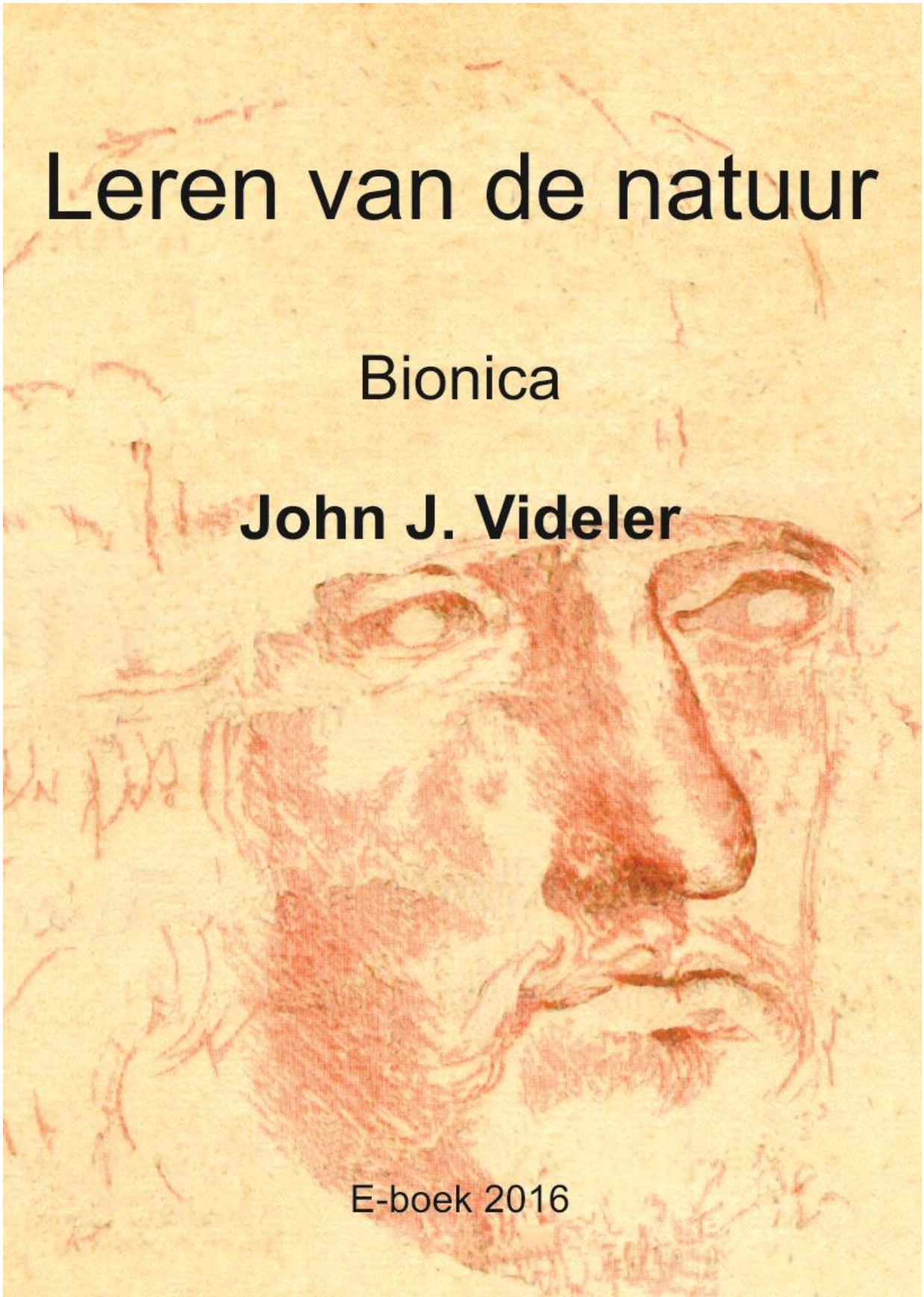


# Leren van de natuur

Bionica

**John J. Videler**

E-boek 2016



John J. Videler  
**Leren van de natuur**  
*Bionica*

E-boek, mei 2016, © John J. Videler  
Herziene en uitgebreide versie van 'Bionica' (Paperback: Atlas, 2010)  
ISBN 978-90-809453-0-2  
NUR 100  
Uitgeverij JOEP vof , Noordlaren

## **Inhoud**

<b>1. Hoe kunnen we van de natuur leren?</b>	6
Relaties tussen vorm en functie	6
Toekomstmuziek	8
Nieuwe antibiotica	11
Omgekeerde bionica	13
<b>2. Natuurlijke selectie en evolutie</b>	14
Het ontstaan van een nieuwe soort	15
Het ontstaan van diversiteit	17
Ontwerpen met de evolutiestrategie	19
Aanpassingen van de verschijningsvorm tijdens het leven	21
<b>3. Biologische bouwkunst</b>	22
Levende bouwstenen	22
Het concept eencellig	25
Bouwplannen in het dierenrijk	28
De bouw van planten	32
Vijfassig symmetrisch	35
Groeien en bouwen	36
Raten van de honingbij	39
Airconditioning in de natuur	41
<b>4. Bionica voor viskwekers</b>	44
Natuurlijk gekweekte vis	44
Eetbare zwemspieren	46
De ontwikkeling van witte vezels	47
Zwemmen van larve tot volwassen vis	48
Ecologische aspecten van de voortplanting van vissen	49
Praktische oplossingen	52
<b>5. Mobiliteit</b>	55
Wat is bewegen?	55
Het voorkomen van files en botsingen	58
Natuurlijke verkeersregels	60

<b>6. Filteren</b>	63
Filteren met zweepharen en trilharen	64
De oudste filters op aarde	67
Geëvolueerde alternatieve technieken	69
Filterende reuzen	72
<b>7. Boren en Graven</b>	75
Biobaggeren	75
Ondermijnen, boren en graven	79
Boren met schelpen	80
Tunnels in zachte bodems	83
<b>8. Bionica voor wedstrijdzwemmers</b>	87
De zwemmende mens.	87
Krachten op een zwemmer	88
Wrijvingsweerstand	90
Vormweerstand	91
Weerstand door de zwembeweging	91
De rompsnelheid	93
Het keerpunt	94
Meettechnieken	94
Zwempakken	96
<b>9. Vliegkunst</b>	100
De eerste bionicus	100
Gevaarlijke vliegkunst	102
De mens vliegt	104
Opkomst van de luchtvaart	105
De werking van een conventionele vleugel	107
Kan het ook anders?	109
De techniek van een extreme vlieger	110
Vliegen is niet moeilijk	113
<b>10. Extreme aanpassingen</b>	117
Zeezoogdieren	117
De potvis	118
Reconstructie van een duik	120

Extreme aanpassingen van de zwaardvis	122
Nieuwe ontdekkingen	125
<b>Bibliografie</b>	128
<b>Eenheden en afkortingen</b>	134
<b>Dankbetuiging</b>	136

# 1. Hoe kunnen we van de natuur leren?

Door biologisch onderzoek te doen als we op zoek zijn naar bruikbare nieuwe ideeën waarmee maatschappelijke en technische problemen kunnen worden opgelost. Het gaat er daarbij niet om de natuur te imiteren maar om haar principes te doorgronden en ervan te leren. (Min of meer synonieme termen voor deze tak van wetenschap zijn: bionica, biomimicry en biomimetica)

Leren van de natuur gaat veel verder dan het opdoen van inspiratie. Gedetailleerde studies van structuur en functie van biologische fenomenen maken het mogelijk om technieken te gebruiken die ontstaan zijn door evolutionaire selectie processen. Het natuurlijke ontwerp is vaak multifunctioneel en niet altijd duidelijk herkenbaar. Van elk organisme valt wel wat te leren en het is de taak van de onderzoeker om uit te vinden wat dat is.

De evolutie werkt anders dan ingenieurs die hun ontwerpen vanuit het niets opbouwen. Evolutie is gebaseerd op de selectie van iets dat in de huidige omgeving beter is dan de bestaande ontwerpen, en niet op selectie van perfecte oplossingen. Er is geen vooropgesteld plan. Anders dan ingenieurs heeft de natuur alle tijd; het ontwerpproces is continue en neemt honderden miljoenen jaren in beslag. Extreme aanpassingen zijn vaak veelbelovend omdat dominante selectiecriteria hebben geleid tot duidelijke oplossingen voor bepaalde problemen.

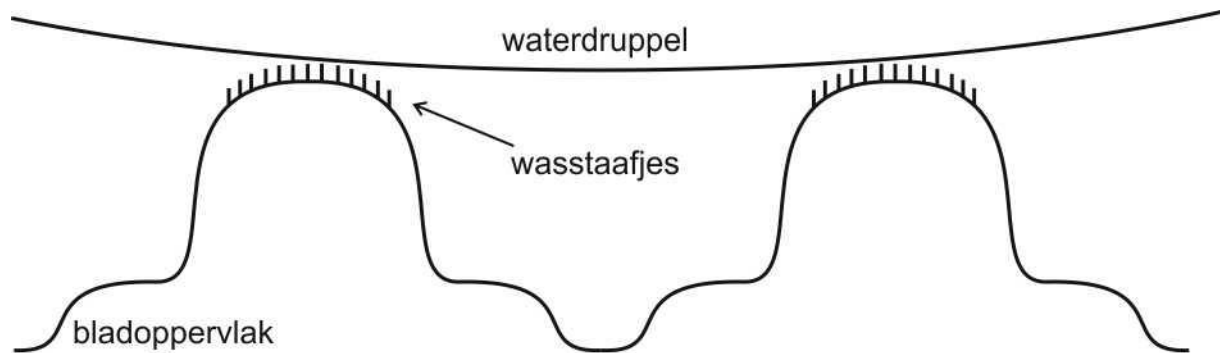
Evolutie is het belangrijkste proces op aarde; hoofdstuk 2 gaat daar verder op in.

Dit inleidende hoofdstuk laat enkele voorbeelden zien van wat de natuur ons kan leren met de bedoeling om de variatie in mogelijkheden te illustreren; andere hoofdstukken zijn gewijd aan specifieke interessegebieden.

## Relaties tussen vorm en functie

Pas als je de relatie tussen vorm en functie door hebt kun je die gebruiken en abstraheren. Klittenband is een goed voorbeeld. De Zwitserse uitvinder Georges de Mestral ergerde zich aan de klitten die aan zijn broek en op zijn hond plakten na de wandeling. De uitgebloeide bloemhoofdjes bevatten de zaden van de grote (*Arctium lappa*), of de kleine (*A. minus*) klit. Onder de microscoop zag hij hoe de haakjes op de hoofdjes verbinding maakten met stof of haren en imiteerde dat proces. In 1948 meldde hij deze uitvinding van de natuur als patent aan.

Een ander voorbeeld is het zelfreinigende lotusblad effect. De Duitse botanicus Wilhelm Barthlott is een systematicus die in de jaren tachtig van de vorige eeuw microscopische bouw van bladoppervlakken gebruikt om planten te classificeren. Foto's gemaakt met een Scanning Elektronenmicroscoop laten zien dat geen twee soorten planten dezelfde fijne structuren hebben op het bladoppervlak. Schubjes, stekeltjes, haartjes, knobbeltjes- vaak van wasachtige aard - komen in oneindige variaties voor. Op een gegeven moment realiseert Barthlott zich dat die complexe microstructuren geen toevallig opgeslagen afvalproducten zijn en er ook niet zijn om het leven van de systematicus te vergemakkelijken. Ze moeten een functie hebben die de kans op vruchtbare nakomelingen vergroot. Die van scherpe stekeltjes op waterplanten is niet moeilijk te raden: kleine grazende vissen worden erdoor weerhouden de plant te verorberen. De bladeren van de heilige



*Schematische tekening van een waterdruppel op een lotusblad.*

lotus (*Nelumbo nucifera*) zijn waterafstotend (hydrofoob). Water rolt eraf als ronde druppels en het blad blijft droog. Bij een sterke vergroting blijkt het oppervlak driedimensionaal complex te zijn. Het bestaat uit bobbels met op elke bobbel een klein bobbeltje. Bij een nog sterkere vergroting zien we hoe kleine rechtopstaande wasstaafjes het geheel bedekken. Barthlott en zijn medewerker Christoph Neinhuis leggen de link tussen de microstructuur en de waterafstotende eigenschappen van lotusbladeren. Onder de microscoop is te zien wat er gebeurt. Water hecht niet aan het blad en vormt ronde druppels. Hoe dat komt is niet zonder meer duidelijk.

Water ( $H_2O$ ) moleculen bestaan uit één zuurstof- en twee waterstofatomen. In elk molecuul worden elektronen aangetrokken door het grotere zuurstof atoom dat daardoor licht negatief geladen wordt. De waterstof atomen worden daardoor een beetje positief. Deze verdeling van de lading maken een watermolecuul polair. Tussen watermoleculen worden de ladingsverschillen geneutraliseerd doordat tegenovergestelde ladingen dicht bij elkaar gaan liggen. Dat is de basis voor de neiging tot het vormen van druppels. Een watermolecuul is 0,5 nm (nanometer) groot. De kleinste druppels hebben doorsneden in de orde van 1 mm en bestaan uit miljoenen moleculen. De aantrekkingskrachten tussen de moleculen veroorzaken oppervlaktespanning en de neiging om bolvormig te zijn met de kleinste verhouding tussen oppervlakte en volume. Wanneer watermoleculen in aanraking komen met moleculen zonder lading, zoals de lange neutrale ketens van de was op het oppervlak van het lotusblad, blijven ze aan elkaar plakken en maken gebruik van de elkaar aantrekkende ladingen om neutraal geladen druppels te vormen.

Die druppels worden gedragen door de wasstaafjes. De afstand tussen de staafjes is zo klein dat water er niet tussen kan. De dikte van zo'n staafje is 0,15  $\mu m$  en de afstand ertussen ongeveer driemaal de dikte. De druppel rust op de toppen van de staafjes als een fakir op een spijkerbed. Daardoor is het totale oppervlak waarover de druppel het blad raakt slechts 6% van het aanrakingsoppervlak tussen een druppel en een glad blad zonder microstructuren. De bobbels zorgen ervoor dat dit percentage gereduceerd wordt tot 0.7%. Het gevolg is dat de druppel heel gemakkelijk van het blad afrolt. Daarbij blijkt dat stofdeeltjes die zich op het blad bevinden door rollende druppels worden opgenomen. Het blad blijft

daardoor schoon. Het evolutionaire voordeel voor de lotusbloem is duidelijk. Stofdeeltjes op een blad houden zonlicht tegen waardoor de aanmaak van voedsel in het blad wordt geremd (verderop meer over dit bijzondere proces). Voortplantingsorganen worden geremd in hun ontwikkeling wanneer er te weinig voedsel is. Ook spoelen sporen van ongewenste ziekteverwekkers bij elke regenbui weg voor ze zich kunnen hechten. Schadelijke schimmels zoals meeldauw krijgen minder kans om het blad aan te tasten.

Het lotuseffect berust op de bouw van microstructuren op het oppervlak van de bladeren. Een juiste nabootsing daarvan levert technische oppervlakken op met dezelfde twee eigenschappen: afspoelen met water maakt ze schoon terwijl ze toch niet nat worden. Barthlott heeft sinds 1998 het patent op de toepassingen daarvan die samen met industriële partners zijn ontwikkeld. Er zijn nu lakken die auto's schoon- en drooghouden en verfsystemen waarmee gevels van gebouwen worden behandeld. Er zijn ook zelfreinigende dakpannen in ontwikkeling. Het principe waarop het lotuseffect berust, wordt hierbij gebruikt zonder de microstructuren van het lotusblad precies na te bouwen.

Er zijn veel meer voorbeelden van kennis die we halen uit de natuur en die we geleerd hebben te gebruiken, zoals het lopen tegen een muur of over het plafond: de geheimen van de vlieg en de gekko zijn door biologen ontraadseld en worden toegepast. Maar er zijn nog veel meer niet-geëxploiteerde mogelijkheden. Twee daarvan zijn energiebronnen die we graag zouden aanboren maar waarvoor de kennis nu nog ontbreekt.

## **Toekomstmuziek**

De levende natuur verbruikt energie. Wij dus ook en niet alleen maar voor onszelf maar ook om ons leven comfortabeler te maken, luxeverbruik dus. Omdat we er zo veel van denken nodig te hebben wordt de energievoorziening als een wereldwijd probleem ervaren. Toch is er overal op aarde meer dan voldoende energie beschikbaar. Onze belangrijkste primaire energiebron, de zon, schijnt overal.

Hoe komen organismen aan hun energie? De meesten zijn direct of indirect afhankelijk van zonne-energie. Maar in de jaren zeventig werden in de diepzee leefgemeenschappen ontdekt die het naar rotte eieren ruikende waterstofsulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) uit het binnenste van de aarde als primaire bron gebruikten. Die gemeenschappen zijn niet afhankelijk van zonlicht.

Directe instraling van zonlicht produceert warmte, maar om energie op te kunnen slaan moeten er energierijke verbindingen worden gemaakt. Dat kunnen alleen planten; zij beschikken in hun cellen over bladgroen, chlorofyl. Dat is een zeer complexe organische verbinding die de plant in staat stelt om van kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ), water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) en zonne-energie, koolhydraten ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) en zuurstof ( $\text{O}_2$ ) te maken. Dat proces heet fotosynthese en gaat in formule als volgt:



De energie zit opgeslagen in de koolhydraten en kan er door verbranding met zuurstof weer uit vrijgemaakt worden. Dan gaat het proces de andere kant op en komt er  $\text{CO}_2$  vrij. Dieren hebben geen chlorofyl en kunnen geen fotosynthese

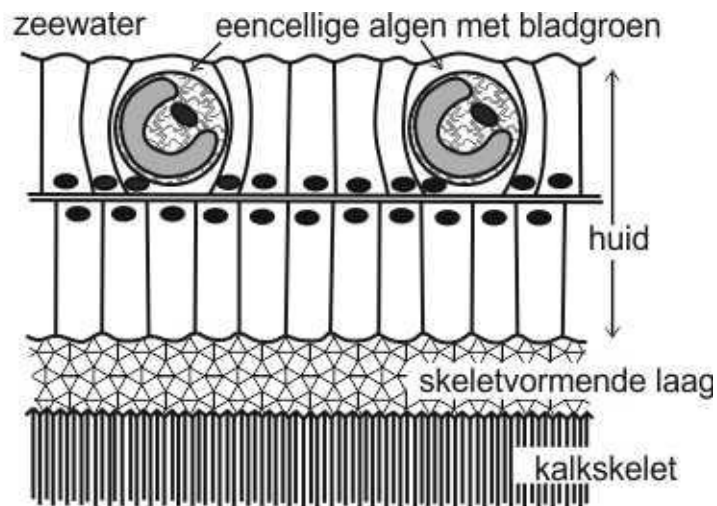


bedrijven. Ze zijn voor hun energievoorziening afhankelijk van planten. Die kunnen ze opeten om eraan te komen. Of ze kunnen de planteneters opeten, hoewel dat minder efficiënt is, want er zit een stap tussen waarin verliezen optreden. Het principe is bekend; zo komen wij mensen immers ook aan onze energie. Toch is dat niet de enige mogelijkheid die dieren kunnen benutten. Er is een slimmere methode die op aarde vele malen onafhankelijk is ontstaan. Tal van diergroepen zijn in symbiose gaan leven met planten. Diverse soorten eencellige algen leven opgesloten in dieren. Die zorgen ervoor dat de algen CO<sub>2</sub>, water en zonlicht krijgen en profiteren zelf van de koolhydraten die er ontstaan. Er zijn tal van eencellige dieren, sponzen, koralen, kwallen, platwormen en weekdieren die symbiose met algen zijn aangegaan.

Als voorbeeld kunnen rifvormende koralen dienen. Die koralen zijn kolonievormende bloemdieren uit de stam van de neteldieren. Ze leven in de tropen in ondiepe zeeën en vormen daar uitgestrekte riffen door hun vermogen om een hard kalkskelet te maken. Normaal gesproken kunnen bloemdieren met hun tentakels, die van netelcellen zijn voorzien, levende prooien verdoven, vangen en opeten. Ze vangen dan hun voedsel op dezelfde wijze als de nauw verwante kwallen.

De meest extreem aangepaste koralen doen dat echter niet meer maar gebruiken de energie die de ingebouwde algen leveren waarmee ze in symbiose leven. De eencellige algen zitten vlak onder de huid van de koralen.

