



HOUTIGE BIOMASSA VOOR BIO-ENERGIE

CO₂-effecten en technische
ontwikkelingen

Houtige biomassa voor bio-energie

CO₂-effecten en technische ontwikkelingen

Winand Smeets en Jan Ros

Houtige biomassa voor bio-energie. CO₂-effecten en technische ontwikkelingen

© PBL (Planbureau voor de Leefomgeving)

Den Haag, 2014

ISBN: 978-94-91506-63-5

PBL-publicatienummer 1278

Eindverantwoordelijkheid

PBL

Contact

Winand Smeets (winand.smeets@pbl.nl)

Beeldredactie

Beeldredactie PBL

Eindredactie en productie

Uitgeverij PBL, Den Haag

Opmaak

Martin Middelburg, VijfKeerBlauw

U kunt de publicatie downloaden via de website www.pbl.nl.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Smeets, W. & J. Ros (2014), *Houtige biomassa voor bio-energie. CO₂-effecten en technische ontwikkelingen*, Den Haag: PBL.

Het PBL is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is vóór alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en altijd wetenschappelijk gefundeerd.

Inhoud

Samenvatting 4

1 Inleiding 6

1.1 Aanleiding en doel 6

1.2 Leeswijzer 6

2 CO₂-effecten van lignocellulose biomassa 7

2.1 CO₂-effecten op korte termijn 7

2.2 CO₂-effecten op lange termijn 16

3 Ontwikkelingsstadium van innovatieve energietechnologie voor lignocellulose biomassa 21

3.1 Basisprincipes van innovatieve technologie 21

3.2 Technologische ontwikkeling 26

Literatuur 33

Samenvatting

De PBL-publicatie *Houtige biomassa voor bio-energie. CO₂-effecten en technische ontwikkelingen* gaat over de omzetting van duurzaam geproduceerde houtige biomassa naar bio-energie. In het rapport worden de CO₂-effecten vergeleken voor verschillende (bestaande en innovatieve) toepassingen, en worden relevante technische ontwikkelingen beschreven.

Voorbeelden van houtige biomassa zijn reststromen uit de bosbouw (boomtoppen, stopen, schors, takken), gerecycled afvalhout, reststromen uit de landbouw (stro), en snelgroeiende bio-energiegewassen (olifantsgras, wilg, populier). Anno 2014 wordt houtige biomassa vrijwel uitsluitend ingezet in verbrandingsinstallaties voor de productie van elektriciteit en warmte. Innovatieve toepassingen, zoals de productie van biobrandstoffen, groen gas en biochemicalïen, zijn in ontwikkeling. Omdat het aanbod van duurzaam geproduceerde houtige biomassa gelimiteerd is en de vraag toeneemt, is de vraag actueel in welke toepassingen biomassa slim kan worden ingezet, wat de CO₂-effecten zijn voor de verschillende toepassingen, en hoe het staat met de ontwikkeling van nieuwe conversietechnieken.

Nieuwe innovatieve toepassingen voor houtige biomassa bieden op de lange termijn CO₂-voordelen

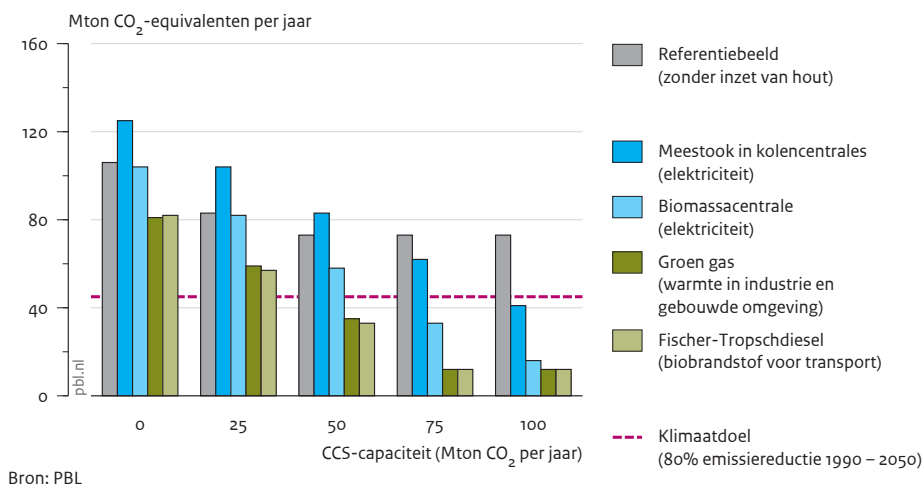
De vergelijking van de CO₂-effecten van verschillende oude en nieuwe toepassingen van houtige biomassa pakt voor de korte termijn heel anders uit dan voor de lange termijn.

Op de korte termijn (tot 2020) levert de inzet van houtige biomassa in de elektriciteitsproductie meer vermindering van de CO₂-uitstoot op dan de inzet van dezelfde hoeveelheid biomassa voor andere toepassingen. Dit effect doet zich voor als biomassa kolen vervangt, wat gebeurt bij het meestoken van biomassa in kolencentrales.

Voor de lange termijn (tot 2050) levert de vergelijking van CO₂-effecten een heel ander beeld op. Nederland heeft als doelstelling om in 2050 ten minste 80 procent minder broeikasgassen uit te stoten dan in 1990. De haalbaarheid van dit doel hangt af van de opslagcapaciteit van CO₂ en de biomassatoepassing(en) waarop wordt ingezet (zie figuur 1). Meestook van houtige biomassa in kolencentrales maakt Nederland sterk afhankelijk van CO₂-opslag en zelfs van CO₂-export. Dat is minder het geval bij biomassacentrales, maar Nederland blijft ook dan in hoge mate afhankelijk van CO₂-opslag en -export. De afhankelijkheid van CO₂-opslag is het kleinst als de beschikbare houtige biomassa wordt gebruikt voor de productie van vloeibare transportbrandstoffen en de productie van groen gas; CO₂-export is dan waarschijnlijk niet nodig. Houtige biomassa kan dan worden ingezet in sectoren met nog weinig zicht op andere CO₂-arme alternatieven, zoals in de luchtvaart en het vrachttransport over de weg en voor ruimteverwarming in de bestaande bebouwing.

Opslag en export van CO₂ zijn in de praktijk nog nauwelijks in beeld. De productie van groen gas,

Figuur 1
Broeikasgasemissie bij inzet van 700 PJ hout, 2050



vloeibare transportbrandstoffen en biochemicalïen uit houtige biomassa lijken daarom voor de lange termijn de aantrekkelijkste opties te zijn. Bij- en meestook van houtige biomassa in elektriciteitscentrales past minder goed in een schoon toekomstbeeld. Mocht in de toekomst CO₂-opslag in beeld komen, dan kunnen de nieuwe toepassingen (biobrandstoffen, groen gas) worden gecombineerd met CO₂-opslag. Daarmee kunnen ‘negatieve’ emissies worden gerealiseerd. Ook is het mogelijk om CO₂ te hergebruiken.

Nederlandse bedrijven investeren in innovatieve toepassingen voor houtige biomassa

De technieken voor de omzetting van houtige biomassa in groen gas, biobrandstoffen en biochemicalïen verkeren nog in de fase van ontwikkeling. Hier liggen uitdagingen voor innovatie en kansen voor een groene economie. In Europa zijn enkele grootschalige demonstratiefabrieken geopend en in voorbereiding, waarin houtige biomassa thermochemisch (met hoge temperaturen) dan wel biochemisch (met micro-organismen) wordt omgezet in vloeibare producten en groen gas. Nederland speelt in deze ontwikkeling een belangrijke rol. Interessant daarbij is de verwerking van hout tot biomethanol, dat in de transportsector of in de chemie kan worden ingezet. Met Europese subsidie is een eerste grootschalige toepassing van een houtvergassingsinstallatie in Nederland in voorbereiding. Hier zal hout worden vergast en omgewerkt in biomethanol. Daarnaast heeft Koninklijke DSM een gepatenteerde enzym- en gisttechnologie ontwikkeld voor de fermentatie van houtige biomassa (onder andere stro) tot bio-ethanol.

Transportbrandstoffen uit houtige biomassa kunnen concurrerend worden bij een olieprijs van 125 dollar per vat

De productie van biobrandstoffen en groen gas uit houtige biomassa is bij de huidige olieprijs niet economisch rendabel te maken zonder subsidie. Het Internationaal Energie Agentschap verwacht dat uit houtige biomassa geproduceerde biobrandstoffen concurrerend worden met benzine en diesel bij een olieprijs van 125 dollar per vat. Dit is een optimistische inschatting, waarbij aanbod en vraag van houtige biomassa gelijke tred houden, en waarbij is aangenomen dat de prijzen van biomassa niet noemenswaard zullen stijgen. Voor Nederland is de vraag relevant of de in de toekomst beschikbare houtige biomassa tegen aanvaardbare kosten naar de Nederlandse havens kan worden getransporteerd om hier grootschalige verwerking te kunnen realiseren.

Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Wereldwijd is er behoefte aan energietechnologieën die een wezenlijke bijdrage kunnen leveren in de transitie naar een CO₂-arme economie in 2050. De inzet van biomassa voor *bio-energie* ter vervanging van fossiele energiedragers (olie, gas, kolen) is een van de bouwstenen in deze transitie, naast energiebesparing, afvang en opslag van CO₂ en elektriciteit uit zon en wind en kernenergie. De Europese Commissie heeft de ambitie om de broeikasgasemissies in 2050 met 80 procent te hebben verminderd ten opzichte van 1990. Nederland heeft zich achter deze ambitie geschaard.

Een energiebron met mogelijk een aanzienlijk duurzaam potentieel is lignocellulose biomassa (houtige biomassa). De schattingen over hoeveel houtige biomassa er mondiaal in potentie beschikbaar is, lopen sterk uiteen. Maar duidelijk is wel dat er meer duurzaam te benutten is dan nu gebeurt. Lignocellulose is een verzamelnaam voor biomassastromen die zijn opgebouwd uit een combinatie van cellulose, hemicellulose en lignine. Lignine is houtstof. Het gaat om stromen zoals houtresten uit de bosbouw (boomtoppen, stompjes, schors, takken), gerecycled hout, reststromen uit de landbouwproductie (tarwestro, maïsstro) en snelgroeiende bio-energiegewassen (olifantsgras, wilg, populier). Dit soort gewassen kan bijvoorbeeld ook worden geteeld op gronden die niet (meer) geschikt zijn voor de productie van voedselgewassen. Het gaat onder andere om gronden die de mens heeft verstoord (door erosie, uitputting van nutriënten, ondeskundige irrigatie of chemische verontreiniging) en die daardoor ongeschikt

zijn geworden voor een rendabele landbouwproductie en niet meer door de mens worden benut.

Lignocellulose biomassa kan op veel manieren worden toegepast. Anno 2014 wordt lignocellulose biomassa nog vrijwel uitsluitend ingezet in verbrandingsinstallaties voor de productie van bio-elektriciteit en biowarmte. Nieuwe innovatieve toepassingen, zoals de productie van biobrandstoffen, groen gas en biochemicalïen, zijn in ontwikkeling.

Deze notitie is technisch van opzet, en is gericht op de mogelijke conversieroutes voor *lignocellulose biomassa*. We beogen twee zaken in beeld te brengen: 1) de CO₂-effecten van verschillende lignocellulose toepassingen (voor elektriciteit, warmte, groen gas, transportbrandstof en chemicaliën) op de korte en de lange termijn, en 2) de ontwikkeling van nieuwe technieken voor de productie van vloeibare biobrandstoffen en groen gas.

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 lichten we de aanpak toe, waarna we de resultaten presenteren van de CO₂-effectberekeningen. In paragraaf 2.1 vergelijken we de kortetermijneffecten op broeikasgasemissies van een achttal biomassa-toepassingen. In paragraaf 2.2 kiezen we een langetermijnperspectief en beoordelen we de haalbaarheid van het klimaatdoel voor 2050. In hoofdstuk 3 gaan we in op de technologische uitdagingen. We beschrijven daar de stand van zaken van innovatieve toepassingen voor de productie van brandstoffen uit droge houtige biomassastromen.

CO₂-effecten van lignocellulose biomassa

2.1 CO₂-effecten op korte termijn

2.1.1 Aanpak

CO₂-reductie per megajoule ingezette biomassa

Het CO₂-effect op de korte termijn van de inzet van biomassa wordt in de Europese regelgeving beoordeeld aan de hand van ketenanalyses. Zo heeft de Europese Commissie een uniforme methode vastgesteld voor het kwantificeren van de CO₂-effecten van biobrandstoffen. Het CO₂-effect van een biobrandstof wordt vastgesteld door de CO₂-emissie van de hele conversieketen (gram CO₂-equivalenten per megajoule biodiesel) te vergelijken met die van de fossiele productieketen (gram CO₂-equivalenten per megajoule fossiele diesel). Het effect wordt dan uitgedrukt als procentuele emissiereductie ten opzichte van het fossiele alternatief. Typische reductiewaarden voor biobrandstofketens op basis van houtige biomassa bedragen 75 tot 95 procent.

In deze notitie gaan we een stap verder en vergelijken we verschillende toepassingen in verschillende sectoren. Daarbij drukken we de CO₂-reductie op een andere manier uit. We nemen niet meer het product als vertrekpunt (megajoule biobrandstof of megajoule elektriciteit) maar redeneren vanuit de beschikbare duurzame biomassa. Omdat de hoeveelheid duurzame lignocellulose biomassa op aarde beperkt is, willen we weten hoe efficiënt verschillende toepassingen omspringen met deze schaarse biomassa. Het is verstandig om de biomassa daar in te zetten waar deze een zo groot mogelijk CO₂-effect heeft. In deze paragraaf gaan we uit van een vaste hoeveelheid biomassa die wordt ingezet in de verschillende te vergelijken

biomassaroutes. Vervolgens vergelijken we de toepassingen op het gerealiseerde CO₂-effect.

Biomassa en CO₂-afvang en -opslag zorgen voor negatieve emissies

In deze paragraaf zijn twee analyses uitgevoerd. In de eerste analyse wordt biomassa ingezet zonder toepassing van afvang en opslag van CO₂ (CCS). In de tweede analyse gaat de inzet van biomassa gepaard met CCS.

De analyse met CCS is relevant, omdat de combinatie van bio-energie met CCS (bio-CCS) een belangrijke sleuteltechnologie kan zijn voor het realiseren van een verregaande emissiereductie op de lange termijn (PBL & ECN 2011). Daarom is gekeken hoe de opties scoren in CO₂-reductie als we wel toepassing van CCS veronderstellen. Daarbij hangt de berekende CO₂-reductie af van de veronderstelling over de toepassing van CCS in de fossiele referentieroute. Hier veronderstellen we dat in beide routes – de biomassaroute en ook de te vervangen fossiele route – CCS wordt toegepast.

