

Biomassa voor de Circulaire Economie

Alles wat je wilde weten over biomassa maar nooit durfde te vragen

JOHAN VAN GROENESTIJN, PAULIEN HARMSSEN, HARRIËTTE BOS



Biomassa voor de Circulaire Economie

Alles wat je wilde weten over biomassa maar
nooit durfde te vragen

Johan van Groenestijn, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos

Uitgegeven in de reeks "Groene Grondstoffen"

- Catalogus biobased bouwmaterialen 2019; Het groene en circulaire bouwen, Jan van Dam, Martien van den Oever (2019)
- Biobased plastics 2019, Karin Molenveld en Harriëtte Bos (2019)
- Lignine, groene grondstof voor chemicaliën en materialen, Jan van Dam, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos, Richard Gosselink (2017)
- Kunstmatige fotosynthese; Voor de omzetting van zonlicht naar brandstof, Robin Purchase, Huib de Vriend en Huub de Groot, editors: Paulien Harmsen en Harriëtte Bos, vertaling: Bruno van Wayenburg (2015)
- Catalogus biobased verpakkingen, Karin Molenveld en Martien van den Oever (2014)
- Duurzaamheid van biobased producten uit plantaardige olie, energiegebruik en broeikasgasemissie. Harriëtte Bos, Sjaak Conijn, Wim Corré, Koen Meesters, Martin Patel (2013)
- Groene bouwstenen voor biobased plastics; Biobased routes en marktontwikkeling, Paulien Harmsen, Martijn Hackmann (2012)
- Catalogus biobased bouwmaterialen; Het groene bouwen, Jan van Dam, Martien van den Oever (2012)
- Biocomposieten 2012; Natuurlijke vezels en bioharsen in technische toepassingen, Martien van den Oever, Karin Molenveld, Harriëtte Bos (editor) (2012)
- Biobased Plastics 2012, Christiaan Bolck, Jan Ravenstijn, Karin Molenveld, Paulien Harmsen (editor) (2011)
- Microalgen; het groene goud van de toekomst? Grootschalige duurzame kweek van microalgen voor de productie van bulkgrondstoffen, Hans Wolkers, Maria Barbosa, Dorinde Kleinegris, Rouke Bosma, Rene Wijffels, Paulien Harmsen (editor) (2011)
- Duurzaamheid van biobased producten; Energiegebruik en broeikasgas-emissie van producten met suikers als grondstof, Harriëtte Bos, Sjaak Conijn, Wim Corré, Koen Meesters, Martin Patel (2011)
- Bioraffinage; Naar een optimale verwaarding van biomassa, Bert Annevelink, Paulien Harmsen (2010)

Deze en oudere uitgaven zijn te downloaden van www.groenegrondstoffen.nl

Voorwoord

In het maatschappelijke debat is “biomassa” gelijk aan “houtpellets”. Een debat dat bovendien naar een welles – nietes uitwisseling neigt. Dit doet biomassa ernstig tekort. Het gaat om meer, veel meer dan houtpellets. Maar hoeveel dan? En welke stromen zijn dat dan? Waar komen die vandaan? Hebben we zelf (van Nederlandse bodem) genoeg? En hoe kunnen we biomassa gebruiken voor zowel Chemie als Energie?

“TKI-BBE” staat voor Topconsortium voor Kennis en Innovatie in de Biobased economy (onderdeel van de circulaire economie). De K en de I staan dus voor Kennis en Innovatie, een wereld waarin feiten een belangrijke rol spelen. Vandaar dit boekje.

Met dit boekje willen we graag een overzicht en waar mogelijk handvatten bieden voor beleid en ondernemerschap. Het biedt een overzicht van de soorten biomassa en de biomassabeschikbaarheid op de schaal van Nederland, Europa, en de wereld, en van de beschikbare technologieën waarmee biomassa kan worden omgezet in een scala aan nuttige producten.

En voordat u gaat lezen: wat denkt u dat het grootste CO₂ vastleggende gewas in Nederland is?

Kees de Gooijer
Chief inspiration Officer TKI-BBE

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
2	Biomassa	11
2.1	Wat is biomassa?	11
2.2	Producten uit biomassa	13
2.3	Productie van biomassa	15
2.4	Nieuwe biomassabronnen	15
3	De huidige inzet van biomassa	19
3.1	Inleiding	19
3.2	Gebruik van energiedragers in Nederland	19
3.3	Nederlands gebruik, invoer en uitvoer van biomassa voor energetische toepassingen	21
3.4	Nederlandse invoer en uitvoer van biomassa	22
3.5	Bestemmingen van biomassa in Nederland	24
3.6	Conclusies	30
4	Biomassabehoefte van de bio-economie	33
4.1	Inleiding	33
4.2	Scenario 1: Vervanging van fossiele grondstoffen door alleen biomassa, bij huidig gebruik	36
4.3	Scenario 2: De verwachte biomassabehoefte in 2050 bij gehele vervanging van fossiele grondstoffen door een mix van hernieuwbare bronnen	39
4.4	Beschikbaarheid van biomassa	42
4.5	Mobiliseren van biomassa is belangrijk	45
4.6	Biomassabehoefte versus beschikbaarheid	46
5	Verwerkingstechnologieën voor biomassa	49
5.1	Inleiding	49
5.2	Mechanische bewerking	49
5.3	Biologische conversieprocessen	50
5.4	Thermochemische conversieprocessen	56
5.5	Chemische conversieprocessen	62
5.6	Scheidingstechnieken	65
6	Nieuwe technologieën	67
6.1	Inleiding	67
6.2	Nieuwe biologische conversieprocessen	67
6.3	Nieuwe thermochemische processen	69
6.4	Nieuwe chemische conversieprocessen	70

6.5	Bioraffinage en cascades	74
6.6	Afvangen, opslaan en benutten van koolstofdioxide	74
7	Hoe de toepassing afhangt van de biomassasoort	79
7.1	Inleiding	79
7.2	Biomassa-eigenschappen in relatie tot geschikte toepassingen.....	80
7.3	Import van biomassa	85
7.4	Inzet van inheemse biomassa	85
7.5	Biomassa niet benutten is ongunstig.....	86
8	Inzet van biomassa in de verschillende toepassingen	87
8.1	Inleiding	87
8.2	Humane consumptie	87
8.3	Diervoeding	87
8.4	Energie	87
8.5	Materialen	89
8.6	Chemie	90
8.7	Compost en bodemverbetering	92
8.8	Conclusies	92
9	Referenties	95
Colofon	100

1 Inleiding

Nederland en de meeste andere landen willen het gebruik van koolstofhoudende fossiele grondstoffen zoals aardolie, steenkool en aardgas verminderen. De twee belangrijkste motivaties hiervoor zijn de klimaatproblematiek en de eindigheid van de voorraden van deze grondstoffen. Het gebruik van fossiele brandstoffen en kunststoffen die gemaakt zijn uit fossiele grondstoffen verandert het klimaat doordat na verbranding of na biologische afbraak koolstofdioxide vrijkomt dat zich ophoopt in de atmosfeer en daar het broeikas effect versterkt. Een atmosfeer met een verhoogd gehalte aan koolstofdioxide houdt de warmte beter vast en verhoogt daardoor de temperatuur van de atmosfeer, zoals een broeikas dat doet. Sinds het jaar 1750, het begin van de industriële revolutie, is de koolstofdioxideconcentratie met 48% toegenomen¹ en veel klimatologen gaan er vanuit dat dat de hoofdoorzaak is van de eveneens toegenomen temperatuur op aarde. Volgens hen zal deze temperatuursverhoging leiden tot een stijging van de zeespiegel en extremer weer (stormen, droogte, overstromingen).

Daarnaast bestaan er zorgen over het gebruik van andere grondstoffen die uit de aarde worden gewonnen zoals fosfaat, kalium en metalen. Ook hier vormen de verspreiding van het materiaal in het milieu en de eindigheid van de voorraden het probleem. Metalen worden grotendeels hergebruikt, maar kalium en fosfaat worden over het algemeen slechts eenmaal gebruikt, net zoals fossiele brandstof. Het gemeenschappelijk kenmerk is de winning van grondstof uit de aarde, gevolgd door een eenmalig gebruik en vervolgens depositie op een plaats waar het materiaal niet meer de cyclus in kan. Als dat kan worden voorgesteld als een lineaire economie dan is een circulaire economie de oplossing. Dat is een economisch en industrieel systeem waarin geen eindige grondstofvoorraden worden uitgeput en waarin reststoffen volledig opnieuw worden ingezet in het systeem. Een dergelijke economie kan mogelijk eeuwenlang worden volgehouden en is dus duurzamer dan een lineaire economie. Een volledige circulaire economie is niet mogelijk, maar een streven naar minimalisatie van het gebruik van grondstoffen met eindige voorraden en beperkingen van lozingen in het milieu wel.

Het terugdringen van de winning van fossiele grondstoffen kan op diverse manieren worden gerealiseerd, bijvoorbeeld door het gebruik van hernieuwbare grondstoffen (biomassa), het gebruik van hernieuwbare energie (zon, wind, aardwarmte) en het hergebruik van eerder gebruikte materialen. Hierdoor ontstaan gesloten kringlopen van koolstof en andere elementen, en bovendien hebben die kringlopen een korte circulatietijd. Bijvoorbeeld, hout geoogst uit een wilgenplantage kan worden gebruikt als brandstof in een elektriciteitscentrale. Door de verbranding komt koolstofdioxide vrij die geloosd wordt in de atmosfeer. Echter, in de wilgenplantage wordt binnen vier jaar eenzelfde hoeveelheid koolstofdioxide uit de atmosfeer opgenomen en vastgelegd in

hout, wachtend op de volgende oogst. Dat is een veel kortere cyclus dan de huidige koolstofcyclus verbonden aan het verbruik van fossiele brandstoffen. Het heeft tientallen miljoenen jaren geduurd om koolstofdioxide om te zetten in planten die afzonken in moerassen en vervolgens tot steenkool werden omgezet in de hoeveelheden die er nu zijn. Omgekeerd kost het de natuur ook weer tientallen miljoenen jaren om de voorraad steenkool en olie die we de afgelopen 200 jaar hebben verbruikt weer vanuit koolstofdioxide aan te vullen, mits er geschikte moerassen zijn. Het gebruik van wilgenhout voor energievoorziening is klimaatneutraal, het gebruik van steenkool is dat niet.



Figuur 1. Koolzaad is van oudsher een belangrijk oliegewas in Noord-West Europa.

Kringloopprocessen draaien pas als er continu energie in blijft gaan en deze energie moet bij voorkeur komen van de zon: biomassa, fotovoltaïsche elektriciteit en windenergie zijn verschillende gedaanten van zonne-energie. Ook aardwarmte en getijde-energie (zwaartekracht-interactie tussen aarde en maan) zijn duurzame bronnen. Kernenergie vormt een geval apart: dat levert weliswaar geen netto koolstofdioxide-emissie, maar afhankelijk van de gebruikte grondstof wel een uitputting van voorraden en in potentie gevaarlijke reststromen. Een ander voorbeeld van vermindering van koolstofdioxide-emissie, maar niet van voorraauditputting, is de kunstmatige opslag van koolstofdioxide in de bodem. Deze kan worden gezien als een tijdelijk hulpmiddel om klimaatverandering tegen te gaan. De uitstoot van koolstofdioxide in de atmosfeer wordt er mee voorkomen, maar als deze koolstofdioxide

wordt geproduceerd uit fossiele bronnen dan wordt de uitputting daarvan niet voorkomen.

De transitie van een lineaire naar een circulaire economie vraagt om een maatschappelijke transitie gepaard gaande met innovaties op wetenschappelijk/technologisch, sociaaleconomisch en institutioneel gebied. In het huidige beleid is die ambitie wel te herkennen, maar vanwege de grootte van de uitdaging en de vele gevestigde belangen die er spelen is het een zeer complex proces.

Bij het realiseren van de circulaire economie is biomassa onontbeerlijk. Het kan als grondstof dienen voor de productie van energie, transportbrandstoffen, chemicaliën, materialen, veevoer en voeding. De bio-economie is een economie waarbij plantaardig materiaal zoals gewassen en reststromen uit de landbouw en voedingsmiddelenindustrie wordt ingezet voor voedsel én niet-voedsel toepassingen. Daarnaast wordt in de bio-economie ook hout en materiaal afkomstig van andere levensvormen (dieren, micro-organismen) ingezet. Deze bio-economie was er al voor het jaar 1750 en is ook nooit weggeweest. Denk maar aan leer, zijde, katoen, lijnolie, jute, wol en lijmen en het gebruik van hout als energiebron, bouw materiaal en grondstof voor papierproductie. Echter, de verscheidenheid van de producten en de hoeveelheid energie die we nu gebruiken als gevolg van het benutten van aardolie, steenkool en aardgas is enorm toegenomen. Als we vanuit dat nieuwe uitgangspunt een transitie willen maken naar een bio-economie 2.0 vraagt dat alleen al een grote slag wat betreft het organiseren van de benodigde kwantiteiten aan duurzame biomassa. Daarnaast vergt het een grote inspanning om economisch haalbare omzettingen te realiseren in een zeer brede waaier aan producten.

Technologisch is er veel mogelijk. Voortdurend worden er nieuwe biobased producten en bijbehorende productieprocessen ontwikkeld en in de markt geïntroduceerd. Deze ontwikkeling en implementatie zijn het gevolg van de gezamenlijke inzet van bedrijven, overheden en kennisinstellingen. Echter, er bestaat ook een maatschappelijke en economische realiteit. Biobased energie, chemicaliën en materialen zijn vaak duurder dan het fossiele alternatief en het ontwikkelen van een kosten-efficiëntere productie kost de nodige inspanning (en dus ook weer geld). Daarnaast vergt het wat van de consument om energie en producten te gebruiken die anders zijn. Aldus tekent zich een spanning af tussen de natuurwetenschappelijke/technologische realiteit en de sociaaleconomische realiteit. Dit boekje beoogt enig zicht te geven op de mogelijkheden vanuit die eerste realiteit. Het is onze visie die gebruik maakt van de ervaringen en bevindingen uit dertig jaar werken aan de bio-economie.

2 Biomassa

2.1 Wat is biomassa?

Biomassa is de substantie waaruit levende en dode organismen bestaan. De soort organismen beperkt zich niet tot planten; ook dieren en lagere levensvormen (micro-organismen) bestaan uit biomassa.

In het kader van een benutting van biomassa in de bio-economie is het belangrijk om te weten uit welke stoffen biomassa bestaat. De beschikbare biomassa op aarde bestaat grotendeels uit plantaardig materiaal en de componenten die daarin zijn te vinden staan in Tabel 1.

Tabel 1. Belangrijkste bestanddelen van planten en hun functie.

Bestanddeel	Functie
Koolhydraten: <ul style="list-style-type: none"> · Cellulose · Hemicellulose · Pectine · Hydrocolloïden 	Onderdeel van celwanden (stevigheid en compartimentering)
<ul style="list-style-type: none"> · Zetmeel · Sucrose 	Reservestoffen
Lignine, kurk	Onderdeel van celwanden
Eiwit	Biokatalysatoren (enzymen), reservestof
Vet, olie	Reservestoffen
Hoogwaardige inhoudsstoffen: <ul style="list-style-type: none"> · Kleurstoffen · Vitaminen · Terpenen · Alkaloiden · Fenolen · Geur/smaakstoffen 	Antioxidanten, beschermingsmiddelen, cofactoren van enzymen, goede of juist slechte smaak
Mineralen	Osmotische druk van cellen, stevigheid, cofactoren van enzymen
Water	Reactiemilieu, transportmiddel en stevigheid

De verhouding tussen de componenten genoemd in Tabel 1 verschilt per plantencategorie. Het hout van bomen en stengels van ouder gras bestaat vooral uit lignocellulose, een stevig complex van cellulose, hemicellulose en lignine. Groene delen zoals loof en jong gras bevatten relatief veel eiwit en weinig lignine. Ondergrondse delen

zoals knollen, bollen en wortels bevatten veel zetmeel en suiker, de reserves voor het volgende groeiseizoen. Zaden bevatten veel reservestoffen zoals zetmeel (graan, rijst) en olie (noten) omdat deze stoffen de energie en bouwmaterialen moeten leveren bij de vorming van een kiemplantje. Wieren bevatten bijzondere koolhydraten voor de celwand en als reservestof (alginaat, carrageen, agar, mannitol), en microalgen zijn weer veel rijker aan olie. Zeewieren en planten die in een zoute omgeving groeien bevatten veel mineralen. Grassen en bepaalde soorten wieren bevatten vaak het mineraal kiezelzuur dat zorgt voor stevigheid. Planten kunnen vrata voorkomen door inzetten van stoffen die giftig zijn of een onaangename smaak of geur hebben. Vruchten moeten juist wel gegeten worden en bevatten inhoudsstoffen met een prettigere sensatie.



Figuur 2. Bruin zeewier (Ascophyllum nodosum), ook wel knotswier genoemd (foto: Paulien Harmsen).

De organische stoffen genoemd in Tabel 1 (dus alles behalve water en mineralen) bevatten allemaal energie. Bij verbranding tot koolstofdioxide en water komt deze energie als warmte vrij. Om daarvan een indruk te geven: met de energie die vrijkomt uit de verbranding van een kilogram zetmeel of een kilogram cellulose kan 47 liter water aan de kook worden gebracht. Een kilogram zetmeel kan bovendien een mens twee dagen van energie voorzien.

2.2 Producten uit biomassa

Hoewel de indeling van biomassasoorten in principe de taxonomische route zou kunnen volgen (indeling van het planten- en dierenrijk) gebruiken we in dit boekje een indeling waarin het gebruik van biomassa binnen het door mensen ontwikkeld productiesysteem centraal staat. We volgen de verwaardingsroute: van verse plant tot restproducten na gebruik door consumenten. Een dergelijke indeling van biomassa die relevant is/wordt in de Nederlandse bio-economie wordt gepresenteerd in Tabel 2. De biomassa levert, naast het hoofdproduct, diverse bijproducten op die meestal goed te gebruiken zijn in de bio-economie. Tabel 3 geeft een indruk van de kwantitatieve verdeling van deze hoofd- en bijproducten.

Tabel 2. Indeling biomassasoorten met specificatie van huidige producten en bijproducten.

Soort biomassa	Primaire producten	Belangrijke secundaire producten (primaire en secundaire reststromen)
Bomen uit bosbouw	Hout, kurk, hars, latex	Loof, zaagsel, schors
Planten, bomen en gras uit landschapsbeheer	Hout, waterplanten, bermgras	Snoeiafval
Gewassen		
· Graan	Graankorrel, zetmeel	Stro, zemelen, kaf
· Oliehoudende gewassen	Bonen, noten, olie	Eiwitrijk schroot, snoeiafval (hout)
· Suikerbieten	Suiker	Suikerbietenpulp, melasse, bietenpunten, bietenblad
· Aardappelen	Aardappel, zetmeel	Aardappelpulp
· Oliepalm	Palmolie	Diversiteit aan grote hoeveelheden reststromen
· Groenten en fruit	Groenten en fruit	Stengels, loof, GF-resten
· Weidegras	Gras, hooi	
Microalgen, zeewieren	Olie, eiwit, hydrocolloïden	Celwandresiduen
Reststromen na gebruik door consument en dier (tertiaire reststromen)	GFT, oud papier, mest, afgewerkt vet, afgewerkte frituurolie, swill, afgedankt textiel en rioolwaterzuiveringslib	

Tabel 3. Kwantitatieve verdeling over producten en bijproducten van belangrijke biomassa-bronnen.

Soort biomassa	Hoofdproduct met massa-aandeel (droge stof)	Bijproduct met massa-aandeel (droge stof)
Suikerbiet ²	Biet 77%	Loof 23%
Wintertarwe ²	Graankorrel 55%	Stro 45%
Consumptieaardappel ²	Aardappel 76%	Loof 24%
Sojaboon ³	Olie 20%	Schroot 71% Hullen 6% Verlies 3%
Boom ^{4,5}	Rondhout 70%	Schors, loof, twijgen 30%

De grote diversiteit aan toepassingen is mooi te zien bij het benutten van bomen. Een boom bestaat (op drogestofbasis) ongeveer 75% uit stam, takken en schors, 20% uit wortel en 5% uit bladeren/naalden.⁴ De stam en takken leveren het rondhout, de bruikbare fractie (zonder schors). De schors neemt meestal tussen 10% en 20% van het (nat)gewicht van stam en takken in.⁶ In Canada wordt na het omzagen van een boom 70% gebruikt als rondhout. Rondhout is geveld stamhout met of zonder schors,



Figuur 3. Van rondhout worden diverse producten gemaakt.

ontdaan van zijtakken en tophout. Schorssnippers worden gebruikt in tuinen en in landschapsbeheer, terwijl zijtakken en tophout worden gebruikt als brandstof in energiecentrales. Als de takken afkomstig zijn van bomen die op arme gronden staan worden deze takken ook wel in het bos gelaten om de bodem te voorzien in mineralen. Het rondhout heeft de volgende bestemmingen:⁵

- 29% gezaagd hout
- 42% papier en pulp
- 14% platen
- 8% brandstof in elektriciteitscentrales (geen pellets)
- 3% brandstof in de vorm van houtpellets
- 4% andere producten

2.3 Productie van biomassa

Omdat planten zonlicht moeten absorberen voor hun energievoorziening nemen planten ruimte in en in essentie land- of wateroppervlak. Hoewel dat een algemeen principe is, blijken verschillende plantensoorten de aangeboden energie met een verschillend rendement aan te wenden voor de productie van biomassa. Die productie kan variëren van enkele tot tientallen ton biomassa droge stof per hectare per jaar (Tabel 4).

Tabel 4. Opbrengsten van belangrijke gewassen en bos per hectare per jaar in Nederland.

Biomassasoort	Opbrengst (ton droge stof/ha.jaar)
Suikerbiet ²	15,7
Wintertarwe ²	7,4
Snijmais ²	14,4
Weidegras ²	11,5
Consumptieaardappel (klei) ²	9,6
Productiebos daadwerkelijke oogst ^{7,8}	1,8

2.4 Nieuwe biomassabronnen

Zeewier

Zeewier is een snelgroeiend gewas dat groeit in zee. Er zijn drie hoofdgroepen te onderscheiden gebaseerd op de aanwezigheid van pigmenten (bruin, rood en groen) maar ook binnen deze hoofdgroepen zijn veel verschillende soorten te onderscheiden.

Welke soort waar groeit is afhankelijk van de locatie en parameters zoals temperatuur, licht, saliniteit en nutriënten. Zeewier is in staat tot bioremediatie, het kan water zuiveren door opname van nutriënten en zware metalen. De combinatie van zeewierteelt met aquacultuur (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture*, IMTA) is veelbelovend maar ook zeewierteelt voor het vastleggen van fosfaat is mogelijk interessant. Kwaliteit van het water (inclusief verontreinigingen) bepaalt dus in grote mate de toepasbaarheid van het wier.

De huidige beschikbaarheid wereldwijd is ongeveer 30 Mton natte biomassa, en de huidige industrie is met name gebaseerd op gecultiveerd zeewier uit Azië (voornamelijk China). Ook wordt op kleine schaal wild geplukt zeewier verwerkt of aangespoeld zeewier. Er zijn momenteel veel nieuwe activiteiten voor het opzetten van zeewierboerderijen in Europa (Noorwegen, Ierland, Schotland, Denemarken, Nederland, België) om de zeewierproductie te vergroten. Er is gebrek aan zeewier en het meeste wier wordt uit Azië gehaald. Onderzoeksvragen zijn de opbrengst/ha, hoe te oogsten en het direct te verwerken tot stabiel tussenproduct.

Wat samenstelling betreft is zeewier rijk aan koolhydraten, mineralen, zouten, en minder rijk aan eiwit. De samenstelling varieert zeer sterk per soort maar ook per seizoen. Zeewier is een interessante biomassa gezien de samenstelling. In zeewier zitten namelijk stoffen met bijzondere eigenschappen (waaronder hydrocolloïden) die je niet vindt in landplanten. Huidige toepassingen van zeewier zijn als voedsel, als grondstof voor de hydrocolloïdindustrie (alginaat, carrageen, agar) voor toepassingen in food, personal care, technische toepassingen, als supplement voor voeding en veevoer en als fertilizer of plantverbeteraar.

