285 | | | | | 285 | 143 | 285 | |
| Shredderafval | 177 | 0 | 143 | 177 | 143 | | | | -geen | 143 | | 143 | |
| Reinigingsdienstenafval | 1.038 | 0 | 1.144 | 41 | 65 | | | | -geen slib, veeg- en plantsoanafval | 65 | | | |
| Totaal (kton nat) | 107.293 | 1.998.907 | >31.513 | 30.136 | 1.824 | 20.907 | 2.200 | 350 | | 107.557 | 8.821 | 18.286 | |
| Totaal (kton droog) | 24.862 | 394.974 | >17.664 | 11.499 | 1.549 | 13.879 | 1.748 | 285 | | 24.865 | 6.009 | 10.533 | |
| Biomassa (PJ), excl. natte mest | 130 | 4.135 | >102 | 34 | 25 | 87 | 28 | 5 | | 146 | 7 | 47 | |
| Kunststoffen (PJ) | 6 | | 29 | | | 21 | | | | 34 | | | |
| Gemengde oorsprong (PJ) | 86 | | 87 | 82 | | 56 | | | | 55 | 61 | 55 | |
| Totaal (PJ) | 222 | 4.135 | >218 | 116 | 25 | 164 | 28 | 5 | | 235 | 68 | 102 | |

In (Arcadis, 2001 en Elbersen, 2002) is geanalyseerd welke deelstromen in de VGI potentieel interessant zijn voor alternatieve benutting. Reststromen die vrijkomen in de VGI bestaan uit afvalstoffen (geen of negatieve economische waarde), bijproducten (bedrijfsafval en organische reststromen) en retourproducten. Door de Nederlandse VGI wordt ca. 10.000.000 ton/jaar aan (organische) reststromen geproduceerd.

Tabel 11: Verschijningsvorm reststromen VGI

| Verschijningsvorm | Drogestofgehalte [%] | hoeveelheden [ton/jaar] |
|------------------------------|----------------------|-------------------------|
| droge reststromen | 80-100 | 4.900.000 |
| Natte reststromen | 10-80 | 5.000.000 |
| Vloeibare reststromen (slib) | 1-10 | 750.000 |
| Afvalwater ¹ | < 1 | 250.000 (COD) |
| Totaal | | 10.000.000 |

¹ 90.000.000 m³/jaar

Voor ruim 20% (2150 kton/jaar) van de vrijkomende reststromen in de VGI blijkt alternatieve benutting (bijv. energietoepassingen) in meer/mindere mate tot de mogelijkheden te behoren.

Een overzicht van: 1) de totale biomassa “productie” in Nederland, 2) de inzet van biomassa-stromen in de energievoorziening in 1999 en 3) een inschatting van de totale hoeveelheid binnenlands beschikbare biomassa-stromen voor de energievoorziening van Nederland voor dezelfde periode, wordt weergegeven in onderstaande tabel (Weterings, 1999 en Zeevalkink, 2000).

Tabel 12: Totale biomassa”productie” in Nederland, gerealiseerde inzet voor energieproductie in 1999 en beschikbare hoeveelheden binnenlandse biomassa-stromen voor energieproductie in NL

| Biomassastroom | Biomassa-Productie '99 | Inzet voor energiedoeleinden in 1999 | | Beschikbaarheid voor energiedoeleinden in 1999 | |
|------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------|--|------------------|
| | | kt n.b. | PJ _{th} | kt n.b. | PJ _{th} |
| Teelt | 6900 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| Biomassa bijproducten ¹ | 80600 | 251 | 3 | 2025 | 18,4 |
| Biomassa afvalstromen ² | 22400 | 466 | 5,8 | 8282 | 57,6 |
| Totaal | 109900 | 717 | 8,8 | 10310 | 76 |

¹ Biomassa bijproducten: bijproducten uit de land- en bosbouw (o.a. dunningshout, mest, stro, ...) en monostromen die vrijkomen bij een bepaalde activiteit.

² Biomassa afvalstromen: reststromen van productieprocessen (o.a. bermgras, resthout, slib, VGI-afval, ..).

Voor de bepaling van de beschikbaarheid van biomassa voor energiedoeleinden is een bescheiden inschatting gemaakt. Dit houdt in dat in aanvulling op biomassa-stromen die reeds feitelijk worden ingezet ook een beperkt potentieel is meegerekend van biomassa-stromen die zich in de praktijk goed lenen voor energie-opwekking. Deze (additionele) biomassa-stromen zijn o.a.: 1) stromen waarvoor de stand van de technologie geen belemmering vormt voor energieconversie, 2) stromen waarvoor geen alternatieve meer rendabele toepassingen bestaan en 3) stromen waarvoor reeds maatschappelijke initiatieven bestaan om deze te benutten in de energievoorziening. Uit bovenstaande tabel blijkt dat in 1999 ca. 0,7% van het beschikbare binnenlandse biomassapotentieel en ca. 12% van het binnenlandse beschikbare biomassa-gelateerde energiepotentieel is benut.

Verder is een inschatting gemaakt van het importpotentieel van biomassa-stromen, vanuit de EU en de rest van de wereld, voor de Nederlandse energievoorziening. De resultaten van deze inschatting worden weergegeven in onderstaande tabel (Weterings, 1999 en Zeevalkink, 2000).

Tabel 13: Geraamd importpotentieel biomassastromen voor de Nederlandse energievoorziening vanuit EU en de rest van de wereld

| Biomassastroom | Europa | | | Rest van de wereld | | |
|-----------------------|-----------|--------------|------------------|--------------------|--------------|------------------|
| | Productie | Beschikb. NL | | Productie | Beschikb. NL | |
| | kt n.b. | kt n.b. | PJ _{th} | kt n.b. | Kt n.b. | PJ _{th} |
| Teelt | 234.000 | 0 | 0 | 906.000 | 0 | 0 |
| Biomassa bijproducten | 1.173.000 | 1674 | 25,2 | 32.920.000 | 0 | 0 |
| Biomassa afvalstromen | 459.000 | 244 | 3,6 | 3.490.000 | 0 | 0 |
| Totaal | 1.866.000 | 1918 | 28,8 | 37.316.000 | 0 | 0 |

Een inschatting van het importpotentieel van biomassa vanuit de EU bedraagt: 1918 kt n.b./jaar oftewel 28,8 PJ_{th}/jaar (indicatief t.g.v. grote onnauwkeurigheid in beschouwde data). Over de importmogelijkheden vanuit de rest van de wereld is vanwege het gebrek aan data geen uitspraak gedaan. Dit potentieel is derhalve op nul gesteld. *De totale 1999 beschikbaarheid (binnenlands (76) + EU-import (28,8)) van biomassa voor energiedoeleinden in Nederland bedraagt 12.228 kt n.b. oftewel 104,8 PJ_{th} per jaar.*

Om een inschatting te kunnen maken van de toekomstige (2020) beschikbaarheid van biomassa voor de Nederlandse energievoorziening zijn door de onderzoekers een aantal scenario-studies uitgevoerd (Weterings, 1999 en Zeevalkink, 2000). Scenario-2 (o.a. vrije markt en energieprijzen 1,5-keer die van 1999) bleek voor de toekomstige beschikbaarheid van biomassa voor de Nederlandse energievoorziening het best uit te pakken.