Beide organismen hebben voordeel van het samengaan. De koralen zorgen door hun uitwendige bouw voor optimale instraling van zonlicht en leveren extra hoge concentraties CO<sub>2</sub>. Ze doen dat volgens een bijzonder maar nog niet geheel



*Schematische doorsnede door een rifbouwend koraal.*

begrepen proces. Diep in het koraal wordt het kalkskelet afgezet. Daarbij gaan positief geladen kalkionen (Ca<sup>++</sup>) verbinding aan met negatieve carbonaationen (CO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en vormen calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>): een stabiele stof die als skelet dient. Carbonaationen voor de skeletvorming en CO<sub>2</sub> voor de fotosynthese maken deel uit van een reeks stoffen die met elkaar in evenwicht zijn in water:



De reacties in deze reeks kunnen meer of minder naar rechts of links verlopen. Voor de fotosynthese is het gunstig als het evenwicht verschoven is naar links; voor de kalkproductie moet het evenwicht juist naar de andere kant toe. Bij het neerslaan van kalk als calciumcarbonaat wordt  $\text{CO}_3^{--}$  onttrokken aan het water en komen er  $\text{H}^+$  ionen vrij. Op een of andere manier, hoe is niet bekend, komen die terecht op de plaats waar fotosynthese aan de gang is. Daar verschuiven ze het evenwicht van de reeks naar links en verhogen het  $\text{CO}_2$ -gehalte in het water en bevorderen daarmee de aanmaak van voedsel door fotosynthese. Zo profiteren zowel het koraal als de commensaal van elkaars aanwezigheid.

Er wordt op tal van laboratoria hard gewerkt om erachter te komen wat de rol is van chlorofyl bij de fotosynthese. Zodra we dat weten en het na kunnen bootsen is het energieprobleem opgelost. Dan hoeven we niet meer te zoeken naar manieren om van de zonne-energie afgeleide vormen zoals wind, getijden en golven te exploiteren. Die secundaire bronnen zijn per definitie minder efficiënt dan de bron zelf: de zon.

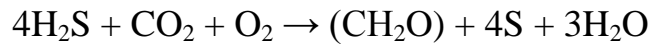
Algen implanteren in onze huid is ook geen voor de hand liggende oplossing want het gaat ons om vrije energie waarmee we onze speeltjes kunnen laten werken.

De bovenstaande reeks evenwichtsvergelijkingen zet ook de recente klimaatdiscussie in een ander daglicht. Het  $\text{CO}_2$  gehalte in de atmosfeer wordt gebufferd door de beschreven processen in het water. Hogere concentraties bevorderen de aanmaak van koolhydraten en calciumcarbonaat. Het massaal verbranden van fossiele brandstoffen verhoogt de concentratie  $\text{CO}_2$  op aarde. Toch was deze in de geologische geschiedenis zelden zo laag als nu. In de tijd dat dinosaurussen de wereld bevolkten was de concentratie 8 maal zo hoog, en tijdens het Cambrium, 500 miljoen jaar geleden, wel 20 maal. De laatste 50 jaar is de concentratie met een kwart gestegen. Uit de geologische geschiedenis blijkt geen verband tussen de  $\text{CO}_2$  concentraties en de temperatuur op aarde. Het klimaat op aarde is nooit constant geweest en hangt af van veel slecht begrepen factoren.

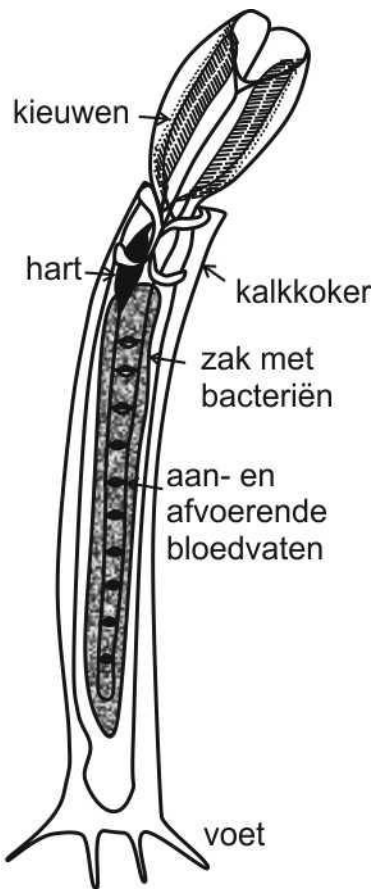
Er is op aarde nog een energiebron die door organismen wordt gebruikt en die niets met de zon van doen heeft. In 1977 ontdekte de bemanning van de Amerikaanse onderzoeksduikboot Alvin op enkele kilometers diepte bij vulkanisch actieve gebieden op midoceanische ruggen langs de Californische kust, grote concentraties leven. Op die plek komen twee aardplaten tegen elkaar. De meest opvallende dieren waren tot 2,5 meter lange wormen in witte kokers met rode pluimen in groepen rechtop bij elkaar. Ze bleken tot de baardwormen te horen, wormen zonder mond of darm. Tijdens het eerste jaar van mijn studie biologie in 1962 was ik ze tegengekomen als een onbelangrijke groep bij het practicum 'overzicht dierenrijk'. Het waren minuscule wormpjes met, wat mij betrof als bijzondere kenmerken, het ontbreken van mond en darm en een met buikvlies bekleedde lichaamsholte (hebben wij ook).

De reuzenkokerwormen zijn *Riftia pachyptila* genoemd. Ze maken rechtopstaande kokers van kalkhoudend materiaal. De rode pluimen blijken goed doorbloede kieuwen te zijn met wel 200.000 dunne lamellen met een heel groot gezamenlijk oppervlak. De wormen hebben een groot hart en een goed ontwikkelde bloedsomloop. Het grootste deel van het lichaam wordt ingenomen door de bo-

vengenoemde holte met een wand die goed voorzien is van bloedvaten. Het bloed wordt vanaf de kieuwen aan een zijde van de holte aangevoerd en aan de andere kant weer afgevoerd. De grote holte zit vol bacteriën. Die bleken bijzonder want ze maken van waterstofsulfide ( $H_2S$ ) met  $CO_2$  en zuurstof energierijke koolwaterstofverbindingen. Het zijn zwavelbacteriën die als volgt chemosynthese bedrijven:



De wormen halen met hun kieuwen waarschijnlijk  $CO_2$  en zuurstof uit het water en vervoeren deze naar de bacteriën. Waterstofsulfide halen ze waarschijnlijk met een soort wortels uit de bodem en leveren het af in de zak met bacteriën. De wormen leven van de productie van koolwaterstoffen en doen het daar zeer goed op. Het zijn de snelst groeiende ongewervelde dieren in zee, ze kunnen 1,5 meter worden in twee jaar.



Bouwprincipe van de reuzenkokerworm *Riftia*.

Er zijn nu ook garnalen en mosselen ontdekt die van de productie van zwavelbacteriën leven.

Ook deze eindeloze energiebron kunnen we aanboren zodra we weten hoe de bacteriën het doen. Om de bacteriën, net als de baardwormen, te gebruiken in een grote biologische installatie is natuurlijk ook een optie, maar waar haal je voldoende  $H_2S$  vandaan? Mogelijk kun je biogasvergistinginstallaties er op die manier van verlossen.

Dit zijn voorbeelden van interessante biologische processen die we nog niet goed doorhebben. Bij het zoeken naar bionische toepassingen kunnen we het beste uitgaan van alle kennis die er al wel is.

In de natuur zijn extreme aanpassingen vaak het vruchtbaarst omdat overheersende selectiecriteria hebben geleid tot duidelijke aanpassingen. Technische vragen waarvoor ingenieurs oplossingen zoeken zijn vaak problemen waarmee de natuur ook ooit 'worstelde'. Natuurlijke selectieprocessen hebben oplossingen doen ontstaan.

Om te begrijpen hoe soorten en hun aanpassingen ontstaan, moeten we in de keuken van de evolutie kijken. Het is het belangrijkste proces op aarde. We kunnen er van leren wanneer we weten hoe het werkt.

## Nieuwe antibiotica

De medische wereld zit te springen om nieuwe antibiotica. Oude en nieuwe bacteriën blijken steeds vaker immuun tegen de bestaande bacteriedodende middelen te zijn. Maatregelen zoals het reserveren van bepaalde antibiotica voor het gebruik in ziekenhuizen tegen extreem resistente bacteriën blijken niet effectief te zijn.

Bacteriën vormen in de vrije natuur ook vaak een bedreiging waartegen na-

tuurlijke selectieprocessen afweermiddelen hebben ontwikkeld. Het gericht zoeken naar deze middelen behoort tot het domein van de bionica.

Mijn oudste dochter is biochemicus. Tijdens de eerste aanstelling na haar promotie zocht ze naar antibiotica in slijmnesten van Zuid-Amerikaanse boomkikkers. Stoffen die bacteriën doden bleken daar echter niet in te zitten. In dezelfde periode onderzochten mijn studenten het gedrag van papegaaivissen bij Bonaire.

Op het rif maken sommige soorten papegaaivissen elke avond een cocon van slijm waarin ze onbeweeglijk de nacht doorbrengen. Klieren in de kieuwholte produceren de grote hoeveelheden slijm die hiervoor nodig zijn. In de literatuur worden verschillende functies gesuggereerd. De cocon zou kunnen dienen om te voorkomen dat parasieten zich 's nachts op de huid van de vis vestigen. Er is geopperd dat het slijmomhulsel de geur van de vis camoufleert zodat predatoren daar niet op af komen. Hoogstwaarschijnlijk gebruiken ze het omhulsel ook als een alarmsysteem. Zodra de cocon wordt aangeraakt, worden ze wakker, schieten weg, en laten het slijm achter. Wat de functie ook moge zijn, de cocon dient de hele nacht intact te blijven. Op het koraalrif van Bonaire is de temperatuur van het water ook 's nachts rond de 30°C, en daarin gedijen bacteriën prima. Het kan bijna niet anders of antibacteriële stoffen zorgen ervoor dat de cocon de hele nacht onaangetast blijft.



*De slaapcocon van de blauwe papegaaivis.*

Voor het onderzoek werd het slijm van een blauwe papegaaivis (*Scarus vetula*) vroeg in de nacht verzameld door de cocon even aan te raken. De vis schoot er vandoor en er was meer dan voldoende slijm voor het onderzoek naar samenstelling en werking.

Mijn dochter stelde eerst vast waar dat slijm uit bestond. Tot ieders verbazing bestond het uit slechts één eiwit met een moleculegewicht van 21.000 Da (Da is de dalton, de moleculaire massa-eenheid). Nadere analyse toonde aan dat het een nog niet bekend eiwit was. Wij noemden het voor de grap pyjamicine en registreerden het officieel in de Europese databank EM-

BL onder het nummer P81557 met de omschrijving: 'Mucus envelope protein from *Scarus vetula*'.

Het bleek al bij lage concentraties de groei van verschillende bacteriën te remmen. We testten acht verschillende bacteriën; tegen zes daarvan werkte het slijm als antibioticum. De bekendste daarvan was de darmbacterie *Escherichia coli*. De andere zijn ziekteverwekkers bij tropische vissen.

De resultaten van het onderzoek zijn gepubliceerd in het *Journal of Fish Biology*, een internationaal wetenschappelijk tijdschrift. De farmaceutische industrie is vrij om die resultaten gebruiken, maar dat is nog niet gebeurd. Mogelijk

brengt de stijgende behoefte aan nieuwe antibiotica daar verandering in.

Naast pyjamicine moeten er in de natuur nog veel meer antibacteriële en antivirale stoffen actief zijn, want bij vrijwel alle organismen zijn afweersystemen geëvolueerd tegen dit soort ziekteverwekkers. Bionica kan ervoor zorgen dat de mens daar gebruik van kan maken.

### **Omgekeerde bionica**

Bionica kan zich niet ontwikkelen zonder voldoende kennis van natuurwetenschappen en van het functioneren van maatschappij en techniek. Moderne hulpmiddelen zoals goed toegankelijke leerboeken, snelle krachtige computers met tal van handige programma's en de wonderen van het internet, maken het mogelijk om de potenties die het vak altijd al had ten volle te benutten.

Inzichten in het functioneren van de natuur gaan snel vooruit. Het is voor één persoon vrijwel onmogelijk om alle voor bionica relevante wetenschappelijke artikelen die er verschijnen te lezen. Dankzij moderne hulpmiddelen wordt die kennis toegankelijk en kan worden benut. Een bionicus hoeft daarom niet alles te weten maar wordt wel geacht de kennis die hij nodig heeft te kunnen vinden.

Om biologische systemen te begrijpen ga je uit van bestaande kennis. Soms komt die uit onverwachte hoek, zoals blijkt uit het volgende voorbeeld.

Voor mijn promotieonderzoek aan vorm en functie van het zwemapparaat van vissen stuitte ik op de complexe structuur van de vissenhuid. Kruisende onrekbare vezels in de huid van vissen lopen diagonaal over het lichaam. De hoek tussen de vezels is ter hoogte van het midden tussen de boven- en onderkant ongeveer  $90^\circ$ . De functie van dit voor vissen universele vezelsysteem was nog onbekend.

Mijn vrouw maakt me erop attent dat in de kledingindustrie gebruik gemaakt wordt van biaisband of schuine bies. Dat is een schuin op de draad geknipte reep stof die dient voor afwerking van ronde randen. Ook een katoenen zakdoek rekt meer wanneer je langs de diagonaal trekt dan evenwijdig aan de richting van de draden. Hiermee was één functie duidelijk. De kruisende vezels zorgen ervoor dat de huid soepel de vorm van de vis volgt wanneer het dier zwemt en het lichaam krom trekt.

De onderliggende zwemspieren brengen echter ook krachten over via de huid naar de staartvin en met soepel meegeven lukt dat niet. Mijn garagehouder vertelde me dat diagonale onrekbare vezels in Michelin X- banden krachten overbrengen in de richting van de bissectrice van de hoek tussen de vezels. De op de juiste spanning opgepompte band kan daardoor heel goed krachten in beide richtingen (bij het optrekken en remmen) langs de diagonaal doorleiden.

Met deze kennis werd ook een tweede functie van de kruisende vezelsystemen bij vissen helder. Samentrekkende spieren zorgen voor de juiste spanning, waardoor vervolgens de huid krachten kan doorgeven langs de diagonaal van de vezelrichtingen naar de staart.

## 2. Natuurlijke selectie en evolutie

Ongeveer anderhalve eeuw geleden kwamen twee Britse geleerden, Charles Robert Darwin en Alfred Russel Wallace, er onafhankelijk van elkaar maar vrijwel tegelijk achter hoe soorten op aarde ontstaan: natuurlijke selectie drijft het proces van geleidelijke verandering dat nieuwe soorten oplevert. Dat proces noemen we evolutie.

Alle levende organismen hebben er vier miljard jaar over gedaan om te worden wat ze nu zijn. Het principe is heel simpel: hoe meer nakomelingen een organisme heeft hoe groter de kans is dat zijn erfelijke materiaal (opgeslagen in de genen) in de volgende generatie terecht komt. Er zit toevallige variatie in het genetische materiaal waardoor sommige nakomelingen beter aan de heersende omstandigheden aangepast zijn en zich succesvoller voortplanten dan andere. De afwijkende eigenschappen die zorgen voor de betere aanpassing worden doorgegeven aan de volgende generatie. De leefomgeving selecteert via het voortplantingssucces. Dat is een geleidelijk proces waarin tijd geen beperkende factor is.

Om het ontstaan van soorten en hun eigenschappen te begrijpen is het van het grootste belang inzicht te hebben in de selectiecriteria. Elke soort is aangepast aan de omstandigheden waarin hij leeft. Die aanpassingen gaan tot in de kleinste details. Extreme omstandigheden hebben vaak geleid tot bizarre aanpassingen. De natuurlijke selectieprocessen hebben immers honderden miljoenen jaren de tijd gehad om antwoorden te vinden op tal van vragen uit de steeds wisselende omgevingen. Dat heeft ertoe geleid dat we in de natuur vaak meerdere oplossingen kunnen vinden voor gecompliceerde technische problemen.

Zo is vliegen vele malen opnieuw geëvolueerd bij totaal verschillende groepen organismen en op fundamenteel verschillende manieren. Het vermogen om te zien is hier ook een voorbeeld van. Fundamenteel verschillend gebouwde complexe ogen zijn onafhankelijk van elkaar ontwikkeld bij insecten, inktvissen en gewervelde dieren.

Het is aan ons om de uitvindingen van de natuur te ontdekken en te gebruiken. Fundamenteel inzicht in de werkwijze van de evolutie is daarvoor een eerste vereiste.

Wanneer de omstandigheden veranderen passen nieuwe generaties zich aan door natuurlijke selectie. Om het geheel te doorzien moeten we dus zowel de organismen als de omstandigheden waarbinnen ze functioneren begrijpen. Uitgestorven soorten waren geen mislukte ontwerpen, maar waren juist uitstekend aangepast aan het ecosysteem waarin ze leefden. Het is dan ook onjuist om uitgestorven soorten te zien als tussenstappen in ontwikkelingen.

De richting van de evolutie wordt uitsluitend bepaald door veranderende omstandigheden. Evolutie is een continu proces, het tempo is variabel maar het proces gaat steeds door. Elk organisme draagt kenmerken met zich mee van het pad dat de voorouders hebben afgelegd. Het geheel van die kenmerken vormt het uitgangspunt voor aanpassingen als gevolg van veranderde omstandigheden en natuurlijke selectie. Hoe optimaal organismen zijn hangt af van de rigiditeit van de selectiecriteria en van het belang van functies voor het genereren van vruchtbare nakomelingen.

Ook diversiteit is zo ontstaan. Heel vroeg al ontwikkelden zich groepen organismen die in bouw en werking fundamenteel van elkaar verschilden. De bouwplannen zijn meestal duidelijk herkenbaar en maken een indeling van het leven op aarde in grote verwante groepen met eenzelfde bouwplan mogelijk.

De mens heeft enkele kenmerken die hem onderscheidt van de mensapen, maar hij heeft nog meer kenmerken die hem, als gewerveld dier, nauw verwant maken aan de primitiefste vissen: een langgerekt lichaam met gesegmenteerde spieren waarvan de vezels in de lengterichting lopen, aan weerszijden van een onsamendrukbare, zijwaarts kronkelende as. Aan de rugkant van die as ligt een langgerekte holle zenuwstreng die vooraan sterk verdikt is. De mond als ingang van een lange darm zit ook vooraan en de uitgang, als anus, achter in het lichaam.

De regenworm heeft ook zo'n darm, maar geen inwendig skelet. Hij ontleent zijn stevigheid aan lichaamsvloeistof onder druk. Het lichaam van de regenworm is opgedeeld in segmenten met per segment kring en lengtespieren om een met vloeistof gevulde ruimte. Het zenuwstelsel is ook anders georganiseerd. We zien een totaal ander bouwplan.

Toch zijn we ook verwanten van de regenworm, want tal van bouwelementen hebben we gemeen. Denk aan cellen en weefsels, spieren en zenuwen.

Evolutionaire processen hebben in de natuur ontelbare structuren en functies ontwikkeld die potentieel bruikbaar zijn, mits we doorzien hoe ze door bepaalde selectiecriteria zijn ontstaan en waar ze voor dienen. Het is hierbij echter belangrijk om te beseffen dat organismen multifunctioneel zijn. Het doel is zoveel mogelijk vruchtbare nakomelingen te produceren, die zich op hun beurt weer voortplanten.

Bij sterk gespecialiseerde organismen treffen we soms extreem ver doorgevoerde aanpassingen aan, maar ook die zijn het resultaat van compromissen met andere functies. Ook vergaande specialisatie is het gevolg van natuurlijke selectie op kleine toevallige erfelijke verschillen, en niet van een doelgerichte strategie. We kunnen van de natuur leren door na te gaan hoe die aanpassingen zijn ontstaan.

Door veranderingen in de omgeving verschuiven selectiecriteria. Erfelijke eigenschappen die hier het best op inspelen krijgen de overhand. Het idee van de Amerikaanse bioloog en evolutiegeoë Ernest Mayer dat daarvoor geografische barrières nodig zijn, waardoor soorten die bezig zijn te ontstaan gescheiden worden, heeft decennia lang als wet gegolden, maar blijkt bij nader inzien niet te kloppen. Ook op één plek kunnen de omstandigheden zodanig veranderen of divers zijn dat soortvorming kan optreden. Het gaat zoals hierboven uitgelegd, om toevallige genetische variatie tussen individuen. De heersende omstandigheden selecteren dusdanig dat de beter aangepaste individuen meer vruchtbare nakomelingen krijgen.

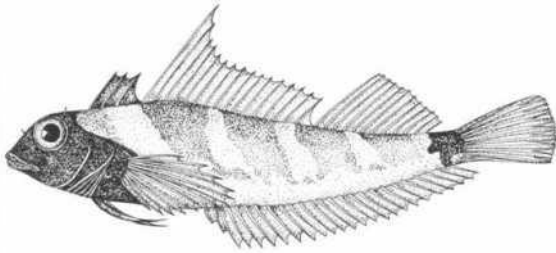
### **Het ontstaan van een nieuwe soort**

De werking van soortvorming kan het beste worden begrepen aan de hand van voorbeelden. Meestal is de ontstaansgeschiedenis niet gebaseerd op keiharde bewijzen, maar wordt een scenario gekozen dat het best bij het aanwezige bewijsmateriaal past en waarvoor de minste vooronderstellingen nodig zijn.

Aan het volgende voorbeeld werkten enkele generaties studenten onder

mijn leiding. In de westelijke helft van de Middellandse Zee bewonen vissoorten van het geslacht *Tripterygion* (drievinnige slijmvissen) de rotskusten. Twee daarvan zijn zo nauw verwant dat de vrouwtjes nauwelijks van elkaar te onderscheiden zijn. De mannetjes echter zien er in de baltsstijd opvallend verschillend uit. Beide varianten hebben een zwarte kop, maar de kleur van het lichaam van de ene soort is felrood en van de andere knalgeel.

