



De groene belofte

Algen

BIOWETENSCHAPPEN EN MAATSCHAPPIJ
KWARTAAL 3 2013

Algen

Het cahier is een uitgave van Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) en verschijnt vier maal per jaar. Elk nummer is geheel gewijd aan een thema uit de levenswetenschappen, speciaal met het oog op de maatschappelijke gevolgen ervan.

Stichting BWM is ondergebracht bij de Nederlandse organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO).

BESTUUR

prof. dr. E. Schroten
(voorzitter)

J.F.B.C.D. van Oranje M.Sc.
MBA (vicevoorzitter) †

Prof. dr. W.P.M. Hoekstra
(penningmeester)

Dr. A. van der Auweraert

Prof. dr. J.M. van den Broek

Dr. L.H.K. Defize

Prof. dr. J.T. van Dissel

Prof. dr. ir. F.P.M. Govers

Prof. dr. N.M. van Straalen

RAAD VAN ADVIES

Prof. dr. P. van Aken

Prof. dr. D. van Bekkum

Dr. J.J.E. van Everdingen

Prof. dr. J.P.M. Geraedts

Prof. dr. J.A. Knottnerus

Prof. dr. J. Osse

REDACTIE

Prof. dr. Wiel Hoekstra

Dr. Packo Lamers

Ir. Rob Buiten (eindredactie)

BUREAU

Drs. Rianne Blok

Drs. Erwin Woord

Monique Verheij

BEELDREDACTIE

B en U international picture
service, Amsterdam

VORMGEVING

Studio Bassa, Culemborg

DRUK

Drukkerij Tesink, Zutphen

INFORMATIE,

ABONNEMENTEN EN

BESTELLEN LOSSE NUMMERS

Stichting Bioweten-

schappen en Maatschappij

Postbus 93402

2509 AK Den Haag

telefoon: 070-34 40 781

e-mail: bwm@nwo.nl

www.biomaatschappij.nl

© Stichting BWM

ISBN/EAN

Stichting BWM heeft zich
ingespannen om alle
rechthebbenden van de
illustraties in deze uitgave
te achterhalen. Mocht u
desondanks menen rechten
te kunnen laten gelden, dan
verzoeken wij u vriendelijk
om contact met ons op te
nemen.



Biowetenschappen
en Maatschappij

Inhoud

Voorwoord door Egbert Schroten en Wiel Hoekstra 2

1 Algen in het wild 5

- Van algen tot wieren 14
- Algen bestrijden?! 16

2 Producten uit de algenfabriek 19

- Biocement 28
- Algen in dienst 30

3 Voetangels en klemmen 33

- Algen oogsten met klontjes 40
- Bioaffinage 42

4 Stamverbetering 45

- Algenethiek 52

5 Beter licht op algen 55

- Knutselen aan de fotosynthese 60

6 Boer zoekt alg 63

- Algenkweken voor doe-het-zelvers 66
- Van algen tot *algae* 68

Auteurs 70

Illustratieverantwoording 71

In Memoriam prins Friso van Oranje

HET OVERLIJDEN van prins Friso heeft het bestuur van de Stichting Biowetenschappen en Maatschappij diep geraakt. Hij was sinds 2006 als bekwaam vice-voorzitter zeer betrokken bij het wel en wee van de stichting. Zijn warme betrokkenheid spoorde niet alleen met zijn brede wetenschappelijke en maatschappelijke belangstelling, maar had ook te maken met het feit dat zijn ouders aan de wieg stonden van de stichting. Op zijn manier zette hij die inspanningen voort.

In dit cahier, dat kort na zijn overlijden verschijnt, leest u over algen; micro-organismen die in de natuur en dan met name in het aquatisch milieu een belangrijke ecologische rol vervullen. Algen kunnen ook op een andere manier belangrijk zijn voor onze toekomst: als bron voor duurzame energiedragers, als voedselbron in de visteelt, als milieuzuiveraars en als producenten van nuttige chemicaliën, om de meest in het oog springende toepassingen te noemen. U kunt lezen dat er talrijke uitdagingen wachten om de potentie van de algen daadwerkelijk te benutten, en hoe gezocht wordt naar passende en betaalbare oplossingen. Er zijn uitdagingen voor allerlei disciplines zoals de (systeem)biologie, de biofysica en ook voor bedrijfstechnologie en bedrijfseconomie. Deze aspecten worden uitvoerig in kaart gebracht. Als zodanig is dit cahier buitengewoon dienstig om de samenleving te informeren en te inspireren.

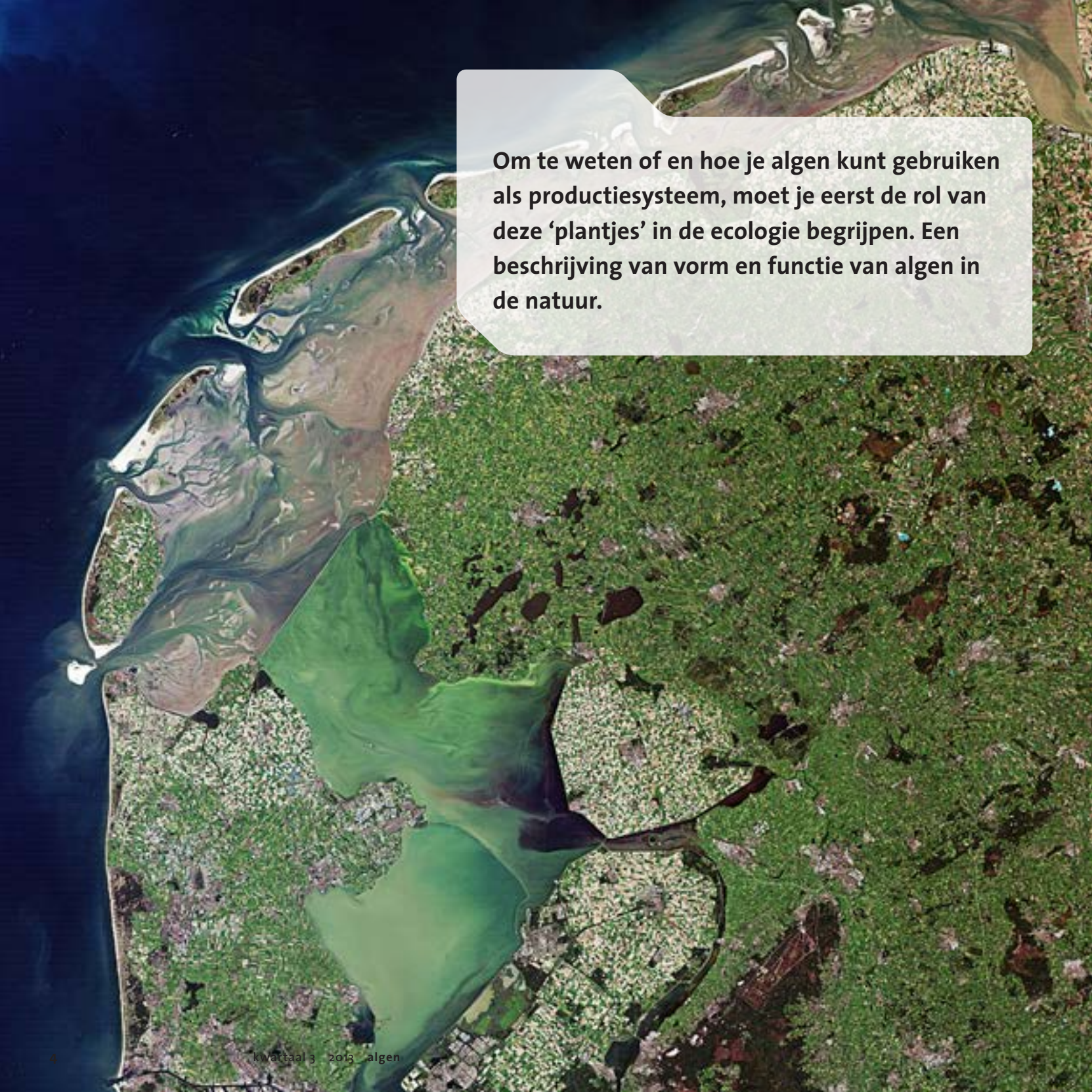
We zijn ervan overtuigd dat prins Friso blij zou zijn met dit cahier. Hij dacht immers toekomstgericht en droeg duurzaamheid een warm hart toe. Hij schuwde uitdagingen en het overschrijden van disciplinegrenzen niet en hij had vanuit zijn opleiding grote belangstelling voor bedrijfstechnologie en bedrijfseconomie. De thematiek in dit cahier interesseerde hem zeer. Dat bleek niet alleen in bestuursvergaderingen. Hij was in 2010 als lid van de redactie ook betrokken bij de uitgave van een cahier over biograndstoffen waarin de potenties van de algen al worden benoemd.

Wij dragen dit cahier daarom aan prins Friso op, in grote dankbaarheid voor alles wat hij met zijn niet geringe kwaliteiten heeft gedaan voor de Stichting Biowetenschappen en Maatschappij. Wij zullen hem missen als een bekwaam en betrokken bestuurslid die door zijn persoonlijk optreden een onuitwisbare indruk in ons bestuur heeft achtergelaten. Wij proberen in de toekomst in zijn geest verder te werken.

Namens het bestuur van de Stichting Biowetenschappen en Maatschappij

Prof. dr. Egbert Schroten
Prof. dr. Wiel Hoekstra



An aerial photograph showing a coastal area with a large, vibrant green algal bloom in the water. The bloom is irregularly shaped and extends from the shore into the sea. The surrounding water is dark blue, and the land is covered in green grass and some brown patches. A white text box is overlaid on the right side of the image.

Om te weten of en hoe je algen kunt gebruiken als productiesysteem, moet je eerst de rol van deze 'plantjes' in de ecologie begrijpen. Een beschrijving van vorm en functie van algen in de natuur.

Algen in het wild

EÉN ZOMERSE duik in het buitenwater en je zwemt ze geheid tegen het lijf: algen. Het water zit er vol mee. In één theelepel water kunnen tot wel tien miljoen van deze microscopische plantjes rondzweven. Algen worden ook wel fytoplankton genoemd, naar het Griekse *phyton* (plant) en *planktos* (zwevend). Berucht zijn vooral de giftige 'blauwalgen' die onze meren kunnen teisteren in warme zomers, al zijn dat strikt genomen geen algen maar bacteriën. Algen komen niet alleen voor in onze meren maar bijna overal op onze planeet: van het kleinste tuinvijvertje tot midden in de Grote Oceaan. Ondanks hun minuscule formaat spelen algen een belangrijke rol in de chemie en ecologie van meren, zeeën en oceanen.

Net als alle planten zetten algen kooldioxide (CO₂) en water met behulp van zonlicht door fotosynthese om in koolhydraten en zuurstof. Het licht wordt 'gevangen' met behulp van pigmenten, waarvan het groene chlorofyl de bekendste is. Verder hebben algen ook voedingsstoffen nodig, zoals nitraat en fosfaat. Deze anorganische elementen worden met behulp van koolhydraten omgezet in organische stoffen zoals eiwitten en vetten (figuur 1). Algen zijn dus, net als alle planten, een belangrijke schakel aan de basis van alle

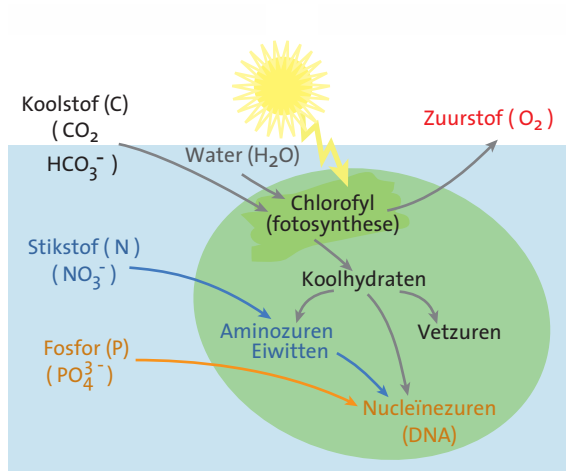
voedselketens, tussen de levende en niet-levende wereld.

Vorm en inhoud

Het grootste deel van een alg bestaat uit de elementen waterstof (H) en zuurstof (O), afkomstig van het water (H₂O) in de cel. Daarna zijn koolstof (C) en stikstof (N) het meest voorkomend. Beide worden gebruikt voor het maken van koolhydraten en eiwitten, die essentieel zijn voor de structuur van een cel. Fosfor (P) komt vaak maar in kleine hoeveelheden voor. Toch is ook dat element essentieel voor de werking van de cel. Het is nodig om bijvoorbeeld DNA te kunnen maken. Daarnaast zijn ook bepaalde sporenelementen zoals de metalen ijzer, koper en magnesium belangrijk voor algen om te kunnen groeien.

Volgens de jongste schattingen zijn er bijna 100.000 soorten algen, met een enorme verscheidenheid in vorm, kleur en levensstijl. Algen kunnen bijvoorbeeld rond, staaf-, ster- of raketvormig zijn. De verscheidenheid in kleur komt door verschillende combinaties van groene, blauwe en rode pigmenten die ze gebruiken voor hun fotosynthese. Sommige algen leven alleen als ééncellige, terwijl andere samen een kolonie vormen. Er zijn ook meercellige algen; deze worden ook wel wieren genoemd.

Figuur 1
Algen zetten CO₂ en voedingsstoffen met behulp van licht om in belangrijke organische stoffen zoals koolhydraten, vetten, eiwitten en DNA.



De meeste algen nemen in aantal toe door celdeling: de dochtercellen zijn daardoor een kloon van de moedercel. Groei van algen betekent niet zozeer dat cellen groter worden, maar dat het aantal cellen toeneemt.

Algen diversiteit in een Nederlands meer. In de bovenste rij staan kiezelalgen, in de middelste rij cyanobacteriën en in de onderste rij een dinoflagellaat (links) en drie groenalgen.



Namen

De naamgeving van de meeste algen heeft te maken met hun uiterlijk of hun opbouw. Sommige algensoorten hebben bijvoorbeeld een celwand van silicium, ofwel kiezel. Deze soorten worden dan ook kiezelalgen genoemd. Andere algen danken hun naam aan hun kleur. Groenalgen hebben chlorofyl als belangrijkste pigment, waardoor de cellen sterk groen kleuren. Blauwalgen hebben naast chlorofyl ook een blauw pigment waarmee ze licht absorberen. Blauwalgen zijn eigenlijk geen microscopische plantjes maar bacteriën. In tegenstelling tot plantencellen hebben blauwalgen en andere bacteriën geen celkern. Daarom worden ze officieel cyanobacteriën genoemd. Cyaan slaat op hun blauw-groene kleur.

Sommige fytoplanktonsoorten hebben naast chlorofyl ook rode of bruine pigmenten, zoals goudalgen en kiezelalgen. Ook zijn er algen met een 'zweepstaart': een soort haar waarmee ze kun-

nen zwemmen. Dinoflagellaten zijn daar een voorbeeld van. Die naam is afgeleid van het Griekse *dinos* (rondtollen) en *flagellum* (zweep). Dinoflagellaten kunnen in symbiose leven met koralen, ze kunnen de zee doen oplichten (zeevonk) en sommige soorten kunnen ook erg giftig zijn.

De grote verschillen tussen algensoorten zorgen ervoor dat ze ook onder heel verschillende omstandigheden kunnen groeien. Ze hebben allemaal hun eigen specialiteit. In het vroege voorjaar bijvoorbeeld kan het water vol zitten met kiezelalgen. Deze groeien al goed bij lage temperaturen en kunnen dus als eerste algen na de winter tevoorschijn komen. Ze groeien door totdat ze al het silicium uit het water hebben opgenomen. Dan komen meestal de groenalgen tevoorschijn. Deze groeien snel en kunnen hoge dichtheden bereiken. Hun groei stopt als ze alle voedingsstoffen hebben opgenomen en in elkaars schaduw zitten. Onder dat soort omstandigheden zijn cyanobacteriën vaak de uiteindelijke winnaars. Zij kunnen met weinig licht toch nog goed groeien, vooral bij warm weer. Uiteindelijk zorgen de wisselende omstandigheden voor een afwisseling van soorten en kleuren algen in het water.

Algen zitten overal

De beschikbaarheid van voedingsstoffen, zoals nitraat en fosfaat, bepaalt waar algen kunnen groeien. In gebieden met veel menselijke activiteit, zoals landbouw en industrie, komen vaak veel van die voedingsstoffen in het oppervlaktewater terecht. Een dergelijke vermessing van het water zorgt er vervolgens voor dat algen hier goed gedijen. Dit is ook de reden dat het water in veel Nederlandse meren letterlijk groen ziet van de algen. Het is zelfs vanuit de ruimte te zien! Behalve in voedselrijke sloten en meren komen algen ook voor in voedselarme wateren zoals bijvoorbeeld vennen, al zijn de dichtheden dan veel lager.



In de oceanen zitten veel voedingsstoffen in de diepere waterlagen, waar algen er niet bij kunnen. Alleen in de bovenste honderd meter van het water dringt genoeg licht door voor fotosynthese. Op plaatsen waar het diepere, voedselrijke water naar het oppervlakte komt, komen algen ook in grote hoeveelheden voor. Dit kan veroorzaakt worden door bijvoorbeeld een storm of door zogenoemde opwelling. Opwelling vindt vooral plaats in kustgebieden waar door een afluende wind de bovenste waterlaag van de kust weg wordt geblazen. Hierdoor wordt het koude en voedselrijke diepere water omhoog gezogen. De groei van fytoplank-

Algen in de Baltische zee zijn vanuit de ruimte te zien als een turquoise zweem in het water.

ton in kustgebieden wordt ook gestimuleerd door voedingsstoffen die worden aangevoerd met rivierwater, zoals bij de monding van onze grote rivieren in de Noordzee.

In tropische delen van oceanen, ver weg van kustgebieden, beperken voedingsstoffen meestal de groei van algen. Daarom is het water er vaak erg helder. Door de hoge temperaturen ontstaat er een gelaagdheid in het water. Warm water is lichter en blijft dus drijven op zwaarder koud water. Dit fenomeen is in een warme zomer ook te voelen in Nederland in een meer als je je tenen in het diepe, koude water steekt. Een dergelijke gelaagdheid zorgt ervoor dat er maar een beperkte hoeveelheid voedingsstoffen vanuit het koude diepe water in het warme water aan het zonnige oppervlak terecht komt. Toch kunnen sommige cyanobacteriën wel groeien in de bovenste warme en voedselarme laag. Het zijn soorten die geen nitraat nodig hebben als stikstofbron. Net als bepaalde bacteriën die tussen de wortels van planten op het land leven ('wortelknolletjesbacteriën') kunnen ze stikstofgas uit de lucht vastleggen. Het is een bijzondere eigenschap die ervoor zorgt dat er ook midden op de oceanen algen leven.

Van pionier ...

Cyanobacteriën speelden een essentiële rol in de ontwikkeling van het leven op onze planeet. De eerste cyanobacteriën zijn zo'n 2,7 miljard jaar geleden al begonnen met het produceren van zuurstof, als 'afvalproduct' van fotosynthese. Hierdoor hebben cyanobacteriën een belangrijke eerste bijdrage geleverd aan de aanwezigheid van zuurstof in de atmosfeer: de atmosfeer is door fotosynthese geschikt geworden voor dieren, waaronder de mens.

Tegenwoordig dragen cyanobacteriën samen met algen tot ongeveer de helft bij aan de mondiale fotosynthese. De rest wordt gedaan door landplanten, met name die in de regenwouden.

Fotosynthese in planten en algen vindt plaats in bladgroenkorrels of chloroplasten. Die chloroplasten waren van oorsprong eigenlijk ook cyanobacteriecellen. Deze bacteriën staan dus ook aan de basis van de evolutie van alle algen en planten.

... tot plaag

Cyanobacteriën zijn nu vooral bekend van warme zomers, wanneer ze in grote hoeveelheden kunnen voorkomen in het oppervlaktewater. Een extreme groei van cyanobacteriën wordt in de volksmond bloei genoemd maar het is dus eigenlijk een uitbundige groei. Veel cyanobacteriesoorten kunnen zeer giftige stoffen maken, zoals saxitoxine. Dat is één van de meest giftige natuurlijke stoffen: ongeveer 600 keer giftiger dan cyanide. Eén kleine cyanobacteriecel bevat ook maar een kleine hoeveelheid gif, maar tijdens een cyanobacteriebloei zitten er wel heel veel cellen in het water. Samen kunnen die een concreet risico vormen voor de



Een watermonster met cyanobacteriën (l) en hetzelfde monster na een nacht in het donker (r).



gezondheid van mens en dier. Zwemmers kunnen irritaties krijgen aan huid en ogen en ook last van braken en diarree. Al vanaf één slok 'blauwalgenwater' kunnen problemen ontstaan maar de klachten nemen toe met de blootstellingsduur en de concentratie van de blauwalgen. De waterschappen in Nederland controleren dan ook regelmatig op de aanwezigheid van blauwalgen en waarschuwen als de concentratie cellen van mogelijk giftige cellen een afgesproken grenswaarde heeft bereikt.

Sommige cyanobacteriesoorten hebben gasblaasjes waardoor ze kunnen drijven. Hierdoor vormen ze een blauw-groene laag bovenop het water. Deze verfachtige laag wordt ook wel een 'drijfslag' genoemd. Het drijfvermogen regelen deze cyanobacteriën zelf. Aan het wateroppervlak, waar veel licht is, kunnen de bacteriën via fotosynthese CO_2 opnemen en koolhydraten maken. Deze koolhydraten worden niet direct gebruikt maar opgeslagen in de cel. De opgeslagen koolhydra-

ten verhogen de soortelijke massa van de cellen, waardoor ze naar diepere waterlagen zinken waar veel voedingsstoffen zitten. Daar nemen de cellen de nodige voedingsstoffen op waarbij ze de opgeslagen koolhydraten gebruiken als energiebron. Nadat de koolhydraten zijn verbruikt verliezen de cellen hun ballast en gaan ze weer drijven. Boven in de waterkolom kunnen de cellen vervolgens weer koolhydraten maken via fotosynthese en het proces begint opnieuw. Drijfslagen van blauwalgen komen vooral 's ochtends voor, als tijdens de nacht de opgeslagen koolhydraten zijn verbruikt.

Behalve cyanobacteriën zijn er ook fytoplanktonsoorten die giftige stoffen kunnen maken. Deze komen vooral voor in kustgebieden, maar ook in brakwatermeren. Een voorbeeld zijn dinoflagellaten. Ook hierbij geldt dat één cel maar een onschuldige beetje gif bevat, maar een bloei van deze algen kan wel een gevaar vormen. Veel dinoflagellaten hebben naast chlorofyl ook een bruin-rood pig-

ment en bij grote hoeveelheden kan het water dan ook rood worden. Een dergelijke dinoflagellatenbloei wordt ook wel toepasselijk een 'red tide' genoemd.

Sommige van deze giftige algensoorten worden gegeten door schelpdieren, die de gifstoffen ophopen en daardoor zelf giftig worden. Deze schelpdieren, zoals mossels en oesters, zijn dan niet meer geschikt om te eten omdat ze zogenoemde schelpdierversgiftiging kunnen veroorzaken. Dinoflagellaten kunnen naast autotroof (ze gebruiken anorganische stoffen en produceren organische stoffen, zoals alle planten) ook heterotroof (ze 'eten' organische stoffen zoals alle dieren) zijn. Sommige dinoflagellaten kennen beide mogelijkheden in één en lijken dus op een plant, maar ook op een

dier. Hierdoor kunnen deze dinoflagellaten vaak ook goed groeien in water waar maar weinig voedingsstoffen in zitten.

Algen in de diepzee

CO₂ uit de atmosfeer reageert met water, waardoor koolzuur ontstaat. Dit koolzuur is erg instabiel en valt uit elkaar in waterstofcarbonaat (HCO₃⁻) en een proton (H⁺), waarna HCO₃⁻ ook uit elkaar kan vallen. Daarbij komt nog een proton vrij (figuur 2). Een toename van protonen zorgt ervoor dat de zuurgraad van het water toeneemt (de pH wordt lager). Met meer CO₂ in de atmosfeer komen er dus ook meer protonen in het water terecht, dat daardoor zuurder wordt. Dit fenomeen staat bekend als 'oceanverzuring'.