Microalgen

De kweek van microalgen kan een belangrijke bijdrage leveren aan het verduurzamen van de samenleving. Microalgen zijn niet alleen in te zetten voor de milieuvriendelijke productie van talloze grondstoffen, maar ook als afvalverwerkers. Ze groeien namelijk uitstekend op afvalstromen, zoals bijvoorbeeld koolstofdioxide uit rookgassen, restwater van agro-industriële bedrijven en zelfs verdunde mest. Hierbij zetten ze afval om in bruikbare grondstoffen. Microalgen recyclen zo de voedingsstoffen die anders weg zouden spoelen, en sluiten zo de nutriëntenkringloop met schoner water als bonus.

De algencel bevat zoveel nuttige stoffen dat ze steeds vaker speciaal voor dat doel gekweekt worden. Veel algensoorten kunnen een fors percentage hoogwaardige oliën bevatten, deels bestaand uit omega-3 en omega-6 vetzuren, die als grondstof voor voedingssupplementen kunnen dienen. De beroemde omega-3 vetzuren in vis komen oorspronkelijk uit microalgen. Nu zijn er talloze landbouwgewassen die olie of zetmeelachtige stoffen bevatten waaruit onder andere brandstof kan worden gemaakt.

Wat algen bijzonder maakt is dat ze naast grondstof voor energie een grote verscheidenheid aan andere nuttige componenten bevatten. De laatste jaren zijn er meer dan 15.000 nieuwe chemische verbindingen in algen ontdekt. Naast vetzuren kunnen de algencellen ook carotenen (pigmenten variërend van geel tot rood) en andere kleurstoffen, antioxidanten, eiwitten en zetmeel bevatten. Deze componenten zijn door de chemische- en levensmiddelenindustrie als grondstof te gebruiken voor tal van producten. De lijst met uit algen gemaakte producten groeit dan ook gestaag. Naast hoogwaardige algenproducten voor nichemarkten, zoals algenpoeder voor de voedingssupplementenindustrie en algenextracten voor de bestrijding van schimmel in golfvelden, komt er ook steeds meer belangstelling voor bulkproducten, zoals grondstoffen voor bioplastics, biobrandstoffen, maar ook algeneiwit voor voedseltoepassingen.⁹



Figuur 4. Aan algenteelt wordt veel onderzoek gedaan, onder andere in Wageningen.

3 De huidige inzet van biomassa

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoeveel biomassa in Nederland wordt gebruikt, voor welke toepassingen en hoe deze hoeveelheid zich verhoudt tot de inzet van fossiele grondstoffen.

3.2 Gebruik van energiedragers in Nederland

Fossiele grondstoffen worden voornamelijk ingezet voor chemie, energie en transportbrandstoffen, terwijl biomassa vooral wordt gebruikt als diervoeding en voor humane voeding. Energie is dominant als het gaat om het gebruik van grondstoffen. De hoeveelheid fossiele energiedragers in Nederland in 2017 bedroeg 2.864 PJ (Tabel 5). Het aandeel hernieuwbare energie binnen alle energiedragers die in Nederland gebruikt worden neemt elk jaar toe.¹⁰ In 2017 was 5,8% hernieuwbaar (182 PJ), waarvan 68% uit biomassa kwam (124 PJ).¹⁰ De andere 32% (58 PJ) werd geleverd door o.a. windenergie en zonne-energie. Deze 5,8% is relatief laag t.o.v. andere Europese landen en de Nederlandse doelstelling om in 2020 14% te halen lijkt nog ver weg. Het percentage hernieuwbare energie is nog zo laag vanwege:

- Beperkte beschikbaarheid van betaalbare hernieuwbare energiebronnen
- De tijd en moeite die de transitie kost
- Belangen van de olie- en gasbedrijven in Nederland^{11,12}
- Nederlandse regelgeving en procedures

Fossiele grondstoffen in Nederland

Nederland is vooral een doorvoer/raffinage-land voor fossiele grondstoffen. De doorvoer is zelfs ongeveer drie maal zo groot als het eigen gebruik. In dit eigen gebruik wordt een derde gedeelte gereserveerd voor de elektriciteitsproductie. Het resterende twee-derde gedeelte van de fossiele grondstoffen wordt gebruikt o.a. voor de productie van transportbrandstoffen, als huisbrandstof en voor de chemie. De belangrijkste brandstoffen voor elektriciteitsproductie in Nederland in 2016¹⁰ waren:

- 14,3 miljard m³ aardgas (454 PJ)
- 12.084 kton steenkool (305 PJ)

Tabel 5. Verbruik van energiedragers in Nederland, voor eigen gebruik, niet voor de handel, in 2017.^{10,13}

Type energiedrager	PJ	%	kton
Aardgas	1.294	41%	34.000
Aardoliegrondstoffen en –producten	1.187	38%	27.400
Steenkool en andere koolproducten	383	12%	15.100
Hernieuwbare energie (waaronder biomassa, wind, zon)	182	6%	
Andere (waaronder kernenergie)	91	3%	
TOTAAL	3.137	100%	76.500

Petajoules en kiloton

Als het om grote hoeveelheden energie gaat ligt een uitdrukking in petajoule (PJ ofwel 10^{15} J) voor de hand. Om een indruk te krijgen van een PJ: het is de hoeveelheid elektrische energie die de Hemweg-8 centrale in Amsterdam produceert in drie weken.

Fossiele grondstoffen en biomassa bevatten energie. In onderstaande tabel staat hoeveel. De netto verbrandingswarmte (calorische waarde) is de energie die vrijkomt na verbranding tot koolstofdioxide en stoom. De bruto verbrandingswarmte is de netto verbrandingswarmte plus de extra warmte die wordt gewonnen door het condenseren van de stoom.

Brandstof	Netto calorische waarde (MJ/kg)	Bruto calorische waarde (MJ/kg)
Aardgas ¹⁴	38,1	42,1
Ruwe aardolie ¹⁵	43,4	45,7
Steenkool ¹⁵	25,3	26,7
Houtpellets (spar) ¹⁶	17,2	18,7

Uit aardgas kan dus meer energie worden gegenereerd per kilo koolstof dan uit steenkool, en daarom stoot een gasgestookte elektriciteitscentrale minder koolstofdioxide uit dan een kolencentrale.

3.3 Nederlands gebruik, invoer en uitvoer van biomassa voor energetische toepassingen

In 2017 namen afvalverbrandingsinstallaties en ketels bij bedrijven een groot aandeel in van de biomassa-gebaseerde energievoorziening. De verschillende toepassingen van deze soorten energie worden gepresenteerd in Tabel 6. In deze tabel wordt het primair verbruik weergegeven: de eerst meetbare vorm van energie van de biomassa, dus de petajoules die in biodiesel, biobenzine, biogas en hout voor de haard zitten en de energie die in het biogene (organische) deel van afval en de biomassa voor ketels en centrales zit. De hoeveelheden petajoules die in de geproduceerde elektriciteit en bruikbare warmte zijn besloten (niet weergegeven) zijn overigens lager dan die in de biomassa, omdat ketels en centrales een bepaald rendement hebben. Deze rendementen hangen ook af van de brandstof en de gebruikte technologie. Zo is bijvoorbeeld het rendement van de productie van elektriciteit en bruikbare warmte uit biogas in een installatie voor warmte-kracht-koppeling hoger dan dat van een elektriciteitscentrale die steenkool gebruikt.

Tabel 6. Inzet (primair verbruik) van biomassa als energiebron in verschillende toepassingen in Nederland in 2017.¹⁰

Toepassing	PJ	Onderverdeling	PJ
Afvalverbrandingsinstallaties	41,9		
Biomassaketels bedrijven	26,8	Voor elektriciteit Alleen voor warmte	16,7 10,1
Huishoudens	19,5	Openhaarden Inzethaarden Vrijstaand Houtskool	2,5 2,8 13,9 0,3
Vloeibare transportbrandstoffen	13,7	Biobenzine* Biodiesel	5,4 8,3
Biogas	13,4	Uit stortplaatsen Rioolwaterzuiveringsinstallaties Co-vergisting mest Overig	0,6 2,4 4,8 5,6
Bij- en meestoken in centrales	4,9**		

* Bioethanol, vrij of ingebouwd in ETBE (een antiklop middel).

** In 2017 werd slechts weinig biomassa bijgestookt in elektriciteitscentrales, door een beperkte SDE. Daarom was ook de invoer van houtpellets relatief laag (zie tabel 7).

De soorten biomassa(producten) en organische reststromen die voor de energievoorziening worden gebruikt staan in Tabel 7. De biomassa die in Nederland wordt gebruikt voor energieopwekking komt deels uit eigen land en deels uit het buitenland en Nederland is zelfs een exportland als het gaat om biomassa voor energietoepassingen.

Tabel 7. Invoer, winning, uitvoer en verbruik van energiedragers uit biomassa en organische reststromen in Nederland in 2017.¹⁰

Energiedrager	NL in (PJ)			NL uit (PJ)		
	Invoer	Winning	Totaal	Uitvoer	Verbruik	Totaal
Biogas	0	14	14	0	13	13
Vaste en vloeibare biomassa(producten) (bijvoorbeeld houtpellets en bioethanol)	13	128	141	68	68	136
Biogene fractie huishoudelijk afval (wat verbrand wordt in de AVI)	11	33	44	1	42	43
Totaal	24	175	199	69	123	192

De balans sluit niet helemaal wegens mutaties in voorraden en statistische effecten.

3.4 Nederlandse invoer en uitvoer van biomassa

Nederland is een klein land met een hoge bevolkingsdichtheid en ook een hoge dichtheid aan vee. Bovendien ligt het aan zee en aan de monding van grote rivieren. Dit heeft Nederland gemaakt tot een land met een grote import en export van goederen. Dat geldt ook voor biomassa. In Tabel 8 staat een overzicht van deze invoer en uitvoer van biomassa. Hieruit blijkt dat 71% van de ingevoerde biomassaproducten uit Europa komt en dat 83% van de uitgevoerde biomassaproducten een Europese bestemming heeft. De uitvoer betreft veel meer de producten en halffabricaten dan de oorspronkelijke biomassa.

De uit de gegevens geschatte biomassaconsumptie in Nederland is 43.000 kton droge stof per jaar (= 50.000-32.000+25.000) en dat is veel meer dan de hoeveelheid die in Nederland zelf geproduceerd wordt (25.000 kton droge stof). De import overstijgt de eigen productie. De enorme import dient ter aanvulling van de eigen behoefte en voor

Tabel 8. Nederlandse invoer en uitvoer van biomassa(producten) van/naar Europa en de wereld in 2016 (CBS).¹⁰

Biomassa	Wereld (kton nat)	Europa (kton nat)	Nederland (kton nat)
Invoer door Nederland			
Ruwe biomassa	31.585	20.752	
Halffabricaat	15.989	13.756	
Eindproduct	31.170	21.066	
Totaal	78.744	55.574 (71%)	
<i>Schatting totaal droge stof (kton)*</i>	<i>50.000</i>		
Uitvoer door Nederland			
Ruwe biomassa	22.599	20.730	
Halffabricaat	16.173	11.517	
Eindproduct	33.057	27.274	
Totaal	71.829	59.521 (83%)	
<i>Schatting totaal droge stof (kton)*</i>	<i>32.000</i>		
Productie in Nederland			
Totaal biomassa(producten)**			41.141
<i>Schatting totaal droge stof (kton)*</i>			<i>25.000</i>

* CBS stelt het droge stofgehalte van veevoedergewassen op 85%.

** Alleen primaire biomassa, geen vlees, beperkt aantal residuen.

de export. Deze sterke verwevenheid met de internationale handel is karakteristiek voor de Nederlandse agro- en bio-economie.

Een verdere onderverdeling van Tabel 8 wordt gegeven in Tabel 9 en Figuur 5. In 2015 kwam 60% van de waarde (euro) van de geïmporteerde landbouwgoederen uit de EU.¹⁷ Specifiek voor graan was dat ongeveer 50% en voor oliehoudende zaden ongeveer 30%. Voor soja is het Europese aandeel in de import veel kleiner. Volgens CBS Achtergrondrapport Sojabarometer¹⁹ was dat in 2011 4% (tonnage). De meeste soja wordt ingevoerd uit Noord- en Zuid-Amerika. Alle palmolie kwam in 2017 van buiten Europa. De in Nederland geïmporteerde palmolie is voor het overgrote deel afkomstig uit zes landen: Indonesië (31%), Maleisië (20%), Papoea-Nieuw-Guinea (14%), Colombia (10%), Honduras en Guatemala (beide 9%).²⁰ Sommige landbouwgoederen worden juist vooral uit Europa betrokken. Een voorbeeld daarvan is fruit, wat betreft waarde de grootste post binnen de categorie importlandbouwgoederen. Deze geïmporteerde goederen kwamen in 2015 voor ruim 80% (waarde) uit Europa.¹⁷

Ook hout en afgeleide producten worden vooral uit Europa ingevoerd: in 2014 kwam 76% (tonnage) van de hout(producten)import uit Europa.²¹ Dit betrof vooral papier, pulp, gezaagd naaldhout en spaanplaat. Noord-Amerika verzorgt 8% van onze houtimport (2014).²² De helft van deze 8% bestond uit houtpellets.

In 2013 en 2014 werden nog 570 kton en 167 kton houtpellets (droge stof) geïmporteerd.¹⁰ Door het wegvallen van de subsidie voor mee- en bijstook zijn er in 2015-2017 nagenoeg geen houtpellets geïmporteerd. Nederland importeert vooral de biomassa(producten) van buiten Europa die Europa zelf niet heeft of kan produceren.

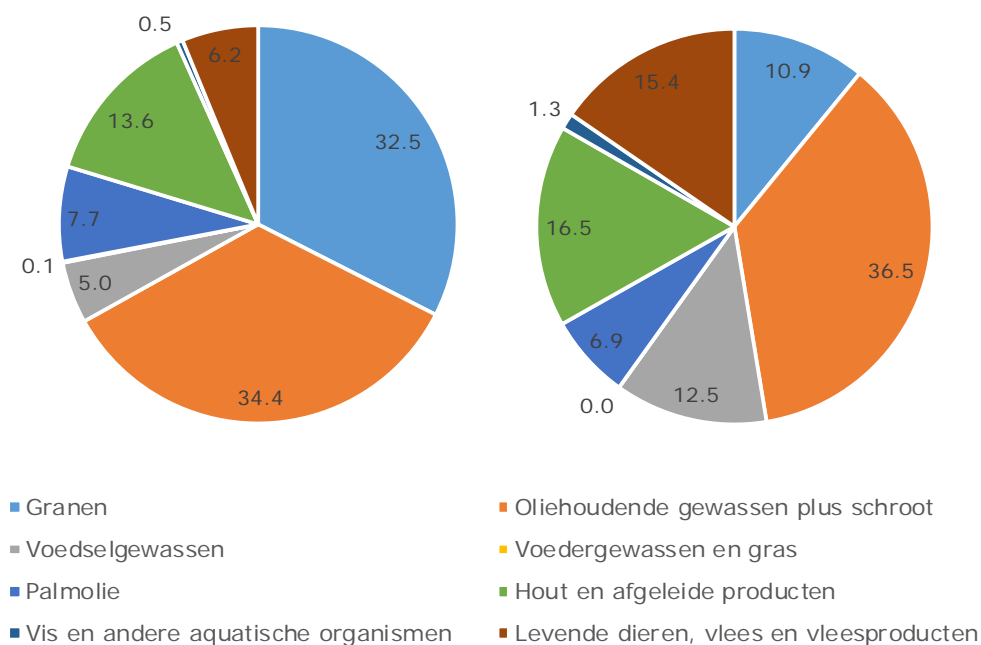
Tabel 9. Nederlandse invoer en uitvoer van de belangrijkste categorieën biomassa(producten),^{3,17} zie ook Figuur 5.

Biomassa(producten)	Invoer (kton droge stof/jaar)	%	Uitvoer (kton droge stof/jaar)	%	Δ (kton)
Granen	12.174	32,5	2.222	10,9	9.952
Oliehoudende gewassen plus schroot	12.914	34,4	7.429	36,5	5.485
Voedselgewassen (groente, fruit, etc.)	1.877	5,0	2.541	12,5	-664
Voedergewassen en gras	33	0,1	4	0,0	29
Palmolie	2.880	7,7	Ca 1.400	6,9	1.480
Hout en afgeleide producten	5.090	13,6	3.353	16,5	1.737
Vis en andere aquatische organismen	196	0,5	268	1,3	-72
Levende dieren, vlees en vleesproducten	2.323	6,2	3.129	15,4	-806
TOTAAL	37.487	100	20.346	100	17.141

3.5 Bestemmingen van biomassa in Nederland

In Nederland wordt biomassa vooral ingezet als veevoer. Daarnaast wordt biomassa ingezet voor de energievoorziening, in humane voeding, materialen (papier, kunststoffen, houtproducten) en chemie. Organische reststromen zoals oud papier, GFT en mest worden nu ingezet voor de productie van papier en bodemverbeteraar (compost). In Figuur 6 wordt een matrix gepresenteerd met de belangrijkste stromen van inheemse biomassa en organische residuen en hun toepassing in Nederland. In Figuur 7 worden daaraan de import en export toegevoegd.

Er wordt nu jaarlijks ongeveer 25.000 kton (droge stof) biomassa in Nederland geoogst. De grootste stroom betreft gras (11.530 kton), dat bijna geheel als diervoeding wordt ingezet. De tweede stroom is granen en snijmais, samen goed voor 5.510 kton droge



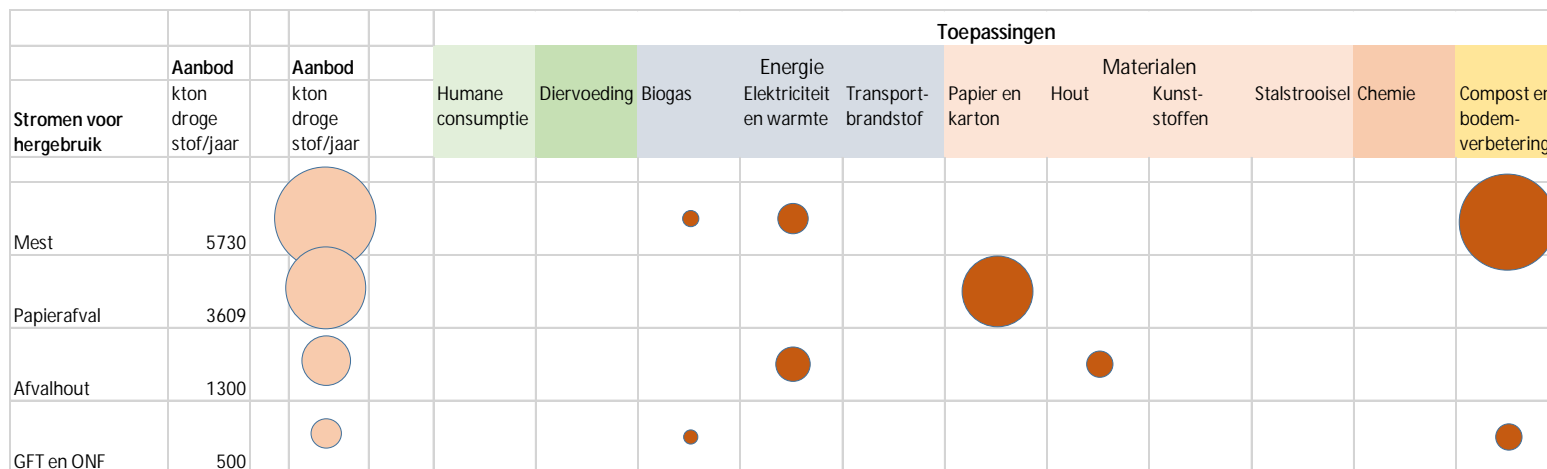
Figuur 5. Invoer (links) en uitvoer (rechts) van biomassa stromen naar en van Nederland.

stof per jaar, waarvan 4.200 kton wordt gebruikt in diervoeding en 1.200 kton voor de productie van bioethanol.^{23,24}

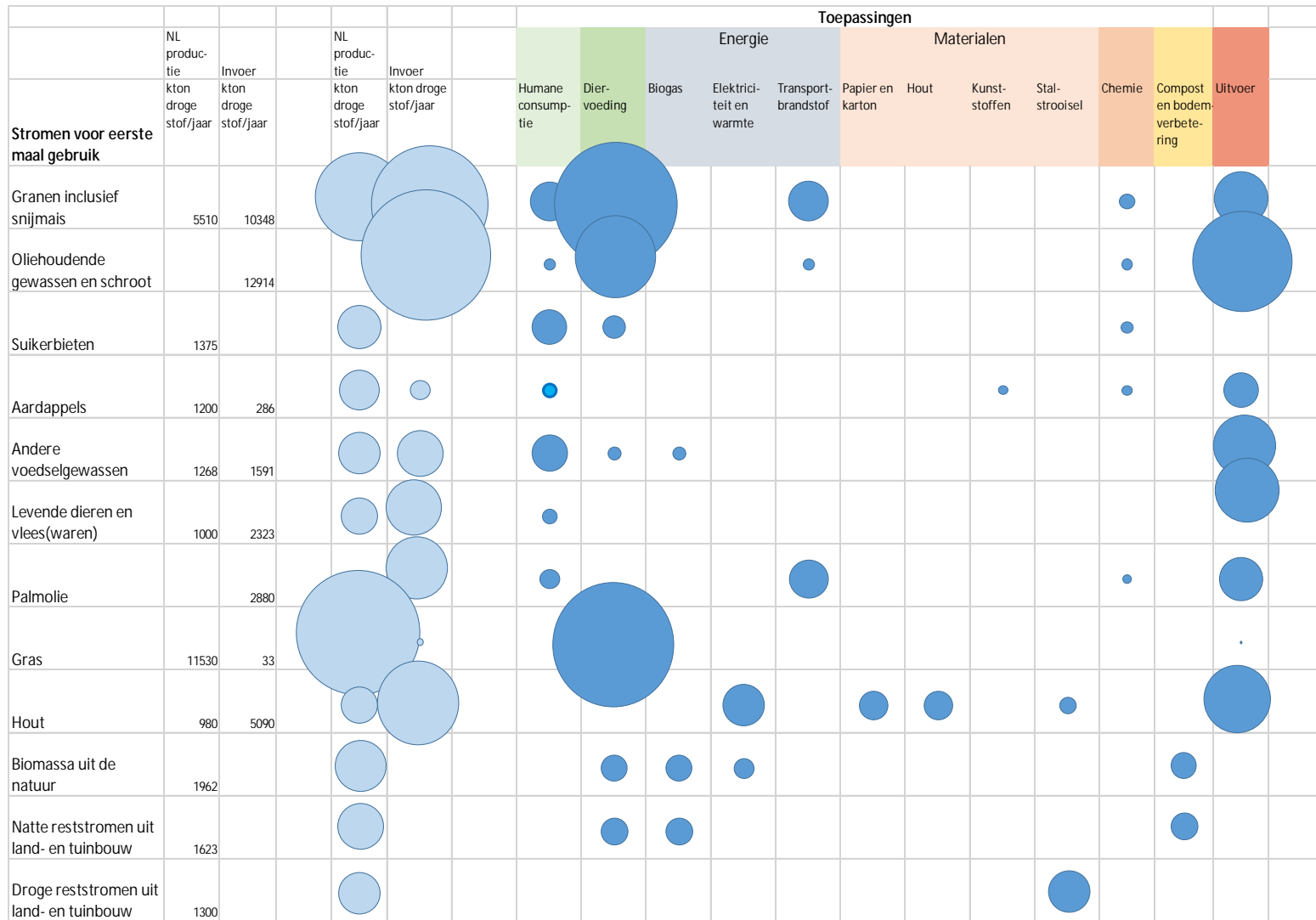
Na gebruik ontstaan organische reststromen, bijvoorbeeld mest (5.730 kton droge stof per jaar) dat grotendeels als bodemverbeteraar wordt gebruikt en een paar procent als grondstof voor biogasproductie.¹⁰ De jaarlijkse 3.609 kton papierafval (droge stof) wordt grotendeels gebruikt om karton van te maken.²⁵

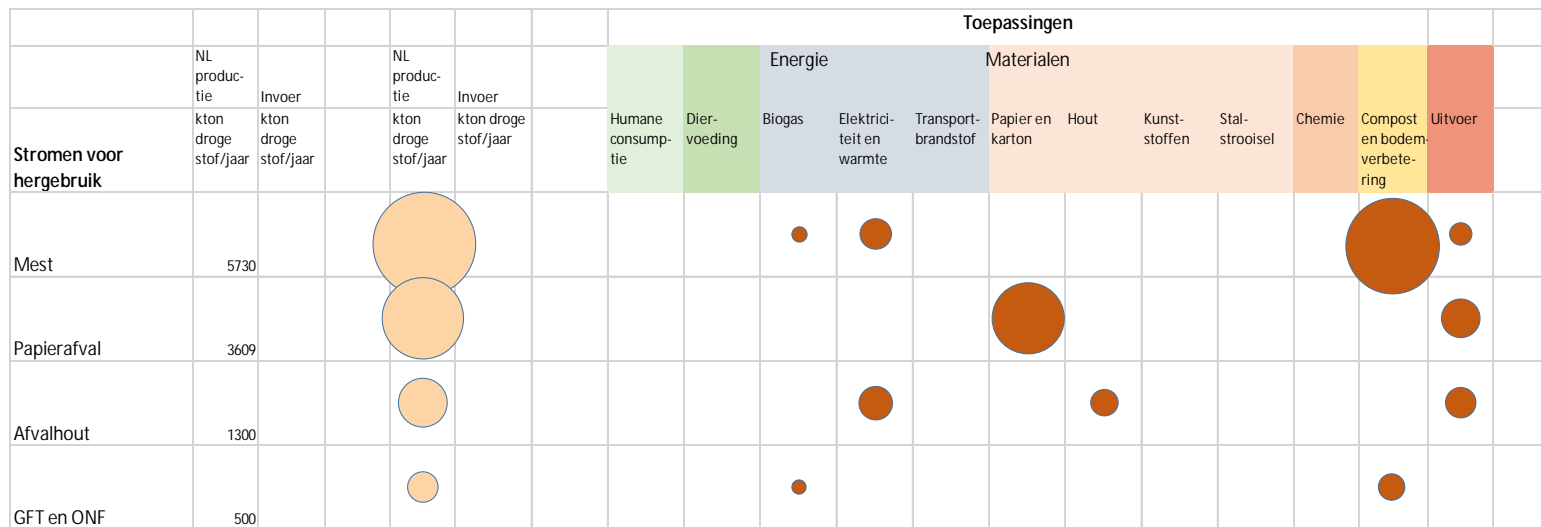
In Figuur 7 worden de belangrijkste biomassa-stromen, zowel invoer, uitvoer als eigen productie, weergegeven. De figuur geeft ook de belangrijkste toepassingen van die stromen weer. De invoer van biomassa (drooggewicht) in Nederland was in 2016 50.000 kton (zie Tabel 8). De ingevoerde biomassa die in Figuur 7 wordt genoemd vertegenwoordigt 35.500 kton droge stof. 29% van de biomassa-invoer (14.500 kton droge stof) is nog niet benoemd. Daarin zitten o.a. verwerkte voedingsmiddelen, zuivel, huishoudelijk afval, siergewassen, textiel (enkele honderden kton), leder(waren) en cacao. Naast een bestemming als veevoer is export de tweede belangrijkste bestemming van biomassa. Deze export is gedeeltelijk doorvoer en betreft voor een ander deel in Nederland geproduceerde producten.