Clusters van factoren die deze beschikbaarheid sterk beïnvloeden zijn:

- 1) De fossiele brandstoffenprijs.
- 2) Het overheidsbeleid m.b.t. het klimaat en de energie-, landbouw- en afvalmarkt.
- 3) De maatschappelijke acceptatie van de aanwending van biomassa voor de productie van energie.

Tabel 14: Beschikbaarheid van biomassa voor de Nederlandse energievoorziening vergeleken met de voorspelde potentiële beschikbaarheid voor 2020 (scenario-studie)

| Biomassastroom | Beschikbaarheid voor energiedoeleinden in 1999 | | Beschikbaarheid voor energiedoeleinden in 2020 |
|-------------------------------|--|------------------|--|
| | kt n.b. | PJ _{th} | PJ _{th} |
| Teelt | 3 | 0 | 6 (in Ned.) |
| Biomassa bijproducten | 2025 | 18,4 | 43 |
| Biomassa afvalstromen | 8282 | 57,6 | 72 |
| Import uit EU | 1918 | 28,8 | Incl. |
| Import uit rest van de wereld | - | - | - |
| Totaal | 12228 | 104,8 | 121 |

Uit bovenstaande tabel blijkt dat het beschikbare energetische biomassapotentieel onder gegeven scenario-condities stijgt met ca. 15% (105 PJ_{th} -> 121 PJ_{th}) in de periode 1999 tot 2020.

De ca. 120 PJ_{th} aan potentieel beschikbare organische reststromen voor energiedoeleinden is bij lange na niet voldoende om aan de verwachte vraag naar biomassa op de lange termijn (zie o.a. par. 3.3) te voldoen. Binnenlandse teelt van energiegewassen en/of buitenlandse teelt met import van de ruwe gewassen of tussenproducten met een hogere energiedichtheid (char, olie) is derhalve onontkoombaar.

BINNENLANDSE TEELT ENERGIEGEWASSEN

Teelt van energiegewassen binnen Nederland kan op twee manieren plaatsvinden, te weten:

- Teelt op cultuurgronden in de land-/akkerbouwsector.
- Combinatieteelt, d.w.z. teelt in combinatie met andere landgebruiksfuncties buiten de land-/akkerbouwsector.

In beide gevallen kan gebruik worden gemaakt van de teelt van monoculturen (bijv. wilg, populier, olifantsgras, etc.) en de teelt van multifunctionele gewassen (bijv. graansoorten, hennep, etc.). Bij monoculturen wordt het volledige gewas aangewend als energiegewas, terwijl bij multifunctionele gewassen slechts een deel van het gewas wordt aangewend als energiegewas. Het andere deel wordt aangewend voor gebruiksdoeleinden met een veelal hoge toegevoegde waarde. Het voordeel van het gebruik van multifunctionele gewassen is dat de hoge toegevoegde waarde van het niet-energiedeel van het gewas bijdraagt aan een reductie van de productiekosten van het resterende gewasdeel dat wordt aangewend als energiegewas.

Door teelt te combineren met andere landgebruiksfuncties (combinatieteelt, multifunctioneel landgebruik) is het mogelijk de netto teeltkosten te minimaliseren. Door de grondkosten volledig toe te rekenen aan de andere gebruiksfunctie van het land behoeven deze niet in de teeltkosten te worden verdisconteerd. Daar de grondkosten in een dichtbevolkt land, zoals Nederland, een aanzienlijk aandeel van de teeltkosten voor haar rekening nemen, leidt combinatieteelt tot een significante reductie van de netto productiekosten en dus tot een betere concurrentiepositie t.o.v. de toepassing van bepaalde organische reststromen en de import van gewassen voor de Nederlandse energievoorziening.

De productiekosten van energiegewassen, inclusief braaklegpremie, zoals deze in 1999 door Novem werden gehanteerd bedragen 50 - 82 €/ton d.s., oftewel 2,7 - 4,5 €/GJ_{th} (exclusief bewerking en transport). Uit een scenario-studie blijkt dat deze kosten kunnen dalen tot 3,2 - 3,9 €/GJ_{th} (Siemons, 1999).

In (Minnesma, 2003) wordt in het rapport “Biomassa – een wenkend perspectief” een beeld geschetst van het perspectief voor teelt van energiegewassen in Nederland en de rol die LNV zou kunnen spelen om dit potentieel daadwerkelijk te ontsluiten. Afhankelijk van een groot aantal met name beleids-gerelateerde randvoorwaarden wordt geschetst dat het potentieel beschikbare binnenlandse landoppervlak voor teelt van energiegewassen in 2020 varieert van minimaal 20.000 tot maximaal 300.000 ha, waarmee naar de mening van ECN Biomassa een energiepotentieel van ca. 45-60 PJ_{th}/jaar (aannames: 8-12 ton d.s./ha.jr en 18 GJ_{th}/ton d.s.) kan worden gerealiseerd. Vanwege de relatief hoge productiekosten - als potentiële productiekosten worden genoemd 40-125 €/ton d.s., oftewel ca. 2-7 €/GJ_{th} - van energieteeltgewassen in Nederland, zal het aandeel aan de energievoorziening, voornamelijk in de vorm van teelt van multifunctionele gewassen in combinatieteelt cultures, beperkt blijven tot benutting in niche-markten.

In Nederland staat energieteelt nog in de kinderschoenen (zie onderstaande tabel). Met een teeltoppervlak van nog geen 300 ha blijft de binnenlandse energieteelt sterk achter met die in de EU (230.000 ha, met name koolzaad) (Novem, 2000). In Nederland bestaan er proefvelden voor Miscanthus (olifantsgras), wilg en populier.