Het nut van gif

Het gif van cyanobacteriën is voor mens en dier vooral hinderlijk. Maar heeft het ook nog een positieve functie voor de bacterie zelf? Ondanks vele jaren onderzoek is daar nog geen eenduidig antwoord op te geven. De meeste gifstoffen zijn zogenoemde secundaire metabolieten, dat wil zeggen: stoffen die niet direct nodig zijn voor de groei van de cel. Hun productie hangt af van de beschikbaarheid van de juiste voedingsstoffen, van licht en van groei van de alg zelf. Uit recent onderzoek is gebleken dat de gifstof

microcystine uit cyanobacteriën een rol kan spelen in de competitie om CO₂. Giftige varianten van een cyanobacteriesoort bleken een voordeel te hebben in de strijd om CO₂ ten opzichte van soortgenoten met minder gif. Ook is aangetoond dat de gifstoffen de cel kunnen beschermen tegen schade door reactieve zuurstofverbindingen. In die gevallen lijkt het er dus op dat deze gifstof een fysiologische functie heeft bij koolstofopname en fotosynthese. Het lijkt niet erg logisch dat het gif door de cya-

nobacteriën is 'bedacht' als verdediging tegen dierlijk plankton dat de bacterie zou willen eten. Ondanks dat de gifstoffen wel giftig zijn voor de mens en voor hogere dieren zijn ze niet altijd giftig voor de 'grazers van de bacterie', het zogenoemde zoöplankton. Bovendien bestaat het gen dat codeert voor het maken van de gifstoffen evolutionair gesproken al veel langer dan de potentiële grazers van de cyanobacterie. Als het gif dus dient als bescherming tegen zoöplankton, dan is dat dus hooguit een handige

bijkomstigheid. Ook het feit dat het gif vaak voor een aanzienlijk deel in de cel blijft en niet wordt uitgescheiden pleit voor een andere rol dan verdediging. Toch blijkt de aanmaak van gifstoffen wel gestimuleerd te kunnen worden door de aanwezigheid van zoöplankton. Dat pleit dus wél weer voor een rol in de bescherming. Naast deze mogelijke functies zou het gif ook nog een rol kunnen spelen als feromoon, communicatiemiddel of als antibioticum.

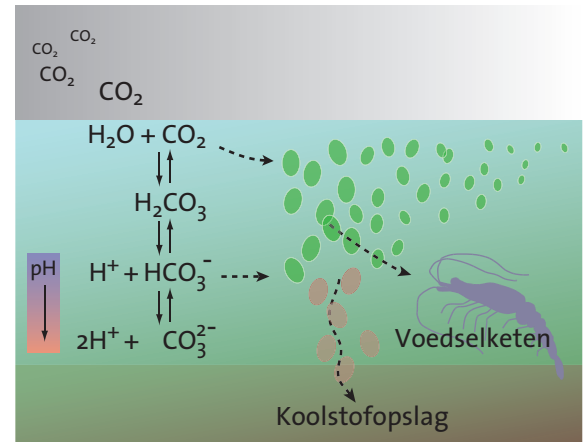
Oceanverzuring heeft allerlei gevolgen voor het leven in het water. Er zijn organismen die een uitwendig skelet van kalk maken, zoals sommige koralen, kreeftachtigen, weekdieren, foraminiferen, maar ook bepaalde algensoorten. In verzuurd water kost het deze organismen meer energie om hun kalkskelet te maken en te behouden. In sommige gevallen lost de kalk zelfs op in het zuurdere water. Hierdoor lijkt oceanverzuring vooral voor deze groep organismen een bedreiging te vormen.

Een deel van het CO_2 dat in het water terecht komt wordt via fotosynthese vastgelegd door algen (de groene bolletjes in figuur 2). Deze algen worden op hun beurt gegeten door dieren zoals bijvoorbeeld krill en roeipootkreeften. Maar niet alle algen worden opgegeten. Een deel van de algen zinkt naar de diepzee waar ze eindigen op de bodem van de oceaan. Hier kan het vastgelegde CO_2 voor een lange tijd worden opgeslagen. Een dergelijk 'transport' van CO_2 door algen vanuit de bovenste waterlaag naar de bodem van de oceaan wordt ook wel de 'koolstofpomp' genoemd. De koolstofpomp zorgt ervoor dat een deel van het CO_2 dat in de atmosfeer terecht komt, bijvoorbeeld door verbranding van fossiele brandstoffen, weer verdwijnt. Zodoende spelen algen een belangrijke rol in de mondiale koolstofkringloop.

Eindeloze strijd

De grote diversiteit van cyanobacterie- en algensoorten vind je niet in één en dezelfde druppel water. Toch leven veel van deze soorten samen en concurreren ze met elkaar om bijvoorbeeld CO_2 , licht en voedingsstoffen. Halverwege de vorige eeuw heeft de Amerikaanse ecooloog George Evelyn Hutchinson de vraag gesteld waarom er relatief veel algensoorten kunnen samenleven met maar een klein aanbod van mogelijk beperkende groeifactoren, zoals CO_2 , licht en voedingsstoffen. Eerder was namelijk aangetoond dat voor iedere groeifactor er vaak uiteindelijk maar één

Figuur 2
Een vereenvoudigd overzicht van het lot van koolstof in het water.



algensoort de 'sterkste' is en de competitie wint. Toch leven er veel meer soorten samen dan dat er beperkende groeifactoren zijn. Dit wordt ook wel de 'planktonparadox' genoemd.

Er zijn verschillende oplossingen voor de planktonparadox. Er kunnen gradiënten zijn van groeifactoren, zoals afnemend licht en een toenemende hoeveelheid voedingsstoffen als je dieper in het water gaat. Ook kunnen groeifactoren zoals temperatuur en licht sterk veranderen met de seizoenen. Iedere algensoort heeft voordeel bij bepaalde

omstandigheden: de optimale groeiomstandigheden. Maar ieder voordeel heeft ook een nadeel. Een dergelijke 'trade-off' draagt bij aan de diversiteit van algen in het water. Als een algensoort goed concurreert om bijvoorbeeld licht, kan dit ten koste gaan van zijn concurrerendevormen voor voedingsstoffen.

Daarnaast kunnen ook ziektes bij algen, zoals schimmel- en virusinfecties de diversiteit aan algen in het water verhogen. Immers, wanneer een bepaalde soort de

De planktonparadox: Er leven veel algensoorten in hetzelfde beetje water

Ijzervreters

Niet overal in de oceaan zijn de belangrijke voedingsstoffen als nitraat of fosfaat beperkend voor de groei van algen. In het water van de Zuidelijke Oceaan rond Antarctica bijvoorbeeld, zitten genoeg van die voedingsstoffen. Hier wordt de groei van algen vooral beperkt door ijzer, dat algen in kleine hoeveelheden nodig hebben voor processen als fotosyn-

these. Door de toevoeging van ijzer zou de groei van algen hier dus gestimuleerd kunnen worden. Door deze zogenoemde ijzerbemesting zou je zelfs de 'koolstofpomp' kunnen stimuleren; met meer algen wordt ook meer CO₂ naar de diepzee getransporteerd. Ijzerbemesting lijkt vooral te kunnen werken wanneer de algensoorten die gestimuleerd worden

beschermd zijn tegen begrazing, zodat ze de diepzee kunnen bereiken en niet voortijdig worden opgegeten. Dit zijn bijvoorbeeld bepaalde kiezelalgen die te groot zijn voor de grazers. Ondanks dat ijzerbemesting de CO₂-concentratie in de atmosfeer zou kunnen terugdringen, is deze vorm van 'geo-engineering' omstreden. De precieze gevolgen voor

de koolstofpomp en de effecten op de ecologie van de Zuidelijke Oceaan zijn nog grotendeels onbekend. Vanwege oceaancirculatie kunnen effecten mogelijk tot op grote schaal doorwerken. Kortom, het is onduidelijk of ijzerbemesting ook daadwerkelijk werkt en wat de risico's ervan zijn. Het onderzoek naar deze toepassing van algen is nog in volle gang.

strijd lijkt te winnen en hoge concentraties bereikt, is de kans op infectie ook groter. Sommige algen maken daarnaast stoffen die giftig zijn voor andere algensoorten of voor grazers. Andere algen wapenen zich tegen grazers door kolonies te vormen of door stekels te maken.

Toch is het is niet alleen haat en nijd: sommige soorten kunnen ook vredig samenleven. Zo is bijvoorbeeld gebleken dat (blauw-)groene en rode cyanobacteriën zonlicht kunnen delen. Door hun kleurverschil kunnen deze cyanobacteriën ieder een eigen deel van het lightspectrum gebruiken. De groene soorten, die dus groen licht reflecteren, absorberen meer van het rode licht, terwijl de rode soorten meer van het groene licht gebruiken. De combinatie van al deze factoren, en nog vele andere, zorgt ervoor dat er nooit een evenwicht ontstaat van maar een kleine hoeveelheid winnaars. Steeds is er een andere algensoort de beste waardoor de algendiversiteit in het water hoog blijft.

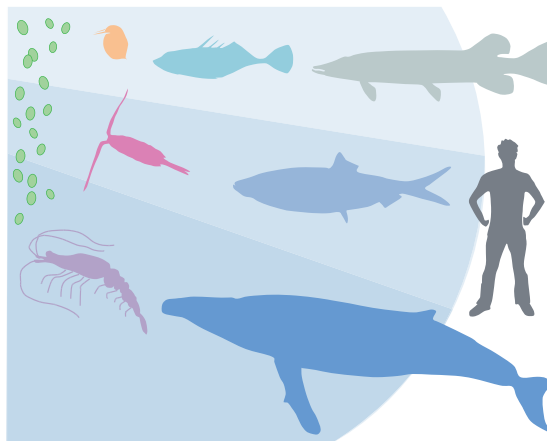
In hun element

De gemiddelde verhouding tussen koolstof-, stikstof- en fosforatomen van algen in natuurlijke wateren lijkt vrij constant te zijn. De verhouding komt vaak in de buurt van 106:16:1 (C:N:P). Deze verhouding is zo'n tachtig jaar geleden ontdekt door de Amerikaanse oceanograaf Alfred Clarence Redfield en wordt dan ook de Redfield-ratio genoemd. Algen kunnen hun C:N:P-verhouding echter aanpassen aan de omgeving. De N:P verhouding van 16:1 komt bijvoorbeeld overeen met de nitraat:fosfaat verhouding in de diepzee. Uiteindelijk hangt de C:N:P verhouding in algen af van welke organische stoffen, zoals eiwitten en vetten, in de cel kunnen worden gemaakt. De verhouding van elementen in algen ligt dus niet vast. Wanneer er bijvoorbeeld weinig nitraat in het water zit, kan een alg minder eiwitten maken; daarvoor heeft hij immers het stikstof uit nitraat nodig. De C:N verhouding van de alg zal dan omhoog gaan. Veranderingen in de verhouding tussen elementen kunnen uiteindelijk ook invloed hebben op dieren en daardoor op de hele voedselketen.

De relaties van de alg

Omdat algen CO₂ en voedingsstoffen omzetten in organische stoffen, staan ze aan de basis van het onderwater voedselweb. Dieren kunnen geen CO₂ omzetten en zijn dan ook allemaal, de mens inclusief, afhankelijk van planten voor belangrijke stoffen zoals koolhydraten, eiwitten en vetten (figuur 3). Algen worden gegeten door zoöplankton wat letterlijk zwevende (*planktos*) diertjes (*zoön*) betekent. In de oceanen zijn dit bijvoorbeeld krill en roeipootkreeften, terwijl in zoetwater water-vlooien belangrijke algeneters zijn. Zoöplankton wordt weer gegeten door vissen. Krill in de zuidelijke oceaan vormt de belangrijkste voedselbron voor zeezoogdieren zoals walvissen. Vissen worden op hun beurt weer gegeten door roofvissen, vogels en (zee)zoogdieren, waaronder zehonden, dolfinen, maar ook beren en natuurlijk de mens.

Door de toename van voedingsstoffen in het water kan het onderwatervoedselweb drastisch veranderen. Met name halverwege de vorige eeuw zijn door vermisting veel wateren in Nederland veranderd van helder water in een troebele algensoep. Met meer voedingsstoffen kunnen algen immers goed groeien. Doordat algen licht wegvangen blijft er minder licht over voor de waterplanten die op de bodem leven. Op een gegeven moment kunnen deze niet meer groeien. Dit heeft ook gevolgen voor bepaalde roofvissen, zoals de snoek, die op zicht jagen en planten nodig hebben om tussen te schuilen en voort te planten. Doordat zoöplanktonetende vissen zoals voorns dan minder door snoek worden bejaagd, neemt de hoeveelheid zoöplankton sterk af. Ook dat heeft een positief effect op algen, want die worden minder opgegeten. Door deze 'positieve terugkoppeling' zorgen algen er dus voor dat de omstandigheden om te groeien voor hen zelf verbeteren. Bovendien zorgen dergelijke terugkoppelingen ervoor dat de concentraties voedingsstoffen ver terug gebracht moeten worden om het water weer



Figuur 3
Algen staan aan de basis van verschillende voedselketens bijvoorbeeld in zoetwater (boven: alg, watervlo, stekelbaars, snoek), zoutwater (midden: alg, roeipootkreeft, haring, mens) en de Zuidelijke Oceaan (alg, krill, bultrug).

helder te krijgen en waterplanten weer te kunnen laten groeien. Ondanks maatregelen als 'actief biologisch waterbeheer' zitten er op veel plaatsen nog grote hoeveelheden voedingsstoffen in het oppervlaktewater (zie ook BWM Cahier Water, 2007-1). Hierdoor hebben veel van onze meren de kenmerkende groene kleur van die kleine intrigerende organismen: algen.

Van algen tot wieren

ALGEN BESTAAN in veel soorten en maten: van de prokaryote blauwalgen – die dus eigenlijk bacteriën zijn – tot de verschillende eukaryote microalgen. Er bestaan ook meercellige algen, beter bekend als wieren. Wieren zijn geen echte, ‘hogere’ waterplanten. Hogere planten bloeien bijvoorbeeld, wieren doen dat niet. Net als de ‘lagere planten’ op land (zoals varens) planten wieren zich voort met behulp van sporen.

Waar nu veel onderzoek wordt gestoken in het opzetten van productiesystemen op basis van microalgen, staan de wieren waarschijnlijk aan de basis van de landbouw, ongeveer tienduizend jaar terug. Onze voorouders maakten volop gebruik van wieren als directe bron van voedsel, dan wel als indirecte bron, door wier te gebruiken als meststof in de landbouw. Nog niet eens zo lang geleden maakten boeren in bijvoorbeeld Zeeland gebruik van wier dat uit zee werd geschept, in de regen van het zout werd ontdaan en vervolgens werd ondergewerkt op de akkers.

De moderne mens lijkt de ervaring van onze voorouders met wier grotendeels te zijn vergeten. Weliswaar wordt wereldwijd nog steeds 7,5 miljard dollar per jaar omgezet in commerciële wierteelt, maar dat gebeurt eigenlijk alleen in Zuidoost Azië. Daarbuiten behoren alleen Tanzania en Chili tot de toptien van zeewierproducerende landen. Toch ligt er ook voor ons een groot potentieel in de wierteelt, stelt dr. Willem Brandenburg, wieronderzoeker van Plant Research International, een onderdeel van Wageningen UR. ‘Op het land vervangen we natuur door landbouw. Geschikte

grond is immers schaars. Op zee hoeft dat niet. Het “enige” dat we daar moeten doen is de enorme stroom van voedingsstoffen die via de rivieren in de zee verdwijnt zien op te vangen.’

Om het potentieel van ‘landbouw op zee’ te benutten zijn er volgens Brandenburg twee duurzame strategieën te bedenken: vang de voedingsstoffen bij de mondingen van de rivieren op voor ze in de diepzee verdwijnen, of zoek plekken op open zee waar je ze zonder al te veel moeite kunt terughalen. ‘Er bestaan zogenoemde opwellingszones, waar de voedingsstoffen uit de diepere zones door natuurlijke stroming omhoog komen. Bijvoorbeeld voor de kust van Chili is zo’n zone. Maar die moet juist níet worden gebruikt voor zeeboerderijen. Dan ga je opnieuw competitie aan met de natuur die in dergelijke zones vaak uitzonderlijk rijk is.’

Om toch wat van onze ‘overbemesting’ uit de zeeën en de oceanen terug te halen zou je volgens Brandenburg kunnen aansluiten bij bestaande activiteiten op zee. ‘Dan kun je denken aan de windmolenparken op zee, of aan de winning van delfstoffen uit de bodem van de oceanen. Wat zou er nou mooier zijn dan, bij wijze van spreken, een extra leiding naar de oceanobodem te leggen waarmee je fosfaat en nitraat omhoog kunt halen om vervolgens aan het oppervlak wier te telen?’

De tweede strategie lijkt meer op wat onze voorouders duizenden jaren terug al deden: maak gebruik van de voedingsstoffen die door de rivieren worden aangevoerd. ‘In die tijd was er natuurlijk nog geen sprake van overbemesting via het rivierwater, maar ook toen al waren delta’s



relatief rijke gronden. Tegenwoordig stroomt er nog steeds stikstof en fosfaat de zee in. Als je bij die riviermonding zeeboerderijen sticht, kun je die nutriëntenstroom aftappen, en snijdt het mes dus aan twee kanten.'

Zeeboerderij

Dat duurzame wiertelt in de praktijk goed mogelijk is hebben Brandenburg en collega's de afgelopen jaren laten zien op een testlocatie in de Oosterschelde: de 'Wierderij'. 'Wat in Zuidoost Azië gebeurt is eigenlijk moderne landbouw op zee. Daar worden de wiertvelden ook gewoon

bemest, dus dan haal je nog niets van de enorme ecologische voetafdruk af die wij met onze manier van consumptie veroorzaken. Met de Wierderij hebben we laten zien dat je ook wier kunt telen op basis van de meststoffen die toch al in zee lopen. In de zomer van 2013 is dan ook de eerste commerciële zeeboerderij op dit principe gestart in de Oosterschelde: Zeewaar bv.'

Maar wat doe je vervolgens met al die geteelde zeesla, vingerwier of suikerwier? Net als ééncellige algen zit wier vaak boordevol voedingsstoffen. Voor een deel kun je het direct consumeren, zoals in sushi. Voor een belangrijker deel zal wier in de toekomst een belangrijke basis kunnen vormen voor eiwitten in voeding voor dieren en mensen. In die zin is het bijvoorbeeld een alternatief voor soja, dat nu nog op grote schaal in voormalige tropische regenwouden wordt geteeld.

Algen bestrijden?!

NIET IEDERE alg leent zich voor commerciële teelt. Sterker nog: sommige blauwalgen is men in het wild liever kwijt dan rijk. Op verschillende plaatsen worden experimenten gedaan om blauwalgen in zwemwater te bestrijden. Zo heeft ondernemer Gerard Manshanden van het bedrijf *Fishflow Innovations* een zogenoemde airlift geïnstalleerd in de Ursemmerplas, bij Medemblik. Het principe is eenvoudig: aan een grote drijver hangt een lange buis die bijna tot de bodem van de plas reikt. Via een elektrische pomp met een capaciteit van slechts drie kilowatt wordt lucht onderin de buis geblazen. De belletjes nemen vervolgens 85 kuub water per minuut van de bodem van de plas mee omhoog.

‘Wat we hiermee doen is niets meer en niets minder dan het water in de plas mengen. En dat werkt. De Ursemmerplas was jarenlang een van de eerste plassen in de regio West-Friesland die bij warm weer moest sluiten voor recreanten vanwege blauwalgenbloei. In 2012 heeft het systeem voor het eerst een heel seizoen gedraaid. In plaats van de eerste plas die moest sluiten vanwege blauwalgen, was de Ursemmerplas dat jaar juist de laatste plas die uiteindelijk toch nog één dag werd gesloten voor zwemmers. In een stilstaande hoek, vlakbij het zwemstrand was na een warme periode toch nog een drijfslag met blauwalgen ontstaan. Dit jaar wil ik proberen met een extra pomp circulatie aan de oppervlakte te creëren. Dan zou het helemaal over moeten zijn.’

Beproefd

Circulatie van stilstaand water in de strijd tegen blauwalg is een beproefd principe. Naast de uiterst goedkope pomp van Manshanden heeft bijvoorbeeld ook het Amerikaanse Medora Ltd. een pomp ontwikkeld: de Solarbee. En aan de Universiteit van Amsterdam deden professor Jef Huisman en dr. Petra Visser al in de jaren negentig onderzoek met het beluchten en circuleren van het water in de Nieuwe Meer. ‘Het verschil tussen de jaren met en zonder beluchten en circuleren van het water was zo spectaculair, dat kon niet aan toevallige variaties in het weer liggen’, zegt UvA-onderzoekster Visser. ‘En het is ook wel ecologisch verklaarbaar. Waar gewone, microalgen in stilstaand water uitzakken, maken blauwalgen gebruik van hun vermogen om met luchtblaasjes drijfvlagen te vormen. Op die manier winnen ze de competitie om licht. Als je door het water te circuleren de blauwalgen naar dieper lagen dwingt, dan verliezen ze de competitie met de onschadelijke microalgen.’

Symptombestrijding


Manshanden is de eerste om te erkennen dat deze aanpak van de blauwalgen eigenlijk symptombestrijding is. ‘Het werkelijke probleem zit hem natuurlijk in de enorme hoeveelheid voedingsstoffen in het water. Blauwalgen doen het goed in water met veel stikstof en vooral fosfaat. In deze plas komen de voedingsstoffen uit de lucht, via stikstof in de regen, en ook uit de vogelpoep van bijvoorbeeld de aalscholvers en de eenden. Het water in deze plas wordt vooral bijgevuld door



op de helling gaan kun je makkelijk grote hoeveelheden mosseltjes halen. Op verschillende plekken langs de oever van de Ursemmerplas liggen al grote stenen. Daar zou je die mosseltjes op kunnen uitzetten. Een mossel kan enorme hoeveelheden water zuiveren van stikstof en fosfaat en ze kunnen zelfs direct blauwalgen opnemen. Dat zou natuurlijk de meest duurzame oplossing zijn.'

zogenoemde kwel uit de bodem. In de bodem van dit soort zandputten zit ook relatief veel ijzer. Dat is op zichzelf gunstig om fosfaat te binden. Maar onder zuurstofarme condities, bijvoorbeeld door rotting van organisch materiaal op de bodem van de plas, laten de ijzerdeeltjes het fosfaat weer los en komt het beschikbaar voor blauwalgen.'

De beste methode om blauwalgen te bestrijden is dus het wegnemen van de overmaat aan voedingsstoffen. 'Maar dat is makkelijker gezegd dan gedaan', weet Manshanden. 'Later dit jaar wil ik gaan experimenteren met het uitzetten van driehoeksmosseltjes. Bijvoorbeeld van schepen die



Algen worden vooral vaak genoemd als potentiële bron van biobrandstof, maar er zijn nog veel meer producten uit te halen. Een overzicht.

2

Producten uit de algenfabriek

ALGEN KOMEN overal ter wereld voor; er is bijna geen 'natte niche' te vinden die niet door algen wordt bevolkt. Die grote verscheidenheid van natuurlijke habitats (leefomgevingen) heeft in honderden miljoenen jaren van evolutie geleid tot een enorme diversiteit in soorten en eigenschappen. Die diversiteit zie je nu ook terug in de vele potentiële toepassingen van (micro)algen. De producten lopen uiteen van intacte cellen voor dierlijke voeding, via olie voor biobrandstoffen tot geraffineerde chemicaliën uit de cellen. Ook kunnen algen diensten leveren als afvalwaterzuivering, doordat ze vervuilende stoffen als nitraat, ammonium en fosfaat 'opeten'.

In de tabel op pagina 20 staan veel producten en toepassingen van algen beschreven. Op dit moment is maar een klein deel daarvan daadwerkelijk commercieel toepasbaar. De meeste producten of diensten zijn simpelweg nog niet rendabel. Vanwege de hoge kosten voor de productie van algen leveren op dit moment alleen nog de hoogwaardige toepassingen voldoende op om uit de kosten te komen.

Toepassingen van complete algenzellen

Complete microalgen worden momenteel gebruikt als diervoeder, als meststoffen en als werkzame bestanddelen van cosmetica en gezondheidsvoeding. Daarnaast worden intacte, al dan niet voorbehandelde microalgen onderzocht op hun geschiktheid als grondstof voor de productie van energiedragers. Via thermochemische processen (een soort gecontroleerde verbranding) of anaerobe vergisting (biologische omzetting door microorganismen onder zuurstofloze omstandigheden) wordt ook geprobeerd complete cellen om te zetten in grondstoffen voor de chemische industrie.

Voer voor vissen

Algen zouden een deel van de oplossing kunnen zijn voor de problemen van de visserij, of beter gezegd: de visteelt. De visserij staat onder extreme druk. Veel soorten vis zijn zo sterk in aantal afgenomen dat de vangst moet worden beperkt. Bovendien vraagt visserij veel energie in de vorm van brandstof voor de schepen. Tegelijk neemt de wereldbevolking toe en is er dus ook meer vraag naar vis. Deze problemen zorgen ervoor dat er steeds meer vis wordt gekweekt in plaats van

Tabel 1.
Overzicht van de huidige toepassingen van microalgen (exclusief toepassingen in waterzuivering en de mestindustrie).

Alg	Product of toepassing	Status	Landen
<i>Chaetoceros muelleri</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Chlorella spp.</i>	gezondheidsvoeding	commercieel	Japan, Taiwan, Tsjechië, Duitsland
<i>Cryptothecodinium cohnii</i>	DHA	commercieel	Verenigde Staten
<i>Dunaliella salina</i>	Bèta caroteen	commercieel	Australië, Israël, China, India
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxantine	commercieel	Verenigde Staten, Zweden, Israël
<i>Isochrysis spp.</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Monochrysis lutheri</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Nannochloropsis spp.</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Pavlova spp.</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Porphyridium cruentum</i>	Polysacchariden, Phycobili-eiwitten	onderzoek en ontwikkeling	Israël, Frankrijk
<i>Skeletonema spp.</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Arthrospira platensis</i>	gezondheidsvoeding, Phycocyanine	commercieel	Thailand, Verenigde Staten, China, India, Vietnam
<i>Tetraselmis suecica</i>	visvoer	commercieel	Wereld
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	visvoer	commercieel	Wereld

gevangen. De visteeltsector groeit op dit moment wereldwijd met ongeveer 5 à 6 procent per jaar.