Stromen voor eerste maal gebruik	Aanbod kton droge stof/jaar	Aanbod kton droge stof/jaar	Toepassingen												
			Humane consumptie	Diervoeding	Biogas	Energie Elektriciteit en warmte	Transport- brandstof	Papier en karton	Hout	Materialen Kunst- stoffen	Stalstrooisel	Chemie	Compost en bodem- verbetering		
Granen inclusief snijmais	5510														
Suikerbieten	1375														
Aardappels	1200														
Gras	11530														
Hout	980														
Biomassa uit de natuur	1962														
Natte reststromen uit land- en tuinbouw	1623														
Droge reststromen uit land- en tuinbouw	1300														



Figuur 6. De belangrijkste biomassa-stromen die in eigen land worden geproduceerd en de belangrijkste toepassingen van die stromen.^{17,18} De genoemde stromen staan aan de linkerkant met vermelding van het jaarlijkse tonnage droge stof. In de matrix staat het gebruik in Nederland. De oppervlakte van de schijven correleert met de tonnage. Als gevolg van dit gebruik worden reststromen geproduceerd: deze staan linksonder. Deze stromen krijgen een nieuwe toepassing in één van de categorieën in de matrix.





Figuur 7. De belangrijkste biomassa-stromen die worden ingevoerd en uitgevoerd en in eigen land worden geproduceerd en de belangrijkste toepassingen van die stromen.¹⁷ De genoemde stromen staan aan de linkerkant met vermelding van het jaarlijkse tonnage droge stof. In de matrix staat het gebruik in Nederland plus de export. De oppervlakte van de schijven correleert met de tonnage. Als gevolg van dit gebruik worden reststromen geproduceerd: deze staan linksonder. Deze stromen krijgen een nieuwe toepassing in één van de categorieën in de matrix.



Figuur 8. Nederland is een belangrijk doorvoerland, ook voor biomassa.

In Figuur 6 staat de binnenlandse productie van de verschillende soorten biomassa en waarvoor ze worden gebruikt. Uit deze figuur kan de omvang van de Nederlandse bio-economie worden geschat. Het aandeel van biomassa in de toepassingen energie, chemie, papier en kunststoffen, zonder exportproducten, maar wel inclusief grondstoffen uit binnen- en buitenland, was in 2016 ruim 10.000 kton droge stof/jaar. Wanneer we ook voeding en veevoer betrekken in de schatting wordt dit getal veel hoger. Dus, wat is dan de totale biomassaconsumptie in Nederland? Met de (geaggregeerde) gegevens van Tabel 8 hadden we al geschat dat de totale jaarlijkse consumptie van biomassa(producten) 43.000 kton droge stof per jaar bedroeg. Uit de onderliggende getallen in Figuur 6 (niet zichtbaar) is ook te schatten wat deze consumptie is, inclusief veevoer en humane voeding, maar zonder recyclestromen en uitvoer. We komen dan eveneens op 43.000 kton droge stof per jaar. Van deze 43.000 kton is ongeveer 30.000 kton veevoer, en ruim 3.000 kton humane voeding.

3.6 Conclusies

De totale jaarlijkse consumptie van biomassa(producten), inclusief voeding en veevoer, maar zonder recyclestromen, bedraagt ongeveer 43.000 kton droge stof. Hiervan wordt 30.000 kton gebruikt voor veevoer en 3.000 kton voor humane voeding. De omvang van de Nederlandse bio-economie (energie, kunststoffen, papier en chemie) bedraagt ongeveer 10.000 kton biomassa droge stof per jaar.

Ter vergelijking: Nederland gebruikt jaarlijks ongeveer 76.500 kton fossiele koolstofhoudende bronnen, vooral voor de energievoorziening. De doorvoer van deze fossiele bronnen is zelfs driemaal zo groot. De Nederlandse koolstof-economie draait dus vooral om fossiele bronnen, veevoer en doorvoer. De nieuwe bio-economie, dus met name de toepassingen van biomassa in energie, chemie en kunststoffen, is vooralsnog klein.



Figuur 9. Geïmporteerde sojabonen zijn momenteel een belangrijke bron van veevoer.

4 Biomassabehoefte van de bio-economie

4.1 Inleiding

Fossiele grondstoffen, met name kolen, aardolie en aardgas, spelen een belangrijke rol in onze maatschappij. Kolen worden voornamelijk gebruikt voor de productie van elektriciteit en warmte, uit aardolie worden vooral transportbrandstoffen, chemicaliën en kunststoffen gemaakt, en aardgas wordt gebruikt voor elektriciteit en warmte en voor de productie van ammoniak (voor kunstmest). De energie- en brandstoffensector is veruit de grootste gebruiker van fossiele grondstoffen met een behoefte die ongeveer 10 maal zo groot is als die voor chemie en materialen.

Het volledig vervangen van deze fossiele grondstoffen gaat veel tijd en inspanning vergen. De EU stelt voor in haar Energy Roadmap 2050 om minstens 55% van de energiebehoefte via hernieuwbare bronnen te voldoen, 32% via fossiele bronnen, maar met koolstofopslag, en de rest via kernenergie.²⁶ Dat is één van de vele scenario's op het gebied van de vervanging van fossiele grondstoffen. Bedrijven, kennisinstellingen, overheden, sectorverenigingen en NGO's hebben een waaier van scenario's ontwikkeld, vaak met de jaren 2030 en 2050 als stippen op de horizon. De scenario's verschillen in de mate waarin de fossiele bronnen vervangen moeten worden (alles of maar een gedeelte) en de rol die biomassa daarin moet krijgen (naast bijvoorbeeld zonne- en windenergie). Scenario's waarin biomassa een beperkte rol krijgt zijn vaak ingegeven door onzekerheid over de beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa in de



Figuur 10. Houtsnippen zijn een grondstof voor diverse processen.



Figuur 11. Van zeewier wordt veel verwacht.

toekomst. Die toekomst is moeilijk te voorspellen, want hoe gaat de behoefte aan energie, chemicaliën en materialen zich ontwikkelen als de bevolkingsomvang toeneemt, maar ook de energie-efficiëntie en recycling van materialen? Ook hiervoor bestaan verschillende scenario's. In deze scenario's spelen vervanging van fossiele bronnen een rol maar ook een efficiënter gebruik van energie. Met name door isolatie van huizen kan er veel worden gewonnen.

In dit hoofdstuk worden eerst de verschillende vervangingsscenario's omzeild door te schatten hoeveel biomassa nodig zou zijn om het huidige gebruik aan fossiele grondstoffen geheel te vervangen (paragraaf 4.2). Een volledige vervanging van fossiele grondstoffen door biomassa is slechts een denkoefening omdat een dergelijke vervanging niet realistisch is. Vervolgens wordt met gekozen groeiscenario's en vervangingsscenario's geschat hoe groot die behoefte in het jaar 2050 zou kunnen zijn (paragraaf 4.3). Daarna wordt geschat hoeveel biomassa er beschikbaar kan worden gemaakt in Nederland, Europa en de wereld in 2050* (paragraaf 4.4). In paragraaf 4.5 wordt toegelicht waarom het mobiliseren van biomassa zo belangrijk is. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een totaaloverzicht van de besproken scenario's.

* Nederland zal biomassa moeten gaan importeren en de beschikbaarheid van biomassa kan niet los worden gezien van de behoefte en plannen van Europa en de rest van de wereld. Als de rest van de wereld het gebruik van fossiele grondstoffen ook wil minimaliseren dan heeft dat consequenties voor Nederland. Vandaar dat in dit hoofdstuk ook de behoefte aan biomassa in Europa en de wereld is meegenomen.

Methodiek omzetting PJ naar Mton biomassa

Energetische toepassingen

De energie die besloten ligt in fossiele grondstoffen en biomassa kan worden uitgedrukt in PJ. Pellets van hout van de spar, onze model-biomassa waarmee in dit hoofdstuk gerekend is, bevatten 18,79 MJ/kg droge stof, ofwel 18,79 PJ/Mton.¹⁶ Dit is de netto calorische waarde, ofwel lower heating value. In dit boekje wordt voor de omrekening van PJ naar biomassa voor energetische toepassingen gerekend met een conversiefactor van 18,79 PJ/Mton biomassa.

Niet-energetische toepassingen

Ook bij fossiele grondstoffen is er een verband tussen gewicht en energie-inhoud. Hierbij is het handig om dit gewicht eerst uit te drukken in MTOE (million tonnes oil equivalent), waarbij alle hoeveelheden, ook gas en steenkool, worden omgerekend naar tonnen olie met dezelfde energie-inhoud. Die energie-inhoud is 42 PJ/MTOE.²⁷

Bij de vervanging van fossiele grondstoffen door biomassa in de chemie moet met beleid te werk worden gegaan. Een belangrijk deel van de petrochemie dient de productie van plastics waarvan polyethyleen en polypropyleen een groot deel uitmaken (circa de helft). Als al deze plastics en chemicaliën uit biomassa gemaakt moeten worden dan zal het gewicht aan benodigde biomassa (droge stof) hoger zijn dan het productgewicht. Dit wordt veroorzaakt door verschillen in de aard van product en grondstof (producten bevatten minder zuurstofatomen dan de grondstof) en door beperkte omzettings-efficiënties. Er kunnen echter twee efficiëntie-slagen gemaakt worden:

- Als we er in slagen om chemicaliën en plastics die een groter aandeel zuurstof bevatten, zoals polyesters, een groter toepassingsgebied te geven ten koste van de zuurstofarme chemicaliën dan is er minder biomassa nodig om dezelfde hoeveelheid chemicaliën te produceren.²⁸
- Als de grondstof meer gelijkenis vertoont met het product zullen verliezen kleiner zijn en wordt biomassa efficiënter ingezet.

Volgens Bos en Sanders²⁹ kunnen deze efficiëntie-slagen de benodigde biomassa (droge stof) met 40% verminderen. Bioraffinageprocessen leveren tenslotte reststromen op waaruit moeilijk nog producten zijn te winnen, maar waar nog wel energie in zit. Deze reststromen kunnen goed gebruikt worden om de bioraffinage-processen van energie te voorzien. Met al deze efficiëntieslagen kan een Mton basischemicaliën worden geproduceerd uit 2,2 Mton biomassa droge stof. Dat is de hoeveelheid die is vastgelegd in de producten. Daarnaast is er nog biomassa nodig voor de energie die het kost om die bouwstenen om te zetten in chemieproducten.

In dit boekje wordt voor de omrekening van PJ naar biomassa voor niet-energetische toepassingen gerekend met een conversiefactor van 42 PJ/MTOE en nog vermenigvuldigd met de bovengenoemde factor 2.2 om te komen tot Mton biomassa.

4.2 Scenario 1: Vervanging van fossiele grondstoffen door alleen biomassa, bij huidig gebruik

4.2.1 Nederland

In hoofdstuk 3 is beschreven dat Nederland in 2017 2.864 PJ aan fossiele grondstoffen gebruikt. Hiervan wordt 585 PJ gebruikt voor niet-energetische toepassingen. Daarnaast wordt 123 PJ aan biomassa gebruikt voor de energievoorziening en 10 PJ aan biomassa voor chemie en kunststoffen. Deze getallen zijn weergegeven in Tabel 10 en omgerekend naar Mton biomassa. Met de eerder gepresenteerde rekenregels is te schatten dat voor een volledige vervanging van fossiele grondstoffen 152 ±20 Mton biomassa droge stof extra nodig is. Deze behoefte is voor een gebruiksniveau van 2017. De biomassa die gebruikt wordt voor papier, houtproducten, veevoer en humane consumptie bedraagt 34 Mton en is in deze berekening buiten beschouwing gelaten.

Tabel 10. Gebruik van grondstoffen (fossiel en hernieuwbaar) in Nederland (data 2017) en de berekende hoeveelheid biomassa die nodig is om de fossiele grondstoffen te vervangen.

Grondstof	Hoeveelheid massa- equivalenten (MTOE)	Hoeveelheid energie (PJ)	Hoeveelheid biomassa (Mton)	Aandeel (%)
Fossiel				
Niet-energie toepassing	14	585	31 ±4	18.6
Energietoepassing	54	2.279	121 ±16	72.6
<i>Totaal</i>	<i>68</i>	<i>2.864</i>	<i>152</i>	<i>91.3</i>
Hernieuwbaar				
Biobrandstoffen en chemie	3,2	133	7,1	4,2
Overig		49		
<i>Totaal</i>	<i>4.3</i>	<i>182</i>	<i>7,1</i>	<i>5.8</i>
Nucleair en andere bronnen	2,2	91		2,9
Totaal	74,5	3.137	159 ±20	100

4.2.2 EU

Het gebruik van fossiele grondstoffen in de EU voor 2016 staat samengevat in Tabel 11. De EU gebruikt in vergelijking met Nederland een lager percentage (van de behoefte aan grondstoffen voor energie, chemie en materialen) aan fossiele grondstoffen. Dat is altijd al zo geweest omdat in veel EU landen meer mogelijkheden bestaan om waterkracht en biomassa te gebruiken. Bij vervanging van alle fossiele grondstof door biomassa zal er jaarlijks een extra hoeveelheid van 2.898 Mton biomassa droge stof nodig zijn voor een gebruiksniveau van 2016.

Tabel 11. Gebruik van grondstoffen (fossiel en hernieuwbaar) in Europa (EU 28, data 2016) en de berekende hoeveelheid biomassa die nodig is om de fossiele grondstoffen te vervangen.³⁰ (Schattingen/extrapolaties gebaseerd op Bos & Sanders).²⁹

Grondstof	Hoeveelheid massa- equivalenten (MTOE)*	Hoeveelheid energie PJ*	Hoeveelheid biomassa (Mton)	Aandeel in Nederland %	Aandeel in EU28 %
Fossiel					
Niet-energie toepassing	85 ±30	3.570 ±1.300	187 ±68		
Energietoepassing	1.213	50.946	2.711 ±350		
<i>Totaal</i>	<i>1.300 ±30</i>	<i>54.600 ±1.300</i>	<i>2.898</i>	<i>91,3%</i>	<i>75,2%</i>
Hernieuwbaar					
Biobrandstoffen en chemie	83	3.486	186 ±24	4,2%	4,8%
Overig		5.376			
<i>Totaal</i>	<i>211</i>	<i>8.862</i>		<i>5,8%</i>	<i>12,2%</i>
Nucleair en andere bronnen	<i>217</i>	<i>9.114</i>		<i>2,9%</i>	<i>12,6%</i>
Totaal	1.728 ±30	75.576 ±1.300	3.084 ±400	100%	100%

*EU28

4.2.3 Wereld

Een overzicht van de hoeveelheid fossiele grondstoffen en de hoeveelheid andere grondstoffen en energiebronnen die wereldwijd in 2016 zijn gebruikt staat in Tabel 12.

Tabel 12. Gebruik van grondstoffen (fossiel en hernieuwbaar) in de wereld (data van 2016)^{31,32} en de berekende hoeveelheid biomassa die nodig is om de fossiele grondstoffen te vervangen.

Grondstof	Hoeveelheid Massa-equivalenten (MTOE)	Hoeveelheid energie (PJ)	Hoeveelheid biomassa (Mton)	Aandeel in Nederland %	Aandeel in de wereld %
Fossiel					
Niet-energie toepassing	870	37.000	1.938 ±250		
Energietoepassing	10.373	436.000	23.203 ±3.000		
Totaal	11.243	472.000	25.141	91,3%	81,7%
Hernieuwbaar					
Biobrandstoffen en chemie	1.349	67.000	3.566 ±465	4,2%	9,8%
Overig		14.000			
Totaal	1.926	81.000		5,8%	13,4%
Nucleair en andere bronnen	669	28.000		2,9%	4,9%
Totaal	13.761*	578.000	28.707 ±3.700	100%	100%

*De wereldenergieconsumptie was 9.555 MTOE, wat lager is dan de totale hoeveelheid grondstoffen hier genoemd.³² Het verschil wordt veroorzaakt door de beperkte rendementen van elektriciteitscentrales en boilers en door eigen energieverbruik door de energiebedrijven en verliezen.

Indien alle fossiele grondstoffen moeten worden vervangen door biomassa dan zou de wereld jaarlijks 25.141 Mton biomassa droge stof extra nodig hebben. Ter vergelijking, de huidige inzet bedraagt circa 22.000 Mton per jaar (zie figuur 28). Deze hoeveelheid geldt voor het verbruiksniveau van het jaar 2016. Een dergelijke grootschalige vervanging van fossiele grondstoffen door biomassa is niet realistisch. In het volgende hoofdstuk wordt een meer genuanceerd beeld neergezet.

4.3 Scenario 2: De verwachte biomassabehoefte in 2050 bij gehele vervanging van fossiele grondstoffen door een mix van hernieuwbare bronnen

4.3.1 Trends

Voorspellen is moeilijk, waardoor de scenario's voor groei van de economie en de mate waarin deze duurzaam en circulair kan worden gemaakt uiteenlopen. In deze paragraaf worden scenario's gepresenteerd waarin biomassa een grote rol speelt, waarna later wordt gekeken in hoeverre deze (grote) vraag naar biomassa gedekt kan worden door de beschikbaarheid daarvan.

Trends om rekening mee te houden zijn:

- Landbouwkundigen stellen dat het landbouwareaal in de wereld niet of nauwelijks uitgebreid hoeft te worden om in de toekomst, ook bij een toenemende populatie, de wereld te blijven voeden. Dit wordt bereikt door efficiëntieverbeteringen in de landbouw en door voedselverspilling tegen te gaan. Hiervoor zullen wel meer nutriënten (mest of kunstmest) nodig zijn, wat mogelijk de energievraag zal doen toenemen.
- De behoefte aan materialen en chemicaliën zal steeds meer worden opgevangen door recycling, waardoor er steeds minder verse grondstoffen nodig zullen zijn (tenzij een enorme economische groei dit effect tenietdoet).
- Hernieuwbare energie zal niet alleen bestaan uit biomassa, maar ook uit zon en wind. De verdeling tussen de diverse bronnen is afhankelijk van technologische ontwikkelingen, o.a. in het opslaan van energie.
- Besparingsprogramma's (bijvoorbeeld isolatie van gebouwen), technologische verbeteringen (energieverbruik voertuigen, rendement centrales, warmtepompen) en levensstijlverandering (minder vliegen en rijden) kunnen een grote invloed hebben op het energieverbruik.
- Het aandeel elektriciteit in energie zal stijgen.
- De chemie wordt naar verwachting gedeeltelijk geëlektrificeerd (waterstof als grondstof, geproduceerd via elektrolyse, en CO₂ als tweede grondstof).
- De bevolking en de economie zullen groeien.
- In de ontwikkelingslanden neemt de vleesconsumptie per inwoner toe en in de ontwikkelde landen neemt deze af.

4.3.2 Nederland

Ook in 2050 zal Nederland veel biomassa nodig hebben voor chemie en energie. De Koninklijke Vereniging van de Nederlandse Chemische Industrie (VNCI) heeft een plan gepresenteerd hoe de Nederlandse chemische industrie in 2050 kan voldoen aan 80-

95% reductie van de emissie van broeikasgassen, conform het Parijse klimaatakkoord.³³ In dat plan wordt rekening gehouden met een verdergaand hergebruik en recycling van materialen. Het beschrijft een paar mogelijke scenario's, waarvan één een hoofdrol geeft aan biomassa. Het scenario van de VNCI gaat ervan uit dat de biomassa wordt gebruikt voor de productie van traditionele chemicaliën zoals C₂ en C₃ verbindingen, methanol en BTX. Mogelijke efficiencylagen door te kiezen voor andere basischemicaliën zijn hierin dus niet meegenomen. In dit scenario wordt geschat dat de Nederlandse chemische industrie 700 PJ (37 Mton droge stof) aan biomassa nodig zal hebben als grondstof en energiebron.

In een studie van De Gooijer³⁴ uit 2018 is geschat hoeveel biomassa Nederland nodig heeft in 2050 voor de productie van energie. Biomassa zal een groot deel van de energie moeten verzorgen. Het aandeel windenergie zal beperkt zijn door het enorme oppervlak dat nodig is voor de windmolenparken. Bovendien zullen de inzet van zonne-energie en windenergie beperkt zijn door de fluctuerende productie (seizoenen, dag/nacht, windstilte) en de afwezigheid van betaalbare energie-opslagsystemen. De hoeveelheid energie die Nederland in het jaar 2050 nodig heeft voor energieopwekking, inclusief mobiliteit en bunkering (zeeschepen en vliegtuigen), zonder het aandeel chemiegrondstoffen, wordt geschat op 4.266 ± 2.300 PJ. De Gooijer stelt voor dat 2.200 ± 1.200 PJ uit biomassa wordt betrokken en dat komt neer op 117 ± 64 Mton droge stof. De wijidheid van marge wordt veroorzaakt door verschillende scenario's van besparingen en groei van de consumptie. 25% van het oppervlak van de Noordzee (Nederlands deel) is in dit scenario bezet met windmolens die bij elkaar 1.346 PJ opleveren, de opbrengst van zonne-energie is geschat op 470 PJ en andere hernieuwbare energievormen op 250 PJ.

Als de twee studies worden gesommeerd (energievraag chemiesector niet dubbel tellen; is ongeveer 320 PJ) dan heeft Nederland in het jaar 2050 137 ± 64 Mton biomassa droge stof nodig. Echter, bij een zeer sterke energiebesparing kan het zelfs mogelijk worden dat we nauwelijks biomassa nodig hebben voor de energievoorziening maar alleen nog voor de chemie.