Ketenemissies in beeld

De berekende CO₂-reducties zijn inclusief kenmerkende ketenemissies die samenhangen met het gebruik van fossiele energie voor de teelt (kunstmestproductie), voorbereiding, de inzameling en het transport van de biomassa. We hebben een set karakteristieke ketenemissies gebruikt die een aardig gemiddeld beeld geven. In de praktijk kennen deze emissies een aanzienlijke spreiding. De berekeningen houden geen rekening met de effecten op de koolstofbalansen in bossen (*carbon debt*) (PBL 2013). Hoewel de daadwerkelijke CO₂-vermindering van biomassa door deze effecten lager

uitpakt, zijn deze niet relevant voor de vergelijking van toepassingen omdat ze voor alle vergeleken toepassingen gelijk zijn.

Biopolyethyleen als voorbeeld van de toepassing van biomassa in de chemie

Houtige biomassa kan niet alleen worden gebruikt voor bio-energie, maar kan ook als grondstof dienen voor de vervaardiging van chemische producten. In deze analyse hebben we gekeken naar de CO₂-reductie van de productie van polyethyleen (polyetheen) uit houtige biomassa. Polyethyleen is de meest gebruikte kunststof op aarde en wordt op vele manieren gebruikt, zoals voor plastic flessen, plastic zakjes, verpakkingsfilms en water- en gasleidingen. Gelet op het grote productievolume kan deze route een rol spelen bij de opbouw van een CO₂-arme economie. Polyethyleen kan worden geproduceerd op basis van aardolie (met de daaruit geproduceerde nafta als grondstof) en op basis van houtige biomassa (door houtvergassing en synthese). Biopolyethyleen is chemisch niet te onderscheiden van fossiele polyethyleen.

2.1.2 CO₂-effecten zonder CCS

In deze paragraaf vergelijken we de CO₂-reductie voor acht verschillende biomassatoepassingen bij een vaste inzet van 100 petajoule aan houtresiduen uit de bosbouw.

De gerealiseerde CO₂-reductie hangt af van een aantal factoren:

- de fossiele energiebron die wordt vervangen in het energiesysteem (kolen, olie en gas; deze bronnen hebben een verschillende CO₂-emissiefactor, CO₂ per petajoule);
- het energetisch rendement van de biomassatoepassing (hoeveel petajoule biobrandstof per petajoule hout);
- het energetisch rendement van de gesubstitueerde fossiele route (hoeveel petajoule fossiel per petajoule brandstof).

De bestudeerde toepassingen zijn:

1. bio-elektriciteit ter vervanging van kolenelektriciteit;
2. bio-elektriciteit ter vervanging van aardgaselektriciteit;
3. directe biowarmte in de industrie ter vervanging van aardgas (warmteopwekking met ketels);
4. directe biowarmte in gebouwde omgeving ter vervanging van aardgas;
5. biodiesel ter vervanging van aardolie in transport (houtvergassing gevolgd door Fischer-Tropsch-synthese [FT-synthese]);
6. groen gas voor transport ter vervanging van aardolie (houtvergassing);
7. groen gas in het aardgasnet voor indirecte biowarmte in de industrie en gebouwde omgeving ter vervanging van aardgas (houtvergassing);

8. biopolyethyleen (bioplastics) in de chemie ter vervanging van aardolie (houtvergassing).

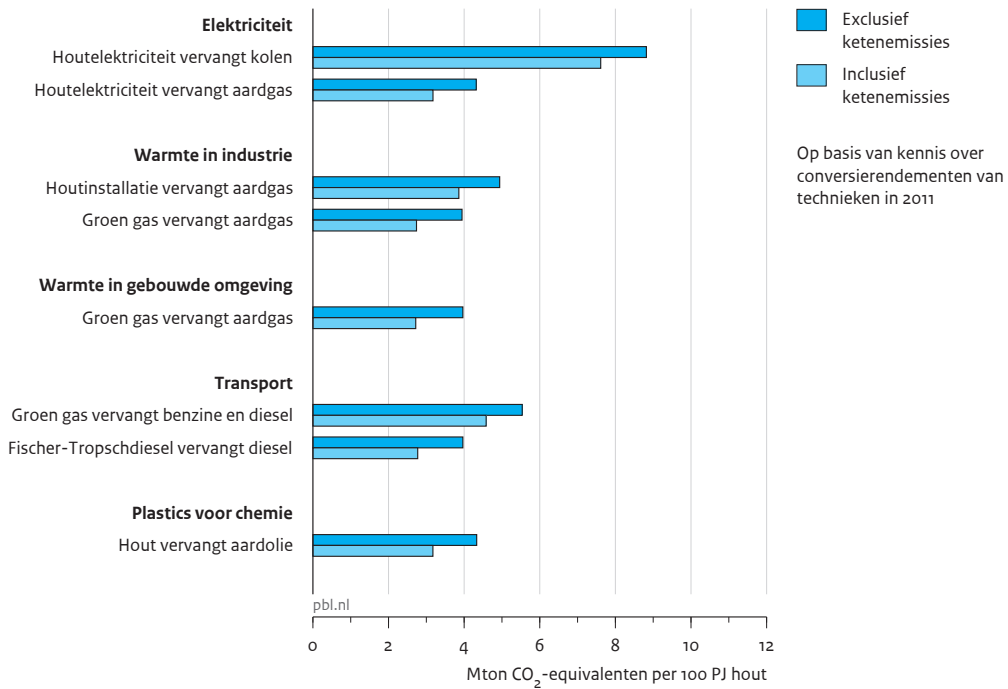
Figuur 2.1 toont de CO₂-emissiereducties. Deze effecten zijn representatief voor de korte tot middellange termijn (heden-2020/2030) waarbij er nog geen CCS wordt toegepast en waarbij steenkool nog een belangrijke rol speelt in het energiesysteem. De ketenemissies zijn hierbij in beeld gebracht (zie paragraaf 2.1.1). Behoudens dit effect is verondersteld dat de inzet van het veronderstelde type duurzame houtige biomassa volledig CO₂-neutraal is.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de gebruikte basisgegevens (conversierendementen) voor de berekening. Deze gegevens heeft het ECN bij elkaar gebracht voor de routekaartstudie van PBL en ECN uit 2011. De conversierendementen zijn gegeven voor de onderscheiden fossiele en biomassaroutes. De omzettingrendementen zijn uitgedrukt per eenheid energie, dat wil zeggen als petajoule product (elektriciteit, warmte, transportbrandstof, plastics) per petajoule energiebron (biomassa of fossiel). Met deze rendementen kan worden afgeleid hoeveel petajoule van de veronderstelde fossiele energiedrager kan worden vervangen door de inzet van één petajoule biomassa.

Conclusies kortetermijnanalyse

- De vervanging van vuile steenkool door houtresiduen scoort op de korte termijn het best van alle opties in CO₂-reductie. Deze optie springt eruit omdat steenkool vervuilend is met een CO₂-emissie die een factor 1,8 groter is dan die van aardgas. De goede score geldt voor de middellange termijn, zolang er nog veel kolen in het energiesysteem aanwezig is. Daarbij past wel de kanttekening dat een nieuwe kolencentrale met 30 procent meestook circa 50 procent meer uitstoot dan een nieuwe gascentrale.
- Groen gas in transport is na kolensubstitutie de optie met het grootste CO₂-effect. Toepassing van groen gas in transport scoort beter dan groen gas voor warmteopwekking in de industrie, omdat bij toepassing voor transport aardolieproducten worden vervangen (met een ongunstiger CO₂-emissie dan aardgas) en bij warmteopwekking in de industrie is dit aardgas. Toepassing van groen gas in transport scoort ook beter dan de productie van FT-diesel in transport, omdat het rendement van deze route gunstiger is dan dat van FT-dieselproductie.
- De productie van bioplastics (biopolyethyleen) uit lignocellulose biomassa leidt tot een vergelijkbare CO₂-emissiereductie als toepassingen gericht op de productie van bio-energie (zie tekstkader 1).

Figuur 2.1
CO₂-emissiereductie per houttoepassing zonder CCS



Bron: PBL

- De CO₂-reducties (inclusief ketenemissies) lopen uiteen van 2,8 megaton CO₂ per 100 petajoule hout voor biodieselproductie tot 7,6 megaton CO₂ per 100 petajoule hout voor de productie van elektriciteit waarbij kolen wordt vervangen.

Tekstkader 1 CO₂-reductie bioplastics en biobrandstoffen

Voor bioplastics concluderen we dat de inzet van biomassa in de biochemie niet automatisch voordelen oplevert in vergelijking met de inzet van biomassa voor de productie van biobrandstoffen. Een veelgehoorde redenering is dat de productie van bioplastics extra CO₂-voordelen oplevert omdat bioplastics meerdere malen worden hergebruikt (cascadering), waardoor de koolstof gedurende langere tijd vastligt in producten. Dit in tegenstelling tot biobrandstoffen waar de CO₂ vrijwel direct weer vrijkomt na productie.

Deze redenering kan snel tot misinterpretaties aanleiding geven. Immers, het voordeel van cascadering geldt evenzeer voor de productie en het gebruik van plastics die uit fossiele aardolie zijn geproduceerd: ook bij deze fossiele plasticsroute ligt de koolstof langere tijd vast. Bioplastics leveren dus – om reden van cascadering alleen – geen extra CO₂-voordeel op in vergelijking met de productie van biobrandstoffen. De biochemicalïënroute levert alleen dan een extra CO₂-voordeel op als het omzettingsrendement (petajoule product per petajoule hout) van de biochemicalïënproductie hoger is dan dat van biobrandstoffen en/of als het energetisch rendement van de te vervangen fossiele route van aardolie richting chemicaliën ongunstiger is dan die van aardolie naar brandstof. Voor de biopolyethyleenproductieroute zijn deze voordelen er niet. De polyethyleenproductie is echter maar een voorbeeld. Er zijn tal van andere chemische producten op de markt, of die kunnen worden ontwikkeld, waarbij de biochemische route potentieel wel CO₂-voordelen kan opleveren ten opzichte van de biobrandstoffenroute.

Tabel 2.1

Conversierendement voor biomassa en fossiele conversieroutes, zonder CCS (uitgedrukt in petajoule, PJ)*

| Lignocellulose-optie | Omschrijving | Conversierendement lignocelluloseroute | Conversierendement fossiele route | Rendement substitutie van fossiel |
|--|--|--|---|-----------------------------------|
| | | xx PJ energiedrager per PJ hout ^a | xx PJ energiedrager per PJ fossiel ^a | PJ minder fossiel per PJ hout |
| | | A | B | A*/B |
| Elektriciteit (BM-centrale vervangt kolen) | Elektriciteit uit hout vervangt kolen | 46% | 49% | 93% |
| Elektriciteit (BM-centrale vervangt aardgas) | Elektriciteit uit hout vervangt aardgas | 46% | 60% | 76% |
| Warmte industrie (BM-centrale) | Warmte uit hout vervangt aardgas industrie | 80% | 92% | 87% |
| Groen gas-warmte industrie | Warmte uit groen gas (uit houtvergassing) vervangt aardgas industrie | 64% | 92% | 69% |
| Groen gas-warmte gebouwde omgeving | Warmte uit groen gas (uit houtvergassing) vervangt aardgas gebouwde omgeving | 64% | 92% | 69% |
| Groen gas-transport | Groen gas uit houtvergassing vervangt diesel/benzine transport (groen gas) | 69% | 93% | 75% |
| FT-diesel-transport | FT-diesel uit hout vervangt diesel transport (FT-diesel) | 50% | 93% | 54% |
| Plastics-chemie | Plastics uit hout vervangt aardolie chemie | 44% | 75% | 58% |

* Combinatie van deze beide rendementen geeft het rendement (uitgedrukt in PJ) waarmee gegeven fossiele energiedragers worden vervangen door de inzet van biomassa.

^a De conversierendementen zijn overgenomen uit PBL & ECN (2011).

2.1.3 CO₂-effecten met CCS

Een toekomstbeeld met 80 procent minder emissies in 2050 is zeer moeilijk te realiseren zonder gebruik te maken van CO₂-afvang en opslag (CCS) (PBL & ECN 2011). In deze paragraaf kijken we hoe de resultaten van de analyse veranderen als er wel CCS wordt toegepast. Feitelijk hebben we het dan over een optie die veel meer bij de lange termijn past dan bij de korte termijn. Het uitgangspunt voor deze berekening is dat er geen beperkingen zijn aan de beschikbare CO₂-opslagcapaciteit. We nemen aan dat alle CO₂ die vrijkomt bij de conversie, en die technisch kan worden opgeslagen, ook daadwerkelijk wordt afgevangen en opgeslagen.

Voor een juiste vergelijking gaan we ervan uit dat zowel in de biomassaroute als in de fossiele route CCS wordt toegepast. Vervolgens beoordelen we wat de vervanging van 'fossiel met CCS' door 'biomassa met CCS' betekent voor de CO₂-emissies. We laten dus zien wat de CO₂-voordelen zijn van de inzet van biomassa met CCS in vergelijking tot de fossiele referentieroute met CCS.

De resultaten zijn gegeven in figuur 2.2 en tabel 2.4. De totale CO₂-reductie bij toepassing van CCS is opgebouwd uit twee effecten:

1. De CO₂-reductie die is toe te kennen aan substitutie van de fossiele energiedrager (kolen, aardgas, olie) door biomassa. De CO₂ die vrijkomt bij biomassa is namelijk kort-cyclisch en is eerder door de plant of boom opgenomen. Dit substitutie-effect komt, behoudens een rendementsverlies door toepassing van CCS, overeen met het eerder berekende effect in figuur 2.1.
2. Het extra CCS-voordeel dat de biomassaroute met CCS biedt in vergelijking tot de fossiele route met CCS. Dit extra CCS-voordeel wordt verklaard doordat er bij de inzet van biomassa in plaats van olie of aardgas, en ook kolen, meer CO₂ vrijkomt en dus beschikbaar komt voor afvang en opslag.

De gebruikte conversierendementen voor de berekening van het substitutie effect zijn gegeven in tabel 2.2. In tabel 2.3 zijn de gebruikte kentallen voor de inschatting van het extra CCS-voordeel gegeven. In tabel 2.4 zijn beide effecten opgeteld en zijn ook de ketenemissies verdisconteerd. Hierna volgen eerst de conclusies, waarna we nog een gedetailleerde toelichting geven bij de cijfers (tabellen).

Conclusies

- Bij de conversie van biomassa komt er – per eenheid elektriciteit, warmte, transportbrandstof – meer CO₂ vrij dan in de conventionele fossiele productieroutes. Daardoor kan er in de biomassaroutes potentieel meer CO₂ worden afgevangen en opgeslagen dan in de conventionele fossiele productieroutes. De

overschakeling van fossiel op biomassa biedt zo een extra CO₂-voordeel, dat verder gaat dan alleen de substitutie van fossiele energie.