Tabel 15: Energieteelt projecten in Nederland.

| Plaats | Gewas | Oppervlak [ha] | Actoren | Type | Aanplant |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|------------------------------|----------|
| Ter Apel e.o. | Miscanthus | 17-20 | Agro-Miscanthus | Onderzoek / Semi commercieel | 1989 |
| Wieringermeer | Wilg, populier, hennep, Misc. | 20 | CPV, SBH, IMAG-DLO | Onderzoek | 1992 |
| Dronten | Wilg, populier | 7,3 | CPV, SBH | Onderzoek | 1993 |
| Slootdorp, Wieringermeer | Wilg | 20 | CPV, IMAG-DLO | Onderzoek | 1994 |
| Susteren | Wilg | 4 | EBPS | Onderzoek | 1995 |
| Emmen | Wilg, populier, Misc., Robina | 1,6 | CPV | ? | 1995 |
| Boxtel | Wilg, populier, Robina | 1,2 | CPV | ? | 1995 |
| Flakkee | Wilg, populier | 2,9 | CPV | ? | 1995 |
| Lelystad e.o. | Wilg, populier | 12,5-200 | CPV-consortium | Demonstratie / commercieel | 1999 |
| Totaal | | 86,5 – 277 | | | |

Naast de teelt van energiegewassen kan de teelt van microalgen interessant zijn (reeds initiatieven in combinatie met mestverwerking in Oost Nederland). Een belangrijk voordeel van microalgen t.o.v. energiegewassen is dat ze meer biomassa per landoppervlakte-eenheid en meer gewenst materiaal per biomassa gewichts-eenheid kunnen produceren. Microalgen bezitten een hogere foto-synthetische energetische efficiëntie vanwege hun eenvoudige levensvorm (geen bloemen, wortels, vruchten). Het praktisch lange-termijn energetisch rendement van microalgen bedraagt 5-6% (Nederlandse condities en open vijver kweeksystemen) t.o.v. 3-4% voor energiegewassen. In een gesloten algen fotobioreactor zal het mogelijk worden om dit energetische rendement te verhogen tot maximaal ca. 15% (de theoretisch maximale energetische efficiëntie is 23%) (van Doorn, 1998). Teelt van microalgen kan plaatsvinden tezamen met een andere toepassing, zoals: CO₂-verwijdering uit de rookgassen van E-centrales en afvalwaterzuivering. Door de groeiomstandigheden van de microalgen te conditioneren kunnen de microalgen worden gebruikt voor de productie van z.g. “specialties” (fijne chemicaliën met een hoge marktprijs), waarbij de organische restfractie wordt gebruikt voor energievoorzieningsdoeleinden (verbranding-, vergassing-, vergisting/WKK).

Vanwege de relatief hoge productiekosten van energieteeltgewassen in Nederland, zal het aandeel aan de energievoorziening, voornamelijk in de vorm van teelt van multifunctionele gewassen in combinatieteelt cultures, beperkt blijven tot benutting in niche markten.

IMPORTMOGELIJKHEDEN VAN BINNEN/BUITEN DE EU

In het (recente) verleden is een aantal studies uitgevoerd waarbij is geanalyseerd wat de importmogelijkheden van biomassa uit met name de Baltische Staten en Zuid-Amerika zijn (Wasser, 1995, Bestebroer, 1996, Venendaal, 1998). Uit deze studies volgt dat import vanuit kostenoverwegingen potentieel voordeliger is dan binnenlandse teelt. Punten van aandacht op dit gebied zijn: 1) de “optimale” vorm voor biomassa voor lange-afstand transport (“ruw” of als olie/char/LNG (hoge-energiedichtheid)) en 2) de teeltcondities in genoemde landen (is e.e.a. wel duurzaam?).

Uit de GRAIN-studie (Lysen, 2000) resulteert dat mondiaal gezien ruim 800 EJ_{th} aan energiegewassen op landbouwgronden kan worden geproduceerd, zonder de wereldvoedselproductie in gevaar te brengen. Het gebruik van braakland kan hieraan nog eens 150 EJ_{th} toevoegen. Inclusief organische reststromen, zou de bovengrens van het potentieel aan beschikbare biobrandstoffen meer dan 1000 EJ_{th} per jaar kunnen bedragen.

In de praktijk geldt dat de potentiële mondiale contracteerbaarheid van biomassa o.a afhangt van de bevolkingsgroei, het voedselconsumptiepatroon en de toekomstige landbouwproductiviteit. De schattingen variëren van 15-85% van het verwachte mondiale energiegebruik in 2050 (van den Broek, 2003). Het importpotentieel vanuit de EU25 zal met name afhangen van de gevoerde landbouwpolitiek.

Indien Nederland tijdig in dit (mondiale) marktpotentieel participeert, bestaat de mogelijkheid door middel van grootschalige import, een aanzienlijke hoeveelheid relatief schone biobrandstoffen te contracteren. Voor de korte-termijn lijkt import vanuit de EU25 meer voor de hand liggend, dan import vanuit ontwikkelingslanden.

Op dit moment wordt als onderdeel van een groot EU-project "VIEWLS" geanalyseerd wat de beschikbaarheid/contracteerbaarheid van biomassastromen (zowel organische reststromen als teeltgewassen) binnen de EU en de kandidaat lidstaten is en op de lange-termijn kan zijn. Tevens wordt geanalyseerd hoe het binnenlandse transport van biomassa (gerelateerde energiedragers) binnen de EU zal kunnen worden georganiseerd ("biomass trading scenarios").

De duurzaamheid van grootschalige import van biomassa is binnen het Transitieproject Biomassa Internationaal geadresseerd als een kritische succesfactor voor de grootschalige implementatie van biomassa in de Nederlandse economie. Dit punt wordt in breed kader uitgewerkt en dient uiteindelijk te resulteren in een soort van duurzaamheidskeurmerk voor biomassa (ingevulde set van duurzaamheidsindicatoren).

TOTAAL POTENTIEEL & PRIJSTELLING BIOMASSA VOOR NEDERLAND

Het totale potentieel van biomassa(rest)stromen dat op termijn (2020) beschikbaar komt voor Nederlandse energiedoelinden, kan als volgt worden samengevat:

- Binnenlandse organische reststromen : 120 PJ_{th}
- Binnenlandse teelt : 45-60 PJ_{th}
- Totaal binnenland : 165-180 PJ_{th}

- Import vanuit binnen/buiten de EU : aandeel van mondiale 1000.000 PJ_{th}

De prijsstelling van biomassastromen is nog onduidelijk. Relatief "vuile" organische reststromen (bijv. slib, mest, ...) zijn qua prijs (negatief, vanwege vermeden afvoerkosten) het interessants om te benutten, echter beperkt inzetbaar. De schonere organische reststromen (bijv. dunningshout, reststromen VGI, ...) zijn, vanwege concurrerende toepassingsmogelijkheden, reeds minder interessant. Import van energiegewassen vanuit binnen/buiten de EU biedt uit kostentechnisch en capaciteitsoogpunt meer perspectieven dan binnnlandse teelt. De invloed die een toenemende (mondiale) vraag naar (schone) biobrandstoffen op de daadwerkelijke contracteerbaarheid en de prijsstelling heeft, verdient nader onderzoek.