4.3.3 EU

Volgens de Energy Roadmap 2050²⁶ zal de EU in 2050 71.400 ± 3.000 PJ nodig hebben aan energie. In deze schatting is rekening gehouden met een scenario met beleidsmaatregelen die in 2012 al waren besloten. Een deel van de energie zal uit andere bronnen dan biomassa worden geleverd. In 2016 waren deze andere bronnen goed voor 14.490 PJ. Als de rest alleen maar door biomassa moet gaan worden verzorgd en we tellen de geschatte biomassabehoeftte voor de Europese chemische industrie erbij (120 Mton) dan heeft de EU28 in 2050 3150 ± 200 Mton (droge stof) nodig aan biomassa. Dat is een extreem biomassa-gericht scenario. Door groei van de wind- en zonne-

energiesector zal de biomassabehoefte lager zijn. Ook als de besparingen groter uitvallen (t.o.v. in 2012 bedachte maatregelen) zal er minder biomassa nodig zijn.

4.3.4 Wereld

De FAO schat in dat in 2050 de wereldbevolking uit 9,8 miljard inwoners bestaat.³⁵ Het wereldvoedselgebruik zal toenemen van 1.482 Mton droge stof in 2011 naar 2.059 Mton in 2050.³⁶ De productie van de belangrijkste basischemicaliën zal met een factor 2,4 toenemen. Deze factor is gebaseerd op een verwacht jaarlijkse groei van 2,5%.³⁷ Als deze groei lager of hoger blijkt te zijn zal ook die factor lager of hoger zijn. Indien deze factor ook geldt voor alle niet-energetische toepassingen van fossiele bronnen dan wordt in 2050 een behoefte van 87.690 PJ verwacht aan fossiele grondstoffen voor de chemie. De hoeveelheid biomassa die in 2050 nodig zal zijn om dit te kunnen vervangen met inbegrip van de eerdergenoemde efficiëntie-slagen zal 4.600 ±400 Mton droge stof zijn.

Tabel 13: Compilatie van de data uit de beschreven studies.

Bron	Behoefte grondstof (PJ)	Behoefte biomassa (Mton)	Opmerkingen
VNCI (2018)	700	37 (omgerekend)	Voor chemische industrie NL (grondstof en energiebron) in 2050
De Gooijer (2018)	2.200 ±1200, waarvan 1.346 wind, 470 zon, overig 250	117 ±64 (omgerekend)	Voor energie (inclusief mobiliteit en bunkering) NL in 2050
	4.646	137 ±64 (omgerekend)	Energie en chemie NL in 2050
EU (2012)	71.400 ±3.000	3800 (omgerekend)	Voor energie EU in 2050
	14.490	771 (omgerekend)	Energie EU werkelijk (zijnde niet biomassa) in 2016
		3150 ±200 (omgerekend)	Energie en chemie EU in 2050
FAO (2016)		1.482	Voedsel wereld werkelijk in 2011
		2.059	Voedsel wereld in 2050
Bos en Broeze (2019)	87.690	4.600 ±400	Chemie wereld in 2050
Shell, IEA, Exxon	800.000 ±400.000		Totale energievraag wereld in 2050

Ook zal er meer energie nodig zijn. Bos en Broeze³⁷ nemen een gemiddelde uit diverse sterk uiteenlopende schattingen van o.a. Shell, IEA en Exxon Mobil voor de totale energie die nodig is in 2050. Deze bedraagt 800.000 PJ, of beter uitgedrukt: 800.000 ±400.000 PJ. Nu wordt 9% van de energiebehoefte in de wereld gedekt door andere bronnen dan fossiele bronnen en biomassa.

Tabel 13 geeft een compilatie van de schattingen uit de beschreven studies.

4.4 Beschikbaarheid van biomassa

4.4.1 Nederland

Koppejan *et al.* hebben in een rapport uit 2009 de beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020 geschat.³⁸ Daarbij hebben ze vier uiteenlopende, maar reële, op CBP-studies gebaseerde scenario's uitgewerkt die passen bij verschillende maatschappelijke ontwikkelingen. Deze verschilden in de mate waarin markten open of gesloten zullen zijn en in de mate waarin duurzaamheid belangrijk wordt gevonden. Hierbij is verondersteld dat de nadruk op duurzaamheid gepaard gaat met een lagere economische groei. De studie richtte zich op de biomassa die vrij te maken is voor een energietoepassing, los van bestaande toepassingen in bijvoorbeeld veevoer, humane consumptie en materialen. De biomassa moest kunnen dienen als grondstof voor o.a. vergisting en verbranding. Vloeibare biobrandstoffen zijn niet meegenomen.

De actuele situatie in 2009 was dat er een beschikbaarheid was van 125 PJ biomassa die in principe ingezet kon worden voor de energieopwekking, maar dat 40% (50 PJ) ook daadwerkelijk hiervoor werd ingezet. Voor 2020 verwachtten de auteurs dat 15 ±1,5 Mton biomassa droge stof (282 PJ) vrijgemaakt zou kunnen worden voor de energieopwekking. Grote bijdragen worden geleverd door steekvaste mest, oud/bewerkt hout en de restfractie van huishoudelijk afval. In de studie is ook energieteelt meegenomen, maar deze speelt in geen van de scenario's een grote rol en aquatische biomassa speelt een zeer kleine rol, wat vanuit het perspectief van 2019 ook redelijk blijkt te kloppen.

De grootste hoeveelheden biomassa kunnen worden vrijgemaakt in een scenario met een grote bereidheid om voor duurzaamheid te kiezen. Het open zijn van de wereldmarkt heeft een klein positief effect op de som van alle beschikbare biomassa plus een bescheiden effect op de soort biomassa die wordt ingezet. Omdat deze studie zich heeft gericht op biomassa die geschikt is voor elektriciteit en warmte zal de hoeveelheid totaal beschikbare biomassa groter zijn. In 2016 is ruim 6 Mton biomassa droge stof gebruikt voor energie waarvan 4,5 Mton inheemse biomassa. Dat is lager dan de genoemde 15 Mton, waardoor er nog ruimte is voor uitbreiding. De hoeveelheid gebruikte inheemse biomassa in 2016 is hoger dan de 50 PJ die in 2009 daadwerkelijk is ingezet. Een

recentere studie is gedaan door Schulze *et al.*³⁹ Deze richt zich ook op het vrij beschikbare biomassapotentieel voor de energiesector, zonder import, maar met horizonnen van 2023 en 2035. De uitkomsten ondersteunen de schattingen die hierboven zijn gemaakt.

4.4.2 EU

Ros *et al.*⁴⁰ hebben in 2012 een schatting gemaakt van het biomassa-potentieel in de EU27 voor toepassing in de bio-energie en biobased chemicaliën. Ook hier gaat het weer over de hoeveelheden energie die in de biomassa besloten liggen en biomassa die realistisch gezien vrijgemaakt zouden kunnen worden en bovendien op een milieuvriendelijke manier. De schatting richt zich op het jaar 2030 en komt op 12.000 ±2.000 PJ, waarvan 6.000 PJ uit de land- en tuinbouw, 1.800 PJ uit de bosbouw en 4.000 PJ uit afval. Dat zou overeenkomen met 640 ±100 Mton biomassa droge stof. Elbersen *et al.*⁴¹ hebben in 2010 geschat dat er in 2030 in de EU 362 Mton biomassa droge stof beschikbaar is in de vorm van bijproducten van de land- en bosbouw en dat het mogelijk is om een extra 184 Mton droge stof te telen.

4.4.3 Wereld

Het SCOPE rapport⁴² uit 2015 meldt dat er in 2015 10.000 Mton (nat/vers-gewicht) aan energiegewassen, landbouwreststromen en bosbouwresiduen beschikbaar waren



Figuur 12. Oliepalm is een gewas met een hoge opbrengst aan olie en reststromen, maar er zijn veel zorgen rondom de duurzaamheid van de teelt.

(actuele productie), wat waarschijnlijk neerkomt op ongeveer 100.000 PJ/jaar. Het rapport meldt dat voor het jaar 2050 het nodig is om tevens 50-200 miljoen ha aan landoppervlak beschikbaar te stellen voor energieteelt. Is dat er wel? De wereld bezit 13 miljard ha landoppervlak, waarvan reeds op 1,5 miljard ha land- en tuinbouw wordt bedreven. De extra 50-200 miljoen ha zouden gerealiseerd kunnen worden in sub-Sahara Afrika en Zuid-Amerika. De gewassen op deze teeltgronden kunnen 150.000 ± 50.000 PJ/jaar aan biomassa opleveren. In het rapport wordt voorgesteld 40-50 miljoen ha te gebruiken voor conventionele biobrandstoffen (uit zetmeelgewassen en palmolie) en de rest voor de teelt van lignocellulosehoudende gewassen. Volgens het rapport zijn er nog meer potenties voor 2050. Het efficiënter maken van weideland (voor de veeteelt) kan leiden tot extra oppervlak voor de energieteelt (potentie 215.000 ± 75.000 PJ/jaar) en het gebruik van droge en marginale stukken land kan nog eens 80.000 PJ/jaar opleveren. De totale potentie voor 2050 kan dan 550.000 ± 200.000 PJ/jaar zijn.

Het SCOPE-rapport maakt een degelijke en complete indruk, met 779 bladzijden en 137 auteurs uit 24 landen. Echter, er bestaan meer studies. In diverse andere studies zijn schattingen gedaan variërend van minder dan 100.000 PJ/jaar indien alleen residuen worden meegenomen tot 1.500.000 PJ/jaar bij extreme scenario's. Dornburg *et al.*⁴³ hebben daar in 2010 een overzicht van gegeven en houden de beschikbaarheid van biomassa op een gemiddelde van 350.000 ± 150.000 PJ/jaar met de residuen als basis en daar bovenop het gebruik van houtaangroei van bossen die nu nog niet wordt ingezet voor houtproducten en teelt op nieuwe gronden, bijvoorbeeld die vrijkomen door het toepassen van efficiëntere landbouw op bestaande landbouwgronden. Een hoeveelheid van 350.000 PJ komt overeen met 18.600 Mton biomassa droge stof.

Het blijft onzeker of deze hoeveelheid ook echt beschikbaar kan worden gemaakt. Het IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) kan leven met een iets lagere beschikbaarheid. Het IPCC heeft een rapport uitgebracht over de opwarming van de aarde met daarin scenario's om de opwarming te beperken tot 1,5°C. In één van de scenario's wordt in het jaar 2050 relatief veel biomassa ingezet. Dat is een scenario met een relatief flinke economische groei en voedselconsumptie. De wereld heeft dan 700.000 PJ (primaire) energie nodig, waarvan 291.000 PJ door biomassa wordt geleverd. De resterende energie wordt betrokken van zon, wind, uit atoomkernen en fossiele bronnen. Om de koolstofdioxide-emissie te beperken wordt ook het opvangen en afvangen van koolstofdioxide ingezet (zie hoofdstuk 6).⁴⁴ In dat IPCC scenario wordt rekening gehouden met het gebruik van ruim 15.000 Mton biomassa droge stof per jaar. De voorspelling van de hoeveelheid duurzame biomassa die in 2050 beschikbaar zal zijn hangt in de vele studies af van de veronderstellingen die in deze studies worden gedaan en deze variëren sterk. Bovendien gaat het hier om een potentiële beschikbaarheid.

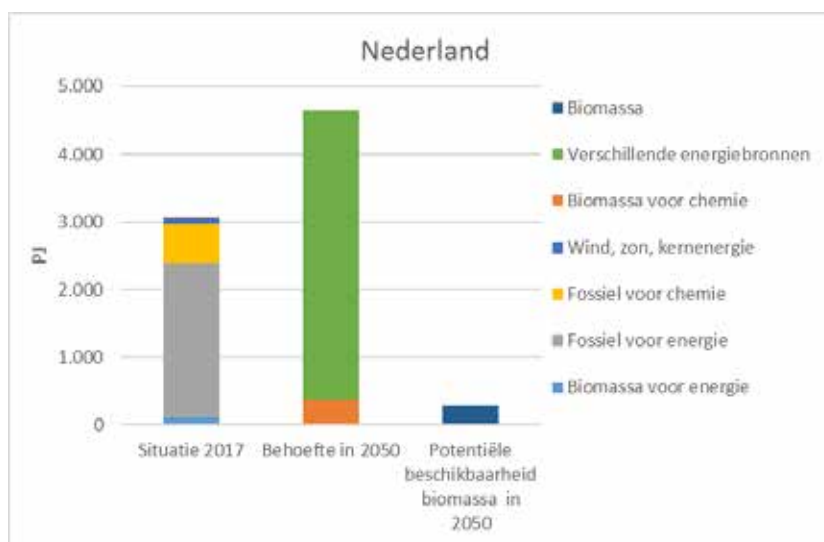


Figuur 13. Miscanthus is een gewas met een hoge biomassa opbrengst.

Alles hangt af van de acties die worden ingezet om die biomassa ook daadwerkelijk te mobiliseren en het juiste beleid dat daar voor nodig is. Voorlopig rekenen we met wat de IPCC realistisch acht: 15.000 Mton biomassa droge stof per jaar, ofwel 282.000 PJ.

4.5 Mobiliseren van biomassa is belangrijk

Naast de potentiële beschikbaarheid van biomassa is ook het mobiliseren van biomassa een aandachtspunt. Veel rest- en afvalstromen uit de land- en bosbouw blijven nu nog onbenut doordat deze op het land blijven liggen of in de open lucht worden verbrand. Wanneer biomassabezitters gestimuleerd worden om de biomassa vrij te maken en beschikbaar te stellen dan kunnen er nog grote hoeveelheden worden gemobiliseerd. Boeren kunnen zelfs rekening gaan houden met de verwachte verkoop van residuen door hun werkwijze aan te passen. Dit maximaliseert de hoeveelheid biomassa die beschikbaar kan worden gemaakt voor de bio-economie. De beste manier om aan die verkoopverwachtingen te voldoen is ervoor te zorgen dat er grote hoeveelheden verhandelbare uniforme halffabricaten (*commodities*) op de markt komen. Deze biomassa *commodities* moeten op duurzaamheid zijn gecertificeerd, over grote afstanden transporteerbaar zijn en afgenomen kunnen worden door meerdere klanten in meerdere sectoren. Voorbeelden zijn houtpellets of pyrolyse olie, of pellets die gemaakt zijn van bagasse waaruit de mineralen zijn gewassen. De mineralen kunnen lokaal worden geretourneerd naar de plantages en de compacte pellets kunnen worden verscheept en worden afgenomen door energiebedrijven en door bioraffinaderijen. Ook



Figuur 14. Grondstoffen voor de energievoorziening en de chemie voor Nederland in 2017 (werkelijk) en 2050 (schatting).

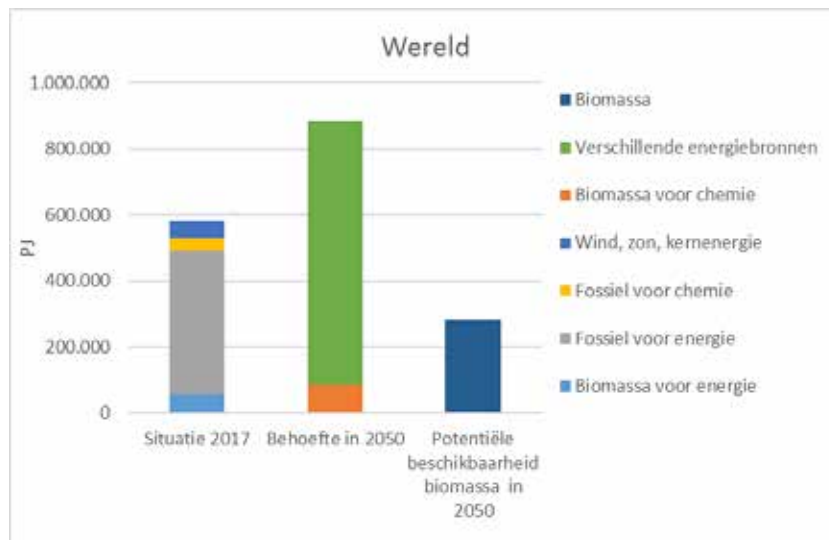
pyrolyseolie of gewassen, getorrificeerde biomassa (zie hoofdstuk 5) kunnen een rol als *commodity* krijgen. De energiesector zal vooroplopen in het afnemen van deze *commodities* en in het kielzog krijgen bioraffinaderijen de kans om gebruik te maken van dit aanbod met leveringszekerheid.

Voor zowel biomassabezitters als voor biomassagebruikers geeft de aanwezigheid van grote hoeveelheden internationaal verhandelbare biomassa *commodities* zekerheid. Deze zekerheid is nodig om de biomassastromen te mobiliseren.

4.6 Biomassabehoefte versus beschikbaarheid

Als Nederland nu alle fossiele grondstoffen zou vervangen door biomassa is er meer biomassa nodig dan de hoeveelheden die volgens diverse scenario's in 2050 nodig zal zijn. Dit komt omdat voor 2050 rekening wordt gehouden met een toenemende efficiëntie op vele gebieden en een toenemende inzet van andere hernieuwbare energiebronnen in Nederland. In Figuur 14 is de hoeveelheid grondstoffen voor energie en chemie in 2017 vergeleken met de behoefte en beschikbaarheid in 2050. Uit deze figuur blijkt dat de ontwikkeling van andere hernieuwbare bronnen noodzakelijk is.

De data voor Europa in 2016 (Tabel 11) en schattingen voor 2050 (Tabel 13) liggen dicht bij elkaar. Ook hier zal Europa zijn best voor moeten doen. Terwijl de economie groeit moet de behoefte aan grondstoffen sterk afvlakken.



Figuur 15. Grondstoffen voor de energievoorziening en de chemie voor de wereld in 2017 (werkelijk) en 2050 (schatting).

Op wereldschaal is dat nog niet evident. Door de bevolkingsgroei en de groei van de welvaart lijkt er vooralsnog veel grondstof nodig te zijn in 2050. Figuur 15 geeft aan dat in 2050 de hele wereld een gedeelte van de behoefte aan grondstoffen voor chemie, materialen en energie uit biomassa zou kunnen halen. Het is noodzakelijk hiervoor nieuwe landbouw- en bioraffinagetechnieken te ontwikkelen en marginale gronden te gebruiken. Ongeveer tweederde van de energie zal uit andere (hernieuwbare) bronnen moeten worden geproduceerd. Als het lukt om dat tweederde deel te produceren met behulp van wind, zon en waterkracht, dan zou het mogelijk kunnen zijn dat we op wereldschaal voldoende biomassa beschikbaar kunnen maken. Dat geeft Nederland het argument en de ruimte om biomassa te importeren. Deze import zal een orde groter zijn dan de biomassa die in eigen land kan worden vrij gemaakt voor energie en chemie en grofweg het dubbele van de huidige biomassa-import (inclusief granen, oliehoudende gewassen en hout). Deze import zal vooral van buiten de EU komen, omdat ook de EU een tekort aan biomassa zal krijgen. Nederland zou daarom ook een grote rol kunnen spelen als biomassa-doorvoerland. De biomassa-importstroom zou dan nog groter kunnen zijn dan de huidige import van fossiele brandstoffen.

5 Verwerkingstechnologieën voor biomassa

5.1 Inleiding

Voor het gebruik van biomassa voor chemie, energie en materialen is het nodig de biomassa te bewerken. Hiervoor zijn diverse conversie- en scheidingstechnologieën beschikbaar, alsmede mechanische bewerking (bijvoorbeeld verkleinen). De conversietechnologieën kunnen worden ingedeeld in de volgende processen:

- Biologische processen waarin (micro)organismen en/of enzymen componenten uit biomassa omzetten in andere componenten.
- Thermochemische processen waarin biomassa wordt ontleed in bruikbare stoffen onder hoge temperatuur.
- Chemische processen waarin biomassa-componenten worden omgezet in andere componenten met behulp van een katalysator en/of door reactie met een toegevoegd reagens.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bewezen conversieprocessen beschreven en wordt in het kort ingegaan op mechanische bewerkingen en scheidingsprocessen. Technologieën die zich nog grotendeels in een ontwikkelingsstadium bevinden worden beschreven in hoofdstuk 6.

5.2 Mechanische bewerking

Ruwe biomassa moet meestal verkleind worden voordat het verder verwerkt kan worden. Hiervoor kan er worden gemalen en gesneden. Voor sommige processen moet de biomassa zelfs verpompbaar zijn, wat betekent dat het sterk verkleind moet worden en in een vloeistof moet worden gedispergeerd. Ook persen is een mechanische bewerking en tevens een scheiding tussen sap of olie en vaste stof.

Bij het produceren van materialen waarin biomassa is verwerkt worden ook vaak mechanische processen gebruikt. Een voorbeeld is extrusie waarin biomassa-componenten, met name vezels, kunnen worden gemengd met een plastic zodat composieten gemaakt kunnen worden. Ook smelten, gieten, opschuimen, emulgeren, dispergeren, pelleteren, mengen en formuleren worden gebruikt om te komen tot bruikbare producten.

5.3 Biologische conversieprocessen

5.3.1 Fermentatieprocessen

Principe

Fermentatie is de omzetting van organisch materiaal met behulp van micro-organismen (bacteriën, gisten, schimmels) tot bijvoorbeeld alcoholen, zuren of waterstof. Hoewel fermentatie soms wordt gedefinieerd als een omzetting onder zuurstofloze condities (anaeroob), wordt de definitie vaak uitgebreid en omvat het ook processen die zuurstof behoeven (aeroob). Voor de sectoren chemie en energie betreft het vaak processen die in een geroerd reactorvat (fermentor) worden uitgevoerd met een vloeistof die meestal koolhydraten bevat, maar soms ook organische zuren. Niet zelden moeten het substraat en de fermentor gesteriliseerd worden zodat kan worden gewerkt met een enkele soort micro-organisme in de vorm van een zogenaamde reiculture.

Geschikte grondstoffen

De belangrijkste grondstof, in fermentatiekunde substraat genoemd, bestaat uit fermenteerbare suikers: monosachariden (zoals glucose) en disachariden (zoals sucrose, ofwel kristalsuiker). Rietsuiker, bietsuiker en melasse zijn geschikte grondstoffen, maar ook zetmeel, cellulose of lignocellulose waaruit deze fermenteerbare suikers zijn te maken. Hierdoor is het mogelijk een brede range aan biomassa-soorten te gebruiken waaronder tarwe, mais, stro, gras, bladeren en hout, zolang het materiaal maar een substantiële hoeveelheid koolhydraten bevat. Omdat het economisch gunstig is om in een fermentatieproces hoge productconcentraties te bereiken mag ook de grondstof niet te veel verdund zijn met water. De grondstof moet bij voorkeur meer dan 25% droge stof bevatten, waardoor fruit, sappen en afvalwater minder voor de hand liggen. Koolhydraatrijke grondstoffen zijn de meest gebruikte. Andere soorten grondstoffen zoals organische zuren, eiwitten, aminozuren, alcoholen, vetten en glycerol kunnen ook als grondstof dienen in fermentatieprocessen, waardoor andere categorieën biomassa ook in aanmerking komen. Uit deze grondstoffen kunnen meestal ook geheel andere producten gevormd worden.

Producten

Belangrijke producten in de categorie energiedragers zijn ethanol, butanol, isobutanol (alle drie vloeibare transportbrandstoffen) en waterstofgas. In de categorie chemie is melkzuur belangrijk, een grondstof voor de bioplastic polymelkzuur, maar ook polyhydroxyalkanoaat (PHA), een bioplastic die in de vorm van korrels in bacteriecellen wordt opgehoopt. De trend is dat de fermentatieproducten barnsteen-zuur, itaconzuur en andere dicarbonsuren steeds belangrijker worden wegens hun geschiktheid voor de

productie van bioplastics. Naast een toepassing in energie en chemie is fermentatie bekend van de productie van bier, wijn, brood, bakkersgist, citroenzuur, antibiotica, enzymen en aminozuren.

Ervaring

In Nederland staan drie grote fermentatiefabrieken voor de productie van ethanol uit zetmeel, waarbij de fabriek in Rotterdam met een productiecapaciteit van 480.000 m³ ethanol/jaar één van de grootste ter wereld is. In Gorinchem staat een fabriek voor de productie van melkzuur.