Voor een duurzame ontwikkeling van de visteelt is het belangrijk een goede voedselketen op te zetten om van vislarven tot volwassen consumptievissen te komen. Voor een goede kweek van vissen is het belangrijk dat ze voldoende meervoudig onverzadigde vetzuren binnenkrijgen. Dat kan uiteraard alleen maar via het dieet. De cruciale meervoudig onverzadigde vetzuren zijn in dit geval: eicosapentaenzuur (EPA) en docosahexaenzuur (DHA). Beide zijn zogenoemde omega-3 vetzuren. Hoewel vissen deze vetzuren zelf vanuit andere opgenomen omega-3 vetzuren kunnen maken, halen ze toch het grootste deel direct uit de voeding.

In de viskwekerij worden EPA en DHA nu nog aan visvoer toegevoegd, voornamelijk in de vorm van visolie. Die wordt gewonnen uit de bijvangst: vis die onbedoeld gevangen wordt tijdens het vissen op andere soorten. Die 'per ongeluk gevangen vissen' hebben het grootste deel van de EPA en DHA ook uit de voeding verkregen: uit algen! Veel mariene microalgen kunnen deze complexe

vetzuren aanmaken. Een aantal soorten is zelfs erg rijk aan EPA en DHA. Dat maakt ze tot interessante algen voor eventuele commerciële exploitatie.

Levende microalgen leveren omega-3 vetzuren van een uitzonderlijke kwaliteit vergeleken bij de traditionele visolie. Dit komt omdat levende algen van nature antioxidanten bevatten, die voorkómen dat vetzuren oxideren. Ook zijn de vetzuren in een alg beter beschermd tegen oxidatie doordat ze ingepakt zitten in een cel. Bovendien komen er in de visoliën uit wilde vis steeds meer vervuilende stoffen voor. Naast de betere kwaliteit is ook de kwantiteit een voordeel voor de alg: het natuurlijke visbestand neemt immers nog altijd af! Om deze redenen zijn EPA- en DHA-rijke algen nu al een belangrijke voedselbron voor de visteelt. Ze kunnen direct als levende voeding aan vislarven worden gegeven, of indirect als voeding voor jonge vissen via zoöplankton, garnalen en kreeftjes.

Algen worden ook gebruikt in de visteelt vanwege hun specifieke pigmenten. Op die manier kunnen ze vissen verschillende tinten meegeven, van geel tot rood. Dat 'kleuren met algen' gebeurt

in de vrije natuur ook. Zalm bijvoorbeeld dankt de roze kleur aan de kleurstof astaxantine uit garnalen en kreeftjes, die het op hun beurt weer uit zoöplankton en microalgen hebben.

Humane voeding

Aan microalgen worden veel gezondheidsbevorderende eigenschappen toegeschreven. Daarom hebben ze ook hun weg gevonden naar de gezondheidsvoeding en cosmetica. Veel microalgen bevatten hoge concentraties antioxidanten en essentiële aminozuren, terwijl een groot aantal soorten mariene microalgen dus EPA en DHA produceren.

De antioxidanten in microalgen zijn voornamelijk carotenoïden (herkenbaar aan de gele of rode kleur), tocoferolen (zoals vitamine E) en fenolen (waaronder derivaten van benzoëzuur en kaneelzuur). Deze stoffen worden door sommigen geassocieerd met vermindering van de kans op een aantal kankersoorten en met voorkoming van bepaalde oogaandoeningen, aderverkalking en hartfalen.

In de viskwekerij valt nog veel te winnen op het gebied van duurzaamheid, bijvoorbeeld door het gebruik van algen in de voeding.



EPA zou hartfalen, hoge bloeddruk en ontstekingen kunnen voorkomen. DHA is een belangrijk vetzuur in de ontwikkeling van hersen- en oogweefsel in menselijke embryo's en pasgeboren baby's. Koeienmelk bevat geen DHA en daarom wordt de stof ook wel toegevoegd aan babyvoeding. Daarnaast zou ook DHA de kans op hart- en vaatziekten verkleinen.

Veel van deze gezondheidsclaims worden niet of op zijn minst niet helemaal ondersteund door uitgebreid en gedetailleerd onderzoek op mensen. Toch wordt van antioxidanten en meervoudig onverzadigde vetzuren algemeen gesteld dat ze een positief effect hebben op de gezondheid. Dat vertaalt zich in een groeiend aandeel van microalgen in de markt voor gezondheidsvoeding.

Specifieke producten uit de algencel

Excretieproducten

Alle microalgen scheiden stoffen uit, bijvoorbeeld voor hun onderlinge communicatie of voor 'biologische oorlogsvoering'. Het voordeel van dit soort uitgescheiden stoffen is dat je ze niet meer uit de cel hoeft te halen en je ze dus makkelijk kunt zuiveren. Het nadeel is dat de algen er (meestal) niet veel van produceren. Typische voorbeelden van 'excretieproducten' zijn toxines. Aan sommige van die toxines worden antikankereigenschappen toegeschreven. Andere zouden een antibacteriële werking hebben. Op dit moment bevindt het werk met deze producten zich nog in de onderzoeksfase. De belangrijkste vraag: hoe verhoog je de opbrengst?

Er zijn ook algen die wél grote hoeveelheden product uitscheiden. Een voorbeeld hiervan is de microalg *Porphyridium cruentum*. Die produceert zoveel lange koolhydraatketens (polysacchariden) dat de vloeistof waar deze alg in wordt gekweekt

er helemaal stroperig van wordt. Het ligt dan ook voor de hand om deze alg in te zetten als producent van verdikkings- of geleermiddelen, stabilisatoren of emulgatoren. Algenkwekers in Frankrijk en Israël werken op dit moment aan een commerciële productieketen voor deze polysacchariden.

Een tweede voorbeeld is de microalg *Botryococcus braunii*. Die maakt lange ketens van koolwaterstoffen die als grondstof zouden kunnen dienen voor brandstoffen en plastics. De alg maakt relatief grote hoeveelheden van deze stoffen: tot wel 80% van de totale hoeveelheid geproduceerde biomassa. De commerciële exploitatie van deze bijzondere eigenschap wordt echter gehinderd door de zeer lage groeisnelheid van deze microalg. Op dit moment zijn er dan ook nog geen rendabele productieprocessen ontwikkeld en richt het onderzoek zich op het verbeteren van de groeisnelheid. Naast deze twee voorbeelden is er slechts een handvol andere microalgen bekend met noemenswaardige hoeveelheden van uitscheidingsproducten. De meeste producten moeten daarom vooral binnen in de cel worden gezocht.

Intracellulaire producten

Algen zijn feitelijk ééncellige plantjes. Hun cellen bestaan uit allerlei verschillende (groepen van)

moleculen die, nadat ze van elkaar zijn gescheiden, als afzonderlijke producten vermarkt zouden kunnen worden. De biochemische samenstelling van microalgen verschilt per soort en is ook afhankelijk van de kweekomstandigheden. Toch bestaan er ook een aantal algemene kenmerken.

De cellen van bijna alle microalgen bestaan uit drie grote fracties: eiwitten, koolhydraten en vetten of lipiden. Samen vormen deze fracties ongeveer 70-90% van de totale biomassa (drogestof, of drooggewicht). Onder optimale groeiomstandigheden beslaat de eiwitfractie ongeveer de helft van de biomassa bij de meeste microalgen. Deze fractie wordt aanzienlijk kleiner wanneer de cellen geen toegang meer hebben tot een geschikte bron van stikstof, één van de essentiële elementen waaruit eiwitten zijn opgebouwd. Onder stikstofarme omstandigheden schakelen de meeste algen over op productie en opslag van koolhydraten en lipiden, die beide geen stikstof bevatten.

Eiwitten

De wereldwijde vraag naar eiwitten voor toepassing in levensmiddelen, diervoeding en bulkchemicaliën neemt hard toe. In Europa is de sojaboon met een jaarlijkse hoeveelheid van 7,5 miljoen ton, ofwel 3 miljoen ton puur eiwit, de voornaamste bron van geïmporteerde eiwitten. Soja-eiwit wordt voornamelijk gebruikt in de diervoeding. De productie van soja gaat evenwel gepaard met ontbossing in landen als Indonesië, Brazilië en Paraguay. Om aan de toenemende vraag naar eiwit te voldoen is dan ook een alternatieve bron nodig. Algen zouden dat alternatief kunnen zijn.

Microalgen bestaan voor ongeveer de helft uit eiwitten. Wanneer een jaarlijkse microalgenproductie van 50 ton drooggewicht per hectare mogelijk zou zijn – wat een conservatieve schatting is – zou voor de complete vervanging van de huidige Europese import van soja 'slechts' 120.000 hectare nodig zijn. Dit staat gelijk aan niet meer dan 0,25%

Algen hebben ook hun weg gevonden naar de beautysalons.





Voor sojateelt worden wereldwijd bossen gekapt. Eiwitproductie met algen kan een stuk duurzamer zijn.

van het totale landoppervlakte van Spanje. Beschikbaar areaal lijkt daarmee dus geen obstakel.

De huidige kostprijs van biomassa uit microalgen is wél een obstakel. Op dit moment kost een kilo algeneiwit nog tien keer meer dan een kilo soja-eiwit. Het verlagen van de kosten voor de productie van microalgen is daarom één van de belangrijkste activiteiten van het onderzoek aan algen bij universiteiten en bedrijven. Het benutten van de rest van de biomassa, dat wil zeggen de andere helft naast het eiwit, is minstens zo belangrijk. De afzetmarkt voor deze 'restproducten' zou in grootte vergelijkbaar moeten worden met de eiwitmarkt. Alleen op die manier kun je voorkomen dat de productie van eiwit uit algen beperkt wordt door, zeg, de nu nog beperkte vraag naar kleurstoffen uit algen.

Een vaak geopperde mogelijkheid is de gecombineerde productie van eiwitten en (eetbare) olie. Olie is echter een relatief laagwaardig product. Bovendien gaat ophoping van olie binnen de cel gepaard met een verlaging van de productie van

eiwit. Bij de ontwikkeling van een dergelijk gecombineerd productieproces zul je er dus voor moeten waken dat de extra inkomsten niet teniet worden gedaan door bijkomende kosten.

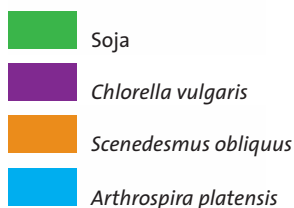
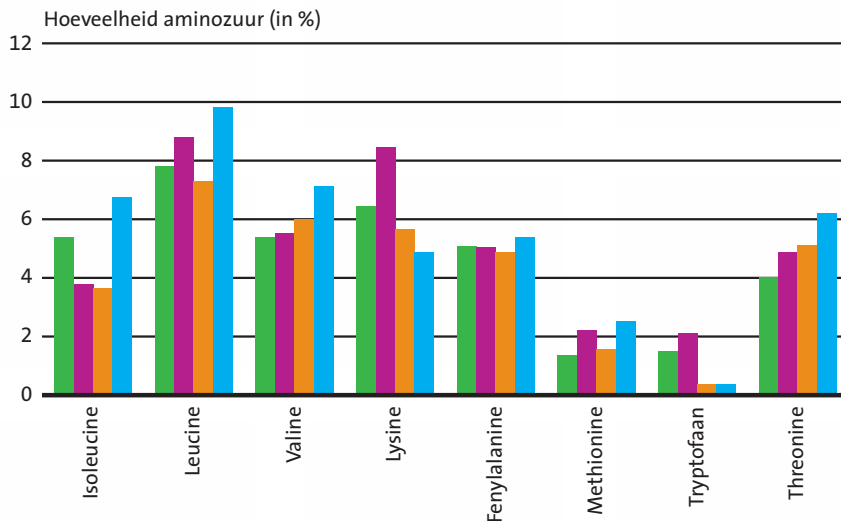
De oplossing zou ook kunnen komen uit een verbeterde eiwitkwaliteit van algen in vergelijking met soja. Soja bevat alle essentiële aminozuren voor dieren, al zijn de verhoudingen van deze aminozuren niet optimaal voor ieder type voeding. Om soja toch geschikt te maken worden dure opgezuiverde essentiële aminozuren toegevoegd. De diverse soorten microalgen verschillen onderling in hun samenstelling van essentiële aminozuren (zie tabel 2). Het is dus denkbaar dat je een beter gebalanceerd diervoeder kunt maken door 'maatwerk' van verschillende microalgen te nemen in plaats van de 'confectie-eiwitten' uit soja.

Een laatste optie om de eiwitten uit algen op te waarderen is scheiding van waardevolle functionele eiwitten, bijvoorbeeld eiwitten die als emulgator of geleermiddel in levensmiddelen kunnen dienen, van de overige eiwitten. Ook dat zal de netto inkomsten ten goede komen.

Koolhydraten

Afhankelijk van de soort bestaat 20-80% van de biomassa van algen uit koolhydraten. De meest voorkomende koolhydraten zijn de zogenoemde glucanen als glycogeen, zetmeel, cellulose, laminarine en chrysolaminarine. De meeste van deze glucanen spelen een belangrijke rol in de opslag van energie. De moleculen worden zowel bij optimale groeiomstandigheden gedurende de dag geproduceerd, zodat ze als brandstof kunnen dienen gedurende de nacht, als ook bij suboptimale omstandigheden, zoals een te hoge lichtintensiteit of een stikstoftekort. In dat geval dienen ze als een soort noodopslag, in afwachting van betere tijden. Cellulose bevindt zich in de celwanden van veel microalgen. Het heeft daar een vooral een structurele, verstevigende functie.

Aminozuursamenstelling van soja en drie verschillende microalgensoorten



Tabel 2. Aminozuursamenstelling van soja en drie verschillende microalgensoorten.

Vanwege de hoge niveaus van koolhydraten in sommige microalgen – tot wel 80% van het totale drooggewicht – worden deze soorten gezien als ideale grondstof voor de productie van ethanol (alcohol voor biobrandstof) via vergisting. Bijkomend voordeel is dat de celwand van microalgen geen lignine of hemicellulose bevat. Die afwezigheid van ‘houtige’ componenten maakt het vrijmaken van glucose uit de biomassa aanzienlijk eenvoudiger dan bijvoorbeeld uit afval van landbouw, tuinen, parken of bermen.

Koolhydraten vinden ook toepassingen in diervoeding, als geleermiddelen in humane voeding, als meststoffen, als binders van zware metalen in de levensmiddelenindustrie en de waterzuivering en als bouwstenen voor de productie van bioplastics.

Lipiden

Veel microalgen bevatten de nodige lipiden. Dat maakt ze potentieel geschikte als leverancier voor grondstof voor de productie van ‘biodiesel’. Helaas blijken niet alle lipiden even geschikt voor de productie van brandstof.

‘Lipiden’ is een vrij algemene term voor een breed scala van moleculen die makkelijker oplossen in organische oplosmiddelen zoals hexaan dan in water. Voorbeelden zijn sterolen, bepaalde vitamines, vrije vetzuren, triglyceriden, diglyceriden en de meeste pigmenten. Niet al deze lipiden kunnen gemakkelijk omgezet worden in biobrandstoffen. De ware biobrandstofbelofte van microalgen huist in de triglyceriden.

Triglyceriden bestaan uit een glycerolmolecuul waaraan drie vetzuren zijn gekoppeld. De vetzuursamenstelling van triglyceriden in microalgen is vergelijkbaar met die van plantaardige oliën. Ze zijn zodoende geschikt voor humane voeding en ook voor omzetting in biobrandstoffen voor gebruik in dieselmotoren. Daarnaast zijn triglyceriden ook geschikte grondstoffen voor de productie van bioplastics.

Veel microalgen hebben de mogelijkheid om triglyceriden te produceren, maar ze doen dat alleen onder kweekomstandigheden die nadelig zijn voor gewone groei. Als microalgen bijvoorbeeld worden blootgesteld aan een stikstoftekort gaan ze als reservevoeding triglyceriden ophopen. Daarbij kan de concentratie triglyceriden in de cel oplopen tot wel 45% van het totale drooggewicht. Dit komt omdat tijdens zo’n stikstoftekort de productie van normale, functionele biomassa niet mogelijk is. De fotosyntheseprocessen blijven aanvankelijk echter onverminderd doorlopen. Een deel van de vrijkomende energie wordt door de cel gebruikt om triglyceriden te produceren. Deze stoffen fungeren als opslag van energie en koolstof, maar ook ter bescherming van de cel, omdat ze een deel van het schadelijke overschot aan elektronen uit de fotosynthese gebruiken en dus onschadelijk maken.

Pigmenten

In de overige biomassa van algen zitten nog pigmenten, antioxidanten, sterolen, glycerol en toxines. Deze stoffen zijn meestal in zeer lage



hoeveelheden aanwezig. Het komt slechts zelden voor dat een individuele component meer dan 10% van het totale drooggewicht beslaat. Een typische uitzondering hierop zijn de pigmenten van sommige microalgen. Pigmentproductie is momenteel één van de weinige commercieel levensvatbare productieprocessen voor celcomponenten van microalgen, vanwege de hoge waarde van deze pigmenten.

Pigmenten van microalgen worden ingedeeld in de chlorofielen (groen), phycobili-eiwitten (rood, blauw, paars en geel) en carotenoïden (geel tot rood). De concentraties van deze pigmenten in de cel zijn vaak te laag voor commerciële exploitatie. Uitzonderingen zijn phycocyanine (blauw) in *Arthrospira platensis* (ook – foutief – aangeduid met de oude naam *Spirulina platensis*), β -caroteen (oranje-rood) in *Dunaliella salina* en astaxantine (rood) in de alg *Haematococcus pluvialis*.

Phycocyanine is eigenlijk een complex van eiwitten en blauwe pigmentmoleculen. Het draagt in de cel bij aan het opvangen en transporteren van energie uit zonlicht. Het wordt toegepast

als kleurstof voor levensmiddelen, als functioneel ingrediënt van gezondheidsvoeding en als een zogenoemd fluorofoor voor het kleuren van biologisch materiaal in microscopisch onderzoek. In *Arthrospira platensis* vormt phycocyanine ongeveer 15% van het totale

drooggewicht. Phycocyanobiline, het werkelijke pigmentmolecuul van dit pigment-eiwitcomplex vormt slechts 0,7% van de biomassa. Commerciële winning van deze stof is desondanks mogelijk dankzij de hoge marktprijzen van zowel phyco-

cyanine als phycocyanobiline. Daarnaast is het oogsten van *Arthrospira platensis* door spontane klontering van de spiraalvormige cellen relatief goedkoop vergeleken met andere microalgen. Voor andere soorten zijn vaak dure centrifuges nodig om de biomassa van het kweekmedium te scheiden. Bovendien gedijt *Arthrospira platensis* goed bij hoge pH. Daardoor is het kweken van deze microalg in relatief goedkope open kweeksystemen mogelijk. Het risico op besmetting met of predatie door andere algen of organismen is niet groot omdat die niet tegen de hoge pH kunnen die *Arthrospira platensis* wél kan verdragen.

Carotenoïden vormen één van de meest wijd verspreide groepen van natuurlijk voorkomende pigmenten. De meeste carotenoïden zijn xanthofielen, die uit veertig koolstofatomen, en één of meer zuurstofatomen bestaan. Carotenen bevatten geen zuurstof en vormen minder dan 10% van alle carotenoïden. Tot op heden zijn meer dan 700 verschillende carotenoïden beschreven. Ze komen voor in alle fotosynthetische en enkele niet-fotosynthetische organismen. Die laatste produceren de carotenoïden niet zelf, maar nemen deze tot zich via hun dieet. De kleuren van deze pigmenten lopen van geel tot rood. Enkele bekende voorbeelden zijn lycopene in bijvoorbeeld tomaten, zeaxantine uit maïs, β -caroteen uit penen en de alg *Dunaliella salina* en astaxantine uit bijvoorbeeld zalm en uit de alg *Haematococcus pluvialis*.

In fotosynthetische organismen helpen carotenoïden bij het vangen en transporteren van energie uit zonlicht. Ze geven structuur aan de 'fotosystemen' in de cel en zorgen voor eventuele afvoer van een overschot aan geabsorbeerde energie. Ook werken ze als antioxidant: ze ruimen reactieve zuurstofdeeltjes op. Deze eigenschap, in combinatie met hun kleur, heeft ervoor gezorgd dat carotenoiden tegenwoordig veel toepassingen vinden in de industrie. In levensmiddelen, diervoeding en cosmetica worden carotenoiden zoals

Dure pigmenten zijn op dit moment één van de weinige commercieel interessante producten uit algen



Op deze luchtfoto van meren in Californië is te zien dat algen veel verschillende pigmenten bevatten.

β -caroteen toegepast als kleurstof. Daarnaast hebben de – al dan niet vermeende – gezondheidseffecten gezorgd voor toepassingen in gezondheidsvoeding. Let wel: er is ook onderzoek dat geen, of op zijn best onder specifieke omstandigheden effecten op de gezondheid aantoonde. Ondanks deze voortdurende discussie blijken carotenoïden commercieel interessante moleculen, die onder andere met behulp van microalgen worden geproduceerd.

Voorbeelden van rendabele carotenoïdenproductie zijn op dit moment β -caroteenproductie met *Dunaliella salina* en astaxantineproductie met *Haematococcus pluvialis*. *Dunaliella salina* is extreem zouttolerant en wordt daarom in open systemen gekweekt bij twee tot tien maal de zoutconcentratie van normaal zeewater, om zo de kans op besmetting en predatie van de cultuur te verkleinen. *Haematococcus pluvialis* is een zogenaamde mixotroof en wordt zowel gekweekt op organische koolstofbronnen als op zonlicht en CO_2 in gesloten kweeksystemen. De carotenoïden worden als opgezuiverde stoffen en als componenten van gedroogde algenbiomassa verkocht.

Pigmenten zijn in relatief lage concentraties (minder dan 1% van het totale drooggewicht) aanwezig wanneer de cellen onder optimale groei-condities worden gekweekt. De microalgen gaan echter over tot ophoping van deze moleculen, tot wel 14% van het totale drooggewicht, wanneer ze worden blootgesteld aan suboptimale groei-condities, zoals een zeer hoge lichtintensiteit, een tekort aan stikstof of suboptimale temperaturen. De opgehoopte pigmenten functioneren vervolgens als een soort zonnescerm om de fotomachinerie tegen overbelichting te beschermen. Bovendien dient de productie van deze componenten, net als bij de triglyceriden, ook ter bescherming van de cel door een deel van het schadelijke overschot aan fotosynthetisch gegenereerde elektronen te gebruiken.

Omdat zowel β -caroteen als astaxantine pas worden opgehoopt onder omstandigheden die nadelig zijn voor de groei van de cellen, worden meestal 'twee-staps' productieprocessen toegepast. Eerst wordt een grote hoeveelheid biomassa geproduceerd onder optimale groei-condities. Vervolgens worden de microalgen aan stress blootgesteld om zo ophoping van de carotenoïden te stimuleren. In de praktijk betekent die stress meestal: stikstoftekort. In de groeifase van de algen is dat vrij eenvoudig te realiseren, doordat de groeiende algen de aanwezige stikstof zelf opmaken. Meestal wordt dit gecombineerd met verdunning van de cultuur, om zo de gemiddelde lichtintensiteit in de cultuur te verhogen.

Een voorbeeld van een carotenoïde dat nog niet commercieel geproduceerd wordt is luteïne. Maar dat zou de komende jaren wel eens kunnen veranderen. Luteïne is een xanthofiel waarvoor steeds meer aandacht is vanwege de mogelijke effecten op preventie van hartfalen en leeftijdsgerelateerde achteruitgang van het gezichtsvermogen. Het is het enige carotenoïde dat na inname geabsorbeerd wordt in de bloedbaan en zich vervolgens ophoopt

in het netvlies. Het beschermende effect van luteïne zit hem waarschijnlijk in de capaciteit om blauw licht te filteren en in de antioxidantwerking waarmee schadelijke reactieve zuurstofdeeltjes geïnactiveerd kunnen worden. Luteïne wordt gebruikt als kleurstof voor levensmiddelen en wordt nu nog gewonnen uit de bloemblaadjes van afrikaantjes.

Om luteïne te oogsten moeten de bloemen regelmatig worden geplukt. Als de bloemblaadjes van de rest van de bloem zijn gescheiden kan luteïne worden geëxtraheerd. De luteïneconcentratie in de bloemblaadjes varieert rond de 0,03% van het totale drooggewicht. Dat maakt de productie van luteïne uit afrikaantjes een arbeidsintensief proces dat ook nog eens veel landbouwareaal vergt. Het is nu dan ook alleen rendabel in ontwikkelende economieën. Luteïne is ook synthetisch geproduceerd, maar de kostprijs hiervan kon niet op tegen de productie van afrikaantjes. Hier lijkt dus een kans te liggen voor een efficiënt en duurzaam productieproces op basis van microalgen. Recent is een nieuwe algensoort ontdekt die zeer veel luteïne

Luteïne komt uit afrikaantjes ... of uit algen.



bevat, *Scenedesmus almeriensis*. De productie van deze microalg wordt nu dan ook opgeschaald.

