

| WETENSCHAP

Superplanten

Fotosynthese is
een essentieel, maar
nogal rommelig proces

PAGINA 4-7



Sleutelen aan de groene motor

De fotosynthese van planten
is verre van efficiënt.
Het is een grote technische
uitdaging om daar iets
aan te verbeteren.

Hoe stroomlijn je die rommelige fotosynthese?

De opbrengst van landbouwgewassen is afhankelijk van hoe efficiënt planten het zonlicht benutten voor de aanmaak van bouwstoffen. Dit valt er nog te verbeteren aan de synthese.

Gemma Venhuizen

Meér voedsel. Duurzamer voedsel. Als het over de toekomst van gewasproductie gaat, dan komen die termen onvermijdelijk ter tafel. Want 9 miljard mensen voeden rond 2050, zonder dat de planeet daaronder lijdt – ga er maar aanstaan. Om dat doel toch te halen, zijn veel plantkundige innovaties gericht op het creëren van superplanten. Planten die voor extra veel opbrengst zorgen, zelfs onder uitdagende omstandigheden. Droogte, hoosbuien, hittegolven, schrale bodems. Er wordt gekeken naar verbeterde wortelgroei, naar planten die ’s nachts CO₂ opnemen in plaats van overdag, waardoor ze minder gevoelig zijn voor verdamping. Een proces staat binnen de plantoptimalisatie centraal: fotosynthese. Een alom aanwezige chemische reactie die essentieel is voor het leven op aarde. En die, zo is de hoop, door de mens verbeterd kan worden, want van nature verloopt het proces nogal rommelig. Maar ingrijpen is niet eenduidig.

The green machine wordt fotosynthese ook wel genoemd. En: de motor van het leven. Volgens biologen van de Amerikaanse universiteit Princeton zijn er zelfs parallellen te trekken tussen de evolutie van planten en de evolutie van auto’s. Net als bij echte machines heeft bij fotosynthese elk onderdeel een eigen functie, van de bladgroenkorrels tot en met het enzym rubisco. Aan al die onderdelen kan gesleuteld worden – maar of dat daadwerkelijk loont, hangt van de omstandigheden af.

Grote vraagstukken dus, en grote potentiële voordelen. Juist daarom is fotosyntheseonderzoek een *hot topic*, waarover aan de lopende band nieuwe artikelen verschijnen in vaktijdschriften – van brede analyses over de stand van fotosynthese-*engineering* tot gedetailleerde verslagen van mutatie-experimenten. *NRC* sprak met fotosynthese-experts uit vier verschillende vakgebieden over de grootste uitdagingen en kansen.

Aan elk onderdeel van fotosynthese kan gesleuteld worden – maar of dat loont, hangt van de situatie af die steeds wijzigt



Blad van een *Ficus pandurata*. FOTO GETTY IMAGES

1 De biofysica

Eerst terug naar de basis – hoe zat het ook alweer? In 1779 bestudeerde de Nederlandse arts en natuuronderzoeker Jan Ingenhousz muntplanten en ontdekte zo dat ze licht gebruikten om te groeien en de lucht te zuiveren. Het proces, dat hij fotosynthese noemde, bleek later samen te vatten in de formule $6\text{ CO}_2 + 6\text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{ O}_2$. Oftewel: koolstofdioxide en water worden, onder invloed van zonlicht, omgezet in glucose en zuurstof.

Dat doen planten met behulp van het pigment chlorofyl. De ‘bladgroenkorrels’ waar dat pigment inzit zorgen niet alleen voor de groene kleur maar bevatten ook twee eiwitcomplexen, PS2 en PS1. PS2 vangt het zonlicht op. De chlorofylmoleculen doen daarbij dienst als antennes, die de zonne-energie concentreren en ervoor zorgen dat die tijdelijk wordt opgeslagen

in de moleculen ATP en NADPH. Vervolgens zorgt die (in elektrische lading omgezette) energie ervoor dat watermoleculen worden gesplitst in zuurstof en in waterstofionen, die nodig zijn voor de glucoseproductie in PS1.

