

**Winning clusters in de
Biobased Economy:
een visie voor het jaar 2050**

Maart 2011

In opdracht van:

Taskforce Biodiversiteit en Natuurlijke Hulpbronnen

Geschreven door:

Dr. A. ter Heijne

Postdoc onderzoeker Environmental Technology, Wageningen UR

Wetenschappelijk team:

Dr. B.J. van Alphen

Directiesecretaris Agrotechnology and Food Sciences Group, Wageningen UR

Prof. R.J. Bino

Algemeen Directeur Agrotechnology and Food Sciences Group, Wageningen UR

Dr. H.L. Bos

Onderzoeker Food & Biobased Research, Wageningen UR

Prof. H.J.M. de Groot

Hoogleraar Biophysical Organic Chemistry, Leiden Institute of Chemistry

Prof. Th.W. Kuyper

Hoogleraar Fungal Ecology and Diversity, Wageningen UR

Dr. J.J. Neeteson

DLO-BU manager, Plant Research International, Wageningen UR

Prof. R. Rabbinge

Universiteitshoogleraar, Wageningen UR

Prof. H.H.M. Rijnaarts

Hoogleraar Environmental Technology, Wageningen UR

Prof. J.P.M. Sanders

Hoogleraar Valorisatie van Plantaardige Productieketens

ir. E van Seventer

Manager business unit Biobased Products, Food & Biobased Research, Wageningen UR

Prof. G. Spaargaren

Hoogleraar Environmental Policy, Wageningen UR

Prof. R.H. Wijffels

Hoogleraar Bioprocess Engineering, Wageningen UR

Inhoudsopgave

1. De Biobased Economy en biodiversiteit.....	3
2. In de Biobased Economy draait alles om biomassa en biologische bouwstenen	4
3. Drivers voor de Biobased Economy	13
4. Randvoorwaarden voor een duurzame Biobased Economy	18
5. De Biobased Economy in 2050	23
6. De winning clusters.....	38
7. Rol van kennisinstellingen, bedrijfsleven en overheid	47
8. Conclusie.....	51
Referenties	52

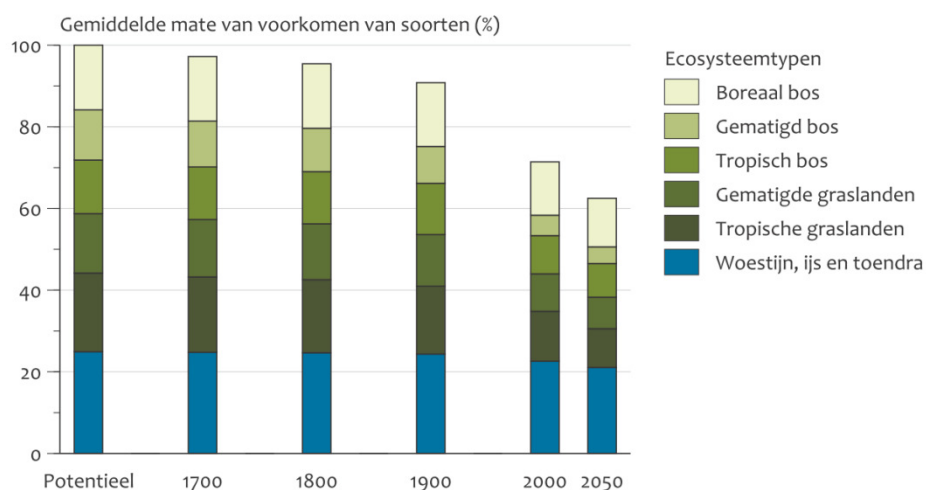
1. De Biobased Economy en biodiversiteit

De biodiversiteit neemt af als gevolg van menselijke activiteiten (Figuur 1)¹. Een van de belangrijkste oorzaken is het verlies aan areaal door omzetting van natuurlijke systemen, zoals ontbossing.

Biodiversiteit omvat zowel genetische biodiversiteit (variatie binnen soorten), als diversiteit van soorten en ecosystemen. Het is belangrijk om de biodiversiteit te beschermen¹. Niet alleen zijn de miljoenen soorten op aarde op zichzelf belangrijk, maar ook zijn biodiversiteit en gezonde ecosystemen essentieel voor het in stand houden van onze natuurlijke hulpbronnen, productieve bodems en zeeën, schone lucht en schoon water, klimaat, het voorkomen van erosie en overstromingen². Bij het overschakelen van fossiele grondstoffen naar hernieuwbare grondstoffen, is daarom behoud van biodiversiteit een belangrijke voorwaarde.

De Biobased Economy biedt kansen voor de biodiversiteit, bijvoorbeeld door het in gebruik nemen van nieuwe gewassen, het integreren van biodiversiteit in de landbouw (agrarisch natuurbeheer), en het efficiënter omgaan met hulpbronnen en vermindering van vervuiling. Aan de andere kant kan de Biobased Economy een bedreiging zijn voor de biodiversiteit, bijvoorbeeld wanneer op grote schaal natuurgebieden in gebruik genomen worden voor de productie van gewassen, of als er extra volumes water gebruikt zouden moeten worden voor koeling om energieproductie in woestijnachtige gebieden mogelijk te maken.

In dit essay worden de kansen en bedreigingen van een Biobased Economy geanalyseerd. Daarbij wordt vooral ingegaan op de biologische, technologische en maatschappelijke ontwikkelingen en de randvoorwaarden waaraan een duurzame Biobased Economy moet voldoen.



Figuur 1. Biodiversiteit uitgedrukt in het gemiddeld aantal soorten per ecotype¹.

2. In de Biobased Economy draait alles om biomassa en biologische bouwstenen

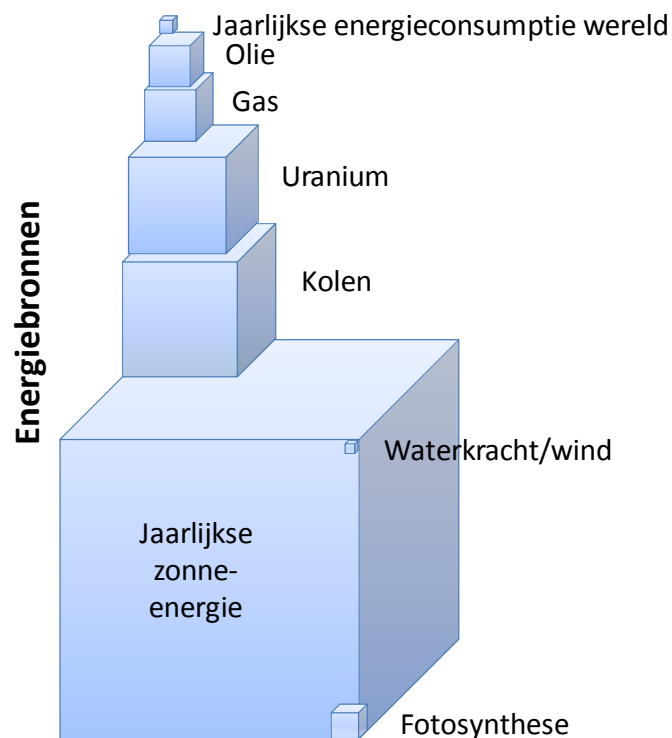
De Biobased Economy is een economie die is gebaseerd op hernieuwbare biologische grondstoffen en bouwstenen voor de productie van voedsel, chemicaliën, brandstoffen en materialen. Samen met andere toepassingen van zonne-energie levert de Biobased Economy de basis voor een duurzame maatschappij waarin energie, voedsel en basisstoffen ruim en voor iedereen beschikbaar zijn.

Hernieuwbare grondstoffen kunnen steeds opnieuw en snel geproduceerd worden. Dit in tegenstelling tot fossiele grondstoffen, die miljoenen jaren geleden in de aarde zijn vastgelegd. Hernieuwbare grondstoffen worden gevormd uit biomassa en van biomassa afgeleide biologische bouwstenen, en deze vormen de centrale grondstof van een Biobased Economy.

Fotosynthese

Het cruciale biologische proces voor de productie van biomassa en biologische bouwstenen is de fotosynthese in planten, algen en (cyano)bacteriën. Hierbij wordt zonlicht gebruikt als energiebron om koolstofdioxide (CO_2) uit de lucht vast te leggen in bouwstoffen, zoals koolhydraten, lignine, vetten en eiwitten. Naast zonlicht en CO_2 hebben planten, algen en bacteriën ook water, nutriënten en ruimte nodig om te groeien. De efficiëntie waarmee een organisme via fotosynthese in staat is om zonne-energie om te zetten in chemische energie in biomassa verschilt. Een plant zet zonlicht om in biomassa met een efficiëntie van 0,1-3%³, bij algen is de efficiëntie 5%⁴, en cyanobacteriën halen een efficiëntie ten minste vergelijkbaar met algen.

De zon is een enorme en bijna onuitputtelijke bron van energie (Figuur 2). De jaarlijkse zonne-energie die de aarde bereikt is vele malen groter dan de jaarlijkse wereldwijde energieconsumptie en de huidige reserves van fossiele grondstoffen⁵. De zon straalt meer dan 170.000 TW aan energie naar de aarde (1 TW = 1 miljard kW), terwijl de totale energieconsumptie in 2001 ongeveer 13,5 TW bedroeg. Met een verwachte toename in het energieverbruik naar 27 tot 40,8 TW in het jaar 2050, betekent dit dat de totale hoeveelheid zonne-energie die de aarde bereikt in één uur ruwweg vergelijkbaar is met de totale wereldwijde energieconsumptie in één jaar⁶.

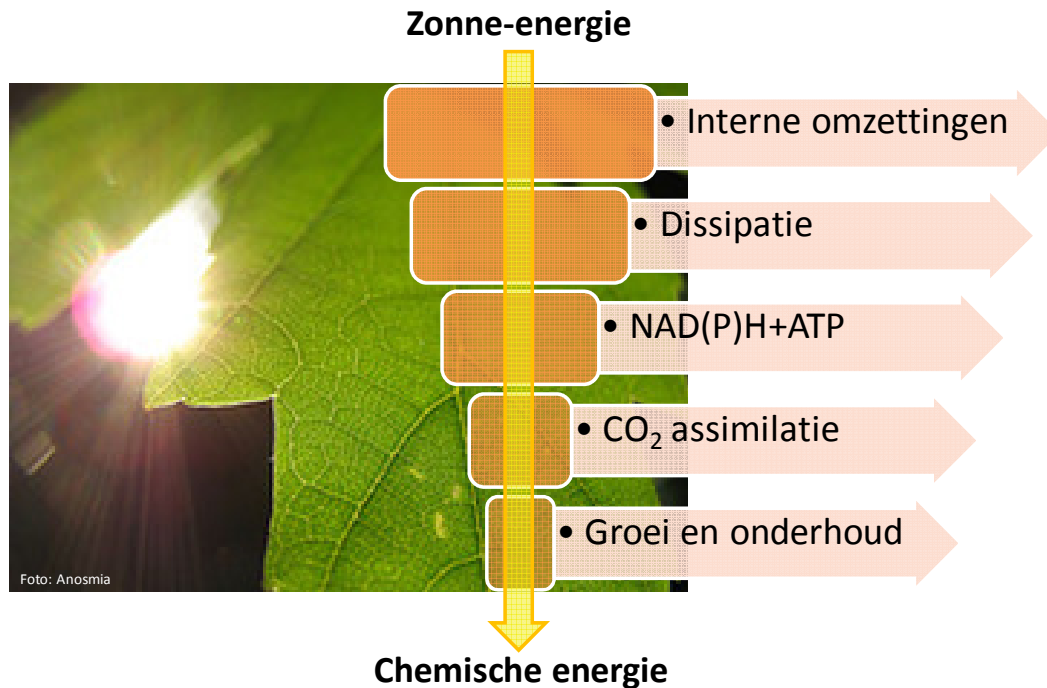


Figuur 2. De jaarlijkse zonne-energie die de aarde bereikt is enkele malen groter dan de reserves aan fossiele brandstoffen samen (gebaseerd op Lomborg⁵).

Het totale vermogen van de natuurlijke fotosynthese-omzettingen in de biosfeer is 100-200 TW. Hoewel er dus in principe voldoende zonlicht op aarde valt om, ook via de lage efficiëntie van fotosynthese, de wereld van biomassa te voorzien, is de schaal van het energieverbruik (27-40 TW in 2050) enorm. Dit heeft tot gevolg dat de productie van biomassa voor menselijke consumptie en ander gebruik begrensd wordt door andere factoren, zoals de beschikbaarheid van water, nutriënten, en ruimte, die ook beschikbaar moeten zijn voor andere functies, zoals voedsel, leefomgeving, natuur, en behoud van biodiversiteit.

Fotosynthetische efficiëntie en ruimtebeslag

Aan de basis van de Biobased Economy staat fotosynthese: de conversie van CO_2 naar biomassa met zonlicht. Zoals beschreven hebben natuurlijke fotosyntheseprocessen gemiddeld een laag rendement, tussen 0,1 en 3%³. De maximale theoretische efficiëntie van de omzetting van zonne-energie in chemische energie via natuurlijke fotosynthese is 9%⁷. In de praktijk is het proces minder efficiënt, doordat een deel van het licht reflecteert en een deel van het geabsorbeerde licht nodig is als onderhoudsenergie of gedissipeerd wordt als warmte (Figuur 3).



Figuur 3. De fotosynthetische efficiëntie van de omzetting van zonne-energie naar chemische energie in planten bedraagt 0,1-3%.

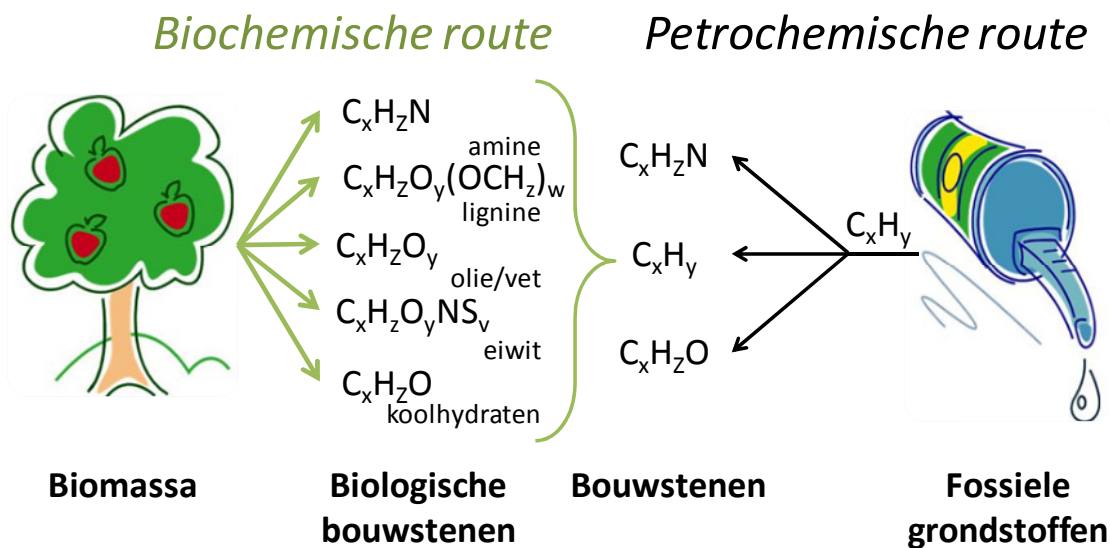
Voor een land als Nederland, relatief noordelijk in Europa en met een hoge bevolkingsdichtheid, is een hoge efficiëntie nodig om voldoende energie te produceren. Het gemiddelde vermogen van de binnenkomende zonnestraling in Nederland is ruwweg 100 W/m^2 . Op dit moment verbruikt elke Nederlander gemiddeld 6 kW aan vermogen. Als dit in 2050 met de helft kan worden teruggebracht tot 3 kW door energiebesparing, dan is bij volledige benutting van alle zonlicht 30 m^2 aan oppervlak minimaal nodig per hoofd van de bevolking, wat correspondeert met 1% van het landoppervlak bij een stabiel bevolkingsaantal van rond de 16 miljoen inwoners. De fotosynthetische efficiëntie is omgekeerd evenredig met het benodigde oppervlak, zoals geïllustreerd in de onderstaande Tabel 1. Om onze afhankelijkheid van andere bronnen van energie te verminderen is het daarom ook voor Nederland belangrijk om de efficiëntie van het vastleggen van energie door planten te verhogen. Dit geeft ook de mogelijkheid om biologische en sociaal-economische duurzaamheid te combineren met behoud van (ruimte voor) biodiversiteit.

