

*Huisjes van de zandkasteelworm.  
Onder water iets lijmen is voor de  
natuur geen probleem.*

**INSPIRED BY NATURE**

# CHEMICI KIJKEN AF BIJ DE NATUUR





Schone energie, slimme materialen en groene grondstoffen, de natuur heeft het allemaal al uitgevonden. Chemici kijken er bewonderend naar. Niet om te kopiëren – “meestal hoeft het niet zo ingenieus” – maar om ideeën te pikken.

Tekst: Marga van Zundert

**F**antastisch, ‘bloedmooi’, Nederlandse chemici bewonderen de schoonheid van Moeder Natuur. Maar na ‘prachtig’ volgt steevast ‘ingenieus’ of ‘geniaal’. Het enzym, het zaaddoosje of de worm die ze zo bewonderen, hangt niet opgeprikt en ingelijst aan de muur zoals een tropische vlinder; de bewondering geldt vooral voor het kunstje dat de natuur flikt. “Hydrogenase-enzymen zijn zo efficiënt. Duizenden protonen per seconde, zonder dat daar extra energie voor nodig is. Dat is echt ongekend efficiënt”, vertelt een haast jaloers klinkende Joost Reek, hoogleraar supramoleculaire katalyse (UvA). Universitair hoofddocent polymeerchemie Marleen Kamperman (Wageningen UR) praat weer lyrisch over slakken. “Ze glijden zonder problemen over een scheermesje. Hun slijm laag is zacht, maar taai. Hoe vernuftig is dat?” En vraag Jan van Maarseveen, hoogleraar biogebaseerde organische synthese, naar zijn bio-inspiratie en hij barst los over CO<sub>2</sub>. “Wist je dat de koolstof die jij nu uitademt al miljarden jaren de wereld rondgaat? Die heeft eerder in bomen, dinosaurussen en wellicht in Cleopatra gezeten. Koolstof maakt maar 0,03 procent uit van deze wereld, maar is de belangrijkste bouwsteen van de hele natuur. Alles, echt alles, wordt gerecycled.”

### Gekko-poten

De natuur levert al langer inspiratie. Klittenband is een bekend succesvoorbeeld van *biomimicry*. De kromme haakjes zijn afgekeken van kleeftkruid. De nanohaartjes op de zolen van gekko-poten zijn gekopieerd voor sterk plakband en robot handen die ruimtepuin wegvangen. En het lotusbloemblad waar waterdruppels als parels op liggen, inspireerde tot extreem waterafstotende, ►

# 'Slakken glijden zonder problemen over een scheermesje'

'zelfreinigende' materialen. Het tegenovergestelde principe levert de natuur overigens ook: oppervlakken die schoon blijven omdat ze altijd vochtig zijn. Vleesetende planten gebruiken de truc om insecten uit te laten glijden.

Inspiratie uit de natuur leidde ook tot de recente Nederlandse Nobelprijs voor Scheikunde. Hoogleraar organische chemie Ben Feringa (Rijksuniversiteit Groningen) laat in geen interview onvermeld dat zijn moleculaire auto het enzym ATPase als inspiratiebron heeft. ATPase is een roterend eiwit in de membraan van mitochondriën, de 'energiefabriek' van elke cel. Feringa: "Als het eiwit de ene kant op draait dan produceert het ATP, een energieopslagmolecuul. Draait het de andere kant op dan wordt ATP juist verbruikt. Dat vind ik waanzinnig mooi."

## Heilige graal

Een truc afkijken bij de natuur is echter zelden eenvoudig. "Je denkt dat je het doorgrondt," vertelt Kamperman (Wageningen UR), "maar wanneer je het dan in je laboratorium probeert na te doen, blijkt de natuur vaak nog vernuftiger en complexer dan je dacht." Zij vindt het dan ook wat arrogant te denken dat je miljarden jaren evolutie kan verslaan. "We leren vooral. En met die kennis ontwikkelen we nieuwe, nuttige materialen."

Andere chemici tonen minder ontzag voor Moeder Natuur. Evolutie is een willekeurig trial-and-error-proces zonder vooropgezet plan, stelt Reek. Terwijl de mens zijn her-

senen kan gebruiken om gericht een doel te bereiken. Bovendien beschikt een modern chemicus over een veel breder repertoire aan stoffen dan de natuur, die het moet doen met twintig verschillende aminozuren en wat sporenelementen. Ook Nathalie Katsonis, hoogleraar bio-geïnspireerde en slimme materialen in Twente, ziet wetenschap de natuur overtreffen: "Het enige criterium in de evolutie is overleven. Een vinding die goed genoeg werkt, is voldoende. Lang niet alle natuurlijke processen zijn superefficiënt, zoals mensen vaak denken."