Aan de Vrije Universiteit Amsterdam onderzoekt Roberta Croce, hoogleraar biofysica van fotosynthese en voorzitter van de International Society of Photosynthesis Research, met haar collega’s die fundamentele, moleculaire basis van het proces. Ze combineren moleculaire biologie, geavanceerde spectroscopie en computermodellen om onder andere te onderzoeken of het ‘oogsten van licht’ nog verder te verbeteren is. In 2024 kreeg ze daarvoor een ERC-onderzoeksbeurs van de Europese Unie.

Planten kunnen alleen zichtbaar, energierijk licht gebruiken voor fotosynthese. Daardoor blijft een groot deel van het zonlicht ongebruikt, waaronder het energie-armere ver-rood licht, dat zich in het spectrum tussen zichtbaar rood en infrarood licht in bevindt. En dat is jammer, zeker voor bladeren onder aan een

plant: die bevinden zich in de schaduw en vangen juist vooral veel ver-rood licht.

Sommige cyanobacteriën, de voorouders van de bladgroenkorrels, kunnen wél ver-rood licht gebruiken voor fotosynthese. Ze voeren hetzelfde proces uit met minder energie, zegt Croce tijdens een rondleiding door haar nieuwe lab vol hypermoderne lasers („die meten de fluorescentie van chlorofyl, tot op de picoseconde nauwkeurig”), centrifuges en spectroscopen. „Als we begrijpen hoe ze dat doen, kunnen we proberen die eigenschap in planten in te bouwen.”

De eerste stap daarbij is het identificeren van pigmenten die ver-rood licht kunnen absorberen. „Chlorofyl a, het belangrijkste pigment in planten, kan dat niet, maar chlorofyl d en f bijvoorbeeld wel”, legt Croce uit. Die pigmenten komen niet in planten voor, dus er is genetische modificatie voor nodig om dat aan te passen.

Bij sommige cyanobacteriën zijn die pigmenten wél aanwezig. „We zien vooral dat de soorten die in de schaduw van anderen leven gebruik maken van chlorofyl d of f. Die vangen minder direct licht en hebben dus andere strategieën nodig.” In het lab is het de onderzoekers al gelukt om cyanobacteriën die normaal niet aan ver-rood-absorptie doen toch te veranderen in exemplaren die dat wel doen.

Ook planten vangen zoals gezegd niet overal evenveel licht. Een optie zou zijn om de bovenste bladeren transparanter te maken, met minder chlorofyl, zodat het zonlicht verder naar beneden doordringt. „En als we die onderste bladeren dan ook nog ver-rood licht kunnen laten gebruiken, dankzij de pigmenten, dan zou de fotosynthese per plant in het ideale geval met meer dan 25 procent toenemen.” Maar zo ver is het nog niet, benadrukt ze. „Fotosyntheseonderzoek gaat niet over één nacht ijs.”

2 De genetici

Dat benadrukt ook Jeremy Harbinson – net met pensioen, maar vóór die tijd ruim veertig jaar fotosyntheseonderzoeker. Vanuit Wageningen Universiteit was hij betrokken bij een EU-project dat onderzoekt op welke manieren fotosynthese kan helpen bij gewasverbetering. „Voor de meeste verbeteringen hebben we zeker nog wel tien jaar onderzoek nodig voordat we ze echt kunnen toepassen.”

Neem bijvoorbeeld het veranderen van zogeheten C3-planten in C4-planten. „Die termen zeggen iets over de beschikbare hoeveelheid koolstofdioxide voor de plant. De meeste planten doen aan C3-fotosynthese, waarbij er vóór de vorming van glucose eerst een tussenproduct ontstaat van een carbonzuur met drie koolstofatomen.” Maar bij zo’n 5 procent van de planten heb je een turbovariant, de C4-fotosynthese, waarbij de plant extra veel CO₂ kan omzetten in glucose doordat de moleculen worden geconcentreerd rond het enzym rubisco – waarover later meer. Tarwe en aardappels doen bijvoorbeeld aan C3-fotosynthese, terwijl maïs gebruikmaakt van de C4-variant.

Meer CO₂ is overigens niet altijd gunstiger voor de plant, benadrukt Harbinson. „Elke ingreep heeft z’n nadelen. Bij de opname van extra CO₂ gaat bijvoorbeeld ook extra water verloren. Als je dat zou willen omzeilen dan zou je eigenlijk willen dat die planten ’s nachts aan fotosynthese doen in plaats van overdag. Maar dan heb je dus nog meer kunstmatige ingrepen nodig.”