Efficiëntie van omzetting zonne-energie	Oppervlak per hoofd van de bevolking	Totaal benodigde oppervlak
100%	30 m ²	1% (wegen, IJsselmeer)
10%	300 m ²	10% (bebouwd, landbouwgrond)
1%	3000 m ²	100% (hele land)
0.1%	30000 m ²	1000% (groot deel Europa)

Tabel 1. De fotosynthese-efficiëntie is omgekeerd evenredig met het benodigde oppervlak benodigd voor energievoorziening.

Biomassa en biologische bouwstenen

Biomassa omvat al het biologische materiaal gevormd door levende organismen via fotosynthese. De term biomassa wordt dus niet alleen gebruikt voor gewassen, bomen, en aquatische biomassa (algen, wieren) en hun restmaterialen, maar ook voor de restproducten die vrijkomen na het gebruik ervan, zoals dierlijke en menselijke mest, afvalhout, afvalwater, en gft-afval. Al deze vormen van biomassa bevatten chemische energie die via fotosynthese uit zonne-energie is vastgelegd: biologische bouwstenen. De eerste en meest belangrijke toepassing van biomassa is voedsel. Daarnaast heeft biomassa een rol als grondstof voor materialen (bijv. hout, katoen, papier en karton) en chemicaliën (bijv. voor de productie van bioplastics, verven, harsen, en geur- en smaakstoffen), en in de energievoorziening (transportbrandstoffen, warmte, koken, elektriciteit). Met de toenemende wereldbevolking, naar mogelijk 9 miljard mensen in 2050⁸, stijgt zowel de vraag naar voedsel als de vraag naar energie, materialen en chemicaliën. Bovendien gaat de economische groei van een aantal Aziatische en Zuid-Amerikaanse landen gepaard met een nieuw consumptiepatroon dat tot een extra vraag naar voedsel, energie en materialen zal leiden. Duidelijk is dat er een steeds sneller groeiende vraag zal zijn naar biomassa voor gebruik in vele essentiële producten, en de beschikbaarheid van biomassa is daarmee een voorwaarde voor sociale en economische ontwikkeling. Om productie van zowel voedsel als energie, chemicaliën en materialen uit biomassa mogelijk te maken, is het van groot belang om de conversie van zonlicht naar biomassa zo efficiënt mogelijk te laten verlopen.



Figuur 4. Vanuit biomassa kunnen dezelfde bouwstenen geproduceerd worden als vanuit fossiele grondstoffen.

Biologische bouwstenen: van petrochemie naar biochemie

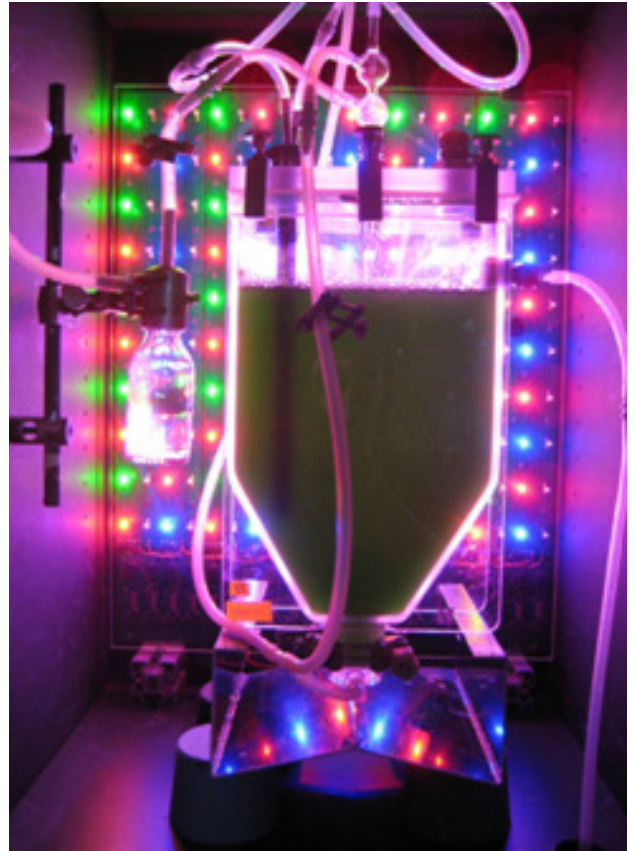
Biomassa bestaat uit biologische bouwstenen. Deze biologische bouwstenen zijn organische verbindingen bestaande uit koolstofatomen, waterstofatomen en daaraan verbonden zuurstof-, stikstof-, fosfor- en zwavel-groepen (Figuur 4). De biologische bouwstenen dienen als basis voor velerlei toepassingen^{9, 10}. Via de biochemische route kunnen de bouwstenen geproduceerd worden die momenteel uit fossiele grondstoffen zoals olie en gas gemaakt worden. Een voorbeeld is hiervan is het plan voor grootschalige productie van bio-ethen uit bio-ethanol in Rotterdam. Deze bio-ethen zal verder verwerkt worden via bestaande, op petrochemie gebaseerde, routes.

Het vervangen van petrochemische basischemicaliën zoals ethyleen door biologische bouwstenen met dezelfde samenstelling, is niet optimaal. Beter is het om de functionaliteit in de biomassa te gebruiken voor het ontwikkelen van nieuwe moleculen die aangepast zijn voor de Biobased Economy.

Biologische bouwstenen beschikken van nature over waardevolle functionele groepen. In de Biobased Economy wordt van deze biologische rijkdom gebruik gemaakt via optimale ontsluiting en verwaarding in een reeks van producten. Het biochemische proces op basis van biomassa zal in de regel minder energie vergen in vergelijking met productie uit fossiele grondstoffen, omdat de functionele groepen van nature aanwezig zijn en niet ten koste van veel energie hoeven te worden aangebracht.

Photanol BV is een spinout bedrijf van de Universiteit van Amsterdam en gebruikt cyanobacteriën om vloeibare brandstoffen te maken. Door moleculair genetische programmering wordt de efficiëntie van de omzetting van lichtenergie naar brandstof verhoogd. Photanol ontwikkelt daarvoor bacterie stammen die in een fermentatieproces afgestemd zijn op de lichtcondities. Het concept is gebaseerd op de introductie van een fysiologische aan- en uitschakelaar in het DNA van de cyanobacterie. Die schakelaar zorgt voor een volledige regulering van de metabolische omzetting van koolzuur naar vloeibare brandstoffen. Hierdoor wordt het metabolisme zo geprogrammeerd dat de brandstoffen in het medium worden uitgescheiden en direct vanuit de vloeibare fase kunnen worden gewonnen.

(Foto: Drs. R.M. Schuurmans, Universiteit van Amsterdam)



Nieuwe biologie

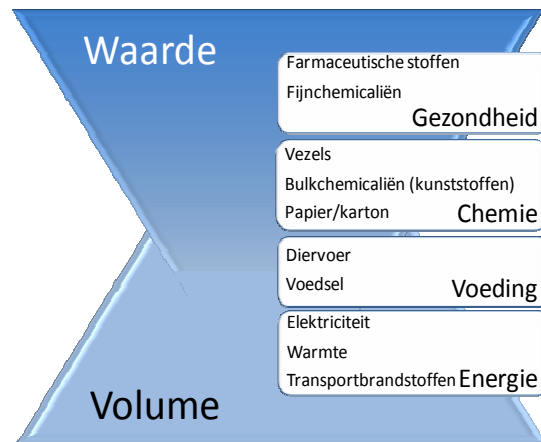
Biologische systemen bestaan uit vele componenten, zoals genen, eiwitten en metabolieten. Inmiddels is de gensequentie van vele organismen bekend en wordt de aandacht verlegd naar de regulatie van de expressie en de interactie van de componenten. Dit onderzoeksgebied maakt deel uit van de systeembioïogie (dat systemen op alle niveaus, tot aan ecosystemen toe, bestudeert). Ieder biologisch systeem kan worden gezien als een hiërarchisch georganiseerd netwerk van interacties. Bijvoorbeeld: eiwitten hebben interacties met andere eiwitten, en vormen eiwitcomplexen. Verschillende eiwitcomplexen hebben interactie met elkaar, en vormen samen met andere componenten een celorganel. Ook celorganellen kunnen allerlei interacties met elkaar hebben, en maken deel uit van een cel. Systeembioïogie brengt al deze interacties in kaart. Op basis van de kennis van het biologische systeem kan heel gericht de functionaliteit van het organisme worden aangepast.

Door selectie en genetische modificatie kan een plant, alg of bacterie worden aangepast aan nieuwe omstandigheden en kunnen nieuwe moleculaire synthesesewegen worden geïntroduceerd. Een volgende stap is het meer gericht ontwerpen van nieuwe, zelfs kunstmatige, biologische systemen op basis van de kennis vanuit de systeembioïogie. Dit wordt synthetische bioïogie genoemd. Inmiddels zijn er vooral in Amerika bedrijven en kennisinstellingen gestart met het gericht ontwerpen van biologische organismen. Ook voor toepassingen in de Biobased Economy zal synthetische bioïogie nieuwe toepassingen genereren. Nu al wordt gewerkt aan het koppelen van fotosynthesesystemen van bijvoorbeeld algen en cyanobacteriën. Dit kan organismen opleveren die een veel breder spectrum van het zonlicht kunnen gebruiken voor groei en productie.

Bioraffinage: inzet op hoogwaardige toepassingen van biomassa

Een hogere efficiëntie van fotosynthese leidt op zichzelf nog niet tot een duurzame Biobased Economy. Het Nederlandse agrificatiebeleid in de jaren '80 en '90 had ten doel om nieuwe toepassingen te creëren voor de overproductie uit de landbouw, voornamelijk in de non-food industrie. Deze opzet sloeg niet aan, niet vanwege een te kort aan landbouwproducten, maar vanwege de lange tijd die nodig was om een markt voor deze producten te ontwikkelen¹¹. In de Biobased Economy worden op een duurzame manier nieuwe producten gemaakt op basis van biomassa in plaats van op basis van fossiele grondstoffen¹¹. Het verschil met de agrificatie is dat niet de productie van biomassa, maar de vraag naar hernieuwbare producten leidend is, en dat het gehele gewas zo nuttig mogelijk gebruikt wordt.

De verschillende toepassingen van biomassa kunnen ingedeeld worden naar volume en waarde, zoals weergegeven in figuur 5. De producten bovenin de waardepiramide worden in relatief kleine hoeveelheden geproduceerd en hebben de hoogste economische waarde. Uit economisch oogpunt is het aantrekkelijk om de biomassa die niet voor voedsel bestemd is, in te zetten voor hoogwaardige producten, zoals farmaceutische stoffen en fijnchemicaliën.



Figuur 5. Bioraffinage is erop gericht om biomassa zo volledig mogelijk te gebruiken, waarbij ingezet wordt op zo hoogwaardige mogelijke toepassingen.

Hoge waarde gaat vaak gepaard met kleine volumes en lage concentraties, en bij de productie van hoogwaardige componenten ontstaan meestal veel reststromen. De uitdaging is om al bij de productie van hoogwaardige componenten rekening te houden met deze reststromen, en ze als bron te beschouwen voor producten lager in de piramide, om zo tot optimale verwaarding van grondstoffen te komen. Daarbij wordt de biomassa zo volledig mogelijk benut, terwijl ook zorg gedragen wordt dat een bepaalde hoeveelheid organische stof teruggebracht wordt naar de bodem voor behoud van bodemvruchtbaarheid. Uitgaande van de waardepiramide vereist dit een integratie van de productieketens voor voedsel, chemicaliën, materialen, en energie (geïntegreerde bioraffinageketens).

De vraag naar fossiele grondstoffen vanuit de chemie is kleiner dan de vraag naar fossiele grondstoffen vanuit de energiesector. Daarom is het van belang dat naast de hoogwaardige toepassingen voor biomassa, ook aandacht wordt besteed aan alternatieven voor de productie van energie, anders dan winning uit biomassa. Er zal zo veel mogelijk gebruik moeten worden gemaakt van zonne-energie, windenergie en blue energy (productie van elektriciteit uit het mengen van zoet en zout water).

Naar een duurzame Biobased Economy

Een Biobased Economy is slechts stabiel als zij bijdraagt aan een duurzame ontwikkeling op de lange termijn¹². Dit rapport beschrijft onze lange termijn visie op de Biobased Economy met als richtjaar 2050. Uitgangspunt van deze visie is dat we onze biodiversiteit en natuurlijke hulpbronnen behouden, en tegelijkertijd de toenemende wereldbevolking zoveel mogelijk kunnen voorzien van biomassa voor voedsel, energie, chemicaliën en materialen, en dat we daarbij het aandeel fossiele grondstoffen tot een minimum beperken.

Om de Biobased Economy te laten bijdragen aan een duurzame ontwikkeling, moeten grote veranderingen plaatsvinden¹². Om de duurzaamheid van deze ontwikkelingen te kunnen beoordelen, verschaffen we een kader met randvoorwaarden. We beschrijven ook de benodigde technologische en maatschappelijke doorbraken, de zogenaamde 'winning clusters', op het gebied van productie, verwerking en consumptie van biomassa.

3. Drivers voor de Biobased Economy

Vervanging van fossiele grondstoffen door hernieuwbare grondstoffen

Op beleidsmatig Europees niveau is de belangrijkste drijfveer voor de introductie van een Biobased Economy de verwachte vermindering die dit heeft op klimaatsverandering. Een tweede, maar niet minder belangrijke, reden voor het omarmen van een Biobased Economy is de bijdrage die zij kan leveren aan het oplossen van problemen die te maken hebben met de toenemende schaarste van niet-hernieuwbare grondstoffen, met name die van fossiele olie.

Biomassa is op dit moment het enige alternatief dat beschikbaar is op de korte termijn om fossiele brandstoffen in het verkeer – goed voor ongeveer 25% van het totale energieverbruik – te vervangen. De noodzaak tot vervanging van fossiele brandstoffen om aan de klimaatdoelstellingen voor CO₂-reductie te voldoen, is een belangrijke driver voor het gebruik van biomassa voor energietoepassingen. Op Europees niveau is daarom bijmenging van biobrandstoffen verplicht gesteld¹³.