- Dit extra CO₂-voordeel bedraagt voor het merendeel van de opties 5 tot 6 megaton CO₂ per 100 petajoule hout. Voor 'biomassacentrales ter vervanging van kolen' blijft dit CO₂-voordeel beperkt tot 1 megaton CO₂ per 100 petajoule hout. Bij kolen en biomascentrales komt een vergelijkbare hoeveelheid CO₂ vrij, welke in beide situaties voor circa 90 procent kan worden afgevangen. Het extra CO₂-voordeel dat kan worden toegekend aan de combinatie van biomassa en CCS is in dit geval dus ook relatief beperkt.
- Kijken we naar het totale CO₂-effect (inclusief ketenemissies), dan scoren alle onderzochte opties vergelijkbaar. Het CO₂-effect varieert van 8,6 tot 10,6 megaton CO₂ per 100 petajoule (zie tabel 2.4).

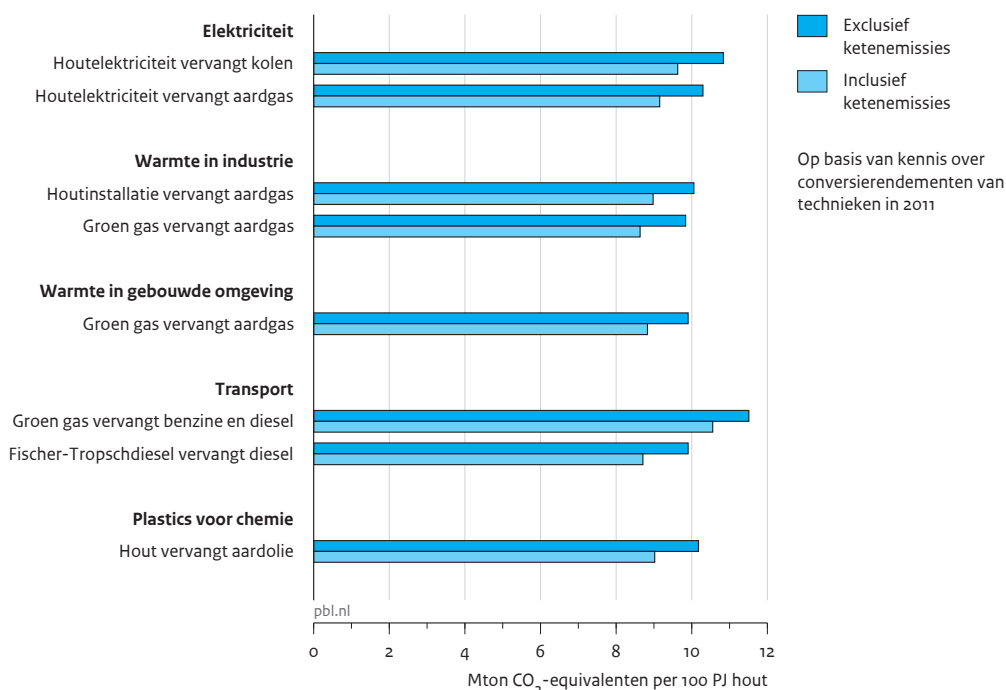
Toelichting bij tabel 2.2 (substitutie-effect)

In tabel 2.2 is het substitutie-effect gegeven. De vierde kolom vermeldt hoeveel (yy) petajoule elektriciteit, warmte of transportbrandstof kan worden geproduceerd met 1 petajoule hout. Dit is het energetisch rendement van de lignocelluloseroute (rendement A). De zesde kolom geeft het energetisch rendement weer van de fossiele route (rendement B). Door vermenigvuldiging van A en 1/B (inverse van B) vermeldt kolom 7 hoeveel petajoule fossiel (kolen, aardgas, olie) er nodig zou zijn geweest om de yy petajoule energie (elektriciteit, warmte of transportbrandstof) te produceren. Dit getal is het substitutie-effect en geeft dus aan hoeveel petajoule fossiel vervangen wordt per petajoule gebruikte biomassa. We zien in deze tabel dat het energetisch rendement van de productie van biobrandstoffen en warmte uit biomassa aanzienlijk lager ligt dan die van fossiele transportbrandstoffen uit aardolie en warmte uit aardgas.

Toelichting bij tabel 2.3 (extra CCS-voordeel)

In tabel 2.3 is het extra CCS-voordeel gegeven. De tweede kolom geeft de hoeveelheid CO₂ weer die technisch kan worden afgevangen en opgeslagen bij een inzet van 100 petajoule hout. We zien dat niet alleen bij verbranding (centrales en industrie), maar ook bij vergassing en opwerking tot transportbrandstoffen en groen gas een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ vrijkomt en daar kan worden afgevangen en opgeslagen. De derde kolom vermeldt de hoeveelheid (xx petajoule) fossiele energie die nodig is om een vergelijkbare hoeveelheid energie (elektriciteit, warmte of transportbrandstof) te produceren als de gegeven 100 petajoule biomassa (overgenomen van tabel 2.2, kolom 7). In de vierde kolom staat de uitstoot van CO₂ die correspondeert met deze xx petajoule te substitueren fossiele energie en daarnaast ook technisch is af te vangen. We zien dat de hoeveelheid

Figuur 2.2
CO₂-emissiereductie per houttoepassing met CCS



Bron: PBL

af te vangen CO₂ bij de productie van fossiele transportbrandstoffen en bij inzet van aardgas in de gebouwde omgeving beperkt tot nihil is. Zo is er geen CO₂-afvang aangenomen bij de verbranding van aardgas in de kleinschalige gebouwde omgeving. De omzetting van aardolie naar transportbrandstoffen wordt gekenmerkt door een hoog conversierendement. Er gaat dus relatief weinig energie verloren in het conversieproces en daardoor komt er relatief weinig CO₂ vrij bij deze omzetting, en is de mogelijkheid voor CO₂-afvang beperkt. De vijfde kolom vermeldt het verschil in CO₂-uitstoot tussen de biomassaroute (A) en de hiermee corresponderende fossiele route (B). Dit verschil is het hiervoor genoemde extra CCS-voordeel van de biomassaroute. Dit CCS-voordeel is volledig verdisconteerd in figuur 2.2. Hier zien we dat het extra CCS-voordeel van de biomassa-elektriciteitsroute beperkt is in vergelijking tot de kolenstroomroute. In beide routes kan het merendeel van de uitgestoten CO₂ worden afgevangen.

Toelichting bij tabel 2.4 (totaal effect, met CCS)

In tabel 2.4 zijn alle drie de berekende CO₂-effecten weergegeven voor de inzet van 100 petajoule aan houtige biomassa met toepassing van CCS. De tweede kolom vermeldt het substitutie-effect voor 100 petajoule biomassa. Dit effect is te berekenen door het

substitutierendement van tabel 2.4 (petajoule te vervangen fossiel per petajoule biomassa) te vermenigvuldigen met 100 petajoule biomassa en vervolgens met de emissiefactoren voor fossiele energiedragers (kolen, aardgas, olie). De derde kolom geeft het extra CCS-voordeel weer van tabel 2.4 (laatste kolom). In de vierde kolom staat een benadering van de extra (fossiele) ketenemissies die kunnen worden toegeschreven aan de biomassaroute. We veronderstellen hier dat alle ketenemissies bij de productie, het transport en de verwerking van biomassa van fossiele oorsprong zijn, bijvoorbeeld fossiele diesel voor het gebruik van landbouwwerktuigen en voor het transport van biomassa.

In figuur 2.2 geeft de CO₂-emissiereductie het verschil in CO₂-emissies weer tussen de biomassatoepassing (met CCS) en de verdrongen fossiele toepassing (met CCS). De ketenemissies zijn hierbij apart in beeld gebracht (zie paragraaf 2.1.1). Behoudens dit effect is verondersteld dat de inzet van het veronderstelde type duurzame houtige biomassa volledig CO₂-neutraal is.

Tabel 2.2
Conversierendement voor fossiele en biomassaconversieroutes, met CCS (uitgedrukt in PJ)*

| Lignocellulose-optie | Omschrijving | Conversierendement lignocelluloseroute (met CCS) | xx PJ energiedrager per PJ hout ^b | Omzetting | Conversierendement fossiele route (met CCS) | xx PJ energiedrager per PJ fossiel ^b | Rendement substitutie fossiel |
|--|--|--|--|---------------------------------|---|---|-------------------------------|
| | | | A | | | B | A*1/B |
| Elektriciteit (BM-centrale) vervangt kolen | Elektriciteit uit hout (met CCS) vervangt kolen (met CCS) | hout -> elektriciteit | 41% | hout -> elektriciteit | poederkolen -> elektriciteit | 43% | 96% |
| Elektriciteit (BM-centrale) vervangt aardgas | Elektriciteit uit hout (met CCS) vervangt aardgas (met CCS) | hout -> elektriciteit | 41% | hout -> elektriciteit | aardgas -> elektriciteit | 54% | 76% |
| Warmte industrie (BM-centrale) | Warmte uit hout (met CCS) vervangt aardgas industrie (met CCS) | hout -> HT-warmte | 76% | hout -> HT-warmte | aardgas -> HT-warmte | 87% | 87% |
| Groen gas-warmte industrie | Warmte uit groen gas (via houtvergassing met CCS) vervangt aardgas industrie (met CCS) | hout -> groen gas -> HT-warmte | 58% | hout -> groen gas -> HT-warmte | aardgas -> HT-warmte | 87% | 66% |
| Groen gas-warmte gebouwde omgeving | Warmte uit groen gas (via houtvergassing met CCS) vervangt aardgas gebouwde omgeving | hout -> groen gas -> warmte | 58% | hout -> groen gas -> warmte | aardgas -> warmte | 92% | 63% |
| Groen gas-transport | Groen gas uit houtvergassing (met CCS) vervangt diesel/benzine transport | hout -> groen gas | 66% | hout -> groen gas | olie -> diesel/benzine 1 | 85% | 78% |
| FT-diesel-transport | FT-diesel (uit houtvergassing met CCS) vervangt diesel transport | hout -> FT-diesel | 42% | hout -> FT-diesel | olie -> diesel/benzine 1 | 85% | 49% |
| Plastics-chemie | Plastics uit hout (uit houtvergassing met CCS) vervangt aardolie chemie | hout -> plastics (polyethyleen) | 35% | hout -> plastics (polyethyleen) | olie -> plastics (polyethyleen) | 67% | 53% |

* Combinatie van deze beide rendementen geeft het rendement (uitgedrukt in PJ) waarmee gegeven fossiele energiedragers worden vervangen door de inzet van biomassa.

^a Olieafrifige toekomst.

^b Conversierendementen haalbaar op de lange termijn, overgenomen uit de PBL & ECN (2011).

Tabel 2.3
Het verschil in CO₂-afvang en opslag tussen inzet van 100 PJ aan biomassa (met CCS in verschillende routes) en de inzet van xx PJ aan kolen, aardgas of olie in de conventionele fossiele route (met CCS)

| Lignocelluloseoptie | CO ₂ -afvang en opslag voor 100 PJ hout | yy PJ fossiel vervangen door 100 PJ hout | CO ₂ -afvang en opslag voor xx PJ fossiel | Extra CCS-effect per 100 PJ hout |
|---|--|--|--|---|
| | lignocelluloseroute | | fossiele route | verschil CO ₂ -afvang en opslag tussen lignocelluloseroute en fossiele route |
| | Mt CO ₂ per 100 PJ hout | yy PJ fossiel | Mt CO ₂ voor xx PJ fossiel | Mt CO ₂ per 100 PJ hout |
| | A | | B | A-B |
| Elektriciteit (BM-centrale vangt kolen) | 9,9 | 96 (kolen) | 8,8 | 1,1 |
| Elektriciteit (BM-centrale vangt aardgas) | 9,9 | 76 (aardgas) | 3,9 | 6,0 |
| Warmte industrie (BM-centrale) | 9,3 | 87 (aardgas) | 4,2 | 5,1 |
| Groen gas-warmte industrie | 9,3 | 66 (aardgas) | 3,2 | 6,1 |
| Groen gas-warmte gebouwde omgeving | 6,5 | 63 (aardgas) | 0,0 | 6,5 |
| Groen gas-transport | 6,5 | 78 (olie) | 0,7 | 5,8 |
| FT-diesel-transport | 6,7 | 49 (olie) | 0,5 | 6,3 |
| Plastics-chemie | 6,7 | 53 (olie) | 0,5 | 6,2 |

* De xx PJ aan inzet van kolen, aardgas of olie levert een vergelijkbare hoeveelheid nuttige energie (elektriciteit of warmte) als de 100 PJ aan biomassa.

^a xx PJ vervangen fossiel = 100 PJ* (rendement substitutie fossiel/100).

Tabel 2.4
CO₂-effect van de vervanging van 'fossiel plus CCS' door 'biomassa plus CCS' bij een inzet van 100 PJ houtige biomassa

| Lignocelluloseoptie (met CCS) | Vervangen fossiele energiedrager (met CCS) | CO ₂ -substitutie-effect | Extra CCS-voordeel van biomassaroute | Extra (fossiele) ketenemissies biomassaroute ¹ | Totaal CO ₂ -effect (inclusief ketenemissies) |
|---|---|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| | | | | | |
| Mton CO ₂ per 100 PJ hout | | | | | |
| | A | B | C | A+B+C | |
| Elektriciteit (BM-centrale vervangt kolen) | 9,7 | 1,1 | -1,2 | | 9,6 |
| Elektriciteit (BM-centrale vervangt aardgas) | 4,3 | 6,0 | -1,1 | | 9,2 |
| Warmte industrie (BM-centrale) | 4,9 | 5,1 | -1,1 | | 9,0 |
| Groen gas-warmte industrie | 3,7 | 6,1 | -1,2 | | 8,6 |
| Groen gas-warmte gebouwde omgeving | 3,6 | 6,5 | -1,2 | | 8,8 |
| Groen gas-transport | 5,8 | 5,8 | -1,0 | | 10,6 |
| FT-diesel-transport | 3,6 | 6,3 | -1,2 | | 8,7 |
| Plastics-chemie | 3,9 | 6,2 | -1,2 | | 9,0 |

¹ Aangenomen is dat alle ketenemissies bij de productie, transport en verwerking van biomassa van fossiele oorsprong zijn, bijvoorbeeld fossiele diesel voor het gebruik van landbouwwerktuigen en voor het transport van biomassa.