In een typische fabriek voor de productie van ethanol uit mais- of tarwezetmeel kan 100.000 ton ethanol per jaar worden gemaakt uit 200.000 ton zetmeel. Hiervoor is ongeveer 2500 m³ fermentorruimte nodig, vaak verdeeld over units van 150-200 m³.



Figuur 16. Bio-ethanol fabriek op de Maasvlakte.

Economie

De productie van ethanol uit mais en tarwe is nog net winstgevend. De productiekosten liggen dichtbij de verkoopprijs van ethanol (€ 550/ton).⁴⁸ Melkzuurproductie uit zetmeel is ook winstgevend. De productie van tweede generatie ethanol of melkzuur (uit reststromen zoals maisstro en suikerrietbagasse) is helaas nog verliesgevend wegens de hoge kosten voor de ontsluiting en enzymatische hydrolyse van de lignocellulose. Optimalisatie van het productieproces is daar dus nog nodig. De trend is om vooral te mikken op anaerobe fermentatieprocessen, omdat deze kosten-efficiënter zijn dan

aerobe fermentatieprocessen. Immers, voor anaerobe processen is geen kostbare beluchting nodig terwijl de productopbrengst hoog is. In aerobe processen wordt een groot deel van het substraat geoxideerd tot koolstofdioxide en omgezet in celmassa van micro-organismen: beide hebben een beperkte waarde en tevens heb je ongewenst verlies van koolstof. In de fermentatie van zetmeel naar ethanol wordt in de praktijk 89% van de energiewaarde in suiker omgezet in ethanol-energie. Echter door o.a. het destillatieproces wordt het uiteindelijke rendement iets lager. Tijdens de destillatie is er een verlies van minder dan 1% ethanol-massa. De energie voor de destillatie in twee trappen kost ongeveer 18% van de energie die in de ethanol besloten ligt.

5.3.2 Vergisting

Principe

Vergisting is een biologisch proces waarin micro-organismen onder zuurstofloze condities organisch materiaal afbreken. Meestal wordt hiermee de methaangisting bedoeld waarin het eindproduct biogas is, een mengsel van methaan en koolstofdioxide. Vergisting is dus een vorm van anaerobe fermentatie. Het proces wordt uitgevoerd in geroerde en verwarmde reactoren, vaak met een inhoud van meer dan 1000 m³, en de omzetting van vaste organische stoffen naar biogas duurt meestal een maand.

Geschikte grondstoffen

Geschikte grondstoffen voor vergisting zijn GFT-afval, mest, slib uit rioolwaterzuiveringsinstallaties, reststromen uit de voedingsmiddelenindustrie, swill (voornamelijk keukenafval en etensresten) en industrieel afvalwater met hoge concentraties organische stoffen. Mest wordt vaak verwerkt samen met mais, gras of een ander cosubstraat in een co-vergisting om een hogere biogas opbrengst te krijgen met hetzelfde reactorvolume.

Producten

Biogas is het hoofdproduct en dat kan verder worden opgewerkt tot een kwaliteit die lijkt op die van aardgas. Gezuiverd biogas heet groen gas en kan in het aardgasnet worden geïnjecteerd. Ook kan dit gas vloeibaar worden gemaakt (bioLNG) en worden ingezet als transportbrandstof. Een alternatief is dat het biogas in een installatie voor warmte-kracht-koppeling wordt gebruikt voor de productie van elektriciteit en warmte. Het bijproduct van vergisting is digestaat waarin nog onvergist organisch materiaal, water en mineralen (o.a. fosfaat en ammonium) aanwezig zijn. In het geval van GFT-vergisting wordt dit digestaat gecomposteerd en in het geval van mestvergisting wordt het digestaat meestal uitgereden op landbouwgrond.



Figuur 17. Een mestvergister op een boerderij.

Ervaring

In Nederland staan bijna honderd slibvergisters, enkele GFT-vergisters, o.a. van Attero, De Meerlanden, Laarakker en Orgaworld, tientallen mestvergisters bij boerderijen, tientallen allesvergisters, tientallen vergisters van afvalwater en enkele vergisters van swill en reststromen uit voedingsmiddelenbedrijven.⁴⁶ Een typische GFT-vergister met een volume van ruim 2000 m³ verwerkt jaarlijks 35.000 ton GFT en produceert daarmee 4,2 miljoen m³ biogas,⁴⁶ hierbij wordt ongeveer 50% van de bruto calorische waarde van GFT omgezet in biogas.

Economie

Bedrijven die vergisting uitvoeren vragen vaak 25 euro per ton GFT (persoonlijke communicatie Orgaworld) of per ton mest.⁴⁷ De biomassa heeft hier dus een negatieve waarde. Echter, de marktwaarde van het geproduceerde biogas is meestal lager dan de kosten van de productie van dat biogas waardoor vergisting alleen economisch haalbaar is met een aanvullende overheidssubsidie. In Nederland werd in 2017 14 PJ (600 m³) biogas gewonnen en 1294 PJ aardgas verbruikt (zie hoofdstuk 3).

5.3.3 Compostering

Principe

Compostering is een microbiologisch proces waarin organisch materiaal wordt geoxideerd en daarmee afgebroken tot compost in een opzet waarin lucht wordt geleid door een hoop (stapel, berg) poreus, vast materiaal. Hoewel compostering spontaan in het veld kan plaats vinden (bijvoorbeeld in gemaaid bermgras langs de weg) wordt hier de gecontroleerde compostering bedoeld. Deze wordt vaak uitgevoerd met een geforceerde beluchting (door een ventilator) in een bak, een hal of in de open lucht. Omdat compostering een soort biologisch verbrandingsproces is, ontstaat warmte die ook gewonnen kan worden. Door die warmte verdampt er tevens water en wordt het materiaal droger en door de hoge temperatuur (70°C) worden veel ziektekiemen en onkruidzaden afgedood. Het proces duurt een paar weken.

Geschikte grondstoffen

Geschikte grondstoffen zijn GFT-afval, materiaal van snoeien en maaien (gras, loof), stro, droge mestsoorten en de dikke fractie van digestaat uit diverse soorten vergisters. Het materiaal moet vochtig zijn maar wel steekvast en poreus, dus geen vloeistof of slurry.

Producten

Compost is het belangrijkste product: dat is het materiaal dat niet is omgezet tijdens het composteringsproces, bijvoorbeeld mineralen en moeilijk afbreekbaar organisch materiaal zoals bepaalde fracties lignocellulose (stukjes hout) en tijdens het proces geproduceerde humuszuren. Compost kan worden gebruikt als bodemverbeteraar en bepaalde typen compost kunnen worden gebruikt als groeisubstraat voor de champignonteelt. Een tweede product is warmte, maar dat wordt nog bij een minderheid van de composteringsbedrijven gewonnen (bijvoorbeeld Upcycling Gemert). Er zijn zelfs bedrijven die de condens die ontstaat uit het verdampte water een nieuwe bestemming geven.

Ervaring

Er staan in Nederland ongeveer 60 grote composteerinstallaties.⁴⁹ Een typische capaciteit is 40.000 ton verwerkte biomassa per jaar. Uit deze hoeveelheid kan 16.000 ton compost worden geproduceerd. Met een composteertijd van twee weken en zes weken rijping is op een dergelijk bedrijf steeds ongeveer 4000-5000 m³ materiaal aanwezig.



Figuur 18. Het composteringsproces.

Economie

Compost is € 18 per ton waard,^{50,51} maar de opbrengst hieruit is onvoldoende om de kosten van het composteerbedrijf te dekken. Er is dus nog een bijdrage nodig van de leverancier van de te composteren biomassa. Voor GFT moet bijvoorbeeld € 25 per ton worden betaald.

5.3.4 Andere biologische conversieprocessen

Met enzymen (afkomstig uit organismen) kunnen stoffen in andere stoffen worden omgezet. De enzymen functioneren hierbij als katalysatoren. Een voorbeeld is de omzetting van zetmeel met het enzym amylase in glucose. Het grootste toepassingsgebied van enzymen is dan ook het hydrolyseren van natuurlijke biopolymeren zoals cellulose en eiwit.

Inkuilen en Bokashi is het fermenteren van vast materiaal (gras, voedselresten) onder zuurstofloze condities met als doel organische zuren te produceren die de grondstof zodanig verzuren dat verder geen biologische activiteit meer mogelijk is. Dit is een manier om de grondstof te conserveren en maandenlang te kunnen bewaren.

Vermicultuur is het composteren van vaste biomassa met wormen. Door in een omgeving met voldoende zuurstof wormen de biomassa te laten eten ontstaat een soort compost.

5.4 Thermochemische conversieprocessen

5.4.1 Verbranding

Principe

Bij verbranding reageert de biomassa met een overmaat zuurstof en wordt vooral koolstofdioxide, water en as geproduceerd. Hierbij komt warmte vrij. Verbranding van biomassa kan worden gebruikt in elektriciteitscentrales waarin de warmte wordt ingezet om stoom te produceren waarmee een stoomturbine kan worden aangedreven. Er bestaan centrales waarin mengsels van kolen en biomassa kunnen worden verbrand maar afhankelijk van de geïnstalleerde technologie kan ook alleen biomassa worden gebruikt. Biomassa wordt ook gebruikt in ketels waarin stoom, warm water of alleen maar warmte wordt geproduceerd voor andere doelstellingen dan elektriciteitsproductie. Huishoudens gebruiken biomassa in haarden en voor de barbecue. Ook afval wordt verbrand waarbij de energie wordt gewonnen als bruikbare warmte. Dit gebeurt in afvalverbrandingsinstallaties (AVI).

Geschikte grondstoffen

De meest geschikte biomassa voor verbranding bevat weinig water en weinig mineralen. Kolencentrales willen voor de bijstook met biomassa mineralen-arme biomassapellets, bijvoorbeeld houtpellets. Deze toepassing zorgt ervoor dat er een significant aandeel aan duurzame biomassa voor toepassing in Nederland wordt ontsloten en dat reeds gedane investeringen in industriële infrastructuur goed worden benut. Het ontsloten biomassapotentieel kan dan op de middellange termijn (als de infrastructuur is afgeschreven, en andere duurzame energiebronnen voldoende zijn geïmplementeerd) worden ingezet voor alternatieve, hoogwaardige toepassingen in de bio-economie.

In Nederland wordt ook groenafval, kippenmest en de restfractie van huishoudelijk afval verbrand, na verwijdering van metalen, glas en papier. Deze restfractie bestaat voor een deel uit biomassa en voor een ander deel uit brandbare kunststoffen op fossiele basis. Stro, lignine, papierslib en cacaodoppen zijn ook geschikt voor verbranding. Naast houtpellets kunnen ook pellets van stroachtige biomassa gebruikt worden. Vooralsnog is echter de toegestane bijstook van niet-houtige biomassa vanuit overheidswege aan een maximum gebonden. In Nederland wordt het grootste deel van het slib uit afvalwaterzuiveringsinstallaties verbrand, maar door het hoge vochtgehalte (65-75%) van dit slib levert dat geen netto energie op.

Producten

Het hoofdproduct van de verbranding is warmte en die kan op diverse manieren worden benut. Daarnaast ontstaat as, een mineraalrijk product. De as uit kippenmest-

verbranding levert een hoogwaardige mest op, maar de as uit meestookcentrales (uit een mengsel van biomassa en kolen) wordt gebruikt in laagwaardige toepassingen als cement, beton en de wegenbouw. Vliegashuis uit afvalverbrandingscentrales wordt toegepast als vulstof in asfalt en bodemas wordt gebruikt als ophoogmateriaal in de wegenbouw. Onderzoek naar het winnen van specifieke mineralen (fosfaat) uit as is gaande. Rookgassen vormen een ander 'product' en rookgasreiniging is nodig voordat deze gassen geloosd mogen worden in de atmosfeer.



Figuur 19. In meerdere kolencentrales wordt biomassa bijgestookt.

Ervaring

In Nederland staan 12 afvalverbrandingsinstallaties, enkele grote elektriciteitscentrales waarin biomassa kan worden meegestookt met kolen en meer dan honderd kleinere biomassaverbrandingsinstallaties. De typische capaciteit van afvalverbrandingsinstallatie is de verwerking van 500-1.000 kton restafval per jaar. Grote elektriciteitscentrales produceren globaal 800 MW_e uit 3.000 kton steenkool/biomassa per jaar. De kleinere biomassaverbrandingsinstallaties staan vaak bij MKB-bedrijven en gebruiken enkele honderden tot duizenden ton biomassa per jaar. Deze installaties leveren de bedrijven energie.

In Ede levert Warmtebedrijf Ede warmte aan 20.000 woningen via een warmtenet. Deze warmte kan het aardgas vervangen en wordt opgewekt in drie installaties waarin lokaal snoeihout wordt verbrand. Elke centrale verwerkt 30 tot 90 ton snoeihout per dag en kan 9 MW aan warmte produceren.⁵²

Economie

Afvalverbrandingsinstallaties hebben een energie-efficiëntie van 25-30% (elektriciteit en warmte).^{53,54} De operationele kosten van de bedrijven met dit soort installaties zijn echter hoger dan de opbrengst van de geproduceerde energie en gescheiden afvalstromen, waardoor deze bedrijven primair afvalverwerkende bedrijven zijn met een tarief voor het aangeleverde afval. Kolen/biomassacentrales hebben een elektrisch rendement van 38% (oudere installaties) tot 46% (nieuwere installaties).⁵⁵ Kolen zijn goedkoper dan houtpellets (factor 3-4 op energiebasis), waardoor de productie van elektriciteit en warmte uit biomassa ook duurder is. In Nederland wordt dit momenteel gecompenseerd met een subsidieregeling (SDE+).

5.4.2 Vergassing

Principe

Bij vergassing wordt biomassa veelal bij hoge temperaturen (meer dan 600°C) met een ondermaat zuurstof omgezet in stook- of synthesegas. Dat gas bevat met name waterstof, koolmonoxide en methaan. In dit gas bevinden zich ook verontreinigingen die aan de soort brandstof zijn gerelateerd. Deze verontreinigingen komen in gereduceerde vorm voor, bijvoorbeeld zoutzuur, ammoniak en waterstofsulfide, en kunnen relatief eenvoudig worden uitgewassen. De koolmonoxide kan trouwens ook nog met een chemisch proces worden omgezet in koolstofdioxide, waarbij nog meer waterstof ontstaat. Deze koolstofdioxide kan vervolgens via adsorptieprocessen worden afgescheiden. Vergassing is derhalve prima geschikt om biomassaconversie te combineren met het afvangen van koolstofdioxide, wat potentieel kan resulteren in een negatieve koolstofdioxide-emissie (zie BECCS in paragraaf 6.6).

Geschikte grondstoffen

Vergassing is geschikt voor relatief droge biomassa-stromen (>85 % droge stof), vaak houtige biomassa. Dat kan ook sloophout zijn, en ook met kippenmest is ervaring.

Producten

Het bovengenoemde stook/syngas is weliswaar het primaire product, maar andere omzettingsprocessen zijn nodig om hieruit een bruikbaar product te maken. Stookgas kan worden gebruikt als brandstof in gasmotors en gasturbines voor de productie van elektriciteit en warmte. Met syngas (waterstof en koolmonoxide) kunnen chemicaliën worden gesynthetiseerd. Het meest voor de hand ligt methanisatie waarin waterstofgas en koolmonoxide wordt omgezet in een gas met een hoog methaangehalte. Dat gas wordt *Synthetic Natural Gas* (SNG) genoemd en kan na zuivering worden geïnjecteerd in het aardgasnet. Al het materiaal dat niet in gas omgezet is komt terecht in een

restfractie, *biochar* genoemd, dat wat eigenschappen betreft lijkt op actieve kool en gebruikt kan worden als bodemverrijker of als brandstof voor de verhitting van dezelfde vergasser. Het primaire product kan ook worden gebruikt om, na reiniging, direct te worden ingezet in de productie van warmte en elektriciteit. Daarnaast kan syngas worden gebruikt voor de synthese van methanol, ethanol en dimethylether. Met het Fischer-Tropsch proces (zie paragraaf 6.4.2) kan het gas worden omgezet in vloeibare koolwaterstoffen (meestal alkanen). Varianten van dit proces kunnen ook methanol en ethanol opleveren.

Ervaring

Houtvergassing is sinds 1870 gebruikt voor de productie van gas voor de straatverlichting (lichtgas) en in de jaren dertig zijn er auto's uitgerust met een houtvergasser. Na de jaren 40 is deze technologie op de achtergrond geraakt. In Europa zijn nu honderden kleine houtvergassers in bedrijf in bijvoorbeeld hotels en voor wijkverwarming. De capaciteit (het vermogen) beperkt zich dan tot enkele tientallen kW. In Nederland zijn nu maar twee grootschalige houtvergassers actief. In 1999 is bij de Amercentrale in Geertruidenberg een houtvergasser gebouwd die sloophout (B-hout) kon verwerken met een capaciteit van 150.000 ton per jaar. De gassen werden gebruikt als brandstof in de centrale.⁵⁶ Deze draait echter niet meer. In Delfzijl heeft een fabriek gestaan waarin glycerol, een reststroom uit biodieselfabrieken, werd omgezet in gas en vervolgens in methanol. Glycerol is een echter chemisch gezien een mooie grondstof en zou wellicht beter gebruikt kunnen worden voor chemische of biologische conversie in chemicaliën. Verder heeft een Nederlands bedrijf een aantal kippenmestvergassers (vermogen ongeveer 1 MW) geleverd in binnen- en buitenland.

Economie

Smekens *et al.* (2017)⁵⁷ merken op dat er in Nederland weinig praktijkvoorbeelden zijn van biomassavergassing (elders ook niet), maar gaan in hun economische beoordeling uit van een typische schaalgrootte van 11 miljoen m³ groen gas/jaar (ruim 10 MW). De investeringskosten van dit soort grote installaties bedragen tussen 7 en 30 miljoen euro voor de vergassing, gasreiniging en gasopwaardering. Dat maakt de realisatie lastig zolang de concurrentie moet worden aangegaan met goedkope fossiele bronnen. Het energetisch rendement van biomassa tot groen gas bedraagt 65%.⁵⁷ Als het geproduceerde gas wordt gebruikt in een gasmotor dan is het te verwachten elektrische rendement 29% (van groen gas tot elektriciteit) en het energetische rendement (elektriciteit plus warmte) 76%. Door ingrepen kan het elektrisch rendement naar 36% worden verhoogd, maar dat gaat dan ten koste van het totale energetische rendement

wat dan daalt naar 58%.⁵⁸ Dit betekent dat de rendementen dicht bij die van vergisting met gasopwerking komen.

5.4.3 Pyrolyse

Principe

Bij pyrolyse wordt de biomassa gedesintegreerd bij hoge temperatuur in afwezigheid van zuurstof. Hoewel de productie van houtskool (carbonisatie) en torrefactie (zie paragraaf 5.4.4) ook (langzame) vormen van pyrolyse zijn doelen we hier op de snelle pyrolyse die wordt uitgevoerd bij 500°C en waarbij ongeveer 70% van de biomassa wordt omgezet in een olie, de rest in *biochar* en gas. Deze pyrolyse wordt met recht snel genoemd, want deze duurt niet meer dan twee seconden. Het proces wordt meestal uitgevoerd in een reactor met een gefluidiseerd bed en het proces hoeft niet onder druk te werken.



Figuur 20. Bermgras kan worden ingezet in een pyrolyseproces.

Geschikte grondstoffen

Pyrolyse kan worden uitgevoerd met een breed palet aan biomassasoorten, maar er worden wel eisen gesteld aan de producten en daardoor ook aan de grondstoffen. Economisch ideaal zijn reststromen als agrarisch afval, snoeihout en bermgras. Echter door het hoge mineralengehalte van deze biomassasoorten kan de pyrolyseolie niet gebruikt worden als brandstof, maar in de toekomst wellicht als bron voor de winning

van chemicaliën. De biomassa mag niet te veel water bevatten (minder dan 10%). Gedroogd hout, gedroogde mest, bagasse, rijstkaf, stro, palmolieresiduen, olijfresiduen en gedroogd slib zijn getest of worden genoemd. De tropische grondstoffen kunnen het best in het land van oorsprong worden gepyrolyseerd, waarna de olie (met een hoge energiedichtheid) efficiënt over zee kan worden getransporteerd.

Producten

Het hoofdproduct van snelle pyrolyse is pyrolyseolie, een mengsel van honderden componenten met o.a. aromatische verbindingen (bijvoorbeeld fenol), suikerderivaten en organische zuren (bijvoorbeeld azijnzuur). Net zoals aardolie kan deze olie als brandstof dienen maar ook als een bron voor een nafta-krakerproces waarbij chemicaliën gewonnen kunnen worden. Een nadeel is het hoge zuurstofgehalte, waardoor de hoeveelheid die kan worden bijgemengd in een kraker beperkt is. De olie heeft een veel hogere dichtheid dan de oorspronkelijke biomassa wat handiger is bij bewaren, opslag en vervoer. Het bijproduct gas wordt meestal ingezet als energievoorziening van de pyrolyse reactor en de *biochar* als bodemverrijker.

Ervaring

In Nederland staan enkel proefinstallaties en één grote schaal pyrolyse-installatie, meteen de eerste ter wereld op commerciële schaal. Deze laatste, die door BTG geleverd is, produceert 20.000 m³ olie per jaar die door Friesland Campina wordt gebruikt als brandstof voor de productie van stoom en elektriciteit.⁵⁹ Recent is dit type reactor aangekocht door Finland, vier stuks, waarbij de complete installatie in Nederland wordt gebouwd.⁶⁰ In de VS en Canada staan demonstratie-installaties. Er is onderzoek gaande waarin pyrolyse meer gestuurd wordt, bijvoorbeeld met katalysatoren of met toevoegingen van waterstof, zodat er grotere hoeveelheden van bepaalde producten worden gevormd.

Economie

Volgens www.ecp-biomass.eu⁶¹ zijn de producten van een typische pyrolyse fabriek met als input relatief droog hout:

- Pyrolyse-olie: 0.55 GJ per GJ input
- Warmte: 0.21 GJ per GJ input
- Elektriciteit: 0,004 MWh per GJ input

De warmte wordt gebruikt om de biomassa te drogen. Als de biomassa-input zeer nat is (>60% vocht), is er additionele energie nodig voor droging. Investeringskosten voor

de pyrolyse-installatie zonder voorbereiding en nabewerking bedragen € 200-300/MW_{th}.⁶¹

5.4.4 Torrefactie

Principe

Ook bij torrefactie (roosten) gaat het om een ontleding van biomassa bij hoge temperatuur in afwezigheid van zuurstof. Echter, nu wordt een temperatuur van slechts 200-400°C gebruikt. In het proces wordt de biomassa gedroogd en omgezet in andere vaste stoffen waarbij ook gassen ontstaan. De gassen worden ingezet voor de energievoorziening van het proces. Het proces kan worden uitgevoerd in diverse reactoren zoals roterende trommels of banddrogers.

Geschikte grondstoffen

Torrefactie is in principe toepasbaar voor vele biomassasoorten, maar er is vooral veel ervaring met hout en houtige biomassa.

Producten

Het hoofdproduct is biokool (zwarte pellets) dat vergeleken met de oorspronkelijke grondstof (hout) droger is, een hogere massadichtheid heeft, een zevenmaal hogere energiedichtheid heeft, beter waterafstotend is en bestand tegen biodegradatie. Het materiaal is meer op steenkool gaan lijken en dat levert t.o.v. hout veel voordelen op bij het bewaren, de opslag en het transport van het materiaal. Het materiaal is geschikt voor vergassing en meestook in kolencentrales.

Ervaring en economie

Tien jaar geleden zijn er een paar grote torrefactie-fabrieken in Nederland operationeel geweest met productiecapaciteiten van 60.000 en 90.000 ton biokool per jaar, voor gebruik in grote elektriciteitscentrales. Door het wegvallen van subsidies was deze activiteit in Nederland niet meer rendabel. De Nederlandse kennis en ervaring wordt nu gebruikt om in landen met veel biomassa (o.a. Estland) grote torrefactie-installaties neer te zetten, terwijl de technologie in eigen land kleinschalig blijft (bedrijven en huishoudens).

5.5 Chemische conversieprocessen

In chemische processen worden stoffen omgezet in andere stoffen, al dan niet door reactie met een andere stof (reagens of reactant), eventueel in aanwezigheid van een katalysator, een stof die de snelheid van chemische reacties verhoogt zonder zelf

verbruikt te worden. De soorten chemische reacties zijn talrijk. In deze paragraaf worden enkele belangrijke chemische processen in het kort geïntroduceerd.