Naast voedsel is energie niet de enige en belangrijkste toepassing van biomassa. Ook voor een duurzame productie van materialen en chemicaliën is het gebruik van hernieuwbare grondstoffen van groot en toenemend belang, ondermeer vanwege de mogelijke toekomstige schaarste van fossiele grondstoffen. Daarnaast hebben hernieuwbare grondstoffen als voordeel dat ze in bepaalde gevallen energie-efficiënter verwerkt kunnen worden tot het gewenste product.

De schattingen over het wereldwijde potentieel van biomassa lopen wijd uiteen (zie kader). Een belangrijke vraag die tot op heden onderbelicht blijft, is wat het effect zal zijn van grootschalige biomassaproductie voor uiteenlopende toepassingen op de biodiversiteit en natuurlijke hulpbronnen.

Potentieel van biomassa

De mate waarin biomassa en biologische bouwstenen gebruikt kunnen worden voor voedsel, chemicaliën, materialen, en energie wordt intensief bestudeerd. Deze studies laten een grote spreiding zien in potentieel (voor een overzicht, zie Dornburg et al.¹⁴ en zijn sterk afhankelijk van de gemaakte aannames. In het ene uiterste, zoals beschreven door Smeets, Faaij et al.¹⁵, wordt uitgegaan van een hoog technologisch ontwikkelde landbouw en een geringe toename in voedselconsumptie, en daaruit wordt geschat dat er voldoende biomassa is om daarvan 1500 EJ ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) in te zetten voor energie. Aan de andere kant zijn er ook schattingen die aangeven dat er onvoldoende biomassa geproduceerd kan worden voor energietoepassing. Zo stellen Wolf et al.¹⁶ dat alle geproduceerde biomassa nodig is om de groeiende wereldbevolking te voorzien van voldoende voedsel. Bindraban et al.¹⁷ berekenden dat 10% vervanging van fossiele brandstoffen door biobrandstoffen een minimale reductie in CO₂ emissies oplevert en tegelijkertijd enorme hoeveelheden vruchtbare landbouwgrond opeist. Voor Nederland bijvoorbeeld, zou voor een vervanging van 10% fossiele brandstoffen het volledige akkerbouwareaal van Nederland nodig zijn.

Een wereldwijde schatting van het potentieel van biomassa is recent gemaakt door Jongschaap en Conijn^{18,19}. Zij laten zien dat wanneer in 2050 het in de wereld beschikbare landbouwareaal (5000 miljoen ha) eerst wordt gebruikt om iedereen van voldoende voedsel te voorzien en het overblijvende areaal (maximaal 800 miljoen ha) volledig wordt gebruikt voor de teelt van energiegewassen, daarmee dan in totaal ruim 100 EJ per jaar aan energie kan worden geproduceerd. Zij gaan er daarbij van uit dat meerjarige energiegewassen zoals oliepalm, *Jatropha* en lignocellulosegewassen op het resterende grasland en eenjarige energiegewassen op het resterende bouwland worden geteeld. Bij de berekeningen is uitgegaan van een doorzetting van de trends in productiviteit tot het biofysisch maximum, en een maximaal gemiddelde van 82% van het potentieel haalbare onder "rainfed" condities (het berekende huidige niveau van Noord Amerika en Europa), en is rekening gehouden met de verwachte ontwikkeling van de bevolkingsgroei in de 22 UN regio's, en de regionale dieetontwikkeling, die meer vleesconsumptie in grote delen van de wereld inhoudt.

Duurzaamheid van de Biobased Economy

De mate waarin een economie gebaseerd op biomassa echt duurzaam is en bijdraagt aan de gestelde beleidsdoelstellingen, hangt van veel factoren af. Op veel gebieden levert vervanging van fossiele grondstoffen door biomassa milieuvoordelen op, met name wanneer afvalstromen gebruikt worden. Aan de andere kant kan het gebruik van biomassa, bijvoorbeeld voor energievoorziening, zelfs tot extra CO₂ emissies leiden in vergelijking met fossiele brandstoffen, o.a. vanwege de energie die nodig is om gewassen te verbouwen en te transporteren, om kunstmest te produceren, en vanwege de indirecte effecten van landgebruiksverandering (ILUC), waarbij bijvoorbeeld bossen gekapt worden om landbouwgrond vrij te maken^{17, 20}. Niet alleen bovengrondse koolstofverliezen zijn hierbij van belang. Wanneer niet voldoende koolstof in de bodem wordt teruggebracht, gaat het organische stof gehalte in de bodem achteruit. Dit kan vervolgens tot extra afbraak in de bodem leiden: een nieuwe bron van CO₂ emissies, en kan daarnaast andere negatieve effecten tot gevolg hebben (Figuur 6).



Figuur 6. De 'classic collapse' laat de mogelijke gevolgen zien van volledige oogst van gewassen, dat uitputting van koolstof in de bodem tot gevolg heeft (gebaseerd op Lal et al.²¹).

De wetenschappelijke raad voor het regeringsbeleid heeft een aantal jaren geleden de Nederlandse economie gekarakteriseerd als een transactie-economie. Mondiaal wordt de productieketen meer en meer opgesplitst en onderdelen van de keten worden geproduceerd waar de productiekosten het laagst zijn. 'Afval' – dat in de toekomst niet meer als afval zal worden gezien – is een belangrijke grondstof waaruit economische waarde kan worden gegeneerd, ook lokaal, met kleinschalige en duurzame processen. De Biobased Economy is de enige manier om duurzame economische innovatie te bereiken, omdat (a) de energiebron, zonlicht, overal en voor iedereen beschikbaar is en (b) de katalytische omzettingen in de natuur in hoge mate superieur zijn aan alles wat de chemische industrie tot op heden gerealiseerd heeft en zal kunnen realiseren, zowel wat betreft complexiteit als wat betreft efficiëntie en duurzaamheid.

Schaarste van grondstoffen

Schaarste van grondstoffen is niet alleen van toepassing op fossiele grondstoffen zoals olie. Ook de beschikbaarheid van nutriënten (bijvoorbeeld fosfaat), water en vruchtbare landbouwgrond staan onder druk.

Van de nutriënten is de grootste schaarste te verwachten voor fosfaat, een essentieel nutriënt voor plantengroei. Fosfaat wordt gewonnen uit fosfaatgesteentes en het grootste deel (85%, 14.9 miljoen ton per jaar) van deze fosfaat wordt gebruikt als kunstmest in de landbouw²² voor voedselproductie en non-food toepassingen. Mogelijk zijn de fosfaatreserves uit gesteentes over 50 tot 100 jaar uitgeput²², anderzijds is het mogelijk dat met nieuwe technologieën ook nieuwe bronnen van fosfaat aangeboord worden. Vanuit milieuoogpunt, en mogelijk ook vanuit economisch en energetisch oogpunt, is minimaal gebruik en maximaal hergebruik van nutriënten een belangrijk aandachtspunt.

Naast schaarste van nutriënten, is ook schaarste van zoet water van belang. 97% van alle water op aarde bevindt zich als zout water in zeeën en oceanen. De overige 3% is zout of zoet water in meren, oppervlaktewater en grondwater. Gemiddeld wordt wereldwijd in de landbouw 70% van de mondiale zoetwaterreserves gebruikt voor irrigatie²³, waarvan zo'n 80% uit regenwater afkomstig is uit opslag in de bodem, en de rest uit rivieren, reservoirs, meren en aquifers²³. Er zijn grote lokale verschillen; in sommige ontwikkelingslanden wordt zelfs 95% van het zoetwater gebruikt voor irrigatie. Bij toenemende landbouwproductiviteit, en geen aanzienlijke verhoging in efficiëntie van waterverbruik in de landbouw, zal de vraag naar water voor irrigatie verder toenemen, waardoor waterschaarste een groter probleem wordt in de toekomst.

Naast nutriënten en water bepaalt de beschikbaarheid van vruchtbare landbouwgrond de hoeveelheid biomassa die geproduceerd kan worden. In 2006 was 22858 km² van Nederland (55% van het totaaloppervlak) in

gebruik voor de landbouw²⁴. Essentieel voor hoge biomassaproductie is, dat de gewassen verbouwd worden op vruchtbare grond. De vruchtbaarheid van de bodem is voor een groot deel afhankelijk van de hoeveelheid organische stof die in de bodem aanwezig is. Organische stof in de bodem leidt niet alleen tot verminderde CO₂ emissies, maar ook tot een beter vochtvasthoudend vermogen en tot verminderde uitspoeling van nutriënten. Daarnaast zorgt organische stof in de bodem voor gezond bodemleven en voor behoud van de bodembiodiversiteit die bijdraagt aan een goede bodemstructuur. Het is van belang om voldoende organisch materiaal in de bodem terug te brengen en zodoende de bodemvruchtbaarheid in stand te houden of te verbeteren. Ook op minder vruchtbare grond kunnen gewassen verbouwd worden, maar opbrengsten op deze gronden zijn vaak laag. De beperkte beschikbaarheid van nutriënten, zoet water en vruchtbare landbouwgrond, legt beperkingen op aan de biomassaproductie en noodzaakt tot keuzes over de inzet van biomassa voor voedsel, chemicaliën, materialen en energie. In dit rapport nemen we Nederland als uitgangspunt. Tegelijkertijd is Nederland onlosmakelijk verbonden met de Europese Unie en de rest van de wereld, via wet- en regelgeving en via de economie. Daarom belichten we zowel regionale als mondiale aspecten van biomassa. De winning clusters zullen daarom zowel op het niveau van Nederland als op mondiaal niveau van belang zijn.

4. Randvoorwaarden voor een duurzame Biobased Economy

Om biomassa op een duurzame manier te kunnen gebruiken voor alle bedachte toepassingen, zijn grote veranderingen nodig in productie, verwerking en consumptie van biomassa. Om te kunnen beoordelen of een Biobased Economy met deze veranderingen bijdraagt aan duurzame ontwikkeling op de lange termijn, is een beoordelingskader nodig. In dit hoofdstuk beschrijven we de randvoorwaarden voor een duurzame Biobased Economy.

Een Biobased Economy die bijdraagt aan duurzame ontwikkeling op de lange termijn:

- Produceert voldoende voedsel voor iedereen.
- Vergroot of behoudt de biodiversiteit.
- Benut de geproduceerde grondstoffen zo volledig mogelijk voor zo hoogwaardig mogelijke toepassingen.
- Hergebruikt alle inputs (nutriënten, water) zoveel mogelijk.
- Draagt bij aan een duurzame energievoorziening.
- Is economisch rendabel.
- Wordt maatschappelijk positief gewaardeerd.

1. Productie van voldoende voedsel voor iedereen

De eerste randvoorwaarde voor een duurzame Biobased Economy is de productie van voldoende en hoogkwalitatief voedsel voor iedereen op de wereld. Dit betekent dat biomassa voor een gezonde voeding prioriteit heeft boven alle andere toepassingen, en op wereldschaal een beperking vormt voor de beschikbaarheid van biomassa voor andere toepassingen. Met de verwachte stijging van de wereldpopulatie naar 9 miljard mensen is het een uitdaging op zich om voldoende voedsel op een duurzame manier te produceren. Of, zoals verwoord door Beddington²⁵:

"The world must produce 40 per cent more food, with limited land and water, using less energy, fertilizer and pesticide — by 2030 — at the same time as bringing down sharply the level of greenhouse gases emitted globally, and while coping with the impact of climate changes that cannot be avoided."

2. Toename in of behoud van biodiversiteit

Behoud van biodiversiteit is een randvoorwaarde voor een duurzame Biobased Economy. Het effect van de Biobased Economy op biodiversiteit heeft verschillende aspecten, zowel bovengronds als ondergronds. Aan de ene kant biedt de Biobased Economy kansen voor de biodiversiteit, en aan de

andere kant vormt zij een bedreiging. Op de schaal van landbouwsystemen kan bijvoorbeeld het opnemen van een energiegewas in de gewasrotatie, en het verbouwen van nieuwe gewassen, de biodiversiteit ten goede komen. Ook kan een verhoogde gewasproductie positief bijdragen aan de biodiversiteit, vanwege een verminderd beslag op grondgebruik, waardoor meer ruimte beschikbaar komt voor specifieke leefgebieden van dieren en planten. Aan de andere kant kan verhoogde productie leiden tot verlies aan bodemvruchtbaarheid en biodiversiteit in de bodem, met name wanneer het volledige gewas geoogst wordt en geen gewasresten teruggevoerd worden. Op mondiale schaal wordt de Biobased Economy voornamelijk als bedreiging van de biodiversiteit gezien, vooral bij grootschalige teelt van biomassa voor energietoepassing, omdat extra landbouwgrond in gebruik wordt genomen. Dit kan leiden tot ontbossing en aantasting van natuurgebieden, wat een negatief effect heeft op de biodiversiteit²⁶.

3. Zo volledig mogelijke benutten van grondstoffen voor zo hoogwaardige mogelijke toepassingen

Bioraffinage is het sleutelwoord wanneer het gaat om benutting van grondstoffen. Bij bioraffinage worden zo veel mogelijk delen van de biomassa benut voor de productie van voedsel, materialen, chemicaliën, en energie. Hierbij wordt biomassa voor zo hoogwaardig mogelijke toepassingen ingezet, en laagwaardige toepassingen zijn het sluitstuk van toepassingen, waarna een voldoende hoeveelheid biomassa of restproducten naar de bodem wordt teruggebracht. Het type biomassa bepaalt voor welk product de biomassa het meest geschikt is, met andere woorden, hoe efficiënt de biomassa omgezet kan worden naar het gewenste product. Hierbij ondergaat de biomassa één of meerdere conversiestappen, die biochemisch, mechanisch, chemisch, of thermochemisch van aard zijn²⁷.

Tot nu toe wordt bioraffinage vooral toegepast in de suiker-, zetmeel-, en papierindustrie. Uitgangspunt daarbij is vaak de grootschalige optimalisatie naar één hoofdproduct, waarbij de restproducten weinig economische waarde hebben²⁷. In de context van de Biobased Economy heeft bioraffinage juist het omgekeerde als doel, namelijk om te optimaliseren naar meerdere producten. Bij bioraffinage is het bovendien van belang te realiseren dat volledig gebruik van biomassa leidt tot verlies aan koolstof in de bodem, en dat dus in de toekomst voor behoud van bodemvruchtbaarheid bij de oogst en bij bioraffinage rekening gehouden zal gaan worden met het terugbrengen van een deel van deze biomassa naar de bodem.

4. Hergebruik van zoveel mogelijk inputs (nutriënten, water)

Het sluiten van water- en nutriëntenkringlopen is een essentieel onderdeel van de Biobased Economy, omdat biomassa niet kan groeien zonder water en nutriënten, en de nu soms al optredende schaarste in de toekomst verder zal toenemen. Een belangrijk aspect van het sluiten van nutriëntenkringlopen is de toenemende mondialisering van de biomassamarkt, wat leidt tot nutriëntenuitputting op de plaats van productie, en nutriëntenoverschotten op de plaats van consumptie. Een voorbeeld hiervan is het sojatransport. Momenteel vindt grootschalige (en goedkope) sojaproductie plaats in Brazilië. Een deel van deze soja wordt verscheept naar Nederland en onder meer gebruikt als eiwitbron voor ons vee. Met de soja wordt niet alleen organisch materiaal, maar worden ook nutriënten verplaatst van Brazilië naar Nederland. Het sluiten van deze nutriënten- en koolstofkringlopen vraagt zowel een lokale als een mondiale aanpak, zowel in de gebieden van biomassaproductie als op de plek van consumptie. Aandachtspunt hierbij is het hoge watergehalte van biomassa. Het onttrekken van water uit biomassa voordat transport plaatsvindt zal enorme energiebesparingen opleveren.