In theorie zou het mogelijk zijn om met genetische modificatie van een C3-plant een C4-plant te maken, als eenmaal bekend is welke genen bij die C4-fotosynthese betrokken zijn. „Maar het is een ingewikkelde, technisch uitdagende klus. En dan heb je ook nog te maken met strenge regelgeving op het gebied van genetisch gemodificeerde planten.”

„Wat dat betreft biedt de klassieke veredeling uitkomst”, zegt de Wageningse promovendus Louise Logie. „Daarbij ben je niet gebonden aan die strenge regelgevingen.” Zij onderzoekt de afgelopen jaren of fotosynthese ook verbeterd kan worden door te selecteren op specifieke planten. „Zelfs binnen één soort, in dit geval de zandraket, zie je al duidelijke genetische verschillen. Wij wilden kijken of je door die exemplaren te kruisen extra efficiënte na-

Naar schatting zijn er wel 10.000 plantengenen betrokken bij fotosynthese, er is niet één afzonderlijk fotosynthesegen

komelingen kan creëren.” „Naar schatting zijn er wel 10.000 plantengenen betrokken bij fotosynthese”, zegt haar promotor, hoogleraar erfelijkheidsleer Mark Aarts. „Die dragen allemaal een beetje bij, er is niet één fotosynthesegen.” Logie bestudeerde in het ultramoderne Netherlands Plant Eco-phenotyping Centre – een samenwerkingsverband tussen de universiteiten van Wageningen en Utrecht – 1.296 zandraketplanten met zes hogeresolutiecamera’s. Centraal in haar onderzoek staat *non-photochemical quenching*, een verzamelterm voor beschermingsmechanismen van planten tegen de influx van te veel energie. „Daarbij kan het weefsel van de plant beschadigd raken. Om dat te voorkomen stoot de plant een groot deel van de geabsorbeerde energie af, maar dat gaat vaak veel te lang door. Ze hebben als het ware een zonnebril opgezet die ze vergeten weer af te zetten.” Dat is nadelig voor de fotosynthese. Daarom selecteerde Logie juist op de planten die aan efficiënt quenchen doen: bijtijds de zonnebril op, en bijtijds ook weer de bril af. Door die met elkaar te kruisen ontstonden er

inderdaad nakomelingen die beter waren in fotosynthese (dus meer glucose produceerden bij dezelfde hoeveelheid zuurstof) dan de voorgaande generaties. Zo zou je in theorie op allerlei voor fotosynthese nuttige eigenschappen kunnen selecteren. Aarts: „Daar is tot nu toe nog veel te weinig naar gekeken. Ook is het binnen de plantenveredeling nu nog te ingewikkeld om mee te nemen. De meeste aandacht gaat bij fotosyntheseonderzoek nog altijd uit naar allang bekende spelers, zoals rubisco.”

3 De rubiscoloog

Enter rubisco, het meest voorkomende eiwit op aarde, voluit: ribulose-1,5-bisfosfaat carboxylase/oxygenase. Het is ook een enzym, bedoeld om biologische processen in de plant te versnellen. Rubisco is essentieel voor de plant om koolstofdioxide te absorberen en om te zetten in glucose. „Vrijwel al het koolstof in suiker, vet en eiwitten is ooit ontstaan dankzij rubisco”, zegt zelfbenoemd ‘rubiscoloog’ Robbie Wilson in een videogesprek. Als Australische molecuulair bioloog doet hij met collega’s aan het Amerikaanse MIT onderzoek naar het enzym.

Maar in de natuur werkt rubisco verre van efficiënt: het is tergend traag (met 1 tot 10 reacties per seconde, tegenover 100 tot 1.000 reacties bij veel andere enzymen) en voor de aanmaak ervan is veel stikstof nodig. En dan wordt er in ongeveer een op de drie door rubisco uitgevoerde reacties ook nog eens per ongeluk zuurstof in plaats van koolstofdioxide gebruikt. Die fout leidt tot een proces, fotorespiratie, waarbij juist CO₂ vrijkomt - en dus *kost* het de plant alleen maar energie. Zo’n 30 procent van de energie gaat daarmee verloren.