In Nederland worden veel plantaardige oliën en dierlijke vetten gebruikt voor het produceren van diverse stoffen. Plantaardige olie bestaat uit triglyceriden, een verbinding tussen glycerol en vetzuren.

Een voorbeeld van een product uit plantaardige olie is zeep, het produceren van zeep uit plantaardige olie is een proces dat al honderden jaren wordt uitgevoerd. Een ander voorbeeld is de productie van biodiesel. Plantaardige olie is direct te gebruiken als transportbrandstof, maar aanpassingen van de motor zijn dan nodig. Vandaar dat de olie meestal wordt omgezet in methyl-esters van de betreffende vetzuren. Het aldus verkregen product heet biodiesel en lijkt wat eigenschappen betreft op diesel. De productie van methyl-esters van vetzuren uit plantaardige olie is een transesterificatie die wordt uitgevoerd met methanol als reactant. Naast de methyl-esters ontstaat glycerol als restproduct.



Figuur 21. Polymelkzuur (PLA) is een veelgebruikt bioplastic.

Een veel gebruikte route voor de productie van bioplastics is het produceren van de gewenste monomeren uit biomassa (met diverse processen), gevolgd door polymerisatie van de monomeren tot een polymeer (lange keten). Op deze manier worden

bijvoorbeeld (bio)polyesters en polymelkzuur gemaakt en ook een materiaal als (bio)polyethyleen.

Chemie speelt ook een rol bij de productie van stoffen en producten uit cellulose, bijvoorbeeld carboxymethylcellulose, viscose en cellofaan.

In het buitenland is pulpen een belangrijke activiteit. Ten behoeve van de papierindustrie worden hout of andere lignocellulosehoudende materialen gepulpt: met chemicaliën wordt nagenoeg alle biomassa opgelost behalve cellulose en een deel van de hemicellulose.[†] De cellulosevezels zijn de belangrijkste grondstof voor het maken van papier en karton. In Nederland wordt nauwelijks meer gepulpt maar in het verleden is dat wel gedaan.



Figuur 22. Voor de productie van papier wordt hout gepulpt met chemicaliën.

Omdat veel biomassa bestaat uit lignocellulose zijn de afgelopen 20 jaar veel processen ontwikkeld die de cellulose, hemicellulose en lignine beter toegankelijk maken voor enzymen of chemische katalysatoren. Dat is de zogenaamde ontsluiting, te vergelijken met het pulpproces voor papier en karton. Deze kan op verschillende wijze worden bereikt. Door een hoge temperatuur (150-170°C) of met stoomexplosie, al of niet in aanwezigheid van een zuur, kan met name de hemicellulose gedeeltelijk worden

[†] Zie ook de uitgave *Lignine* in deze serie.

gehydrolyseerd waardoor de drie polymeren, cellulose, hemicellulose en lignine, beter toegankelijk worden. Met loog of een organisch oplosmiddel kan lignine worden opgelost en met bepaalde soorten schimmels kan lignine worden afgebroken.

Een andere belangrijke chemische conversie die ook niet meer in Nederland is te vinden is het looien van leer. Het looien van leer is het crosslinken van moleculen van het eiwit collageen met een looimiddel zoals driewaardig chroom. Er ontstaat dan een sterk complex dat niet snel biologisch of anderszins is af te breken.

5.6 Scheidingstechnieken

Bij het omzetten van biomassa in componenten die kunnen worden gebruikt in chemie, energie en materialen is naast conversie en mechanische bewerking scheiding van belang. Het komt vaak voor dat uit een oplossing met verbindingen bepaalde doelcomponenten moeten worden gewonnen en verder moeten worden gezuiverd. Een voorbeeld hiervan is de destillatie van ethanol uit een fermentatievloeistof. Ook het scheiden van vaste stoffen en vloeistoffen, zoals het persen van olie uit zaden, het extraheren van stoffen uit biomassa, zoals lignine uit hout, en het scheiden van deeltjes vaste stof (zeven) worden regelmatig toegepast in productieprocessen voor de bio-economie.

Scheidingstechnieken worden overigens in vele sectoren gebruikt, o.a. in de chemie, voedingsmiddelentechnologie, afvalverwerking en waterzuivering, en zijn dus niet uniek voor de bewerking van biomassa.

6 Nieuwe technologieën

6.1 Inleiding

Voor het realiseren van een technisch en economisch haalbare bio-economie van enige omvang zullen nieuwe technologieën ontwikkeld moeten worden. Nieuwe landbouwtechnologieën zijn nodig om meer biomassa te kunnen produceren op aarde. Onderzoek naar betere landbewerking, bemesting en teeltmethoden zijn gaande. Eén van de spectaculairste ontwikkelingen is het verbeteren van de fotosynthese in planten zodat deze efficiënter met licht kunnen omgaan en dus sneller groeien en een hogere opbrengst halen. Wereldwijd zijn diverse teams bezig om dit mogelijk te maken. Daarnaast moet nog veel worden verbeterd aan technologieën die biomassa bewerken en omzetten in producten. Veel van de in hoofdstuk 5 gepresenteerde technologieën zijn economisch nog matig rendabel, mede door een lage prijs van fossiele grondstoffen, en veel onderzoek richt zich op verdere ontwikkeling en optimalisatie daarvan. Daarnaast worden nieuwe varianten van deze technologieën ontwikkeld of zelfs geheel nieuwe richtingen bewandeld. Een voorbeeld van zo'n nieuwe richting is de elektrificatie van de chemie. Ook worden voortdurend nieuwe producten ontwikkeld die gebaseerd zijn op biomassa. Deze producten hebben soms vergelijkbare eigenschappen als bekende producten gebaseerd op fossiele grondstoffen, maar soms ook geheel nieuwe eigenschappen. Een andere weg die volop wordt gevolgd is de productie van chemicaliën uit biomassa die exact hetzelfde zijn als chemicaliën uit fossiele grondstoffen, de zogenaamde *drop-in* chemicaliën, bijvoorbeeld bioethanol en het hieruit geproduceerde bio-ethyleen. Het voordeel van deze route is de aanwezigheid van een bestaande markt voor die producten.

In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op nieuwe ontwikkelingen, vooral in Nederland, op het gebied van biologische, thermochemische en chemische conversie en het afvangen, opslaan of benutten van koolstofdioxide.

6.2 Nieuwe biologische conversieprocessen

Opvallende Nederlandse onderzoekstrajecten, als het gaat om nieuwe processen met biologische conversies, zijn o.a. de productie van middellange vetzuren (bijvoorbeeld capronzuur) uit azijnzuur. In een proces dat ontwikkeld is door de WUR en ChainCraft worden organische reststromen eerst biologisch omgezet in organische zuren en vervolgens vindt in een tweede biologisch proces verlenging van de keten plaats met ethanol als reactant wat o.a. capronzuur oplevert.⁶² In Amsterdam is een demonstratiefabriek opgestart waarin 1000 ton capronzuur per jaar kan worden geproduceerd. Capronzuur kan worden gebruikt onder andere als gewasbeschermingsmiddel en als veevoeradditief.

Reverdia (sinds april 2019 volledig vallend onder Roquette) heeft een fermentatieproces ontwikkeld voor de productie van barnsteenzuur gebaseerd op een gist.⁶³ Het voordeel van het gebruik van gist is dat het proces bij een lage pH kan worden uitgevoerd waardoor er weinig of geen loog als hulpstof nodig is. Er staat een fabriek in Italië waarin jaarlijks 10.000 ton barnsteenzuur wordt geproduceerd. Dit is een ontwikkeling die relatief nieuw is maar al wel op grote schaal wordt uitgevoerd.



Figuur 23. Maiszetmeel kan de basis vormen voor de productie van chemicaliën als barnsteenzuur. Het eiwit uit de mais kan dan naar voeding.

Een trend die niet te missen is, is het gebruik van gassen als fermentatiesubstraat, bijvoorbeeld mengsels van waterstofgas, koolmonoxide en koolstofdioxide, welke in principe uit biomassa kunnen worden geproduceerd. Grote vorderingen zijn gemaakt met mengsels van waterstofgas en koolmonoxide voor de biologische productie van ethanol.⁶⁴ Lanzatech heeft in China een paar pilot plants in bedrijf die 300 ton ethanol per jaar kunnen produceren.⁶⁵ Deze gebruiken weliswaar gas uit hoogovens, maar in principe is ook gas uit de vergassing van biomassa te gebruiken. Ook andere alcoholen en organische zuren kunnen uit waterstofgas en koolmonoxide worden gemaakt.

De productie van het methaanhoudende biogas uit biomassa is bekend. Meestal wordt biogas als energiebron gebruikt. Echter, methaan kan ook worden gebruikt als substraat voor de microbiologische productie van diverse chemicaliën. Daarmee ontstaat steeds meer ervaring. Decennia geleden is methaan nog gebruikt voor de productie van *single cell protein* op industriële schaal, maar nu richt het onderzoek zich op chemicaliën, o.a.

melkzuur, de grondstof voor de bioplastic polymelkzuur. Dit onderzoek bevindt zich nog op laboratoriumschaal,⁶⁶ evenals de omzetting van koolstofdioxide in melkzuur door bacteriën. Het economisch vervangen van de nu gangbare melkzuurproductie door fermentatie van suiker zal een uitdaging zijn.

De productie van PHA is nog te kostbaar. Om dat te ondervangen wordt onderzoek verricht naar kosten-efficiëntere processen, goedkopere substraten en waardevollere vormen van PHA, bijvoorbeeld met alkanoaten met langere ketens.^{67,68} Onderzoek is gaande om PHA ook uit methaan te kunnen maken.⁶⁹

Eén van de grootste wensen van de bio-economie is de vervanging van de kunststof PET (polyethyleentereftalaat), bekend van de frisdrankflessen en textielvezels, nu nog geproduceerd uit fossiele grondstoffen. Een belangrijke kandidaat hiervoor is PEF (polyethyleenfuraandicarbonzuur). Corbion heeft een biologisch proces waarmee furaandicarbonzuur kan worden geproduceerd uit furaan, een afbraakproduct van suiker.⁷⁰ Avantium heeft een chemische route ontwikkeld (zie paragraaf 6.4.1) voor de productie van furaandicarbonzuur uit suiker.

Naast het gebruik van nieuwe substraten en het mogelijk maken van 'nieuwe' biologische omzettingen vinden er ook innovaties plaats op het gebied van genetische modificatie van de betrokken micro-organismen. Het doel van deze modificatie is het organisme te laten doen wat wij willen. Met nieuwe technieken zoals CRISPR-CAS kunnen deze modificaties gericht worden uitgevoerd.

6.3 Nieuwe thermochemische processen

Eén van de vernieuwingen waaraan diverse onderzoeksinstituten en bedrijven werken is de vergassing van biomassa in superkritisch water. Voor conventionele vergassing van biomassa moet de biomassa droog genoeg zijn, wat een beperking is van het toepassingsgebied. Nu blijkt dit niet op te gaan als wordt gewerkt boven het kritische punt van water. Het kritische punt is een begrip uit het vakgebied van de thermodynamica. Het is een combinatie van één bepaalde waarde van temperatuur, druk, samenstelling en eventueel andere thermodynamische variabelen, waarbij een stof of mengsel een bijzonder gedrag vertoont. Het kritische punt van water ligt bij 218 bar en 374°C.⁷¹ Als de druk en/of temperatuur hoger liggen wordt in het superkritisch gebied gewerkt. Water heeft dan andere eigenschappen en dat maakt dat er toch nog gewerkt kan worden met biomassa die tussen 70-90% vocht bevat. Onder superkritische omstandigheden is er geen verschil meer tussen vloeistof en gas. Hierdoor hoeft het water niet te worden verdampt. Biomassa kan in dit proces bijna volledig worden omgezet in waterstofgas, methaan, koolmonoxide en koolstofdioxide. Ook wordt er geen teer als bijproduct meer geproduceerd. De hoge druk lijkt kostbaar, maar daardoor is er ook geen compressor meer nodig voor nageschakelde processen. Eén van de problemen is het neerslaan van mineralen onder deze omstandigheden, wat kan leiden tot

verstoppingen. Het proces wordt alleen in het laboratorium en in *pilot plants* beproefd. Een dergelijke proefinstallatie staat bij Waterschap Aa en Maas voor de vergassing van zuiveringsslib.⁷²

6.4 Nieuwe chemische conversieprocessen

6.4.1 Koolhydraten als grondstof

Om de al eerdergenoemde biobased kunststof PEF te kunnen produceren heeft Avantium een proces ontwikkeld dat via een reeks van chemische stappen het furaandicarbonzuur kan produceren uit glucose. Omdat dit proces recentelijk is bewezen op pilot plant schaal is het bedrijf van plan om binnen een paar jaar een grootschalige productie van furaandicarbonzuur te starten.⁷³

In Nederland bestaat ook veel aandacht voor het vinden van een alternatief voor aromaten die nu uit aardolie worden geproduceerd, meestal als bijproduct van olieraffinage. Door de krimpende aardolie-raffinage-capaciteit als gevolg van de overschakeling naar aardgas (uit o.a. Qatar) en schaliegas dreigt een tekort te ontstaan aan aromaten. Tegelijkertijd is er een wens om aromaten duurzaam te produceren, bijvoorbeeld in de vorm van bioaromaten. In het programma BIORIZON worden technologieën ontwikkeld waarmee koolhydraten en lignine uit biomassa kunnen worden omgezet in bioaromaten.⁷⁴ Lignine geldt als een van de grootste bronnen van aromatische verbindingen op aarde.

Daarnaast wordt ook onderzoek gedaan naar het toepassen van suikers uit reststromen van de voedingsmiddelenindustrie, bijvoorbeeld uit suikerbietenpulp (Pulp2Value).⁷⁵

6.4.2 Gassen als grondstof

Een andere veelbelovende ontwikkeling is het Fischer-Tropsch proces met biobased grondstoffen. Met dit proces kan een mengsel van koolmonoxide en waterstofgas in aanwezigheid van een katalysator worden omgezet in een vloeibare brandstof die uit koolwaterstoffen bestaat. Het gasmengsel, ook syngas (synthesegas) genoemd, wordt in de praktijk meestal uit steenkool (CTL: *coal-to-liquids*) of aardgas (GTL: *gas-to-liquids*) gewonnen. Grote Fischer-Tropsch installaties zijn te vinden in Zuid-Afrika, Qatar en Maleisië. Het *biobased* alternatief is BTL (*biomass-to-liquids*) waarin o.a. het Fischer-Tropsch proces wordt toegepast of andere processen die methanol en ethanol opleveren. Er bestaan op dit moment geen commerciële BTL installaties, alleen maar pilot plants. Wel is er een vrij groot demonstratieproject geweest in Duitsland waarin een installatie met een capaciteit van 15.000 ton brandstof per jaar heeft gefunctioneerd.

De elektrificatie van de chemie is een nieuwe trend die gebruikt kan worden om biomassa te benutten. Elektriciteit die is geproduceerd uit hernieuwbare bronnen (biomassa, wind, zon) kan gebruikt worden om elektrochemische conversies uit te

voeren: met stroom omzetten van een stof in een andere stof. De grondstoffen kunnen ook nog eens afkomstig zijn van biomassa of op een andere manier hernieuwbaar zijn. Veel aandacht gaat tegenwoordig uit naar eenvoudige verbindingen zoals methaan, water, zuurstof, stikstof en koolstofdioxide. Zo is het mogelijk om met elektrochemie methanol te maken uit methaan. Ook is een alternatief ontwikkeld voor de productie van mierenzuur, nu nog uit fossiele bronnen. In dit alternatief wordt koolstofdioxide met duurzame elektriciteit in mierenzuur omgezet. Het onderzoek naar dit soort conversies wordt nog op laboratoriumschaal uitgevoerd, bijvoorbeeld in het Nederlandse programma VoltaChem.⁷⁶ Ook zijn er verschillende onderzoeksprogramma's die zich richten op de ontwikkeling van kunstmatige fotosynthese.[‡]

6.4.3 Lignine als grondstof

Lignine komt in grote hoeveelheden vrij bij het pulpen van papier en verwacht wordt dat deze hoeveelheden sterk gaan toenemen door de komst van lignocellulose-bioraffinaderijen. Tot nu toe wordt lignine vooral gebruikt als brandstof en lignosulfonaten worden gebruikt als bindmiddel of plasticifeerder in beton. De kleine hoeveelheden lignine die vrijkomen uit soda pulping van stro worden gebruikt in lijm. De R&D-activiteiten op het gebied van het ontwikkelen van processen die lignine gebruiken als grondstof voor de productie van chemicaliën en materialen nemen nu een



Figuur 24. Lignine is een bron van aromatische verbindingen (foto: WFBR).

[‡] Zie ook de uitgave *Kunstmatige fotosynthese* in deze serie.

grote vlucht. In die nieuwe processen wordt de lignine als zodanig gebruikt, afgebroken tot monomeren of gemodificeerd waarbij de polymere structuur wordt benut. Een voorbeeld van het gebruik van lignine als zodanig is het gebruik als vervanger van bitumen in asfalt. Lignine heeft namelijk vergelijkbare bindende eigenschappen als bitumen, de teerachtige kleefstof in asfalt. Het onderzoek is nu zover dat mengsels van lignine en asfalt zijn gebruikt bij het aanleggen van proefstukken weg en fietspad.⁷⁷ Voorbeelden van modificatie met behoud van de polymere structuur is de vervaardiging van koolstofvezels uit lignine. Deze vezels kunnen in hoogwaardige composieten worden gebruikt. Ook actief kool kan uit lignine worden vervaardigd. Onderzoek is gaande waarin lignine wordt gemodificeerd door er groepen aan te hangen (carboxymethylering, aminering, etc.) waardoor de eigenschappen van de lignine worden veranderd. Het meeste onderzoek gaat uit naar de depolymerisatie van lignine, dus het produceren van kleinere moleculen (monomeren), vaak met een aromatisch karakter. Het



Figuur 25. Op de campus in Wageningen is in 2017 een fietspad met lignine-asfalt geopend (foto: Marte Hofsteenge).

opknippen van de polymeerketens kan bijvoorbeeld gebeuren door pyrolyse (zie hoofdstuk 5). Veel onderzoek gaat uit naar het sturen van de afbraak door het kiezen van de juiste katalysator.⁷⁸ Ook met zuur of loog bij hoge temperatuur en druk kan lignine worden opgeknipt in stukjes. Vaak levert dat moleculen op waarin nog zuurstof aanwezig is, wat voor bepaalde toepassingen, zoals stabiele hoogwaardige vloeibare transportbrandstoffen en toepassingen waarvoor een lager kookpunt nodig is,

ongewenst is. De zuurstof blijkt verwijderd te kunnen worden door de producten te laten reageren met waterstofgas in aanwezigheid van een metaalkatalysator.⁷⁸ Voor sommige toepassingen is juist veel zuurstof nodig, bijvoorbeeld als er organische zuren geproduceerd moeten worden. Lignine kan dan worden gepolymeriseerd en geoxideerd met ozon of waterstofperoxide in aanwezigheid van een metaaloxide. Al deze processen zijn beproefd op laboratoriumschaal.⁷⁸ De grootste uitdaging in deze ontwikkeling is het



Figuur 26. Voorbeeld van een cascade bij afvalverwerker Meerlanden.

feit dat er steeds een mengsel van monomeren wordt gevormd, wat wordt veroorzaakt door de heterogene samenstelling van lignine. Veel onderzoek richt zich op het vinden van katalysatoren die ervoor zorgen dat bepaalde producten in het mengsel dominant worden. De kansen voor deze depolymerisatie-route liggen vooral op het gebied van de productie van vliegtuigbrandstof en het vervangen van fenol in bijvoorbeeld fenol-formaldehyde-harsen.⁷⁸

6.5 Bioraffinage en cascades

Uit elke biomassasoort kunnen meerdere producten worden gemaakt. Het geheel van bewerkingen moet dan ook zodanig worden georganiseerd dat de kosten-efficiënte winning van deze producten mogelijk is. We spreken dan van bioraffinage: de duurzame verwerking van biomassa in een spectrum van vermarktbaar producten en energie. Bioraffinage doet denken aan wat we al meer dan een eeuw kennen uit de olie-industrie: olieraffinage waarin ruwe olie deels wordt gescheiden in lichtere en zwaardere fracties maar waarin ook omzettingen (kraken) worden gepleegd. Een voorbeeld van bioraffinage is de winning van natief eiwit uit reststromen van groente-snijderijen. Het gewonnen eiwit vertegenwoordigt een hoge waarde maar een klein massa-aandeel van die groente. De rest kan worden vergist onder productie van biogas. Echter niet alle groentebestanddelen worden goed vergist. Het digestaat kan worden ingedikt en gecomposteerd waarmee een derde product wordt geproduceerd: compost. Ook de aardappel kan worden geraffineerd. Zo wint Avebe niet alleen zetmeel uit aardappelen maar ook Solanic, een eiwit met gelerende eigenschappen dat dierlijke eiwitten in bepaalde voedingsmiddelen kan vervangen.

Vaak wordt bij de winning van producten uit biomassa een bepaalde volgorde gehanteerd: eerst wordt het product gewonnen met de hoogste waarde en vervolgens producten met een lagere waarde. Dat is één van de vormen van cascadering. In de mooiste cascades wordt de biomassa volledig benut (zie ook Figuur 26 en Figuur 27).

6.6 Afvangen, opslaan en benutten van koolstofdioxide

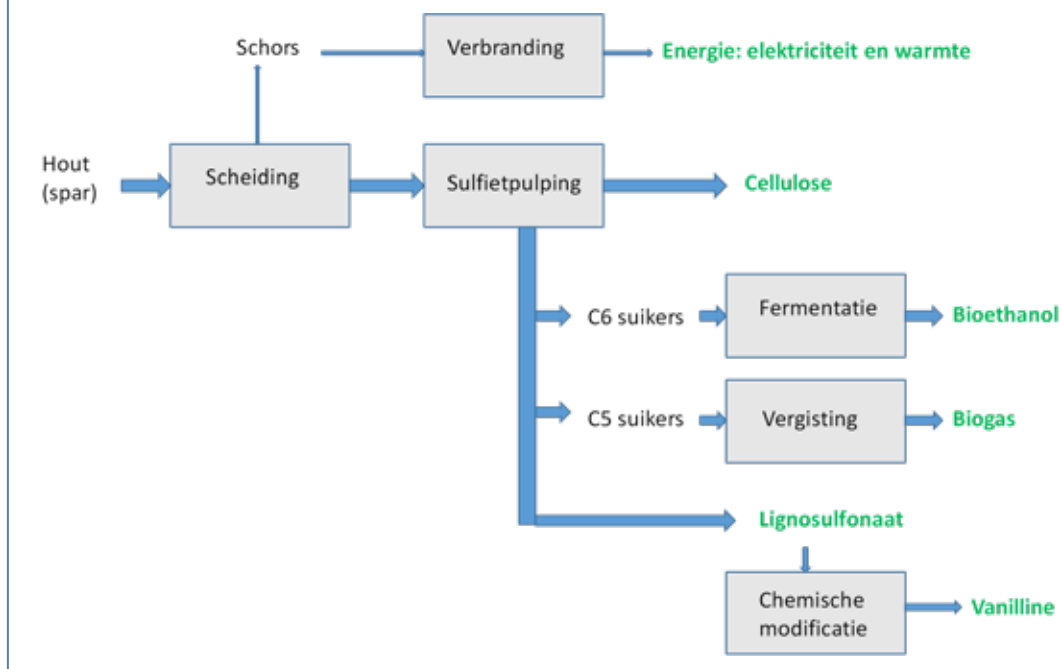
Eén van de redenen dat we biomassa willen gebruiken in plaats van fossiele bronnen is de vermindering van de emissie van langcyclische koolstofdioxide (zie ook hoofdstuk 1). De benutting van biomassa als energiebron levert weliswaar een emissie van koolstofdioxide op, maar dezelfde hoeveelheid koolstofdioxide is in de jaren daarvoor uit de atmosfeer gehaald door planten en wordt de komende jaren weer uit de atmosfeer gehaald door de aangroei van plantmateriaal. Op deze manier ontstaat een korte cyclus van enkele jaren en is de netto koolstofdioxide-emissie gering. Deze netto koolstofdioxide-emissie kan zelfs negatief worden als de koolstofdioxide die geproduceerd wordt in biomassacentrales en bioraffinaderijen niet in de atmosfeer wordt geloosd maar wordt afgevangen en wordt opgeslagen in de ondergrond.