5. Bijdrage aan duurzame energievoorziening

Voor een duurzame energievoorziening is het van groot belang om fossiele energie door hernieuwbare energie te vervangen. In 2007 werd 87.3% van de energie geproduceerd uit fossiele (en nucleaire) bronnen²⁸.

Het aandeel biomassa in de totale energievoorziening in 2007 was 10%. Het overgrote deel van de bioenergie, 87%, komt uit houtige biomassa. Hiervan wordt 61% direct (en inefficiënt) gebruikt voor verwarming en koken²⁹. Het overige deel (39%) wordt gebruikt voor moderne vormen van energie, bijvoorbeeld elektriciteitsopwekking

Voor productie van elektriciteit zijn verschillende technologieën voorhanden en in ontwikkeling die onafhankelijk zijn van biomassa als basis. Het gaat dan bijvoorbeeld om fotonvoltaïsche cellen, concentrated solar power, windmolens en mengen van zoet en zout water. Fotonvoltaïsche cellen en concentrated solar power zijn met hun efficiëntie van 15-20% een stuk aantrekkelijker voor elektriciteitsproductie dan biomassa. Ook verwarming kan worden gerealiseerd met technologieën die niet afhankelijk zijn van biomassa, zoals koude-warmte opslag in de ondergrond bij gebouwen en kassen, aardwarmte, warmtepompen, zonnecollectoren, en gebruik van restwarmte (bijv. uit verbrandingsmotoren of uit warm douchewater).

Voor brandstoffen zijn momenteel minder alternatieven voorhanden; vooral op de korte termijn zijn biobrandstoffen de enige beschikbare optie. Hoewel auto's gedreven op elektriciteit en/of waterstof als alternatieven genoemd worden, kleven er nog grote nadelen aan deze opties, zoals beperkte actieradius, veiligheid (in verband met opslag H₂), en gebrek aan infrastructuur (voor H₂). Vliegtuigen hebben vloeibare brandstof nodig en

vliegen tot nu toe alleen op kerosine. Uitzondering hierop zijn enkele vluchten met biobrandstof gewonnen uit een oliezaadgewas. Verdere ontwikkelingen op het gebied van energie-opties die niet op biomassa zijn gebaseerd zijn essentieel om de druk op biomassa voor energietoepassingen te verminderen.

6. Bijdrage aan de reële economie

De Biobased Economy biedt kansen omdat het bedrijven en consumenten op een nieuwe manier en in duurzame ketens verbindt. Momenteel wordt de Biobased Economy nog gevoed door subsidies; dit zal kunnen veranderen met de implementatie van handelssystemen voor uitstoot van CO₂ en andere afvalstoffen.

De mate waarin de Biobased Economy vervolgens bijdraagt een reële economische vooruitgang hangt af van het schaalniveau waarop de economie gebaseerd is. Op mondiaal niveau biedt een Biobased Economy in principe zekerheid en spreiding in aanvoer van grondstoffen, verlaagt de afhankelijkheid van monopolistische grondstof leveranciers, en initieert een nieuwe marktwerking door innovatieve duurzame producten. Op regionaal niveau biedt de Biobased Economy kansen van nieuwe markten in landen die verdienen aan productie en verwerking (Oost-Europa, Azië, Latijns Amerika, en op termijn Afrika). Om de criteria van duurzaamheid te kunnen garanderen en om de marktpositie van bedrijven te borgen zijn wettelijke regels en nieuwe methoden van certificering nodig, en gericht beleid van overheden om ook in de landen van herkomst uitputting van natuurlijke hulpbronnen te voorkomen. Een Biobased Economy vraagt de ontwikkeling van duurzame netwerken van specialistische bedrijven en toeleveranciers op de plaats van productie, verwerking en consumptie en de interacties daartussen. Boeren in Brazilië en Afrika gaan duurzaam produceren met terugvoer van nutriënten, behoud van bodemvruchtbaarheid, en een beperkte ecologische voetafdruk wat betreft water. Bulkverwerking vindt zoveel mogelijk plaats dicht bij productie om kringlopen te kunnen sluiten (lokale verwerkingsindustrie). Transport naar fijne verwerking en de consument is zo veel mogelijk duurzaam geregeld. Fijne verwerking gebeurt dicht bij consument. Op de plaats van consumptie krijgen waardevolle reststromen een nuttige toepassing en nutriënten worden waar nodig teruggevoerd naar productie regio's, waarbij de afstanden tussen producent en consument zo kort mogelijk zullen zijn.

7. Waardering door de maatschappij

De belangrijkste voorwaarde voor de succesvolle implementatie van een Biobased Economy is dat deze geaccepteerd en gewaardeerd wordt door de maatschappij en het individu. Dit vraagt zowel om een individuele benadering met veel actie, communicatie en interactie, als om een

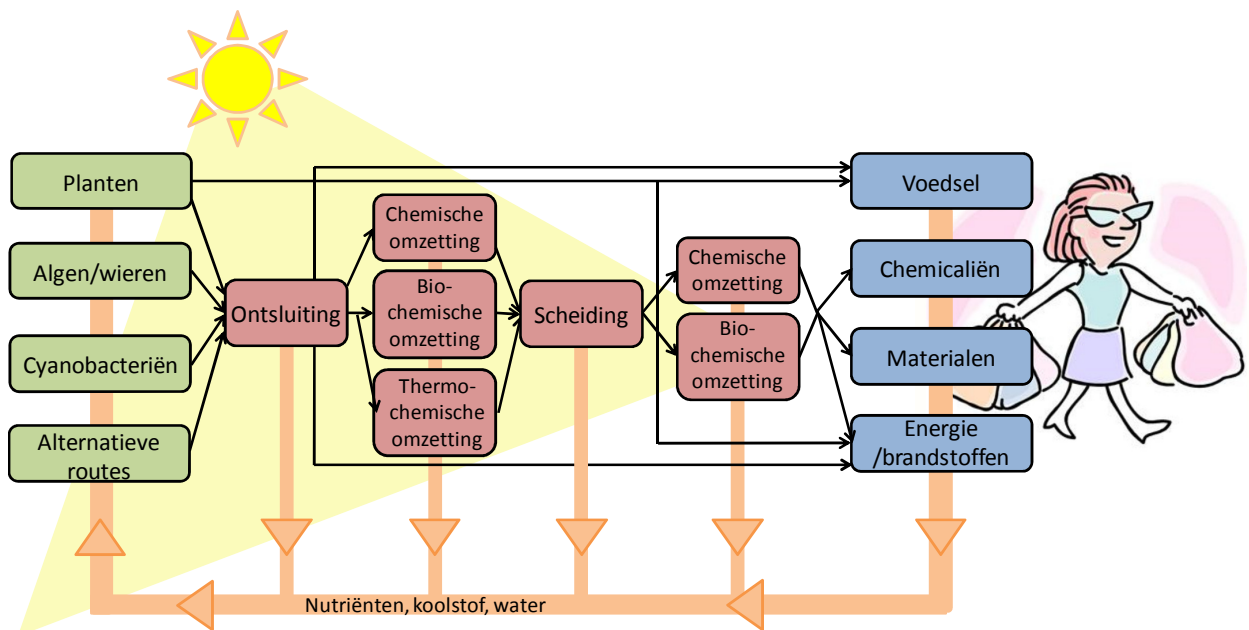
doelgerichte strategie waarbij de voordelen van de Biobased Economy de mogelijkheid biedt tot een succesvolle en snelle verspreiding naar de maatschappij. In beide gevallen kan vanuit de sociale wetenschap en de geesteswetenschappen de maatschappelijke waardering van een technologische en economische vernieuwing in een aantal deelgebieden worden gedefinieerd. Deze deelgebieden zijn gebaseerd op de bijdragen die de maatschappelijke verandering levert aan de economische ontplooiingsmogelijkheden van burgers, het produceren van voldoende voedsel, het versterken van gezondheid, het creëren van een goede woon- en leefomgeving, het bieden van vrijheid (inspiratie, geluk), veiligheid en duurzaamheid.

Moeilijker wordt het wanneer een nieuwe technologie die bijdraagt aan de introductie van de Biobased Economy stuit op weerstand op de korte termijn en niet vanzelfsprekend voldoet aan het kader van maatschappelijke waardering. Hiertoe zal elke winning cluster moeten worden getoetst om te identificeren op welke aspecten deze de maatschappij aanspreken of juist afstoten.

Cruciaal is dat de komende energietransitie en in het verlengde daarvan de Biobased Economy verschilt van eerdere energietransities omdat het nu gaat om een transitie naar duurzaamheid. Nederland heeft een sterke economie en dit is vooral mogelijk geworden omdat we sinds de gouden eeuw de beschikking hadden over toegankelijke bronnen van energie: eerst turf, toen steenkool en nu gas. Het is voor het verduurzamen van onze sociale en economische structuur van belang om tijdig in te spelen op de ontwikkelingen op het gebied van de schaalbare Biobased Economy gedreven door de omzetting van zonlicht; hiermee maken we het mogelijk dat ook in 2050 Nederland toegang heeft tot een natuurlijke bron van energie.

5. De Biobased Economy in 2050

Onderstaande Figuur 7 geeft de processen in de duurzame Biobased Economy van 2050 weer. De energie die van de zon komt wordt vastgelegd in planten, algen, wieren en cyanobacteriën, en via alternatieve routes. De meeste vormen van biomassa worden niet direct geconsumeerd, maar eerst verwerkt. Hiervoor wordt de biomassa eerst uit elkaar gehaald (ontsluiting), waarna katalytisch-chemische, biochemische of thermische omzettingen volgen. Thermochemische omzettingen worden zo veel mogelijk beperkt, omdat het grote energie- en kostenvoordelen heeft om de functionele groepen die de biomassa bevat te benutten, in plaats van de biomassa eerst in kleine delen op te breken. Na de oogst wordt het product gescheiden, waarna het direct gebruikt kan worden, of na verdere verwerking (biochemische of chemische reacties), voor voedsel, energie, chemicaliën en materialen. De reststromen uit alle verwerkingsstappen en uit de consumptie/verbruik worden zoveel mogelijk teruggevoerd naar de productie, zowel op lokaal als op regionaal en mondiaal niveau. Tegelijkertijd wordt er voldoende biomassa (of reststromen daarvan) teruggevoerd naar de bodem ten behoeve van een duurzaam bodembeheer. De energie die voor deze processen nodig is komt uit de zon of uit de biomassa zelf. In dit hoofdstuk geven we een doorkijk naar 2050, sterk in lijn met het SER-advies "Meer chemie tussen groen en groei"³⁰ en de "Innovatieagenda voor de Biobased Economy"³¹.



Figuur 7. Processen in de duurzame Biobased Economy.

5.1 Productie van biomassa in 2050

5.1.1 Productie van biologische bouwstenen in planten

De plant is, naast dieren, de enige vorm van biomassa die direct gebruikt wordt voor voedsel. Planten bevatten suiker, zetmeel, olie, eiwitten, en/of lignocellulose. Lignocellulose is het voornaamste bestanddeel van het niet-eetbare deel van de plant, zoals de stengel of stam, en vormt een belangrijke biomassabron voor de non-food toepassingen.

In 2050 hebben naast planten ook algen, wieren, bacteriën en biologische zonnecollectoren op grote schaal hun intrede gedaan. Dat is noodzakelijk om gezamenlijk te kunnen voorzien in de steeds verder toenemende behoefte aan biomassa voor food en non-food toepassingen. Desalniettemin vormen planten een belangrijke basis voor de verschillende biobased toepassingen, met voedsel als prioriteit.

In 2050 is de fotosynthese-efficiëntie van bestaande gewassen sterk verhoogd ten opzichte van 2011 (Figuur 8). In ontwikkelingslanden zorgt beter beheer (water, mest, bodem) voor verhoogde opbrengsten. Daarnaast hebben nieuwe gewassen hun intrede gedaan en worden bestaande gewassen op andere manieren gebruikt. Wereldwijd zijn teeltmethoden aangepast om de benutting van schaarse grondstoffen als zoet water en fosfaat te optimaliseren en hergebruik mogelijk te maken.



Figuur 8. Productie van biomassa en biologische bouwstenen in planten: aandachtsvelden voor 2050.

Efficiëntere fotosynthese

De opwarming van de aarde leidt ertoe dat teeltgebieden naar het noorden opschuiven. Gewassen waarmee oorspronkelijk in zuidelijke landen hoge opbrengsten werden behaald, zijn daar bij temperatuurstijging in noordelijke landen veelal niet toe in staat omdat de productie niet alleen afhankelijk is van temperatuur, maar ook van daglengte en lichtintensiteit. Alle landplanten maken bij de fotosynthese gebruik van hetzelfde chlorofyltype met dezelfde fotoreceptorpigmenten. Maar landplanten verschillen in het mechanisme waarmee het koolzuur wordt opgevangen en verder wordt gemetaboliseerd. Planten kunnen worden onderscheiden in C3- en C4-planten, waarbij C4-planten een efficiënter fotosynthesesysteem bezitten en daarom een hogere productiviteit hebben. Op verschillende onderzoekslaboratoria wordt gewerkt om C3-planten eigenschappen te geven van het C4-mechanisme. Zo werkt het IRRI (International Rice Research Institute) op de Filippijnen aan introductie van C4-genen in rijst.

Bij zeewieren en microalgen komen wel verschillende chlorofyltypes en fotoreceptorpigmenten voor. Hierdoor kunnen bijvoorbeeld rood- en bruinwieren onder de relatief lichtarme omstandigheden in diepere lagen van de zee een hoge drogestofproductie behalen. Het inbouwen van het chlorofyl van deze wieren in landgewassen biedt mogelijkheden om gewassen ook onder omstandigheden van korte daglengte en lage lichtintensiteit een hoge opbrengst te kunnen geven. Ook andere genen kunnen naar onze gewassen worden overgebracht, zoals genen die resistenties geven tegen ziektes en plagen en genen die planten meer weerbaar maken tegen droogte en andere vormen van stress. Verhoging van de weerbaarheid van planten zal een directe verhoging van de opbrengst per oppervlakte gewas geven. Nieuwe vormen van gerichte veredeling op basis van genetische kennis maken het mogelijk dit soort eigenschappen in gewassen te introduceren. Dit kan door klassieke veredeling, maar sneller en meer effectief via genetische modificatie.