2.2 CO₂-effecten op lange termijn

2.2.1 Aanpak

De CO₂-effecten op de lange termijn analyseren we voor het jaar 2050 op het niveau van het Nederlandse energiesysteem. Vertrekpunt voor de analyse is een schoon toekomstig energiesysteem met tal van maatregelen in alle sectoren, zoals 70 procent elektriciteit uit wind en zon, 30 procent stroom uit aardgas en 70 procent licht elektrisch verkeer (personen- en bestelauto's) en veel energiebesparing, maar nog zonder biomassa en CO₂-afvang en -opslag. Het zwaar vervoer is nog hoofdzakelijk op basis van aardolie. Dit is het basis-scenario. In dit basisscenario wordt in 2050 een emissieniveau gerealiseerd van 106 kiloton, ofwel circa 50 procent reductie in 2050 ten opzichte van 1990. Vervolgens hebben we de CO₂-effecten in beeld gebracht van de inzet van biomassa voor vier toepassingen, al of niet in combinatie met CO₂-opslag. We weten niet hoeveel houtige biomassa beschikbaar komt voor Nederland in de verre toekomst. Hier analyseren we hoe de emissies dalen voor twee situaties: bij de inzet van 350 en 700 petajoule aan houtige biomassa. We beoordelen de onderscheiden biomassaopties op grond van de bijdrage die deze kunnen leveren aan de realisatie van het klimaatdoel van 80 procent emissiereductie in 2050 ten opzichte van 1990. Dit doel vertaalt zich voor Nederland in broeikasgasemissies van 45 megaton CO₂-equivalenten in 2050.

Voor de energievraag in 2050 hanteren we het referentiebeeld voor 2050 uit de routekaartstudie (PBL & ECN 2011). Ten opzichte van deze referentie veronderstellen we een extra energiebesparing van 20 procent (de maximaal technisch haalbare besparing bedraagt zo'n 30 procent). Hiermee komt de energievraag in 2050 circa 10 procent lager uit dan in 2010. Het emissieniveau in 2050 in het basisscenario wordt verder bepaald door de gehanteerde uitgangspunten voor de inzet van technologie die zijn gegeven in tabel 2.5. Het uitgangspunt van 70 procent stroom uit wind en zon in 2050 sluit aan bij Duitse emissiereductiescenario's voor een toekomstig CO₂-arm Duits energiesysteem (Fraunhofer 2012). Het basisscenario met veel zon en wind is zo gekozen omdat de inzet van kolen in 2050 moeilijk verenigbaar is met het klimaatdoel voor 2050.

De beschikbare capaciteit voor CO₂-afvang en -opslag is gevarieerd van 0, 25, 50, 75 tot 100 megaton per jaar. De opslagcapaciteit op zee in Nederland wordt geschat op 25 megaton per jaar over een periode van vijftig jaar. De capaciteit op land en zee samen wordt geschat op iets minder dan 50 megaton. Daarnaast is het mogelijk om CO₂ te exporteren naar het buitenland en daar op te slaan. Zo is er aanzienlijke opslagcapaciteit in Noorse

aquifers, watervoerende lagen in de bodem. Voor een capaciteit van 75 en 100 megaton zal er moeten worden geëxporteerd naar het buitenland.

Voor de analyse op systeemniveau is het model E-design ingezet (PBL & ECN 2011). Dit model is speciaal ontwikkeld om integrale analyses op het niveau van het Nederlandse energiesysteem mogelijk te maken, waarbij de totale Nederlandse emissies in beeld worden gebracht. De basisgegevens over conversierendementen en CCS-opslagmogelijkheden voor de belangrijkste technieken zijn door het ECN bij elkaar gebracht. In het E-design-model wordt de vraag ingevoerd naar energie in verkeer, gebouwde omgeving en processen in industrie en landbouw. Aan deze vraag kan worden voldaan met een mix van energiedragers die in het model kan worden gevarieerd. De balans tussen energievraag en -aanbod wordt daarbij in het model kloppend gehouden. De hoofdonderdelen in het model zijn verkeer, industrie, gebouwde omgeving, elektriciteitsvoorziening en brandstoffenproductie. Het model omvat gegevens over verwachte rendementen van technieken in 2050 (met bandbreedte). Het model berekent op basis van de energievraagvariant en door de gebruiker ingevoerde technologiekeuze (bijvoorbeeld het aandeel elektrisch, benzine, diesel en gas in transport en het aandeel wind, zon en biomassa in elektriciteitsopwekking) hoeveel energiegroestoffen nodig zijn en wat de emissie is.

Vier biomassaopties

We analyseren vier hoofdroutes voor de toepassing van droge lignocellulose biomassa:

1. elektriciteitscentrales met meestook, waarbij de inzet van kolen is gekoppeld met de inzet van biomassa (zon en wind worden vervangen);
2. biomassa-centrales, zonder koppeling met koleninzet (zon en wind worden vervangen);
3. de productie van groen gas voor vooral warmteproductie in industrie en gebouwde omgeving (aardgas wordt vervangen);
4. FT-dieselproductie voor gebruik in zwaar transport (aardolie wordt vervangen).

Er zijn geen combinatieopties doorgerekend. In de eerste twee opties leidt de productie van meer bio-elektriciteit tot het verdringen van elektriciteit van zon en wind. Bij de optie meestook resulteert de inzet van meer biomassa automatisch ook in meer inzet van kolen. We rekenen met een meestookpercentage van 30 procent. Een petajoule extra meestook van biomassa gaat dan gekoppeld met ruim 2 petajoule extra inzet van kolen. Bij de tweede stroomoptie wordt biomassa verbrand in speciale biomassa-centrales, en leidt de inzet van biomassa niet tot meer inzet van kolen. Wel gaat het om grootschalige centrales waarbij CCS mogelijk zal zijn. Bij

Tabel 2.5

Inzet van technologie in het basisscenario 2050 zonder inzet van houtige biomassa

| Energievraag en energieproductie | Technologie | Fossiele energiebron | Omvang energievraag/ activiteit 2050 | Eenheid |
|---|---|----------------------|--------------------------------------|--------------|
| Personenauto's en bestelauto's | Elektrische auto's, plug-in hybride | | 92 | miljard km |
| Personenauto's en bestelauto's | Verbrandingsmotor, hybride techniek | Aardolie | 35 | miljard km |
| Vrachtauto's | Verbrandingsmotor fossiel, hybride techniek | Aardolie/aardgas | 10 | PJ brandstof |
| Scheepvaart, luchtvaart en overige voertuigen | Verbrandingsmotor | Aardolie | 312 | PJ brandstof |
| Warmtevraag - gebouwde omgeving | Warmtepompen, geothermie, zonneboiler | | 219 | PJ warmte |
| Warmtevraag - gebouwde omgeving | Elektrische boilers, warmte derden | | 38 | PJ warmte |
| Warmtevraag - gebouwde omgeving | HR-ketels, micro-WKK | Aardgas | 63 | PJ warmte |
| Warmtevraag – industrie | Warmtepompen | | 45 | PJ warmte |
| Warmtevraag – industrie | Ketels, fornuizen, WKK | Aardgas | 279 | PJ warmte |
| Elektriciteitsproductie | Windmolens en zonnecellen | | 77 | TWh |
| Elektriciteitsproductie | STEG-centrales | Aardgas | 33 | TWh |
| Productie vloeibare brandstoffen | Biobrandstof op basis van voedingsgewassen | Voedingsgewassen | 16 | PJ brandstof |
| Productie vloeibare brandstoffen | Olieraffinaderijen | Aardolie | 409 | PJ brandstof |

de optie groen gas is aangenomen dat dit gas wordt aangewend in alle toepassingen van gas. Het geproduceerde groene gas in deze rekenvariant wordt verdeeld over warmteopwekking voor industrie en gebouwde omgeving, en elektriciteitsproductie in gascentrales. Uitgangspunt bij deze berekening is dat de productie van groen gas niet leidt tot verdringing van stroom uit zon en wind; de inzet in de elektriciteitssector leidt uitsluitend tot de vervanging van de nog resterende stroom uit aardgas (zie tabel 2.5). Bij de vierde optie wordt zogenoemde Fischer Tropischdiesel (FT-diesel) geproduceerd uit houtige biomassa. Deze vervangt fossiele diesel voor gebruik in zwaar transport (onder andere vrachtauto's en binnenvaart).

2.2.2 CO₂-effecten van vier biomassaopties

Aanbod biomassa

De 350 en 700 petajoule zijn realistische schattingen voor het toekomstige aanbod van biomassa voor Nederland (PBL & ECN 2011). Hiervan kan maximaal 200 petajoule uit Nederland komen. Het overige deel zal Nederland moeten importeren. We nemen in deze analyse aan dat

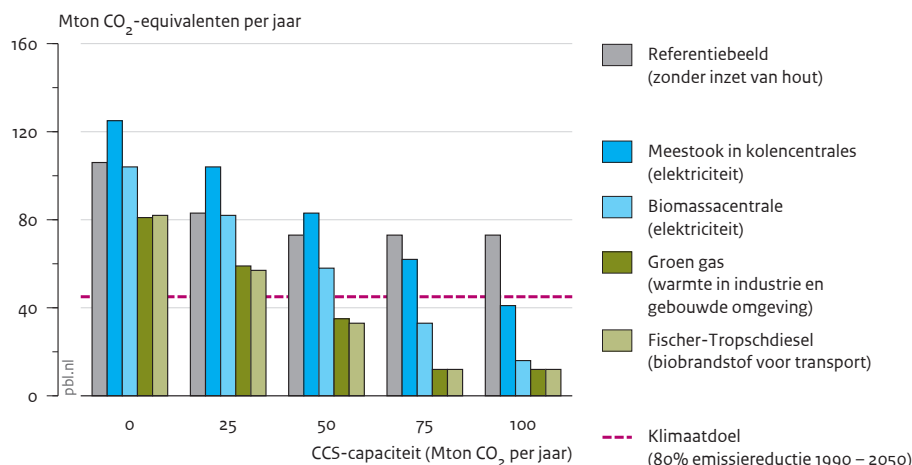
de 350 en 700 petajoule biomassa in z'n geheel bestaat uit droge lignocellulose biomassa.

Toelichting resultaten

De resultaten zijn gegeven in figuur 2.3 en figuur 2.4 voor respectievelijk 700 en 350 petajoule biomassa. De resultaten laten zien dat de opties 'biobrandstoffen' en 'groen gas' op de lange termijn het beste scoren. De bio-elektriciteitsopties scoren slecht doordat er verdringing optreedt tussen de opties 'biomassa voor elektriciteit' en 'elektriciteit uit zon en wind' (voor de korte termijn zijn dit al 'concurrerende' opties voor het halen van doelstellingen voor hernieuwbare energie). Meer inzet van biomassa voor elektriciteit vertaalt zich in minder zon en wind: het ene duurzame alternatief (zon/wind) wordt dus ingeruild voor een ander schoon alternatief (biomassa). De inzet van biomassa voor stroom-opwekking leidt zo gezien, op de langere termijn, niet tot lagere emissies.

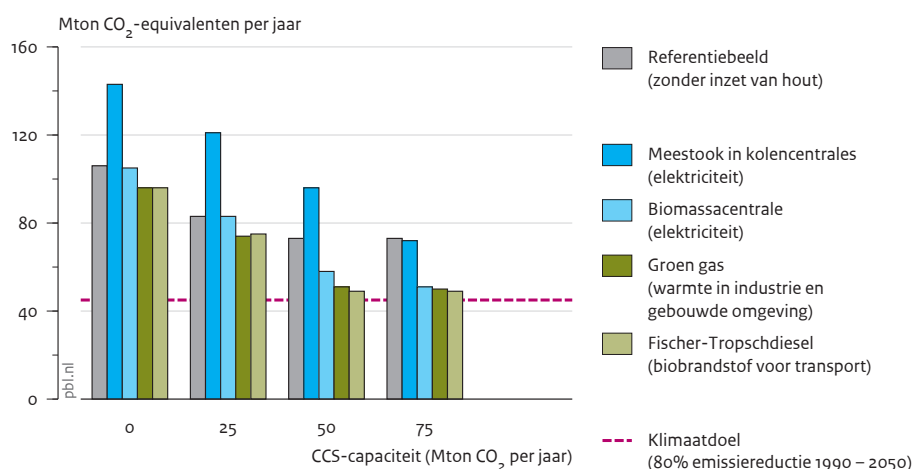
De voorgaande conclusie hangt af van de door ons gemaakte veronderstellingen in het basisscenario met toepassing van schone alternatieve productietechnieken

Figuur 2.3
Broeikasgasemissie bij inzet van 700 PJ hout , 2050



Bron: PBL

Figuur 2.4
Broeikasgasemissie bij inzet van 350 PJ hout, 2050



Bron: PBL

voor stroomproductie, dat wil zeggen veel zon en wind en geen kolen. Bij een afwijkend basisscenario, met kolenstroom in 2050, zal het gebruik van biomassa in de stroomsector, zoals figuur 2.1 liet zien, wel een positief effect laten zien. Echter, het doel van deze analyse is niet om nogmaals het positieve effect aan te tonen dat de vervanging van kolen door biomassa kan hebben op de middellange termijn (zie figuur 2.1). In deze langetermijn-analyse richten we ons op de vraag naar de technische haalbaarheid van het emissiereductiedoel van minimaal 80 procent in 2050 (maximaal 45 megaton CO₂-equivalenten). Hadden we wel kolenstroom verondersteld in het basisscenario, dan had het emissieniveau in 2050 fors hoger gelegen dan de hier gegeven 106 megaton. Dit niveau zou dan verlaagd kunnen worden

door biomassa in te zetten en zo kolen te vervangen. Dit positieve effect zou dan duidelijk zichtbaar zijn geweest in de figuren, maar het emissieniveau zou vervolgens niet beneden de 106 megaton zijn uit-gekomen. Extra kolen in het basisscenario zou dan gecompenseerd worden door extra biomassa. Hier starten we met een gunstiger vertrekpunt (106 megaton), en kijken dan hoe biomassa kan zorgen voor emissie-niveaus die in de buurt komen van het doel van maximaal 45 megaton.

Deze analyse laat zien dat de haalbaarheid van het klimaatdoel van 45 megaton in 2050 kritisch afhangt van het aanbod van duurzame biomassa, het beschikbare CCS-potentieel en de keuzes die worden gemaakt voor de inzet van biomassa in de verschillende sectoren.

Tekstkader 2 In een energiesysteem met inzet van biomassa komt meer CO₂ beschikbaar voor opvang en afvang van CO₂ dan in een vergelijkbaar fossiel systeem

In een energiesysteem waarin biobrandstoffen en groen gas worden geproduceerd uit houtige biomassa (via vergassing), komt er meer CO₂ beschikbaar voor opslag dan in een fossiel systeem waarbij brandstoffen worden geproduceerd uit aardolie en aardgas.

Kijken we naar het basisscenario (zonder inzet van biomassa) in figuur 2.3, dan zien we dat de emissies niet meer verder dalen als de beschikbare CCS-capaciteit boven de 50 megaton uitkomt. We nemen dan wel aan dat de CCS-capaciteit hoger ligt dan 50 megaton, maar deze capaciteit kan verder niet meer worden benut. Alle met CCS te controleren emissiebronnen zijn dan aangepakt. Voor de resterende bronnen geldt dat afvang van CO₂ nagenoeg onhaalbaar is, zoals bij de kleinere installaties in de industrie en bij het transport. Deze bronnen blijven dus CO₂ uitstoten, ongeacht de beschikbare CCS-capaciteit.