Om te begrijpen hoe die twee soorten naast elkaar zijn ontstaan, moeten we eerst meer weten over de omstandigheden waaronder ze leven en over hun voortplantingsgedrag. De rode soort treffen we aan in de bovenste zes meter water, de gele tussen vijf en vijftwintig meter diepte. In de broedtijd hebben mannetjes



*Mannetje van de gele drievinslijmvis.*

territoria waarin ze opvallend baltsge-  
drag vertonen om wijfjes te lokken.

Hun territorium is een gebiedje van ongeveer één vierkante meter op een vlak, met algen begroeid stuk rotsbodem. In het midden bevindt zich het nest. Bij het baltsen zwemmen de mannetjes voortdurend een klein stukje omhoog en dan weer terug in het nest; de bewe-

ging heeft de vorm van een acht. Vrouwtjes komen op een baltsend mannetje af en deponeren hun eieren een voor een op de algen in het nest, het mannetje bevrucht de eieren door naast het wijfje met een sidderende beweging sperma te lozen.

De nesten van de rode soort liggen dicht bij elkaar in de bovenste drie tot vijf meter onder het wateroppervlak, die van de gele hebben een groter verspreidingsgebied en zitten dieper dan zes meter. Er zijn nog meer verschillen. Vrouwtjes van gele mannen die eieren afzetten nemen alle tijd (uren), bij rood doen ze het snel (seconden). Bij geel zijn alle mannetjes geel, bij de rode soort zien sommige mannetjes eruit als vrouwtjes. Die houden zich op aan de rand van de territoria en proberen bevruchtingen te stelen. (Officieel heet dit gedrag kleptogamie maar gedragsgeleerden noemen het ook wel ‘sneaky fucking’). De rode eigenaren van de territoria hebben het druk met het weggagen van deze mannetjes. Maar er zijn er veel, en regelmatig lukt het zo’n mannetje om eieren te bevruchten.

De twee soorten leven naast elkaar, en tijdens meer dan vijftwintig broedseizoenen hebben we nooit waargenomen dat ze onderling kruisten.

Tot zover een samenvatting van het gedrag zoals we dat nu kunnen waarnemen en kwantificeren. We weten verder dat rood alleen in de Middellandse Zee voorkomt, en geel ook in de Atlantische Oceaan.

Nu het meest waarschijnlijke scenario. Om dat te kunnen opstellen moeten we ook de belangrijkste biogeografische omstandigheden kennen. Zo’n vijftien miljoen jaar geleden viel de Middellandse Zee vrijwel geheel droog en raakte hij afgescheiden van de Atlantische Oceaan doordat het Afrikaanse continent tegen Europa botste. Het duurde tien miljoen jaar voor er een doorbraak plaatsvond bij Gibraltar en de Middellandse Zee weer volliep.

Atlantische soorten kwamen dus vijf miljoen jaar geleden de Middellandse Zee binnen, zo ook de gele drievinslijmvis. Die bezette de ondiepe rotskusten van



het westelijke bekken. De gele mannetjes waren in de bovenste waterlagen niet erg opvallend, want de gele kleur lijkt erg op schitteringen van de zon. Nu komen er bij veel vissoorten erfelijk rode vormen voor. Rode mannetjes zijn in ondiep water wél opvallend. Dieper vallen ze minder goed op; rood is in helder zeewater de eerste kleur die uit het spectrum verdwijnt. Rood wordt dieper dan drie meter grijs, geel blijft wel tot op grote diepte goed zichtbaar.

Dit verklaart waarom het verspreidingsgebied van de rode soort beperkt is tot de bovenste waterlagen. Het voor de nesten beschikbare oppervlak is daarmee beperkt. De geïntensiveerde manier van voortplanten compenseert dat. Er zijn te weinig territoria voor alle rode mannen, en zo ontwikkelt zich de kleptogamie. In de Atlantische Oceaan ontstond de soort niet, omdat daar een groot getijdenverschil bestaat. De bovenste zes meter water zijn er niet geschikt om als broedplaat- sen te dienen. Het getijdenverschil in de Middellandse Zee is verwaarloosbaar klein.

Natuurlijke selectie heeft hier niet alleen gewerkt op de mannelijke balts- kleur, maar ook op andere factoren die met de voortplanting te maken hebben. De doordringbaarheid van rood licht in zeewater heeft als selectie criterium gediend en de rode baltskleur veroorzaakt. Als neveneffect is het voortplantingssysteem van de nieuwe soort aangepast.

We leren hieruit hoe natuurlijke selectie kan werken, en ook dat kleuren onder water veranderen met de diepte waarop licht van verschillende golflengtes uitdooft. Tot een meter of drie is rood een opvallende kleur, dieper is geel veel duidelijker zichtbaar. Een tip voor duikers en offshore-werkers?

### **Het ontstaan van diversiteit**

Het Victoriameer is het jongste van de grote Afrikaanse meren. Geologische gegevens laten zien dat het ongeveer 15.000 jaar geleden nog helemaal droog was. De vispopulatie in het meer wordt gedomineerd door cichliden, baarsachtige vis- sen met slechts een neusgat aan elke kant van de kop, van het geslacht *Haplo- chromis*.

DNA studies tonen aan dat sinds het ontstaan van het meer ongeveer vijf- honderd soorten van dit geslacht zijn ontstaan uit een enkele voorouderlijke soort. Twee eigenschappen hebben waarschijnlijk bijgedragen aan dit enorme vermogen tot soortvorming: de bouw van de kop verandert gemakkelijk wanneer specialisa- tie in een bepaald voedseltype daarom vraagt, en vrouwtjes kiezen partners op basis van kleurpatronen.

*Haplochromis* vrouwtjes broeden de eieren uit in de bek, de jongen blijven de mondholte gebruiken als schuilplaats tot ze zelfstandig zijn. De eiproductie, het uitbroeden en de langdurige broedzorg vergen een grote investering aan ener- gie; bij het kiezen van een partner zijn vrouwtjes dan ook erg kieskeurig.

De vrouwtjes van de meeste soorten zijn eentonig van kleur, ze zijn nauwe- lijks van elkaar te onderscheiden. Mannetjes zijn daarentegen fel gekleurd en be- horen tot overwegend blauwe, rode, gele of zwarte soorten. Vrouwtjes hebben een voorkeur voor extreem gekleurde mannetjes. Dat bevordert splitsing in kleurgroep- en soortvorming.

Het grote aantal soorten is ook het gevolg van het vermogen binnen de ver-

schillend gekleurde groepen tot aanpassing aan tal van ecologische niches. Specialisatie in voeding gaat heel ver. Eén groep eet bijvoorbeeld uitsluitend vis, andere groepen leven van slakken of van dierlijk plankton, van algen of van dood organisch materiaal.

De groepen bestaan weer uit soorten die zich verder gespecialiseerd hebben. Zo zijn er pedofagen, die kleine of grote vislarven verorberen. Sommige pedofagen eten de eieren of jongen uit de bek van vrouwtjes van andere soorten: natuurlijke selectie heeft de bouw van hun bek daaraan aangepast. Er zijn ook viseters die hele vissen pakken, andere soorten leven alleen van schubben.

*Haplochromissen* die rotskusten bewonen, zijn aangepast aan een netwerk van microniches die bepaald worden door de waterdiepte, de afstand tot de kust, zonatie van algen en de daarmee samenhangende verschillen in microfauna, of door de aanwezigheid van schuilplaatsen. Ze zijn uiterst gevoelig voor selectiedruk; dat levert samen met de seksuele selectie op kleur de enorme variatie aan soorten op.

Recent was de mens veroorzaker en getuige van een sterke vermindering van het aantal soorten *Haplochromis* in het Victoriameer. De uitzetting van nijlbaars, een grote visetende predator, trof vooral de soorten van het open water en liet de rotsbewoners relatief ongemoeid. Door de grote rijkdom aan prooidieren vermeerderde de nijlbaars zich explosief en werd hij bron van een visserijindustrie rond het meer.

De voortdurende industriële ontwikkeling en massale houtkap, nodig voor het roken van nijlbaarzen, veroorzaakten vervuiling en maakten het water in de kustgebieden troebel. De seksuele selectie, die de diversiteit van de *Haplochromis* soorten bij de bewoners van ondiepe rotsen in stand hield, ondervond daar hinder van. Daarmee nam de soortenrijkdom af. Soorten kruisten onderling en vormden hybriden.

Nu de nijlbaars door overbevissing is teruggedrongen zien we in het open water al weer soorten terugkomen die zich hebben aangepast aan de veranderde omgeving; er zijn aanpassingen gevonden in kieuwen, ogen en voedselopnameapparaat. Veranderingen van de lichaamsvorm suggereren hogere ontsnappingsnelheden. Onder de juiste omstandigheden kunnen vormveranderingen dus in heel korte tijd optreden.

Het eerste hoofdstuk van Darwins *On the Origin of Species* gaat over selectie door de mens bij gecultiveerde soorten planten en dieren. Wat de natuur kan, kunnen wij ook. Zo hebben we het uiterlijk van tal van soorten veranderd door te selecteren op kenmerken die we prettig vonden en we zorgden er zelf voor dat de individuen met die kenmerken nakomelingen kregen.

Tal van rassen van paarden, honden, katten, varkens, duiven, runderen enzovoort zijn op die manier ontstaan. Het zijn rassen die onderling kruisbaar blijven en vruchtbare nakomelingen produceren. Het zijn daarom geen aparte soorten. Hoe dat komt weten we niet goed. Darwin draait er in zijn boek omheen.

Waarschijnlijk komt het doordat onze selectiemethoden niet gericht zijn op verschillen die de onderlinge kruisbaarheid onder natuurlijke omstandigheden teniet zouden doen. De selectie bij huisdieren hebben we zelf grotendeels in de hand; in de natuur bepalen de ecologische omstandigheden wat er verder leeft. Nu



*Darwins (geschoten) wilde duif vergeleken met twee gecultiveerde rassen, met hun schedels.*

we weten hoe het evolutieproces werkt, rijst de vraag of we die techniek kunnen gebruiken bij onze eigen technische creaties.

### **Ontwerpen met de evolutiestrategie**

Het evolutieproces gaat onverbiddelijk door, wat er ook gebeurt. Soorten gaan en komen, er zijn steeds weer nieuwe optimale aanpassingen aan heersende omstandigheden waar natuurlijke selectie op inspeelt. Dat proces van voortdurende optimalisatie is ook als methode in de bionica te gebruiken.

Nakomelingen van organismen vertonen altijd kleine erfelijke verschillen. Die ontstaan toevallig. De kenmerken die het beste voldoen aan de eisen die de omgeving stelt, worden geselecteerd en in de loop van een aantal generaties geoptimaliseerd.

Om dit principe te kunnen toepassen bij het optimaliseren van een ontwerp moeten de kenmerken van een prototype door een toevalsproces kunnen variëren. De te gebruiken techniek komt dus neer op het gericht selecteren van verschillen die door toeval zijn ontstaan. De criteria in de natuur worden door de omgeving bepaald, de best aangepasten krijgen meer nakomelingen.

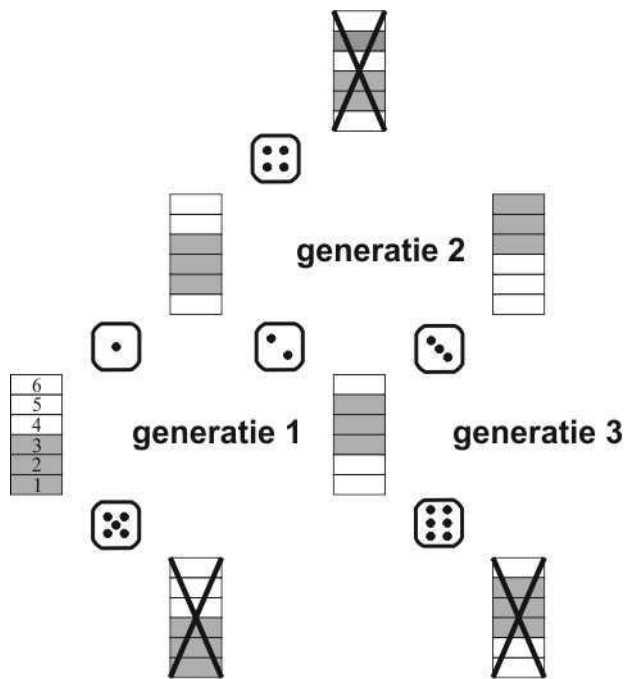
De bionicus wil een bepaalde functie optimaliseren en kiest uit de toevallige variatie de beste variant als uitgangspunt voor de volgende generatie. We kunnen het principe leren kennen door aan de slag te gaan met een eenvoudig voorbeeld waarin de twee belangrijke elementen goed te herkennen zijn: mutaties zijn toevallig, en selectie is gebonden aan regels.

Een spelletje met damstenen en een dobbelsteen kan de werking van de belangrijkste evolutionaire processen goed demonstreren.

We beginnen met drie witte en drie zwarte damstenen. Stapel ze zo op elkaar dat de onderste drie, plaatsen 1, 2 en 3, zwart zijn en de bovenste drie, plaatsen 4, 5 en 6, wit. Dit is het oerbeest dat we laten muteren.

In de natuur gaat dat met kleine stapjes. Hetzelfde doen wij hier door bij elke stap de positie van de bovenste steen in de stapel eventueel te laten veranderen.

Die verandering moet op toeval berusten. We maken twee nakomelingen door twee maal te gooien met een dobbelsteen. Nu hebben we een selectie criterium nodig om uit twee nakomelingen de fitste te kiezen. Stel dat zwart beneden en wit boven lange tijd optimaal was, maar dat je nu zo veel mogelijk wit van onder en zwart van boven hoort te zijn om aangepast te zijn aan je omgeving en om tot voortplanting te komen.



Voorbeeld van een voorspoedig verlopen evolutiespel. Toeval en rigoureuze selectie op twee nakomelingen per generatie resulteerde in de omgekeerde volgorde van zwarte en witte blokken in drie generaties.

belen om de volgende generatie te laten ontstaan, gooien we 3 en 6. Met een 6 verandert er niets, maar de 3 zorgt voor een individu met drie zwarte stenen boven en drie witte onder.

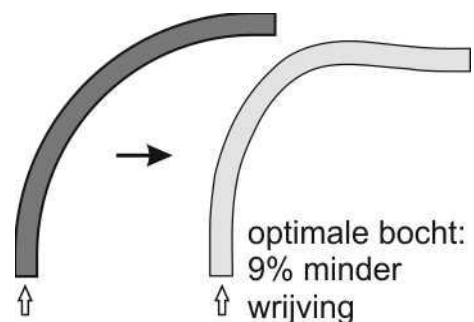
We zijn zo gelukkig geweest om in drie generaties de volgorde van de stenen om te draaien. Vaak zal het gebeuren dat beide nakomelingen evenveel zwarte stenen in de bovenste helft hebben. In dat geval wordt er met beide nazaten doorgespeeld. De gelukkige winnaar is de speler die de minste generaties nodig heeft. Dat hoeven er bij veel geluk, zoals in het voorbeeld, slechts drie te zijn. Met minder geluk duurt het langer voor het spel ten einde is.

Met de evolutiestrategie kan in principe elk ontwerp geoptimaliseerd worden voor een bepaalde eigenschap of een combinatie van eigenschappen. De methode werkt vooral goed bij ontwerpen waarvan de meest functionele vorm niet goed voorspelbaar of uit te rekenen is. Een klassiek voorbeeld van deze methode komt van de ontdekker ervan, de Berlijnse bionicus Ingo Rechenberg, en stamt uit de jaren zestig van de vorige eeuw. Hij onderzocht de weerstand in een elleboogstuk van een waterleiding. De bocht in de proefopstelling was een flexibele slang en op zes plaatsen kon hij de kromming willekeurig veranderen. De optimale

In het voorbeeld scoren we een 5 en een 1. Maak de nakomelingen die daardoor ontstaan. Door de worp die resulteerde in een vijf verplaatst de bovenste steen naar plaats 5 en blijft het aantal witte stenen in de bovenste helft 3. De andere nakomeling ontstaat door het gooien van een 1. Bij deze worden de plaatsen 1, 5 en 6 ingenomen door witte stenen; 2,3 en 4 door zwarte. Hij heeft dus een zwarte steen in de bovenste helft, is beter aangepast dan zijn generatiegenoot en kan zich verder voortplanten.

De eerste van zijn twee nakomelingen ontstaat door het gooien van 4. De bovenste witte steen komt dan op de vierde plaats waardoor er nog steeds slechts een zwarte steen in de bovenste helft zit. Het resultaat van de tweede worp is 2, waardoor er twee zwarte stenen in de bovenste helft zitten.

Deze nakomeling plant zich verder voort, de andere niet. Bij het dob-



Rechenbergs evolutionaire strategie toegepast op een elleboogstuk van een waterleiding.

bocht die uit dat experiment naar voren kwam was geen kwart cirkelboog, maar verliep iets flauwer in het begin en schoot door de bocht iets verder door, om vervolgens weer terug te buigen. In de bionische bocht waren de drukverliezen door de wrijving 9% minder. Het is vreemd dat deze energie besparende vinding niet wordt gebruikt.

Evolutionair ontwerpen is nog steeds geen gemeengoed in de ingenieurswereld; toch kan er veel tijd, materiaal en energie door bespaard worden. De uitkomsten zijn vaak verrassend en elegant.

### **Aanpassingen van de verschijningsvorm tijdens het leven**

Tijdens de ontwikkeling van embryo tot volwassen individu treden er grote veranderingen op. Het zaadje groeit uit tot een kiemplant en die groeit verder uit tot een volwassen plant die opnieuw zaad kan produceren. Onderweg gebeurt er van alles; elk groeiend wezen heeft het vermogen om te reageren op de invloeden van buitenaf. Die zijn voor elk individu anders. Een maïsplantje dat op arme grond in de schaduw van bomen groeit, ziet er miezriger uit dan de genetisch identieke plant onder meer optimale condities. Een boom die veel wind vangt maakt meer hout aan op de mechanisch juiste plekken dan een die op een beschermde plaats in het bos staat. De sportievere helft van een eeneiige tweeling bouwt meer spierweefsel en een betere conditie op dan de andere die vooral van lekker eten en tv-kijken houdt.

Deze verschillen in uiterlijk zijn vanuit een bionisch oogpunt interessant, omdat organismen vaak efficiënt op invloeden van buitenaf reageren. Ook daar kunnen we wat van opsteken. Collega Klaus Mattheck heeft zich verdiept in de groei van bomen en botten onder invloed van krachten van buitenaf. In het hoofdstuk 'Biologische bouwkunst' komt zijn werk aan bod.

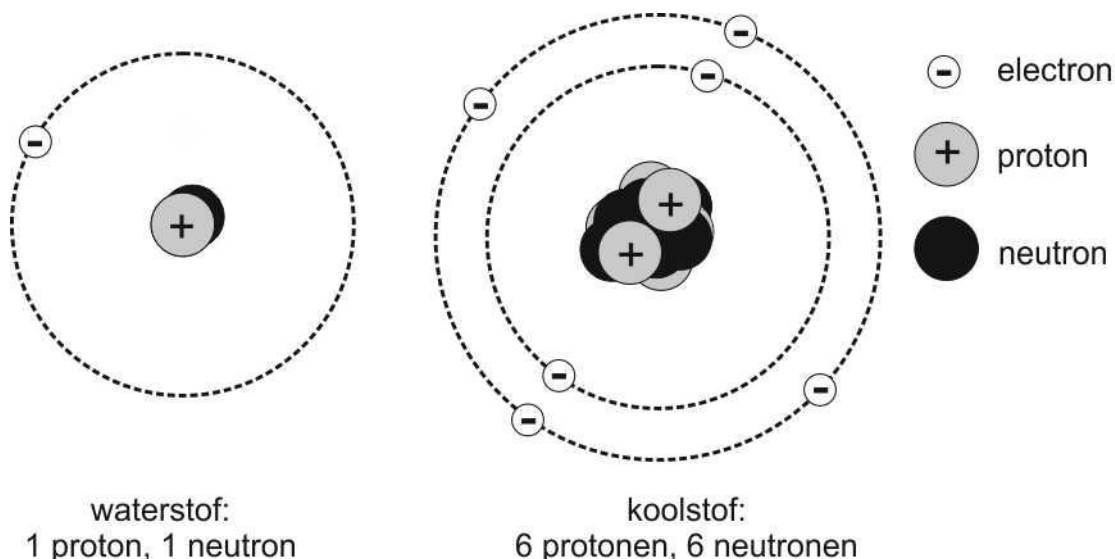
### 3. Biologische bouwkunst

Leven speelt zich af in tal van behuizingen, variërend van een 20 nm virus dat bestaat uit een ingepakte streng DNA of RNA, een enkele cel van een bacterie, via de 30 m lange 170 ton zware blauwe vinvis tot de grootste boom ter aarde: de reuzensequoia General German die 84 m hoog is en 21.000 ton weegt. De belangrijkste levensfuncties: voedselopname, groei en reproductie, zijn in elke levensvorm goed verzorgd. Er is dus nooit sprake van hogere of lagere, betere of slechtere bouwplannen. Elk organisme is uitverkoren door natuurlijke selectie en heeft de best mogelijke overlevingskansen onder de heersende ecologische omstandigheden. Natuurlijke bouwkunst wordt gedomineerd door vorm-functie relaties. Esthetische aspecten spelen geen rol. Bij de menselijke bouwkunst worden die wel belangrijk gevonden; ze gaan zelfs vaak ten koste van de functionaliteit.