Verhoogde biomassaproductie in Afrika en Azië

In Afrika en een aantal Aziatische landen richt de landbouwkundige productie zich eerst en vooral op voedselproductie om de bevolking van voldoende voedsel van goede kwaliteit te voorzien. Daarnaast zijn er nog vele onbenutte mogelijkheden voor biomassaproductie met een economisch non-food perspectief. Meer in het algemeen hebben de aride, semi-aride, of nutriëntarme regio's in de wereld te maken met biofysische beperkingen. In deze gebieden kunnen voldoende hoge landbouwopbrengsten alleen behaald worden bij uitgekiend water- en nutriëntenbeheer in aan de lokale omstandigheden aangepaste productiesystemen. Ook kan teelt van nutriënt en waterefficiënte gewassen hieraan bijdragen. De productiesystemen moeten daartoe klimaatrobust, hoogproductief en rendabel zijn, en moeten

een lage ecologische voetafdruk bezitten. Mogelijk kunnen grote – nu nog uitgesloten – oppervlakken aan de mondiale biomassaproductie gaan bijdragen. Nieuwe alternatieve productiesystemen kunnen worden ontwikkeld. Denk daarbij aan algen- en bamboe-boerderijen in woestijngebieden, gebruikmakend van een overvloed aan zonne-energie en hergebruik van nutriënten en water uit afvalwater.

Teelt de grond uit

Er zijn intensieve teeltsystemen ontwikkeld met een zeer hoge efficiëntie van het water-, nutriënten- en pesticidengebruik. Deze teelt los van de grond kan plaatsvinden in aquatisch milieu, of op substraten en in grond los van de ondergrond. Hierdoor vinden geen emissies plaats van nutriënten en pesticiden naar grond- en oppervlaktewater. Water en nutriënten worden zoveel mogelijk lokaal teruggewonnen en hergebruikt. Teelt de grond uit heeft als groot voordeel dat de teelt in principe overal, ook op niet-vruchtbare gronden, plaats kan vinden.

Nieuwe gewassen

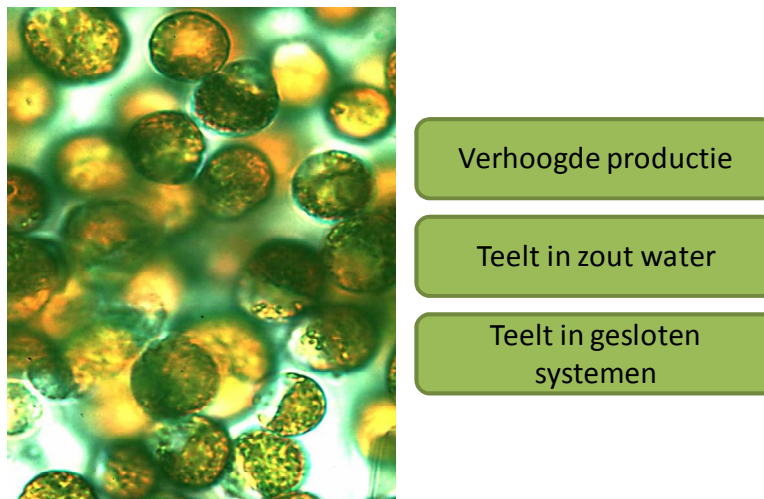
In 2050 zijn er nieuwe gewassen of nieuwe toepassingen van gewassen die een belangrijke bijdrage aan de Biobased Economy leveren. Een voorbeeld hiervan is rubber uit paardenbloemen. Rubber wordt momenteel met name gewonnen uit de rubberboom. De toenemende vraag naar rubber leidt ertoe dat alternatieve bronnen van rubber worden gezocht. Een alternatieve bron is de Russische paardenbloem. Deze produceert een stof die als basis kan dienen voor natuurlijk rubber.

Ook worden er nieuwe toepassingen van bestaande gewassen ontwikkeld. Een voorbeeld hiervan is gras. Gras kan in verschillende bruikbare fracties gescheiden worden, waarbij het eiwit als veevoer kan dienen, en de cellulosevezels bijvoorbeeld als grondstof voor papier gebruikt kunnen worden.

5.1.2 Productie van biologische bouwstenen in algen, wieren en cyanobacteriën

Micro- en macroalgen worden al sinds 1950 als veelbelovend gewas beschouwd voor productie van eiwit en brandstof. Wij denken dat algen in 2050 hun belofte hebben waargemaakt en een commerciële, industriële activiteit vormen (Figuur 9). De kostprijs van productie zal in 2050 sterk zijn verminderd³². Bovendien zal productie veel kosteneffectiever zijn als de geproduceerde biomassa verwerkt wordt via bioraffinage³³.

Cyanobacteriën zijn fotosynthetisch actieve micro-organismen die in het water leven. De organismen zetten met een hoge efficiëntie de energie van de zon om in verschillende koolstofverbindingen. In 2050 is de modelcyanobacterie *Synechocystis* geoptimaliseerd voor de Biobased Economy. Daartoe is de lichtabsorptie van het fotosynthesesysteem in het celmembraan en het verdere metabolisme via synthetische biologie verbeterd. Afhankelijk van de behoefte kan de bacterie worden aangezet om suikers of de vloeibare brandstoffen butanol en propanol te maken. Een belangrijke doorbraak die een hoge efficiëntie van lichtconversie mogelijk maakt is de aanpassing van de regulering van de licht-donker reactie van het organisme. De "designer" cyanobacteriën groeien in gesloten systemen (bioreactoren) met volumes van enkele tonnen, zonlicht wordt ingebracht via een uitgebreid systeem van glasvezels en de bacteriën scheiden de brandstoffen continu uit.



Figuur 9. Productie van biomassa en biologische bouwstenen in algen: aandachtsvelden voor 2050.



Binnen het BioSolar Cells programma (zie: www.biosolarcells.nl) werken kennisinstellingen, bedrijven en de overheid samen aan het beter begrijpen en toepassen van fotosynthese. Biosolar cells richt zich daarbij op drie niveau's:

1. Het verhogen van de fotosynthetische efficiëntie van planten.
 2. De directe productie van brandstoffen zonder een biomassa-tussenstap.
 3. Het combineren van natuurlijke en technische componenten.
-

Verhoogde productie per ha

Algen zetten zonlicht en meststoffen veel efficiënter om in bruikbare olie dan landbouwgewassen, zoals koolzaad. Het metabolisme in algen is te sturen op een zodanige manier dat overproductie van bepaalde componenten, zoals olie gerealiseerd kan worden. Op die manier is het mogelijk om biomassa te produceren met daarin ongeveer 60% olie. Zo kan 20 000 liter olie per hectare worden geproduceerd, terwijl een hectare raapzaad of oliepalmen 1500 resp. 6000 liter oplevert.

Micro- en macroalgen groeien op zout water, geen concurrentie om vruchtbare grond

Microalgen kunnen groeien op zeewater. Om deze reden kunnen algen gekweekt worden in gebieden die niet geschikt zijn voor landbouw zoals in woestijnen (mits verdamping voorkomen wordt) en op zee. Voor de productie van 1 liter biodiesel uit landbouwgewassen zijn duizenden liters water nodig, terwijl dat met algen beperkt kan worden tot slechts enkele liters. Kweken van algen met minimaal gebruik van zoet water is alleen mogelijk als we de productiesystemen kunnen koelen via warmteuitwisseling in plaats van verdamping. Om deze reden is het aantrekkelijk algen te kweken op de open zee, omdat het zeewater een ideale temperatuurbuffer is. Om hoge opbrengsten te behalen is optimale nutriëntenvoorziening, vooral van stikstof en fosfaat, essentieel. De enige manier om algen te kweken zonder verdamping van water en dus zonder excessief gebruik van zoet water is door gebruik te maken van 'gesloten' systemen (Figuur 10). In open vijvers

zal verdamping altijd een rol spelen en zal water aangevuld moeten worden door toevoeging van zoet water.



Figuur 10. Grootschalige testopstelling voor productie van algen in Spanje door Wageningen University (Foto: Prof. R. Wijffels).

Stand-alone systemen

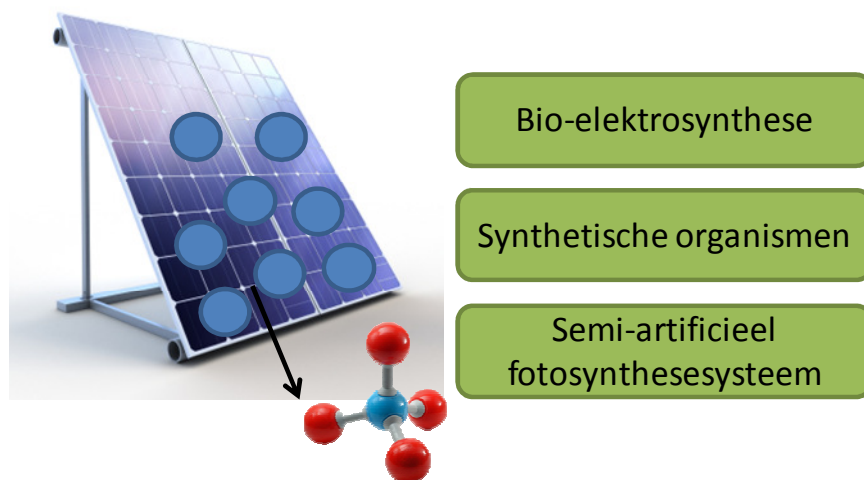
Schaalbaarheid van algenproductiesystemen is momenteel nog een bottleneck. Voor de productie van algen zijn meststoffen als fosfaat en stikstof nodig. Grootschalige productie van algen vergt een enorme logistiek om al die grondstoffen aan te leveren. In specifieke situaties kunnen grootschalige productiesystemen onafhankelijker worden van toevoer van meststoffen, CO_2 en zoet water. Dan kunnen ze meer als 'stand alone' faciliteiten functioneren. Transportbrandstoffen bevatten geen fosfaat of stikstof, maar bestaan slechts uit koolwaterstoffen. In 2050 zullen algen katalytisch olie produceren en uitscheiden en is er in feite nauwelijks kunstmest nodig en is toevoer van CO_2 voldoende. Dit is mogelijk middels *in situ* extractie van producten en het vervolgens melken van de algen^{34, 35}. Een essentieel substraat voor de productie van olie in algen is CO_2 . Effectieve productie kan alleen plaats vinden als de concentratie aan CO_2 hoger is dan de atmosferische concentratie. Actieve toevoer van gas rijk aan CO_2 is logistiek complex. Ideaal zou zijn om algen te kweken op CO_2 uit de atmosfeer en de concentratie van CO_2 fysisch-chemisch of biologisch ter plekke te verhogen met behulp van zonne-energie. Planten kunnen de CO_2 -concentratie in cellen ophogen middels het enzym carbonic anhydrase. Dit is in principe ook mogelijk in microalgen³⁶.

5.1.3 Productie van biologische bouwstenen via alternatieve routes

In 2050 zullen er drie nieuwe routes zijn ontwikkeld om biomassa te produceren, die een alternatief vormen voor fotosynthese in planten, algen, wieren, of cyanobacteriën. Het voordeel van deze alternatieve routes is dat ze onafhankelijk zijn van vruchtbare grond en in reactoren direct de gewenste vorm van biomassa kunnen produceren. Deze alternatieve routes zijn bio-elektrosynthese, synthetische biologie, en semi-artificiële fotosynthese systemen (Figuur 11).

Bio-elektrosynthese

Bio-elektrosynthese is een nieuwe en alternatieve route voor fotosynthese waarbij niet de zon, maar elektriciteit als energiebron dient voor levende micro-organismen³⁷. De benodigde elektriciteit kan met hoge efficiëntie direct uit de zon geproduceerd worden bijvoorbeeld via zonnecellen, maar kan ook afkomstig zijn uit andere bronnen, zoals windenergie of blue energy (elektriciteit uit het mengen van zoet en zout water). Water dient als elektronendonor, en met input van elektrische energie zetten bacteriën CO₂ direct om in bouwstoffen, zoals methaan of acetaat. De efficiëntie waarmee elektrische energie in chemische energie omgezet wordt via bio-elektrosynthese is nu nog 35%, en zal in 2050 tot zo'n 70% zijn opgelopen. Bij een efficiëntie van 20% van zonnecellen leidt dit dus tot een efficiëntie van 14%, een aanzienlijke verhoging in vergelijking met planten, algen en cyanobacteriën.



Figuur 11. Alternatieve fotosynthese-routes voor productie van biomassa en biologische bouwstenen: aandachtsvelden voor 2050.

Synthetische organismen

Synthetische organismen zijn organismen waarvan het DNA wordt beperkt tot de genomen die van belang zijn voor de productie van voor de mens nuttige bouwstoffen. Wanneer bijvoorbeeld het DNA van cyanobacteriën zo aangepast wordt dat een synthetische cel gecreëerd wordt die gericht eiwitten, koolhydraten of vetten, vergemakkelijkt dit de verwerking van het celmateriaal. Cyanobacteriën zijn een interessante mogelijkheid, omdat cyanobacteriën eencellige organismen zijn die, net als algen, een groter deel van het lichtspectrum kunnen omzetten dan planten, en dus zonlicht efficiënter benutten voor productie van biomassa. Een bijkomend voordeel is dat synthetische organismen niet afhankelijk hoeven te zijn van schaarse nutriënten die niet essentieel zijn voor de geproduceerde bouwstof. De geproduceerde eiwitten, koolhydraten of vetten kunnen gebruikt worden voor vele doeleinden: voedsel, veevoer, maar ook energie, materialen en chemicaliën.

Semi-artificieel fotosynthesesysteem

In een semi-artificieel fotosynthesesysteem (SAF) wordt zonlicht omgezet naar brandstof, ook met water als elektronendonor. Een SAF is gebaseerd op het natuurlijke (biologische) fotosyntheseprocess en bevat de twee fotosystemen om de hoge redoxgradient die nodig is voor het splitsen van water te genereren met zichtbaar licht. Een verbetering ten opzichte van het natuurlijke systeem is dat een SAF het zichtbare licht in twee spectrale gebieden opdeelt. De theoretische efficiëntie is 42%, en in 2050 wordt een efficiëntie van 30% behaald. Een aantrekkelijke brandstof voor tijdelijke opslag op daken van gebouwen en publiek meubilair in 2050 om in de avond en de nacht het licht te laten branden is mierenzuur, het eenvoudigste molecuul dat uit CO₂ gemaakt kan worden en dat ook in brandstofcellen gebruikt wordt.

5.2 Biomassaverwerking in 2050

Bij de verwerking van biomassa tot een waardevol product zijn drie processen essentieel: ontsluiting, omzetting, en scheiding. Hierbij wordt de biomassa-bron eerst omgezet naar biologische bouwstenen en tussenproducten, waarna scheidings- en omzettingstappen plaatsvinden om het gewenste eindproduct te maken. Figuur 12 geeft een overzicht van de biomassa bronnen, biologische bouwstenen en (eind)producten die op dit moment geproduceerd (gebaseerd op IEA³⁸).