Kijken we vervolgens naar de varianten mét biomassa, dan valt op dat de emissies hier wel verder dalen als de CCS-capaciteit boven de 50 megaton uitstijgt. De inzet van biomassa, toegepast in grootschalige verbrandings- of vergassingsprocessen, zorgt ervoor dat er meer CO₂ kan worden afgevangen en opgeslagen dan in een alternatief energiesysteem waarin de energiebehoefte wordt gedekt door fossiele energiebronnen. Inzet van biomassa zorgt er dus niet alleen voor dat fossiele energie wordt verdrongen, maar leidt er ook toe dat er meer CO₂ vrijkomt voor opslag (zie ook paragraaf 3.1.2). Het gaat hier om kort-cyclisch CO₂ dat eerder door de plant is opgenomen. De extra uitstoot van CO₂ in de biomassaroute wordt verklaard doordat de conversie van biomassa naar biobrandstoffen en groen gas energetisch minder efficiënt is dan de conversie uitgaande van fossiele brandstoffen. Hierdoor komt er bij het gebruik van biomassa, om aan een gegeven energievraag te voldoen, aanzienlijk meer (kort-cyclisch) CO₂ in de lucht dan bij het gebruik van fossiele energiebronnen. De extra CO₂ uit biomassa kan worden opgeslagen als er voldoende CCS beschikbaar is, en dan zorgen voor negatieve emissies. Ook als de biomassa wordt ingezet in biomassacentrales zien we dat de emissie verder daalt als de CCS-capaciteit boven de 50 megaton uitstijgt. Dit komt doordat in deze variant stroom uit zon en wind (voor een deel) is verruild voor stroom uit biomassa. Zon en wind bieden geen mogelijkheden voor CO₂-opslag daar waar biomassacentrales deze mogelijkheid wel bieden. Dus ook hier geldt dat er bij de inzet van biomassa meer (kort-cyclisch) CO₂ beschikbaar komt voor opslag dan in het basisscenario.

Bij een *'beperkte' tot 'redelijke' toekomstige beschikbaarheid van CCS (25-50 megaton)* en een 'ruim' aanbod van biomassa (750 petajoule), wordt biomassa op de lange termijn bij voorkeur ingezet voor de productie van biobrandstoffen en groen gas en chemicaliën. Biobrandstoffen en groen gas kunnen worden ingezet in de luchtvaart, scheepvaart, zwaar wegtransport of voor warmteopwekking in de industrie en bestaande bouw. Voor deze sectoren is er nog weinig zicht op alternatieve, CO₂-arme productietechnieken in 2050. Voor elektriciteitscentrales zijn deze alternatieven er wel in de vorm van zon en wind en kernenergie. Inzet van biomassa in elektriciteitscentrales past dan minder goed in een schoon CO₂-arm toekomstbeeld.

Bij een *'ruime' beschikbaarheid van CCS (75 megaton)* en een 'ruim' aanbod van biomassa (750 petajoule), maakt het minder uit in welke sector de biomassa wordt ingezet. In dit geval is het doel ook haalbaar als de biomassa wordt gebruikt voor elektriciteitsproductie in biomassa-centrales. Meestook in kolencentrales blijft echter ook dan een onmogelijke optie. Bij deze toepassing wordt er zoveel CO₂ uitgestoten door de gelijktijdige inzet van kolen dat, zelfs bij een zeer ruime beschikbaarheid van

CCS, de CO₂ niet afdoende kan worden verwijderd om de 80 procent emissiereductie in 2050 te halen.

Bij een *'zeer ruime' beschikbaarheid van CCS (100 megaton)* en een 'ruim' aanbod van biomassa (750 petajoule) kan het klimaatdoel in alle gevallen worden gerealiseerd.

Figuur 2.3 laat zien dat de emissies in het basisscenario (zonder inzet van biomassa) niet meer verder dalen als de beschikbare CCS-capaciteit boven de 50 megaton uitkomt. Kijken we echter naar de varianten met biomassa, dan valt op dat de emissies wel verder dalen als de CCS-capaciteit boven de 50 megaton uitstijgt. Dit effect wordt in tekstkader 2 nader toegelicht.

Conclusies langetermijnanalyse

- Beoordelen we de inzet van biomassa op de lange termijn (voor 2050), dan wordt biomassa bij voorkeur ingezet voor de productie van biobrandstoffen, groen gas en biochemicaliën.
- Meestook van biomassa in kolencentrales past niet in een CO₂-arm toekomstbeeld, tenzij er wordt uitgegaan van een zeer ruime beschikbaarheid van CCS-capaciteit.

- Technisch is het mogelijk om onder het klimaatdoel van 80 procent emissiereductie uit te komen, maar dit is alleen mogelijk als er voldoende biomassa beschikbaar komt voor Nederland. Bij een aanbod van 350 petajoule biomassa op jaarbasis is 80 procent emissiereductie het maximaal haalbare.

Ontwikkelingsstadium van innovatieve energietechnologie voor lignocellulose biomassa

3.1 Basisprincipes van innovatieve technologie

De inzet van biomassastromen, zoals hout, stro en grasachtige gewassen, voor de productie van groen gas of biodiesel mag dan uit het perspectief van CO₂-emissies op de lange termijn voor Nederland de voorkeur verdienen, de technologie ervoor moet wel beschikbaar en betaalbaar zijn. Het gaat om technieken die nog in ontwikkeling zijn.

Er is een breed scala aan technieken beschikbaar voor het gebruik van biomassa voor bio-energie. Tabel 3.1 geeft hiervan een overzicht. Voor deze studie konden niet alle technieken worden bestudeerd; we hebben het onderzoek gericht op die technieken, en bijbehorende biomassastromen, die een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de *langetermijntransitie* richting een CO₂-arm energiesysteem. Zo kwamen we uit bij innovatieve technieken voor de verwerking van houtige biomassastromen, concreter: de vergassing en fermentatie van droge houtige biomassa. Met dit soort technieken kunnen biobrandstoffen en groen gas uit allerlei houtige biomassastromen worden gemaakt. In dit hoofdstuk geven we inzicht in de ontwikkelingen rond deze technieken. Technieken die meer zijn gericht op de voorbewerking van houtige biomassa, zoals pyrolyse en torrefactie, zijn in deze studie niet nader onderzocht vanwege de beperkte beschikbare ruimte.

Er zijn veel verschillende technieken voor de omzetting van houtige biomassa tot biobrandstoffen en groen gas. Deze worden ingedeeld in twee hoofdcategorieën:

De *thermochemische conversieprocessen* gaan gepaard met hoge temperaturen. Hieronder vallen vergassing, torrefactie en pyrolyse. Deze processen kunnen daarbij ook worden gecombineerd in eenzelfde conversieketen. In de *biochemische conversieroute* wordt de biomassa omgezet met behulp van micro-organismen in combinatie met chemische processen.

Thermochemische conversieprocessen

Kijken we naar de thermochemische processen vergassing, torrefactie, en pyrolyse, dan onderscheiden deze zich in de procestemperatuur: hoe hoger de procestemperatuur, hoe meer de biomassa uit elkaar valt in kleine moleculen.

Bij *vergassing* wordt droge biomassa vergast bij hoge temperaturen (800 tot 1.000 °C), een soort verbranding met een ondermaat zuurstof, gevolgd door chemische syntheseprocessen waarbij uit het geproduceerde gas de beoogde producten worden gemaakt, zoals methaan of FT-diesel.

Bij *pyrolyse* wordt biomassa verhit bij 300 tot 800 °C, onder afsluiting van zuurstof, waardoor de biomassa niet kan verbranden en uiteenvalt in kleine koolstofverbindingen. Hierbij ontstaat pyrolyseolie en komen brandbare gassen vrij. De pyrolyseolie kan over lange afstanden worden getransporteerd, en kan worden gebruikt in verschillende toepassingen, onder andere in

Tabel 3.1
Overzicht van energietechnieken voor biomassa

| Biomassatype(n) | Verwerkingstechnologie | Product | Nader bestudeerd in deze studie |
|-----------------------|--|--|---------------------------------|
| Thermochemisch | | | |
| Droge biomassa | Verbranding | Elektriciteit en warmte | |
| Droge biomassa | Vergassing | Elektriciteit en warmte | |
| Droge biomassa | Vergassing en methanolsynthese | Methanol / DME (dimethylether) | V |
| Droge biomassa | Vergassing en FT-synthese | Biodiesel | V |
| Droge biomassa | Vergassing en FT-synthese | Diverse bulkchemicaliën | |
| Droge biomassa | Vergassing en methaansynthese | Groen gas (methaan) | V |
| Droge biomassa | Torrefactie | Pellets (biokolen) | |
| Droge biomassa | Pyrolyse | Pyrolyseolie (en houtskool) | |
| Biochemisch | | | |
| Plantaardige oliën | Verestering | Biodiesel | |
| Plantaardige oliën | Behandeling met waterstof | Biodiesel (HVO Hydrotreated Vegetable Oil) | |
| Suikers en zetmeel | Fermentatie | Bio-ethanol of ETBE (derivaat van ethanol) | |
| Natte biomassa / mest | Vergisting | Biogas / groen gas | |
| Droge biomassa | Voorbehandeling (hydrolyse) en fermentatie | Bio-ethanol | V |
| Droge biomassa | Voorbehandeling (hydrolyse) en fermentatie | Biobutanol | |
| Droge biomassa | Voorbehandeling (hydrolyse) en fermentatie | Diverse bulkchemicaliën | |

raffinaderijen als een vervangende grondstof voor aardolie.

Bij *torrefactie* wordt biomassa verhit bij 200 tot 400 °C, zonder toevoer van zuurstof. De biomassa krijgt hierdoor een structuur die lijkt op kolen (Agentschap NL 2013). Het proces levert pellets op, kleine korrels die 90 procent van de oorspronkelijke energie-inhoud hebben.

De processen pyrolyse en torrefactie maken ruwe biomassastromen beter geschikt voor opslag, transport en energieopwekking. De meeste biomassa in de wereld komt namelijk niet uit de gebieden waar de energie-behoefte het grootst is. Ook Nederland zal op grote schaal biomassa moeten importeren om het doel van 80 procent CO₂-reductie in 2050 te kunnen halen. Dit betekent dat er veel biomassa over de wereld vervoerd zal gaan worden. De uitdaging is om verschillende processen zo efficiënt mogelijk aan elkaar te koppelen. Met behulp van torrefactie en pyrolyse kunnen de ruwe biomassastromen worden omgezet in intermediaire producten ('biokolen', pyrolyseolie) die betere eigenschappen hebben dan de ruwe biomassa, en daardoor ook efficiënter over grote afstanden kunnen worden getransporteerd, en aangewend in vervolprocessen

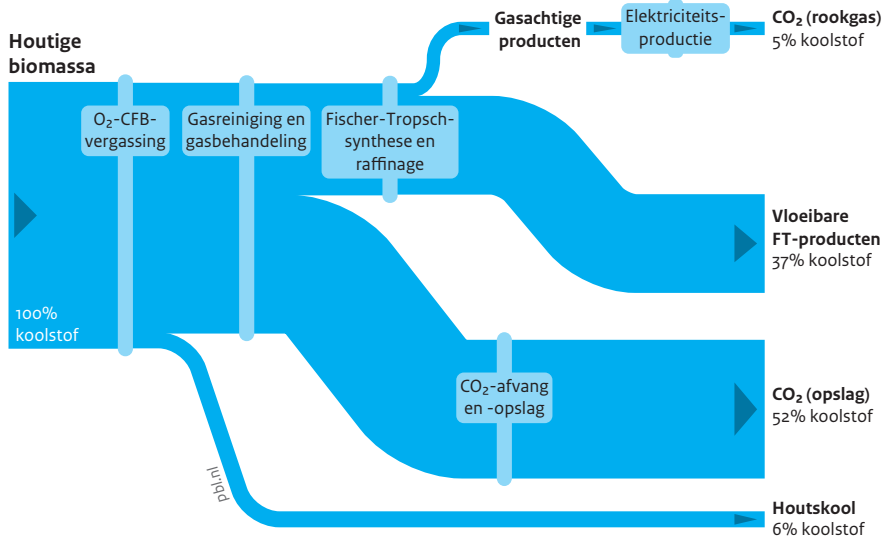
(vergassing, fermentatie, verbranding, chemie). Zo is biomassa na torrefactie droger en hydrofoob in vergelijking met ruwe biomassastromen, en daardoor beter op te slaan, transporteerbaar en verwerkbaar. Afval en (landbouw)restproducten zijn vaak te nat, hebben te veel volume en composteren makkelijk, waardoor deze minder geschikt zijn om over grote afstanden te transporteren.

Biochemische conversieroute

De biochemische conversieroute kent eveneens diverse varianten. Zo is vergisting al een breed toegepaste technologie, vooral voor verwerking van natte biomassastromen. De fermentatie van suikers uit suiker- of zetmeelhoudende gewassen tot ethanol is eveneens een zeer oude, vaak toegepaste technologie. Het vrijmaken van suikers uit houtige biomassastromen, met veel (hemi-)cellulose en lignine, en de daaropvolgende fermentatie van deze suikers is een technologische uitdaging, en vraagt om de toepassing van nieuwe innovatieve technieken.

Figuur 3.1

Verdeling van koolstof in uitgaande stromen van een Fischer-Tropschdiesel­fabriek met CO₂-opslag



Bron: Carbo et al. 2010, EBTP 2012

3.1.1 Basisprincipe vergassing lignocellulose biomassa

Procesbeschrijving vergassing

Bij vergassing wordt lignocellulose biomassa verbrand met een ondermaat zuurstof (tussen 800 en 1.000 °C). Bij vergassing staat de vorming van een synthegas centraal. Dit synthegas is een brandbaar mengsel van CO (koolmonoxide), H₂ (waterstof), CH₄ (methaan) en CO₂. De vergassingsroute biedt veel flexibiliteit als het gaat om de mogelijke vervolgroutes en te fabriceren eindproducten.

Bij vergassing blijft er as achter, dat kan worden gebruikt als meststof. Afhankelijk van de vergassingstemperatuur kan er ook teervorming optreden. De uitdaging is dan ook problemen met teervorming zoveel mogelijk te vermijden. Ook komt er CO₂ vrij; het betreft hier het deel van de biomassa dat wordt verbrand om de hoge temperatuur te krijgen die nodig is voor het vergassingsproces. Deze CO₂ kan worden afgevangen. De energie die nodig is om het vergassingsproces in stand te houden, is afkomstig van de ingezette biomassa; dat wil zeggen dat een deel van het hout hiervoor wordt verbrand (ondermaat zuurstof maakt deze gedeeltelijke verbranding mogelijk).