Zuivering van rookgas en andere afvalstromen

De productie van microalgen zal duurzamer en kostenefficiënter worden wanneer dit gecombineerd wordt met afvalwaterzuivering of rookgasbehandeling. Industriële rookgassen bevatten 10 tot 20% CO₂ en vormen daarmee een zeer geschikte koolstofbron voor algenkweek. In rookgassen zitten echter ook giftige stoffen zoals zwavel- en stikstofoxides. Er zijn al veel microalgen ontdekt die toch goed groeien in cultures die belucht worden met rookgassen. De grootste beperking is momenteel dat niet op alle locaties waar rookgassen in grote hoeveelheden worden geproduceerd worden voldoende ruimte is voor grootschalige algenkweek op zonlicht.

Afvalwater uit steden, de landbouw of de industrie, waarin organische en anorganische bronnen van stikstof en fosfor voorkomen, kunnen door microalgen worden gezuiverd. Een mogelijk probleem is de aanwezigheid van zware metalen, medicijnen of ziekteverwekkers in het afvalwater. Wanneer de algen deze componenten in hun biomassa opnemen worden ze ongeschikt om ze te gebruiken als meststof, laat staan als levensmiddel. (zie ook de box na dit hoofdstuk)

Microalgen hebben dus een heel scala aan mogelijke toepassingen. Op dit moment is maar een beperkt deel een commerciële realiteit. Dit komt voornamelijk door de nu nog hoge kosten van productie. De belangrijke vraag is op welke punten de productieketen verbeterd kan worden.

Biocement

UIT HET voorgaande hoofdstuk blijkt dat er potentieel veel interessante stoffen uit algen kunnen worden gehaald. Een deel van die stoffen wordt zelfs al op commerciële schaal gewonnen. Ook uit de fractie die na winning van oliën, koolhydraten of eiwitten uit de alg overblijft valt mogelijk nog winst te behalen. Deze restfractie wordt ook wel as genoemd en bestaat uit zouten en mineralen.

Er zijn microalgen van de families diatomeeën en coccolithoforen die voor een groot deel, soms meer dan 30% van hun drooggewicht, uit mineralen bestaan. Deze algen maken om hun cel een soort uitwendig skeletje. Diatomeeën maken dat van silicaat, coccolithoforen van calciumcarbonaat. Deze algen bevatten vaak ook andere interessante stoffen zoals EPA en triglyceriden die als grondstof voor biobrandstof kunnen dienen. Als deze algen in de toekomst op grote schaal gekweekt zouden worden voor de productie van EPA of biobrandstof, dan blijven er dus mineralen over waarvoor het interessant zou zijn om ook een toepassing te vinden.

De mineralen silicaat en calciumcarbonaat die door deze algenfamilies worden geproduceerd hebben onderzoekers op het idee gebracht om algen te gebruiken bij het verduurzamen van cement. De productie van cement is op meerdere manieren belastend voor het milieu. Nu worden de grondstoffen voor cement, voornamelijk klei en kalksteen, uit het landschap gegraven. Wat dat met het landschap doet is te zien rond de Sint Pietersberg bij Maastricht. Actievoerders die jarenlang tegen de cementwinning door de ENCI protesteerden

noemden die berg al 'de holle kies van Maastricht'.

Een nog grotere belasting voor het milieu is de CO₂-uitstoot die gepaard gaat met de productie van cement. Cementproductie is verantwoordelijk voor 7% van de door mensen geproduceerde CO₂. Ongeveer de helft van die uitstoot wordt veroorzaakt door de verbranding van fossiele brandstoffen om de grondstoffen bij hoge temperatuur in cement om te zetten. Tijdens die verbranding wordt CO₂ uit de grondstof calciumcarbonaat (CaCO₃) verwijderd en blijft calciumoxide (CaO) over. Dat is de basiscomponent van cement. Deze zogenoemde calcinatie is verantwoordelijk voor de andere helft van de CO₂-uitstoot.

Je zou de hoeveelheid CO₂ in de productie van cement een kortere kringloop kunnen geven door andere grondstoffen te vinden voor de mineralen, bijvoorbeeld de biomassa uit algen. De 'kalkskeletjes' van diatomeeën en coccolithoforen zouden hier een rol in kunnen spelen. Tijdens de groei van die biomassa is CO₂ eerst vastgelegd uit de atmosfeer. Daarmee compenseer je dus een deel van het CO₂ die tijdens het productieproces weer wordt vrijgemaakt.

De productie van planten of algen zuiver en alleen voor de productie van een goedkoop bulkproduct als cement zal economisch nooit uit kunnen. Wat wel mogelijk is, is het gebruik van reststromen uit algenproductiesystemen. Door algen ook nog eens op afvalwater te laten groeien wordt al geprobeerd om zoveel mogelijk stikstof en fosfaat terug te winnen uit afvalstromen. Als op een vergelijkbare manier ook silicium en calcium door algen uit afvalwater kunnen worden terugge-

De alg *Emiliana huxleyi* is rijk aan kalk.



wonnen zouden dus meerdere kringlopen gesloten kunnen worden.

Cement op basis van algen is makkelijker bedacht dan gemaakt. Er zal nog goed gekeken moeten worden naar de eigenschappen van de mineralen die uit de verschillende algen kunnen worden verkregen. Misschien dat mengsels van algen en plantenresten kunnen worden gebruikt bij verschillende verbrandingstemperaturen om as te krijgen met de gewenste eigenschappen voor de productie van cement. De kwaliteit van dit biocement zal moeten worden onderzocht op de mogelijke toepassingen. Omdat de algenbiomassa verschilt van plantenresten heeft het mogelijk voordelige eigenschappen voor de cementproductie. De beperkte deeltjesgrootte en de fijne structuur lijken bij uitstek voordelig voor cement-

productie. Daarnaast bestaat het uitwendige skeletje van coccolithophoren uit losse plaatjes die tijdens de groei los kunnen laten. Deze zijn relatief eenvoudig te scheiden van de rest van de biomassa en het water, waardoor je vrijwel puur calciumcarbonaat overhoudt. Het lijkt daarmee een ideale grondstof om de basis van cement te optimaliseren voordat het de oven ingaat.

Algen in dienst

A LGEN EN afvalwater kunnen een problematische combinatie vormen. Wanneer slecht behandeld afvalwater wordt geloosd op het oppervlaktewater, kan ongewenste en soms zelfs giftige algenbloei ontstaan. Het probleem zit dan vooral in de overmaat aan voedingsstoffen uit het afvalwater.

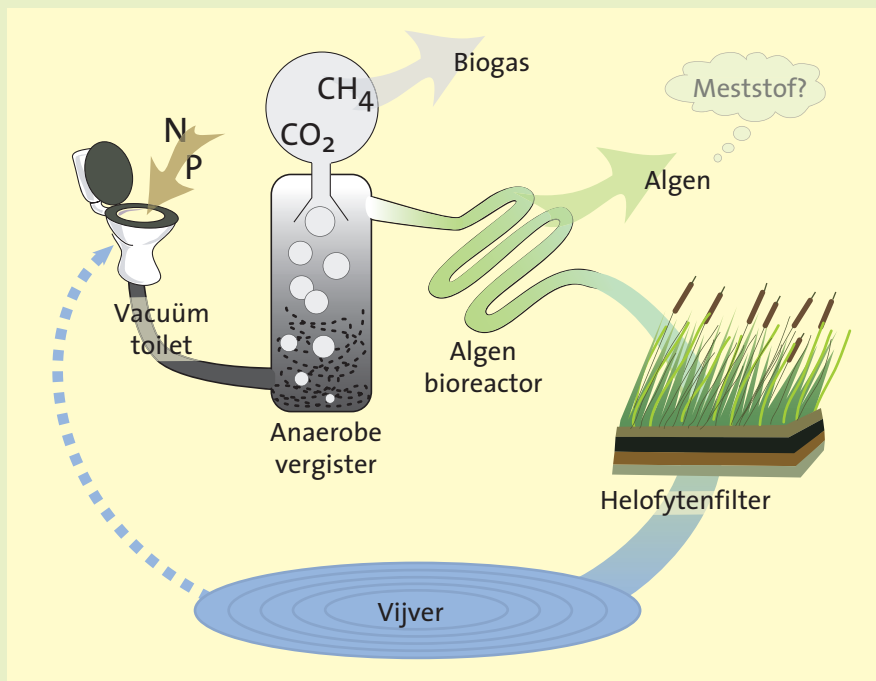
Er bestaan gelukkig ook positieve relaties tussen algen en afvalwater. De afgelopen jaren zijn wetenschap en bedrijfsleven afvalwater steeds vaker gaan zien als een bron van essentiële voedingsstoffen voor algengroei. Door op die manier naar afvalwater te kijken, kunnen algen geproduceerd worden tegen lagere prijzen terwijl tegelijk het afvalwater wordt gezuiverd. Er zit nog een ander belangrijk voordeel aan deze manier van denken: in de komende eeuw dreigt uitputting van de voorraad fosfaat voor de landbouw. Terugwinning van fosfaat uit afvalwater door algen is dan een goed alternatief voor het traditionele fosfaat uit mijnen.

Huishoudelijk afvalwater is rijk aan koolstof en waardevolle voedingsstoffen. En die zijn ook waardevol voor de zogenoemde circulaire, *biobased* economie van de toekomst. Dat afvalwater bevat echter ook vaak microverontreinigingen zoals geneesmiddelen, hormonen en producten voor persoonlijke verzorging. Dergelijke stoffen maken het aantal potentiële toepassingen van de algen die met dat afvalwater zijn gekweekt beperkter. Ze kunnen bijvoorbeeld ongeschikt worden als bron voor levensmiddelen en vis- of veevoer. De algen zijn nog wel geschikt voor vele andere toepassingen: bijvoorbeeld groene energie, bioplastics en als bron van specifieke verbindingen.

Sanitatie op locatie

In het gebouw van het Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW) wordt afvalwater al als grondstof gezien in plaats van als afval. Vacuümtoiletten zamelen het toiletwater in, dat naast fecaliën, urine en toiletpapier maar 1 liter grondwater per spoelbeurt bevat. Dit water heet ook wel 'zwart water'. Het blijft gescheiden van het overige, licht vervuilde afvalwater van het gebouw: het 'grijze water'. Door de gescheiden inzameling en behandeling van de verschillende afvalwaterstromen zijn voedingsstoffen als stikstof, fosfor en kalium eenvoudiger terug te winnen. Daarnaast zorgt dit concept voor een drastische vermindering van het drinkwaterverbruik en genereert het groene energie.

Van het huishoudelijk afvalwater bevatten urine en fecaliën de hoogste concentraties stikstof en fosfaat. Dit zijn essentiële nutriënten voor groeiende algen. Het NIOO-KNAW zuivert zwart water eerst in een anaeroob (zuurstofloze) vergister. Hier zetten micro-organismen organische verbindingen om in biogas. Na dat proces zijn de nuttige nutriënten voor de groei van algen nog steeds beschikbaar. De volgende stap is straks dan ook een algenbioreactor. Nu kan dat alleen nog op laboratoriumschaal. Een vertikaal doorstroomd helofytenfilter – feitelijk een veld met moerasplanten en allerlei lagen zand en grond – zorgt uiteindelijk voor een laatste reiniging, waarna het gezuiverde water klaar is om de natuur weer in te gaan. Of het toilet.



Schematische weergave van de uiteindelijke zwartwater-behandeling bij het NIOO-KNAW in Wageningen, Het NIOO richt zich op het terugwinnen van fosfaat en stikstof uit anaeroob voorgezuiverd zwart water, waarbij het instituut waardevolle biomassa produceert: algen. De droom bij dit nieuwe sanitatieconcept is om de geoogste algen als meststof te gebruiken waarmee de lokale nutriëntencyclus gesloten kan worden. Op dit moment doet het NIOO verder onderzoek naar de kwaliteit van de algen en het effect van microverontreinigingen.



Algen kunnen een duurzame bron worden van biobrandstof en nog vele andere producten en diensten. Waarom zijn ze dat nog niet? Een overzicht van de uitdagingen.

Voetangels en klemmen in de algenteelt

ONDANKS DE enorme belofte van microalgen als duurzame bron van producten en diensten is op dit moment slechts een klein deel van die toepassingen daadwerkelijk in bedrijf. Dit komt voornamelijk door de nog hoge kosten van het productieproces, maar waar zit hem dat nu precies in? Om te weten waar verbeteringen nodig zijn heb je een goed inzicht nodig in de belangrijkste kostenfactoren van de productieketen. Dan blijkt dat er nog heel wat werk te verrichten is en dat er zelfs doorbraken nodig zijn voor we bulkproducten uit microalgen op de schappen in de supermarkt en aan de pomp zullen tegenkomen.

Al een halve eeuw oud

Biobrandstofproductie met microalgen is bepaald geen nieuw concept. Al meer dan een halve eeuw terug verschenen de eerste rapporten waarin dit concept beschreven werd. Pas tijdens de oliecrisis van de jaren zeventig werd er echt werk gemaakt van deze ideeën. Grote onderzoeksprogramma's in de Verenigde Staten en Japan legden zich toe op de ontwikkeling van energieproductie met behulp van microalgen. Het Amerikaanse *Aquatic Species Program* richtte zich daarbij voornamelijk op de productie van biodiesel met olierijke microalgen,

gekweekt in open vijversystemen. De benodigde CO₂ kwam uit de schoorstenen van energiecentrales.

De Japanners gebruikten ook rookgassen, maar hun onderzoek spitste zich toe op gesloten fotobio-reactoren. Beide projecten leverden het nodige op, zoals veelbelovende productiestammen en ontwerpprincipes voor open en gesloten kweeksystemen. Toch werden de programma's halverwege de jaren negentig gestopt. De reden: de stap naar grootschalige productie van energiedragers leek economisch gezien niet rendabel.

Ongeveer een decennium later, toen biotechnologisch onderzoek tot volle wasdom kwam, leefde het onderwerp weer op. Niet alleen de doorbraken die de biotech mogelijk maakte, maar ook andere factoren droegen bij aan de hernieuwde interesse in biobrandstofproductie. Zo steeg de prijs van fossiele brandstoffen tot recordhoogtes, nam de energiebehoefte van de groeiende wereldbevolking alsmaar toe, wilden westerse landen niet meer afhankelijk zijn van olie uit het Midden Oosten en bleek het gebruik van fossiele brandstoffen een grote negatieve impact op het milieu te hebben.

In vergelijking met ander onderzoek naar biobrandstofproductie kreeg en krijgt het onderzoek naar microalgen veel aandacht. Dit komt doordat

productie van biobrandstof op basis van landbouwgewassen als koolzaad of suikerriet een potentiële bedreiging vormt voor de wereldvoedselproductie. Voor dergelijke producten is immers vruchtbare grond nodig. Microalgen kunnen ook op onvruchtbaar land geproduceerd worden en zijn bovendien veel productiever dan de traditionele landbouwgewassen.

Alleen hoogwaardige producten

Ondanks de potentie van microalgen is de productie van algenbiomassa momenteel beperkt ten opzichte van die van energiegewassen in de landbouw. De wereldwijde productie van microalgen bedraagt ongeveer 10.000 tot 20.000 ton drogestof per jaar. Dat gaat in hoofdzaak om de productie van hoogwaardige producten als pigmenten en omega-3 vetzuren. Deze productie vertegenwoordigt een waarde van ongeveer 2,5 miljard Euro, ofwel een gemiddelde prijs van 125 tot 250 euro per kilo droge algenbiomassa. Ter vergelijking:

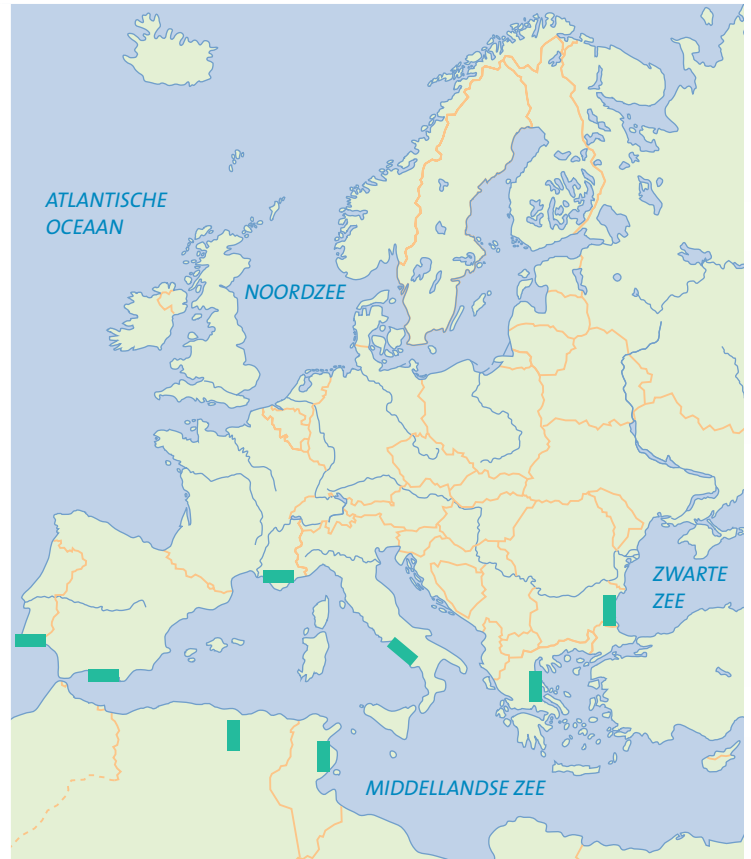
van palmolie wordt bijna 40 miljoen ton per jaar geproduceerd tegen een prijs van ongeveer 50 cent per kilo.

De productie van bulkstoffen, zoals brandstof, met behulp van microalgen moet daarom op een veel grotere schaal en tegen een veel lagere kostprijs gebeuren. Stel, we zouden alle transportbrandstoffen in Europa willen vervangen door biobrandstoffen uit microalgen, dan is een jaarlijkse productie van ruim 400 miljoen ton olie nodig. Omgerekend zou hier een oppervlakte ter grootte van Portugal – ruim 9 miljoen hectare – voor nodig zijn. Daarbij ga je ervan uit dat een hectare algenkwekerij 40.000 liter olie per jaar kan produceren, op basis van 3% omzettingsefficiëntie van de hoeveelheid zonlicht zoals die in Zuid-Europa gebruikelijk is en op basis van algen die voor de helft uit olie bestaan. De ruimte is er wel rond de Middellandse Zee (zie figuur 1), maar het is nog een grote stap voor de microalgentechnologie op deze schaal mogelijk is. Niet alleen zal de productieschaal dramatisch moeten toenemen, ook zal de kostprijs met ongeveer een factor 10 omlaag moeten.

Voor zulke drastische doorbraken is veel inspanning nodig. De hele keten van algenproductie moet onder de loep worden genomen. Fundamentele biologie, systeembioïologie, modellering van de stofwisseling, stamveredeling, bioprocestechnologie, opschaling, bioraffinage, productieketen- en systeemontwerp ... alles moet op een geïntegreerde manier worden bekeken. Het voornaamste doel is om de kostprijs en energiebehoefte van de algenproductie te verlagen. Tegelijk moet de olieproductie door de algen worden verbeterd en zal niet alleen uit de oliefractie maar ook uit de rest van de biomassa inkomen moeten worden gehaald. Voor dit laatste is een bioraffinage methodologie nodig, waarin de verschillende componenten van de alg van elkaar worden gescheiden en vervolgens worden

De oliecrisis bracht algen als producenten van brandstof voor het eerst écht in de belangstelling.





opgewerkt tot afzonderlijke producten (zie box ‘algenraffinaderij’). Voor de andere doelen zullen ceileigenschappen, bioreactorontwerp en de efficiëntie van toevoer en gebruik van nutriënten en grondstoffen verbeterd moeten worden.

Dat er nog veel ruimte is voor verbetering blijkt onder andere uit het voorbeeld van penicillineproductie door schimmels. Door technologische vooruitgang op het gebied van bioreactorontwerp, procescontrole, oogst- en extractietechnieken, en op het gebied van stamverbetering produceren schimmels tegenwoordig 5.000 keer meer penicilline dan ongeveer 50 jaar geleden. Commerciële algenproducenten maken nu echter nog altijd gebruik van traditionele kweekmethoden

en slechts een handvol verschillende algenstammen. Er zijn nog duizenden soorten microalgen te ontdekken. Daarnaast biedt genetische modificatie de mogelijkheid om microalgen met verbeterde eigenschappen uit te rusten.

Meer olie uit dezelfde alg

Voor er betaalbare biodiesel op basis van algen uit de pomp komt moet de olieproductie door microalgen drastisch worden verhoogd. In optimaal groeiende microalgen zijn lipiden voornamelijk aanwezig in de vorm van membranen. Wanneer bepaalde microalgen worden blootgesteld aan suboptimale groeiomstandigheden, zoals teveel licht, te weinig stikstof of extreme temperaturen, dan hopen

Om alle transportbrandstoffen in Europa door algen te laten produceren heb je de oppervlakte van Portugal nodig, al dan niet verspreid over meerdere locaties.

zij lipiden op in de vorm van triglyceriden, een soort oliedruppels. De membraanlipiden bevatten fosfaat- of suikergroepen en zijn daarom minder geschikt als biobrandstof dan de druppeltjes triglyceriden. Bovendien vormen membraanlipiden dankzij hun polariteit een stevige verbinding tussen wateroplosbare en olieoplosbare moleculen. Daardoor zijn ze moeilijk te scheiden van de rest van de biomassa. Efficiënte 'algendiesel' begint daarom met efficiënte productie van triglyceriden. Het kweken onder suboptimale groeiomstandigheden kost een cel echter relatief veel energie en wordt de cel uiteindelijk zelfs fataal. Dat dempt uiteindelijk de algehele olieproductiviteit van een algenkweek.

Kennis van de fundamentele biologie achter productie van triglyceriden is beperkt. De meeste ken-

nis is gebaseerd op onderzoek aan hogere planten. Als de biologische mechanismes en hun regulatie bekend waren, zou het mogelijk moeten zijn om olieproductie in microalgen te stimuleren zonder ze bloot te stellen aan suboptimale groeiomstandigheden, bijvoorbeeld door aanpassingen van de procesomstandigheden, door het gebruik van specifieke nutriëntenregimes, of door genetische modificatie van de microalgen (zie hoofdstuk 4). Hierdoor zou de efficiëntie van de triglyceridenproductie verhoogd kunnen worden.

Zon en water

Microalgen groeien op licht, water, CO₂, stikstof, fosfor en een aantal sporenelementen. Groot-schalige, duurzame kweek van microalgen voor biobrandstoffen moet gebaseerd zijn op zonlicht

Reactoren die het licht over een groter oppervlak verdelen gaan beter met zonlicht om.



Algen kunnen behulpzaam zijn in de rioolwaterzuivering.



als enige bron van lichtenergie. Vooral in de zomer en dicht bij de evenaar is de intensiteit van het zonlicht hoog; zo hoog dat de fotomachinerie in een algencel verzadigd wordt met licht en de rest van het geabsorbeerde licht verloren gaat als warmte. De omzettingsefficiëntie van het zonlicht wordt hierdoor laag. De laatste jaren is daarom veel onderzoek gedaan naar het verbeteren van deze efficiëntie, onder andere door het gebruik van stammen met minder pigment die minder licht opnemen (zie hoofdstuk 5) en door het gebruik van reactoren die het invallende zonlicht over een groter oppervlak verdelen.

Waterverbruik is een volgend belangrijk aspect van rendabele en duurzame biobrandstofproductie. Voor de productie van 1 liter brandstof met energiegewassen is niet minder dan 3.300 liter

water nodig! Microalgen hebben veel minder water nodig. Voor de fotosynthese en de stofwisseling heeft een kilo algen ongeveer 0,75 liter water nodig. Bij een oliepercentage van 50% kost een liter olie dus ongeveer 1.5 liter water.