De overgrote meerderheid van de organismen op aarde bestaat uit één cel waarbinnen het leven zich afspeelt. De levende cel is daarmee het meest geslaagde bouwplan maar dient tevens als bouwsteen voor alle meercellige organismen: planten, schimmels en dieren. We willen graag meer weten over de oorsprong van het leven om eventueel gebruik te kunnen maken van de principes die eraan ten grondslag liggen.

#### Levende bouwstenen

In het begin was de aarde woest en ledig (Genesis 1, vers 2). Zo zou je de wolk minuscule elementaire deeltjes, neutronen, protonen en electronen, kunnen beschrijven waaruit onze planeet 4,5 miljard jaar geleden na een explosie in het

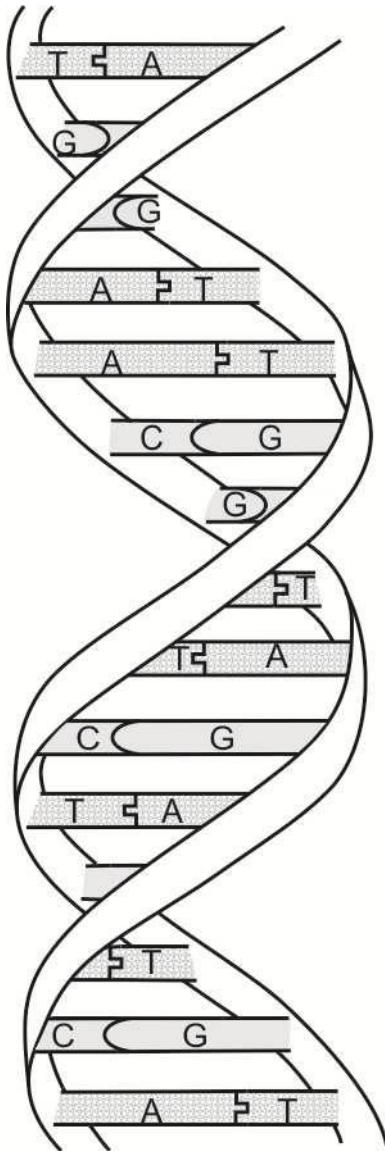


*Schematische voorstelling van waterstof en koolstof.  
De banen (stippellijnen) waarin de elektronen draaien zijn niet op schaal getekend.  
De vorm van de banen is ook niet correct weergegeven.*

heelal ontstond. In die wolk klonteren neutronen en protonen samen tot atoomkernen. Elektronen draaien rond atoomkernen en vormen zo atomen. Protonen

verschillende volgordes. De vier basen vormen vaste paren: adenine met uracil, en cytosine met guanine. RNA heeft ook het vermogen ontwikkeld om als mal te dienen voor de duplicatie van andere moleculen. RNA kan verschillende enzymatische functies uitvoeren.

Modern RNA maakt eiwitten naar een recept dat zit opgeslagen in de volgorde van de baseparen. Eiwitten zijn belangrijke biologische moleculen, opgebouwd uit ketens aminozuren. Aminozuren bestaan uit koolstof, zuurstof, stikstof en waterstof en een variabele restgroep die de specifieke eigenschappen bepaalt.



Stukje DNA met baseparen: cytosine met guanine (C-G); thymine met adenine (T-A).

Eiwitten kunnen bouwstenen zijn - spieren bestaan bijvoorbeeld uit eiwitten - maar ze fungeren vooral als enzymen, verantwoordelijk voor het verlopen van alle reacties die nodig zijn om leven mogelijk te maken. Eiwitten zijn als enzymen veelzijdiger dan RNA en hebben veel enzymfuncties daarvan overgenomen.

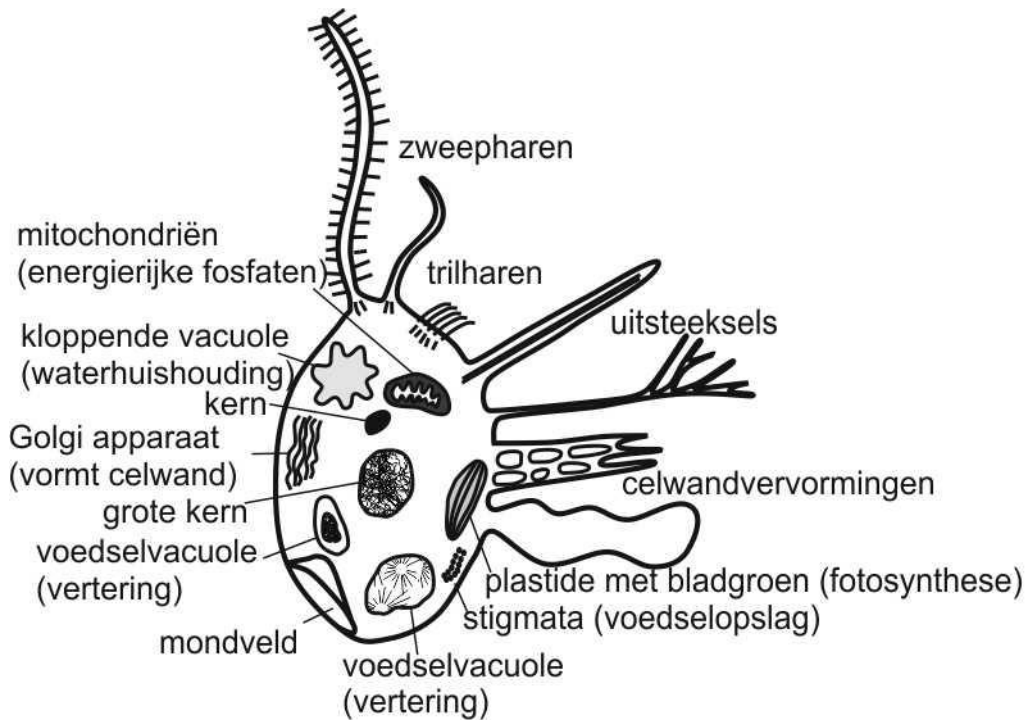
In de loop van de tijd is de opslagfunctie voor eiwitrecepten vrijwel overal overgenomen door het verwante DNA. DNA staat voor Deoxyribo Nucleic Acid, deoxyribonucleïnezuur. Het bestaat uit twee strengen die een dubbele helix vormen door de aantrekkingskrachten tussen paren van vier basen. De basen zijn twee aan twee via waterstofbruggen met elkaar verbonden: cytosine met guanine en adenine met thymine (en niet met uracil zoals bij RNA).

Waterstofbruggen verbinden de basen. Het zijn geen sterke verbindingen. De verbinding tussen guanine en cytosine is met drie waterstofbruggen wat sterker dan die tussen thymine en adenine met twee.

De code voor de opslag van informatie over eiwitrecepten zit in de volgorde van de twee baseparen. Hiermee is er een systeem ontstaan dat informatie over zichzelf van generatie op generatie kan doorgeven.

De eerste levende cel was geboren toen er een membraan rond een kluitje RNA of DNA ontstond. Het is wonderbaarlijk hoe door chemische evolutie met de synthese van RNA, DNA en eiwitten het leven op aarde kon ontstaan.

Vanaf dat moment, zo'n 3,5 miljard jaar geleden, begint de biologische evolutie waarin organismen geselecteerd worden op voortplantingssucces. Dat proces heeft geleid tot de grote diversiteit aan uitgestorven en bestaande levensvormen.



*Schematische eukaryote cel met de meest voorkomende organellen en celwandstructuren.*

mogelijk ook prokaryoten die door symbiose in eukaryote cellen terecht zijn gekomen. Ze dienen voor de voortbeweging. Stijve uitsteeksels gaan predatie tegen. Andere celwandvervormingen vangen voedsel.

Eukaryoten zijn twee tot drie miljard jaar oud. De cellen zijn omgeven door een membraan of celwand en gevuld met vloeistof waarin de organellen drijven, ze hebben een skelet van kleine buisjes - microtubuli -, en soms ook hele mooie kalk- of kiezelskeletten. In de kern zit het DNA verdeeld over chromosomen: de dragers van erfelijke eigenschappen. Eukaryoten zijn te verdelen in protisten, schimmels, planten en dieren. De protisten zijn eencelligen van zeer divers pluimage, met soorten die fotosynthese bedrijven en dus plantaardig zijn, en dierlijke groepen levend van organisch materiaal. De systematische samenhang in die groep is ver te zoeken en voortdurend onderhevig aan veranderende inzichten in genetische verwantschap, bouw en functie. De cellen van schimmels lijken meer op die van dieren dan op plantencellen. Uit overeenkomsten op moleculair niveau is gebleken dat schimmels en dieren dezelfde voorouder (een protist met zweepharen) hebben. Van de andere kant hebben schimmels en planten cellen met celwanden en dieren niet. De celwanden van schimmels bestaan vooral uit chitine en die van planten uit cellulose; beide stoffen zijn meervoudige suikers. Om dierlijke cellen zit een gecompliceerde, flexibele membraan die selectief stoffen doorlaat.

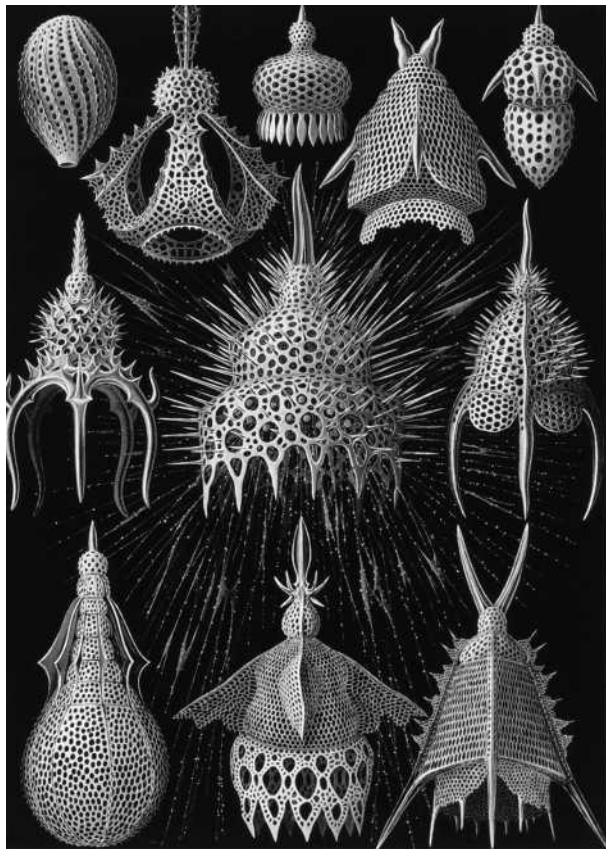
Bouwkunsttechnisch gezien zijn er enkele interessante groepen protisten. Microscopisch kleine diatomeeën en coccolithophoren komen voor als plantaardig plankton in de oceanen. Bij de diatomeeën vormt de celwand een doosje met een dekseltje als een petrischaaltje. Deze kiezeloxideschaaltjes hebben mooie



vormen: rond, driehoekig of langwerpig met dunne plekje die op gaatjes lijken en patronen vormen.

De meest prominente soort coccolithophoor is *Emiliana huxleyi*; die scheidt ronde plaatjes van calciumcarbonaat af waarmee de cel aan de buitenkant wordt bedekt. *E. huxleyi* vormt een uitwendig skelet van ronde schildjes. Die zijn kleurloos maar weerkaatsen het zonlicht. Onder gunstige omstandigheden zijn ze op satellietfoto's te zien als wolken in de oceaan.

Foraminiferen en radiolariën zijn dierlijke groepen eencelligen die op de zeebodem leven of rondzweven als plankton. Ze zijn meestal slechts enkele tienden millimeters groot en maken prachtige uitwendige schelpjes van meervoudige



Kiezelskeletten van radiolariën uit 'Kunstformen der Natur' (Ernst Haeckel, 1889).

suikers met calciumcarbonaat, kiezeloxide of ijzer. Die schelpjes bestaan vaak uit meerdere kamertjes en zitten vol gaatjes, waar uitsteeksels van de celwand door naar buiten steken. Ze komen massaal voor; de witte kliffen bij Dover bestaan uit fossiele resten van foraminiferen.

De vormenrijkdom is overweldigend: ze kunnen bol zijn maar ook vijfhoekig, of de vorm hebben van een logaritmische spiraal (hierover verderop meer). Ribbels en knobbeltjes vormen ornamenten die bijdragen aan de artistieke schoonheid van deze miniatuurjuwelen.

De functie van deze pracht en praal is niet bekend.

Radiolariën hebben een inwendig skelet van kiezeloxidestaafjes en stekels. Dat materiaal vormt een prachtig driedimensionaal rasterwerk in tal van verschijningsvormen. De vormenrijkdom van deze protisten is een bron van inspiratie voor kunstenaars en bouwkundigen (Gaudi bijvoorbeeld). Vooral

de tekeningen van de Duitse bioloog Ernst Haeckel in zijn boek *Kunstformen der Natur* uit 1898 hebben aan die inspiratie bijgedragen.

De eukaryoten omvatten naast de eencellige protisten ook de schimmels, planten en dieren. Onder de schimmels komen eencellige soorten voor zoals de gisten, maar ook complexe meercellige, de paddenstoelen bijvoorbeeld. De paddenstoelen die wij zien vormen slechts een klein deel van het organisme. Ze dienen voor de productie van sporen waarmee ze zich voortplanten en verspreiden. Het grootste deel wordt gevormd door lange strengen van achter elkaar gelegen cellen die een netwerk onder de grond vormen, het mycelium. Tussen de cellen zitten schotjes met poriën waardoor ze stoffen uitwisselen. Ondergrondse netwer-

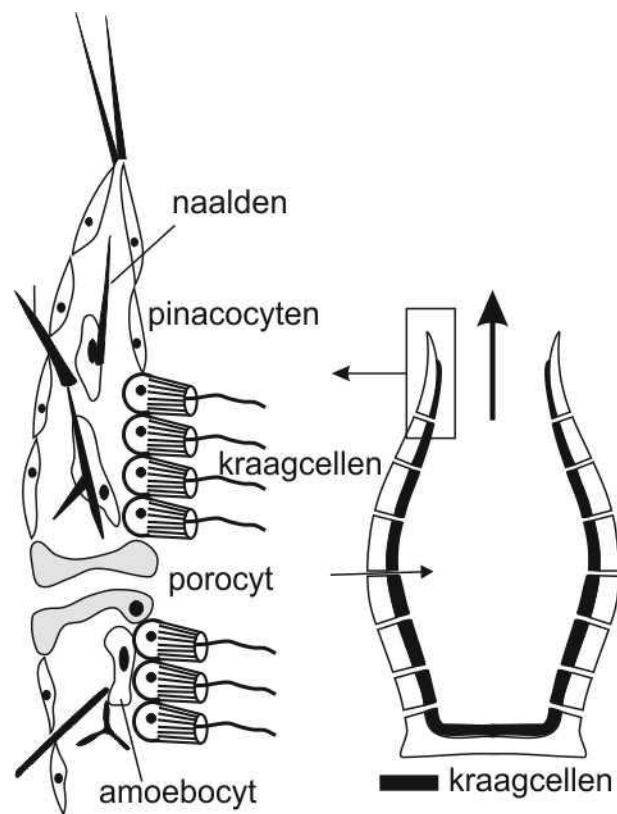
ken kunnen duizenden jaren oud worden. Schimmels bedrijven geen fotosynthese maar leven van dood plantaardig materiaal; ze kunnen ook parasiteren op planten of ermee in symbiose leven.

Planten hebben celwanden van cellulose en kunnen met bladgroen fotosynthese bedrijven. De verschijningsvorm varieert van eencellige algen tot meer dan negentig meter hoge sequoia bomen. Zoals bekend vangen hoge bomen veel wind en het krachtenspel tussen wind en boom is vanuit een bionica perspectief hoogst interessant. Collega Claus Mattheck ontdekte door bestudering van de groei van bomen een belangrijk principe waarmee optimaal industrieel ontwerpen eenvoudig wordt. Hierover verderop meer.

Meercellige dieren zijn in te delen in stammen met elk een eigen bouwplan. Cellen zijn de bouwstenen die zich tijdens de embryonale ontwikkeling differentiëren en specialiseren. Daarbij vormen ze weefsels met elk een specifieke taak. Dierlijke bouwplannen zijn zeer divers, gebaseerd op uiteenlopende principes. Ze bestaan naast elkaar en zijn dus evolutionair gezien allemaal topontwerpen. We gaan zien wat we ervan kunnen leren.

### Bouwplannen in het dierenrijk

Bij sponzen zijn individuele cellen goed herkenbaar. Er is een duidelijke functieverdeling tussen de cellen. Sponzen zitten vast op de bodem, ze zijn in principe zakvormig met kleine openingen in de wand en een grote uitstroomopening aan de bovenkant. Deze dieren bestaan uit een vrij los verband van cellen. Aan de buitenkant wordt een spons bekleed met



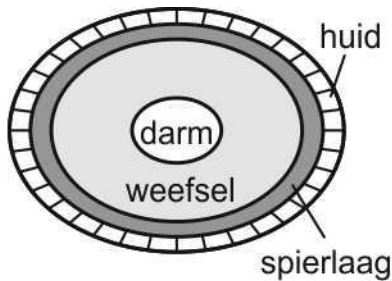
*Bouwplan spons.*

platte cellen: de pinacocyten. Andere cellen, de porocyten, hebben de vorm van een servetring, door het gat gaat water de sponsholte in. Speciale cellen vormen het skelet. Dat kan bestaan uit losse naalden, uit driedimensionale kraaienpootachtige structuren of uit een prachtig bouwsel dat eruitziet of het gekantklost is.

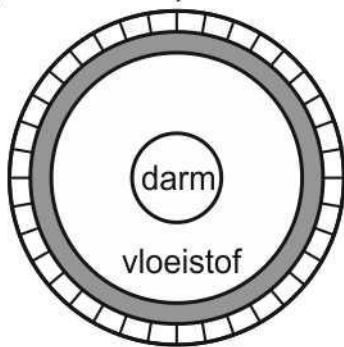
Het materiaal waaruit sponzen hun skelet maken kan zacht spongine zijn zoals bij de echte badspons, maar het kan ook hard en kalkachtig zijn of uit kiezeldraden bestaan. De binnenwand van de zakvormige holte is bekleed met kraagcellen die voor de voedselvoorziening zorgen (zie het hoofdstuk Filteren). Sponzen hebben een soort superstamcellen: de amoebocyten. Die bewegen zich door de spons heen, zorgen voor de verdeling van voedsel en zijn vooral van belang om-

langrijke tweedeling optreden. Bij de meeste stammen wordt de oeropening mond, maar bij de stekelhuidigen en de chordadieren (waar wij toe behoren) wordt de oermond tijdens de verdere ontwikkeling de anus.

Vliegtuigen, treinen en auto's zijn ook holle buizen met een voor- en achterkant. Voor de bestuurder is uitzicht naar voren van levensbelang. Die bestuurder is het centrale zenuwstelsel van het voertuig: de bediening van de aandrijving, de remmen, het stuursysteem, het licht, en het alarmsysteem zijn in zijn handen. Daarom vliegt er geen vliegtuig zonder piloot, rijdt er geen trein zonder machinist en geen auto zonder chauffeur, tenzij een automaat die taken overneemt.

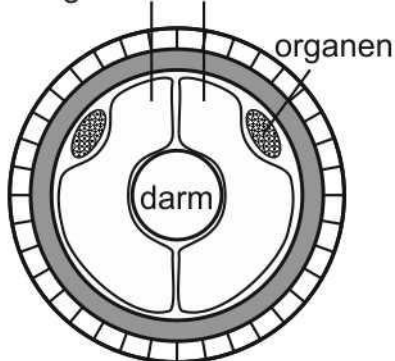


**platwormen, snoerwormen**



**rondwormen, raderdieren**

met weefsel beklede ruimtes  
gevuld met vloeistof



**ringwormen, geleedpotigen, weekdieren, snorwormen, armpotigen, stekelhuidigen, chordadieren**

*Dwarsdoorsneden door bilateraal symmetrische dieren.*

Ontwerpers die zich daarmee bezig houden doen er goed aan zich te verdiepen in de manier waarop de natuur het centrale zenuwstelsel en de zintuigen voorin georganiseerd heeft. Daar valt vast nog het een en ander van te leren.