We onderscheiden in deze studie twee routes die beide lopen via vergassing:

1. Productie van biobrandstoffen (FT-diesel, dimethylether of DME) waarbij vergassing wordt gevolgd door chemische synthese. Cellulose, hemicellulose en lignine worden afgebroken tot een synthegas en vervolgens worden de verkregen kleine moleculen met diverse chemische synthese­processen (gebruikmakend van katalysatoren) opgebouwd tot allerlei producten van een hoge kwaliteit. Deze route is een alternatief voor fossiel dieselverbruik door zwaar transport, en wordt ook wel aangeduid als BtL (*Biomass-to-Liquids*). Deze route vormt ook een alternatief voor aardoliegebruik in de chemie (productie van nafta, alcohol).
2. Productie van groen gas (biomethaan of bio-CH₄) waarbij vergassing wordt gevolgd door methaansynthese, en opwerking tot groen gas van aardgaskwaliteit of transportbrandstof (bio-LNG of bio-CNG). Deze route is een alternatief voor aardgasgebruik of fossiel dieselverbruik in zwaar transport.

Grondstoffen voor vergassing

De grondstoffen voor de thermochemische routes zijn divers van aard. De thermochemische vergassingsroute is vooral geschikt voor de verwerking van droge biomassa­stromen. In te zetten biomassa­stromen zijn residuen uit

land- en bosbouw (stro en hout), snelgroeiende bomen of grassen (populier, wilg, olifantsgras), residuen uit bossen en afvalhout.

Biomassavergassing in combinatie met CCS (bio-CCS) leidt tot negatieve emissies. Bij vergassing van biomassa komt veel CO₂ vrij. Deze CO₂ kan worden afgevangen en opgeslagen. Omdat de CO₂ eerder door de plant uit de atmosfeer is gehaald, kunnen zo negatieve emissies worden gerealiseerd, ofwel kan er CO₂ uit de lucht worden verwijderd.

Vergassing van biomassa in combinatie met CCS (bio-CCS) leidt tot negatieve emissies

Figuur 3.1 illustreert de koolstofstromen in een lignocellulose FT-dieselfabriek, gebruikmakend van een zuurstofgeblazen CFB-vergasser (Carbo et al. 2010; EBTP 2012). Opvallend is dat ongeveer de helft van de koolstof in de biomassa kan worden afgevangen. Dit verklaart ook mede het grote CO₂-effect gegeven in hoofdstuk 2 (tabel 2.5). Ongeveer 52 procent van de koolstof in de biomassa eindigt in een zuivere CO₂-stroom, en kan daardoor relatief makkelijk worden afgevangen, en vervolgens getransporteerd en opgeslagen. Ongeveer 37 procent van de koolstof in de houtige biomassa eindigt in de biodiesel. Deze koolstof komt later vrij bij de verbranding

in voer- en vaartuigen. Circa 5 procent van de koolstof eindigt in een reststroom en komt bij het proces vrij in de lucht. Deze reststroom kan worden verbrand en gebruikt voor de opwekking van elektriciteit en warmte.

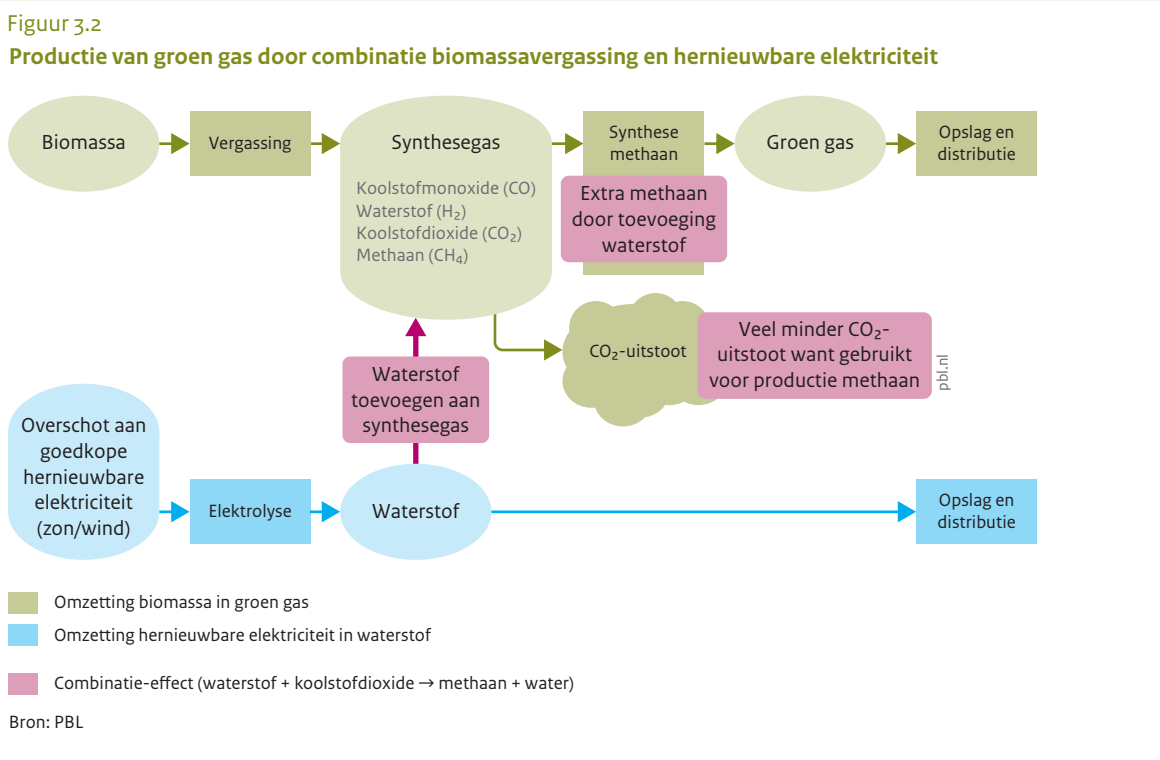
In een vergassingsreactor ontstaat een productgas waarin zich ongewenste producten bevinden, zoals CO₂, teer en zwavelverbindingen. Met een reinigingsstap moet CO₂ uit dit productgas worden verwijderd, waarbij zuiver CO₂ vrijkomt als een bijproduct van het proces. Deze CO₂ kan worden getransporteerd en ondergronds opgeslagen.

Naast de combinatie van biomassavergassing met CCS is er een andere, mogelijk kansrijke systeemoplossing waarin grootschalige biomassavergassing een centrale rol vervult. Het gaat hier om de combinatie van een elektrolysefabriek (power-to-gas) met een grootschalige vergassingsinstallatie. Deze optie is bij uitstek gericht op de lange termijn en verdient nadere verkenning. Zie voor details tekstkader 3 en figuur 3.2.

Tekstkader 3 Een kansrijke toekomstige technologie: combinatie van biomassavergassing en groene elektriciteit

De combinatie van grootschalige vergassing met een elektrolysefabriek is een innovatieve optie voor de toekomst die nog goed moet worden bestudeerd, maar die potentieel allerlei kansen biedt (Nordic Energy Research 2013). In deze energieoptie van de toekomst wordt een grootschalige vergassingsinstallatie die groen gas produceert, gekoppeld met een elektrolysefabriek. In de elektrolysefabriek wordt waterstof geproduceerd. Op dagen met een overschot aan elektriciteit uit zon en wind kan deze worden benut voor de productie van waterstof (zie figuur 3.2). Deze waterstof kan dan worden ingevoerd in de vergassingsreactor en zo worden aangewend om de CO₂ die vrijkomt bij de biomassavergassing om te zetten in methaan (groen gas). Door deze koppeling met een elektrolyseinstallatie kan het rendement van de vergassingsinstallatie substantieel worden verhoogd (meer groen gas per megajoule houtige biomassa). Het geproduceerde groen gas kan daarbij eventueel tijdelijk worden opgeslagen onder de grond. Daarmee kan deze optie een rol vervullen in het balanceren van de variabele elektriciteitsproductie uit wind en zon over het jaar. Groen gas kan ook worden omgezet in vloeibare producten, zoals methanol.

Zoals gezegd gaat het hier om een mogelijk kansrijke optie. Er zijn nog veel vragen. Zo is het aanbod van goedkope elektriciteit uit wind en zon discontinu. Dit leidt tot extra kosten voor de elektrolysefabriek. Deze extra kosten zullen moeten worden afgewogen tegen het voordeel van het variabele aanbod van goedkope elektriciteit. Daarnaast zal deze optie moeten worden afgewogen tegen de alternatieve optie waarbij de waterstof direct wordt gebruikt zonder omzetting in groen gas. Anders gezegd, het voordeel van de productie van groen gas dat met lage kosten gemakkelijk toepasbaar is in de bestaande infrastructuur (gasnet) zal moeten worden afgewogen tegen alternatieve toepassingen van waterstof met hogere kosten in de toepassing. Verder zullen de voordelen en kosten van dit systeem van balanceren moeten worden afgewogen tegen andere opties voor balanceren, zoals veel meer internationale interconnectie via een uitgebreider grid of het simpelweg accepteren van elektriciteitsverlies.



3.1.2 Basisprincipe fermentatie lignocellulose biomassa

Procesbeschrijving fermentatie

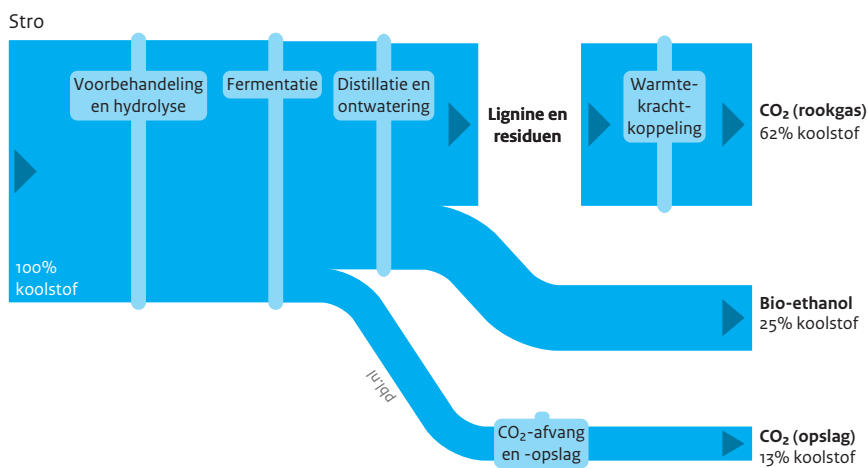
Het conversieproces van lignocellulose is feitelijk gericht op het versneld afbreken van moeilijk afbreekbaar plantaardig materiaal. Planten hebben zich honderden miljoenen jaren geëvolueerd om bestand te zijn tegen afbraak door insecten, bacteriën, schimmels en extreme weersomstandigheden. De uitdaging is om de energie die ligt opgeslagen in de moeilijk afbreekbare plantendelen, zoals stengels, bladeren en takken, vrij te maken voor gebruik door de mens.

Op hoofdlijnen zijn de stappen in het biochemische conversieproces van lignocellulose biomassa gelijk aan de productie van eerste-generatie biobrandstoffen uit voedingsgewassen. Omdat lignocellulose plantmateriaal echter moeilijk is af te breken, vraagt dit om nieuwe innovatieve technieken die afwijken van de al eeuwen bestaande technieken die worden gebruikt voor de conversie van zetmeelhoudende gewassen. De opeenvolgende stappen bij de biochemische conversie zijn:

- voorbehandeling;
- hydrolyse;
- fermentatie; en
- productscheiding en destillatie.

Het doel van de *voorbehandeling* is om de cellulose en hemicellulose vrij te maken uit het plantmateriaal en te scheiden van de lignine. De lignine wordt hierbij zoveel mogelijk opgelost of afgebroken. Dit gebeurt door een mix van mechanische (malen) en chemische processen (toevoeging van zuur of ammoniak). Er zijn verschillende voorbehandelmethode bestudeerd en ontwikkeld. Het doel van de *hydrolyse* is om de vrijgekomen cellulose en hemicellulose om te zetten in suikers. De oude manier waarbij dit wordt gedaan, is met zuur. Het gebruik van zuur is echter duur en leidt tot grote hoeveelheden afval. Het merendeel van de technieken maakt daarom gebruik van speciaal ontwikkelde enzymen die cellulose en hemicellulose kunnen omzetten. De output van dit proces is een mengsel van C6-suikers (onder andere glucose en sucrose) en C5-suikers (zoals xylose). De enzymen worden ontwikkeld en geproduceerd door speciale enzymfabrikanten, zoals DSM en Novozymes. Het doel van de *fermentatie* is om de vrijgekomen suikers om te zetten in ethanol, en verschillende nuttige bijproducten met een economische waarde. Bij de fermentatie komt koolstofdioxide vrij als een bijproduct. De fermentatie van de C6-suikers is een bekend proces waarvoor dezelfde micro-organismen kunnen worden gebruikt als bij de productie van eerste-generatie biobrandstoffen. De uitdaging ligt in de snelle en efficiënte omzetting van de C5-suikers. Deze suikers maken een belangrijk deel uit van de vrijgekomen suikers. Fermentatie van C5-suikers is moeilijk en nieuwe

Figuur 3.3

Verdeling van koolstof in uitgaande stromen van een bio-ethanolfabriek met CO₂-opslag

Bron: Carbo et al. 2010, EBTP 2012

genetisch gemodificeerde giststammen worden ontwikkeld om deze suikers effectief om te zetten. Daarbij komt dat deze micro-organismen gevoelig zijn voor bepaalde bijproducten die vrijkomen in de procesgang. Voor de inrichting van het productieproces is het belangrijk om te voorkomen dat de fermentatie door deze bijproducten wordt belemmerd. Het doel van de *destillatie* is om het product ethanol zuiver in handen te krijgen. De overgebleven lignine en niet-afgebroken cellulose en hemicellulose, enzymen en micro-organismen blijven achter als digestaat. Deze materialen kunnen als brandstof worden gebruikt voor energieopwekking, dan wel worden opgewerkt tot waardevolle bijproducten. Ethanol geproduceerd uit lignocellulose wordt aangeduid als cellulose-ethanol.

Grondstoffen voor fermentatie

Zowel natte (organisch afval) als drogere biomassa-stromen (stro, hout) kunnen worden verwerkt via de biochemische route. In te zetten biomassa-stromen zijn residuen uit land- en bosbouw (stro en hout), snelgroeiende grassen (olifantsgras) en bomen (populier, wilg), de organische component uit huishoudelijk afval en afval uit de voedingsindustrie.

Fermentatie van biomassa in combinatie met CCS (bio-CCS) leidt tot negatieve emissies

Bij de fermentatie worden suikers omgezet in bio-ethanol en CO₂. De CO₂ die vrijkomt kan worden gescheiden in een zuivere CO₂-stroom, en vervolgens worden getransporteerd en ondergronds opgeslagen. Ook bij

fermentatie kunnen dus negatieve emissies worden gerealiseerd, zij het in mindere mate dan bij vergassing.