Fotosynthese is een voorbeeld. Gras benut nauwelijks 1 procent van de energie van het zonlicht dat erop valt. Suikerbiet is met 3 tot soms 8 procent een van de meest efficiënte gewassen. Fabriekszonnecellen zitten daar ruim boven met zo'n 15 procent; het wereldrecord ligt zelfs op 48 procent, behaald met een meerlaagse (*multi-junction*) cel. Maar zonnecellen leveren stroom, terwijl planten de zonne-energie chemisch vastleggen door CO<sub>2</sub> met water om te zetten in glucose, een belangrijke energiebron en bouwstof voor de plant.

En dát kunstje onder de knie krijgen, is nog een heilige graal in de chemie. Een handzame brandstof maken uit CO<sub>2</sub> zou namelijk het klimaatprobleem, het opraken van aardolie en het opslagprobleem voor wind- en zonne-energie oplossen. Een belangrijk deel van het katalysatoronderzoek van Reek (UvA) richt zich op de kunstmatige fotosynthese. "Licht invangen,

ladingscheiding, protonen en elektronen uit water vrijmaken. Het is echt complex: een hele serie processen die allemaal op elkaar afgestemd moeten zijn." Van Maarseveen: "Maar het hoeft niet zo ingenieus als in de natuur. Methanol is al prachtig." Hij roemt het werk van Harvard-hoogleraar Daniel Nocera, pionier en uitvinder van het 'kunstmatige blad' dat zonlicht omzet in alcoholen. "Ik vind het echt treurig dat de wereld nog niet druk is dit soort onderzoek op te schalen. Onbegrijpelijk dat daar geen miljarden beschikbaar voor zijn."

## Alles recyclen

Reek richt zich op synthetische varianten van de enzymen in de fotosynthese. "We snappen welke katalytische groepen ze gebruiken, maar de echte clou zit in de eiwitmantel die de reactanten precies oriënteert. Dat concept wil ik kopiëren. Maar met chemie die veel breder is dan de natuur biedt. Met koolmonoxide en waterstof aldehyden uit alkenen maken, kunnen enzymen bijvoorbeeld niet. Wij wel. Ik zie lab en natuur als complementair." Kamperman en Katsonis vertalen bijzondere natuurlijke materialen in synthetische varianten. Kamperman bestudeert zandkasteelwormen om chirurgische lijm te maken. Zaadozen inspireren Katsonis tot 'explosieve' materialen. "Een zaadoos schiet zaden met grote kracht weg. Hoe lukt ze dat? Dat idee vertalen wij naar kunststoffen." Katsonis gaat het uitdrukkelijk om slimme materialen: stoffen die reageren op hun omgeving, zich kunnen aanpassen. "Alle biologische materialen kunnen dat, maar wij leren het pas." Net als recyclen, vult Van Maarseveen aan. "Over twintig jaar is de aardolie op. Dan moeten we efficiënt biomassa kunnen omzetten in geschikte grondstoffen voor de chemische industrie. De natuur weet al hoe, die recyclet alles."



## ZELFORGANISERENDE KATALYSATOREN = AFKIJKEN BIJ ENZYMEN

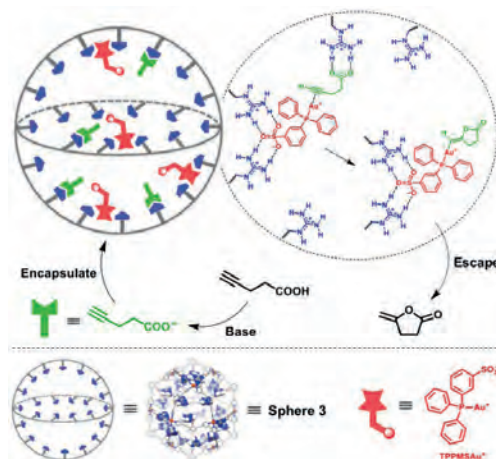


Joost Reek.

**H**et hart van elk enzym is de katalytische holte. Daar binden de uitgangsstoffen en vindt de reactie plaats. Katalytische groepen spelen natuurlijk een cruciale rol. Maar het hele enzym doet mee, benadrukt Joost Reek, hoogleraar supramoleculaire katalyse (UvA). De eiwitmantel 'duwt' de reactanten in de ideale positie om te reageren en is zo geconstrueerd dat het reactieproduct niet blijft plakken. Dat moet immers plaatsmaken voor nieuwe reactanten.