Voorbeeld van een bioraffinaderij Borregaard: producten uit hout

Het Noorse bedrijf Borregaard heeft een bioraffinaderij in Sarpsborg. In deze fabriek, die al meer dan een halve eeuw operationeel is, wordt hout als grondstof gebruikt. In het productieproces staat sulfietpulping centraal. Uit 1000 kg (droge stof) snippers sparrenhout worden de volgende hoofdproducten geproduceerd:⁷⁹

- 400 kg cellulose voor kleding, verf, bouw en cosmetica
- 400 kg lignosulfonaat voor beton (additief), diervoeding en pigmenten
- 50 kg ethanol voor medicijnen en autoverzorging en als brandstof
- 3 kg vanilline voor voeding, parfum en medicijnen

Daarnaast worden de reststromen omgezet in energiedragers. Hieronder staat een vereenvoudigd stroomschema van het productieproces.



Figuur 27. Voorbeeld van een bioraffinaderij gebaseerd op hout.

De techniek van het afvangen en opslaan van koolstofdioxide (*CCS: carbon capture and storage*) is vooral bekend uit experimenten met rookgassen uit kolencentrales. Deze gassen bevatten 10-15% koolstofdioxide.⁸⁰ In CCS wordt de koolstofdioxide uit rookgassen afgevangen door gaswassers met amine-oplossingen en vervolgens in geconcentreerde vorm vrijgemaakt en getransporteerd naar een plaats waarin het ondergronds, in een stabiele geologische formatie, wordt opgeslagen. De eerste demonstraties van CCS zijn al uitgevoerd in 1996 in Noorwegen en in 2018 waren er wereldwijd 23 grote CCS installaties operationeel of in aanbouw, samen goed voor 40 Mton koolstofdioxide-opslag per jaar.⁸¹ Dat is 0,1% van de wereldwijde uitstoot van koolstofdioxide. Er kleven nog twee grote problemen aan deze methode: kosten en veiligheid. Het afvangen van koolstofdioxide uit rookgas van kolencentrales kost meer dan 20% van de energie die door deze centrales wordt geproduceerd. Experimenten met efficiëntere absorptiemiddelen zijn gaande. Verder bestaan er zorgen over de veiligheid van ondergrondse opslag van koolstofdioxide in verband met lekkages naar het maaiveld. Verbetering van de technologie en meer ervaring is dus nodig. CCS is allesbehalve een uitontwikkelde technologie.

Pas CCS toe op installaties die biomassa omzetten in energie (en koolstofdioxide) en je krijgt BECCS (*bio-energy with carbon capture and storage*).⁸² Wereldwijd zijn daarvan nu zes grote installaties operationeel, alle bij bioethanolfabrieken en verbrandingsinstallaties voor huishoudelijk afval. Het grote voordeel van BECCS bij bioethanolfabrieken is dat de koolstofdioxide een concentratie heeft van nagenoeg 100%, wat bespaart op het energieverbruik van CCS. Het grootste project wordt sinds 2017 dan ook uitgevoerd bij een bioethanolfabriek in Illinois waar jaarlijks 1 miljoen ton koolstofdioxide ondergronds wordt opgeborgen in zandsteen.⁸³ In Nederland wordt een pijpleiding gebouwd voor koolstofdioxide uit diverse bronnen voor injectie in uitgeputte gasvelden in de Noordzee. Het gaat dan om 2,5 Mton koolstofdioxide per jaar.⁸³ BECCS lijkt ook geschikt voor biomassacentrales. Sinds februari 2019 wordt bij de biomassacentrale in het Engelse Drax een pilot plant project uitgevoerd met het afvangen van koolstofdioxide.⁸⁴ Dit is een technologie waar wel een flink prijskaartje aan hangt.

In plaats van koolstofdioxide op te bergen kan het ook ergens voor gebruikt worden. Dat is CCU (*carbon capture and utilization*) en de mogelijkheden zijn o.a.:

- Omzetten in brandstof, bijvoorbeeld met algen of technieken op het gebied van *solar fuels*. *Solar fuels*, eenvoudige organische stoffen, kunnen met chemische technologie gemaakt worden uit koolstofdioxide en water met behulp van zonlicht.
- Omzetten in chemicaliën en materialen zoals methanol, polycarbonaten, azijnzuur en ureum

-
- Omzetten in calciumcarbonaat of magnesiumcarbonaat en dat gebruiken als bouw materiaal.
 - Gebruiken voor het verbeteren van oliewinning in olievelden: injectie van koolstofdioxide in het veld zet de olie in beweging.
 - Gebruiken in de glastuinbouw voor een snellere groei van planten.

De technieken van de eerste drie punten in de lijst bevinden zich nog in een ontwikkelingsstadium. Meer ervaring bestaat met het gebruik van koolstofdioxide uit bioraffinaderijen voor de glastuinbouw. Een bioethanolfabriek in de omgeving van Rotterdam levert jaarlijks 100 kton koolstofdioxide aan de glastuinbouw en in een afvalverbrandingsinstallatie in Duiven wordt elk jaar 50 kton koolstofdioxide gewonnen uit rookgas en eveneens gebruikt in de glastuinbouw.⁸³

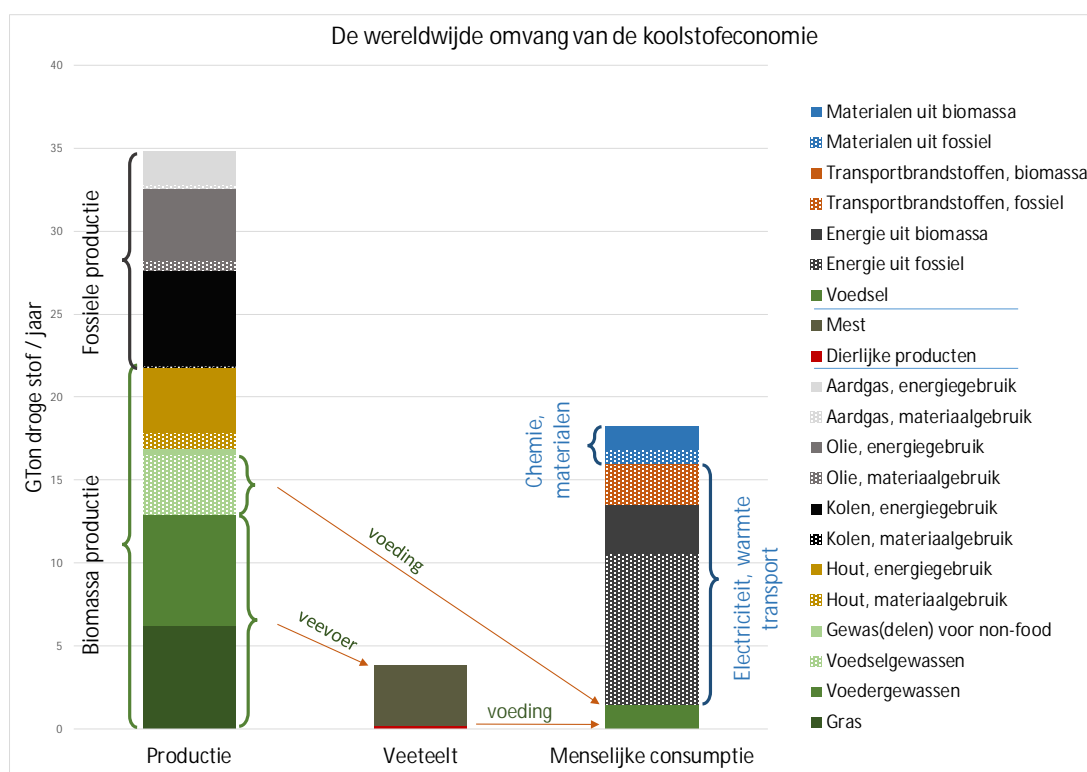
Volledigheidshalve moet worden vermeld dat ook onderzoek wordt uitgevoerd op het gebied van directe afvang van koolstofdioxide uit de lucht (buitenlucht). Dit kan o.a. door absorptie in natronloog. Na de absorptie kan de loog worden verhit waardoor de koolstofdioxide in geconcentreerde vorm vrijkomt en daarna opgeslagen kan worden. Ook adsorptie aan het oppervlak van deeltjes op amine-basis is een werkende methode. Na verhitting onder vacuüm komt de koolstofdioxide in geconcentreerde vorm vrij. Scheiding met membranen is een derde methode en een geheel andere benadering is de reactie met magnesium uit gesteente met veel magnesiumsilicaat (o.a. olivijn). Het wordt dan vastgelegd als een mineraal. Al deze methoden bevinden zich nog in de kinderschoenen en kampen met een hoog energieverbruik (hoger dan bij CCS uit rookgassen) veroorzaakt door de lage concentratie koolstofdioxide in lucht (0,04%).

De koolstofdioxide concentratie in de atmosfeer kan ook worden beïnvloed door veranderingen in het landgebruik. Het *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) heeft daar diverse malen over geschreven en noemt dit effect LULUCF (*land use, land-use change and forestry*). Zo veroorzaakt bijvoorbeeld de transformatie van bos in landbouwgrond een netto koolstofdioxide-emissie.

7 Hoe de toepassing afhangt van de biomassasoort

7.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 is een overzicht gegeven van de huidige beschikbaarheid aan biomassa en is een vervangingsscenario beschreven waarin alle fossiele grondstoffen zijn vervangen door hernieuwbare grondstoffen waaronder biomassa. Aangezien er grenzen zijn aan het produceren en vrijmaken van duurzame biomassa voor de bio-economie is het van belang dat biomassa daar wordt ingezet waar geen goede alternatieven zijn voor de productie van alle producten die we nodig hebben. Dit hoofdstuk geeft een kwalitatief beeld van de meest efficiënte en logische inzet van biomassa in de bio-economie voor de toepassingen humane consumptie, diervoeding, energie, materialen, chemie en compost en bodemverbetering. Als handvat is in Figuur 28 een overzicht gegeven van de huidige wereldwijde inzet van biomassa en fossiele grondstoffen in de verschillende toepassingen.



Figuur 28. De huidige wereldwijde omvang van de productie van biomassa en fossiele grondstoffen en de toepassing van deze grondstoffen.

7.2 Biomassa-eigenschappen in relatie tot geschikte toepassingen

7.2.1 Biomassa-eigenschappen zijn bepalend

De toepassing en transporteerbaarheid van biomassa hangt af van zijn fysische en chemische eigenschappen en wettelijke status. De volgende paragrafen geven daar meer informatie over. Figuur 29 bevat een overzicht van relevante eigenschappen van diverse soorten biomassa en biomassaproducten. Figuur 30 koppelt daar een geschikte toepassing en/of verwerking aan.

7.2.2 Vochtgehalte

Natte biomassa is ongunstig voor thermochemische processen zoals pyrolyse en vergassing, wegens de extra energie die nodig is voor de opwarming van het water.⁸⁵ Voor vergassing ligt de toelaatbare grens ongeveer bij 15% vocht.⁸⁶ Ook verbranding, bijvoorbeeld in elektriciteitscentrales, is minder efficiënt naarmate de biomassa natter is. Ook als grondstoffen getransporteerd of wekenlang bewaard moeten worden is natte biomassa ongunstig wegens opslagkosten en houdbaarheid. Natte biomassa is wel geschikt voor vergisting en als grondstof voor fermentatieprocessen of voor inkuilen. Voorbeelden van natte biomassa zijn gras, GFT-afval, mest, loof, suikerbieten, aardappels, groente- en fruit reststromen, algen, waterplanten en slib uit rioolwaterzuiveringsinstallaties. Droge grondstoffen zijn hout, zaagsel, plantaardige olie, stro, pitten, oud papier, suiker en granen.

7.2.3 Dichtheid

Als een laag vochtgehalte gecombineerd kan worden met een hoge dichtheid (ton/m³) is dat gunstig voor transport, bijvoorbeeld import en export, en handling in het algemeen. Hoge dichtheden worden bereikt bij pellets van hout, gras of stro, hout, getorrificeerde biomassa, plantaardige olie, suiker en graan. Deze dichtheden worden ook bereikt bij afgeleide producten als pyrolyseolie, methanol, ethanol, butanol en vloeibare methaan. Minder gunstig zijn losse stro en bagasse.

7.2.4 Koolhydratengehalte

Koolhydraatrijke grondstoffen zoals granen en suikerbieten vormen een belangrijke basis voor onze voeding. Daarnaast zijn het ook belangrijke grondstoffen voor de chemie om door middel van chemische conversies en/of fermentaties chemische bouwstenen te produceren voor materialen of transportbrandstoffen.⁸⁷ Suiker en graan zijn goede grondstoffen voor de fermentatie industrie, voor de productie van bijvoorbeeld ethanol, melkzuur (grondstof voor PLA), butanol, barnsteen zuur (voor de productie van PBS, een afbreekbaar bioplastic met eigenschappen die lijken op die van PP), aminozuren en diverse andere organische zuren.

Biomassa	Veel vocht	Hoge dicht- heid droge stof	Veel kool- hydra- ten	Veel eiwit	Vezels	Veel olie	Veel mine- ralen	Afval- status
Granen								
Stro								
Plantaardige olie								
Schroot van oliehoudende gewassen								
Suikerbieten								
Aardappels								
Groenten en reststromen								
Fruit en reststromen								
Microalgen								
Wieren								
Waterplanten								
Gras								
Hout								
Houtpellets								
Snoeihout								
Graspellets								
Stropellets								
Getorrificeerde biomassa								
Loof								
Mest								
Oud papier								
GFT								
ONF								
Slib uit rioolwater- zuiverings- installaties								

Figuur 29. Eigenschappen van de verschillende biomassa grondstoffen.

Biomassa	Humane consumptie	Diervoeding	Energie			Materialen		Chemie	Compost
			Biogas	Elektriciteit en warmte	Transport-brandstoffen	Papier/karton	Kunststoffen		
Mest									
Oud papier									
GFT									
ONF									
Slib uit rioolwater-zuiveringsinstallaties									

Figuur 30. Geschikte toepassingen en verwerkingen van soorten biomassa en biomassaproducten in de toekomst; wit is ongeschikt, donker is zeer geschikt. Hout voor constructie en stalstrooisel zijn niet meegenomen.

Het gebruik van graan en suiker buiten de voedingsmarkt is omstreden maar nieuwe duurzaamheidsstudies hebben aangetoond dat er geen voordeel is in het gebruik van tweede generatie grondstoffen (bv lignocellulose) boven eerste generatie zoals graan en suikerbieten.⁸⁸ Op dit moment is er door het loslaten van de suikerquota in 2017 en door het verhogen van de opbrengsten een overschot aan suiker. Daarbij zal de afzet van suiker in voedingsmiddelen afnemen. Het is de verwachting dat de EU een netto exporteur gaat worden voor suiker⁸⁸ en dat er ruimte gaat ontstaan voor de inzet van eerste generatie suikers voor de chemie.

7.2.5 Eiwitgehalte

Bij verbranding en thermochemische processen werkt eiwit storend wegens de geproduceerde NH₃ en NO_x die materialen kunnen aantasten en een negatieve milieu-impact hebben. Bij vergisting en fermentatieprocessen kan de aanwezigheid van middelmatige hoeveelheden eiwitten gunstig zijn. Voor veevoeder is eiwit een pre. Gras, oliehoudende zaden en het afgeleide schroot, noten, groenten, microalgen, slib uit rioolwaterzuiveringsinstallaties en granen zijn eiwitrijk.

7.2.6 Vezels

Hout, gras, stro, en stengels bestaan uit vezelstructuren van cellulose, hemicellulose en lignine en kunnen worden ingezet in materiaaltoepassingen waar die structuur nodig is zoals papier, karton en bouwmaterialen. Specifieke vezelgewassen zoals katoen, vlas en hennep bevatten sterke vezels die kunnen worden ingezet voor textiel en in composieten.

7.2.7 Plantaardige olie

Plantaardige olie is in de eerste plaats een grondstof voor humane voeding. Plantaardige olie wordt daarnaast ook ingezet in de chemie, bijvoorbeeld voor de productie van oppervlakte-actieve stoffen, voor alkydverf en voor een product als linoleum. Plantaardige olie kan ook dienen als transportbrandstof. Relevante biomassastromen zijn palmolie, oliehoudende zaden (soja, zonnebloem, olijf) en afgewerkte frituurolie.

7.2.8 Mineralengehalte

Bij veel toepassingen stoort de fractie aan mineralen in biomassa, in het bijzonder bij verbranding en thermochemische processen. Biochemische processen zoals vergisting, compostering en fermentatieprocessen zijn minder gevoelig voor mineralen. Mineraalrijke biomassa wordt vertegenwoordigd door de organische natte fractie (ONF) van huisvuil, GFT-afval, mest, stro, gras, suikerbieten, zeewieren en slib uit rioolwaterzuiveringsinstallaties.

7.2.9 Afvalstatus

Bepaalde soorten biomassa hebben een wettelijke status als afval waardoor het type verwerking en de toepassing van producten aan beperkingen is gebonden. De reden is dat de samenstelling van de biomassa niet te controleren is en de biomassa microbiologisch of chemisch vervuild kan zijn. Ook het recyclen van vlees(restanten) is ter voorkoming van ziekten (BSE) aan regels gebonden. Zo is GFT-afval, ONF, oud papier, supermarktafval, swill en slib uit rioolwaterzuiveringsinstallaties afval. Een toepassing in voeding en veevoer is dan niet mogelijk en veel afnemers zijn ook niet genegen om de producten in allerlei materialen toe te passen. Ook is import en export niet zonder meer mogelijk. Mest is geen afval, maar kent zijn eigen regelgeving.

7.3 Import van biomassa

Als er biomassa in de EU moet worden geïmporteerd omdat de beschikbaarheid niet voldoende is (en die kans is groot) zal er biomassa moeten worden getransporteerd uit gebieden die op grote afstand van Nederland liggen. Om de transportkosten en het energieverbruik van overzeese biomassatransporten te beperken, tot minder dan 10% van de kosten en van het energiegehalte van de biomassa, is het noodzakelijk biomassa met een hoge dichtheid te transporteren. In aanmerking komen materialen zoals pellets van hout, stro, bagasse of gras, getorrificeerde biomassa, (pyrolyse)olie, vloeibaar methaan, alcoholen (methanol, ethanol, butanol), suiker en graan.

Het opwerken van biomassa tot halffabricaten (pellets, ethanol, methaan, olie) op de teeltlocatie heeft als voordeel dat de mineralen daar gemakkelijker kunnen worden teruggevoerd als meststoffen naar de plantages. Zo kunnen pellets gemaakt worden van (afval)hout maar ook van stro en gras, waarvan de laatste stromen eerst gewassen worden om het gehalte aan mineralen te verlagen, wat met name voor veel thermochemische toepassingen noodzakelijk is. Dergelijke processen moeten eerst geoptimaliseerd worden voordat ze economisch kunnen worden toegepast.

7.4 Inzet van inheemse biomassa

In hoofdstuk 3 is beschreven dat de biomassa die in Nederland wordt geoogst vaak al een nuttige bestemming krijgt, maar er is nog wel ruimte om een deel van de biomassa een meer hoogwaardige bestemming te geven of om de opbrengst te verhogen. Het gaat dan om biomassa uit de natuur en waterwegen, natte reststromen uit land- en tuinbouw, mest en GFT. Deze stromen worden nu gebruikt als bodemverbeteraar, soms in de energievoorziening en soms als diervoeding, maar het aandeel energievoorziening kan nog omhoog en uit de genoemde biomassastromen kunnen soms chemicaliën worden geproduceerd. In Nederland lopen vele R&D en demonstratieprogramma's op dat gebied.

7.5 Biomassa niet benutten is ongunstig

Biomassa die vrijgemaakt had kunnen worden voor gebruik in de bio-economie, maar daarvoor toch niet ingezet wordt, draagt niet bij aan de vervanging van fossiele grondstoffen. Daarnaast kunnen diverse andere nadelige effecten optreden rond onbenutte biomassa. Gemakkelijk afbreekbare biomassa die op de oogstlocatie blijft liggen wordt in het beste geval met zuurstof uit de lucht in koolstofdioxide en water omgezet. Dat komt neer op een verbranding zonder dat er voor de mens nuttige energie wordt gewonnen.⁸ Voorbeelden hiervan zijn bermgras dat langs de weg blijft liggen en waterplanten die gestort worden op de oever. In een slechter geval, onder zuurstofloze condities, dieper in de stapel biomassa of dieper onder de grond (een decimeter), kan de biomassa gaan rotten waardoor methaan vrijkomt. Dat methaan is gasvormig en wordt aan de atmosfeer afgegeven, wat behoorlijk nadelig is. Methaan heeft namelijk per kilogram een 25 maal zo grote broeikaswerking als koolstofdioxide.⁸⁹ Waterplanten die naar de bodem van een plas of watergang zakken worden daar ook al gauw omgezet in methaan, dat zich in belletjes een weg naar de atmosfeer baant. Is dat niet gewoon een natuurlijk proces? Nee, want het Nederlandse oppervlaktewater is zodanig overbemest dat er abnormale hoeveelheden waterplanten in groeien. Ook het uitrijden en injecteren van mest op het land levert vaak een productie en emissie van methaan op. Beter is dus deze methaanproductie te kanaliseren in een vergistingsinstallatie waarin methaan kan worden opgevangen en benut.

Rottende waterplanten

In Nederlands oppervlaktewater kan al gauw 5 ton waterplanten (droge stof) worden geproduceerd per hectare per jaar.⁹⁰ Het benutten van deze waterplanten door vergisting levert per hectare een hoeveelheid biogas op waarmee 1,5 ton aardgas kan worden vervangen. Dat bespaart al gauw een emissie van 3,6 ton CO₂-equivalenten. Echter, als deze waterplanten naar de bodem zakken en daar verrotten kan er 1,3 ton methaan worden geproduceerd en dat levert een emissie op van 33 ton CO₂-equivalenten.

⁸ Hierbij moet wel worden aangetekend dat, om het bodemkoolstofgehalte op peil te houden, een deel van de minder snel afbreekbare biomassa, zoals lignocellulose-houdende delen, op het land achter moet blijven, of dat hiervoor andere koolstofbronnen moeten worden teruggevoerd.

8 Inzet van biomassa in de verschillende toepassingen

8.1 Inleiding

Zoals uit het vorige hoofdstuk naar voren komt ligt er een rationale achter het gebruik van biomassa in de verschillende toepassingen die wordt ingegeven door de specifieke eigenschappen van de biomassa. In dit hoofdstuk bespreken we voor de verschillende toepassingsgebieden de meest voor de hand liggende inzet van biomassa.

8.2 Humane consumptie

Onze voeding is altijd geproduceerd uit biomassa, inzet van biomassa voor voeding heeft daarom de hoogste emotionele waarde. Maar met de productie van voedsel wordt een grote hoeveelheid biomassa als reststroom geproduceerd die niet geschikt is voor humane consumptie.⁹¹ Deze biomassa-residustromen worden deels ingezet voor veevoer, maar kunnen vaak ook goed worden ingezet als grondstof voor de bio-economie. Daarnaast ontstaan er in de voedselverwerkende industrie ook reststromen die benut kunnen worden.

8.3 Diervoeding

Naast zij- en reststromen uit de voedingsindustrie (schroot, bierbostel) worden ook gewassen ingezet voor diervoeding (gras, snijmais). De hoeveelheid biomassa die naar veevoer gaat is veel groter dan de hoeveelheid die direct naar humane voeding gaat.⁹² Door de consumptie van vlees naar beneden te brengen kan de biomassa-productie voor diervoeding dalen waardoor er meer ruimte komt voor de productie van andere soorten biomassa voor de bio-economie.