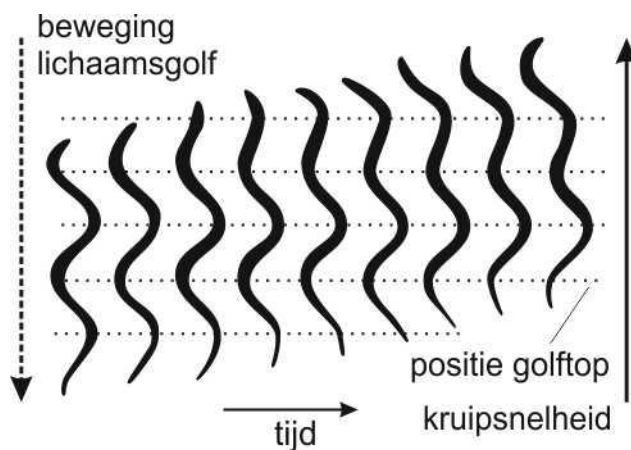
Dwarsdoorsneden door de holle buis van tweezijdig symmetrische dieren laten drie fundamenteel verschillende bouwplannen zien. Bij twee stammen, de platwormen en de snoerwormen, is de ruimte tussen de buitenkant en de darm geheel gevuld. Aan de buitenkant zit de huid met daaronder een laag met spieren. Tussen spierlaag en darm is het lichaam gevuld met cellen die een dicht weefsel vormen. Bij de rondwormen en raderdieren zit op die plek vloeistof. De darm hangt er los in. De lichaamsvloeistof is bij alle andere stammen opgeborgen in met weefsel beklede ruimtes. De ringwormen, geleedpotigen, weekdieren, snorwormen, armpotigen, stekelhuidigen en de chordadieren komen wat dat betreft overeen.

Verschillen in bouwplan hebben te maken met het soort skelet. Er zijn drie mogelijkheden: hydrostatisch, hard uitwendig en hard inwendig. Spieren die samentrekken hebben een skelet nodig waarop ze de kracht die ze ontwikkelen kunnen overbrengen. Dat skelet hoeft niet, zoals bij de mens, uit botten te bestaan. Een met vloeistof of weefsel gevulde ruimte, met een niet-rekbare wand en dus een vast volume, komt het meest voor. Dit hydrostatische skelet werkt omdat vloeistof niet samendrukbaar is. Kringspieren en lengtespieren kunnen het vaste volume wel vervormen door het langer en dunner of korter en dikker te maken, maar het volume blijft gelijk.

Segmenten van ringwormen kunnen na elkaar korter en dikker en langer en

dunner worden. Door de dikke segmenten telkens vast te maken aan de omgeving kunnen de ervoor gelegen segmenten vooruit bewegen door dunner en langer te worden. Vervolgens zetten de voorste segmenten zich weer vast door korter en dikker te worden en wordt de rest van de worm naar voren bewogen. Dat proces verplaatst zich over de worm. De kruipbeweging is peristaltisch. (Zie ook het hoofdstuk Boren en Graven.)

Rondwormen zijn niet in segmenten opgedeeld, ze hebben uitsluitend lengtespieren. Deze houden het vaste volume van de worm onder druk. Rondwormen kruipen niet peristaltisch door verkorting en verlenging maar bewegen door te kronkelen waarbij de lengtespieren de worm afwisselend aan de linker en rechter kant kromtrekken. De druk in het lichaam zorgt voor het weerwerk. Zo maken ze een golvende beweging met hun lichaam. Die golf loopt van voor naar achter, waardoor het dier naar voren gaat, mits het zich kan afzetten tegen de omgeving. Wanneer daarbij geen slip optreedt is de voorwaartse snelheid gelijk aan de achterwaartse snelheid van de golf.



*Kronkelend kruipende ronde worm: de kruipsnelheid naar voren is gelijk aan de snelheid van de lichaamsgolf naar achteren.*

Een lichaam dat onder inwendige druk staat is bemoeilijkt het eten van voedsel. Dat moet via een sluis, tegen die druk in naar binnen gewerkt worden. Poepen is echter gemakkelijk. De sluitspier rond de anus hoeft maar te ontspannen en de druk perst de ontlasting eruit.

Bij geleedpotigen met een uitwendig skelet biedt de harde buitenkant weerwerk aan de spieren. Geleedpotigen zijn de grootste stam wat betreft het aantal soorten en individuen in het dierenrijk. Het moet dus wel een topontwerp zijn. Het grote voordeel is de bescherming tegen krachten van buitenaf. Het harnas van chitine is hard

en star op flexibele verbindingen tussen segmenten na. Toch zijn de nadelen onmiddellijk duidelijk. Elke middeleeuwse ridder heeft geweten dat zo'n ding niet meegroeit. Telkens als je figuur verandert moet je weer naar de smid.

Harde materialen zijn over het algemeen ook zwaar. Bij groei neemt de lengte toe. Het oppervlak neemt toe met het kwadraat van de lengte. Wanneer de materiaaldikte gelijk blijft, neemt ook het gewicht van het omhulsel kwadratisch toe. Dat houdt een keer op en beperkt de maximale grootte die je met een uitwendig skelet kunt bereiken.

Wat de groei-problematiek betreft lossen geleedpotigen die op door te vervellen. Ze groeien in stappen. De harde buitenkant wordt daarbij afgestoten en er treedt een groeispuurt op voor de huid weer uithardt en verstart. Iedereen die wel eens een kreeft heeft zien vervellen, weet dat het een heel kwetsbaar moment en een zeer gecompliceerd proces is. In de Middeleeuwen moesten ridders in vol ornaat op hun paard geholpen worden; soepel bewegen was er niet bij.

Geleedpotigen hebben dat soort problemen niet: hun spieren en pezen bedienen het exoskelet van binnenuit. Bij het eten van krabbenpoten kom je ze tegen. Als je krab of kreeft eet zie je ook dat de gewrichten van de poten en scharen gebouwd zijn als kruiskoppelingen die met meerdere scharnieren loodrecht op elkaar, bewegingen in alle richtingen mogelijk maken.

Ontwerpers en bouwers van robots kunnen gebruikmaken van deze technologie. Er zijn al tal van exoskelet robots gebouwd. Vaak zie je daarbij toch dat delen van de aandrijving buiten om zijn gemonteerd. Het is kennelijk moeilijk om een concept consequent toe te passen.

Dieren zoals wij ontleen stevigheid aan een inwendig skelet. Oorspronkelijk bestond dat uit een as van chordacellen. Dat zijn cellen gevuld met vloeistof, omgeven door een stevige wand. Achter elkaar vormen ze een wateras. Die as is naar alle kanten buigbaar en niet in de lengte samendrukbaar. Bij de gewervelde dieren is daaromheen een rij wervels van been of kraakbeen geëvolueerd; de wateras is gereduceerd. De wervels kunnen onderling scharnieren. Het chordaweefsel vormt nog kernen in schijven tussen de wervels. Bij de mens kunnen de chordakernen onder de druk van de verticale wervelkolom tussen de wervels uitschieten en tegen de zenuwen van het ruggenmerg drukken. We noemen dat een hernia.

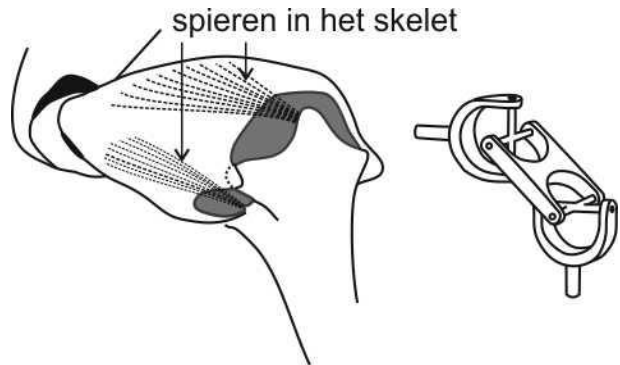
Lange botten in de extremiteiten zijn beweeglijk met elkaar verbonden via scharnierende gewrichten. Die kunnen door hun bouw de beweging beperken, zoals bij een eenassig scharnier, of juist vrijheid van beweging geven met een kogelgewricht. Een inwendig skelet is kwetsbaar omdat de weke spieren en pezen aan de buitenkant zitten. Ondanks scheenbeschermers kan elke voetballer daarover meepraten. Bij gordeldieren en schildpadden is dat probleem opgelost met verbeende huidstructuren, maar dat gaat wel ten koste van de beweeglijkheid.

## De bouw van planten

We zagen dat planten verschillen van dieren door het bezit van celwanden van cellulose en het vermogen om koolhydraten te produceren uit  $\text{CO}_2$ , water en licht.

Bouwstrategieën worden gedomineerd door de noodzaak zonlicht op te vangen om er zeker van te zijn dat licht het chlorofyl in de cellen bereikt. Veelal zit chlorofyl opgeslagen in de cellen van bladeren of in andere structuren die min of meer horizontaal staan en licht van boven kunnen opvangen. Onder water dooft licht snel uit met de diepte en dat beperkt het leefgebied van planten tot de diepte waarop nog licht doordringt. Boven water is licht meestal geen limiterende factor en  $\text{CO}_2$  is beschikbaar in overvloed; de zwaartekracht en de beschikbaarheid van water zijn daar de problemen.

In de loop van de evolutie van landplanten heeft natuurlijke selectie deze

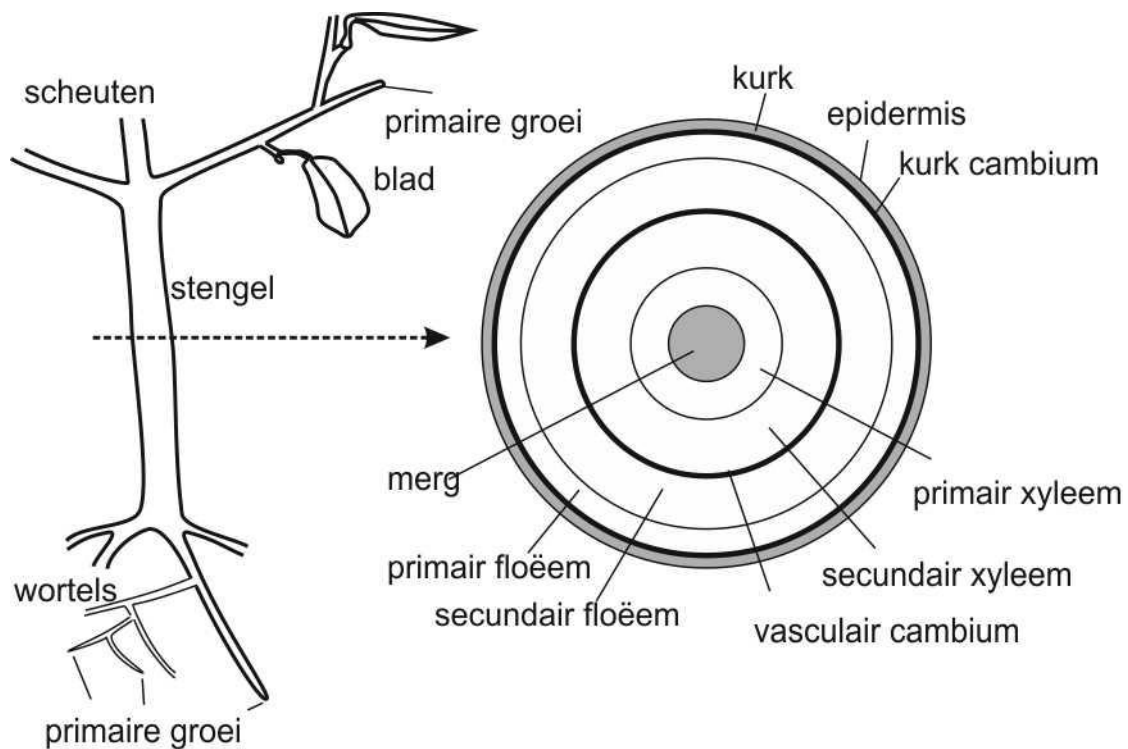


*Gewrichten van geleedpotigen zijn kruiskoppelingen.*

problemen op meerdere manieren opgelost. Groene algen worden algemeen beschouwd als de voorouders van alle landplanten. Onder water wegen planten vrijwel niets en de hydrofiele celwanden laten water door en hebben geen steunfunctie. De overgang naar het leven op het land is stapsgewijs verlopen. De eerste belangrijke innovatie was het ontstaan van de cuticula, een hydrofobe waslaag die aan de buitenkant van de plant ervoor zorgt dat uitdroging wordt beperkt. Poriën in de cuticula regelen de uitwisseling van water, CO<sub>2</sub> en zuurstof. De eerste landplanten die leken op levermossen gebruikten deze structuur en groeiden daarmee net boven de waterlijn in een vochtige omgeving waar ze groene korsten vormden die weinig steun nodig hadden.

Ook op het land is er competitie om licht en er is concurrentiestrijd om water en mineralen. Deze laatste behoefte heeft geleid tot het ontstaan van wortel-systemen. Steun en transportsystemen zijn noodzakelijk om de hoogte in te groeien in de richting van de zon. De ontwikkeling van vaatstelsels maakten de vorming mogelijk van bladeren, stengels en wortels.

Bij de vaatplanten delen speciale groepen ongedifferentieerde cellen voortdurend; ze zijn georganiseerd in groeizones. Primaire groei in de lengte treedt op aan de uiteinden van wortels en scheuten en in de stengels; secundaire groei in dikte in de stengels en de wortels. Primaire groei vormt van buiten naar binnen de volgende weefsels: epidermis, het buitenste grondweefsel (schors), primair floëem, primair xyleem, en het binnenste grondweefsel (merg). Epidermale cellen maken een cuticula om een barrière te vormen met de buitenwereld. Xyleem en floëem zijn de belangrijke vloeistof transportsystemen. Grondweefsel is zacht en bestaat uit dunwandige cellen die verschillende functies kunnen hebben (bijvoorbeeld fotosynthese en opslag van voedsel).



*Schematische voorstelling van de bouw van een vaatplant.*

Een dwarsdoorsnede door een stengel laat twee secundaire groeizones zien die voor diktegroei zorgen: kurk cambium voegt secundair epidermaal weefsel toe en vasculair cambium maakt secundair xyleem en secundair floëem.

De meeste vaatplanten hebben twee typen vaten die ontstaan uit verbindingen van langwerpige cellen. Floëem bestaat uit lange cellen die met de uiteinden aan elkaar grenzen. De wanden daar zijn geperforeerde zeefplaten. De inhoud van de cellen is gereduceerd; ze missen een kern, ribosomen, vacuolen en skeletelementen. Elke floëemcel is nauw verbonden met een zustercel die met een kern en ribosomen de verloren functies van de floëemcel verzorgt. Floëem transporteert voedingsstoffen en suikers tussen de wortels en de bladeren. We denken dat het transport wordt veroorzaakt door concentratieverschillen van opgeloste moleculen in de floëemcellen. Daardoor is het transport multidirectioneel. Op plekken met een hoge concentratie zijn opgeloste moleculen actief geaccumuleerd. Door osmose wordt daar water uit de omgeving aangetrokken en neemt er de turgordruk toe. In andere delen van de plant zijn de concentraties laag doordat de moleculen onttrokken worden aan de vloeistof; daar is de hydrostatische druk lager en er ontstaat een stroming van de plek met hoge naar die met een lage druk. Die stroming staat onder controle van de zeefplaten en wordt geholpen door diffusieprocessen; op zichzelf zijn die te traag om de gemeten stroming te kunnen verklaren.

Xyleem is het belangrijkste watertransportsysteem in vaatplanten. Ook hier vormen lange slanke cellen de vaatstructuur. De smaller wordende uiteinden van deze cellen zijn met elkaar verbonden en op die plaats geperforeerd. De binnenkant van de vaten, die zo ontstaan, is bekleed met een extra wand gemaakt van lignine (houtstof), een sterk hydrofoob molecuul met bijzondere mechanische eigenschappen. Wat wij hout noemen is eigenlijk lignine. Lange dunne holle buizen en wijdere open vaten verzorgen het watertransport tussen wortels en bladeren bij de vaatplanten. De cellen die het functionele volwassen xyleem vormen zijn dood.

Lignine versterkt de stengels en boomstammen en maakt het mogelijk dat de grootste bomen meer dan 90 m hoog kunnen worden. Lignine is een van de meest verbluffende uitvindingen van de natuur. De stijfheid van dat materiaal maakt watertransport over de hele hoogte van een boom van wortel tot blad mogelijk. Dit transport vergt geen energie van de plant zelf maar komt tot stand door capillaire activiteit, moleculaire cohesie en verdamping. De watermoleculen hangen aan elkaar met waterstofbruggen (cohesie) waardoor oppervlaktetenspanning optreedt, maar ze plakken ook aan de wanden van capillairen (adhesie). Adhesiekrachten tussen water en de wand van een capillair trekken de waterkolom op tot er een evenwicht is bereikt met de zwaartekracht die de kolom naar beneden trekt. De lengte waarover het water in contact staat met de wand van de buis, en daarmee de cohesiekracht, is evenredig met de diameter van de buis. Het gewicht van de waterkolom is evenredig met het kwadraat van de diameter. Daarom zal in een nauwere buis de waterkolom hoger optrekken dan in een wijdere.

De xyleem capillairen zijn gevuld met water en eindigen open in de bladeren. Daar verdampt water en cohesie tussen de watermoleculen trekt het water omhoog om de verloren watermoleculen aan te vullen.

Er is nog een mechanisme dat helpt om water omhoog te stuwen. In de wor-

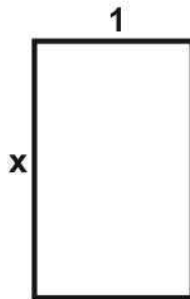
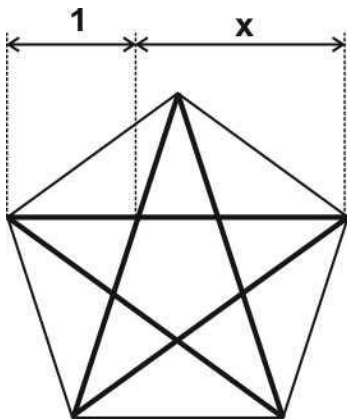
tels hopen zich ionen op die water aantrekken en osmotische druk opbouwen die het water omhoog stuwt in de stengel.

Details van het hele systeem zijn nog erg raadselachtig en er zijn nog tal van onopgeloste vragen over stromingsverschijnselen in vaatplanten. Toch is het gebruik van capillaire vaten om vloeistof omhoog te pompen op zonne-energie interessant vanuit ingenieursperspectief.

### Vijfassig symmetrisch

Een bijzondere vorm van radiaire symmetrie is de vijfassige of pentaradiaire. In het plantenrijk komen vijftallige bloemen en vruchten veel voor. In het dierenrijk komt alleen bij de stekelhuidigen vijfhoekige symmetrie als regel voor. Volwassen stekelhuidigen hebben de vorm van een regelmatige vijfhoek. Het is een bijzondere vorm met hoeken tussen de vijf assen van  $72^\circ$ . Voordeel of functie hiervan is niet duidelijk. Verhoudingen van de delen van een regelmatige vijfhoek zijn bepaald door het getal Phi van de gulden snede (Luca Pacioli, Divina Proportione, 1497).

Verbind de hoekpunten van de vijfhoek met de twee tegenoverliggende punten. Er ontstaat een vijfpuntige ster met een vijfhoek als kern. De verbindingslijnen doorsnijden elkaar op twee punten waardoor er drie stukken ontstaan. Het middelste stuk vormt een kant van de centrale vijfhoek. Elk van de twee andere stukken is de buitenkant van de arm van de vijfpuntige ster.



De gulden snede:  $1/x = x/(x+1)$ ;  
 $x = 1,618\dots$

Stel: de lengte van elke buitenkant is de eenheid waarmee we de verhoudingen gaan bepalen met de lengte van de rest van de verbinding tussen twee punten. Die rest noemen we  $x$ . Nu blijkt dat in elke regelmatige vijfhoek en dus ook in vijfassig symmetrische stekelhuidigen dat  $1/x$  gelijk is aan  $x/(x+1)$ . Met andere woorden: bij de verdeling van de lijn is de verhouding tussen de eenheid en de rest van de lengte gelijk aan de lengte van het langste deel gedeeld door de totale lengte. Dat is de verhouding van de gulden snede.

Uit de vergelijking kunnen we een reële waarde vinden voor  $x$  wanneer we er een vierkantsvergelijking van maken:

$$1/x = x/(x+1)$$

Dat wordt:

$$x^2 - x - 1 = 0$$

De positieve waarde voor  $x$  die met de formule voor de wortels uit deze vergelijking komt is:

$$x = (1 + \sqrt{5})/2$$

Dat is ongeveer 1,618, het getal Phi ( $\phi$ ) afgerond op drie cijfers achter de komma.

Wat maakt de verhouding van de gulden snede, 1: 1,618, nu zo bijzonder?