Figuur 3.3 illustreert de koolstofstromen in een lignocellulose bio-ethanolfabriek (Carbo et al. 2010; EBTP 2012). Ongeveer 13 procent van de koolstof in de biomassa kan relatief makkelijk worden afgevangen, en vervolgens getransporteerd en opgeslagen. Ongeveer 25 procent van de koolstof komt terecht in de bio-ethanol. Het merendeel van de koolstof (62 procent) eindigt in de reststroom en bestaat voor een groot deel uit lignine. De lignine kan worden verbrand en worden gebruikt voor de opwekking van energie.

3.2 Technologische ontwikkeling

De technologie voor vergassing en fermentatie van lignocellulose biomassa wordt de komende jaren op precommerciële schaal gedemonstreerd. In tabel 3.2 is het ontwikkelingsstadium samengevat van de belangrijkste conversieroutes voor droge lignocellulose biomassa in Europa en de wereld. We zien dat de technieken voor de omzetting van droge biomassa in koolwaterstoffen als methanol, diesel of methaan zich nog in de fase van (kleinschalige) demonstratie bevinden. Echter, grootschalige productie is in voorbereiding, maar voor 2020 zijn daarvan nog geen grote bijdragen te verwachten. *Flagship plants* van 50 tot 100 miljoen liter biobrandstof zijn in voorbereiding in Europa en de Verenigde Staten. Nederland spreekt duidelijk een

Tabel 3.2

Ontwikkelingsstadium energietechnologie voor de productie van biobrandstoffen en groen gas uit droge lignocellulose biomassa*

| Verwerkingstechnologie | Product | Pilot | Demo | Flag-ship | Commercieel |
|--------------------------------|-----------------------------|-------|------|------------------|-------------|
| Vergassing | | | | | |
| Vergassing en methanolsynthese | Methanol / DME ¹ | | | In voorbereiding | |
| Vergassing en methaansynthese | Biomethaan (groen gas) | | | In voorbereiding | |
| Fermentatie en methaansynthese | Biomethaan (groen gas) | | | In voorbereiding | |
| Vergassing en FT-synthese | Biodiesel | | | In voorbereiding | |
| Vergassing en FT-synthese | Diverse bulkchemicaliën | | | | |
| Fermentatie | | | | | |
| Voorbehandeling en fermentatie | Bio-ethanol ² | | | | |
| Voorbehandeling en fermentatie | Diverse chemicaliën | | | | |

*In het schema zijn vier fasen onderscheiden: grote onderzoekopstelling (pilot), kleine praktijkopstelling (demo), eerste fase toepassing op grote schaal (precommercieel) (flagship) en bewezen techniek (commercieel).

¹ Dimethylether.

² Bio-ethanol uit houtige biomassa wordt ook aangeduid als cellulose-ethanol.

woordje mee in deze toepassingen en ontwikkelingen (ECN 2013). In Delfzijl is een fabriek in voorbereiding voor de verwerking van houtige biomassa tot biomethanol, dat in transport of in de chemie kan worden ingezet. In Alkmaar worden plannen gemaakt voor de bouw van een vergassingsinstallatie voor afvalhout die als uiteindelijk doel heeft om groen gas van aardgaskwaliteit te produceren. Torrgas Nederland ontwikkelt en levert technologie voor de torrefactie van houtige biomassa in combinatie met vergassing van de getorreficeerde biomassa. Koninklijke DSM heeft een gepatenteerde enzym- en gisttechnologie ontwikkeld voor de fermentatie van houtige biomassastromen tot bio-ethanol.

Kijken we naar de omvang van de geraamde productie aan biobrandstoffen en groen gas, en daarvoor benodigde hoeveelheden biomassa, kunnen we concluderen dat de toepassing van biomassa voor biobrandstoffen en groen gas een grotere vlucht neemt dan de toepassing voor de productie van bulkchemicaliën. De bulk van de grondstoffen voor de chemie wordt ingezet voor de productie van plastics. De switch van op olie gebaseerde grondstoffen naar biomassa als grondstof is nog slechts in zeer beperkte mate gemaakt. Hierbij gaat het wel om het volume aan in te zetten biomassa. Specifieke ontwikkelingen in de (bio) chemische industrie, als onderdeel van de *biobased economy*, zijn niet meegenomen. Deze ontwikkelingen zijn economisch interessant en vragen ook veel innovatie. Daarbij gaat het veelal om de productie van specifieke chemische stoffen en om de benutting van meer

biokennis (biotechnologie). Voor de ontwikkeling hiervan op pilotschaal zijn specifieke nieuwe voorzieningen ingericht.

Veel technische problemen zijn opgelost

Zo'n tien jaar geleden was de productie van biobrandstoffen en groen gas uit houtige biomassa veelbelovend, maar er waren nog veel hardnekkige technische problemen die moesten worden opgelost, zoals de teervorming bij de vergassingsroute en de (enzymatische) afbraak van cellulose en hemicellulose bij de fermentatieroute. In de afgelopen tien jaar is er op deze terreinen veel technische vooruitgang geboekt. Meerdere firma's hebben technieken ontwikkeld en gepatenteerd. De techniek van vergassing en fermentatie is nu zo ver ontwikkeld en getest dat in Europa en de Verenigde Staten de stap is gezet naar de planning en bouw van grootschalige precommerciële demonstratiefabrieken. Deze nieuwe fabrieken moeten de komende jaren (tot 2020) aantonen wat de kosten zijn van grootschalige productie, en hoe deze zich verhouden tot de kosten van fossiele brandstoffen. Een groot deel van de kosten wordt bepaald door de kosten van de lignocellulose biomassa. De prijsontwikkeling van deze grondstof is onzeker en moeilijk te voorspellen.

Tabel 3.3

Huidige en geplande productiecapaciteit voor vloeibare biobrandstoffen uit houtige biomassa in de Europese Unie (exclusief huishoudelijk afval)

| Project | Land | Product | Productiecapaciteit vloeibare transportbrandstoffen | |
|--|------------|--------------------|---|--|
| | | | 2011 PJ/jaar | 2020 (in voorbereiding) PJ/jaar |
| NER-300-projecten | | | | |
| Woodspirit | Nederland | biomethanol | - | 8,1 |
| AJOS BTL | Finland | FT-diesel | - | 4,9 |
| UPM Stracel | Frankrijk | FT-diesel | - | 4,5 |
| Goswinowice | Polen | cellulose-ethanol | - | 1,3 |
| BEST | Italië | cellulose-ethanol | - | 1,1 |
| Overige projecten | | | | |
| Varmlandsmethanol | Zweden | biomethanol | - | 2,2 |
| BioTfuel | Frankrijk | FT-diesel/kerosine | - | 0,2 |
| Inbicon | Denemarken | cellulose-ethanol | 0,1 | 0,1 |
| Biogasol | Denemarken | cellulose ethanol | - | 0,1 |
| BioDme Chemrec | Zweden | bio-DME | 0,05 | 0,05 |
| Procethol 2G | Frankrijk | cellulose ethanol | - | 0,04 |
| Clariant Straubing | Duitsland | cellulose-ethanol | - | 0,03 |
| Totaal | EU | | 0,16 | 23 |
| Aandeel hernieuwbare energie in transport | EU | | | 0,17% (zonder dubbeltelling) |

Bron: EBTP (2013); bewerking PBL

3.2.1 Europese productiecapaciteit lignocellulose biobrandstoffen in 2020

Europese productiecapaciteit voor vloeibare lignocellulose biobrandstoffen in 2020 is nog zeer beperkt

Uitgaande van een lijst van het European Biofuels Technology Platform (EBTP) en informatie van de Commissie over toegekende projecten onder het NER-300-subsidieprogramma, hebben we een overzicht gemaakt van Europese productie-installaties voor vloeibare biobrandstoffen op basis van houtige biomassa (EBTP 2013) (zie tabel 3.3 en figuur 3.4). Het overzicht geeft een zo goed mogelijk actueel beeld, maar we claimen niet volledig te zijn; afwijkingen van de feitelijke huidige situatie en verwachtingen kunnen voorkomen. Europese plannen voor biobrandstofvergassings-installaties op basis van huishoudelijk afval zijn hier niet meegenomen.

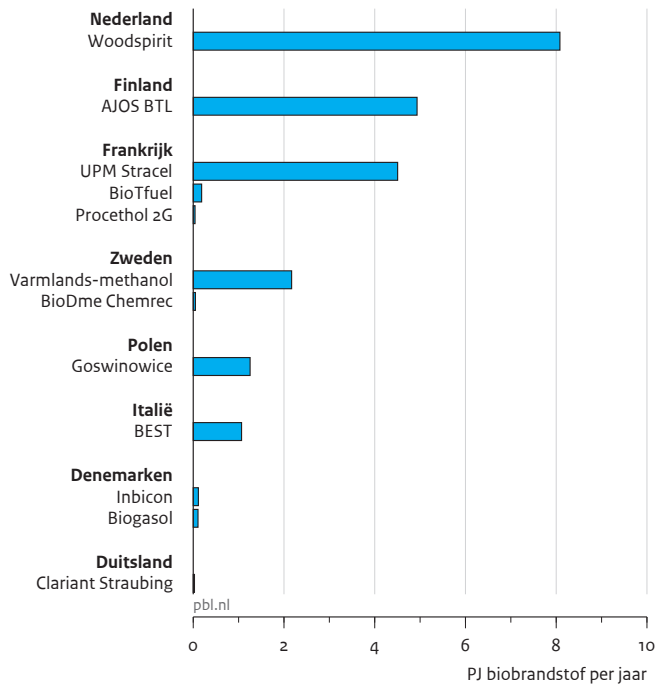
Tabel 3.3 laat zien dat er in 2011 in de Europese Unie nog vrijwel geen vloeibare biobrandstof op basis van houtige biomassa werd geproduceerd; in 2011 bedroeg de productiecapaciteit circa 0,2 petajoule brandstof per jaar. Voor 2020 bedraagt de geplande productiecapaciteit circa

23 petajoule per jaar, waarvan circa een derde in Nederland, wat daarmee de grootste bijdrage van een individueel land is. Het totale finale energiegebruik in het EU-transport wordt voor 2020 geraamd op circa 13.500 petajoule (Primes 2010). De geraamde toename in productiecapaciteit komt vooral voor rekening van projecten waarvoor de Europese Unie subsidie heeft toegekend in het kader van het Europese stimuleringsprogramma NER-300.

Het Europese Parlement (EP) wil het gebruik van biobrandstoffen van voedingsgewassen begrenzen. In 2020 mag maximaal 6 procent van de brandstoffen (finale energieverbruik) in het verkeer gemaakt zijn van voedselgewassen. De verplichting voor het gebruik van hernieuwbare bronnen in de transportsector bedraagt 10 procent in 2020. Dit betekent dat 4 procent afkomstig moet zijn uit niet-voedingsgewassen, zoals lignocellulose biomassa, en andere grondstoffen, zoals plantaardige en dierlijke rest- en afvalstromen uit de voedingsindustrie, huishoudelijk organisch afval, mest en zuiveringsslib, dan wel uit hernieuwbare elektriciteit en waterstof. Bij de berekening van het aandeel hernieuwbare energie in de transportsector wordt het totale finale energiegebruik in het transport (exclusief het energiegebruik in de scheep- en luchtvaart) als referentie (noemer)

Figuur 3.4

Europese installaties voor productie van biobrandstoffen uit houtige biomassa, 2020



Bron: EBTP, 2013; bewerking PBL

gebruikt. De geplande Europese productiecapaciteit van 23 petajoule aan vloeibare lignocellulose biobrandstoffen bedraagt 0,17 procent van het hiervoor genoemde totale energiegebruik in transport. Dit geeft aan dat in 2020 nog maar een zeer kleine fractie van het energieverbruik van het transport afkomstig zal zijn uit lignocellulose materiaal.

Gaan we ervan uit dat biobrandstof uit lignocellulose dubbel mag worden geteld voor de bijmengverplichting, dan komt de 0,17 procent overeen met 0,34 procent. De verwachting is dat er in 2020 nog niet veel lignocellulose biobrandstoffen kunnen worden geïmporteerd in Europa. De inventarisatie maakt duidelijk dat het merendeel van de hernieuwbare energiedoelstelling voor transport dan zal moeten worden ingevuld met biobrandstoffen geproduceerd uit andere duurzame biomassastromen, zoals dierlijke rest- en afvalstromen uit de voedingsindustrie, huishoudelijk afval en mest, of zal moeten komen van meer hernieuwbaar elektrisch vervoer of waterstof.

Vergassingsroute naar vloeibare biobrandstoffen: precommerciële fabrieken in voorbereiding in Europa, de grootste in Nederland door BioMCN

Kijken we naar de vergassing van biomassa en daarop volgend de synthese van vloeibare biobrandstoffen, dan is er een aantal grote fabrieken in voorbereiding in Europa

(zie tabel 3.3). Dit type fabrieken wordt aangeduid als BtL (*Biomass-to-Liquids*). De grotere BtL-fabrieken zijn mogelijk gemaakt met een Europese subsidie vanuit het Europese NER-300-subsidieprogramma voor innovatieve CO₂-arme technologie. Niet alle ontwikkelingen verlopen overigens voorspoedig. Zo is een eerste grootschalige productie van biodiesel via vergassing in Freiburg (Duitsland) inmiddels gestopt.

De grootste fabriek voor houtvergassing in de Europese Unie staat gepland in Nederland, in Delfzijl. Het Nederlandse bedrijf BioMCN wil in Delfzijl een fabriek bouwen waarbij houtige biomassa wordt vergast en omgezet in biomethanol. Biomethanol kan worden ingezet in transport of in de chemie. De start van de productie staat gepland voor 2017. De fabriek zal gebruikmaken van 1,5 miljoen ton aan geïmporteerde *wood chips*. Het project genaamd Woodspirit heeft een geplande productiecapaciteit van 516 miljoen liter biomethanol. De biomethanol zal gebruikt gaan worden als een additief voor benzine ter vervanging van fossiele olie. Initiatiefnemer is een consortium van bedrijven, waaronder BioMCN en Siemens. BioMCN heeft al een vergassingsfabriek in Delfzijl voor de productie van biomethanol uit glycerine.

In het noorden van Finland staat een BtL-fabriek gepland in Ajos. In deze fabriek zal hout worden vergast en vervolgens met het FT-proces wordt omgezet in FT-diesel

en bionafta. De opening van de fabriek is gepland voor 2017. De fabriek zal gebruikmaken van circa 1 miljoen ton aan houtige biomassa. Vertalen we de gehele productiecapaciteit, inclusief de nafta, naar eenzelfde product FT-diesel, dan vertaalt zich dit in circa 135 miljoen liter FT-diesel per jaar. Initiatiefnemer is het Finse energiebedrijf VAPO, een pionier op het gebied van bio-energie. VAPO is ook een van Europa's grootste bedrijven voor de productie van zaaghout voor de bouw- en meubelindustrie. Het doel is om vooral het Baltische zeegebied (Finland en Zweden) te voorzien van een hoge kwaliteit tweede-generatie biobrandstof.