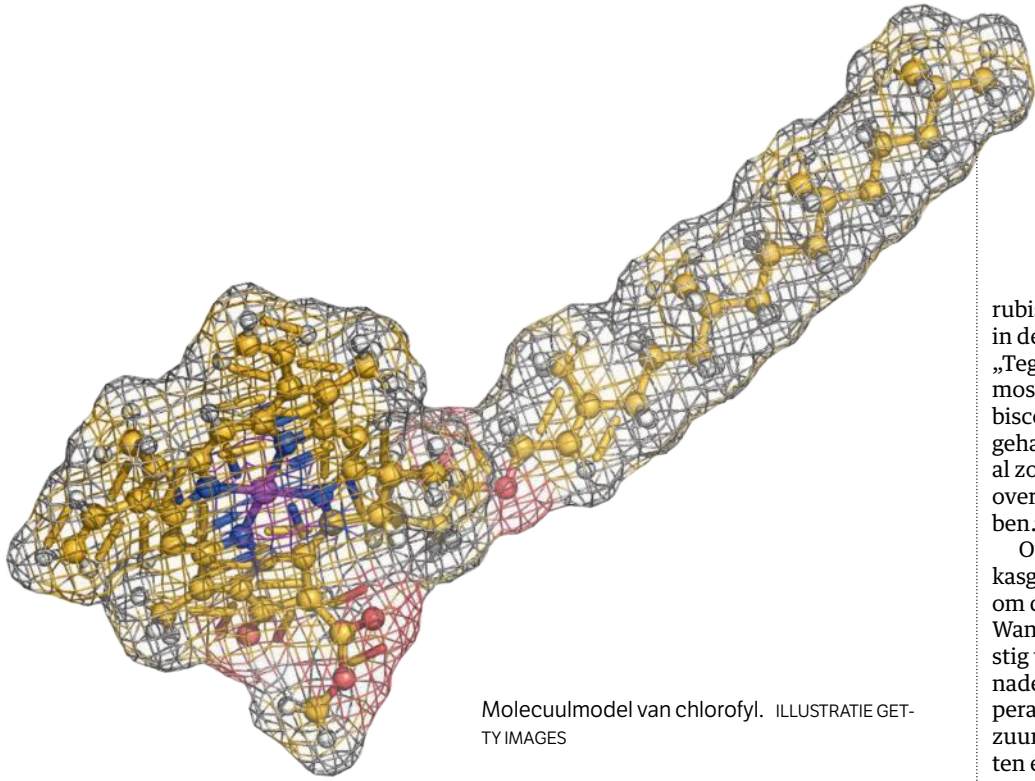
Op het moment dat de vroegste vormen van fotosynthese evolueerden, bij de cyanobacteriën dus, was dat nog geen probleem omdat er geen zuurstof in de atmosfeer aanwezig was. In die zin is het proces door de tijd heen inefficiënter geworden doordat de atmosfeer veranderde en de ‘machine’ zich daarop niet heeft aangepast. Zou je rubisco kunnen verbeteren, dan is een belangrijke bottleneck binnen het fotosyntheseproces opgelost. Alleen: dat gaat niet zonder slag of stoot.

„Vergeet niet: als miljoenen jaren aan plantenevolutie rubisco niet al efficiënter konden maken, dan is dit waarschijnlijk het moeilijkst oplosbare probleem binnen de evolutiebiologie”, zegt Wilson. „Want omdat fotosynthese zo essentieel is voor het leven, zou je verwachten dat de natuur op elk mogelijke voordelige rubiscomutatie selecteert.” Om die reden ligt het ook niet voor de hand dat één mutatie de oplossing biedt. „Je hebt hoogstwaarschijnlijk een hele reeks aan veranderingen nodig.”