In de praktijk is natuurlijk veel meer water nodig, bijvoorbeeld voor het koelen van de gesloten fotobioreactoren of voor het compenseren van waterverlies door verdamping uit open vijversystemen. Wanneer gesloten systemen worden uitgerust met warmtewisselaars, die aangesloten zijn op grote zoutwaterbuffers, kan het gebruik van kostbaar zoetwater aanzienlijk worden gereduceerd. Bovendien kunnen veel soorten microalgen

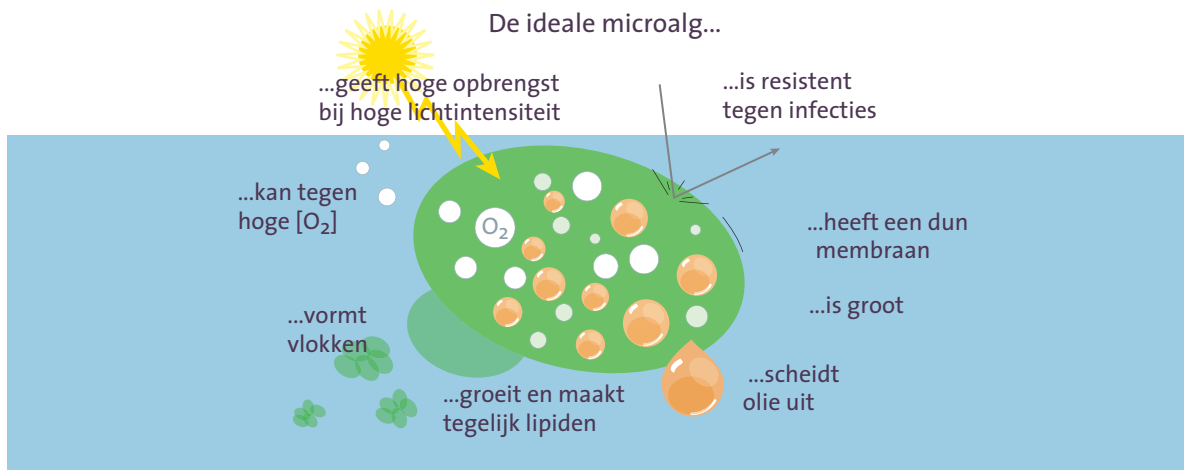
in zoutwater worden gekweekt. Daarmee is zelfs kweken in de woestijn met behulp van zoutwater uit de diepe bodem een optie. Ook productie in gesloten systemen op meren of zeeën behoort tot de moge-

lijkheden, al is het ontwikkelen van een reactor die bestand is tegen wind en golven beslist geen sinecure.

CO₂ van de schoorsteen naar de alg

Het produceren van grote hoeveelheden microalgen vereist ook grote hoeveelheden CO₂. Voor één kilo alg is netto ongeveer 1,8 kilo CO₂ nodig. Dit betekent dat voor de 400 miljoen ton transportbrandstoffen in Europa 1.4 miljard ton CO₂ nodig is. De Europese unie produceert nu ongeveer 4 miljard ton CO₂ door de verbranding van fossiele brandstoffen. Hiervan zou dus een aardig deel gerecycled kunnen worden in de vorm van algenbiobrandstof. Natuurlijk zal het CO₂ na verbranding van die biobrandstof alsnog in de atmosfeer eindigen, maar de snelheid waarmee het CO₂ uit

Schimmels maken nu ook 5.000 keer meer penicilline dan een halve eeuw terug



fossiele brandstoffen uiteindelijk ophoopt in de atmosfeer en onze oceanen zal hierdoor toch aanzienlijk verlaagd worden. Er is wel een belangrijk probleem: microalgen kunnen lang niet altijd pal naast CO₂-uitstotende industrie worden gekweekt. Eén van de grootste uitdagingen voor het hergebruiken van de huidige CO₂-uitstoot is dan ook de afstand waarover dit gas getransporteerd zal moeten worden.

Voeding

De belangrijkste nutriënten voor de productie van microalgen zijn stikstof en fosfor. Droge algenbiomassa bestaat voor ongeveer 7% uit stikstof en 1% uit fosfor. Voor het produceren van alle transportbrandstoffen in Europa is ongeveer 25 miljoen stikstof en 4 miljoen ton fosfor nodig. Dit is ongeveer twee keer zoveel als de huidige meststofproductie in de EU. Voor duurzame productie van biobrandstoffen uit microalgen zullen die voedingsstoffen daarom zoveel mogelijk gerecycled moeten worden. Je zou bijvoorbeeld gebruik kunnen maken van afvalstromen die rijk zijn aan nutriënten (zie box 'Algen in dienst'). In Europa is bijvoorbeeld 8 miljoen ton stikstof beschikbaar uit afvalstromen.

Dure oogst

Na de productie moet de biomassa geoogst worden. De olie moet uit de alg worden geëxtraheerd en het overgebleven celmateriaal moet worden opgewerkt tot een waardevolle bron van reststoffen. Het oogsten van microalgen is nu nog een kostbaar proces omdat dit veel energie kost en hoge investeringskosten met zich meebrengt. De meeste microalgen zijn ééncellig en microscopisch klein. Daarom wordt nu meestal een centrifuge gebruikt om de microalgen van het water te scheiden. Omdat er meestal maar een paar gram drogestof in een liter kweek zit, zijn grote centrifuges nodig om deze waterige stromen te verwerken. Een eerste concentratiestap door middel van zogenoemde flocculatie van de biomassa zou deze kosten en energiebehoefte aanzienlijk kunnen reduceren (zie box 'Beter oogsten met klontjes').

Om olie uit de microalgen te extraheren worden de cellen eerst 'opengebrouwen', waarna de olie van de rest van de biomassa wordt gescheiden. Dat kan met behulp van organische oplosmiddelen of met meer milieuvriendelijke, maar duurere, oplosmiddelen, zoals bijvoorbeeld het recyclebare CO₂. De meeste microalgen zijn niet alleen klein maar hebben ook nog eens een relatief dikke

celwand. Daarom zijn grove methoden nodig om de cel kapot te maken en die daardoor ook de functionaliteit van celcomponenten zoals eiwitten nadelig kunnen beïnvloeden. Het zou dan ook veel handiger zijn wanneer de alg zélf de olie al uit de cel werkt, zoals de soort *Botryococcus braunii* bijvoorbeeld doet. Dat vraagt een veel eenvoudiger opwerkingsmethode, waardoor de kosten van oliewinning uit de cultuur veel lager kunnen uitvallen.

Wanneer ook de overige celcomponenten te gelde moeten worden gemaakt, kunnen cellen met een dunnere celwand uitkomst bieden. Zo'n celwand moet nog net stevig genoeg zijn om de krachten in de fotobioreactor te weerstaan, maar tegelijkertijd eenvoudig open te breken zijn tijdens het extractieproces.

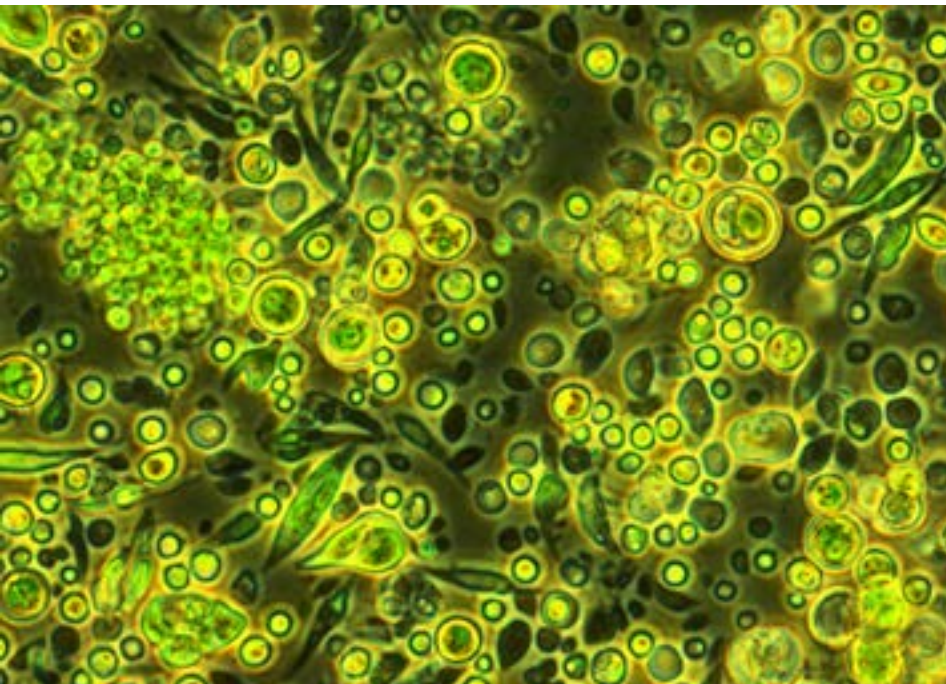
Algen hebben verschillende eigenschappen. De ideale productiestam is nog niet gevonden.

De ideale alg

In figuur 2 is een aantal gewenste eigenschappen van de ideale productiestam weergegeven. Helaas

is er op dit moment nog niet één microalg bekend die al deze eigenschappen in zich verenigt. Op het gebied van stamverbetering en stamselectie is dus nog veel ruimte voor verbetering. Eventuele doorbraken op dit gebied kunnen ook gevolgen hebben voor andere onderdelen van de productieketen. Bijvoorbeeld, een microalg die heel efficiënt om kan gaan met hoge lichtintensiteit maakt het overbodig om kweeksystemen te ontwerpen met een groot invangend lichtoppervlakte per grondoppervlak. En stammen die hoge zuurstofconcentraties kunnen tolereren vragen minder investering in zuurstofverwijdering.

De ideale productiestam zal er niet morgen of overmorgen al zijn. Er liggen nog veel uitdagingen en er zijn doorbraken nodig in verschillende onderdelen van de productieketen om biobrandstoffen en andere bulkproducten uit microalgen rendabel en duurzaam te maken. Het lijkt redelijk om te stellen dat het nog wel een jaar of tien zal duren voordat dit doel bereikt is. De volgende hoofdstukken geven een gedetailleerd inzicht in de vorderingen die op een aantal onderzoeksgebieden worden gemaakt.



Algen oogsten met klontjes

OOGSTEN VAN nuttige microalgen is een uitdaging. Ze zijn maar enkele micrometers klein: hooguit een tiende van de dikte van een menselijke haar. Bovendien hebben ze een dichtheid die nagenoeg gelijk is aan die van water, waardoor ze niet naar boven komen drijven en ook niet zinken. De cellen van microalgen zijn doorgaans ook nog eens negatief geladen, waardoor ze elkaar afstoten. Tot slot is de concentratie van algen in kweeksystemen laag: tussen 0,2 en 10 g microalgen per liter water. Dat betekent dat je meer dan 990 g water moet zien kwijt te raken om 10 g microalgen in handen te krijgen.

Het oogsten van microalgen gebeurt nu hoofdzakelijk via een centrifuge. Dit vergt ongeveer 50% van de totale energie die een microalg bevat. Door een benadering met verschillende stappen kan dat energiegebruik flink worden teruggebracht. Een eerste belangrijke stap is verdikking. Hoe hoger de concentratie van algen die je daarbij bereikt, des te minder energie heb je nodig om het laatste beetje water uit de suspensie te verwijderen. Tegelijk mogen er natuurlijk niet teveel algen verloren gaan in dat proces.

Vlokjes

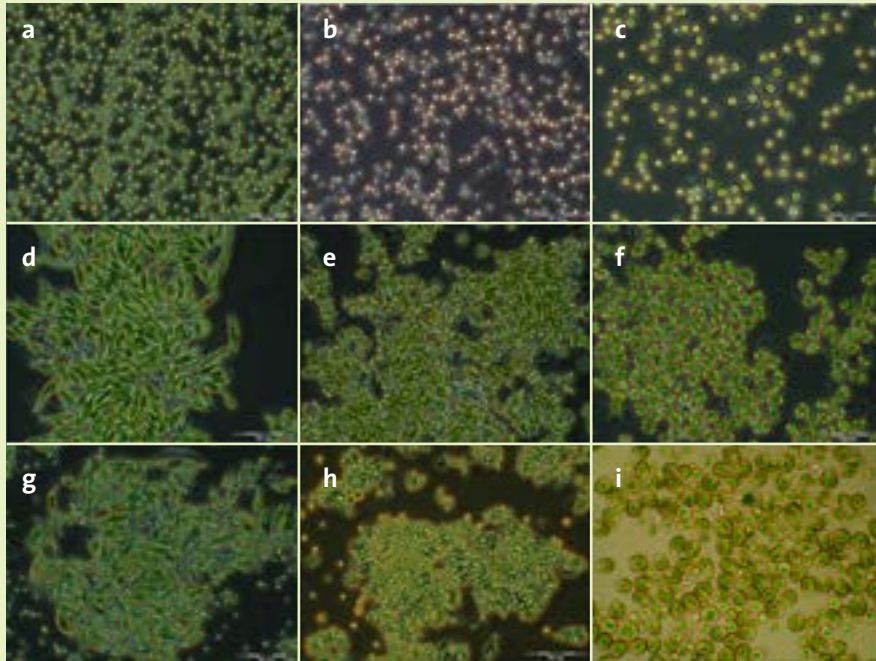
Meestal wordt verdikking bereikt door zogenoemde flocculatie. Algen klonteren daarbij samen in vlokjes die je vervolgens kunt laten bezinken. Die flocculatie kan op verschillende manieren worden bereikt. Veel methoden maken gebruik van het verminderen of afschermen van de negatieve lading van de cellen van microalgen. Ongeladen cellen stoten elkaar immers niet meer

af. Daarvoor kunnen verschillende ‘vlokmiddelen’ worden gebruikt. Chemische flocculatie wordt al uitgebreid toegepast in bijvoorbeeld waterzuiveringsinstallaties. Het is een eenvoudige en effectieve methode, maar toch niet erg geschikt voor het oogsten van algen. De chemische vlokmiddelen moeten meestal weer uit de algen worden verwijderd, of anders wel uit het water dat je graag wilt hergebruiken vanwege de voedingsstoffen die er nog in kunnen zitten.

Je kunt ook zogenoemde extracellulaire polymeren gebruiken die door andere micro-organismen worden uitscheiden. Deze ‘bioflocculatie’ van microalgen verloopt al succesvol met bacteriën en schimmels, maar je hebt wel extra voedingsstoffen en energie nodig om die andere micro-organismen, zoals bacteriën of schimmels in leven te houden. Dat kan in de vorm van suiker, maar dat heeft weer als nadeel dat dit ongewenste bacterie- of schimmelinfecties kan veroorzaken onder de algen.

Zelfvlokkers

In Wageningen is een nieuwe manier van bioflocculatie ontwikkeld: met behulp van microalgen die vanzelf samenklonteren en daarbij andere algen ‘invangen’. In de figuur is te zien hoe de te oogsten algen worden gevangen in de vlokken van deze ‘autoflocculerende’ microalgen. Die ‘zelfvlokkers’ hebben op hun oppervlak duidelijk zichtbare extracellulaire polymere structuren (EPS) die dienen als een soort ‘lijm’ tussen de cellen. De autoflocculerende microalgen groeien onder dezelfde omstandigheden als de te oogsten microalgen. Er



Niet-vlokvormende microalgen (a en b *Chlorella vulgaris* en c *Neochloris oleoabundans*), autoflocculerende microalgen (d *Ankistrodesmus falcatus*, e *Scenedesmus obliquus* en f *Tetraselmis suecica*) en de autoflocculerende microalgen die niet-vlokkende microalgen vangen in de gevormde vlokken (g *C. vulgaris* met *A. falcatus*, h *C. vulgaris* met *S. obliquus* en i *N. oleoabundans* met *T. suecica*).

hoeft dus geen extra kweekmedium, chemicaliën of andere voedingsstoffen te worden toegevoegd om de vlokken op gang te brengen.

Toevoeging van de autovlokkende microalgen verbetert de bezinkingssnelheid van de niet-vlokvormende microalgen. De opbrengst van niet-vlokkende microalgen is ook aanzienlijk hoger. Door het toepassen van deze bioflocculatie in een sedimentatietank als eerste verdikkingsstap, gevolgd door centrifuge als laatste verdikkingsstap, vermindert de energie die je nodig hebt voor het oogsten van de microalgen van ongeveer 14 MJ per kg microalgen wanneer alleen centrifuge wordt gebruikt naar 0,14 MJ per kg microalgen. De energiebehoefte voor de oogst neemt dus met een factor honderd af! Dit maakt het oogsten van microalgen met behulp van autoflocculerende microalgen een bijzonder geschikte en energetisch gunstige manier om microalgen te winnen.

De algenraffinaderij

DE TECHNOLOGIE voor de algenproductie staat nog in de kinderschoenen. Bij verdere ontwikkeling is de verwachting dat algen op commerciële basis kunnen worden geproduceerd voor een kostprijs van € 0,68 of minder per kilo droge biomassa. Als de verschillende componenten kunnen worden gescheiden kan de totale waarde van de grondstoffen in de algenbiomassa hoger zijn dan € 1,65 per kilo. Raffinage is dus een voorwaarde voor rendabele productie van algen.

Bioraffinage is in principe hetzelfde als olieraffinage, waar meerdere typen brandstoffen en chemicaliën worden geproduceerd uit ruwe olie, via onderling gekoppelde scheidingen en conversieprocessen.

Voorzichtig

Voor de ontwikkeling van een economisch aantrekkelijke algenraffinaderij moet de biomassa van de

microalgen worden gescheiden in de verschillende hoofdcomponenten: oliën, eiwitten en suikers. Het is dan wel belangrijk dat de verschillende componenten hun eigenschappen en dus hun waarde behouden. Daarom moet het scheiden voorzichtig gebeuren, maar wel met een hoog rendement.

De scheiding van de verschillende componenten moet niet alleen in een onderzoekslaboratorium kunnen gebeuren, maar moet ook op te schalen zijn naar een grotere raffinaderij. Uiteindelijk moet het zelfs in een continue proces worden geïntegreerd om een grote stroom biomassa te kunnen verwerken. De belangrijke stappen in deze 'milde' vorm van bioraffinage zijn: het concentreren van de biomassa vanuit het kweekstelsel, het gecontroleerd openbreken van de algencellen, extractie en fractioneringen van de waardevolle componenten uit de celinhoud. Door gebruik te maken van de natuurlijke structuur van de algencellen kun je een eerste concentratie van de gewenste producten

Bij een scheiding in het laboratorium is te zien hoe de inhoud van een alg in verschillende fracties uiteen valt.



bereiken omdat deze sterk verrijkt aanwezig kunnen zijn in bepaalde cel onderdelen die mogelijk specifiek zijn af te scheiden. Hiermee kun je een duurzame productiestrategie ontwikkelen waarin fototrofe microalgen worden gebruikt voor de conversie van licht energie naar functionele producten zonder verarming van natuurlijke hulpbronnen.

Wanneer je verschillende producten uit de microalgen wilt halen is een viertal belangrijke stappen nodig:

Disruptie

De cellen moeten zó worden geopend dat de structuur en functie van de verschillende waardevolle onderdelen behouden blijft. In het algenonderzoek wordt nu gewerkt met elektrische pulsen, stoompulsen of ultrasone pulsen voor het perforeren van de celwanden. Voor dit onderzoek is het nodig dat je meer weet over de samenstelling en de structuur van de celwand van de algen. Die kan per soort sterk verschillen.

Extractie

In de cel zitten hydrofobe producten, die door water worden afgestoten, zoals oliën, en hydrofiele producten die in water oplossen, zoals eiwitten en suikers. Die kunnen worden gescheiden met behulp van polymeren als polyethyleenglycol. Er bestaan ook nieuwe chemische zoutverbindingen, de zogenoemde *ionic liquids*. Die kunnen heel effectief hydrofiele verbindingen scheiden van de hydrofobe, terwijl de functie van de stoffen behouden blijft.


Fractioneren

Fractioneren is het scheiden van bijvoorbeeld verschillende eiwitten. Zo wil je graag hoogwaardige eiwitten als ribulose-1,5-biphosphatase carboxylase, wat gebruikt kan worden voor de voeding, scheiden van de andere bulkeiwitten. Op die manier kun je extra waarde uit de algen halen voor toepassing in voedsel en farmaceutische producten. Daarnaast kunnen de suikers apart worden gefractioneerd voor gebruik in de markt voor voedingsproducten. Fractioneren kan bijvoorbeeld worden bereikt met korrels of membranen die in staat zijn om op basis van elektrische lading of de mate van aantrekking of afstoting door water de verschillende componenten te scheiden.

Continu proces

Tot slot moeten de verschillende technieken worden samengevoegd in één, continu en vooral economisch rendabel raffinageproces. In zo'n continue bioraffinage zijn niet alleen de hierboven beschreven stappen, maar ook de benodigde energie- en waterstromen op een duurzame manier geïntegreerd.

De ontwikkelingen rond bioraffinage staan nog in de kinderschoenen, maar over een jaar of tien moeten de specifieke proces- en zuiveringsstappen zó ver zijn ontwikkeld dat de eerste complete, geïntegreerde systemen beschikbaar zullen zijn.



De algen zoals die nu in de vrije natuur voorkomen zijn mogelijk niet de beste kandidaten om heel efficiënt voedsel, diervoeding of biobrandstoffen te produceren. Is genetische modificatie wellicht een oplossing?

ALS HET gaat om de winning van bijvoorbeeld olie voor biobrandstoffen of bestanddelen voor voedsel, diervoeding, of andere grondstoffen zijn algen niet per se de meest efficiënte bron. (zie ook het voorgaande hoofdstuk) Dat wil zeggen: voor het voortbestaan van het organisme zelf doen ze wat ze doen op een biologisch geweldige manier. Economisch is dat nog een ander verhaal. Op verschillende manieren proberen onderzoekers de productie van bruikbare stoffen door algen in kunstmatige systemen op te voeren tot economisch rendabele niveaus. Veel onderzoek is gericht op het vinden van optimale kweekomstandigheden en van efficiënte oogst- en extractietechnieken.

Een andere mogelijkheid om algen efficiënter in te zetten in productiesystemen is genetische modificatie om betere 'productiestammen' te maken. Bij genetische modificatie worden nieuwe genen ingebracht of bestaande genen verwijderd. Het totale genenpakket bepaalt uiteindelijk wat voor chemische omzettingen er in de alg plaats kunnen vinden. Door de samenstelling van dat genenpakket aan te passen kunnen dus betere productiestammen ontwikkeld worden.

De eerste ervaring met genetische modificatie van algen stamt uit 1970. Toen werd de cyanobac-

terie *Synechocystis* op een stabiele manier voorzien van genetisch materiaal van een andere bacterie. (De genetische modificatie van cyanobacteriën wordt verder besproken vanaf p. 47) De eerste modificatie van een 'echte', eukaryote alg stamt uit 1989. Toen werd *Chlamydomonas reinhardtii* voor het eerst op een stabiele manier voorzien van een vreemd gen. Sindsdien is deze *C. reinhardtii* uitgegroeid tot een waar proefkonijn onder de algen wat betreft genetische modificatie. Ruim twintig jaar na de eerste geslaagde genetische experimenten kunnen in laboratoria diverse stoffen geproduceerd worden door deze alg: van olie voor biobrandstof, tot menselijke afweereiwitten en zelfs tot een potentieel malariavaccin aan toe.

Genetische modificatie technieken

De genetische modificatie van eukaryote algen is wat ingewikkelder dan die van blauwalgen. De laatste zijn feitelijk bacteriën en voor deze relatief eenvoudige micro-organismen bestaan al veel langer technieken voor genetische aanpassingen. Een van de methodes om eukaryote algen te voorzien van een vreemd gen is de kern of de chloroplast (het celonderdeel waar de fotosynthese in plaatsvindt) te bombarderen met kleine deeltjes waar het vreemde DNA opgeplakt zit. Dit wordt biolistiek

genoemd. Met behulp van een 'genpistool' worden minuscule deeltjes van wolfram of goud dwars door een te modificeren cel geschoten. Aan de buitenkant van die deeltjes zit een laagje met het te transplanteren genetisch materiaal. Bij de tocht van de 'genetische kogels' door de cel blijft het DNA in bepaalde gevallen op cruciale plekken in de cel achter. Naast deze genetische beschietingen zijn er ook manieren om met behulp van minuscule glasbolletjes of met chemicaliën de cel zó te prikkelen dat vreemd DNA wordt opgenomen.

Behalve het toevoegen van vreemd DNA is het ook mogelijk gebleken om bestaande genen uit te schakelen. Wanneer in een cel DNA-informatie wordt omgezet in een concreet eiwit, gebeurt dit via een tussenstap: via RNA. Het blijkt mogelijk om die tussenstap te blokkeren met een 'spiegelbeeldige', of 'tegengestelde' RNA-code. Dat spiegelbeeldig RNA past precies op het (functionele) enkeldradig RNA, waardoor (niet functioneel) dubbeldradig RNA ontstaat. Zo'n tegengestelde, blokkerende code wordt antisense genoemd.

Doelen van genetische modificatie

Blauwalgen zijn veelbelovende productieorganismen voor kleine moleculen die uitgescheiden kunnen worden, zoals ethanol, butanol, vrije vetzuren en andere organische zuren. Eukaryote algen hebben de voorkeur wanneer het belangrijk is dat de producten binnen de cel worden opgeslagen, zoals in geval van bijvoorbeeld olie. Cyanobacteriën zijn niet goed uitgerust om olie in grote hoeveelheden op te slaan. Bij die opslag zijn veel verschillende moleculen betrokken. Het identificeren en inbrengen van alle genen die hiervoor nodig zijn is voorlopig nog teveel gevraagd.

De genetische verandering van eukaryote algen heeft verschillende doelen. De eerste is het verbeteren van de omzetting van zonlicht in bruikbare energie voor de cel: de fotosynthese. De productie van algen is afhankelijk van zonlicht en CO₂. Onder normale omstandigheden is licht niet de limiterende factor. Sterker nog: een alg wordt onder normaal daglicht met zoveel fotonen bestookt dat die de productie juist remmen. Dat fenomeen wordt lichtinhibitie genoemd. Een van de strategieën van genetische modificatie is erop gericht om de 'antennes' van de alg voor het opvangen van fotonen zó aan te passen dat de productie niet meer wordt geremd bij een overmaat aan fotonen.