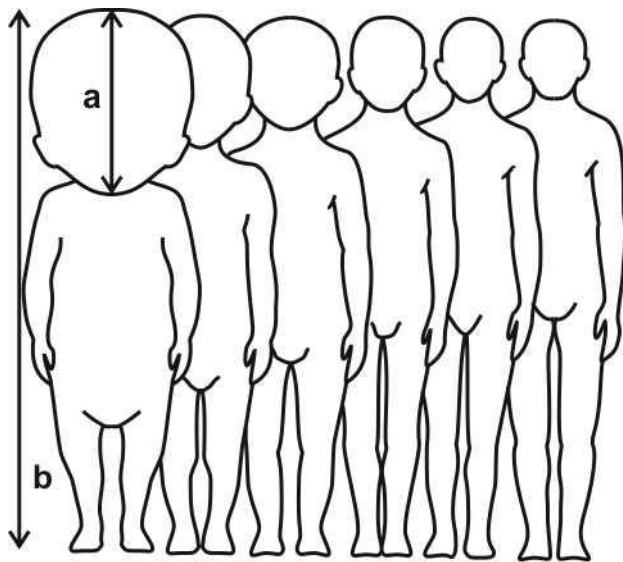


Het enige zinnige antwoord is waarschijnlijk dat wij mensen die verhouding esthetisch mooi vinden. Dat kan verband houden met het feit dat de gulden snede terug te vinden is in de verhoudingen van een mooi menselijk lichaam zoals Leonardo da Vinci probeerde te laten zien toen hij de man van Vitruvius natekende.

De vijfhoek wordt ook als een mooie vorm ervaren en door architecten af en toe toegepast: bijvoorbeeld in het Pentagon in Washington en het Gasunie gebouw in Groningen. Maar ook een rechthoekig raam waarvan de korte zijde zich verhoudt tot de langste zijde als de langste zijde tot de som van beide wordt als mooier ervaren dan wanneer dat niet zo is. De langste maat die 1,618 maal de kortste is, voldoet mogelijk aan een onbewuste esthetische eis.

## Groeien en bouwen

Groei gaat in de natuur meestal gepaard met vormverandering. De verhoudingen van onderdelen ten opzichte van elkaar veranderen. Het menselijk lichaam is een



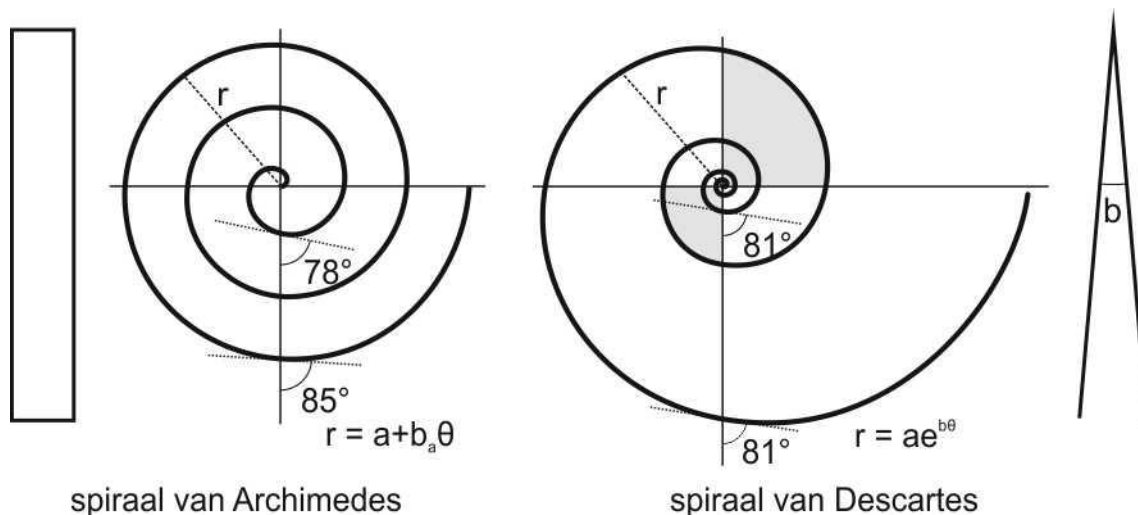
*Vormverandering tijdens de groei bij de mens. De verhouding tussen a en b verandert van 0,34 naar 0,14.*

goed voorbeeld. Het hoofd van een pasgeborene is ten opzichte van het formaat van het lichaam wel tweeëneenhalf maal zo groot als bij een volwassene. Een vierkant dat met vormverandering (allometrisch) groeit verandert in een rechthoek. Bij dit type groei worden alle onderdelen voortdurend aangepast. Dat lijkt me geen bruikbaar concept voor een bionische toepassing.

Groei zonder vormverandering (isometrische groei) zou dat eerder zijn, maar dat type groei is uitzonderlijk in de natuur. Een vierkant blijft vierkant door aan twee zijden evenveel groter te worden. In de natuur komt isometrische groei voor bij spiraalvormige schelpen van weekdieren en van foraminiferen.

Het is niet de simpelste spiraal, die zou eruitzien als een opgerolde staaf, zoals een dikke tros aan dek van een schip keurig opgerold kan zijn. Die spiraal verandert van vorm omdat de hoek tussen de raaklijn aan de kromme en de straal afneemt en na een aantal omwentelingen de  $90^\circ$  nadert. De straal van de spiraal neemt toe met de dikte van de staaf (of de tros) maal het aantal omwentelingen. Het is de allometrische spiraal van Archimedes.

De isometrisch groeiende spiraal is een opgerolde kegel. Het is een logaritmische spiraal, ook wel de spiraal van Descartes genoemd. De vorm hangt sterk af van de hoek van de kegel. Hij heeft als bijzondere eigenschap dat de hoek tussen de straal en de raaklijn aan de kromme overal gelijk is. De straal van een logaritmische spiraal groeit evenredig met  $e$  (het grondtal van de natuurlijke logaritmen) tot de macht van het product van de hoek van kegel en de omwentelingshoek (beide in radialen): het is dus eigenlijk een exponentiële spiraal.



De bekendste spiralen: de spiraal van Archimedes verandert bij groei van vorm, die van Descartes niet. De straal van de spiraal is  $r$ ,  $\theta$  is het aantal omwentelingen in radialen,  $a$  is een constante,  $b_a$  is de dikte van de staaf,  $e$  is het grondtal van natuurlijke logaritmen en  $b$  is de hoek van de kegel.

Bij de bekende schelp van de nautilus (de inktvis *Nautilus pompilius*) is de hoek van de kegel ongeveer  $10^\circ$ , en de hoek tussen de straal en de raaklijn aan de kromme is overal om en nabij de  $100^\circ$ . Alle schelpen van weekdieren en foraminiferen zijn Descartes-spiralen met verschillende kegelhoeken, aantallen omwentelingen en raakhoeken aan de kromme. Ze hebben meestal een derde dimensie, die met een uitrekkingfactor kan worden beschreven. Ook die is per soort anders.

Bomen groeien in samenspel met hun omgeving. De krachten die de wind genereert dienen te worden opgevangen. Bomen kunnen door hun gedifferentieerde groei de zwaarste stormen overleven. Ze gaan daarbij echter zuinig om met de aanleg van hout. Aan de kanten waar ze beschutting genieten van andere bomen (of bebouwing) hoeven ze minder sterk geconstrueerd te zijn en daar zullen ze ook minder hout aanleggen. Wanneer bij oude bomen door het kappen van enkele bomen in een dicht bestand windbeschutting wegvalt, duurt het te lang vóór de resterende bomen door groei het mechanische optimum hebben hersteld en lopen ze een grote kans te sneuvelen onder extreme windomstandigheden. Het komt veel voor dat bosbeheerders of plantsoenendiensten daar geen rekening mee houden. Het afzagen van een dikke tak kan ook rampzalige gevolgen hebben als er extreme weersomstandigheden optreden voordat de boom tijd heeft gehad om zich aan te passen aan de nieuwe situatie.

Hoe een boom reageert, is uitgezocht door de Duitse fysicus Claus Mattheck die een zwak voor bomen heeft en hun lichaamstaal begrijpt. De vork in een boom, waar de stam in tweeën splitst, heeft een vorm waardoor de stam niet splijt als de wind tekeergaat. De krachten op de vork zijn statisch en dynamisch van aard. De zwaartekracht werkt loodrecht naar beneden in beide zijtakken die echter onder een hoek staan ten opzichte van de verticale richting. Het gewicht van elke tak is de som van het gewicht van de tak zelf plus dat van alle zijtakken en bladeren. De grootte van de hoek van de vork bepaalt de grootte van de component van de zwaartekracht die de vork uit elkaar trekt. De dynamische krachten door de

De natuur heeft voor elk constructieprobleem wel een oplossing die dicht in de buurt van een optimum zal liggen. Als een probleem precies gedefinieerd is kan de bionicus uitzoeken welk organisme de oplossing daarvoor in huis heeft. Sommige structuren in de natuur zijn wat vorm en functie betreft ongeëvenaard ingenieus.

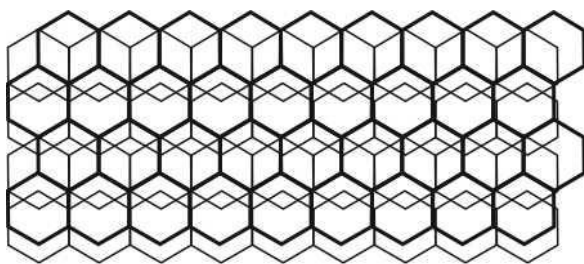
### Raten van de honingbij

De raten van honigbijen (*Apis mellifera*) en wespen (*Vespula vulgaris*) behoren tot de meest ingenieuze bouwsels die de natuur te bieden heeft. Bijen maken ze van was, wespen van gekauwd hout.

Bijen worden al duizenden jaren door de mens gehouden omdat ze honing, was, propolis (een hars), geneeskrachtig gif en de vermeend jong makende en libido versterkende koninginnengelei produceren.

Onder natuurlijke omstandigheden zijn de raten van de honigbij halfronde, soms langwerpige wasplaten die loodrecht naar beneden hangen. Ze hangen evenwijdig aan elkaar meestal in een hol, maar ook wel eens in de open lucht. Een raat heeft twee kanten. Elke kant bestaat uit aaneengesloten zuiver symmetrische zeshoekige cellen. De punten van de regelmatige zeshoeken wijzen naar boven. Elke cel is een centimeter diep en heeft een concave bodem die de vorm heeft van een halve bol. De meeste cellen zijn 5,4 mm groot van wand tot wand gemeten. Die worden gebruikt als broedcellen voor werksters en als opslagcellen voor honing en stuifmeel. Aan de rand van de raten worden ook grotere cellen gemaakt met een horizontale diameter van 7,1 mm. Die dienen voor het uitbroeden van darren. Voor koninginnen worden aparte cellen gebouwd, los van de strakke raatstructuur.

De moderne imker hangt rijen houten raampjes met kunstraat in een kast die van boven open kan. Een kunstraat is een plaat was met aan weerszijden het patroon van de zeshoekige cellen voorbedrukt. De bijen gebruiken de plaat als basis om er aan twee kanten cellen op te bouwen. Deze praktijk laten we hier buiten beschouwing.



*De geometrie van een honingraat.*

Wat we ervan weten vat ik hier samen waarbij ik gebruikmaak van mijn eigen waarnemingen als imker.

Bij de bouw beschikken bijen over enkele precieze meetinstrumenten. Voor de richting waarin de raten naast elkaar gebouwd worden, oriënteren ze zich met een ingebouwd kompas op het aardmagnetisch veld. IJzerhoudende partikels in de antennes en op enkele andere plaatsen in het lichaam werken als kompasnaald.

Om precies verticaal te kunnen werken beschikken ze over een alternatief

De grote perfectie die onder natuurlijke omstandigheden wordt bereikt heeft de mens van oudsher verbaasd. Door de eeuwen heen brak de mens zich het hoofd over de vraag hoe bijen dat voor elkaar krijgen. Nog steeds worden er wetenschappelijke artikelen aan gewijd, want niet alle details van het productieproces zijn opgehelderd.

en een wandoppervlak van  $193 \text{ mm}^2$ . Een tien millimeter diepe cel die een driehoekige dwarsdoorsnede heeft met dezelfde inhoud heeft zijden van 7,35 millimeter en een wandoppervlak van iets meer dan  $220 \text{ mm}^2$ . De bouw van regelmatige zeshoeken kost dus veel minder was en door het grotere aantal ribben is de structuur veel sterker.

De hoek van  $13^\circ$  waaronder de cellen naar de dichte achterkant aflopen zorgt ervoor dat de vloeibare inhoud er niet uitloopt. Natuurlijke selectie op het bouwgedrag van honingbijen heeft geresulteerd in de ingenieuze raatstructuur. Dat heeft dus niets met intelligentie van deze dieren te maken. Het bouwgedrag ligt verankerd in de genen en is aangeboren. Door genetische variatie werden volken die efficiënter bouwden groter en hadden aldus meer kans op overleven.

Wij zien het eindresultaat van een evolutionaire ontwikkeling en kunnen gebruikmaken van de geoptimaliseerde bouwtechniek zodra we de details begrijpen.

We leren hier onder andere van hoe je efficiënt met beschikbare ruimte kunt omgaan, hoe je met zo weinig mogelijk materiaal een grote sterkte kunt bereiken en hoe je in een productieproces aaneengesloten ronde cilinders kunt vervormen tot zeshoekige, om er ruimte en stevigheid mee te winnen.

## **Airconditioning in de natuur**

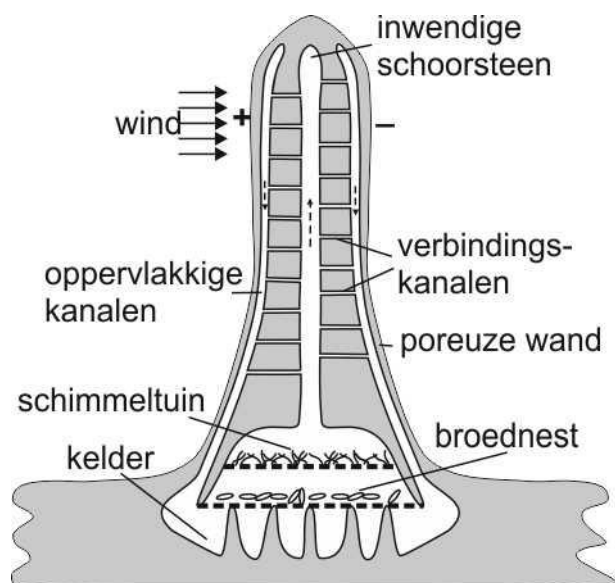
Er is nog veel meer te leren van bijen en andere sociale insecten. Hoe houden ze bijvoorbeeld de temperatuur, de luchtvochtigheid en de samenstelling van de lucht in hun onderkomens constant? Bij bijen en termieten zijn de meest geavanceerde methodes geëvolueerd.

Op de vliegplank voor een bijenkast staan op warme dagen rijtjes bijen achter elkaar met hun vleugels te slaan zonder op te stijgen. Af en toe stoppen ze even, soms neemt de vleugelslagfrequentie toe.

Wat gebeurt daar precies? De samenstelling van de lucht in een bijenvolk wordt geregeld door sociale communicatie over en weer. Holen waarin bijen van nature leven en de door de mens gemaakte korven of kasten, hebben gemeen dat ze meestal slechts één enkele opening hebben aan de onderzijde. De kostbare raten met broed en honing hangen bovenin en kunnen zo goed worden beschermd. Kieren aan de bovenkant worden dicht gekit met propolis, een donkerbruine substantie met een antibiotische werking die bijen van hars maken.

Er zitten zo'n 30.000 tot 60.000 bijen in een volk, die warmte,  $\text{CO}_2$  en waterdamp produceren en zuurstof verbruiken. Koele verse droge lucht wordt door de kleine opening onderin aangevoerd en warmte,  $\text{CO}_2$  en waterdamp afgevoerd. Een probleem, want in de kast stijgt de warme lucht op. Dat komt niet alleen door de hoge temperatuur maar ook doordat zuurstof wordt vervangen door een per saldo lichter mengsel van lichtere waterdamp en zwaardere  $\text{CO}_2$ . Door verschillen in concentraties binnen en buiten zal er bij de uitgang door diffusie enige uitwisseling plaatsvinden, maar dat is lang niet genoeg.

De rijtjes bijen staan met de kop naar de ingang en zuigen door te waaieren de lucht naar buiten. Ze worden daarbij tegengewerkt door de opstijgende lucht binnen. Het aantal waaierende bijen neemt toe naarmate de  $\text{CO}_2$ -concentratie binnen hoger wordt.



Airconditioning bij termieten.

Het mechanisme werkt als volgt: de bijen zuigen de lucht met hun vleugelslagen naar buiten (ze moeten zich daarbij schrap zetten) en creëren daarmee onderdruk in de kast. Dan stoppen ze allemaal tegelijk en de opgebouwde onderdruk zorgt ervoor dat verse lucht naar binnen stroomt. Vervolgens beginnen ze opnieuw lucht naar buiten te pompen tot er voldoende onderdruk binnen is en ze weer stoppen om lucht binnen te laten. De neiging van de lucht binnen om op te stijgen wordt door dit gedrag handig gebruikt om de airconditioning te optimaliseren. De bijen die de waaierwacht hebben, hoeven het niet alleen te doen, binnen zijn er op

verschillende plaatsen bijen die met vleugelslagen helpen de lucht de goede kant uit te laten bewegen, afwisselend naar binnen en naar buiten.

Bijen doen het helemaal zelf, termieten maken gebruik van luchtstroming in hun omgeving voor de airconditioning van hun onderkomens.

Een termietennest bevindt zich half onder de grond. Daar zit centraal een groot broednest met de koningin en daaromheen zijn kamers met schimmelkweken waarvan de enzymen gebruikt worden om cellulose, van hout dat als voedsel dient, af te breken.

Er zijn minder en meer geavanceerde termietenheuvels te onderscheiden. De eerste categorie maakt gebruik van het schoorsteeneffect. Op het bovengrondse deel van het nest zit een schoorsteen die langer is naarmate er meer termieten in het volk zitten. De opening van de schoorsteen bevindt zich boven het maaiveld, daar waar de wind vrij spel heeft en niet meer afgeremd wordt door de bodem. Vlak bij de grond zijn er vele kleine openingen naar buiten vanuit het gangenstelsel dat de verschillende kamers met elkaar verbindt. De langsstromende wind zorgt voor onderdruk bij de opening van de schoorsteen. Vlak bij de bodem is de luchtdruk hoger. Het verschil zorgt voor doorstroming van het nest van beneden naar boven.

De grootste termietenheuvels hebben echter geen open schoorsteen. De nesten van *Macrotermes michaelseni* en *M. natalensis* hebben onder de grond een grote kelderruimte, ondersteund door pilaren. Daarboven zit het broednest en daar weer boven bevinden zich de schimmeltuinen. De kelder staat in verbinding met een kanalsysteem dat zich overal vlak onder het oppervlak van de heuvel bevindt en door een poreuze wand met de buitenwereld in contact staat. In het centrum van de heuvel zit een inwendige schoorsteen die geen opening naar buiten heeft maar met zijkanalen wel in verbinding staat met het oppervlakkige kanalsysteem.

De kolonie als geheel heeft een metabolisme dat zo groot is als dat van een volwassen geit. De miljoenen termieten van een volk gebruiken zelf ruwweg 1,5

## 4. Bionica voor viskwekers

Het aantal mensen op aarde nadert de zeven miljard en groeit gestaag door. Voedselproductie en -distributie voor de wereldbevolking is een groeiend probleem.

Voedsel wordt op grote schaal geteeld en gekweekt en het ziet ernaar uit dat er voldoende zal zijn zolang we het op een goede manier kunnen verdelen. Met één soort voedsel is er echter een groot probleem: vis; die komt voornamelijk uit het wild en wordt nog maar mondjesmaat gekweekt. De oceanen worden in hoog tempo leeggevist. Wereldwijd dalen de vangsten ondanks hogere visserij-inspanningen en verdere verbetering van de technieken. Bij favoriete soorten zijn de aantallen in de populaties de afgelopen vijftig jaar met 90% gedaald. Herstelprogramma's lijken soms te werken, zoals bij de kabeljauw waarover berichten verschijnen dat de populaties zijn verdubbeld door beschermende maatregelen. In werkelijkheid zijn de aantallen toegenomen van 1% naar 2% van die uit 1950.

Kweken lijkt de juiste oplossing. Bij deze tak van de voedselindustrie worden de problemen echter ook steeds groter. De kweekmethoden zijn toe aan vernieuwing want de kwaliteit van het eindproduct en de duurzaamheid van de methode laten te wensen over.

Op een internationaal congres in Barcelona op 2 juli 2010 werden oplossingen aangedragen. Hier volgt een samenvatting van mijn bijdrage.

### Natuurlijk gekweekte vis

De natuur gebruikt voortplanting als een dekmantel voor voedselproductie. Nageslacht is houdbaar voer dat leeft en groeit. Een eik draagt elk jaar tienduizenden zaden, maar slechts heel af en toe ontstaat er een nieuwe boom uit zo'n eikel. Veruit de meeste noten, zaden en vruchten worden gegeten. Bij veel dieren is het niet anders. Slechts tien van elke honderdduizend eieren die een schol afzet, is een jaar later nog in leven als klein visje. De rest is opgegeten door Jan en alleman, inclusief iets oudere larven van de eigen soort. Kannibalisme is een volstrekt normaal en noodzakelijk verschijnsel in de natuur. Vanuit het gezichtspunt van de eik en de schol lijkt dit een enorme verspilling. Maar elke voortplantingsstrategie is het gevolg van natuurlijke selectieprocessen die de kans op gezonde en dus vruchtbare nakomelingen zo groot mogelijk maken binnen de ecologische beperkingen van een soort.