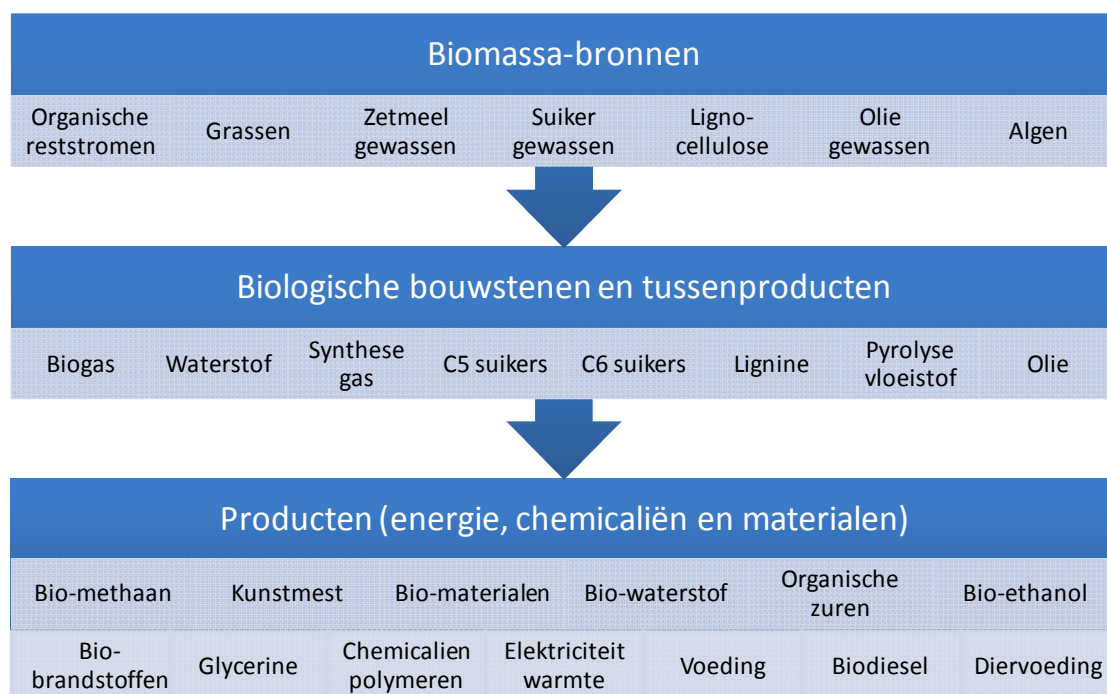
Agro-Food sector

In de agro-food sector is het dreigend tekort aan eiwitten ondervangen door verhoogde eiwitproductie in planten en andere (artificiële) organismen.

Reststromen worden niet langer gezien als afval, maar als bron van grondstoffen voor andere markten, of als bron van koolstof en nutriënten voor behoud van bodemvruchtbaarheid. Eiwit in veevoer en visvoer is niet langer afkomstig van dierlijke, maar van plantaardige bronnen.

Voedselproducten worden energiezuinig geproduceerd m.b.v. structurele exergie analyses.

In 2050 is het spectrum van biomassa bronnen, biologische bouwstenen en biobased producten sterk uitgebreid.



Figuur 12. Bestaand spectrum van biomassa bronnen, biologische bouwstenen en biobased producten (gebaseerd op IEA³⁸).

Chemie sector

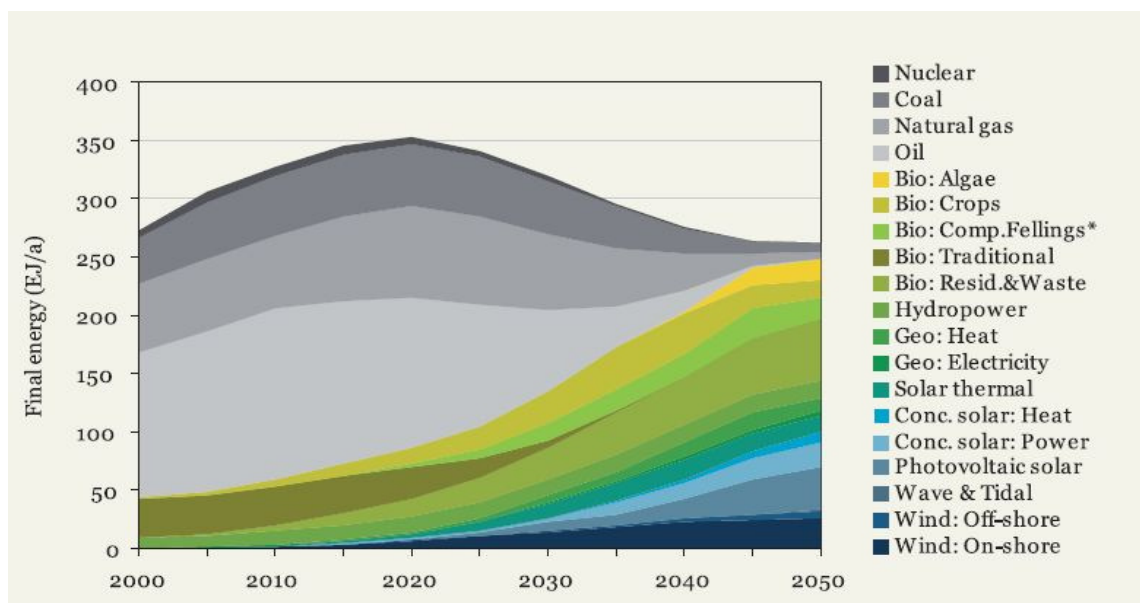
In 2050 is de chemie sector groen geworden en is olie als grondstof geheel vervangen door biologische bouwstenen. Chemieconcerns halen hun grondstoffen uit bronnen die niet met de voedselproductie concurreren, bijvoorbeeld lignocellulose uit planten en koolhydraten uit algen en artificiële organismen. De nadruk wordt gelegd op energiezuinige chemische en biochemische ontsluiting en omzetting. Energie-intensieve thermochemische omzettingen zijn zoveel mogelijk teruggedrongen. De functionele groepen die de biologische bouwstenen van nature bezitten worden optimaal gebruikt. Dit levert aanzienlijke energiebesparing op ten opzichte van het gebruik van petrochemische grondstoffen. De overgang van petrochemie naar groene chemie verloopt in drie fases (gebaseerd op WTC³¹):

- 1) In de eerste fase zijn petrochemische bouwstoffen vervangen door gelijksoortige biologische bouwstoffen, gebruik makend van de bestaande petrochemische infrastructuur.
- 2) In de tweede fase zijn nieuwe, voor de groene chemie meer geschikte biologische bouwstenen ontwikkelend en toegepast, zoals melkzuur als vervanger voor etheen.
- 3) In de derde fase zijn de chemie en het agro-food complex sterk geïntegreerd en zijn petrochemische grondstoffen volledig vervangen door biologische bouwstenen.

Naast chemicaliën worden ook materialen vervaardigd uit biomassa. Kunststoffen worden via verschillende routes uit biomassa reststromen geproduceerd, bijvoorbeeld uit melkzuur. Materialen worden versterkt met natuurlijke vezels, zoals vlas, hennep en jute. Deze natuurlijke vezels zijn sterk en licht, wat leidt tot een verminderde transport- en energiebehoefte. Binnen de papierindustrie zijn alternatieven voor houtvezel gevonden en wordt efficiënter met grondstoffen en energie omgegaan³⁹.

Energie sector

Biomassa is een belangrijke basis voor transportbrandstoffen, die in 2050 nodig zijn voor zwaar vervoer over land en het vliegverkeer. Biobrandstoffen worden in hoofdzaak geproduceerd uit algen, die geen concurrentie opleveren met de voedselproductie (wanneer algen gekweekt worden op grond die ongeschikt is voor landbouw). Het opwekken van elektriciteit en de productie van warmte zijn geen primaire toepassingen voor biomassa, en wordt vooral toegepast op restproducten. Er zijn in 2050 voldoende alternatieven voor de opwekking en opslag van elektriciteit beschikbaar.



Figuur 13. Energievoorziening voor de wereld, per energiebron².

Een recent rapport van het Wereld Natuur Fonds² laat een schatting zien voor de energievoorziening wereldwijd in 2050 (Figuur 13). Hierin wordt voorspeld dat een aanzienlijk deel van de toekomstige energievoorziening op basis van biomassa zal zijn, waarbij reststromen en afval, maar ook algen en gewassen als belangrijkste bronnen gezien worden. Het overige deel (meer dan de helft) van de energie wordt geleverd uit waterkracht, aardwarmte, zonne- en windenergie.

Chemische katalyse en biokatalyse voor omzetting van biomassa

Chemische- en biokatalyse worden in 2050 grootschalig ingezet om biomassa en biologische bouwstoffen om te zetten naar uiteenlopende producten. Biokatalyse maakt gebruik van micro-organismen en enzymen om de gewenste reacties op een energie-efficiënte manier te laten verlopen. Het gaat zowel om reacties op het gebied van ontsluiting als de omzetting van biomassa en biologische bouwstenen. Op dit moment worden al verscheidene bouwstoffen via fermentaties geproduceerd, zoals melkzuur en dialcoholen (Figuur 14). In 2050 is de toepassing van biokatalyse uitgebreid naar de productie van ingewikkelde moleculen uit biomassa. Dit vereist het begrijpen, nuttig gebruiken en maximaal behouden van de complexiteit van biologische bouwstenen bij de verwerking tot producten³¹. In 2050 zijn er fermentatieve en enzymatische processen die lignocellulose toegankelijk maken voor verdere (bio)chemische verwerking tot bulk chemicaliën, zoals suikers, aromaten en alkanen/alkenen.



85 kg stro

20 L biobrandstof

Figuur 14. Uit 85 kg stro wordt via fermentatie momenteel op labschaal 20 liter ABE (mengsel van aceton, butanol en ethanol) geproduceerd (Wageningen UR).

Scheidingstechnologie

Biologische bouwstenen worden over het algemeen via katalytische processen in een waterige omgeving geproduceerd. Om de gewenste bouwstenen afzonderlijk en in hoge concentraties beschikbaar te maken, zijn energie-efficiënte scheidingstechnologieën nodig. De huidige scheidingstechnologieën zijn met name gericht op het scheiden van relatief eenvoudige en zuivere moleculen afkomstig uit aardolie.

Geavanceerde scheidingstechnologieën die nodig zijn voor de Biobased Economy kunnen uit een 'organische soep' met verschillende complexe moleculen (die vaak op elkaar lijken en soms in lage concentraties aanwezig zijn), verschillende waardevolle bouwstenen scheiden en concentreren³¹. In 2050 kunnen biologische bouwstenen selectief gescheiden worden onder milde condities met zo min mogelijk energie-input.

Omzetting van bouwstenen in bruikbare producten, materiaalontwikkeling

Wanneer de biomassa is omgezet en gescheiden, kan het product ofwel direct gebruikt worden, of er is een extra stap nodig om het gewenste (eind)product te maken. Deze omzetting kan chemisch of biochemisch van aard zijn. Bij het maken van het product zijn de producteigenschappen van groot belang. De eigenschappen van biobased materialen zullen in 2050 vergelijkbaar of beter zijn dan de eigenschappen van materialen die geproduceerd zijn op basis van aardolie.

Nieuwe logistieke concepten voor biomassa

Bioraffinage is het proces waarin biomassa en biologische bouwstenen stapsgewijs worden verwerkt tot verschillende tussen- en eindproducten. Deze coproductie is kenmerkend voor de Biobased Economy en resulteert in een optimale verwaarding van de biologische grondstoffen.

In de opeenvolgende fasen van verwerking wordt steeds ingezet op de productie van zo hoogwaardig mogelijke producten (Figuur 4). Om dit tot stand te brengen is het noodzakelijk dat er integratie plaatsvindt tussen de productieketens voor voedsel, chemie, materialen en energie. Hierbij vormen de reststromen van het ene bedrijf de grondstof van het andere bedrijf. In 2050 vindt volgens dit principe bijvoorbeeld coproductie plaats van pigmenten, eiwitten en biodiesel uit algen.

Regionale en lokale verwerking van biomassa zorgt ervoor dat de bulkbiomassa niet onnodig over grote afstanden moet worden getransporteerd ten koste van veel energie⁴⁰. Dit gebeurt op de plaats van productie en consumptie, waar de restproducten ontstaan. Op dit moment fungeert Rotterdam nog als belangrijke schakel in de verwerking van biomassa. In 2050 zal een groot deel van deze verwerking lokaal, d.w.z. daar waar de biomassa geproduceerd wordt, plaatsvinden. Dit levert lokaal economische voordelen en energiebesparing op die samen opwegen tegen het verlies van de 'economy of scale'. Bijkomend voordeel van deze nieuwe logistieke concepten is dat het meer mogelijkheden biedt voor het sluiten van kringlopen, door nutriënten en koolstof terug te voeren naar de bodem. Rotterdam zal zich hebben ontwikkeld tot een centrum van synthese-, fijn-, en precisiechemie. Nieuwe materialen en nieuwe chemicaliën zullen zijn ontwikkeld met een veelheid aan toepassingen. Op de plaats waar de biomassaproducten gebruikt worden ontstaan restproducten. De waardevolle bestanddelen (bijvoorbeeld nutriënten en spore-elementen) worden teruggewonnen en teruggevoerd naar de productieregio's of omgevormd tot toepassingen. Rotterdam krijgt dus een tweede functie: terugvoer van grondstoffen naar de productielanden.

5.3 Consument en maatschappij in 2050

In 2050 waarderen maatschappij en consument de Biobased Economy positief om zijn verdiensten. De Biobased Economy heeft er voor gezorgd dat de consument in zijn behoefte aan voedsel, producten en energie kan voorzien, zonder dat de randvoorwaarden voor een duurzame economie (zie hoofdstuk 3) geweld aan worden gedaan.

De consument is in 2050 goed geïnformeerd en maakt bewuste keuzes. Alle consumptiegoederen zijn voorzien van begrijpelijke informatie over hun ecologische voetafdruk. Deze ecologische voetafdruk beperkt zich niet tot CO₂, maar geeft ook informatie over het (niet hernieuwbare) gebruik van schoon water en schaarse nutriënten als fosfaat. Er zijn duurzame voedselproducten en diëten ontwikkeld die van de consument geen concessies vragen in termen van textuur en smaakbeleving.

De wetgeving is aangepast, zodanig dat het sluiten van kringlopen wordt bevorderd in plaats van tegengewerkt. De overheid blijft actief investeren in onderzoek naar nog efficiëntere en energiezuiniger productie en verwerking van biomassa. Publiek-private samenwerking tussen overheid, bedrijven en kennisinstellingen zorgt voor duurzaam concurrentievoordeel voor de Nederlandse agro-food industrie en de chemiesector.

6. De winning clusters

Dit hoofdstuk beschrijft de *winning clusters* van de Biobased Economy. De winning clusters zijn belangrijke technologische en maatschappelijke doorbraken die nodig zijn om de Biobased Economy van 2050 realiteit te laten worden. De winning clusters beschrijven de kernonderwerpen voor onderzoek en ontwikkeling en leveren op hoofdlijnen een onderzoeksagenda voor de komende decennia.

De winning clusters zijn allemaal essentieel, en zullen dus naast elkaar ingezet worden om een duurzame Biobased Economy in 2050 te realiseren. Per winning cluster is kort aangegeven waar de sterke en zwakke punten liggen, op basis van het beoordelingskader zoals geschetst in hoofdstuk 3. De zwakke punten geven aan op welke gebieden extra aandacht nodig is om het winning cluster tot een succes te maken.

Een specifiek voorbeeld dat we hier nader toelichten is het gebruik van genetische modificatie. Voor verscheidene winning clusters is genetische modificatie essentieel, bijvoorbeeld voor het verhogen van de fotosynthese efficiency van planten en voor het gericht produceren van bouwstoffen in cyanobacteriën. Tegelijkertijd kan worden geconstateerd dat genetische modificatie van planten in Nederland niet breed maatschappelijk geaccepteerd wordt. Verwacht mag worden dat toepassingen van genetische modificatie in gesloten systemen (algen en cyanobacteriën in foto-bioreactoren) wel geaccepteerd zullen worden, vooral als het non-food toepassingen betreft.