APPENDIX 2: VERGASSING

Vergassing is het proces waarbij een vloeibare of vaste brandstof wordt omgezet in een brandbaar gas. Het doel van vergassing is in het algemeen om zoveel mogelijk verbrandingsenergie uit de brandstof om te zetten in een brandbaar gas. In tegenstelling tot vergisting, verloopt vergassing bij relatief hoge temperaturen, in de praktijk circa 700°C of hoger. Deze temperatuur wordt meestal bereikt door met lucht of zuurstof een deel van de brandstof of het geproduceerde gas te verbranden. In deze appendix worden twee reactortypen gebruikt in de uitleg: circulerend wervelbedvergasser (CFB) en entrained flow vergasser die bedreven worden bij 700-1000°C resp. 1300-1600°C. In appendices 4 resp. 3 worden beide vergassers technisch nader beschreven.

Lucht of zuurstof

De keuze voor lucht of zuurstof als oxidatiemiddel bij vergassing wordt met name bepaald door de eisen die gesteld worden door de gastoevoering. Het gebruik van lucht resulteert in een gas dat sterk verdund is met stikstof. Voor de verbranding van het gas in een gasmotor of gasturbine is dit geen bezwaar. Bij de toepassing van het gas als synthesegas voor bijvoorbeeld transportbrandstoffen of chemicaliën, is N₂ veelal ongewenst. Dit verlaagt het rendement en/of maakt hogere drukken noodzakelijk en/of resulteert in grote (ongewenste) circulatiedebieten in de synthesereactor. Voor de productie van synthesegas is het gebruik van zuurstof in het algemeen dus noodzakelijk. In sommige gevallen is het gebruik van zuurstof om een andere reden onvermijdelijk. Dit is het geval bij verslakkende vergassers waarbij een dusdanig hoge temperatuur cq. warmteflux is gewenst dat lucht niet voldoet. Tabellen 16 en 17 tonen het verschil tussen de prestaties van een CFB bedreven met lucht en zuurstof.

Druk

Het bedrijven van vergassing op verhoogde druk heeft enkele belangrijke consequenties.

- § Ten eerste dient de vaste brandstof op druk gebracht te worden. Het conventionele systeem via zgn. lock hoppers vergt grote hoeveelheden inert gas. Naast de economische consequenties van het verbruik, dient het gas ook te worden gecompriëerd en wordt dus elektriciteit verbruikt. Tevens komt een deel van het inert gas terecht in de vergasser waar het een negatief effect heeft op het rendement.
- § Ten tweede verlopen de vergassingsreacties bij hoge druk anders. In het algemeen kan worden gesteld dat bij hogere druk de vorming van gassen uit vaste stoffen moeilijker is.

In de tabellen 16 en 17 is voor twee typen vergassers (CFB en entrained flow) aangegeven wat de numerieke consequenties zijn van het verhogen van de druk van 1 naar 20 bar. Duidelijk is de afname van het koudgasrendement en de toename van de bijdrage van koolwaterstoffen aan de verbrandingswaarde van het gas uit een CFB. Voor de berekeningen is gekozen voor het gebruik van CO₂ als inert gas voor het op druk brengen van het gas en het toevoeren van de brandstof aan de vergasser. Ten opzichte van bijvoorbeeld N₂ heeft dit als belangrijk voordeel dat het kan worden verwijderd uit het gas (en kan worden hergebruikt) en dus geen blijvend negatief effect heeft op de kwaliteit van het geproduceerde gas.

Globale balansen

De energie uit de brandstof (biomassa) wordt verdeeld over gasvormige brandstof, warmte (heet gas), energieverlies en brandbaar residu als gevolg van onvolledige conversie. De relatieve “opbrengsten” zijn afhankelijk van het soort vergasser en het gebruikte oxidatiemiddel (lucht of zuurstof). In Tabel 16 worden enkele typische waarden gegeven voor genoemde energietermen voor het tweetal eerder genoemde vergassertypen. Uit Tabel 16 wordt duidelijk dat het rendement naar brandbaar gas voor alle vergassers circa 75% bedraagt. Dit is het koudgasrendement. Tabel 17 bevat typische waarden voor de massabalans. Voor de beschrijving van de vergassers wordt verwezen naar appendix 3 en 4.

Tabel 16: Energiebalans, typische waarden voor vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow

| Reactortype | CFB | CFB | CFB | EF | EF |
|--|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|----------|
| Druk | 1 bar | 1 bar | 20 bar | 1 bar | 20 bar |
| Oxidatiemiddel | lucht | zuurstof/ stoom ^(a) | zuurstof/ stoom ^(a) | zuurstof | zuurstof |
| IN | | | | | |
| Brandstof (aanname: 100%) | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Lucht (aanname: 400°C) | 3% | - | - | - | - |
| Stoom (aanname: 400°C) ^(a) | - | 2% | 1% | 0.3% | 0.3% |
| UIT | | | | | |
| Gas (verbrandingsenergie) ^(b) | 77% ^(c) | 76% ^(c) | 76% ^(c) | 77% | 75% |
| Warmte (heet gas) | 16% | 14% | 13% | 20% | 22% |
| Energieverlies | 2% | 2% | 2% | 2% | 2% |
| Vaste rest (onvolledige conversie) | 8% ^(d) | 8% ^(d) | 10% | 1% | 1% |

(a) stoom wordt toegevoegd vanwege het gevaar van sintering/agglomeratie, aanname stoom/zuurstof = 1 kg/kg

(b) dit is het koudgasrendement

(c) inclusief 3-4% teer

(d) gebaseerd op (Drift, Meijden& Strating, 2002)

Tabel 17: Massabalans, typische waarden voor vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow

| reactortype | CFB | CFB | CFB | EF | EF |
|--------------------------------|-------|--------------------|--------------------|----------|----------|
| druk | 1 bar | 1 bar | 20 bar | 1 bar | 20 bar |
| oxidatiemiddel | lucht | zuurstof/ stoom | zuurstof/ stoom | zuurstof | zuurstof |
| IN | | | | | |
| brandstof (aanname: 100%) | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| lucht | 120% | | | | |
| zuurstof | | 26% | 20% | 46% | 49% |
| stoom | | 26% | 20% | 5% | 5% |
| CO ₂ ^(a) | | | 8% | | 24% |
| UIT | | | | | |
| gas | 214% | 146% | 141% | 148% | 175% |
| vaste rest | 6% | 6% | 7% | 3% | 3% |