Leven op aarde is georganiseerd in voedselpiramides. Fotosynthese in planten vormt de basis. Alle planten, van eencellige algen tot woudreuzen, maken met bladgroen en zonne-energie, koolhydraten van kooldioxide en water. Dit is het primaire productieproces. Planten gebruiken de opbrengst om te groeien en zich voort te planten. Zij worden massaal begraaasd door dieren die geen bladgroen hebben en plantaardig voedsel eten om zelf te kunnen groeien en zich voort te planten. Sommige dieren zijn hun hele leven vegetariër, andere tijdens larvale of juveniele stadia. Planteneters dienen op hun beurt als voedsel voor vleeseters.

Voor elk dier valt te berekenen hoeveel primaire productie er nodig is om het in leven te houden door op te tellen hoeveel het eet, hoeveel zijn prooien consumeren en uit hoeveel plantaardig materiaal het voedsel van de prooien bestaat. Daarbij is de efficiëntie per stap ongeveer 10%. Dus voor één gram snoek, heb je

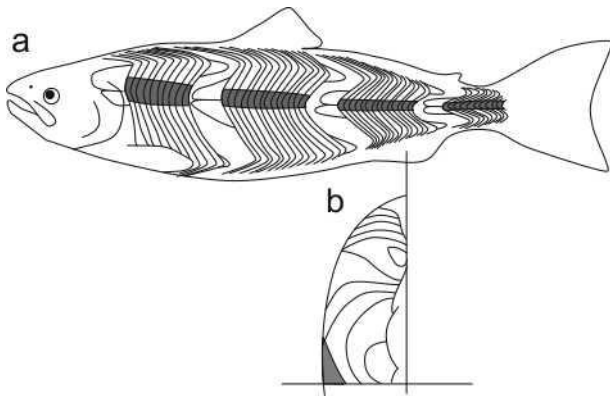
vangen vis. Haring van prima kwaliteit bijvoorbeeld wordt tot visvoer verwerkt om zalm te kweken die het qua smaak en textuur niet haalt bij wilde zalm. Scheepsladingen goede consumptievis worden gevoerd aan tonijnen. Dit systeem is niet duurzaam en zal op een gegeven moment instorten.

Veel viskwekers zien dat al aankomen en vragen om oplossingen. Door te onderzoeken hoe de natuurlijke topkwaliteit tot stand komt zou er een beter product op de markt kunnen komen. Dit is ook bionica, want we kijken hoe vissen zich van nature voortplanten, voeden en uitgroeien tot lekkere prachtexemplaren en kunnen die methode of belangrijke delen daarvan toepassen. Dat vraagt wel om een cultuuromslag bij viskwekers.

### Eetbare zwemspieren

We gaan de witte spieren van vissen nader bekijken om te zien hoe ze ontstaan, hoe ze groeien en waar hun kwaliteit van afhangt.

Zwemspieren van vissen zitten ingewikkeld in elkaar. De spiervezels zijn



*Myotoombouw bij de zalm. a. Zijaanzicht, waarin enkele spiergroepen zijn verwijderd. b. Bovenste kwart van een dwarsdoorsnede. (Rode spieren zijn grijs.)*

kort en zitten in plakken, myotomen genoemd, achter elkaar. De plakken worden van elkaar gescheiden door peesplaten, de myosepten. (Ze vallen gemakkelijk uit elkaar bij een gare vis). De myotomen en myosepten zijn complex gevormd, ze zitten als friteszakken in elkaar geschoven. Aan één zijde vinden we van boven naar beneden vier friteszaksystemen. De punten van de bovenste en onderste zakken wijzen naar achteren, die van de middelste twee naar voren. De functie van deze complexe bouw is nog niet bekend, maar heeft waarschijnlijk met het efficiënt doorgeleiden van krachten van

doen.

De spiervezels in het myotoom lopen ongeveer in de lengterichting van de vis. Afhankelijk van de plaats in het lichaam wijken ze er wat van af. Die afwijkingen zorgen ervoor dat alle vezels evenveel arbeid verrichten tijdens het zwemmen.

De meeste spiervezels zijn wit van kleur (bij zalmachtigen zijn ze door kleurstoffen in het voedsel roze). Rode vezels liggen bij de meeste vissen oppervlakkig over de hele lengte in het midden tussen rug en buik; ze maken deel uit van de myotomen. Op een dwarsdoorsnede van het achterste deel van het lichaam voorbij de anus zien we vier onderling gespiegelde kwarten. In elk kwart zijn de myosepten te zien als min of meer concentrische cirkels van wit bindweefsel. Dat zijn de doorgesneden friteszakken.

Bij sommige vissen scheidt een horizontale bindweefselplaat de bovenste kwarten van de onderste. Elk kwart heeft een klein hoekje gevuld met rode spiervezels aan de buitenzijde. Het grootste oppervlak van de dwarsdoorsneden wordt

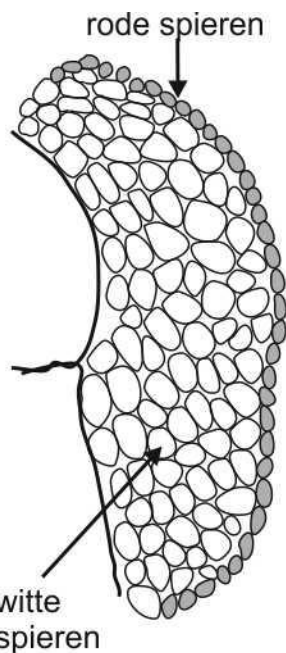
ingenomen door witte spieren. Rond de buikholte is de bouw van de spieren aangepast en liggen de myotomen en myosepten als een plaat aan de buitenkant van de ribben. De bovenste kwarten in dat deel zijn vergelijkbaar met die in het staartgedeelte.

Actieve vissen die constant zwemmen hebben het hoogste percentage rode spieren, van de makreel is bijvoorbeeld 15% van de spieren rood. Predatoren die hun prooi met een korte snelle beweging vanuit een hinderlaag grijpen en het grootste deel van de tijd stil liggen te wachten, hebben voornamelijk witte spieren.

De rode spiervezels trekken langzaam samen maar zijn vrijwel onvermoeibaar. De zuurstofvoorziening houdt gelijke tred met het verbruik. De rode kleur is het gevolg van een zeer goede doorbloeding, en dat maakt het uithoudingsvermogen groot. Rode spiervezels hebben een hoog metabolisme en verzuren niet. Een dicht net van zenuwen zorgt voor een goede aansturing en ze reageren op een enkele prikkel. Bij sommige soorten - grote snelle tonijnen en haaien - liggen de rode spieren diep in de massa witte spieren. Bij het zwemmen wordt de temperatuur van de witte spieren door de diep liggende rode spieren verhoogd met wel 10°C waardoor de witte spieren tweemaal zo snel samentrekken en de maximale zwemsnelheid verdubbelt. De diameter van rode spiervezels is kleiner dan die van de witte.

Witte spiervezels verkorten snel maar zijn ook vlug uitgeput. De bloedvoorziening is slecht en witte spieren verzuren gemakkelijk. Door de slechte bloedvoorziening duurt het wel een dag voor alle melkzuur uit de spier verdwenen is na een uitbarsting van activiteit.

Verzuurde spieren zijn minder smakelijk. Dat is mogelijk de reden dat



*Spiervezels in een dwarsdoorsnede door een bovenste kwart van een karpelarve.*

sportvissers hun buitgemaakte karpers meestal niet eten. Het is de sport om karpers aan een dunne lijn te vangen en ze zo uit te putten dat ook het zwaarste exemplaar uiteindelijk gemakkelijk met een net uit het water geschept kan worden zonder tegenspartelen. Om die karpers vervolgens te kunnen eten zou hij een dag lang moeten bijkomen in zuurstofrijk water.

De minder gewaardeerde smaak van rode spieren hangt mogelijk samen met de sterke doorbloeding. Viskwekers zouden het liefst vis kweken met zoveel mogelijk witte spiervezels, maar hoe groeien die?

### **De ontwikkeling van witte vezels**

In het ei ontstaan witte spiervezels al in een heel vroeg stadium, het aantal is afhankelijk van de zuurstofvoorziening en de temperatuur. Al in het ei oefenen de embryo's de witte vezels door heel wild te bewegen. Na het uitkomen, gaan ze daarmee door en stimuleren zo de ontwikkeling van nieuwe vezels. Tegen de tijd dat vislarven hun dooier op hebben en zelf voedsel gaan zoeken zijn de lichaamshelften gevuld met witte vezels met daaromheen aan de buitenkant



een enkele laag rode vezels.

De spiervezels groeien heel snel in het begin, de aantallen nemen toe en ze worden ook dikker. De groeisnelheid hangt mede af van het voer. Kunstmatig voer geeft lagere groeisnelheden dan levend voer. Bij een vergelijkende proef witte spieren hadden witte spieren van karperlarven die met levend dierlijk plankton werden gevoed de hoogste groeisnelheden, waarbij het volume in twee weken tijd dertig maal zo groot werd. 64% van deze groei werd veroorzaakt door de toename van het aantal cellen, de rest was groei in de dikte.

Het is geen wet van Meden en Perzen dat dit voor alle vissoorten geldt; de relaties tussen de groei van witte spieren en variabelen als voedsel, dienen voor elke soort opnieuw te worden onderzocht.

Zwembewegingen zijn in het eerste larvale stadium belangrijk voor de ontwikkeling van de witte spieren. We zullen zien dat bij de kleinste larven rode spieren bij het zwemmen geen rol van betekenis spelen. Die zwemmen namelijk totaal anders dan volwassen vissen. We verdiepen ons in het zwemmen van vissen om te begrijpen waarom.

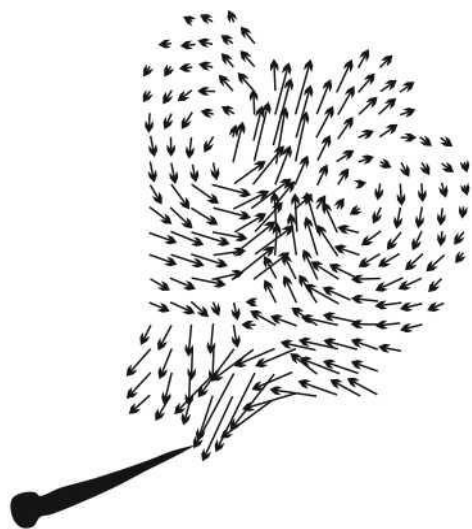
### **Zwemmen van larve tot volwassen vis**

De wervelkolom van vissen kan in de lengterichting niet samengedrukt worden maar wél soepel naar links en rechts buigen. De spieren aan de linker- en rechterkant zorgen voor de zijdelingse buigingen van het lichaam die nodig zijn om te zwemmen. Daarbij drukt het bewegende lichaam tegen het water; de reactiekrachten stuwden de vis voort.

Tijdens de ontwikkeling van larve tot volwassen vis verandert de aard van de interactie met het water drastisch. Voor de kleinste larven voelt het water aan als stroop, terwijl de groteren er zich steeds gemakkelijker in kunnen verplaatsen.

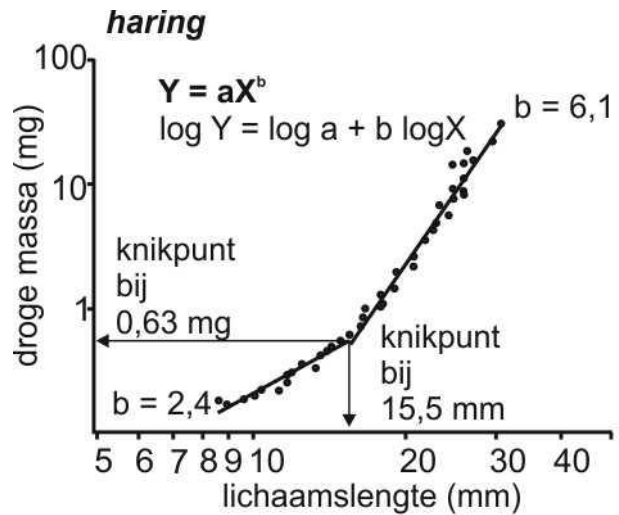
De lichaamslengte en de zwemsnelheid bepalen de aard van de interactie. Het gaat om de verhouding tussen traagheidskrachten en viskeuze krachten: het Reynoldsgetal. Bij pas uitgekomen vislarven overheerst de stroperigheid en is die verhouding ongeveer een op tien. Het Reynoldsgetal is 0,1. Het loopt op tot honderd miljoen voor een groot verkeersvliegtuig of een drieëndertig meter lange walvis op topsnelheid; daarbij speelt viscositeit geen rol meer en is de traagheid de bepalende factor.

Larven kunnen aan het stroperige milieu ontsnappen door te groeien en sneller te zwemmen. De kleinste larven zwemmen met één enkele staartslag gevolgd door een kort uitdrijfmoment. Die slag produceert twee wervels in het water en de stroming tussen die wervels duwt de larve vooruit. De aanvankelijke snelheid neemt na de slag onmiddellijk drastisch af door de grote vis-



*Het stroompatroon als gevolg van één staartslag van een 4 mm lange zebravislarve.*

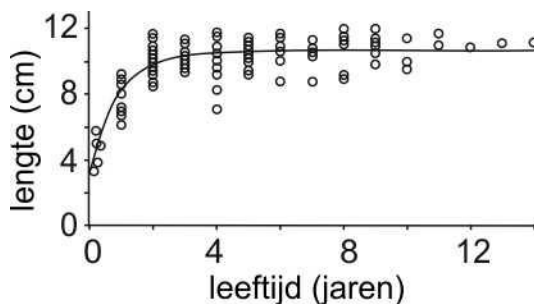
Vissen die opgroeien bij lagere temperaturen dan optimaal blijven langer larve, groeien slechter en zwemmen langzamer. Groeigrafieken, waarin de massa wordt uitgezet tegen de lengte, laten bij veel vissen een knik zien. Haringlarven groeien aanvankelijk sneller in de lengte en blijven slank. Pas later in hun ontwikkeling, boven een bepaalde lengte, neemt het gewicht plotseling sterker toe en worden ze minder snel langer. Ze ontsnappen aan het viskeuze regime door snel te groeien en harder te zwemmen. Dat moet natuurlijk niet ten koste gaan van de witte spiervezels. Dat gebeurt ook niet.



Knikpunt in de groeicurve van haringlarven.

Bij karperlarven is aangetoond dat tijdens snelle groei er meer dunnere witte spiervezels ontstaan dan bij, als gevolg van slecht voedsel, langzaam groeiende larven. Bij die laatste groep was de doorsnede door de witte spier wel groter maar zaten er minder vezels in per oppervlakte eenheid.

Otolieten zijn gehoorbeentjes van vissen, ze groeien voortdurend door het afzetten van groeiringen per dag. Het is mogelijk om het verloop van de groei vanaf het larvale stadium af te lezen aan de ringen. Daarbij is bij de blauwvis (*Pomatomus saltatrix*) gezien dat dieren die als larve sneller groeiden een hogere overlevingskans hebben.



Groeicurve van de bruinkop vlindervis.

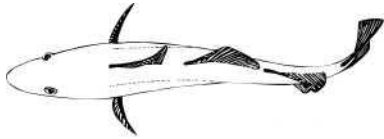
Veel vissen groeien dan ook zo snel mogelijk door naar hun volwassen grootte. De bruinkop vlindervis (*Chaetodon larvatus*) uit het zuiden van de Rode Zee bereikt door snel te groeien binnen twee jaar de maximale lengte en leeft vervolgens nog meer dan zestien jaar door zonder verdere groei (bijzonder is dat de otolieten wél doorgroeien).

Het is duidelijk dat natuurlijke selectie gericht is op het elimineren van de kleinere en minder mobiele individuen. De kleinste eieren, larven en juvenielen worden massaal geconsumeerd door predatoren. Grotere stadia van dezelfde soort behoren ook tot die predatoren. Er zijn in elke generatie slechts enkele overlevenden die zich voort kunnen planten; de grote massa is visvoer. Dit principe zorgt voor de topkwaliteit van wilde vis. De beste vissen produceren de meeste en grootste eieren en het beste sperma. Nakomelingen van deze dieren hebben de grootste kans om ook volwassen te worden en zich voort te planten. De meeste vissoorten investeren in extreem grote hoeveelheden bevruchte eieren die ze vrij

zaam dat uitsluitende de rode spieren gebruikt worden. Ook bij volwassen vissen dienen de witte spieren regelmatig te worden aangesproken om ze topfit te houden.

Elke soort gebruikt de witte spieren anders, afhankelijk van zijn ecologische niche en zijn plaats in de voedselpiramide. Jagers vanuit een hindernis zoals de zeeduivel of de snoek zetten witte spieren in bij het grijpen van de prooi, de snoek accelereert daarbij tot vijftientig keer de versnelling van de zwaartekracht  $g$  (astronauten ondergaan  $10 g$  bij de lancering). De zeeduivel lokt zijn prooi met een op aas lijkend uiteinde aan een lange vinstraal op zijn kop. Als de prooi dichtbij is opent hij razendsnel zijn grote bek en zuigt hem naar binnen. Dat veroorzaakt grote krachten die hem van zijn plaats zouden gooien als hij niet met zijn grote massa witte spieren tegenkrachten genereert.

Bij schrikreacties zetten vissen ook hun witte spieren in. Forellen zijn eigenlijk langeafstandszwemmers maar kunnen bij schrikreacties versnellingen halen van  $10 g$ . Een kabeljauw jaagt van nature door op kruissnelheid te zwemmen en



*Een remmende kabeljauw.*

heel hard te remmen wanneer hij met zijn gevoelige baarddraad een prooi waarneemt. Tijdens het zwemmen gebruikt hij de rode spieren maximaal bij een snelheid die hij eindeloos kan volhouden. Remmen gebeurt met de witte spieren die het lichaam plotseling in een S-vorm samentrekken. Hij remt zo krachtig dat de prooi nog niet voorbijgeschoten maar halverwege zijn lichaam is, waar die na een snelle draaibeweging wordt gepakt. Ook bij die beweging zijn de witte spieren actief.

Jagen op voedsel en voortdurende predatiedruk zijn van groot belang bij het kweken. Kannibalisme kan hierbij een middel zijn om ervoor te zorgen dat de besten overleven. Nu wordt het nog als een plaag gezien door viskwekers. Die houden vissen vaak in dichtheden van wel duizend maal de natuurlijke. Dat heeft ernstige negatieve effecten op ontwikkeling en groei. Vissen in een natuurlijke school houden afstand van elkaar met behulp van informatie over stromingspatronen in het water die ze met hun zijlijnorgaan opvangen. Dat orgaan bestaat uit zintuigen die zich van kop tot staart langs het hele lichaam bevinden. De werking is gebaseerd op zintuigharen die beweging waarnemen en zenuwuiteinden activeren, vergelijkbaar met ons gehoor- en evenwichtsorgaan. In onnatuurlijk dichte scholen is de hoeveelheid en aard van de informatie die de zenuwen doorgeven aan de hersenen niet te verwerken tot adequaat gedrag. Bij mensen leidt een dergelijke overdosis aan informatie in de hersenen tot psychose.

### **Praktische oplossingen**

Voor viskwekers is het is de moeite waard serieus te overwegen soorten te selecteren met voornamelijk witte spieren die hun rode spieren weinig gebruiken en vrijwel niet hoeven te zwemmen. Predatoren zoals de snoek, snoekbaars, barracuda en zeeduivel vangen hun prooi vanuit een hinderlaag en bewegen verder nauwelijks. Hun witte spieren zijn het best ontwikkeld. Ook platvissen vallen onder deze categorie.

Er valt ook te overwegen een deel van de productie van eieren, larven en

voor een deel door staande netten in grote kooien geleid. Ze zijn dan mager en worden er vervolgens vetgemest met hoogwaardige, uit het wild gevangen vis. Dat is niet nodig: een eiwitrijk dieet op basis van meelwormen zou ze minstens zo gemakkelijk op gewicht kunnen krijgen. De witte spiervezels van deze volwassen dieren zijn immers al volledig ontwikkeld. Deze tonijnen zijn bestemd voor de export naar Japan waar ze tegen torenhoge prijzen vers verkocht worden.

Het is duidelijk dat een bionische aanpak een cultuuromslag vergt in de vis-industrie. Massaproductie is niet langer het hoofddoel. In plaats daarvan gaat het om de kwaliteit van de vis op het bord met duurzaamheid als bonus. De praktische uitwerking van een natuurlijke aanpak bij het kweken van consumptievis zal hoge eisen stellen aan de inventiviteit van de kwekers, maar met de fundamentele lessen uit de natuur in het achterhoofd moet het nieuwe doel grotendeels te verwezenlijken zijn.