Zoals al eerder genoemd is de belangrijkste voorwaarde voor de succesvolle implementatie van een Biobased Economy dat deze geaccepteerd en gewaardeerd wordt door de maatschappij en het individu. Dit vraagt zowel om een individuele benadering met veel actie, communicatie en interactie, als om een doelgerichte strategie waarbij de voordelen en de nadelen van de Biobased Economy eerlijk en open worden besproken en gecommuniceerd.

6.1 Winning clusters bij productie van biomassa

Verhoogde biomassaproductie per oppervlakte-eenheid via planten

Essentieel voor de Biobased Economy is dat de plantaardige productie per oppervlakte-eenheid stijgt. Daarvoor westerse landen en ontwikkelingslanden zijn verschillende strategieën van belang. In de westerse wereld is de voornaamste winst te behalen door verhoogde fotosynthetische efficiëntie in planten, bijvoorbeeld door gerichte veredeling of genetische modificatie van gewassen. In Afrika en enkele Aziatische landen kan, naast verhoging van fotosynthese-efficiëntie, beter beheer (oogst, nutriënten, water) en teelt van nutriënten- en waterefficiënte gewassen tot aanzienlijke opbrengstverhoging leiden.

Bij een verhoging van de productie per oppervlakte-eenheid is een extra hoeveelheid nutriënten en water nodig. Om dit op een duurzame manier mogelijk te maken is het essentieel dat vanuit de kringloopgedachte gewerkt wordt, zodat zoveel mogelijk nutriënten en water gerecycled worden. Ook is het noodzakelijk om voldoende koolstof terug te voeren naar de bodem ter behoud van bodemvruchtbaarheid.

Sterk: Verhoogde opbrengsten per oppervlakte-eenheid dragen bij aan de voedsel- en grondstofvoorziening en verminderen de druk op de biodiversiteit.

Zwak: Gebruik van genetische modificatie voor verhoogde fotosynthese-efficiëntie ligt gevoelig, vooral wanneer het voedsel betreft.

Verhoogde biomassaproductie per oppervlakte-eenheid via algen, wieren en cyanobacteriën

Algen, wieren en cyanobacteriën hebben van nature een hogere fotosynthese-efficiëntie dan planten. Dit maakt deze organismen tot een aantrekkelijke alternatieve biomassabron. Coproductie van eiwitten, olie en suikers is goed mogelijk.

Voor duurzame teelt is het van belang om zo efficiënt mogelijk met water en nutriënten om te gaan, en zorg te dragen voor voldoende overdracht van CO₂ uit de lucht naar de organismen.

Sterk: Hoge opbrengsten per ha en teelt op weinig vruchtbare gronden en in zout water leveren geen concurrentie op met de voedselproductie. Teelt in aquatisch milieu maakt hergebruik van nutriënten beter mogelijk.

Zwak: Gebruik van genetische modificatie voor gerichte productie van biologische bouwstenen kan maatschappelijk gevoelig liggen. Effect van grootschalige teelt op biodiversiteit is nog niet vastgesteld, maar waarschijnlijk beheersbaar.

Verhoogde biomassaproductie per oppervlakte-eenheid via alternatieve routes

Bioelektrosynthese, synthetische organismen, en kunstmatige zonnecellen zijn veelbelovende, efficiënte routes om biologische bouwstenen te produceren uit zonlicht. Naast het feit dat deze routes gekenmerkt worden door hoge efficiënties, zijn ze onafhankelijk van vruchtbare landbouwgrond. Deze technologieën bevinden zich in een vroeg ontwikkelingsstadium, maar vormen vooral op de langere termijn een veelbelovend alternatief.

Sterk: Hoge efficiëntie en productie onafhankelijk van vruchtbare landbouwgrond leidt tot verminderde druk op voedselproductie en biodiversiteit. Minimale input van nutriënten en water nodig.

Zwak: Gebruik van synthetische organismen kan maatschappelijk gevoelig liggen. Deze zeer nieuwe technologieën moeten zichzelf nog bewijzen.

Grootschalige niet-grondgebonden teeltmethoden

Ontwikkeling van niet-grondgebonden teeltmethoden is van belang om biomassaproductie mogelijk te maken in gebieden die niet geschikt zijn voor landbouw. Bij niet-grondgebonden teeltmethoden gaat het specifiek om gesloten fotobioreactoren voor algen en cyanobacteriën, en teelt uit de grond en/of in aquatisch milieu. Gesloten reactoren en aquatisch milieu zijn essentieel voor maximale benutting en terugwinning van nutriënten, koolstof en water. Dit is met name van belang wanneer toenemende biomassaproductie deze extra inputs vergt, in combinatie met de toenemende schaarste van nutriënten en water.

Sterk: *Teelt in gesloten systemen en aquatisch milieu maakt hergebruik van nutriënten en water mogelijk.*

Zwak: *Vereist grote veranderingen in infrastructuur en teeltmethoden en vereist relatief grote investeringen, wat de implementatie kan bemoeilijken. Het effect op biodiversiteit is onbekend.*

6.2 Winning clusters bij verwerking van biomassa

Milde en energiezuinige technieken voor omzetting van biomassa naar biologische bouwstenen

Om de biologische bouwstenen uit biomassa beschikbaar te maken, is ontsluiting en omzetting van biomassa nodig. Daarbij zijn plaats, tijd, en centrale en decentrale factoren van groot belang; sommige biomassastromen vragen om een kleinschalige onmiddellijke (decentrale) aanpak dicht bij de productieplek, anderen kunnen beter ingezameld worden en op een centrale plek opgeslagen en verwerkt worden. Goed zicht op de dynamica tussen productie, opslag en verwerking is van groot belang om efficiënte en duurzame verwerkingssystemen te realiseren. Om concurrentie met voedselproductie te minimaliseren, is het van groot belang dat biomassareststromen gebruikt kunnen worden voor de productie van waardevolle grondstoffen zoals eiwitten, lipiden en koolhydraten. Deze reststromen zijn vaak moeilijk open te breken. Er is dringend behoefte aan milde en energiezuinige technieken voor het ontsluiten van alle waardevolle grondstoffen uit diverse soorten biomassa, zoals lignocellulose. Deze technieken zijn veelal chemisch of biochemisch van aard, waardoor ze onder milde condities (omgevingstemperatuur en -druk) plaatsvinden.

Sterk: *Er ontstaan nieuwe, van nature meer complexe biologische bouwstenen met nieuwe omzettingsmogelijkheden.*

Zwak: *Vereist nieuwe chemische pathways met bijbehorende infrastructuur en investeringen.*

Milde en energiezuinige technieken voor scheiding van biologische bouwstenen

Om de gewenste biologisch bouwstenen afzonderlijk en in hoge concentraties beschikbaar te maken, zijn energie-efficiënte bewerkings- en scheidingstechnologieën nodig. De geavanceerde scheidingstechnologieën die nodig zijn voor een Biobased Economy kunnen uit een 'organische soep' met verschillende complexe moleculen (die vaak op elkaar lijken en soms in lage concentraties aanwezig zijn), verschillende waardevolle bouwstenen vrijmaken door combinaties van (bio-)chemisch bewerken, scheiden en concentreren.

Sterk: *Selectieve en energie-efficiënte scheidingstechnologie is essentieel om de vereiste grondstoffen voor biobased producten te kunnen maken.*

Zwak: *De haalbaarheid moet nog bewezen worden.*

Groene chemie voor omzetten van biologische bouwstenen naar biobased producten

Voor de omzetting van biologische bouwstenen naar de gewenste biobased producten is verdere ontwikkeling van de groene chemie nodig. Het gaat hierbij om het ontwikkelen van alternatieve chemische routes die optimaal gebruik maken van de complexiteit die biologische bouwstenen van nature bezitten. De biochemische en chemische reacties die hieraan ten grondslag liggen zullen op een energie-efficiënte manier ingezet worden. Aandacht voor materiaalontwikkeling is van groot belang: de eigenschappen van biobased materialen moet vergelijkbaar, of beter zijn dan van materialen die geproduceerd zijn op basis van aardolie.

Sterk: *Energiezuinige productie. Nieuwe producten op basis van biologische bouwstenen hebben mogelijk betere eigenschappen dan bestaande producten op basis van petrochemische grondstoffen.*

Zwak: *Grote veranderingen in infrastructuur nodig. Vergt grote investeringen, terwijl de voordelen pas op langere termijn zichtbaar worden.*

Ketenintegratie en nieuwe logistieke concepten

Bioraffinage is het proces waarin biomassa en biologische bouwstenen stapsgewijs worden verwerkt tot verschillende tussen- en eindproducten. Deze coproductie resulteert in een optimale verwaarding van de biologische grondstoffen. Hierbij is het uitgangspunt dat in de opeenvolgende fasen van verwerking, steeds wordt ingezet op de productie van zo hoogwaardig mogelijke producten. Om dit tot stand te brengen is het noodzakelijk dat er integratie plaatsvindt tussen de productieketens voor voedsel, chemie, materialen en energie.

Regionale en lokale verwerking voorkomen dat biomassa over grote afstanden moet worden getransporteerd. Waar nu nog wordt ingezet op economies of scale, zal in de toekomst een deel van de verwerking lokaal, d.w.z. daar waar de biomassa geproduceerd wordt, plaatsvinden. Dit vereist

nieuwe logistieke concepten met betere mogelijkheden voor het sluiten van kringlopen.

Sterk: Lokale verwerking en coproductie over ketens heen leveren optimale verwaarding en energiebesparing op. Daarnaast biedt het betere mogelijkheden voor het sluiten van kringlopen.

Zwak: Economische effecten nog onduidelijk.

Biobrandstoffen als enige vorm van energie uit biologische bouwstenen; productie van andere vormen van energie uit andere bronnen

De toepassing van biomassa voor energie wordt beperkt tot in de toekomst noodzakelijke brandstoffen voor bijvoorbeeld zware transporten (biodiesel) en de luchtvaart (kerosine). Andere vormen van energie, zoals warmte en elektriciteit, komen niet of nauwelijks voort uit biomassa, maar worden via efficiëntere alternatieve routes geproduceerd. Duurzame winning van zonne-energie is daarbij essentieel. De productie van biologische bouwstenen voor biobrandstoffen vindt hoofdzakelijk plaats in algen en cyanobacteriën en concurreert niet met de voedselproductie.

Sterk: Biomassagebruik beperken tot transportbrandstoffen zorgt voor een verminderde druk op de voedselvoorziening en biodiversiteit, zeker wanneer de productie plaatsvindt in gesloten systemen op marginale gronden.

Zwak: Er is veel kritiek op het gebruik van biomassa voor energievoorziening, maar die richt vooral op de productie van energiegewassen op landbouwgrond.

6.3 Winning clusters bij consumptie van biobased producten

Sluiten van kringlopen

Het sluiten van kringlopen voor nutriënten, water, en koolstof is essentieel. Dit is van belang zowel op lokaal als op regionaal en globaal niveau. Om dit te realiseren is het nodig dat nutriënten op een energie-efficiënte manier en in een bruikbare vorm kunnen worden teruggewonnen uit (huishoudelijk) afvalwater. Daarnaast is het belangrijk dat er voldoende stabiele organische stof in de bodem teruggebracht wordt. Technologieën voor de productie van kunstmest uit reststromen en inzicht in de rol van organische stof in de bodem zijn essentieel voor een duurzame Biobased Economy. Door reststromen uit voedselproductie en -consumptie een hergebruikfunctie te geven in de non-food industrie, kunnen effecten op het gebied van gezondheid en milieu worden voorkomen.

Sterk: Essentieel voor het omvormen van afval tot een waardevolle bron. Schaarse grondstoffen worden hergebruikt en bodemdegradatie wordt voorkomen.

Zwak: Mogelijk risico van ophoping van ziekteverwekkers. Hergebruik van afval is niet in alle gevallen maatschappelijk gewaardeerd, met name waar het voedsel of drinkwater betreft. Wetgeving is op dit moment een knelpunt.

Maatschappelijke waardering voor de Biobased Economy en biobased producten

Het succes van biobased producten moet voortkomen uit een reële economische meerwaarde die bedrijven en consumenten hier aan toekennen. Om beter geïnformeerde en bewustere keuzes te kunnen maken, is het belangrijk dat consumenten inzicht krijgen in de ecologische voetafdruk van de goederen die zij consumeren. Dit kan bijdragen aan de waardering voor biobased producten.

Naast waardering speelt acceptatie van nieuwe technologieën een rol. Een duurzame Biobased Economy is hoogtechnologisch en maakt gebruik van nu nog omstreden technologieën als genetische modificatie en artificiële organismen. Het is van belang dat rondom deze onderwerpen tijdig een maatschappelijk debat wordt geïnitieerd. Naast nut en noodzaak dient hierin aandacht te worden besteed aan de veronderstelde risico's en de maatregelen om deze te beheersen.

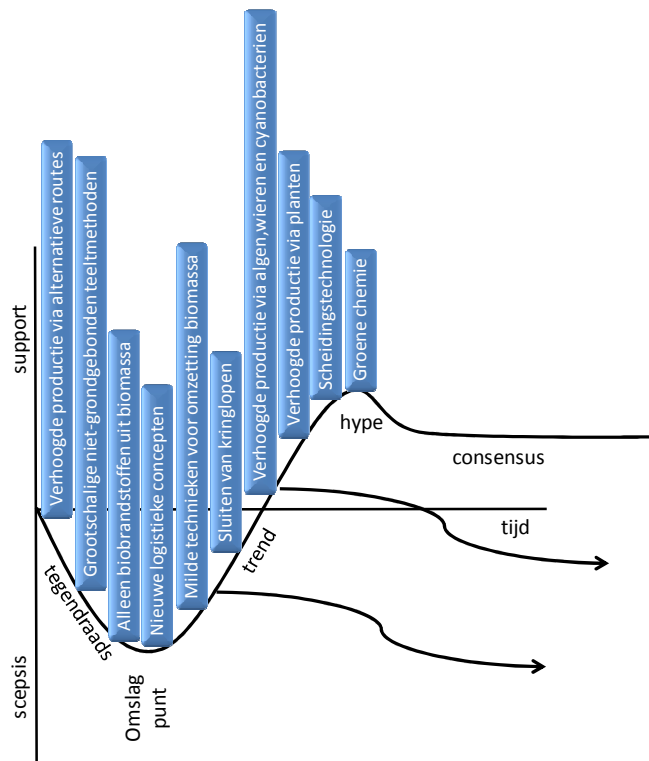
Sterk: *Maatschappelijke waardering is essentieel voor het slagen van alle winning clusters. Voordelen van de Biobased Economy moeten glashelder zijn.*

Zwak: *Hoogtechnologische productiemethoden staan haaks op trend bij consumenten naar 'het natuurlijke'.*

7. Rol van kennisinstellingen, bedrijfsleven en overheid

In 2050 kunnen biomassa en biologische bouwstenen een duurzame en winstgevende basis vormen van de sectoren voedsel, chemie, materialen en specifieke vormen van energie. Er zijn goede economische en ecologische redenen om hier actief naar te streven en op langere termijn is het zelfs een noodzaak. Met inachtneming van de criteria voor een duurzame Biobased Economy (Hoofdstuk 3), zijn in het voorgaande hoofdstuk winning clusters gedefinieerd. Dit zijn gebieden waarop technologische en maatschappelijke doorbraken het hardste nodig zijn.