(a) CO₂ wordt toegevoegd als inert gas om de vaste brandstof op druk te brengen

Gassamenstelling en verbrandingswaarde

De samenstelling van het geproduceerde gas is sterk afhankelijk van de gebruikte vergassingstechnologie. In het algemeen bevat het gas met name H₂ en CO als brandbare componenten en CO₂ en H₂O als verbrandingsproducten. Het grote verschil tussen de verschillende vergassers zit in de concentratie koolwaterstoffen zoals methaan (CH₄), etheen (C₂H₄), acetyleen (C₂H₂) en benzeen (C₆H₆). Hogere koolwaterstoffen (groter dan benzeen) worden vaak aangeduid met de verzamelnaam teer (Neeft, 2000).

Tabel 18 toont de typische gassamenstelling voor de CFB en entrained flow vergasser. In alle gevallen maken H₂ en CO het grootste deel uit van de brandbare componenten in het gas. De aanwezige koolwaterstoffen bij met name de CFB-vergasser zijn echter niet te verwaarlozen. Zoals blijkt uit Tabel 19, zijn koolwaterstoffen verantwoordelijk voor tientallen procenten van de energie van het gas. Bij de CFB op 20 bar is dat zelfs circa 70%. De bijdrage van H₂ en CO aan de energie-inhoud van het gas is in dat geval dus beperkt tot zo'n 30%.

Tabel 18: Gassamenstelling en verbrandingswaarde, typische waarden voor gas afkomstig uit enkele vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow

| reactortype | CFB | CFB | CFB | EF | EF |
|--|-------|--------------------|--------------------|----------|----------|
| druk | 1 bar | 1 bar | 20 bar | 1 bar | 20 bar |
| oxidatiemiddel | lucht | zuurstof/ stoom | zuurstof/ stoom | zuurstof | zuurstof |
| CO [vol% droog gas] | 21% | 27% | 20% | 53% | 53% |
| H ₂ [vol% droog gas] | 14% | 32% | 19% | 33% | 27% |
| CO ₂ [vol% droog gas] | 14% | 29% | 40% | 13% | 19% |
| CH ₄ [vol% droog gas] | 5% | 8% | 15% | 0% | 0% |
| N ₂ + Ar [vol% droog gas] | 44% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| C ₂ H _x [vol% droog gas] | 2% | 3% | 5% | 0% | 0% |
| C ₆ H _x [vol% droog gas] | 0.4% | 1% | 1% | 0% | 0% |
| teer [g/m _n ³ nat gas] | 8 | 8 | 11 | 0 | 0 |
| H ₂ O [vol% nat gas] | 11% | 28% | 30% | 19% | 22% |
| LHV [MJ/m _n ³ droog gas] | 7.7 | 12.4 | 14.9 | 10.3 | 9.6 |

Tabel 19: Bijdrage van componenten in het gas aan de verbrandingswaarde van het gas, typische waarden voor gas afkomstig uit enkele vergassers bedreven met gedroogd hout (7% vocht); CFB: circulerend wervelbed, EF: entrained flow

| reactortype | CFB | CFB | CFB | EF | EF |
|-------------------------------|-------|--------------------|--------------------|----------|----------|
| druk | 1 bar | 1 bar | 20 bar | 1 bar | 20 bar |
| oxidatiemiddel | lucht | zuurstof/ stoom | zuurstof/ stoom | zuurstof | zuurstof |
| CO | 35% | 27% | 16% | 65% | 70% |
| H ₂ | 20% | 28% | 14% | 35% | 30% |
| CH ₄ | 22% | 22% | 35% | 0% | 0% |
| C ₂ H _x | 12% | 12% | 19% | 0% | 0% |
| C ₆ H _x | 7% | 7% | 12% | 0% | 0% |
| teer | 4% | 3% | 4% | 0% | 0% |

Teerverwijdering

Teer is een verzamelnaam voor grote koolwaterstoffen (verbindingen van koolstof en waterstof). Teer is een onvermijdelijk product bij vergassers zoals een CFB die bedreven worden op temperaturen tot maximaal 1000°C. Teer is vaak ongewenst vanwege de eigenschap om reeds bij hoge temperatuur te condenseren. Gecondenseerde teer is plakkerig en kan voor serieuze operationele problemen zorgen. Daarnaast vertegenwoordigt teer, afhankelijk van het soort vergasser, enkele procenten van de energie uit de vaste biomassa-brandstof. Er wordt momenteel veel onderzoek verricht naar mogelijkheden om teer te verwijderen of te voorkomen. De volgende opties bestaan:

- Hoge temperatuur: bij temperaturen van circa 1300°C of hoger worden teren niet gevormd of worden teren die ontstaan direct weer afgebroken. Hiervan wordt gebruik gemaakt in het geval van de entrained flow vergasser. Tegelijkertijd worden de kleine koolwaterstoffen gekraakt.
- Wassen: ECN heeft in de laatste jaren de zgn. OLGA-technologie ontwikkeld; dit is een op olie gebaseerde gaswasser die in staat is gebleken teren nagenoeg volledig te verwijderen uit gas (Bergman, van Paasen& Boerrigter, 2002; Boerrigter, van Paasen& Bergman, 2003).
- Katalytische reductie: Door o.a. UMSICHT, onderdeel van het Fraunhofer Instituut, wordt gewerkt aan een op nikkel gebaseerde katalysator om teren uit een CFB katalytisch te reduceren (Ising, Gil& Unger, 2000). Een groot nadeel van de katalytische methode om teer te verwijderen is de gevoeligheid van de katalysator voor verontreinigingen gecombineerd met de noodzaak de katalysator te plaatsen direct na de vergasser en dus in het nog verder ongereinigde gas. Eerst reinigen zou namelijk afkoeling van het gas nodig maken en teerproblemen veroorzaken.

Vochtgehalte biomassa

Het vochtgehalte van de gebruikte biomassa heeft grote invloed op het rendement van een vergasser. Vocht dat met de biomassa de vergasser ingaat moet namelijk verdampt worden en worden opgewarmd tot de vergassingstemperatuur. De energie die dit kost gaat ten koste van het koudgasrendement. Bij gebruik van hout met 15% in plaats van bovengenoemde 7% vocht, daalt het koudgasrendement met ruim 2 procentpunten! Hier tegenover staat dat er minder warmte wordt gebruikt om het hout te drogen. Meestal zal de benodigde lage-temperatuurwarmte echter ruimschoots aanwezig zijn als restwarmte in het proces.