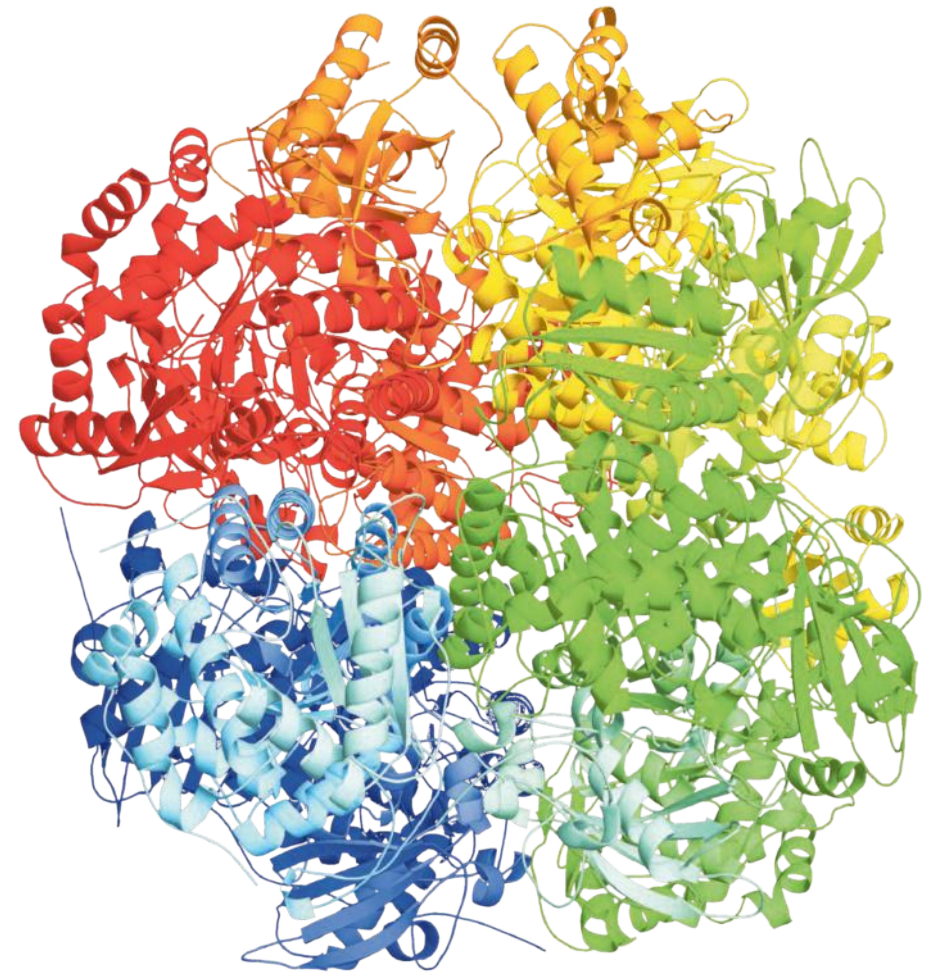
Sommige wetenschappers streven er vanwege die complexiteit zelfs naar om rubisco helemaal buiten spel te zetten. Zij menen dat fotosynthese efficiënter zou verlopen zonder het enzym. Zo beschreven twee Duitse microbiologen in 2017 in een artikel over *the rise and fall* van rubisco onder meer over de zoektocht naar geheel nieuwe manieren om CO₂ te fixeren.

Daar lijnrecht tegenover staan de wetenschappers die zich juist op rubisco concentreren, onder wie Wilson. Afgelopen zomer publiceerde hij met collega’s in tijdschrift *PNAS* een artikel over de kunstmatige evolutie van een natuurlijke rubiscovariant.

Die komt normaal voor bij *Gallionellaceae*, oeroude bacteriën die in milieus met veel koolstofdioxide en weinig zuurstof leven en worden beschouwd als een van de snelst werkende rubiscovarianten op aarde, met ruim 25 omzettingen per seconde. „Daarmee ben je er nog niet, want bacterierubisco kun je niet zomaar vergelijken met plantenrubisco”, zegt Wilson. Bovendien is snelheid nog niet alles; efficiëntie van het enzym speelt ook een rol. Het gaat dus niet alleen om het tempo waarmee CO₂ wordt vastgelegd en wordt omgezet in suiker, maar ook om een zo nuttig mogelijke besteding van die CO₂ - als rubisco dan veel energie verbruikt



Molecuulmodel van chlorofyl. ILLUSTRATIE GETTY IMAGES



Molecuulmodel van het rubisco-enzym. ILLUSTRATIE ANP

„Als miljoenen jaren evolutie rubisco niet efficiënter konden maken, dan is dit waarschijnlijk het moeilijkst oplosbare probleem

Robbie Wilson ‘rubiscoloog’

rubiscogebied, vindt Wilson dat het enzym ook in de huidige vorm al bewonderenswaardig is. „Tegenwoordig pompen we zoveel CO₂ de atmosfeer in dat er voldoende aanbod is voor rubisco om om te zetten. Maar ook toen het CO₂-gehalte nog een stuk lager lag, wist rubisco CO₂ al zodanig te concentreren dat planten konden overleven. Daar moet je toch respect voor hebben.”