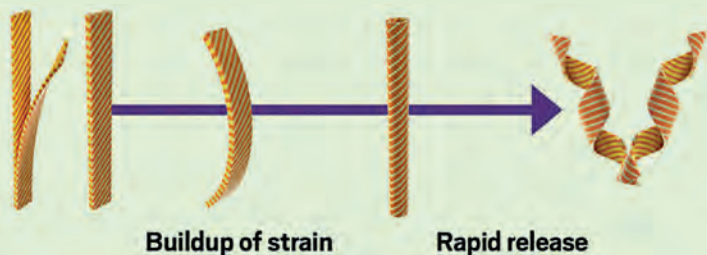
Wie een synthetisch enzym wil maken, moet dus al die aspecten kopiëren. Reek puzzelt zelforganiserende systemen in elkaar die enzymen nabootsen. Het gaat om moleculen die zich spontaan organiseren tot kubus- of bolvormige structuren. Binnenin is plaats voor de katalysator. En in de voorgeorganiseerde holte kunnen de reactanten snel en selectief reageren.

Een recent voorbeeld is een flexibele kubus of kooi opgebouwd uit 24 identieke moleculen. Ze vinden elkaar door palladium-coördinatie. Binnenin zitten 24 positief geladen guanidinegroepen rondom de centrale holte. Die ruimte vult Reek deels op met een goudkatalysator die stevig bindt door waterstofbindingen en een negatieve sulfonaatgroep. Ook acetyleenzuur zoekt de positieve holte op en cycliseert daar dankzij het goud. Het reactieproduct is een lacton dat (ongeladen) snel plaatsmaakt voor een nieuwe reactant.



*Schematische weergave van het werkingsprincipe van de nanoconcentrator. The gold(II) catalysts (drawn in red) are located in the sphere. Once the substrate (in black) is deprotonated the anionic substrate (in green) enters the sphere to pre-organize close to the catalyst via hydrogen bonding to the guanidine-binding site (displayed in blue). After rapid conversion of the substrate, the neutral cyclic product leaves the sphere.*

## SPRINGENDE MATERIALEN = AFKIJKEN BIJ ZAADDOSJES



*De stroken willen in tegengestelde richting krimpen als er licht op valt. Spanning bouwt zich op totdat de verbinding breekt: de stroken schieten van elkaar en elk krult zijn eigen kant op.*

**E**en strookje staat rechtop in een klemmetje. Het licht gaat uit, spot aan. Het strookje buigt en kronkelt wat, maar richt zich snel weer op. Het staat fier overeind tot het plots uiteen barst in twee losse, gekrulde stroken. Het synthetische zaaddoosje van Nathalie Katsonis, hoogleraar biogeïnspireerde materialen in Twente, is gesprongen.

Planten hebben geen handen of voeten om hun zaden te verspreiden. Een van de oplossingen die de evolutie bedacht is zaden weg kata-

pulteren. Wanneer zaaddozen uitdrogen, ontstaat er spanning op de naden. Dat komt doordat over de bladen die het doosje vormen vezels lopen die in loodrecht-op-elkaarstaande richting krimpen. De spanning stijgt totdat de naad zwicht. Het doosje barst razendsnel open en zaden vliegen rond. 'Engineering strain', noemt Katsonis het: spanning verzamelen om die in een explosieve, snelle beweging te laten vrijkomen. Katsonis lukt het met synthetische materialen. Ze creëerde een speciale 'gestrepte'

kunststof. In het materiaal wisselen geordende en ongeordende vloeibaar kristallijne delen elkaar af. En het bevat moleculaire 'schakelaars' met lichtgevoelige azobenzengroepen. Wanneer licht op het materiaal valt, krimpen de geordende strepen sterk in de lengterichting door *cis-naar-trans* fotoisomerisatie. Een ongeordende streep krimpt nauwelijks omdat de schakelaars in alle richtingen liggen. Katsonis knipte stroken van het materiaal waarbij de strepen in een hoek van 45 graden over de strook lopen. Wanneer er licht op schijnt, krullen ze op tot links- of rechtshandige helices, al naar gelang de richting van de strepen. Twee van deze stroken omgekeerd op elkaar geplakt imiteren het principe van een zaaddoos. Ze willen krimpen in tegengestelde richting wanneer er licht op valt, maar houden elkaar tegen. Spanning bouwt zich op totdat de verbinding breekt: de stroken schieten van elkaar en elk krult zijn eigen kant op.



Nathalie Katsonis.