APPENDIX 3: ENTRAINED FLOW VERGASSING

Een entrained flow vergasser (in het Nederlands soms ook stofwolkvergasser genoemd) is feitelijk een reactor waarin de brandstof wordt meegesleurd met het gas en in de meestal korte verblijftijd in de reactor (circa 1-2 seconde) wordt omgezet. Normaliter is een entrained flow vergasser groot (enkele honderden MW_{th}) en wordt hij bedreven bij hoge temperatuur (1300-1600°C), bij hoge druk (20-40 bar) en met zuurstof als oxidatiemiddel. Zowel vaste stoffen als vloeistoffen (en slurries) kunnen in entrained flow vergassers worden gevoed. Vaste stoffen worden vaak pneumatisch ingeblazen met een hoeveelheid inert gas, de vloeistoffen worden verneveld. In de zogenaamde brander wordt de brandstof in contact gebracht met de zuurstof. Hier kunnen lokaal temperaturen heersen van boven de 2500°C.

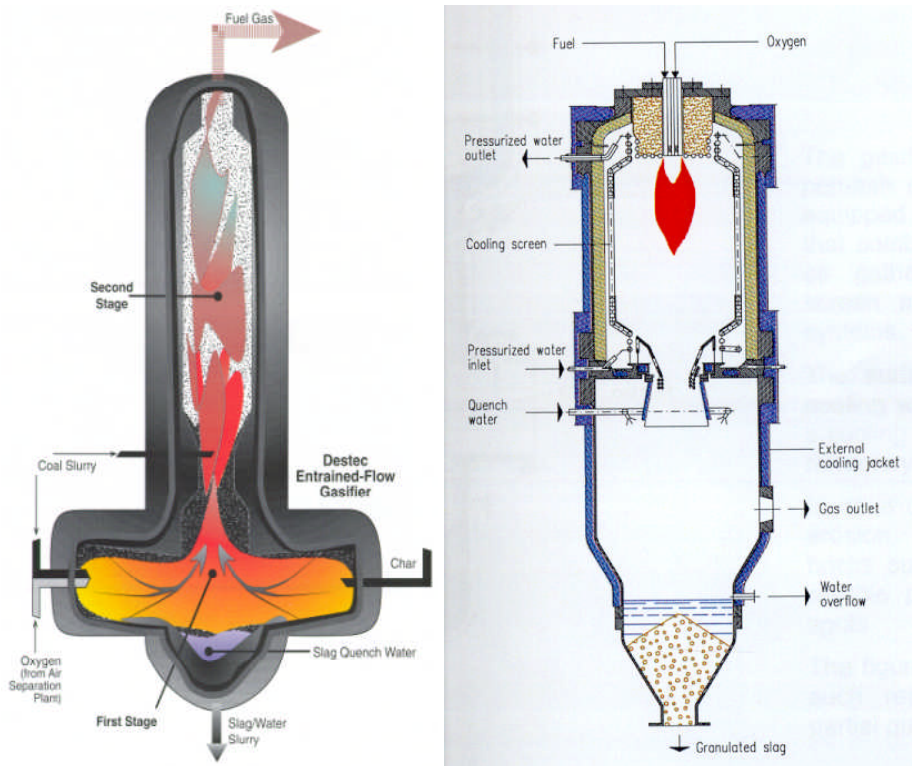
Er zijn diverse entrained flow vergassers op dit moment commercieel in bedrijf. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen twee soorten:

1. verslakkende vergasser
2. niet-verslakkende vergasser

Verslakkende vergasser

In een verslakkende vergasser worden de inerte bestanddelen (as) gesmolten. De zogenaamde vloeibare slak stroomt langs de wand naar beneden en wordt daar afgevoerd. De slaklaag in de reactor dient tevens als een bescherm laag voor de wand van de reactor. Hierdoor worden eisen gesteld aan de slakeigenschappen en wordt vaak een zogenaamd fluxmiddel toegevoegd om de eigenschappen te beïnvloeden. In het geval van kolen als brandstof wordt vaak kalksteen als fluxmiddel gebruikt. Verslakkende entrained flow vergassers worden geleverd door o.a. Shell (SCGP), Texaco, E-gas (Destec), Future-Energy (Noell), Krupp-Uhde (Prenflo), MHI, Hitachi en Choren (Carbo-V). Een voorbeeld van een verslakkende vergasser is de circa 600 MW_{th} kolenvergasser in Buggenum (eigenaar NUON), ontwikkeld door Shell (Zuideveld, de Graaf, 2003). Een ander voorbeeld is de 130 MW_{th} vergasser van Noell (huidige naam: Future Energy) op het terrein van de Schwarze Pumpe in Duitsland voor de vergassing van afvalolie/rioolslurries en andere afvalstoffen (Jaeger, Mayer, 2000). Figuur 9 toont de vergasser zoals Noell die heeft en levert. De onderste helft dient hier als koeler door waterinjectie.

Bij verslakkende vergassers wordt in veel gevallen de wand gekoeld (en stoom geproduceerd) om het bestaan van een beschermende slaklaag te garanderen. Op deze wijze is altijd een gestolde laag aanwezig en bestaat er een temperatuurgradiënt van gekoelde wand naar hete reactorinhoud.



Figuur 9: Schematische voorstelling van een E-gas (voorheen DESTEC) entrained flow reactor (links) en een vergasser van Future Energy (rechts) (Future Energy, 2003)

Niet-verslakkende vergasser

In een niet-verslakkende vergasser wordt geen slak geproduceerd. In de praktijk betekent dat, dat de brandstof een maximum asgehalte mag hebben van minder dan 1%. De vergassing van vloeistoffen vindt vaak plaats in een niet-verslakkende vergasser. Een voorbeeld hiervan is het SGP (Shell Gasification Process) voor olie-residuen in Pernis (Zuideveld, de Graaf, 2003).

Biomassa in een entrained flow vergasser

In analogie met de vergassing van kolen, kan ook biomassa in een entrained flow vergasser worden omgezet in synthesegas. In een recent afgerond project met subsidie van SDE is geconcludeerd dat een verslakkende vergasser het meest geschikt is voor biomassa. Bij het gebruik van schoon hout is silica noodzakelijk als fluxmiddel. Voor voldoende slak in de reactor is een recycle van slak nodig aangezien het asgehalte van schoon hout met circa 1% zeer laag is (vergelijk kolen: 10-15% as).