Overigens betekent dat niet dat er nu broeikasgas in de atmosfeer moet worden gepompt om de planten te helpen, benadrukt Wilson. Want meer koolstofdioxide is niet per se gunstig voor de plant: dan komen er weer andere nadelen om de hoek kijken. Toenemende temperaturen maken rubisco extra gevoelig voor zuurstof en zorgen er bovendien voor dat planten extra water verliezen.

4 De veldtechnologen

Tot zover rubisco. Want het enzym is dus zeker niet de enige bottleneck in het fotosyntheseproces. Soms is het juist gebrek aan licht, aan stikstof (nodig voor de aanmaak van rubisco) of aan fosfaat (nodig voor de energiemoleculen ATP en NADPH). „Veel experimenten vinden plaats in het lab, maar de essentie van fotosynthese is dat het juist heel dynamisch is, vanwege de constante veranderingen”, zegt Deserah Strand. „Er hoeft maar één zuchtje wind te komen of één wolk voor de zon te schuiven en de lichtbeschikbaarheid is weer compleet anders. Op elk moment zijn weer andere eigenschappen belangrijk. Wij kijken daarom welke consequenties ingrepen in de plant hebben in de echte wereld. Het veld is ons laboratorium.”

Ze is onderzoeker bij het in 2022 opgerichte Jan Ingenhousz Institute, dat zich op de Wageningse universiteitscampus bevindt maar grotendeels onafhankelijk opereert. Bij het instituut worden technologie en veldonderzoek gecombineerd. „Zo hebben we bijvoorbeeld sensoren ontwikkeld waarmee je de fotosynthese van veel planten simultaan kunt meten”, zegt mede-oprichter David Kramer. „Met oudere sensoren moet je ze allemaal stuk voor stuk meten, maar dan zijn de weersomstandigheden alweer compleet veranderd zodra je bij plant nummer tien bent.”

Kramer is net terug van veldwerk in het binnenland van Australië, waar hij onderzocht bij welke plantensoorten fotosynthese nog goed functioneert als de bladtemperatuur oploopt tot 50 graden Celsius. „De temperatuur van de bodem was 62 graden - ik kwam thuis met gesmolten schoenzolen.”

Al het onderzoek van het Jan Ingenhousz Institute is open source, uiteindelijk is het de bedoeling dat fotosyntheseonderzoekers over de gehele wereld de instrumenten zelf kunnen maken. „Om echt impact te hebben, moeten de sensoren beschikbaar zijn voor veel onderzoekers wereldwijd”, zegt Kramers collega Alexander Laarman. Ook plantenveredelingsbedrijven zouden ervan kunnen profiteren: als ze toegang kunnen krijgen tot de data van de sensoren kunnen ze vervolgens zelf de selecties uitvoeren.

De grote hoeveelheden data van de sensoren worden uiteindelijk met behulp van computermodellen verwerkt, zegt Steven Driever die vanuit de Wageningen Universiteit nauw samenwerkt met het instituut. In zijn modellen bestudeert hij veranderingen in het fotosyntheseproces op verschillende schaalniveaus, van de individuele bladeren tot aan het complete bladerdek. „In tegenstelling tot dieren kunnen planten niet weg van hun plek als de omstandigheden ongunstig zijn, en juist daarom hebben ze zo’n brede set aan aanpassingsmogelijkheden ontwikkeld.”

Hoe belangrijk alle technologie ook is, uiteindelijk moet de behoefte van de plant centraal staan, zegt Strand. „Wat hebben ze nodig om glucose te maken, hoe kunnen wij ze daarbij van dienst zijn? Want hoe beter we de planten kunnen helpen, des te groter de gewasopbrengst zal zijn.”