8.4 Energie

Biogas

Natte, laagwaardige biomassa-stromen kunnen worden omgezet in het methaanhoudende biogas in een biologisch proces (vergisting of methaangisting, zie hoofdstuk 5). Voor droge biomassasoorten (met minder dan 15% vocht) bestaat een thermochemisch proces dat eveneens een methaanhoudend gas oplevert (vergassing, zie hoofdstuk 5). Beide soorten gassen kunnen worden opgewerkt tot een product dat hoofdzakelijk methaan bevat. Analoog aan aardgas kan dit gas door afkoeling (-162°C) vloeibaar worden gemaakt, waardoor het volume met een factor 600 afneemt. Voor aardgas bestaat deze routine al 50 jaar. In 2017 werd er wereldwijd 29 miljoen ton LNG (*liquefied natural gas*) verscheept, o.a. uit Qatar. Rotterdam (Maasvlakte) heeft een LNG-terminal waar de vloeistof ook weer in gas kan worden omgezet en kan worden toegevoegd aan het aardgasnet.

Biogas kan dus worden ingezet als brandstof voor de productie van elektriciteit en warmte of voor de productie van LNG. Met name laagwaardige natte biomassastromen die moeilijk op een andere manier kunnen worden ingezet kunnen door vergisting verwerkt worden tot een nuttig product. Het eindproduct is biogas dat in gezuiverde vorm vergelijkbaar is met aardgas, in het huidige aardgasnetwerk kan worden ingezet en breed kan worden toegepast. Deze combinatie maakt vergisting een interessante technologie voor de bio-economie.

Elektriciteit en warmte

Voor de productie van elektriciteit en warmte uit biomassa wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van droge biomassastromen met weinig mineralen en een hoge dichtheid zoals houtpellets die kunnen worden verbrand in de huidige kolencentrales. Ook torrefactie levert een product (biokool) dat als brandstof kan dienen in elektriciteitscentrales. De biokool die door torrefactie wordt geproduceerd is waterafstotend (wat handig kan zijn bij transport en opslag) en heeft een hogere energiedichtheid dan de oorspronkelijke biomassa. Tenslotte kan via pyrolyse van biomassa pyrolyseolie worden gemaakt waarmee elektriciteit en warmte kunnen worden geproduceerd.

Aangezien elektriciteit en warmte een groot deel van onze huidige energiebehoefte bestrijkt (Figuur 28) is het noodzakelijk dat naast biomassa ook andere vormen van hernieuwbare energie, zoals zon en wind, een substantieel onderdeel gaan uitmaken van de totale hoeveelheid die nodig is, zeker als het personenvervoer elektrisch gaat worden. De installatie van zonnepanelen en zonneboilers op huizen levert absoluut gezien een kleine bijdrage aan de totale vraag naar elektriciteit en warmte maar is één van de manieren voor consumenten om bij te dragen aan de overgang van fossiel naar hernieuwbaar.

Transportbrandstoffen

Voor transportbrandstoffen maken we onderscheid tussen brandstoffen voor personenvervoer, zwaar wegvervoer, scheepvaart en luchtvaart.

Voor personenvervoer zijn er verschillende vormen van hernieuwbare alternatieven beschikbaar zoals biogas, waterstofgas, biodiesel, bioethanol of elektriciteit. Grote automerken hebben inmiddels massaal gekozen voor de transitie naar elektrisch rijden, en het is de verwachting dat het wagenpark in de toekomst zal bestaan uit elektrische auto's. Elektriciteit wordt nu nog op grote schaal geproduceerd in elektriciteitscentrales gestookt op steenkool (eventueel bijgestookt met biomassa) maar biomassa-vrije alternatieven zijn ook voorhanden.

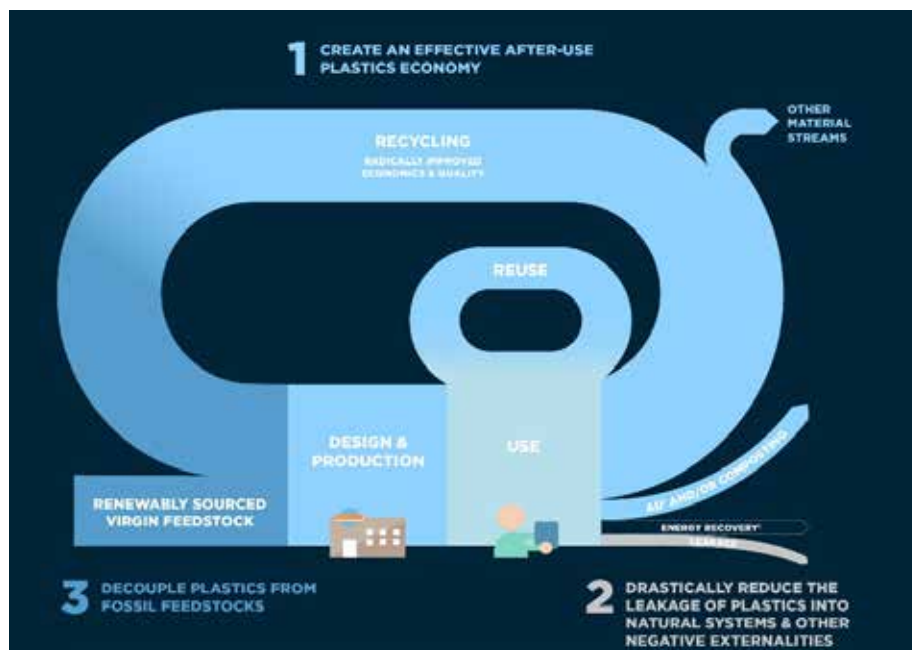
Voor het zwaar wegvervoer, scheepvaart en de luchtvaart zal elektriciteit waarschijnlijk niet de oplossing vormen en wordt er gezocht naar alternatieven voor zware diesel,

stookolie en kerosine. Deze zogenaamde *advanced biofuels* zullen een aantal eigenschappen moeten hebben waaronder een hoge energiedichtheid en een grote actieradius. De verwachting is dat biomassa hier een rol zal spelen.

Met name voor de luchtvaart ligt er nog een grote (technische) uitdaging om kerosine te vervangen door een hernieuwbare bron van energie. Ontmoedigen van vliegen als transportmiddel door vliegtickets flink duurder te maken zal deels bijdragen aan het oplossen van dit probleem, zeker als er milieuvriendelijker alternatieven voorhanden zijn voor korte vluchten zoals de trein. Het is de verwachting dat biomassa nodig blijft voor de productie van hernieuwbare alternatieven voor kerosine.

8.5 Materialen

Voor de productie van papier en karton is biomassa nodig. Hiervoor wordt veelal houtige biomassa gebruikt maar ook andere biomassasoorten zoals grasachtigen kunnen als grondstof dienen. De mogelijkheid bestaat dat de productie van papier en karton de komende jaren zal toenemen, zeker als de vervanging van plastic verpakkingen door op papier-gebaseerde verpakkingen meer vorm gaat krijgen.



Figuur 31. De "nieuwe plastic economie" (Ellen MacArthur Foundation).⁹³

Hout is een belangrijke grondstof als bouw materiaal en voor meubels, vloeren trappen etc. Bossen leveren naast hoogwaardige houtproducten ook nevenstromen zoals bast, zaagsel en takken die goed kunnen worden ingezet in de bio-economie.

De bijdrage van biomassa aan de productie van kunststoffen is nu nog zeer beperkt, minder dan 1 % van het totaal,⁹⁴ maar kan veel groter worden als de transitie van plastics uit fossiele grondstoffen naar hernieuwbare grondstoffen doorzet. De Ellen MacArthur foundation schetst hoe de nieuwe plastics economie eruit zou kunnen zien (zie ook Figuur 31).⁹³ De drie belangrijkste elementen van de nieuwe plastic economie zijn:

- Alle plastics moeten zoveel mogelijk circulair worden gebruikt (gerecycled) in gelijkwaardige toepassingen
- Lekkage van kunststoffen in het milieu moet worden voorkomen
- De productie van virgin plastics wordt losgekoppeld van fossiele grondstoffen.

Biobased plastics zijn een belangrijk element van dit nieuwe model vanwege de loskoppeling van fossiele grondstoffen.

Voor de productie van textiel (veelal buiten Europa) worden de laatste jaren steeds meer fossiele grondstoffen ingezet terwijl textiel van oorsprong werd geproduceerd uit natuurlijke materialen zoals wol, katoen, vlas en zijde. Ook hier zal biomassa een grotere bijdrage moeten gaan leveren als het gebruik van fossiele grondstoffen moet worden vermeden. Hierbij kan worden gedacht aan het inzetten van alternatieve grondstoffen voor katoenvezels zoals vlas en hennep. Bamboe en andere lignocelulosestromen, waaronder ook textielrecyclestromen en reststromen, worden steeds meer gebruikt als cellulosebron voor de productie van viscose. Daarnaast worden biobased varianten van synthetische vezels zoals polymelkzuur, polyesters en polyamides ontwikkeld.

8.6 Chemie

De chemie benut al decennia lang hernieuwbare grondstoffen (olie, zetmeel, suiker, cellulose) voor de productie van chemicaliën en materialen. Met de opkomst van de fossiele grondstoffen zijn veel hernieuwbare grondstoffen vervangen door fossiele en zijn er veel nieuwe chemicaliën en materialen (kunststoffen) ontworpen die ons veel gemak opleveren. Een voorbeeld is verpakkingsmateriaal voor voedsel waardoor de houdbaarheid enorm wordt verlengd of dunne, lichte verpakkingen waardoor transportkosten laag blijven.

Momenteel wordt ongeveer 80% van de grondstoffen voor de petrochemie ingezet voor de productie van kunststoffen. Het produceren van deze materialen uit biomassa in



Figuur 32. Bamboe is een gewas dat voor textiele toepassingen sterk in opkomst is.

plaats van fossiele bronnen zal dus aanzienlijk bijdragen aan de ontwikkeling van de bio-economie. Technisch gezien is het veelal mogelijk om chemische bouwstenen te produceren uit biomassa. Met name de zogenaamde drop-ins, bouwstenen die chemisch identiek zijn aan fossiele tegenhangers, zijn sterk in opkomst omdat ze direct kunnen worden ingezet in de bestaande infrastructuur.⁸⁷

Chemische bouwstenen met zuur- en alcohol functionaliteiten, zoals ethanol, butanol, glycolen, melkzuur en barnsteenzuur, kunnen heel goed worden geproduceerd uit suikers omdat de zuurstofatomen die nodig zijn voor deze bouwstenen al aanwezig zijn in de grondstof. De productie van melkzuur voor polymelkzuur (PLA) heeft zelfs geen fossiele tegenhanger en is een mooi voorbeeld van een nieuw biobased materiaal. Chemische bouwstenen die kunnen worden toegepast in veel verschillende kunststoffen door hun specifieke chemische structuur zijn veelbelovend en zullen naar verwachting een aanzienlijke groei ondergaan. Vooral polyesters, polymeren die meestal bestaan uit twee chemische bouwstenen, één met twee zuurfunctionaliteiten en één met twee alcoholfunctionaliteiten, zijn interessant vanwege hun goede mogelijkheden om ze uit biomassa te maken. Als gevolg hiervan kan er ook een verschuiving ontstaan in het gebruik van verschillende types kunststoffen. Met name polyolefinen als polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP) zijn minder efficiënt uit biomassa te maken en hun

marktomvang zou kunnen afnemen ten gunste van de biobased polyesters bij toenemend gebruik van biomassa als grondstof.

8.7 Compost en bodemverbetering

Compost uit composteerinstallaties dient als bodemverbeteraar, maar ook de minerale fracties uit biomassastromen kunnen daarvoor worden ingezet. Daarnaast kan methaan uit biogas dienen als grondstof voor de productie van ammoniak een ingrediënt van kunstmest.

8.8 Conclusies

Nederland zal een belangrijk deel van de benodigde biomassa in de toekomst moeten importeren en energie zal naar verwachting een belangrijke toepassing zijn. Deze twee zaken moeten goed op elkaar gaan aansluiten in de vorm van energiedichte, droge en mineraal-arme biomassa die intercontinentaal moet worden getransporteerd. Voorwaarde hiervoor is dat bij boeren en verwerkers overal ter wereld biomassarestanten worden omgezet in *commodities*, gemakkelijk te verhandelen eenheden van uniforme halffabricaten zoals pellets.



Figuur 33. Suikerbieten en suikerbietenpulp zijn een bron van diverse koolhydraten die goed kunnen worden ingezet in de chemie.

De (Nederlandse) biomassa kan beter worden benut en veel meer biomassa kan worden vrijgemaakt. De biomassasoorten waarover Nederland kan beschikken hebben uiteenlopende eigenschappen wat gunstig is bij het inzetten in verschillende toepassingsgebieden. Voor de toepassingsgebieden voeding, veevoer, materialen en chemie is biomassa een zeer belangrijke grondstof, zeker als het gebruik van fossiele grondstoffen voor materialen en chemie moet worden vermeden. Daarnaast ligt het voor de hand om voor verschillende toepassingen in de chemie koolhydraten te gebruiken uit suikerbieten en granen.

Het efficiënt en duurzaam inzetten van biomassa hangt af van het kiezen van de juiste combinaties van biomassa-eigenschappen, omzettingen en toepassingen. Met dit boekje hopen we hiervoor een aantal handvatten te hebben aangereikt.

9 Referenties

1. www.co2levels.org
2. Harmsen, P., S. Lips, H. Bos, B. Smit, S. van Berkum, J. Helming, R. Jongeneel (2014) Suiker als grondstof voor de Nederlandse chemische industrie; WFBR rapport 1494
3. CBS Achtergrond-informatie Soja, 2014
4. Poorter, H., A.M. Jagodzinski, R. Ruiz-Peinado, S. Kuyah, Y. Luo, J. Oleksyn, V.A. Usoltsev, T.N. Buckley, P.B. Reich and L. Sack, 2015. How does biomass distribution change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytologist*: July 2015:1-14
5. www.sankey-diagrams.com/tag/canada/
6. Richtlijnen voor het meten van inlands rondhout ten behoeve van de verkoop, Bosschap 2002
7. Kuiper, L. en S. de Lint (2008) Binnenlands biomassapotentieel: biomassa uit natuur, bos, landschap, stedelijk groen en houtketen; Ecofys
8. Nabuurs, G.J., M.J. Schelhaas, J. Oldenburger, A. de Jong, R. Schrijver, G. Woltjer, H. Silvis en C.M.A. Hendriks, 2016. Nederlands bosbeheer en bos- en houtsector in de bio-economie; Scenario's tot 2030 in een internationaal bio-economie perspectief. WUR Rapport 2747
9. Microalgen; het groene goud van de toekomst? Grootschalige duurzame kweek van microalgen voor de productie van bulkgrondstoffen, Hans Wolkers, Maria Barbosa, Dorinde Kleinegriss, Rouke Bosma, Rene Wijffels, Paulien Harmsen (editor) (2011)
10. CBS Hernieuwbare Energie 2017
11. www.follow-this.org
12. www.afpm.org
13. www.cbs.nl: energiebalans; aanbod, omzetting en verbruik
14. www.wikipedia.com, Gronings gas
15. DUKES: Digest of United Kingdom Energy Statistics (2017) Calorific values of fuels; publication of the UK Dept for Business, Energy & Industrial Strategy; www.gov.uk/government/statistics/dukes-calorific-values
16. www.phyllis.nl
17. Internationaliseringsmonitor CBS, 2016
18. Bos, H.L., M.J.A. van den Oever en K.P.H. Meesters (2014) Kwantificering van volumes en prijzen van biobased en fossiele producten in Nederland, WFBR rapport 1493.
19. CBS Achtergrondrapport sojabarometer 2012
20. CBS www.cbs.nl/en-gb/news/2018/12/palm-oil-imports-on-the-rise-again, 2018

21. Bosberichten 2016/3
22. www.bosenhoutcijfers.nl
23. www.alcogroup.com
24. www.fcn.eonerc.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaahdapq
25. www.cbs.nl. Afvalbalans, afval naar sector; nationale rekening
26. European Union, 2012. Energy roadmap 2050. ISBN 978-92-79-21798-2
27. www.kylesconverter.com/energy,-work,-and-heat/petajoules-to-tons-of-oil-equivalent
28. Bos, H.L., Meesters, K.P.H., Conijn, S.G., Corré, W.J., Patel, M.K., 2012. Accounting for the constrained availability of land: a comparison of bio-based ethanol, polyethylene, and PLA with regard to non-renewable energy use and land use. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 6(2): 146-158
29. Bos, H.L. en J.P.M. Sanders, 2013. Raw material demand and sourcing options for the development for a bio-based chemical industry in Europe : Part 1 : Estimation of maximum demand. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 7(3): 246-259.
30. www.ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/9172750/KS-EN-18-001-EN-N.pdf/474c2308-002a-40cd-87b6-9364209bf936
31. IEA Renewables Information Overview, 2017
32. IEA Key World Energy Statistics, 2018
33. Stork, M., J. de Beer, N. Lintmeijer en Bert den Ouden, 2018. Chemistry for Climate: Acting on the need for speed; Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050
34. De Gooijer, C.D., (2018) Bio-based Economy in NL: Tour de horizon
35. www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html
36. FAOstat, <http://chartsbin.com/view/1162>
37. Bos H.L. en J. Broeze (2019) BioFPR, publicatie in voorbereiding.
38. Koppejan, J., W. Elbersen, M. Meeusen en P. Bindraban, 2009. Beschikbaarheid van Nederlandse biomassa voor elektriciteit en warmte in 2020. SenterNovem project 200809.
39. Schulze, P., J. Holstein, H. Vlap, 2017. Biomassapotentieel in Nederland- Verkennende studie naar vrij beschikbaar biomassapotentieel voor energieopwekking in Nederland. DNV.GL report GCS.17.R.10032629.2.
40. Ros, J., J. Olivier, J. Notenboom, H. Croezen and G. Bergsma, 2012. Sustainability of biomass in a bio-based economy: A quick-scan analysis of the biomass demand of a bio-based economy in 2030 compared to the sustainable supply. PBL Publication number: 500143001

-
41. Elbersen, H.W., M. van der Zee and H.L. Bos, 2010. The role of 4F crops in EU27 under contrasting future scenarios - Final report on WP6; DOI: 10.13140/RG.2.1.2661.3603
 42. Mendes Souza, G., R.L. Victoria, C.A. Joly and L.M. Verdade (eds), 2015. Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps. SCOPE report 72
 43. Dornburg, V., D. van Vuuren, G. van de Ven, H. Langeveld, M. Meeusen, M. Banse, M. van Oorschot, J. Ros, G.J. van den Born, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, P. Verweij, E. Lyseng and A. Faaij, 2010. Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. *Energy Environ. Sci.* 2010 (3):258–267
 44. Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Khesghi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
 45. www.groengas.nl/kaart-bio-energie-installaties-nederland/
 46. www.meerlanden.nl
 47. www.boerderij.nl/Home/Nieuws/2016/1/Akkerbouwer-casht-met-mest-2752844W/
 48. www.icis.com/explore/resources/news/2018/03/29/10207802/eu-fuel-ethanol-prices-plummet-on-market-length-eu-policy-worries/
 49. www.bvor.nl/kaart-biomassawerven/
 50. Bruins en Kwast, 2017. Tarievenlijst 2017
 51. www.grondwerkentrikikoen.be
 52. www.warmtebedrijfede.nl
 53. AEB Jaarverslag 2016.
 54. AEB Jaarverslag 2017.
 55. www.wisenederland.nl/groene-stroom/dossier-kolen
 56. www.nl.wikipedia.org/wiki/Houtgas
 57. Smekens, K., Meijer, R., M. Cremers, 2017. Kostenonderzoek verbranding en vergassing van biomassa SDE+ 2018. ECN rapport ECN-N--17-009

58. Meijden, C.M. van der, W. Sierhuis, A. van der Drift, 2011. Waste wood fueled gasification demonstration project. Presented at the Renewable Energy World Europe Conference and Exhibition, 7 - 9 June 2011, Fiera Milano City, Milan, Italy
59. www.btg-btl.com
60. <https://www.biobasedeconomy.nl/2019/04/02/mega-order-uit-finland-voor-twentse-energie-innovatie/>
61. www.ecp-biomass.eu/sites/ecp-biomass.eu/files/books/HP_reviewECP%20technologie%20beschrijving%20Pyrolyse%20-%2028_01_2011.pdf
62. Verbraeken, 2017. ChainCraft schaaft op bij productie biologische vetzuren. Het Financiële Dagblad 1-5-2017, p. 15.
63. www.reverdia.com
64. Groenestijn, J.W. van, Abubackar, H.N., Veiga, M.C. & C. Kennes (2013) Bioethanol. In: C. Kennes & M.C. Veiga (Eds) Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy. John Wiley & Sons
65. www.lanzatech.com
66. www.natureworksllc.com
67. www.besustainablemagazine.com/cms2/a-biorefinery-to-turn-urban-waste-into-biobased-products/
68. www.urbiofin.eu
69. Strong, P.J., B. Laycock, S.N.S. Mahamud, P.D. Jensen, P. A. Lant, G. Tyson and S. Pratt, 2016. The Opportunity for High-Performance Biomaterials from Methane. *Microorganisms* 4(11): 1-20
70. www.corbion.com/fdca
71. [www.nl.wikipedia.org/wiki/Kritisch_punt_\(thermodynamica\)](http://www.nl.wikipedia.org/wiki/Kritisch_punt_(thermodynamica))
72. www.snb.nl/minifabriek-test-nieuwe-technologie-slibvergassing/
73. www.avantium.com
74. www.biorizon.eu
75. www.pulp2value.eu
76. www.voltachem.com
77. www.wur.nl/nl/project/Duurzaam-bio-asfalt-uit-lignine.htm
78. Wang, H., Y. Pu, A. Ragauskas and B. Yang, 2019. From lignin to valuable products—strategies, challenges, and prospects. *Bioresource Technology* 271: 449–461 ; 228–240
79. www.bioref-integ.eu/fileadmin/bioref-integ/user/documents/Martin_Lersch__Borregaard_-_Creating_value_from_wood_-_The_Borregaard_biorefinery.pdf
80. www.en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage

-
81. The global status of CCS 2018. Global CCS Institute.
 82. www.en.wikipedia.org/wiki/Bio-energy_with_carbon_capture_and_storage
 83. Kemper, J., 2017. Biomass with carbon capture and storage (BECCS/Bio-CCS); https://ieaghg.org/docs/General_Docs/IEAGHG_Presentations/2017-03-10_Bioenergy_lecture_2_Read-Only.pdf
 84. www.drax.com/press_release/world-first-co2-beccs-ccus/
 85. Burhenne, L., M. Damiani and Th. Aicher, 2013. Effect of feedstock water content and pyrolysis temperature on the structure. Fuel 107:836–847.and reactivity of spruce wood char produced in fixed bed pyrolysis
 86. Kumar, H., P. Baredar, P. Agrawal and S.C.Soni, 2014. Effect of moisture content on gasification efficiency in down draft gasifier. International Journal of Scientific Engineering and Technology 3(4):411-413.
 87. Paulien F. H. Harmsen, Martijn M. Hackmann and Harriëtte L. Bos, 2014. Green building blocks for bio-based plastics. Biofuels Bioproducts and Biorefining 8(3) 306-324
 88. Dammer, L., Carus, M. and S. Piotrowski, Sugar as feedstock for the chemical industry. What is the most sustainable option? Nova-Institut GmbH, Germany, January 2019
 89. www.climatechangeconnection.org
 90. Heerdt, G. ter, 2014. Waterplanten maaien, conserveren en verwerken. Waternet rapport nr 14.123373
 91. Meesters, K., P. Boonekamp, M. Meeusen, D. Verhoog, W. Elbersen, 2010. Monitoring groene grondstoffen. Platform Groene Grondstoffen
 92. Nova Insitut at <http://bio-based.eu/graphics>
 93. www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/activities/new-plastics-economy
 94. www.european-bioplastics.org

Colofon

Biomassa voor de circulaire economie

Alles wat je wilde weten over biomassa maar nooit durfde te vragen

Johan van Groenestijn, Paulien Harmsen, Harriëtte Bos

Met dank aan Wolter Elbersen, René van Ree en Koen Meesters

In opdracht van TKI-BBE

2019

© Wageningen Food & Biobased Research

ISBN: 978-94-6343-954-1

DOI: <https://doi.org/10.18174/475889>

Wageningen Food & Biobased Research

Bornse Weilanden 9

Postbus 17

6700 AA Wageningen

<https://www.wur.nl/wfbr>

Deze publicatie is mede mogelijk gemaakt door de TKI-BBE. Het is de drieëntwintigste in een reeks publicaties over het gebruik van biomassa, agrogrondstoffen en nevenstromen in veilige en gezonde producten voor consumenten- en industriële markten (zie ook www.groenegrondstoffen.nl en www.biobasedeconomy.nl).