Een tweede doel van genetische modificatie is om algen extra stoffen te laten produceren die ze van nature op zijn best in kleine hoeveelheden produceren. Een voorbeeld daarvan zijn toxines die een antibacteriële werking kunnen hebben. Ook het extra laten produceren van olie of onderdelen daarvan hoort tot de mogelijkheden. Daarvoor kunnen genen worden geïntroduceerd die lipiden produceren of opslaan. Andere genen, die de afbraak van lipiden stimuleren, kunnen juist worden geremd. Daarnaast worden ook genen in de algen gebracht die coderen voor enzymen die de kwaliteit van de geproduceerde oliën en vetten verbeteren. Een olie of vet dat goed genoeg is voor een alg is dat immers niet per se voor industriële toepassingen.

Een derde lijn van onderzoek richt zich op het introduceren van compleet nieuwe stoffen in de alg. Van nature maken algen bijvoorbeeld geen waterstof, alcohol of bepaalde vetzuren. Door introductie van nieuwe genen kunnen algen deze energiedragers mogelijk wél produceren. Naast die energiedragers is er ook een groeiende lijst eiwitten, tot medicijnen aan toe, die via genetische modificatie door algen worden geproduceerd, zij het alleen nog op experimentele schaal.



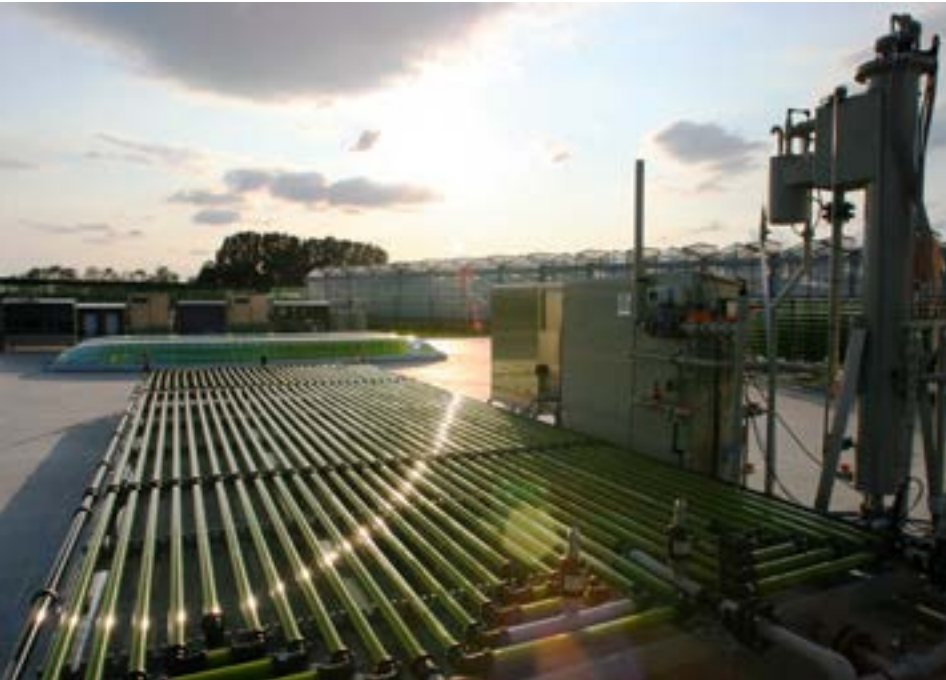
Genpistool voor biolistiek.

Genetische modificatie van blauwalgen

Net zo min als algen, zijn cyanobacteriën geëvolueerd om aan onze behoefte aan biobrandstoffen of andere nuttige producten tegemoet te komen. Hun 'evolutionaire streven' is zuiver gericht op zo goed mogelijk overleven en vermeerderen onder allerlei verschillende natuurlijke omstandigheden. Toch zorgen de natuurlijke biochemische processen van deze micro-organismen vaak voor verbindingen die ook interessant zijn voor de mens. Zelfs de celonderdelen die voor die productie zorgen zijn vaak bruikbaar voor dat doel. Dat is geen toeval. Zo zijn de fossiele brandstoffen die wij grootschalig gebruiken en die wij mogelijk willen vervangen door biobrandstoffen uit algen ooit ook door levende organismen gemaakt.

Hieruit kun je opmaken dat wat zich chemisch afspeelt in de cel erg dicht in de buurt ligt van wat

In de volle zon ontvangen algen gauw teveel licht.



wij willen dat de cel voor ons doet. Aangezien alle processen gestuurd worden door de activiteit van enzymen, en het voorkomen van enzymen genetisch is vastgelegd, is het goed denkbaar dat wij met goed geplande genetische ingrepen die processen naar onze hand kunnen zetten.

Net zoals algen voeren cyanobacteriën fotosynthese uit. Daarbij wordt zonne-energie gebruikt om CO_2 te reduceren tot organische verbindingen. De biochemische route (de zogenaemde Calvin-cyclus) leidt onder andere tot de intracellulaire vorming van glyceraldehyde 3-fosfaat. Vanuit deze verbinding kan de cel vervolgens nieuw celmateriaal maken, zoals suikers, celwanden, eiwitten of DNA. Het glyceraldehyde 3-fosfaat kan door de cyanobacterie ook worden omgezet in pyruvaat (pyrodruivenzuur). Dus: $\text{CO}_2 + \text{zonlicht} \rightarrow \text{pyruvaat}$.

Er zijn veel zogenaemde chemotrofe organismen die hun energie halen uit de verbranding van chemische stoffen in hun omgeving. Een voorbeeld is bakkersgist, dat pyruvaat omzet in ethanol. Daarvoor zijn slechts twee enzymen nodig. Bakkersgist heeft dus ook twee genen in het DNA die voor deze enzymen coderen: het gen *pdh* codeert voor pyruvaat-decarboxylase en *adh* codeert alcoholdehydrogenase. Een nog eenvoudiger voorbeeld is de biochemische productie van melkzuur uit pyruvaat door verschillende bacteriën. Daarvoor hebben ze maar één gen en één enzym nodig: *ldh* voor de productie van lactaat-dehydrogenase.

De strategie om een 'nieuwe blauwalg te maken' die uit pyruvaat ethanol of melkzuur produceert laat zich aan de hand van die voorbeelden raden: voorzie het organisme van de juiste genen, zorg dat deze genen tot expressie komen (dat wil zeggen: de enzymen daadwerkelijk maken), voorzie de cellen van licht en CO_2 , en het pyruvaat dat ze gaan produceren wordt door de aangebrachte enzymen omgezet in het gewenste product. Zo kan CO_2 plus zonlicht wellicht worden omgezet in melkzuur. Melkzuur kan een grondstof zijn voor bioplastics.



Cyanobacteriën in kweek.

Knippen en plakken ...

In principe is het overbrengen van bijvoorbeeld het *ldh*-gen uit een zuivelbacterie naar een blauwalg een goed beschreven genetische techniek. Een veelgebruikte methode is de zogenoemde homologe recombinatie. Het *ldh*-gen bijvoorbeeld wordt eerst uit het DNA van de zuivelbacterie ‘geknipt’.

De natuur heeft moleculair biologen daarvoor een hele serie enzymatische scharen, ofwel specifieke enzymen geleverd. Vervolgens plak je aan het begin en het eind van dat stukje DNA stukjes genetisch materiaal die identiek, ofwel homolog zijn aan natuurlijke stukjes DNA van de blauwalg. Ook dat gebeurt met specifieke enzymen uit de gereedschapskist van de moleculair biolog.

Je hebt dan een stuk DNA, *xx-ldh-yy* dat je kunt vermeerderen via een tussenstap en vervolgens kunt aanbieden aan de blauwalg.

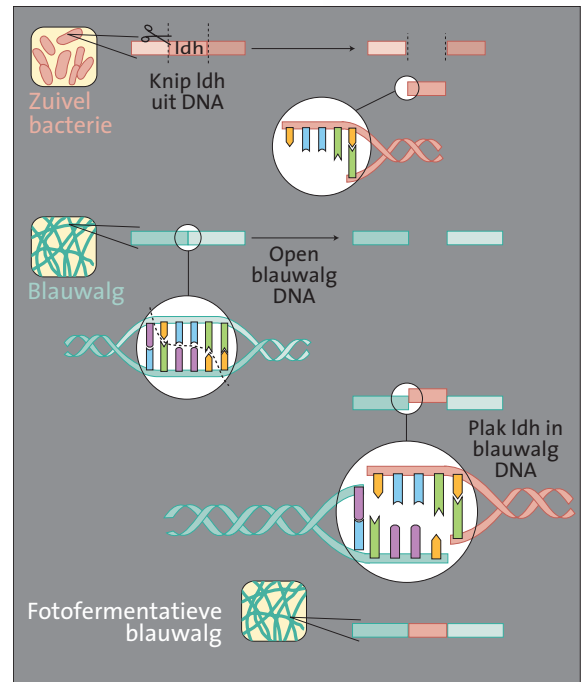
Soms zal het stuk DNA de cel binnenkomen en dat kan dan tot ‘recombinatie’ van de homologe *xx* en *yy* stukken van het blauwalg-DNA leiden, inclusief het tussengeplakte stukje *ldh*. Daarmee is het gen ingebouwd in een blauwalgcel (zie onderstaande figuur). Je hebt dan een zogenoemde trans-

formant die je via selectietechnieken kunt isoleren en verder opkweken.

... en dan écht produceren

Daarmee heb je nog niet per se een blauwalg die melkzuur produceert, laat staan in interessante hoeveelheden. Hier ligt de echte uitdaging voor het team van moleculair biologen, biochemici, microbiel fysiologen en procestechnologen. Allereerst moet het gen op het gewenste niveau tot expressie komen. Er moet voldoende enzym worden gemaakt door de cel om de biochemische omzetting goed te laten verlopen. Er zijn verschillende moleculaire strategieën die zich hierop richten. Het kiezen van de beste locatie van het gen binnen het DNA van de blauwalg is belangrijk, net als het kiezen van een goede ‘promotor’. Dat is een DNA-sequentie voorafgaand aan het gen dat geactiveerd

De belangstelling van biotechnologen voor cyanobacteriën neemt toe



Het inbrengen van een vreemd gen in een alg met behulp van enzymen.

moet worden. Verder is het aantal kopieën van het vreemde gen dat in één blauwalgchromosoom wordt ingebouwd van belang.

De cyanobacterie zelf is niet gebaat bij de door ons gewenste hoge productie van, in dit geval, melkzuur. Ingrijpen in de biochemie van de cel kan ook allerlei nadelige effecten hebben op de natuurlijke overleving, groeisnelheid, gevoeligheid en stabiliteit van de bacterie. Synthetische biologie, ondersteund door bio-informatica en wiskundige modellen, helpt om op basis van kennis over genetica, enzymen, biochemie en fysiologie te voorspellen hoe je het gedrag van de cel kunt sturen, waar de *bottlenecks* in de stofwisseling liggen, waar de grenzen liggen en hoe je optimale productie kunt bereiken. Vanuit de fysiologie bedenk je de beste condities om de blauwalg zijn werk te laten doen, de procestechnologie ontwerpt de reactor met het juiste lichtregime, de beste menging en de gunstigste geometrie.

Beter met blauwalg

In veel opzichten zijn cyanobacteriën eenvoudiger en gemakkelijker genetisch te modificeren dan de eukaryote algen. Het zijn prokaryote organismen met een relatief eenvoudige genetisch structuur. Bovendien groeien zij in het algemeen sneller en gaan ze efficiënter om met licht. Het is dan ook niet verwonderlijk dat de belangstelling voor deze groep organismen in de biotechnologie toeneemt. Het zal ook duidelijk zijn dat zij zeer breed inzetbaar zijn. Door de juiste genetische 'cassette' in te brengen komt een groot scala aan producten binnen bereik. Wanneer die cassette naar behoren functioneert hebben we een systeem tot onze beschikking dat gezien kan worden als een katalysator die zonder bijproducten een stof produceert uit CO₂ en zonlicht en verder niets nodig heeft.

Vanuit pyruvaat kunnen heel veel stoffen worden gemaakt. Behalve het al genoemde melkzuur en etanol kun je ook butanol, butaandiol en verge-

lijkbare energiedragers uit deze stof maken. Maar niet alleen producten op basis van pyruvaat komen in aanmerking voor 'cyanofabricage'. Je kunt ook denken aan de productie van kleurstoffen en voedingscomponenten. In feite leert de systeembiologie dat alle stoffen waarvan de structuur niet al te veel afwijkt van de structuur van de verbindingen die de cel al van nature maakt, kandidaten zijn. Gezien de enorme variatie in biochemische omzettingen in de natuur heeft de zoektocht naar de juiste (combinatie van) genen die het celegeen product omzetten naar de gewenste verbinding al snel kans van slagen. Het is lastiger om de stap naar een economisch rendabel proces te zetten. Lastiger, maar met voortschrijdend inzicht in de microbiologie steeds vaker wél binnen bereik.

Het inzetten van genetisch gemodificeerde 'fotosynthetiseerders' als alternatieve producenten van nuttige chemicaliën en brandstoffen is in principe altijd duurzaam en daarom de moeite van het onderzoeken waard. De risico's zijn beperkt. Enerzijds maak je gebruik van het enorme biochemische potentieel van voor mens en dier ongevaarlijke blauwalgen, maar je minimaliseert hun overlevingskansen 'in het wild'. Door hun enorme flexibiliteit, bedoeld om te overleven, te exploiteren voor onze eigen doelen, ontnemen we de blauwalgen de mogelijkheid om adequaat te reageren op de wisselende condities in de natuurlijke omgeving. De enige plaats waar ze zich optimaal kunnen profileren is de fotobioreactor waarvoor ze zijn ontworpen door de moleculair biologen. Hoe dan ook zul je verspreiding van genetisch gemodificeerde algen willen voorkomen. Er zal dan ook altijd onder strikte, wettelijk voorgeschreven condities gewerkt worden.

Kunstmatige selectie

Behalve via het inbouwen van een nieuwe eigenschap door genetische modificatie, kun je ook op zoek gaan naar die eigenschap die misschien al in een heel klein deel van een populatie algen aanwezig is. Maar hoe vind je die paar exemplaren die die gewenste eigenschap hebben? Op deze vraag geeft het boek *Geobiologie of inleiding tot de milieukunde* van Baas Becking uit 1934 het antwoord: alles is overal, maar het milieu selecteert. Becking zegt hier feitelijk dat alle eigenschappen overal vertegenwoordigd zijn en dat je door aanpassing van het milieu één van die eigenschappen het voordeel kunt geven. Dit principe is op allerlei schalen en manieren toepasbaar.

Stel dat alle dieren in Artis ontsnapt zijn en door elkaar heen lopen. De verzorgers willen graag de boel weer op orde hebben en besluiten het vangen van de dieren alfabetisch aan te pakken: eerst moeten de apen gevangen worden. In eerste instantie rennen de verzorgers met schepnetten achter de apen aan, maar die zijn natuurlijk niet voor één gat te vangen. Daarom slaat een verzorger het boek van Baas Becking open en besluit om de apen met een selectief milieu te gaan selecteren uit de grote groep dieren. De verzorgers verstoppen een tros bananen in een hoge boom. Zo selecteren de verzorgers voor twee eigenschappen: goed kunnen klimmen en van bananen houden. De kans dat de verzorgers olifanten (houden wel van bananen, maar klimmen moeizaam in bomen) of leeuwen (kunnen wel klimmen, maar houden niet van bananen) in de bomen aantreffen is erg klein. Het gecreëerde milieu selecteert voor alle twee de eigenschappen tegelijkertijd.

In de microbiële dierentuin werkt het principe van Baas Becking nog beter. Omdat algen zich sneller vermenigvuldigen dan apen, verspreiden de eigenschappen waarop geselecteerd wordt zich vlot in een populatie. Op die manier kan een eigen-

schap die eerst amper zichtbaar was, snel overheersend worden in een groep.

Survival of the fittest

Stel nu dat we graag een alg tjokvol met olie willen vinden. Die eigenschap is al ergens aanwezig; alles is immers overal. Het gaat er dan ook om een milieu te creëren waar zo'n alg er profijt van heeft om vol olie te zitten. Olie is voor algen een koolstof- en energieopslag, zoals vet dat voor mensen is. Er zijn allerlei milieus te bedenken waarin opslag van olie een voordeel is. Energie en koolstof komen bijvoorbeeld goed van pas in lange donkerperiodes of als het koud is. Algen hebben echter ook energie en koolstof nodig voor celdeling en om voedingsstoffen zoals fosfaat en stikstof uit het water op te nemen. Stel dat je de algen alleen in het donker voedingsstoffen geeft, dan is de algensoort met veel olie spekkoper. Hij (of zij) heeft namelijk energie en koolstof tot zijn beschikking en kan in het donker toch nog nutriënten opnemen die worden gebruikt om nieuwe fotomachinerie aan te maken en om 's nachts te delen. De extra fotomachinerie zorgt ervoor dat er de volgende dag met hogere efficiëntie nieuwe olie gemaakt kan worden, wat de volgende nacht weer gebruikt wordt om de voorsprong nog verder uit te bouwen. Zijn buurman zonder olie kan slechts lijdzaam toekijken hoe de olie-alg zich vermenigvuldigt. Met deze kennis kun je dus voor de eigenschap 'olieproductie' gaan selecteren.

Hoe werkt dit in de praktijk? Je gaat naar de dichtstbijzijnde vijver en vult een buisje met algen. Terug in het lab gooi je die in een reactor. Vervolgens geef je de algen overdag genoeg licht en CO₂ om olie te maken, maar geen nutriënten om te delen. Die geef je ze pas 's avonds. Het gevolg zal zijn dat alleen de dikke 'olie-algen' nutriënten kunnen opnemen en kunnen delen omdat ze overdag energie en koolstof, in de vorm van olie hebben opgeslagen. Als je elke dag een deel van de algen



Ruim 100 jaar oude tekening van verschillende algen gemaakt door Beijerinck (1851-1931), de eerste microbiologieprofessor in Delft.

verwijderd, wordt de cultuur na een tijdje volledig overgenomen door olie-algen. Op die manier creëer je een kunstmatig milieu waarin alleen de algen overleven die olie ophopen.

Kunstmatige selectie in de praktijk

Dit principe klinkt leuk, maar werkt het ook? Ja en nee. Aan het begin van de rit is er een hele diertuin van algensoorten aanwezig en na verloop van tijd wordt het systeem inderdaad een monocultuur. Maar helaas maakt die alg vervolgens geen olie. De alg wordt wel dik, dat dan weer wel. Algen maken niet alleen olie of vet als energie- en

koolstofopslag, maar ook zetmeel. Het beschreven kunstmatige milieu selecteert op de *survival of the fittest*, maar dat kan blijkbaar net zo goed of zelfs beter op basis van zetmeel zijn. Het milieu moet blijkbaar nog specifiekere worden gemaakt.

Op dit moment vindt het merendeel van het onderzoek naar algen plaats op laboratoriumschaal. Het uiteindelijke doel is echter dat algen op grote schaal geteeld gaan worden. De aanpak via kunstmatige selectie zoals hier is beschreven kan dan grote voordelen bieden. Een grote bedreiging voor een stabiele productie is namelijk vervuiling door andere algen. In de vrije natuur van een algenkweekvijver staan 'wilde algen' te dringen om de concurrentie aan te gaan met de alg die het in het laboratorium zo goed deed, of die je zorgvuldig genetisch in elkaar hebt geknutseld. Het is goed mogelijk dat de wilde, ongewenste algen deze concurrentieslag winnen omdat ze bijvoorbeeld sneller groeien dan de gewenste olieproducerende algen.

Een mogelijke oplossing is om met gesloten kweeksystemen te werken en door sterilisatie ervoor te zorgen dat buitenstaanders het systeem niet binnen kunnen dringen. Theoretisch gezien is dit mogelijk, maar op grote schaal is het praktisch onhaalbaar en vooral erg kostbaar. Door kunstmatige selectie is het niet erg als er andere algen in de kweek komen. Je selecteert immers niet op die ene soort alg, maar op die ene eigenschap. Alle algen met die eigenschap zijn welkom in het systeem. Met een alg van buiten kunnen twee dingen aan de hand zijn. Als de alg minder olie maakt dan de algen die al in het systeem zitten, heeft hij 's avonds amper energie en koolstof om te delen. Hij verdwijnt dan vanzelf weer uit het systeem omdat hij de concurrentieslag met de andere algen verliest. Als de alg meer olie kan produceren, neemt hij langzaam het systeem over. Daardoor verandert wel het type alg in het systeem, maar de eigenschap van olie maken verandert niet. Sterker nog: die is zelfs verbeterd.

Algenethiek

ANDERS DAN proefdieren, de bio-industrie, of akkers met genetisch gemodificeerde gewassen, zal industrieel gebruik van algen niet meteen tot veel maatschappelijke weerstand leiden. Toch vraagt ook het werken met algen om voorzorg.

Algen als invasieve exoten

Een potentieel gevaar van het werken met algen schuilt in het introduceren van soorten die van nature niet in een bepaald gebied voorkomen. Vaak zijn niet onze inheemse algensoorten de beste producenten van biobrandstof of andere stoffen, maar doen exotische algen het veel beter.

In het huidige stadium van experimenteren op een relatief kleine schaal in Nederland zijn nog geen voorbeelden bekend waarbij algen uit productiesystemen tot problemen 'in het wild' hebben geleid. Ook in andere landen, waar algen al wel op grote schaal worden gekweekt zijn nog geen problemen bekend. Toch noemt het rapport 'Biologische globalisering' (een achtergronddocument voor het beleid rond invasieve soorten van het ministerie van Economische Zaken) de introductie van giftige algen als één van de grote potentiële gevaren van het gewild of ongewild transporteren van soorten voor het aquatisch milieu.

Genetisch gemodificeerde algen?

Een tweede reden voor voorzichtigheid is het gebruik van genetisch gemodificeerde organismen; door tegenstanders steevast genetisch *gemanipuleerde* organismen genoemd.

In Nederland worden experimenten met gene-

tische gemodificeerde planten of dieren gecontroleerd door de COGEM (Commissie Genetische Modificatie). De COGEM onderscheidt 2 situaties: ingeperkt gebruik in bijvoorbeeld kweekfaciliteiten. Daarbij zitten de algen in dichte buizen of doorzichtige containers. Een tweede situatie betreft introductie in het milieu, bijvoorbeeld via open productiesystemen, waarbij de algen dus in de natuur terecht kunnen komen.

De wetgeving rond genetische modificatie stelt voor elk experiment of elke productie met genetisch gemodificeerde algen een risicoanalyse verplicht. Er is echter nog niet veel ervaring opgedaan met de risicobeoordeling van algenkweeksystemen. Gemeenten reageren bijvoorbeeld heel verschillend op vergunningaanvragen voor algenfaciliteiten. De onderzoeksfaciliteit AlgaePARC in Wageningen is bijvoorbeeld voorzien van uitgebreide voorzorgsmaatregelen om verspreiding van algen te voorkomen, ook al wordt daar geen gebruik gemaakt van genetisch gemodificeerde algen. Tegelijk mogen open kweeksystemen voor natuurlijke algen zonder dit soort voorzieningen werken. Zo kreeg een commerciële productiefaciliteit in het Gelderse Borculo van de lokale autoriteiten toestemming om open kweekvijvers te bouwen zonder dat daarvoor een verdere risicobeoordeling nodig was.

Risico's van genetisch gemodificeerde algen

Naast het risico van verspreiding van exotische algen zijn er specifieke risico's voor genetisch gemodificeerde algen. De meeste genen die nu in onderzoek worden gebruikt om algen te modificeren hebben een functie in de productie van 'energiedragers'.



Open algenkwekerij in het vrije Gelderse veld.

Onderzoekers schatten het risico van dergelijke modificaties laag in omdat deze algen waarschijnlijk geen groeivoordeel hebben ten opzichte van wilde algen en energiedragers ook niet betrokken zijn bij giftigheid van algen. Toch is het denkbaar dat algen zich ‘anders gaan gedragen’ wanneer er een vreemd gen in hun cellen is geïntroduceerd. De COGEM adviseert dan ook om dergelijke ‘fenotypische aanpassingen’ te onderzoeken voordat een gemodificeerde alg buiten het lab mag worden gebruikt.

Behalve geplande veranderingen aan de alg zelf, is de stabiliteit van genetische veranderingen van belang voor een risicobeoordeling. Overdracht van genen van de gemodificeerde alg naar vergelijkbare algen of andere organismen is mogelijk. In het geval van blauwalgen of cyanobacteriën is dergelijke ‘horizontale transmissie van genen’ zelfs een heel gebruikelijke manier van aanpassing van de bacterie aan veranderende omstandigheden. Bij het introduceren van een vreemd gen in een cyanobacterie moet dan ook goed worden onderzocht wat de kans en de potentiële gevolgen zijn van het overspringen van een vreemd gen naar een andere cyanobacterie, naar een andere bacterie of naar een heel ander

organisme. In eukaryote algen is de ‘horizontale transmissie van genen’, van de ene soort naar de andere veel minder voor de hand liggend dan in cyanobacteriën.