APPENDIX 4: WERVELBEDVERGASSING

Wervelbedden of fluïde bedden zijn reactoren waarin een bedmateriaal (deeltjes met een grootte van meestal 0.1-1 mm) in een wervelende toestand wordt gehouden door er gas doorheen te leiden. Het gas is meestal de lucht of zuurstof die wordt toegevoegd voor het proces, aangevuld met het gas dat wordt geproduceerd tijdens de conversie. Het wervelbed is voor te stellen als een kolkende massa van deeltjes. Het grote voordeel van een wervelbed is dan ook de goede warmteoverdracht en de homogeniteit van temperatuur en massa in het bed. De condities in de reactor zijn hierdoor nauwkeurig in te stellen en te handhaven.

Vaak wordt onderscheid gemaakt tussen een zgn. bubbling wervelbed (BFB: bubbling fluidised bed) en circulerend wervelbed (CFB: circulating fluidised bed). Het verschil is grofweg een factor tien in de gassnelheid en daarmee samenhangend de mate waarin deeltjes uit het bed worden weggeblazen. In een bubbling wervelbed worden de deeltjes in principe niet weggeblazen, terwijl in een circulerend wervelbed de deeltjes worden weggeblazen. In dat laatste geval worden de deeltjes afgevangen met een cycloon en teruggevoerd naar het bed. Vandaar de naam circulerend wervelbed.

De verblijftijd van een brandstofdeeltje in een wervelbedvergasser is afhankelijk van de deeltjesgrootte en kan variëren van enkele seconden (zeer kleine deeltjes) tot vele minuten (grote deeltjes, in de praktijk meestal enkele centimeters tot hooguit een decimeter).

In het algemeen wordt een wervelbedvergasser bedreven bij temperaturen tussen 700 en 1000°C. Bij lagere temperatuur worden in het algemeen de reacties te traag en bij hogere temperatuur treden enkele ongewenste effecten op. Dit laatste heeft met name te maken met het smeltgedrag van as van biomassa. Het smelten van componenten is in het algemeen ongewenst in een wervelbed omdat dit resulteert in het aan elkaar plakken van deeltjes waardoor de fluïdisatie wordt verstoord. Dit effect versterkt zichzelf en wordt aangeduid als de-fluïdisatie, sintering of agglomeratie.

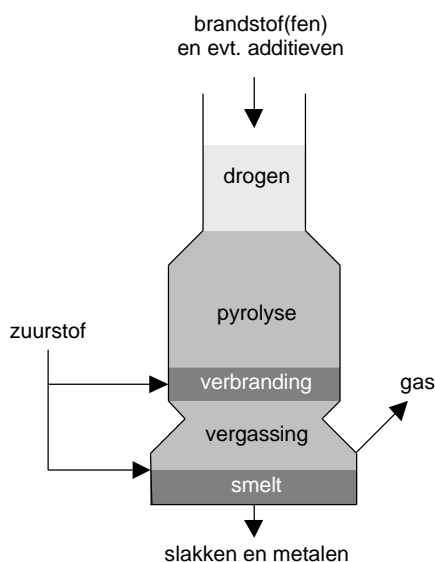
Wervelbedden in het algemeen worden op zeer veel plaatsen en voor zeer veel doelen gebruikt. Ook met biomassaconversie in wervelbedden is veel ervaring. Er zijn diverse leveranciers van zowel BFB's als CFB's voor de vergassing van biomassa die reeds meerdere vergassers hebben geleverd. De belangrijkste zijn: Lurgi, TPS, Foster-Wheeler en Carbona. Daarnaast bestaan er diverse partijen die biomassavergassers leveren waarbij meerdere wervelbedden zijn gekoppeld. De bekendste zijn: FERCO (Battelle-proces) en REPOTEC (FICFB-proces). ECN heeft enkele lab-schaal en pilot-schaal wervelbedvergassers gelijkend op diverse commercieel beschikbare vergassers.

De meeste bestaande wervelbedreactoren voor biomassa worden bedreven met lucht op atmosferische druk. Er zijn echter enkele voorbeelden van het gebruik van zuurstof en het bedrijf op 10-20 bar. Ook ECN heeft ervaring met het gebruik van zuivere zuurstof. Met name in een CFB blijkt het belangrijk voldoende stoom toe te voegen aan de zuurstof om het risico voor agglomeratie te beperken. Stoom vervangt feitelijk de warmtecapaciteit (dit is de mate waarin energie kan worden opgeslagen en dus de mate waarin de temperatuur in de reactor kan worden gehomogeniseerd) van de anders aanwezige stikstof uit de lucht en werkt als zogenaamde moderator. Stoom heeft als voordeel dat het eenvoudig uit het gas kan worden verwijderd door condensatie.

APPENDIX 5: HET OMEGA-PROCES VAN OXYTEC

De OMEGA¹-vergasser (voorheen 2SV-reactor) is ontwikkeld door Oxytec in Leipzig in Duitsland (ECN., 2003). Oxytec beschikt over een testinstallatie van enkele MW_{th}. De OMEGA-vergasser kan worden bedreven op hout, maar een zekere hoeveelheid cokes lijkt noodzakelijk. Figuur 10 toont schematisch de OMEGA-vergasser.

In het bovenste deel van de installatie bevindt zich de pyrolysezone, waar de brandstof achtereenvolgens wordt gedroogd, ontgast en gepyrolyseerd bij enkele honderden graden Celsius. De pyrolyseproducten zijn pyrolysegas en char (houtskool bij het gebruik van hout als brandstof). Het gas bevat een hoge concentratie teer (grote koolwaterstoffen).



Figuur 10: Schematisch weergave van de OMEGA-vergasser van Oxytec

Aan de onderzijde van de pyrolysezone wordt zuurstof ingeblazen met meerdere zuurstoflansen. Door verbranding van het gas ontstaat hier een zeer hete zone. De hete zone is zowel een bron voor energie voor de bovengelige pyrolysezone als een zone waarin de teercomponenten in het pyrolysegas worden afgebroken (gekraakt). De vaste fase (char, cokes) passeert de hete zone min of meer als inert materiaal. Na het verlaten van de verbrandingszone zal vanwege het contact met de toegevoegde cokes en met name char een zgn. chemische quench plaatsvinden. Hierbij wordt het gas gekoeld als gevolg van de endotherme vergassingsreacties tussen gasvormige en vaste fase. De uittree-temperatuur van het ruwe productgas bedraagt 800-1000°C. De overgebleven char en met name cokes zakt onderin de reactor in een smelt die op temperatuur (circa 1500°C) wordt gehouden door het inblazen van zuurstof. Aan de onderzijde bevindt zich een aftappunt voor de slakken. Slak wordt periodiek afgetapt. De reactor wordt gekoeld met water om met name de bemetseling in de smeltzone te beschermen.