In Frankrijk staat een BtL-fabriek gepland in Straatsburg, met een geplande start in 2016. Het doel van deze fabriek is om FT-diesel en bionafta te produceren. De fabriek is gepland op het terrein van een bestaande papierfabriek en zal circa 1 miljoen ton aan houtige biomassa gebruiken. De geplande productiecapaciteit bedraagt circa 135 miljoen liter FT-diesel per jaar. Initiatiefnemer is het Finse papier- en pulpbedrijf UPM. UPM bezit papierfabrieken over de hele wereld, en is een pionier in bio-energie.

In Zweden is een biomassa-naar-methanolabriek gepland in Hagfors. Het project is genaamd Varmlandsmetanol. De geplande productiecapaciteit is circa 140 miljoen liter per jaar. Dit project maakt gebruik van houtresten uit de bosbouw. De vergassingstechnologie wordt ingebracht door het Duitse Thyssen Krupp Uhde. De geplande start van de fabriek is in 2017.

Naast bovengenoemde grote NER-300-projecten lopen er ook kleinere projecten. Zo loopt in Frankrijk het BiotFuel-demonstratieproject. Het initiatief voor dit project ligt bij vijf Franse partners en Thyssen Krupp Uhde. Het project combineert vergassing en FT-synthese en is gericht op de productie van FT-diesel en FT-kerosine. Het gaat om een relatief klein project, met een productiecapaciteit van circa 6 miljoen liter FT-diesel per jaar. De geplande start van de productie is in 2014. De vergassingstechnologie wordt ingebracht door het Duitse Thyssen Krupp Uhde. In Zweden is sinds 2010 een kleine productie-installatie voor DME operationeel in Pitea. Het project is bekend onder de naam BioDME. BioDME wordt gemaakt van biomethanol, een schone brandstof die als alternatief kan dienen voor diesel. De installatie heeft een capaciteit van 2 miljoen liter per jaar. De installatie bevindt zich op het terrein van een papierfabriek en draait op houtresten.

Fermentatieroute naar vloeibare biobrandstoffen: pre-commerciële fabrieken in voorbereiding in Italië en Polen

Oktober 2013 is een grote precommerciële fabriek opgestart voor de productie van ethanol door middel van

fermentatie van houtig materiaal. Het gaat om een fabriek in Noord-Italië (project BEST in Crescentino bij Turijn) die gaat draaien op tarwestro (zie tabel 3.3). Initiatiefnemer achter deze fabriek is het Italiaanse chemisch bedrijf Chemtec (M&G). Met dit project willen Chemtec (M&G) en Novozymes hun gepatenteerde cellulosestechnologie demonstreren en in de markt zetten. Hiervoor is een speciale joint venture opgezet, genaamd Beta-renewables, samen met de investeerder TPG. De productiecapaciteit van de fabriek is 50 miljoen liter cellulose-ethanol per jaar.

Daarnaast is een precommerciële fabriek in voorbereiding in Polen (Goswinowice) die gaat draaien op tarwestro en maïsstro, ook wel maïsstover genoemd (zie tabel 3.3). De geplande productiecapaciteit van deze fabriek is 60 miljoen liter cellulose-ethanol per jaar. Verder is een aantal kleinere demonstratie-installaties in voorbereiding in andere EU-landen.

In de Verenigde Staten zijn er veel ontwikkelingen rond de productie van bio-ethanol uit landbouw- en bosresiduen. Zo komt naar verwachting in 2014 een grote precommerciële fabriek in Iowa in bedrijf. Het betreft hier een joint venture tussen het Amerikaanse Poet (een van de grootste ethanolproducenten in de wereld) en het Nederlandse DSM (wereldleider in gist- en enzymstechnologie). DSM wil hiermee zijn gepatenteerde enzym- en giststechnologie in de markt zetten. Deze fabriek gaat draaien op maïskolven en maïsstover, met een productiecapaciteit van 76 miljoen liter cellulose-ethanol per jaar. Huidige eerste-generatie bio-ethanolabrieken hebben een productiecapaciteit tot 480 miljoen liter.

Als de demonstratie van de cellulosestechnologie in de Verenigde Staten en de Europese Unie goed verloopt, en de kosten acceptabel zijn, is een verdere uitrol van deze technologie naar andere ethanolproducenten over de wereld in circa vijf tot zeven jaar mogelijk (vanaf 2018-2020).

3.2.2 Europese productiecapaciteit groen gas in 2020

Vergassings- en fermentatieroute naar groen gas: pre-commerciële fabrieken in voorbereiding in Zweden en Duitsland

Kijken we naar de productie van biomethaan (groen gas van aardgaskwaliteit) op basis van lignocellulose, dan zijn er plannen voor de bouw van een aantal grote precommerciële fabrieken in Zweden en Duitsland (zie tabel 3.4). Het merendeel van de plannen betreft vergassingsinstallaties; uitsluitend in het Duitse project wordt biomethaan geproduceerd uit stro via fermentatie.

Tabel 3.4

Geplande productiecapaciteit voor biomethaan uit lignocellulose biomassa in de Europese Unie (exclusief huishoudelijk afval)

| Project | Land | Product | Productiecapaciteit biomethaan 2020 (in voorbereiding) PJ/jaar |
|--------------------------|-----------|-------------------------|---|
| NER-300-projecten | | | |
| GoBiGas-2 | Zweden | biomethanol | 8,1 |
| Verbio straw | Duitsland | fermentatie - groen gas | 0,4 |
| Overige projecten | | | |
| E.on Bio2G | Zweden | vergassing - groen gas | 5,8 |
| GoBiGas-1 | Zweden | vergassing - groen gas | 0,6 |
| Gaya | Frankrijk | vergassing - groen gas | 0,02 |
| ECN/HVC | ECN/HVC | vergassing - groen gas | 0,02 |
| Totaal | EU | | 10 |

Bron: EBTP, 2013, bewerking PBL

Het geproduceerde biomethaangas onderscheidt zich niet van aardgas en kan worden bijgemengd in het gasnet, en gebruikt als transportbrandstof, dan wel als brandstof in de industrie en de gebouwde omgeving. Ook dit overzicht geeft een zo goed mogelijk actueel beeld, maar opnieuw claimen we niet volledig te zijn. Zo is de status van het voorgenomen project E.on Bio2G in Zweden onduidelijk.

De totale bij ons bekende plannen in Europa voor biomethaanproductie tellen op tot circa 9,66 petajoule per jaar in 2020. Mocht dit groen gas volledig worden aangewend in de transportsector, dan kan het aandeel hernieuwbare energie uit lignocellulose biomassa in 2020 in de Europese Unie oplopen tot 0,24 procent.

Ook in Nederland (Alkmaar) zijn er plannen voor de bouw van een relatief kleine demonstratie-installatie voor de productie van biomethaan. Mogelijk zal in 2014 worden gestart met de bouw, als de financiering rondkomt. De installatie gebruikt sloophout en heeft een vermogen van 12 megawattuur, en zal de eerste jaren uitsluitend worden ingezet voor de productie van stroom en warmte. Het plan is om in 2017 een deel van het productgas (1 megawattuur) op te werken tot biomethaan. In de demonstratie-installatie wordt gebruikgemaakt van door ECN (Petten) en de Dahlman Industrial Group (Maassluis) ontwikkelde vergassings- en reinigingstechnologie.

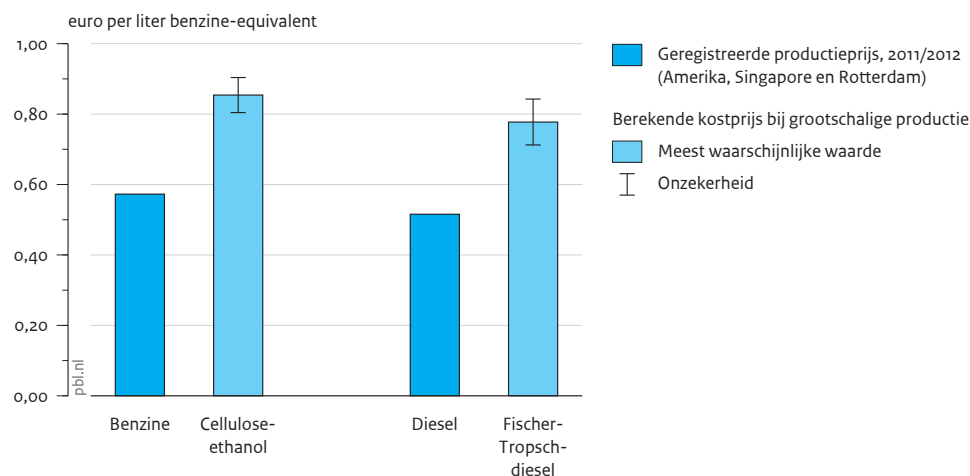
3.2.3 Kosten biobrandstoffen uit lignocellulose biomassa**Biobrandstoffen uit lignocellulose in 2011 tweemaal duurder dan fossiele brandstoffen**

Het IEA (2011, 2012) heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar de kostprijs voor biobrandstoffen uit lignocellulose biomassa. Overigens betreft het hier indicatieve schattingen, aangezien er in de wereld nog geen ervaring is met grote commerciële fabrieken.

De kostprijs van lignocellulose biobrandstoffen is opgebouwd uit de kosten voor het conversieproces (investeringskosten en operationele kosten) en de zogenoemde *feedstock*-kosten (kosten van de grondstof). De kostprijzen kunnen sterk verschillen, afhankelijk van het type biomassa (onder andere hout of stro), het soort conversietechnologie dat wordt gebruikt en de regio (bijvoorbeeld Europa of Latijns-Amerika). De *feedstock*-kosten van biomassa vertegenwoordigen een belangrijk deel van de totale productiekosten van lignocellulose biobrandstoffen (25 tot 40 procent). De kosten van het conversieproces (investering en operationeel) zijn, bij biomassaprijzen anno 2011, het meest bepalend (60 tot 75 procent) (IEA 2011).

De (berekende) kostprijs voor lignocellulose biobrandstoffen lag in 2011-2012 ongeveer 50 procent hoger dan voor fossiele brandstoffen (zie figuur 3.5). De kostprijs is uitgedrukt per liter benzine energie-equivalenten. Bij deze afleiding van kosten wordt ervan uitgegaan dat de biobrandstof geproduceerd zal gaan worden in grootschalige commerciële installaties van enkele honderd miljoen liter brandstof.

Figuur 3.5
Productieprijs transportbrandstoffen



Bron: IEA, 2012; bewerking PBL

Het IEA verwacht dat cellulose-ethanol en FT-diesel bij een olieprijs van 125 dollar per vat competitief kunnen worden met benzine en diesel

Het is moeilijk om te voorspellen hoe de prijs van biobrandstoffen uit lignocellulose zich in de toekomst zal ontwikkelen, en op welk moment de productie van lignocellulose biobrandstoffen (zonder subsidie en zonder bijmengverplichting) competitief zal worden met fossiele benzine en diesel. Naast de onzekere ontwikkeling van de olieprijs hangt dit in hoge mate af van de onzekere ontwikkeling van de biomassaprijs. Het IEA is in de *World Energy Outlook 2012* optimistisch over de prijsontwikkeling van lignocellulose biobrandstoffen (IEA 2012). Het IEA neemt aan dat het wereldwijde biomassa-aanbod meer dan voldoende is om te voldoen aan de toenemende vraag, en veronderstelt daarbij geen noemenswaardige stijging van de biomassaprijzen. Verder veronderstelt het IEA dat de kosten van het 'conversieproces' (exclusief de biomassakosten) nog met 10 tot 20 procent kunnen dalen. Gegeven deze uitgangspunten verwacht het IEA dat lignocellulose biobrandstoffen competitief worden met benzine en diesel bij een olieprijs van circa 125 dollar per vat. Dit betekent dat de olieprijs nog met iets meer dan 10 procent moet stijgen ten opzichte van het huidige niveau. De gemiddelde olieprijs in de periode 2011-2012 was 111 dollar per vat.

De break-even olieprijs van 125 dollar per vat is een optimistische schatting. Wanneer de biomassaprijs wel stijgt (als het aanbod geen gelijke tred houdt met de vraag), dan zal de olieprijs boven de 125 dollar per vat moeten uitstijgen voordat de productie van lignocellulose biobrandstof concurrerend kan worden met fossiele benzine en diesel.

Literatuur

- Agentschap NL (2013), 'Bio-energie–Techniek, Torrefactie', <http://www.agentschapnl.nl/sites/default/files/bijlagen/Bio-energie%20-%20Techniek%20%E2%80%93%20Torrefactie.pdf>.
- Carbo, M.C. et al. (2010), *Bio Energy with CO₂ Capture and Storage (BECCS): conversion routes for negative CO₂ emissions*, Proceedings of the 4th International Freiberg Conference on IGCC & Xtl, Germany.
- CE (2010), *Goed gebruik van biomassa*, CE-Delft, Publicatienummer 10.8179.26, Delft.
- EBTP (2012), *Biomass with CO₂ capture and storage (Bio-CCS). The way forward for Europe*, European Biofuels Technology Platform and the Zero Emissions Platform.
- EBTP (2013), 'European Biofuels Technology Platform', <http://www.biofuelstp.eu/overview.html>.
- ECN (2013), *Biomass gasification in the Netherlands*. IEA-bioenergy Task 33 on biomass gasification, Publicatienummer ECN-E--13-032, Petten: ECN.
- EU (2010), *EU energy trends to 2030 — Update 2009*, European Commission Directorate-General for Energy.
- Fraunhofer (2012), *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung, Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146.
- IEA (2011), *Technology Road Map Biofuels for Transport*, Paris: OECD/IEA.
- IEA (2012), *World Energy Outlook 2012*, Paris: OECD/IEA.
- Nordic Energy Research (2013), 'Project on CO₂ electrofuels with the goal to quantify the capacity and cost potential of CO₂ electrofuels and proposed roadmaps for the introduction of CO₂ electrofuels in the Nordic region', <http://www.co2-electrofuels.org/>
- PBL & ECN (2011), *Naar een schone economie in 2050: routes verkend. Hoe Nederland klimaatneutraal kan worden*, Den Haag: PBL.
- PBL (2013), *Klimaat effecten door gebruik van hout voor bio-energie*, Den Haag: PBL.

Planbureau voor de Leefomgeving

Postadres
Postbus 30314
2500 GH Den Haag

Bezoekadres
Oranjevuitensingel 6
2511 VE Den Haag
T +31 (0)70 3288700

www.pbl.nl

Februari 2014