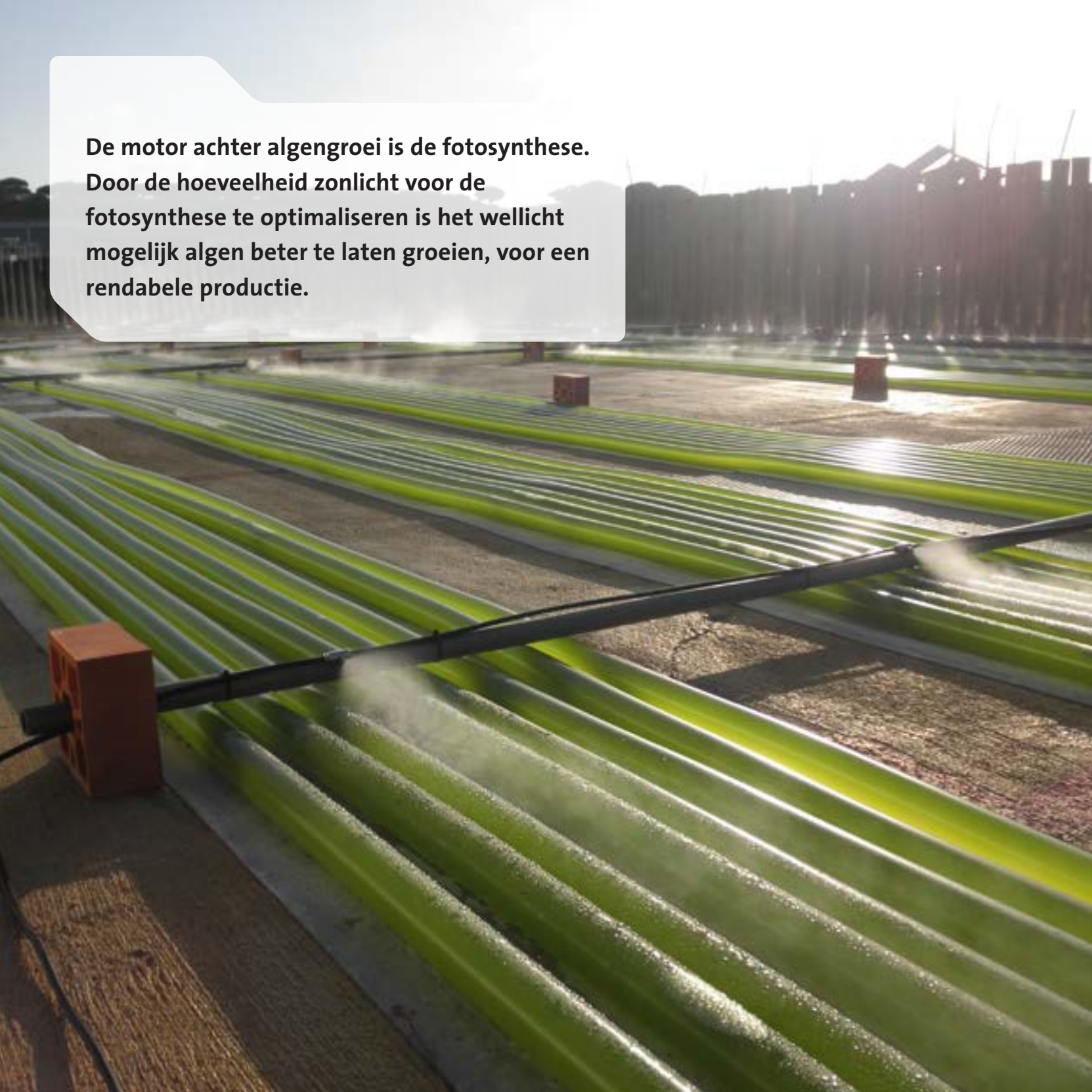
Genen die als risicofactor worden beschouwd zijn genen die resistentie opleveren tegen antibiotica of herbiciden. Die resistentie tegen antibiotica of herbiciden wordt in de onderzoekspraktijk vaak gebruikt als een methode om genetisch gemodificeerde organismen te herkennen en te filteren uit niet-gemodificeerde algen. Het is dan ook zaak om deze resistenties uit de gemodificeerde algen te verwijderen voordat ze op grote schaal worden gebruikt.

Niet buiten de fabriek

Een mogelijkheid om potentiële risico’s van genetisch gemodificeerde algen te minimaliseren is door ze ‘afhankelijk’ te maken van de productiefaciliteit. Zo zou een productiefaciliteit op basis van zoutwateralgen diep in het binnenland gesitueerd kunnen worden. Zouden pompen of filters eens haperen, en algen uit de fabriek ontsnappen naar buiten, dan hebben zoutwaterorganismen geen kans om te overleven in het zoete water in het binnenland.

Het is ook mogelijk om genetisch gemodificeerde algen afhankelijk te maken van een specifieke voedingsstof, zoals vitamine B12. Zo’n alg kan alleen overleven in de aanwezigheid van voldoende van het vitamine of in de aanwezigheid van specifieke bacteriën die het vitamine produceren. Mocht de alg ‘ontsnappen’, dan zou die in het wild niet kunnen overleven zonder de aanvullende, kunstmatige maatregelen van de productiefaciliteit.

De motor achter algengroei is de fotosynthese. Door de hoeveelheid zonlicht voor de fotosynthese te optimaliseren is het wellicht mogelijk algen beter te laten groeien, voor een rendabele productie.



5 Beter licht op algen

OM TE begrijpen of, en zo ja hoe, de groei-omstandigheden van algen kunnen bijdragen aan het rendabel maken van algenproductie voor bijvoorbeeld biodiesel, moet je even helemaal terug naar de basis: de fotosynthese.

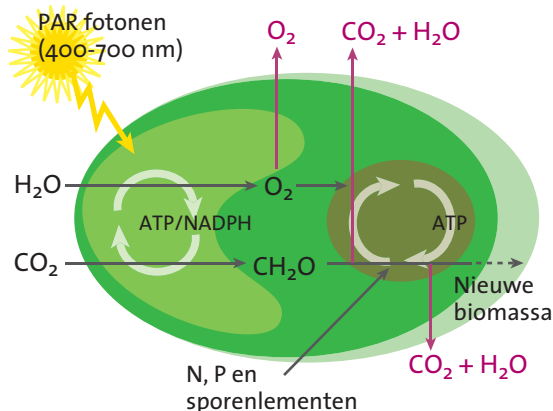
Algen (zowel de ééncellige microalgen als de meercellige macroalgen of wieren) zijn fotosynthetische organismen die in water groeien. Zonlicht is dus de energiebron voor hun groei. Ze zijn autotroof, wat wil zeggen dat ze hun biomassa opbouwen uit anorganische componenten: water (H_2O), koolstofdioxide (CO_2), stikstof (N), fosfor (P) en nog een aantal sporenelementen. De toevoer van

voldoende zonlicht en koolstofdioxide is daarom van het aller grootste belang voor een snelle groei van de algen.

In figuur 1 is de groei van algen in iets meer detail uitgelegd. In deze algencel zit een groot compartiment (organel): de chloroplast. Die chloroplast zit vol met pigmenten als chlorofyl en carotenoïden die de zogenoemde fotosystemen vormen. Met behulp van de energie van lichtdeeltjes (fotonen) wordt in deze fotosystemen water gesplitst in zuurstof (O_2), protonen (H^+) en elektronen (e^-). Zuurstof is dus eigenlijk een afvalproduct van de fotosynthese. De elektronen worden geparkeerd op de verbinding NADPH. De protonen worden gebruikt om ATP te maken. Dit ATP is de feitelijke brandstof van algen, net als in elk andere levend wezen. Met behulp van NADPH en ATP wordt in de chloroplast CO_2 omgezet in suikers (weergegeven als CH_2O in de figuur 1). De suiker uit de chloroplast is de basis voor (onder andere) de verdere groei van algen. Dit hele proces wordt fotosynthese genoemd.

Met deze achtergrond kun je de belangrijkste factoren bepalen die de snelheid van algengroei bepalen: (1) beschikbaarheid van voldoende zonlicht, (2) beschikbaarheid van voldoende koolstofdioxide en (3) beschikbaarheid van voldoende

Figuur 1:
Vereenvoudigde weergave van de foto-autotrofe groei van ééncellige microalgen.



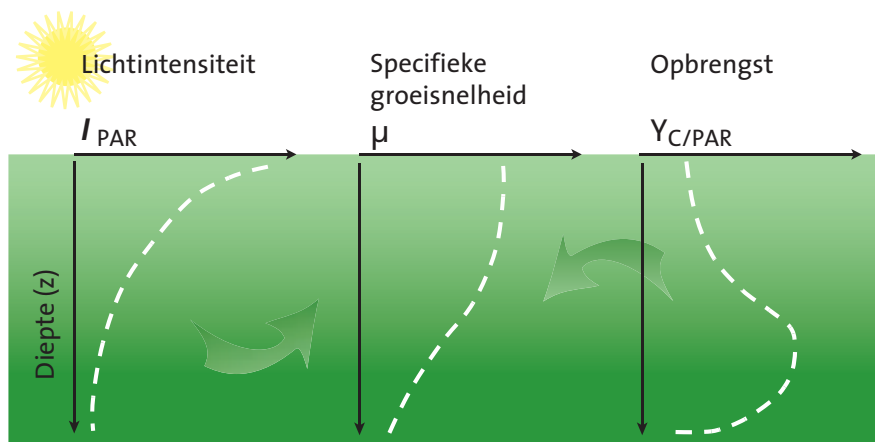
voedingsstoffen. Verder moet de zuurstof die vrijkomt bij de fotosynthese verwijderd worden. Als de zuurstof ophoopt gaat deze namelijk de fotosynthese, en dus ook de algengroei als geheel, remmen. Ook de temperatuur van het water is van belang voor optimale groei. Deze is afhankelijk van de algensoort en ligt in het algemeen tussen 15 en 35 graden.

Het beïnvloeden van de hoeveelheid voedingsstoffen als stikstof en fosfor in een algenkweekstelsel is relatief eenvoudig. De beschikbaarheid van zonlicht en de efficiëntie waarmee dat licht door de alg gebruikt wordt is meestal de beperkende factor voor algen.

Optimaal licht

Algen absorberen zichtbaar licht, net als planten, in het golflengtegebied van 400 tot 700 nm. Dit is de 'photosynthetic active radiation', PAR. De lichtintensiteit wordt dan ook uitgedrukt in 'mol PAR fotonen per vierkante meter per seconde', met andere woorden: het aantal lichtdeeltjes tussen 400 en 700 nm dat in één seconde invalt op een oppervlak van één vierkante meter.

Op dit moment wordt een beperkt aantal algensoorten in grote vijvers gekweekt. Dit worden vaak 'racebaanvijvers' (*raceway ponds*) genoemd. In deze vijvers wordt het water met algen gemengd door middel van schoepenraden om te voorkomen dat de algen bezinken en om ervoor te zorgen dat alle algen aan dezelfde hoeveelheid licht worden blootgesteld. Het water bevat veel algencellen; zo veel dat al het zonlicht dat op de vijver valt wordt geabsorbeerd. Er zal dan ook nauwelijks licht op de bodem vallen. Dit is ook precies de bedoeling, omdat je al het licht wilt gebruiken voor algengroei. Het mag niet zo zijn dat licht 'ongebruikt' op de bodem van de vijver valt. Het is dus zaak de concentratie algencellen zo te kiezen dat al het zonlicht onderweg geabsorbeerd wordt. Dit wordt in de praktijk gedaan door de snelheid waarmee de



Figuur 2: Schematische weergave van de afname van de lichtintensiteit (I_{PAR}) met de diepte (z) in een algencultuur in een vijver of fotobioreactor (grafiek links). Daarnaast is ook aangegeven hoe de groeisnelheid van de algen (μ , grafiek midden) en de efficiëntie van lichtgebruik (Y_C/PAR , grafiek rechts) afhankelijk van de positie in de vijver of fotobioreactor.

algen geoogst worden aan te passen aan de productie. Deze kan van dag tot dag variëren gezien de variatie in zonnenschijn en dus zal ook de oogst dagelijks aangepast moeten worden.

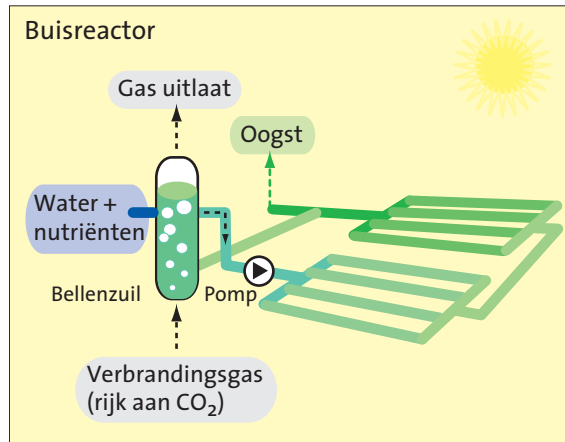
De ideale situatie is schematisch weergegeven in figuur 2. In deze figuur is de lichtgradiënt in de vijver zichtbaar: hoe dieper, hoe donkerder. De grafiek aan de linkerkant geeft de afname weer van de lichtintensiteit over de diepte van de vijver. Die lichtintensiteit neemt af door de absorptie van licht door de algen. Dat betekent dat de algen ook trager groeien als ze dieper zitten (middelste grafiek). Omdat de algen in zo'n open, stromend systeem continu worden gemengd, zal de groeisnelheid zich ook continu aanpassen aan de hoeveelheid licht op de betreffende diepte. In de rechter grafiek is te zien hoe efficiënt het licht wordt gebruikt op elke diepte in de vijver. Deze efficiëntie is erg laag in het relatief felle zonlicht aan het oppervlak en maximaal in de onderste helft van de vijver.

Als er te weinig algen worden geoogst zou het onderste deel van de vijver helemaal donker kunnen worden. In dat donkere deel zal de hoeveelheid biomassa niet groeien en zelfs kunnen afnemen omdat er nu eenmaal energie nodig is voor het onderhoud van de cellen. Als er niet genoeg licht is om die energie te leveren, zal de alg zijn

koolhydraatreserves gaan verbranden en dus in massa afnemen. Dit kun je voorkomen door optimalisatie van de oogstsnelheid. Dat geldt niet alleen in zo'n open vijver, maar ook in gesloten fotobioreactoren.

Lichtverdunning

Er zijn maar weinig algensoorten die zich laten kweken in een open vijver. Veel vaker zul je dat in een gesloten 'fotobioreactor' moeten doen. Zo'n gesloten fotobioreactor heeft het voordeel dat je het ontwerp zo kunt aanpassen dat het zonlicht 'verdund' wordt over een groter oppervlak. Daarmee voorkom je dat de algen teveel licht krijgen en kun je het licht dus met grotere efficiëntie omzetten in biomassa. Toch is dit makkelijker gezegd dan gedaan. Het betekent vaak meer materiaalgebruik en hogere installatiekosten voor de fotobioreactor.



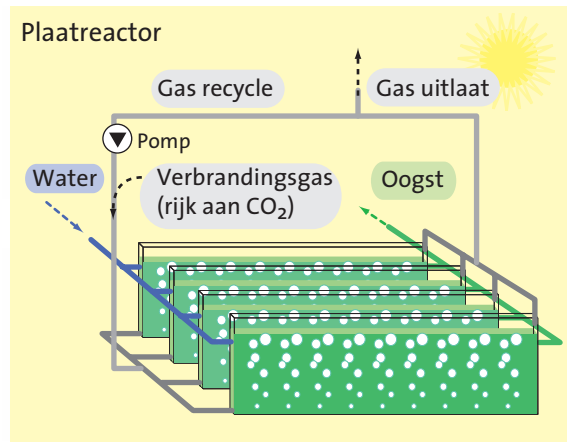
Figuur 3:
Schematische weergave van een buisreactor voor algenproductie.

In figuur 3 en 4 worden twee karakteristieke ontwerpen getoond van fotobioreactoren: een buisreactor in figuur 3 en een plaatreactor in figuur 4. De plaatreactor is zo opgesteld dat er per vierkante meter grondoppervlak een groter reactoroppervlak



Raceway pond

Figuur 4:
Schematische weergave
van een platenreactor voor
algenproductie.



aanwezig is dat blootgesteld is aan zonlicht. Op deze manier kun je eenzelfde hoeveelheid licht dus verdunnen over een groter oppervlak. Ook de buizenreactor kun je verticaal opstellen om zo voordeel te halen uit dit lichtverdundingseffect. Op verschillende plekken in de wereld worden verschillende reactorontwerpen getest, onder andere op AlgaePARC bij Wageningen UR.

Alg met minder pigment

Behalve een aanpassing van het kweekstelsel, kun je ook de alg aanpassen aan het beschikbare licht. Zo kun je algen selecteren die minder pigment bevatten en daardoor minder licht absorberen. Dat klinkt wellicht tegenstrijdig, maar een alg die minder pigment heeft zou in een algenproductiesysteem juist efficiënter met licht om kunnen gaan. De productie van de algenvijver of fotobioreactor zou daardoor omhoog kunnen gaan. Zo'n 'pigment-arme alg' neemt bij een hoge intensiteit van het zonlicht

niet zo snel teveel zonlicht op. Het licht dat wél wordt opgenomen wordt efficiënter omgezet in biomassa. Bovendien kan het zonlicht dieper doordringen in de algencultuur, waar het weer geabsorbeerd kan worden door andere cellen en gebruikt worden voor fotosynthese. In feite kun je op deze manier meer algen in de cultuur handhaven. Alle individuele algencellen groeien iets minder hard omdat ze minder pigment hebben, maar het licht wordt wel efficiënter benut en de productiviteit van de cultuur als geheel is hoger omdat er dus meer algencellen in zitten.

Ook dit principe is in de praktijk lastiger dan het lijkt. Er worden in laboratoria over de hele wereld pogingen gedaan om algen die interessante producten maken aan te passen zodat ze minder pigment hebben. Dit gebeurt door middel van kunstmatige selectie of gerichte genetische modificatie (zie ook hoofdstuk 4). Het is echter nog niet aangetoond dat deze soorten in groot-schalige algenkweek op zonlicht ook echt productiever zijn.

Koolzuur erin, zuurstof eruit

Behalve het optimaal benutten van zonlicht is het ook belangrijk dat de algen genoeg CO₂ gevoerd krijgen en dat de zuurstof – het 'afval' – op tijd wordt afgevoerd. Zoals in Figuur 3 en 4 te zien is worden de verschillende types fotobioreactoren 'belucht' met CO₂-rijk gas. Dat kunnen bijvoorbeeld verbrandingsgassen zijn uit elektriciteitscentrales of generatoren. Die verbrandingsgassen hebben als extra voordeel dat ze arm zijn aan zuurstof, waardoor ze dit 'afval' van de fotosynthese makkelijk opnemen.

Ook open algenvijvers moeten 'verrijkt' worden met CO₂ om een snelle algengroei te stimuleren. Het is helaas niet mogelijk om echt snelle algengroei te realiseren op basis van de concentratie CO₂ in de lucht. Die is met 400 ppm, ofwel 0.04 volume% veel te laag. Voor hoogproductieve

De betere alg absorbeert minder licht



Systeem van plaatreactoren ingesloten in een grote waterzak. Ontwerp is van het Belgische bedrijf Proviron en deze demonstratiereactor staat bij AlgaePARC, Wageningen UR.

algenkulturen zijn gasstromen met 10 volume% CO₂ of meer nodig. De hoeveelheid zuurstof in een algenproductiesysteem moet lager gehouden worden dan ruwweg drie keer het niveau zoals dat in gewone buitenlucht zit (21 volume%). Boven deze waarde zal de fotosynthese geremd worden.

Temperatuur

De laatste grote uitdaging om algenproductiesystemen productiever te maken is temperatuurcontrole van het water waarin de algen groeien. Elke algensoort heeft zijn eigen optimale temperatuur. In het algemeen ligt deze tussen de 15 en 35°C. Afhankelijk van de plek op aarde en de gebruikte algensoort betekent dit dat het in de winter soms lastig wordt om algen te kweken. Omgekeerd moeten de meeste systemen in de zomer juist worden gekoeld omdat de algenkultuur heel veel warmte van het zonlicht opneemt. In algenvijvers is die koeling in de praktijk geen groot probleem. Er zit

heel veel water in het systeem en dus een grote warmtebuffer. Op echt warme dagen verdampt er dan wel veel water wat weer een nadeel is.

Voor gesloten plaatreactoren is een ontwerp bedacht waarin de platen met algen gemaakt zijn van plastic folies die zelf weer zijn opgesloten in een grote waterzak die als warmtebuffer fungeert (foto). In dit geval kan dus net als in een vijver veel van de warmte gedurende de dag in de 'waterzak' worden opgeslagen om die in de nacht weer af te geven. Het voordeel van deze afgesloten zak ten opzichte van de vijver is echter dat er geen water verdampt.

Knutselen aan de fotosynthese

DE ALG *Botryococcus braunii* kan zich verheugen op de warme belangstelling van de wetenschap. Het blijkt een bijzonder goede producent van specifieke koolwaterstoffen die als basis zouden kunnen dienen voor de productie van biodiesel. Onder optimale omstandigheden bestaat wel 80% van het gewicht van de alg uit deze koolwaterstoffen. 'De alg heeft daarbij wel één groot nadeel', vertelt Tom van den Berg, promovendus aan de vakgroep biofysica, fotosynthese & energie van de Vrije Universiteit in Amsterdam. '*B. braunii* groeit heel traag. Dat maakt hem op dit moment weer minder geschikt als producent van biodiesel.'

Het onderwerp van het promotieonderzoek van Van den Berg is de fotosynthese in deze alg. Algen hebben net als andere planten chloroplasten in hun cellen: de typerende groene celonderdelen waarmee zij zonlicht kunnen vangen. Van den Berg: 'Ons onderzoek is erop gericht om de verschillende onderdelen van de cel waarmee licht wordt gevangen en vastgelegd beter te begrijpen. Als je algen wilt veranderen zodat ze nog efficiënter omgaan met het aangeboden zonlicht, of je wilt ze precies het goede licht van de juiste kwaliteit en hoeveelheid aanbieden, dan zul je eerst inzicht moeten krijgen in de specifieke eigenschappen van het fotosysteem waarmee licht wordt gevangen en vastgelegd.'

Beperkte capaciteit

Fotosynthetische organismen zetten de licht-energie – die moeilijk te gebruiken en op te slaan is – om in een energievorm die voor langere tijd

bewaard kan worden, zoals suikers. Daar zit een nadeel aan: maar een beperkt deel van de energie van het licht kan worden opgeslagen in deze 'brandstofmoleculen'. De huidige wetenschap is erop gericht om dit proces te begrijpen en te verbeteren.

'De beperking van een plantencel om zonlicht om te zetten in bruikbare energie zit hem niet in de efficiëntie van de betrokken eiwitten', vertelt professor Roberta Croce, de promotor van Van den Berg. 'In membranen binnenin de chloroplasten zitten gespecialiseerde eiwitten die het licht vangen: de fotosystemen I en II. Die zijn op zichzelf extreem efficiënt. In veel planten en algen kunnen die eiwitten in principe het theoretisch maximum van ongeveer 10% van de gevangen zonne-energie omzetten in chemische energie, vastgelegd in biomassa. Het probleem is dat dit alleen goed gaat in condities met weinig licht. Als er veel licht is neemt niet alleen de efficiëntie af maar zal het fotosysteem zelfs beschadigd raken. Alle organismen die fotosynthese gebruiken hebben daarom methoden ontwikkeld om deze schade te beperken: ze geven een groot deel van de opgenomen lichtenergie weer af als warmte. Deze mechanismen zijn gericht op het overleven van het organisme, maar als het draait om productie is weggegooide energie natuurlijk zonde. Daarom proberen we dit proces beter te begrijpen en aan te passen.'

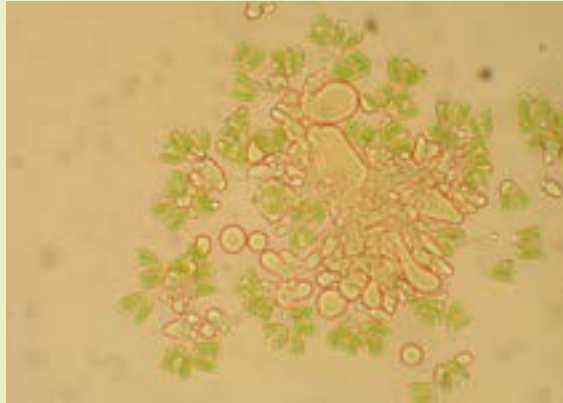
De aanpak van de VU-onderzoekers is fundamenteel van aard: ze proberen de fotosystemen tot in het kleinste detail te begrijpen voor ze iets aan het licht of aan de alg willen veranderen. Van den Berg: 'Het helpt dat de membranen in de chloro-

plasten vol met fotosystemen zitten. Zo kunnen we de individuele systemen isoleren. Om het goed te begrijpen onderzoeken we fotosynthese niet alleen in levende algen, maar we kunnen de geïsoleerde fotosystemen ook aan verschillende lichtomstandigheden blootstellen, zodat we meer leren over de individuele eigenschappen.'