## MOLECUUL OP WIELEN = AFKIJKEN BIJ ATPase

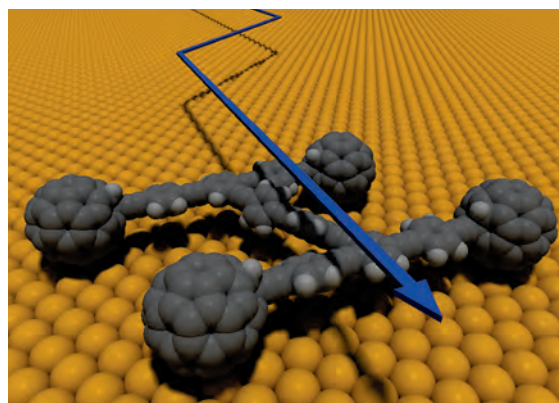


Ben Feringa.

In 1999 presenteerde Ben Feringa, hoogleraar organische chemie aan de Rijksuniversiteit Groningen, als eerste een door licht aangedreven molecuulair motortje. Het bestond uit een in één richting draaiend deel dat met een asje is verbonden aan een ander deel. Net als vele anderen zag Feringa er een wiel in. Vier stuks aan een molecuulair chassis en je hebt een moleculaire auto.

En dat lukte na veel experimenteren. In 2011 sierde de eerste moleculaire fourwheeldrive de voorpagina van Nature. Het kleinste mogelijke wagentje (vier nanometer lang, twee nanometer breed) rijdt niet op licht, maar elektrisch. Een prestatie van formaat. Niet eens zozeer vanwege de vijftien synthesestappen, maar vooral vanwege de getoonde controle over de moleculaire wereld. Feringa ontving in 2016 de Nobelprijs voor de Scheikunde voor de moleculaire machientjes, samen met zijn Franse collega Jean-Pierre Sauvage en de Brit James Fraser Stoddart.

Grote inspiratiebron voor Feringa was het eiwit ATPase, een onmisbaar enzym in de energiehuishouding van al het leven op aarde. ATPase was voor Feringa hét bewijs dat moleculaire motors bestaan en



Feringa ontving in 2016 voor de moleculaire machientjes de Nobelprijs voor de Scheikunde.

aan te sturen zijn. Hij bouwde er een met totaal andere chemie. De motors zijn geen eiwitten, maar bestaan uit helixvormige groepen, waarbij chiraliteit ervoor zorgt dat de motor linksom of rechtsom draait onder invloed van licht. Uiteindelijk doel is het maken van moleculaire technologie: dynamische materialen, machines of robotjes. Structuren die bewegen, zich aanpassen en werk verrichten op een niet eerder toegankelijke schaal. ■

*'Alle biologische materialen zijn slim, maar wij leren het pas'*



Zandkasteelwormen metselen hun onderwaterhuisjes op elkaar tot een waar 'kasteel'.

Foto: Shutterstock



Marleen Kamperman.

## ONDERWATERLIJM = AFKIJKEN BIJ DE ZANDKASTEELWORM

Zeepokken en mosselen plakken zichzelf vast op rotsen en scheepsrompen. Onderwater iets lijmen is voor de natuur geen probleem. Universitair hoofddocent polymeerchemie Marleen Kamperman (Wageningen UR) kijkt dat kunstje af bij zandkasteelwormen, die hun huisjes gezellig op elkaar metselen tot een waar 'kasteel'. De zandkasteelworm metselt met een zelfgemaakte tweecomponentenlijm. Positief- en negatief-geladen eiwitten en suikers worden opgeslagen in speciale blaasjes. Bij het metselen scheidt de worm de vloeibare stoffen uit. Dankzij de tegengestelde ladingen spoelen ze niet weg in zee. Binnen een halve minuut hardt het goedje uit, waarbij zandkorrels worden verlijmd tot een nieuw, slurfvormig appartement. Kamperman: "Wij zoeken een lijmsysteem op basis van hetzelfde

principe. Dus een mengsel van positief- en negatief-geladen materialen die in een vochtige omgeving uithardt door cross-linking." Voor medische toepassingen is een mengsel ideaal dat vloeibaar is bij kamertemperatuur en uithardt door lichaamswarmte. Hechten is dan een kwestie van de lijm aanbrengen, de wond sluiten en eventjes wachten. Kamperman werkt met methacrylaten en methylacrylamides. Dat geeft allereerst vragen als: Heeft het materiaal de juiste mechanische eigenschappen? Hoeveel ladingen zijn er nodig? En hoeveel cross-linking is ideaal? Is het principe duidelijk, dan volgt het testen van de bio-compatibiliteit. Behalve in het ziekenhuis komt de vochtbestendige lijm wellicht ook van pas voor het stickeren van diepgevroren vlees of bloedzakken, denkt Kamperman.