Technologische doorbraken – hoe belangrijk en veelbelovend ook – komen niet vanzelf tot stand. Doorgaans worden nieuwe technologieën in eerste instantie met scepsis bekeken. Daarna kan een omslag plaatsvinden en verandert de scepsis langzaam in een trend. Bij succesvolle verdere ontwikkeling volgt het stadium van de hype, waarna een technologie zijn weg kan vinden naar grootschalige toepassing. Op deze route kan het zijn dat toch de scepsis weer toeneemt en dit succesvolle toepassing in de weg staat. In onderstaande figuur is per winning clusters indicatief aangegeven in welke fase van ontwikkeling deze zich bevindt (Figuur 15).



Figuur 15. Ontwikkelingsfase van de winning clusters, indicatief.

Het realiseren van doorbraken vereist intensieve samenwerking tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen. In diverse publicaties, waaronder de recente nota 'Naar de Top', wordt hieraan gerefereerd als samenwerking in de *gouden driehoek*. Het agro-food complex heeft op dit gebied een lange en succesvolle traditie en wordt om die reden als voorbeeld gesteld voor andere topsectoren.

Kenmerkend voor het sectorenbeleid van de overheid zijn een integrale aanpak, vraagsturing door het bedrijfsleven, minder specifieke subsidies en meer ruimte voor ondernemers. In het licht van de Biobased Economy zijn vooral de topsectoren agro-food, chemie en energie van belang. De rol van de overheid is daarbinnen regulerend, maar vooral ook agenderend en voorwaarden scheppend. Daadwerkelijke doorbraken moeten van het bedrijfsleven komen, op grond van aantoonbare economische meerwaarde die in de Biobased Economy te behalen valt. Kennisinstellingen leveren een cruciale bijdrage door – in samenwerking met de bedrijven – toonaangevend onderzoek te doen naar technologieën en concepten om biomassa en biologische bouwstenen optimaal te verwaarden volgens de waardepiramide.

Voor een succesvolle ontwikkeling van de Biobased Economy in Nederland is het van groot belang dat er een strategische toekomstagenda wordt opgesteld. Onderzoeksmatig kunnen de in dit rapport genoemde winning clusters hier richting aan geven. Maar er is ook aandacht nodig voor kennisvalorisatie, wet- en regelgeving, onderwijs en maatschappelijk debat. Op dit moment werkt het interdepartementale programma Biobased Economy aan een strategische agenda. Op korte termijn gaan *topteam*s van vooraanstaande beleidsmakers, ondernemers en wetenschappers aan de slag om de strategische agenda voor de topsectoren te bepalen. Het is voor de economie van Nederland van groot belang dat de Biobased Economy hierin een voorname plaats krijgt. Het sectoroverschrijdende karakter vraagt daarbij om een extra coördinatie-inspanning.

Nederland heeft internationaal een sterke positie in de topsectoren agro-food, chemie en energie. Dit biedt Nederland bij uitstek de mogelijkheid om voorop te (blijven) lopen in de ontwikkeling van de Biobased Economy. De toekomstige concurrentiepositie van Nederlandse bedrijven is hiermee sterk gebaat en daarmee ook de welvaart van de Nederlandse burger. De overheid kan deze ontwikkeling op verschillende manieren stimuleren.

Passend in het beleidsvoornemen van de nota *Naar de Top*, dient het subsidie-instrument terughoudend te worden gebruikt. Het succes van biobased producten moet onafhankelijk zijn van subsidies en voortkomen uit een reële economische meerwaarde die bedrijven en consumenten hier aan

toekennen. Daarbij dient de overheid te zorgen voor een *level playing field*. Momenteel stimuleren subsidies en regelgeving vooral het gebruik van biomassa voor energie en transportbrandstoffen. Hierdoor komen andere, meer hoogwaardige toepassingen in bijvoorbeeld chemicaliën en materialen moeilijker van de grond. De subsidies voor toepassing van biomassa voor energietoepassingen passen niet in de strategie van optimale verwaarding van biomassa en vertragen daarmee de ontwikkeling van de Biobased Economy. Stimuleringsmaatregelen moeten er juist op gericht zijn om de hoogwaardige toepassingen van biomassa te versterken.

Er liggen aanzienlijke technologische, logistieke en conceptuele uitdagingen voor ons. Om deze het hoofd te bieden, zijn voldoende financiële middelen voor R&D nodig. Nederland blijft achter als het gaat om private R&D uitgaven door het bedrijfsleven. Vanuit een welbegrepen eigenbelang zal dit op termijn veranderen. Tot het zo ver is, ligt er een belangrijke taak voor de overheid om de benodigde kennisontwikkeling en daaraan gekoppelde valorisatie te stimuleren en mede te financieren. De beschikbare middelen kunnen worden gekoppeld aan de topsectoren agro-food, chemie en energie, waarbinnen op basis van publiek-private samenwerking toponderzoek wordt uitgevoerd door kennisinstellingen en bedrijven. De onderzoeksagenda wordt bepaald in samenspraak tussen overheid, bedrijven en kennisinstellingen, overeenkomstig de structuur van de topteams. Belangrijk is dat er naast meer toegepast onderzoek voldoende ruimte en geld is voor precompetitief onderzoek, dat op termijn tot fundamentele vernieuwingen in de biomassavoorziening en -verwerking leidt. Ook moet actief worden geïnvesteerd in onderwijs, om in de toekomst voldoende goed geschoold personeel te hebben. Het ontwikkelen van een onderwijscentrum voor de Biobased Economy door EL&I is daarvan een recent en goed voorbeeld.

De voordelen van de Biobased Economy worden het beste duidelijk gemaakt door voorbeelden van nieuwe producten en toepassingen die succesvol kunnen concurreren en hun weg naar de consument vinden. Op dit moment zien we dat mondjesmaat gebeuren en dat moet verder worden gestimuleerd. De overheid kan hierin een belangrijke rol spelen door de juiste voorwaarden te scheppen. Zoals gezegd niet door het subsidiëren van producten, maar door innovatieve onderzoekers, ondernemers en ondernemingen te helpen. Dat kan door de administratieve lasten te verlagen, innovatiekredieten te verstrekken, borg te staan voor startende ondernemingen of eventueel zelf in een onderneming te participeren.



Het technologisch topinstituut BE-Basic ondersteunt de ontwikkeling van schone, robuuste en competitieve biobased chemicaliën, materialen en energie (zie www.be-basic.org). BE-Basic verenigt Nederlandse en internationale topuniversiteiten, instituten, en industrieën op verschillende niveaus.

De productie en verwerking van biomassa is in onze uitkijk naar 2050 hoogtechnologisch. Gegeven de groei van de wereldbevolking en de toenemende welvaart, is een hoogtechnologische productie van biomassa en biologische bouwstenen noodzakelijk om aan de criteria voor duurzame Biobased Economy te kunnen voldoen. Het gericht toepassen van genetische modificatie van planten en het ontwikkelen van (semi) artificiële organismen zijn daar een onderdeel van. Deze belangrijke technologieën zijn op dit moment nog niet maatschappelijk geaccepteerd. De overheid kan een belangrijke rol spelen in het organiseren van een maatschappelijk debat rondom dit thema. Daarbij is het van belang dat naast de voordelen, nadrukkelijk ook aandacht wordt besteed aan de veronderstelde risico's en de maatregelen om deze te beheersen.

Ten slotte kan de overheid het goede voorbeeld geven. Dat kan door op te treden als launching customer voor nieuwe biobased producten.

8. Conclusie

De Biobased Economy van 2050 – zoals geschetst in dit essay – biedt een reëel en in veel opzichten aantrekkelijk toekomstperspectief. Het is wel van belang dat aan de Biobased Economy een aantal duidelijke randvoorwaarden worden gesteld. Voedselzekerheid en behoud van biodiversiteit zijn daar twee belangrijke voorbeelden van. Het is onze stellige overtuiging dat de in dit essay genoemde randvoorwaarden zich goed laten combineren met de totstandkoming van een biogebaseerde economie. Dat vereist wel een aantal technologische en maatschappelijk doorbraken, die hier zijn benoemd als winning clusters. Deze winning clusters zijn allemaal essentieel en niet onderling uitwisselbaar. Om voldoende biologische bouwstenen te produceren is het noodzakelijk om de fotosynthese efficiency sterk te verhogen. Dat vereist combinaties van nieuwe technologieën die elk een meerwaarde moeten opleveren. Evenzo is een groene chemie niet alleen afhankelijk van technologische innovaties op het gebied van het ontsluiten en scheiden van biologische bouwstenen, maar evenzeer van het ontstaan van nieuwe, ketenoverstijgende concepten die leiden tot een optimale verwaarding van biomassa. De biomassa en biologische bouwstenen die, naast voedsel of als restproduct van voedsel, voortkomen uit planten, algen, cyanobacteriën of geproduceerd worden via alternatieve routes, worden zo volledig mogelijk benut met inzet op hoogwaardige componenten, zoals farmaceutische stoffen, biomaterialen en chemicaliën. Daarbij wordt zorg gedragen voor behoud van bodemvruchtbaarheid door het terugvoeren van voldoende organisch materiaal naar de bodem. Productie van energie uit biomassa beperkt zich tot toepassingen waarvoor geen alternatieven voorhanden zijn (bijvoorbeeld biobrandstoffen voor zwaar transport en luchtvaart).

Binnen de geschetste randvoorwaarden is de Biobased Economy een kans voor de biodiversiteit. De systeeminnovatie van een economie gebaseerd op fossiele grondstoffen naar hernieuwbare bronnen vereist daarbij ontwikkeling van nieuwe vormen van samenwerking, maatschappelijke daadkracht en wetenschappelijke innovaties. Maar alle bouwstenen zijn aanwezig, het is nu de kans voor de toekomst, de toekomst naar het jaar 2050.

Referenties

1. PBL Voedsel, biodiversiteit en klimaatverandering. Mondiale opgaven en nationaal beleid. http://themasites.pbl.nl/images/Voedsel-biodiversiteit-klimaatverandering_tcm60-49626.pdf (2010).
2. WNF The Energy Report: 100% renewable energy by 2050. http://assets.wnf.nl/downloads/101223_energy_report_final_print_2.pdf (2011).
3. Heaton, E.A., Dohleman, F.G. & Long, S.P. Meeting US biofuel goals with less land: The potential of Miscanthus. *Global Change Biology* **14**, 2000-2014 (2008).
4. Wijffels, R.H. Pilot Spanje. (2010).
5. Lomborg, B. The skeptical environmentalist: measuring the real state of the world. (Cambridge University Press, Cambridge; 2001).
6. Lewis, N.S. & Nocera, D.G. Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **103**, 15729-15735 (2006).
7. Wijffels, R.H. Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology. *Trends in Biotechnology* **26**, 26-31 (2008).
8. VN <http://esa.un.org/unpp/> (2011).
9. Scott, E., Peter, F. & Sanders, J. Biomass in the manufacture of industrial products-the use of proteins and amino acids. *Applied Microbiology and Biotechnology* **75**, 751-762 (2007).
10. van Haveren, J., Scott, E.L. & Sanders, J. Bulk chemicals from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **2**, 41-57 (2008).
11. Bos, H.L., Slingerland, M.A., Elbersen, W. & Rabbinge, R. Beyond agrification: Twenty five years of policy and innovation for non-food application of renewable resources in the Netherlands. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **2**, 343-357 (2008).
12. Langeveld, J.W.A., Sanders, J.P.M. & Meeusen-van Onna, M.J.G. The Biobased Economy: biofuels, materials and chemicals in the post-oil era. (Earthscan, London; 2010).
13. EU Directive on the Promotion of the use of biofuels and other renewable fuels for transport. *2003/30/EC* (2003).
14. Dornburg, V. et al. Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. *Energy and Environmental Science* **3**, 258-267 (2010).
15. Smeets, E.M.W., Faaij, A.P.C., Lewandowski, I.M. & Turkenburg, W.C. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science* **33**, 56-106 (2007).
16. Wolf, J., Bindraban, P.S., Luijten, J.C. & Vleeshouwers, L.M. Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy. *Agricultural Systems* **76**, 841-861 (2003).
17. Bindraban, P.S., Bulte, E.H. & Conijn, S.G. Can large-scale biofuels production be sustainable by 2020? *Agricultural Systems* **101**, 197-199 (2009).

18. Jing, Q., Conijn, J.G., Jongschaap, R.E.E. & Bindraban, P.S. Modeling crop growth, development and production of perennial energy species across the globe. *Submitted* (2011).
19. Jing, Q., Conijn, J.G., Jongschaap, R.E.E. & Bindraban, P.S. Land area requirements for European and sub-Saharan African diets. *To be submitted* (2011).
20. Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S. & Hawthorne, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* **319**, 1235-1238 (2008).
21. Lal, R. Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **28**, 57-64 (2008).
22. Cordell, D., Drangert, J.O. & White, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* **19**, 292-305 (2009).
23. Molden, D. in *Water for Food, Water for Life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. (ed. D. Molden) (Earthscan and Colombo: International Water Management Institute, London; 2007).
24. CBS www.cbs.nl (2009).
25. Beddington, J. Food security: Contributions from science to a new and greener revolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **365**, 61-71 (2010).
26. Fearnside, P.M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. *Conservation Biology* **19**, 680-688 (2005).
27. Annevelink, B. & Harmsen, P. Bioraffinage, naar een optimale verwaarding van biomassa. *Deel 10 in de reeks "Groene Grondstoffen"* (2010).
28. IEA Key world energy statistics.
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf (2009).
29. IEA World Energy Outlook.
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/weo2002.pdf> (2002).
30. SER Meer chemie tussen groen en groei.
http://www.ser.nl/~media/DB_Advieszen/2010_2019/2010/b29279.aspx (2010).
31. WTC Innovatieagenda voor de Biobased Economy. (2011).
32. Norsker, N.H., Barbosa, M.J., Vermuë, M.H. & Wijffels, R.H. Microalgal production - A close look at the economics. *Biotechnology Advances* **29**, 24-27 (2011).
33. Wijffels, R.H., Barbosa, M.J. & Eppink, M.H.M. Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **4**, 287-295 (2010).
34. Liu, X., Brune, D., Vermaas, W. & Curtiss Iii, R. Production and secretion of fatty acids in genetically engineered cyanobacteria 10.1073/pnas.1001946107 (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (2010)). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **107**, 13189 (2010).

35. Hejazi, M.A. & Wijffels, R.H. Milking of microalgae. *Trends in Biotechnology* **22**, 189-194 (2004).
36. Aizawa, K. & Miyachi, S. Carbonic anhydrase and CO₂ concentrating mechanisms in microalgae and cyanobacteria. *FEMS Microbiology Letters* **39**, 215-233 (1986).
37. Nevin, K.P., Woodard, T.L., Franks, A.E., Summers, Z.M. & Lovley, D.R. Microbial Electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds. *mBio* **1**, 1-4 (2010).
38. IEA Bioenergy task 42 on biorefineries
http://www.biorefinery.nl/fileadmin/biorefinery/docs/Brochure_Totaal_definitief_HR_opt.pdf (2009).
39. KB_programma_Groene_Grondstoffen (2011).
40. De Jong, E., Van Ree, R., Sanders, J.P.M. & Langeveld, J.W.A. in The Biobased Economy: biofuels, materials and chemicals in the post-oil era. (eds. J.W.A. Langeveld & J.P.M. Sanders) (Earthscan, London; 2010).