De fotosystemen in de cel van algen hebben 'antennes' waarmee zij de fotonen uit het zonlicht kunnen opvangen. In die antennes zitten pigmenten zoals het bekende, groene chlorofyl, maar ook oranje carotenen. Die pigmenten geven de energie die ze uit het zonlicht hebben gehaald door aan weer een volgend pigment in het zogenoemde reactiecentrum van het fotosysteem. Daar wordt de lichtenergie omgezet in chemische energie. Door de antennes van het fotosysteem zijn de algencellen enigszins flexibel in het verwerken van licht. Komt er weinig licht binnen, dan kunnen zij de grootte van hun antennes aanpassen om de weinige beschikbare fotonen tóch te kunnen vangen.

LED

Het fundamentele werk van de algenonderzoekers kan verschillende consequenties hebben voor de praktijk, zegt professor Croce. 'Aan de ene kant kun je je voorstellen dat er productiesystemen worden gemaakt, bijvoorbeeld in kassen, waarbij algen precies het juiste licht van de juiste golflengte krijgen aangeboden. Een vergelijkbare ontwikkeling zie je al in de glastuinbouw, waarbij tomaten en andere groenten onder LED-licht worden gekweekt. Andersom kun je je ook voorstellen dat je er voor zorgt dat algen in grootschalige culturen beter



Botryococcus braunii

gebruik kunnen maken van de lichtenergie door ze genetisch te modificeren', aldus Croce. 'Maar wat je ook doet: het is cruciaal dat je eerst goed begrijpt hoe een alg met lichtenergie omgaat.

Waar productie van algen nu nog vooral het domein is van onderzoekers, zal het uiteindelijk toch naar de commerciële praktijk worden gebracht. Op het Wageningse AlgaePARC krijg je een idee hoe de algenboerderij van de toekomst er uit zou kunnen gaan zien.



6 Boer zoekt alg

MICROALGEN WORDEN al decennialang op kleine schaal vooral in Azië en Noord-Amerika gekweekt, meestal voor toepassingen in de diervoeding en de voedingssupplementen. Het gaat hier om een klein aantal soorten zoals *Spirulina* en *Chlorella*. Op dit moment wordt wereldwijd maar zo'n 10.000 tot 20.000 ton gedroogde algen per jaar geproduceerd. Er is een viertal verschillende kweeksystemen in gebruik bij algenkwekers.

Open vijvers

De open vijvers of *raceways* zijn ondiepe, ringvormige kanalen waarin menging plaatsvindt met behulp van schoepenwielen. Wereldwijd zijn dit nu de meest toegepaste kweeksystemen. Een belangrijk voordeel van dit eenvoudige ontwerp zijn de relatief lage kosten. Daar staat tegenover dat zo'n open, grote vijver minder goed te controleren is dan een gesloten kweekstelsel. Er verdampt water en ook is dit systeem gevoelig voor infecties, waardoor de keuze van de te kweken algensoort zich beperkt tot weerbare, snelgroeiende soorten.

Of algenvijvers op de langere termijn het meest kosteneffectieve kweekstelsel zullen blijven is de vraag. Op basis van theoretische berekeningen

kunnen algen via fotosynthese maximaal tien procent van de energie uit zonlicht benutten en omzetten in biomassa. De rest van de lichtenergie gaat verloren als warmte. In de praktijk ligt het percentage benutte zonne-energie echter veel lager. Voor een algenvijver is dit slechts 1,5 procent. Dit komt onder andere doordat algen in de bovenste laag van de vijver blootgesteld worden aan een relatief hoge lichtintensiteit. De overmaat aan geabsorbeerd licht in deze laag wordt niet gebruikt om biomassa te maken, maar wordt omgezet in warmte. Overigens is zelfs die beperkte efficiëntie nog altijd bijna twee keer zoveel als bij 'gewone' landbouwgewassen.

Algenkweek in zonniger streken is potentieel veel productiever, mits de benutting van zonne-energie efficiënter wordt. Dat kan onder andere door de alg minder licht te laten absorberen, bijvoorbeeld door de antennegrootte van algen met behulp van genetische modificatie te verkleinen. Door die verminderde lichtabsorptie zal licht ook dieper in de vijver doordringen. Daardoor zullen ook de algen op grotere diepte zonlicht voor fotosynthese ontvangen. Een mogelijk nadeel van deze methode is dat de genetisch veranderde algen moeten concurreren met gewone, wildtype algen.



Horizontale buisreactor links en de gestapelde versie, rechts



Horizontale buisreactoren

Een horizontale buisreactor is een gesloten kweekstelsel, opgebouwd uit een enkele laag horizontale buizen. Zo'n buisreactor laat meer controle toe en is per vierkante meter productiever dan een vijver. Een belangrijk nadeel van dit ontwerp is dat de lichtintensiteit die op de met algen gevulde buis valt, net als in een vijver, erg hoog is. Algen kunnen hier slecht tegen en groeien dan langzamer, waardoor de productiviteit afneemt. Een ander nadeel van buisreactoren is de energie die nodig is voor het rondpompen van de algensoep. Ook de gasuitwisseling is bij deze systemen niet optimaal. Je moet moeite doen om koolzuurgas erin te krijgen en zuurstof hoopt makkelijk op, wat bij hoge concentraties schadelijk is voor algen. Daarnaast liggen de constructiekosten hoger dan bij de relatief simpele vijvers.

Gestapelde horizontale buisreactoren

In een gestapeld horizontaal systeem is de reactor opgebouwd uit meerdere lagen buizen die verticaal op elkaar zijn geplaatst. Ze vormen daarmee een soort hekwerk van buizen. Dit type reactor

heeft deels dezelfde voor- en nadelen als de enkele laag buisreactor. Een belangrijk verschil is dat het probleem van een te hoge lichtintensiteit hier veel minder speelt. Dit komt doordat de verticaal gestapelde buizen als het ware het zonlicht moeten verdelen over een grotere invangende oppervlakte, waardoor de lichtintensiteit op de cultuur afneemt. De algen kunnen het licht dan efficiënter gebruiken waardoor de productiviteit hoger is dan in de enkele laag buisreactor.

Vlakke plaat reactoren

Dit zijn gesloten reactoren opgebouwd uit series vlakke, parallelle platen. Deze systemen zijn in theorie het meest productief. Er is geen overmatige ophoping van het voor algen giftige zuurstof en ook is de lichtintensiteit niet te hoog. Nadeel van dit systeem is dat er relatief veel energie nodig is voor het mengen van voedingsstoffen en om te voorkomen dat de algen naar de bodem zakken. Hierdoor is het energieverbruik hoog. Daarnaast is het toevoegen van extra CO₂ wat moeilijker en ook is dit systeem wat lastiger op te schalen.

Plaatreactor in het laboratorium.



Praktijkonderzoek

Welke van de vier voorgenoemde systemen nu uiteindelijk het meest rendabel en duurzaam is, is onzeker. Omdat een aantal jaar geleden steeds meer bedrijven en overheden geïnteresseerd raakten in het antwoord op deze vraag, maar het onderzoek zich op dat moment vooral op laboratoriumschaal afspeelde, is het algenonderzoek in Wageningen opgeschaald op het *Algae Production and Research Centre*, kortweg AlgaePARC. AlgaePARC moet een brug slaan tussen kleinschalig laboratoriumonderzoek en grootschalige productie. Verbeteringen die door wetenschappers worden bedacht kunnen op AlgaePARC worden getest. Daarnaast zullen de onderzoekers op deze locatie

de vier belangrijkste algenkweeksysteem vergelijken met betrekking tot kosten, kwee-efficiëntie en duurzaamheid. Het nu nog meest gebruikte kweeksysteem, de open kweekvijver, zal daarbij als referentie dienen. Elk kweeksysteem heeft specifieke voor- en nadelen, maar uiteindelijk gaat het om de maximale productie van hoogwaardige algen tegen een zo laag mogelijke prijs gedurende het hele jaar.

Naast het gebruikte type kweeksysteem is het ook belangrijk de condities van het kweekproces zodanig te manipuleren dat een optimale productie van het gewenste algenproduct, bijvoorbeeld oliën, wordt bereikt. Traditioneel laten kwekers de algen groeien tot er voldoende algenbiomassa is verkregen. Vervolgens wordt de hoeveelheid voedingsstoffen verminderd, waardoor de alg stopt met groeien en meer olie gaat produceren. Meestal zijn dit twee processen die kwekers achter elkaar uitvoeren: eerst neemt de biomassa snel toe, daarna hoopt zich in die biomassa heel langzaam vet op. Een van de doelen van de onderzoekers op het AlgaePARC is het ontwerp van een systeem dat van meet af aan een optimale mix van vet of zetmeel produceert in plaats van botweg zo veel mogelijk biomassa. Om de productiekosten zo laag mogelijk te houden wordt dit systeem gevoed met nutriënten verkregen uit reststromen.

AlgaePARC heeft zich een aantal concrete doelen gesteld. Binnen vijf jaar willen de onderzoekers een goede vergelijking kunnen maken van verschillende productiesystemen op fotosynthetische efficiëntie, productiviteit, energiegebruik, gebruik van nutriënten en water, robuustheid en mogelijkheden om de systemen op te schalen naar 'algenboerderijniveau'. Daarnaast moeten de systemen een fotosynthetische efficiëntie bereiken van meer dan 3% van het zonlicht, en dat het hele jaar door kunnen handhaven in de buitenlucht. Het zijn een paar van de noodzakelijke stappen die nodig zijn om van een wetenschappelijke belofte naar een commercieel productiesysteem te komen.

Algenkweken voor doe-het-zelvers

LIJKT HET wat om thuis een eigen algenkweekje te starten, maar heb je geen idee waarmee te beginnen? Dan heb je misschien wat aan de volgende tips. Je hebt nodig: Algen, een fotobioreactor, licht, CO₂, water, nutriënten en sporenelementen, en manieren om de cultuur te mengen en de temperatuur en pH op het juiste niveau te houden. In de afgelopen twee jaar hebben 234 scholieren van 6 verschillende technasia (voortgezet onderwijs met een technologisch profiel) meegedaan aan een 'algenreactorontwerpwedstrijd'. Het lukte alle groepjes om de algen aan het groeien te krijgen. Het winnende ontwerp van afgelopen jaar staat in de foto hiernaast.

De algen en het groeimedium

Algen kun je natuurlijk uit de sloot, je eigen groen uitgeslagen aquarium, of uit een vijver halen, maar je hebt dan grote kans dat je ook predatoren van de alg meepikt. Nog voordat een kweek goed en wel gestart is, zullen die zich tegoed gaan doen aan de vers geproduceerde algen. Als alternatief kun je algen bij zogenaamde cultuurcollecties bestellen, zoals bijvoorbeeld SAG (www.uni-goettingen.de/en/184982.html) of CCAP (www.ccap.ac.uk). Een ideale alg voor starters is *Chlorella sorokiniana*. Dit is de wereldrecordhouder groeisnelheid onder de eukaryote microalgen. In ideale omstandigheden zijn 24 uur genoeg om het aantal cellen met 650-voud toe te laten nemen! Deze zoetwateralg is bovendien erg robuust. Dat wil zeggen dat de alg niet meteen het loodje legt als de kweekcondities niet helemaal optimaal zijn.

Als meststof kan Pokon of Chrysal in zoet of zout water worden verdund, afhankelijk van de algensoort. Het beste mestrecept voor *C. sorokiniana* staat op www.wageningenur.nl/algen-profielwerkstuk.

De reactor

Algen hebben licht nodig, dus de reactor moet (deels) transparant zijn. Verder geldt dat groter niet per sé beter is: 1 tot 1,5 liter is een mooie omvang voor een prototype, en voor een thuiskweek geldt dat 3 tot 5 centimeter de ideale afstand is die het licht in de reactor moet afleggen. Een frisdrankfles is dus eigenlijk al te dik, tenzij je hem van twee kanten belicht.

Veel algen zullen naar de bodem zakken als de cultuur niet gemengd wordt. Mengen kan door je kweek regelmatig te schudden, door een mechanische roerder in de kweek te installeren, of door lucht door de kweek te bubbelen met behulp van een aquariumpompje. Dit laatste heeft als voordeel dat ook het geproduceerde zuurstof, dat bij hoge concentraties giftig wordt voor de algen, met de belletjes wordt afgevoerd.

Licht en temperatuur

Voor zowel zonlicht als kunstlicht geldt: wees voorzichtig met teveel licht, want daaraan kunnen de algen doodgaan. Bij te weinig licht zullen de algen nauwelijks groeien. Wat de juiste lichtintensiteit is, is moeilijk te zeggen. Dit ligt namelijk aan vorm en grootte van de reactor en aan de hoeveelheid algen in de reactor. Als vuistregel geldt dat een lichtintensiteit die voor je ogen nog net niet oncomfortabel is genoeg is. Als je merkt dat de cultuur aanslaat en de



De winnaars van de algenkweekontwerpwedstrijd 2013: leerlingen van Het Streek uit Ede

algen gaan groeien kun je met stapjes de lichtintensiteit verhogen, door bijvoorbeeld de lamp dichterbij te schuiven. Deze verhoging is nodig, omdat er steeds meer algen zijn, en er dus ook meer licht nodig is om al die algen van energie te voorzien.

De keerzijde van verlichting is verwarming. Voor de meeste algen geldt dat een temperatuur van ongeveer 20-25 graden celsius optimaal is. De alg *C. sorokiniana* komt van nature voor in de woestijn en groeit het beste bij 35 graden. Dat is voor

de meeste algen echter al zo hoog dat ze bijna niet meer groeien. Als het nodig is kun je de cultuur koelen door deze in een waterbak te zetten waar je water van een bepaalde temperatuur doorheen laat stromen. Opwarmen kan bijvoorbeeld met een aquariumverwarmingselement.

CO₂ en pH

Koolstofdioxide is een essentiële voedingsstof voor algen. Al zijn alle condities precies goed, zonder voldoende CO₂ zal de alg niet of nauwelijks groeien. Het is de kunst om precies genoeg CO₂ toe te voegen; ongeveer 2% in de gasfase is vaak afdoende. Bij een overmaat aan CO₂ zal de cultuur, net als bij de oceaanverzuring uit hoofdstuk 1, verzuren met trage groei als gevolg. De meeste algen doen het goed als de pH tussen de 6 en 8 ligt. Het optimum voor *C. sorokiniana* is 6,7. Je kunt pH schommelingen beperken met behulp van een chemische buffer. CO₂ kan bijvoorbeeld bijgemengd worden in de lucht als een gascilinder met puur CO₂ beschikbaar is. Anders zou je in een aparte plastic fles zelf CO₂ kunnen produceren door gist met water en suiker te mengen.

Meer tips staan op www.wageningenur.nl/algen-profielwerkstuk. Deze website van Wageningen UR is ingericht om scholieren, die een profielwerkstukproef met algen willen doen, te voorzien van informatie en tips voor het kweken van algen. De website is echter net zo nuttig voor 'niet-profielwerkstukkens'. Er is bovendien een emailadres, algen-profielwerkstuk@wur.nl, waar je terecht kunt met al je vragen over algen en het kweken daarvan.

Van algen tot *algae*

DIT CAHIER heeft laten zien wat er allemaal nog nodig is voordat algen op een rendabele en duurzame manier kunnen worden geproduceerd. Toch is er ook nu al de nodige commerciële activiteit, zowel in Nederland, op relatief kleine schaal, als daarbuiten op grotere schaal. Op dit moment worden er nog geen bulkproducten zoals biobrandstoffen tegen concurrerende prijzen op de markt gebracht. Toch is dat wel het einddoel van een aantal bedrijven. In Nederland timmeren onder andere Photanol en Algae Food & Fuel hard aan de weg.

Bij Photanol, een spin-off bedrijf van de Universiteit van Amsterdam, wordt gewerkt aan het genetisch modificeren van cyanobacteriën. Deze algen worden uitgerust met genen die het mogelijk moeten maken om zoveel mogelijk van de geabsorbeerde lichtenergie in te zetten voor het produceren en uitscheiden van fermentatieproducten als melkzuur of 2,3-butaandiol (zie hoofdstuk 4). Sinds 2012 worden in een proeffabriek de eerste stappen gezet op demonstratieschaal (een reactor van 2.500 liter) voor de productie van lactaat.

Algae Food & Fuel ontwerpt en exploiteert LED-technologie, vijverkweeksystemen, gesloten fotobioreactoren en oogstsystemen. Bovendien produceren ze verschillende producten met behulp van eukaryote algen die in veel gevallen op reststromen van agrarische biogasinstallaties groeien. Zo'n biogasinstallatie is in feite een mestvergister, waarbij mest en co-producten als maïs worden omgezet in methaan. Daarnaast komt ook CO₂ vrij en bevat het zogenoemde digestaat (een vloeibare reststroom van het vergistingsproces) mineralen

als stikstof en fosfor. Dit 'afval' bevat dus essentiële grondstoffen voor de productie van algen. De combinatie van vergisting en algenkweek lijkt dan ook veelbelovend. Op dit moment produceert Algae Food & Fuel onder andere algen voor diervoeding samen met het melkvee- en biogasbedrijf Kelstein, in Hallum. Daarnaast heeft het een onderzoeksfaciliteit in Lelystad opgezet, in samenwerking met Wageningen UR en energiebedrijf Eneco, voor het verder ontwikkelen van hun kweeksystemen.

Voor het grotere werk moet je naar de zon. In Bailargues, vlakbij Montpellier, produceert Microphyt sinds 2010 algen. In kassen staan daar rijen boven elkaar geplaatste horizontale buisreactoren, met een totaal volume van 10.000 liter. Het bedrijf stelt dat hun reactoren en kweekmethode speciaal zijn ontworpen om fragiele algensoorten betrouwbaar te kunnen produceren. Microphyt is inderdaad ook één van de weinige algenproducenten ter wereld die deze specifieke algensoorten op kilobasis per dag kan leveren. Ze leveren onder andere soorten voor de productie van rood pigment, voor aquacultuur, en voor olie.

In Pataias, Portugal, staat één van de grootste fotobioreactoren ter wereld: een buizenreactor van 1,1 miljoen liter van het bedrijf A4F, in samenwerking met cementfabrikant Secil. De fotobioreactor maakt gebruik van de CO₂-uitstoot van de cementfabriek.

Het Amerikaanse bedrijf Heliae is een spin-off van Arizona State University, en werd opgericht door dezelfde familie Mars die ook in het snoep zit. Het



Sapphire Energy's green crude farm in New Mexico, VS.

bedrijf met 75 werknemers werkt aan producten voor bijna alle markten die je met algen kunt bestrijken, zoals ingrediënten voor (gezondheids)voeding, geneesmiddelen, cosmetica, meststoffen, fijnchemicaliën en brandstoffen. Stokpaardje van het bedrijf is momenteel het Volaris-kweeksysteem: een soort kas met daarin open bioreactoren waarin de algen gedurende de dag op zonlicht groeien en 's nachts op een organische koolstofbron.

Het bedrijf Sapphire Energy uit California legt zich volledig toe op de productie van olie met behulp van algen. Sapphire werkt met open vijversystemen zonder toevoeging van organische koolstofbronnen. Het bedrijf heeft een onderzoeks- en ontwikkelingsafdeling in New Mexico met 70

open vijversystemen, variërend in grootte van 100 tot 1 miljoen liter. Met hun demonstratieproject de *green crude farm* van 120 hectare open vijvers (foto) zegt Sapphire ongeveer 4 miljoen liter afge-werkte brandstof per jaar te zullen produceren. Dit demonstratieproject kan uiteindelijk inzicht geven in de productiekosten van deze brandstof op grote schaal.

De genoemde voorbeelden van industriële algen-productie laten zien dat algen biotechnologie niet enkel een wetenschappelijke vingeroefening is, maar dat er ook door bedrijven serieus aan gewerkt wordt. Het is evenwel nog een jonge sector, met bedrijven die vaak niet veel langer dan vijf jaar bestaan. Hoe succesvol ze zullen worden, en of productie van algenbiomassa voor bulktoepassingen duurzaam en rendabel wordt, weten we waarschijnlijk pas over een jaar of tien. Wat als een paal boven water staat is de enorme potentie van algen voor duurzame productie van allerhande stoffen. De technologische uitdagingen om deze potentie te verzilveren zijn bekend en bij zowel wetenschappers als ondernemers lijkt de motivatie aanwezig om hier oplossingen voor te bedenken.

Auteurs

Dr. Dedmer van de Waal, Nederlands Instituut voor Ecologie, NIOO-KNAW (hoofdstuk 1)
Professor Ellen van Donk, Nederlands Instituut voor Ecologie, NIOO-KNAW (hoofdstuk 1)
Dr. Packo Lamers, WUR (hoofdstuk 2, 3 en boxen 'Algenkweken voor doe-het-zelvers' en 'Van algen tot Algae')
Ir. Nadia Inderfurth, WUR (box 'Biocement')
Dr. Tania Fernandes, Nederlands Instituut voor Ecologie, NIOO-KNAW (box 'Algen in dienst')
Professor René Wijffels, WUR (hoofdstuk 3 en hoofdstuk 6)
Dr. Sina Salim, WUR (box 'Algenoogst')
Dr. Michel Eppink, WUR (box 'Bioraffinage')
Drs. Hans Reith, WUR (Box 'Bioraffinage')
Professor Gerrit Eggink, WUR (hoofdstuk 4, eukaryoten)
Professor Joost Teixeira de Mattos, UvA (hoofdstuk 4, cyanobacteriën)
Drs. Peter Mooij, TU Delft (hoofdstuk 4, artificiële selectie)
Dr. Marcel Janssen, WUR (hoofdstuk 5, fotosynthese)
Dr. Maria Barbosa, WUR (hoofdstuk 3 en 6)

Verder is door Rob Buiters dankbaar gebruik gemaakt van de informatie van de volgende geïnterviewden:
Dr. Willem Brandenburg, WUR (box 'Van algen tot wieren')
Gerard Manshanden, Fishflow Innovations (box 'Algen bestrijden?!')
Algae and genetic modification, rapport mei 2012, Technopolis (box 'Algenethiek')
Professor Roberta Croce en drs Tom v. d. Berg, VU (box 'Knutsele aan fotosystemen')

Illustratieverantwoording

Foto omslag: Shutterstock

RVD, Den Haag: p. 3

NASA: p. 4, 7

Elisa Carolus, Rotterdam: p. 6 b, 11, 13, 31, 38, 48 o,
55, 56, 57 b, 58

Dedmer van de Waal, NIOO-KNAW, Wageningen:
p. 6 o, 8, 9 l, 9 r

Agrosysteemkunde, WUR, Wageningen: p. 15

Rob Buiten, Heemstede: p. 17, 67

Kim Mulders, WUR, Wageningen: p. 18, 42

Theo Pasveer BNO Cartographics, Deventer: p. 20,
24, 35

Shutterstock: p. 21, 22, 23, 32, 37

Lenny de Jaeger, WUR, Wageningen: p. 25

Imageselect, Wassenaar: p. 26

Wil Hoekstra: p. 27

Alison R. Taylor, University of North Carolina

Wilmington Microscopy Facility: p. 29

Hollandse Hoogte, Amsterdam: p. 34

AlgaePARC, WUR, Wageningen: p. 36, 44, 47, 57 o,
59, 61 r, 62, 64 l, 64 r, 65

Packo Lamers, WUR, Wageningen: p. 39

Sina Salim, WUR, Wageningen: p. 41

Bio-Rad Laboratories: p. 46

Photanol b.v. Amsterdam: p. 48 b

Delft School of Microbiology Archives, TUDelft: p. 51

Marcel Janssen, WUR, Wageningen: p. 53

René Wijffels, WUR, Wageningen: p. 54

Courtesy of Sapphire Energy Inc.: p. 69

Stichting Biowetenschappen en Maatschappij
werkt samen met:

Dit cahier is mede tot stand gekomen door:



In dit nummer:

- > **Algen in de ecologie**
- > **Algen, blauwalgen en wieren**
- > **De verschillende producten uit algen**
- > **Uitdagingen voor rendabele kweek**
- > **Meer alg uit hetzelfde licht**
- > **Boer zoekt alg**

Redactie

Prof. dr. Wiel Hoekstra

Dr. Packo Lamers

Ir. Rob Buiten (eindredactie)

Met een In Memoriam voor onze vicevoorzitter Prins Friso.

Algen vervullen niet alleen een essentiële rol in het water, ze staan ook in toenemende belangstelling van de technologie. Vliegtuigen zouden erop kunnen vliegen, kweekvis en andere dieren kunnen ermee worden gevoed en in de schoonheidssalon kun je er een louterend maskertje van maken. Algen lijken een bron van vele mooie producten en toepassingen. Maar de belofte is nog geen praktijk.

In dit cahier belichten de vooraanstaande wetenschappers uit het algenonderzoek wat de rol van algen in de natuur is, wat de potentie is van algen als producenten van biobrandstoffen of andere producten, en vooral wat er nog moet gebeuren voor de belofte realiteit wordt.

En ja, in de zomer kunnen sommige algen ook je zwemplezier vergallen. Maar zelfs voor de bestrijding van dat probleem biedt dit cahier een handvat.

**Biowetenschappen
en Maatschappij**