De OMEGA-vergasser produceert een gas dat rijk is aan CO en H₂. Metingen van ECN hebben echter aangetoond dat ook een geringe hoeveelheid methaan en andere koolwaterstoffen aanwezig is in het gas. Ook teer blijkt aanwezig te zijn.

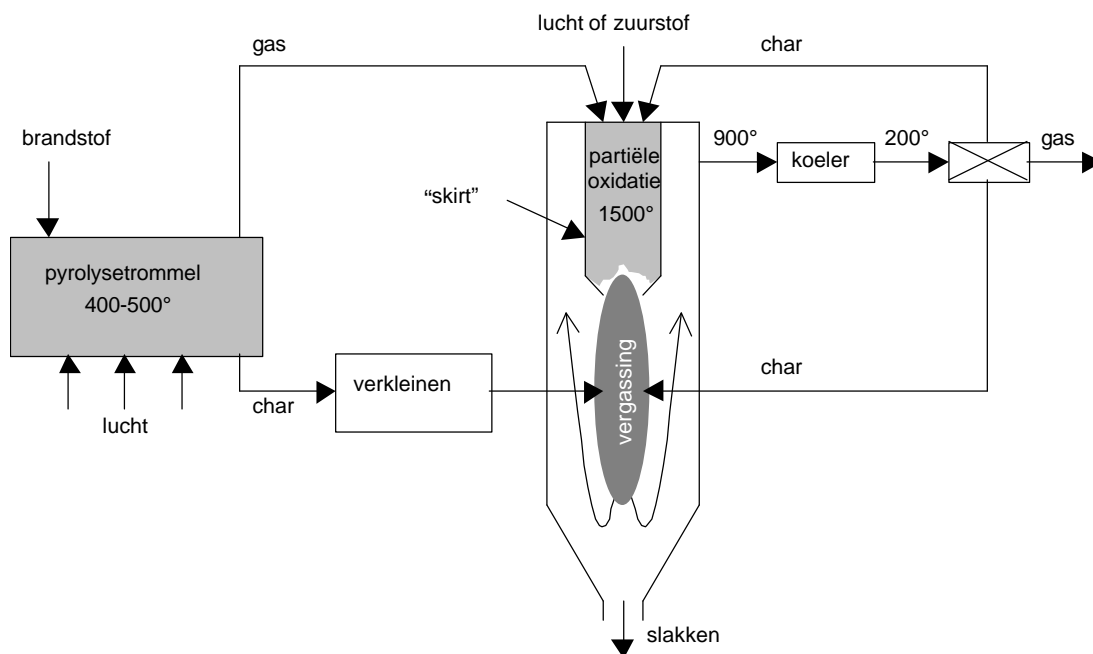
Het grote voordeel van het OMEGA-concept is de eenvoud. Alles gebeurt in één reactor. Het kritische punt is met name de discontinue aftap van de vloeibare slak. Ook blijkt het concept niet in staat gas te produceren dat vrij is van methaan en teer. Tenslotte kan worden vermeld dat de OMEGA-vergasser slechts beperkt opschaalbaar is, enkele tientallen MW_{th} lijkt het maximaal haalbare. De grootte van de reactor wordt met name bepaald door de noodzakelijke verblijftijd van de vaste delen (orde-grootte 1 uur). De vergasser zal dus niet kleiner worden als hij op druk wordt bedreven.

APPENDIX 6: HET CARBO-V PROCES VAN CHOREN

Sinds 1993 wordt gewerkt aan de ontwikkeling van het Carbo-V-proces door Choren (het vroegere UET) in Freiberg in Duitsland. In 1998 is een atmosferische 1 MW_{th} testfaciliteit gebouwd in Freiberg die tot oktober 2003 totaal 10 000 uur in bedrijf is geweest (Rudloff, 2003a). In september 2003 is de nieuwe installatie met een capaciteit van 30 MW_{th} in bedrijf genomen (Rudloff, 2003b). In 2005 zal in Freiberg een installatie van 43 MW_{th} op 5 bar worden gerealiseerd voor de productie van haast 22 MW diesel via Fischer-Tropsch synthese (Rudloff, 2003a).

Beschrijving

Het Carbo-V proces bestaat uit drie onderdelen: (1) pyrolyse met directe luchtinjectie, (2) partiële verbranding van vluchtige componenten (en teruggevoerde char uit de derde reactor: vergassingsreactor) en (3) een vergassingsreactor waar het hete gas uit de verbrandingsreactor wordt afgekoeld door char te injecteren die bij deze temperatuur vergast (endotherme reacties). Dit is een zgn. chemische quench. De vloeibare slakken worden onderin de reactor afgevangen in een waterbad. Figuur 11 toont de uitvoeringsvorm van de Carbo-V vergasser van 1 MW_{th} zoals die is geplaatst in Freiberg.



Figuur 11: Uitvoeringsvorm van het Carbo-V-concept

De Carbo-V-vergasser produceert met name CO en H₂ als gewenste brandbare componenten in het gas. In de praktijk blijkt het gas ook 1.5% CH₄ te bevatten (UET, 2000). In (Ferrero, 2000) wordt het een koudgasrendement genoemd van 75-80% als lucht wordt gebruikt en 78-82% als zuurstof wordt gebruikt.

Kritische punten in het Carbo-V-proces zijn de injectie van de gemalen char in de chemische quench, de koeling van het stof/char-rijke gas, de stof/char-af scheiding uit het gas en het vervolgens terugvoeren ervan (pneumatisch transport) naar de vergasser en verbrander. Verder kan worden gezegd dat het een relatief duur proces is omdat het bestaat uit twee reactoren waarbij de hoge-temperatuurreactor bovendien bestaat uit twee delen. Tenslotte is de opschaalbaarheid van het Carbo-V-concept beperkt. De afmeting van pyrolyse reactor (trommel) vormt hierbij naar eigen zeggen met een maximale lengte van 5 meter de belangrijkste beperking (ECN, 2000). Waarschijnlijk is ook de char-injectie en de gewenste uniforme verdeling over de doorsnede van de reactor een probleem bij de opschaling. De vergassingsreactor zónder char-injectie kan wel worden opgeschaald, deze bestaat reeds op een schaal van 130 MW_{th} als (zuurstof-geblazen) Noell-vergasser (Future-Energy) bij de Schwarze Pumpe.