De voordelen zijn:

- Een kweekproduct van uitstekende kwaliteit dat meer geld per kilo opbrengt.
- Sterk gereduceerde voerkosten en betere kwaliteit duurzaam voer.
- Lagere investeringen in voersupplementen en medicijnen.
- Sterke vermindering van de vervuiling van het milieu.
- Gezondere en minder gestreste vis.

Ook elders in de bio-industrie kunnen natuurlijke productiemethoden leiden tot verbetering van het eindproduct: het welzijn van de dieren en duurzaamheid. Dit in tegenstelling tot wat megastallen kunnen bieden. De noodzakelijke biologische kennis is voorhanden, het is een kwestie van durf en de wil om nieuwe wegen in te slaan.

## 5. Mobiliteit

### Wat is bewegen?

Mobiliteit is het vermogen om te bewegen; verplaatsing in ruimte en tijd. Het is een complex fenomeen. Aristoteles dacht daar in zijn tijd al diep over na en kwam tot de conclusie dat er een kracht nodig was om een voorwerp in beweging te krijgen en te houden. Hij dacht dat beweging ophoudt zodra de kracht wegvalt. Vanuit die filosofie was het vooral moeilijk om beweging in lucht en water te verklaren.

Wij zijn nu een stuk verder en hebben met de leer van de mechanica, de kern van de klassieke natuurkunde, de juiste verklaring voor bewegen gevonden.

De belangrijkste elementen van beweging zijn lengte, massa en tijd. Hiervoor zijn internationale standaard (SI) eenheden afgesproken. Voor de lengte is dat de meter (m), de eenheid van massa is de kilogram (kg) en die van tijd de seconde (s). Met combinaties van deze fundamentele eenheden kunnen afgeleide grootheden worden gedefinieerd.

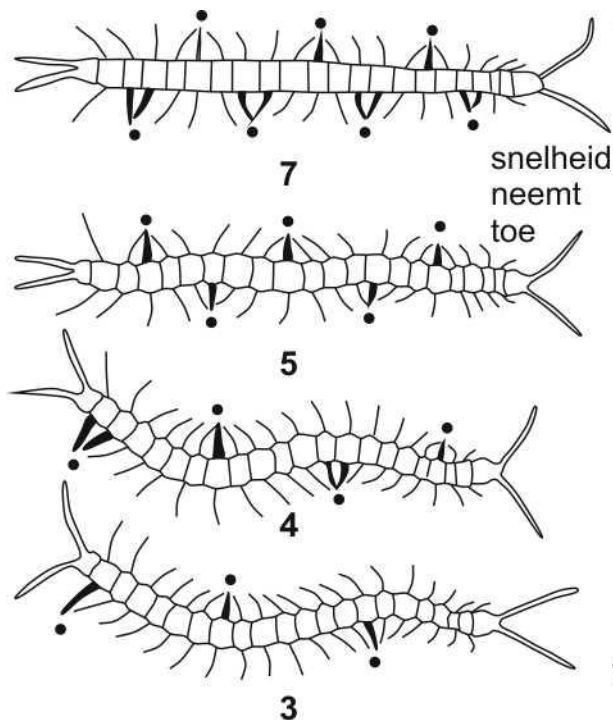
Bij bewegen is er sprake van verandering van plaats, uitgedrukt in meters (m). Snelheid, de verandering van plaats per tijdseenheid, wordt uitgedrukt in meters per seconde (m/s). Versnelling of vertraging is de verandering van snelheid in de tijd ( $m/s^2$ ). Versnelling maal de massa die versneld wordt ( $kg\ m/s^2$ ) is een kracht. De eenheid daarvan is de Newton (N), waarmee 1 kg met  $1\ m/s^2$  wordt versneld. De massa van een bewegend voorwerp duwt door en laat zich moeilijk afremmen. Die eigenschap is de impuls, die gelijk is aan het product van de massa en de snelheid ( $kg\ m/s$ ). Om die impuls tot nul te reduceren en het voorwerp af te stoppen dient kracht te worden uitgeoefend gedurende een zekere tijd ( $Ns = kg\ m/s^2\ s = kg\ m/s$ ). Anders gezegd, de verandering van impuls in de tijd is kracht ( $Ns/s = N$ ). Energie is de capaciteit om arbeid te verrichten. Arbeid is gelijk aan kracht maal afstand (Nm). De eenheid daarvan is de Joule ( $J = Nm$ ). Energieverbruik ten slotte is de arbeid die per tijdseenheid wordt verricht ( $J/s$ ) en de eenheid daarvan is de Watt ( $W = J/s = Nm/s$ ).

Isaac Newton (1642 - 1727) formuleerde drie basiswetten voor bewegende voorwerpen in zijn boek *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* in 1686.

De eerste luidt vrij vertaald: een voorwerp blijft in rust of in eenparige beweging langs een rechte lijn wanneer er geen krachten op worden uitgeoefend of wanneer de resultante van alle krachten nul is. Impuls is de eigenschap die ervoor zorgt dat een bewegend voorwerp doorgaat met bewegen zonder van richting of snelheid te veranderen.

De tweede wet beschrijft wat er gebeurt wanneer een voorwerp uit de evenwichtssituaties komt waar het in de eerste wet over gaat. Een verandering van snelheid wordt veroorzaakt door een netto kracht die van buitenaf op het voorwerp wordt uitgeoefend. De richting van die versnelling is gelijk aan de richting van de kracht, en de grootte is gelijk aan die van de kracht gedeeld door de massa van het voorwerp.

De derde wet staat bekend als de actie = reactie wet: elke kracht die op een voorwerp wordt uitgeoefend veroorzaakt eenzelfde kracht in tegengestelde richting.



*Duizendpoot: het aantal poten aan de grond neemt af als de snelheid toeneemt.*

de grond. Moet de snelheid omhoog dan gaat een paard in draf en vervolgens in galop. In draf en galop is elk been minder dan de helft van de looptijd aan de grond. In snelle draf zet een paard zich met twee benen af en zweeft kort door de lucht. De benen rechts voor /links achter wisselen af met links voor / rechts achter. (Bij de telgang van onder andere kamelen en honden zetten de poten aan één kant afwisselend af.) Een galop kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. Bij de sprongengalop zetten afwisselend de voor en achterbenen af, gevolgd door een sprong door de lucht. Bij het neerkomen raakt eerst één been de grond, dan het andere, en dat blijft het langst aan de grond tot de volgende sprong begint. Tijdens de galop wordt de rug afwisselend gebogen en gestrekt. Bij het buigen wordt elastische energie opgeslagen in de zware pezen van de rug. Die worden dan uitgerekt en veren weer terug tijdens het strekken. De schouderbladen draaien over een grote hoek en verlengen samen met het strekken van de rug: de sprong. Het jachtluipaard doet dat zeer extreem en bereikt daarmee zijn snelheidsrecord.

Voor de verschillende gangen van het paard verandert de energie die het kost per afgelegde afstand met de snelheid. Elke gang heeft een snelheid waarbij de energie per afgelegde meter het laagst is. Langzamer of sneller gaan kost meer

Hogesnelheidstreinen kunnen dit principe zonder meer toepassen en daarmee de wrijving met de rails en de kosten van transport aanmerkelijk verminderen. De trein zou met toenemende snelheid steeds meer wielparen van de rails moeten tillen om dit te bereiken. Technisch moet het een koud kunstje zijn om dat automatisch te laten verlopen. De dynamische stabiliteit is bij hoge snelheid groot genoeg om de trein met enkele veelvouden van drie paar wielen op de rails te houden.

Paarden laten ook zien dat je met steeds minder benen aan de grond harder loopt. Bij de stap steunt elk been gedurende meer dan de helft van de looptijd op de grond, de benen worden om de beurt verplaatst met ongeveer gelijke tussenpozen. Er zijn afwisselend twee of drie hoeven aan

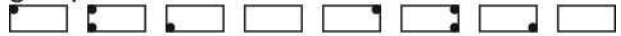
stap:



draf:



galop:

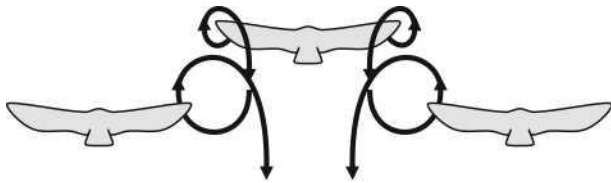


*De gangen van het paard weergegeven als patroon van hoeven aan de grond.*

adequaat kunt reageren.

Om niet te botsen, zwemmen alle individuen met ongeveer dezelfde snelheid, de onderlinge peiling en afstand blijven vrijwel gelijk. De automobielfabrikant Nissan ontwikkelde robotjes, de eporos, die zich gedragen als vissen in een school en niet met elkaar in botsing komen. Met lasertechnologie bepaalt de robot voortdurend peiling en afstand tot de burens voor en opzij. Snelheid en koers worden aangepast zodat botsingen uitblijven, ook wanneer er een plotselinge wegversmalling of een obstakel in het parcours zit.

Ganzen vliegen vaak in V-formatie en doen dat waarschijnlijk ook om energie te sparen. Grote vogels met een rustige vleugelslag verstoren de lucht op een voorspelbare manier. Achter de vleugels ontstaan bij de vleugelpunten wervelingen. Van achter gezien draaien die aan de rechterkant linksom en aan de linkerkant rechtsom. Daardoor ontstaat een neerwaartse stroming aan beide kanten binnen de vleugelpunten en een opwaartse stroming buiten de vleugelpunten naast de vogel. De vogel er achter kan ervoor kiezen in de opwaartse stroming te gaan vliegen achter de voorganger. Metingen aan ganzenformaties laten zien dat de vleugelpunten van de naast elkaar vliegende vogels vrij precies zeventien centimeter uit elkaar liggen met een variatie van plus of min twee centimeter. Er zijn



*Formatievlucht en wervelpatronen bij ganzen.*

geen metingen bij ganzen die het energetische voordeel kunnen laten zien, maar bij pelikanen is vastgesteld dat de hartslag van in formatie vliegende dieren 10 tot 15% lager kan zijn dan wanneer ze onder dezelfde omstandigheden alleen vliegen. Ook bleek de gemiddelde vleugelslagfrequentie van de leider hoger te zijn dan van de vogels achter in de formatie.

Tijdens de Tweede Wereldoorlog maakten ook piloten van bommenwerpers gebruik van de mogelijkheid om zo energie te sparen. Vliegtuigen die in de formatie achterin mochten vliegen, konden zo 15% brandstof besparen. Er moet dan wel heel precies gevlogen worden anders werkt het niet of er gebeuren ongelukken.

Bij spreeuwen in grote zwermen gebeuren nooit ongelukken. Waarom spreeuwen zo massaal met tientallen duizenden in grote wolken gaan vliegen is niet duidelijk. Wel weten we door recent onderzoek in Rome wat meer over hoe ze het doen. Boven de olijfbomen bij het station Termini vertonen spreeuwen 's avonds voor het slapengaan indrukwekkende zwerm dansen. In Nederland is dit gedrag tegen de schemering ook op tal van plaatsen waar te nemen.

Er zijn driedimensionale reconstructies gemaakt van met hoge snelheid opgenomen videobeelden van het gedrag van individuen in de zwerm. Het lijkt erop dat spreeuwen zich richten op de bewegingen van zes tot zeven naaste burens in de zwerm en daarop hun eigen vlieggedrag afstemmen. De onderlinge afstand tussen individuen in de zwerm is niet afhankelijk van de grootte van de zwerm.

Zoals we vaak kunnen zien is de vorm van het geheel sterk variabel en in hoog tempo veranderlijk. Computermodellen die uitgaan van zelforganisatie, ge-

iets langer dan over de smalle, juist omdat de mieren elkaar moesten ontwijken, en dat kost tijd.

Bij wegversmallingen in drukke voetgangersgebieden kan dit principe om de doorstroming te bevorderen worden toegepast door het gebruik van stoplichten, bij de mens is dit clustergedrag er immers niet evolutionair ingeslepen.

De regels zijn wat ingewikkelder bij mieren die zware lasten dragen bij het terugkeren naar het nest. Dat is onderzocht aan de Midden-Amerikaanse parasolmier (*Atta colombica*). Werksters van deze soort knippen stukken blad af en brengen die naar het nest. Ze dragen de stuken boven hun hoofd en lopen langzamer dan onbeladen mieren. Ook hier zien we bij wegversmallingen clusters ontstaan. Die zien er wat anders uit dan bij de wegmieren. Binnenkomende clusters worden gevormd door beladen mieren, gevolgd door mieren zonder lading. Dit blijkt het gevolg te zijn van het verkeersgedrag van de onbeladen mieren: die halen de beladen mieren niet in maar verminderen snelheid en blijven erachter hangen. Daardoor hoeven ze minder vaak uit te wijken voor tegenliggers.

Het blijkt uit metingen dat vertraging door uit te moeten wijken twee maal zo groot is als de vertraging die wordt opgelopen door in de cluster achter de beladen mieren te blijven. De onbeladen mieren die terugkeren naar het nest zijn wegwerkers die de geursporen onderhouden en obstakels verwijderen. Anders dan de beladen mieren wijken zij wel uit voor de mieren die op weg zijn naar het foerageergebied. Werksters die leeg van het nest komen geven voorrang aan de beladen mieren en krijgen voorrang van de wegwerkers. Van deze simpele regels kunnen verkeersdeskundigen vast wat leren.

Wegverbreding om verkeersopstoppingen te voorkomen is de meest gebruikte oplossing. Bij mieren is die optie ook in gebruik. Het verbreden kost veel energie, vooral ondergronds maar ook omdat de geursignalen sterker moeten zijn.

Mieren wisselen onderweg informatie uit met tegenliggers die op korte afstand passeren. De mogelijkheden daarvoor worden minder bij een bredere weg. Toch zijn er soorten die brede en ruimtelijk gescheiden banen benutten. Bij Zuid-Amerikaanse legermieren (*Eciton burcellii*) en enkele soorten termieten loopt het binnenkomende verkeer over het centrale deel van het pad en gebruikt het uitgaande verkeer twee buitenbanen. Dit patroon ontstaat doordat het uitgaande verkeer naar twee kanten uitwijkt voor de beladen binnenkomers. Voordeel van dit systeem is dat de terugkerende werksters beschermd worden tegen concurrenten die het kostbare voedsel willen stelen. Het gebruik van de capaciteit van de weg is met gescheiden banen ook veel beter. Bij de mieren zijn drie banen beter dan twee omdat het geurspoor geconcentreerd in het centrum kan liggen waardoor de beladen mieren beter op koers kunnen blijven.

Wanneer we iets willen leren van de mieren moeten we wel bedenken dat het geen mensen zijn. Mieren uit een kolonie hebben allemaal hetzelfde doel: zoveel mogelijk nakomelingen grootbrengen. Ze gaan allemaal met dezelfde motivatie op pad en werken nauw samen. Dat ligt bij mensen even anders.



## 6. Filteren

Het scheiden van deeltjes en het vloeibare medium waarin ze zich bevinden is een belangrijk industrieel proces in onze samenleving. Dat vloeibare medium kan een gas of een vloeistof zijn. Filtertechnieken zijn niet meer weg te denken uit ons dagelijks leven. Denk aan stofzuigen, waterzuivering, airconditioning, en de verwijdering van roet en fijnstof uit uitlaatgassen. Er zijn tal van ingenieuze methoden ontwikkeld. In veel gevallen is er een drukverschil over het filter om het gas of de vloeistof er door te persen. De zwaartekracht is soms al voldoende om dat drukverschil te maken, maar er worden ook hoge zuig- of persdrukken ingezet.

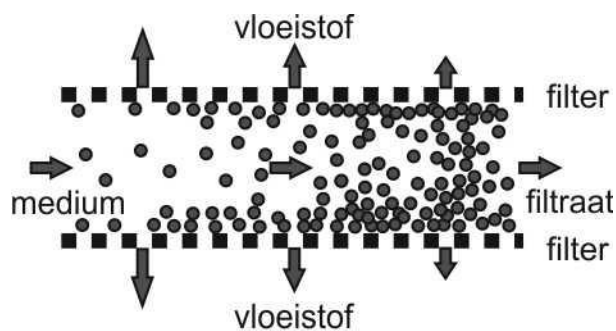
De zeefmethode is de simpelste. Een filter als een zeef heeft een bepaalde maaswijdte; het medium gaat erdoorheen en alle deeltjes die groter zijn dan de diameter van de mazen blijven erop achter.

Bij decanteren zinken zwaardere deeltjes naar de bodem en kan de vloeistof erboven worden afgegoten.

Ook centrifugale krachten worden toegepast als filtertechniek. Zwaardere deeltjes ondervinden een grotere kracht en worden verder naar buiten geslingerd. Bloedplasma wordt zo gescheiden van bloedcellen.

Problemen die zich voordoen hebben vaak te maken met het verstopping van het filter of met het verwijderen van het gefilterde materiaal. Filters kunnen bijvoorbeeld worden gereinigd door ze door te spoelen in omgekeerde richting.

Bij waterzuivering worden zandfilters gebruikt. Het vervuilde water sijpelt door een dikke laag zand en het vuil blijft achter. Het vuile zand kan vervolgens worden uitgespoeld.



*Het principe van een dwarsstroomfilter.*

Dwars stroomfiltratie (cross-flow filtration) wordt veel toegepast wanneer het scheiden een continu proces moet zijn. Het medium met deeltjes stroomt daarbij langzaam over een filter. Onderweg passeert het vloeibare deel het filter en het filtraat wordt boven het filter steeds sterker geconcentreerd. Een voordeel hiervan is dat het filter minder gauw verstopt raakt. Een nadeel is dat het veel energie kost.

Het te filteren medium wordt vaak tussen twee filterende oppervlakken geperst, het vloeibare deel wordt afgevoerd en het filtraat blijft op het oppervlak achter. Het kan daar vervolgens op tal van manieren worden afgehaald, bijvoorbeeld door het filter te verbranden. Er zijn ook minder rigoureuze methoden bedacht. Bij elektrostatische filters worden zwevende deeltjes voorzien van een elektrische lading en vervolgens aangetrokken door platen met een omgekeerde lading. Bij viskeus filteren worden klevende oppervlakken toegepast.

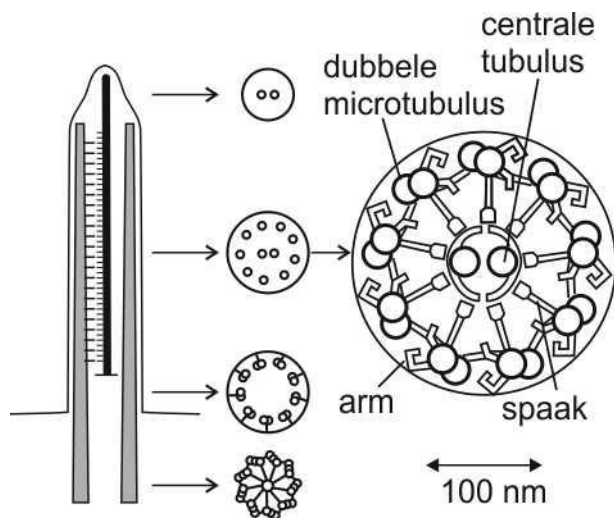
Dit korte overzicht is lang niet volledig want er zijn miljoenen patenten verleend op evenzoveel variaties op het thema. Toch is het heel goed denkbaar dat ontwerpers van industriële filters inspiratie kunnen putten uit oplossingen die door natuurlijke selectie in de loop van miljarden jaren zijn ontwikkeld.

## Filteren met zweepharen en trilharen

In het dierenrijk is filtratie de allerbelangrijkste manier om aan voedsel te komen, en er zijn tal van ingenieuze methoden geëvolueerd. De aarde is voor driekwart bedekt met water en daarin zijn eencellige algen het basisvoedsel van de meeste voedselketens. Die algen zijn zeer verdund in het water aanwezig, in concentraties van 1 deeltje op  $10^5$  tot  $10^7$  deeltjes water.

Zonder te overdrijven kun je zeggen dat het leven op aarde afhangt van het vermogen om deeltjes organisch materiaal uit water te filteren. Daarbij spelen zweepharen en trilharen (ook wel flagellen en ciliën genoemd) vaak een belangrijke rol. Het zijn microscopisch kleine, beweeglijke organellen. Organellen zijn onderdelen van cellen, ze komen voor bij organismen die uit cellen met kernen bestaan. Welke organismen zijn dat? Biologen verdelen het leven op aarde over drie domeinen: archaea, bacteria en eukaryota. Bij de eerste twee zit het erfelijke materiaal, het DNA, los in de cellen. Alle andere organismen zijn eukaryota met cellen waarin het DNA verpakt zit in celkernen. De eerste eukaryota met zweepharen en trilharen zijn meer dan één miljard jaar geleden op aarde ontstaan.

Zweepharen en trilharen zijn uitstulpingen van de celwand. Trilharen hebben een diameter van  $0,25 \mu\text{m}$  en zijn 2 tot  $20 \mu\text{m}$  lang. Zweepharen zijn even dik maar kunnen wel  $200 \mu\text{m}$  lang zijn. Ze zijn in principe op dezelfde manier gebouwd.

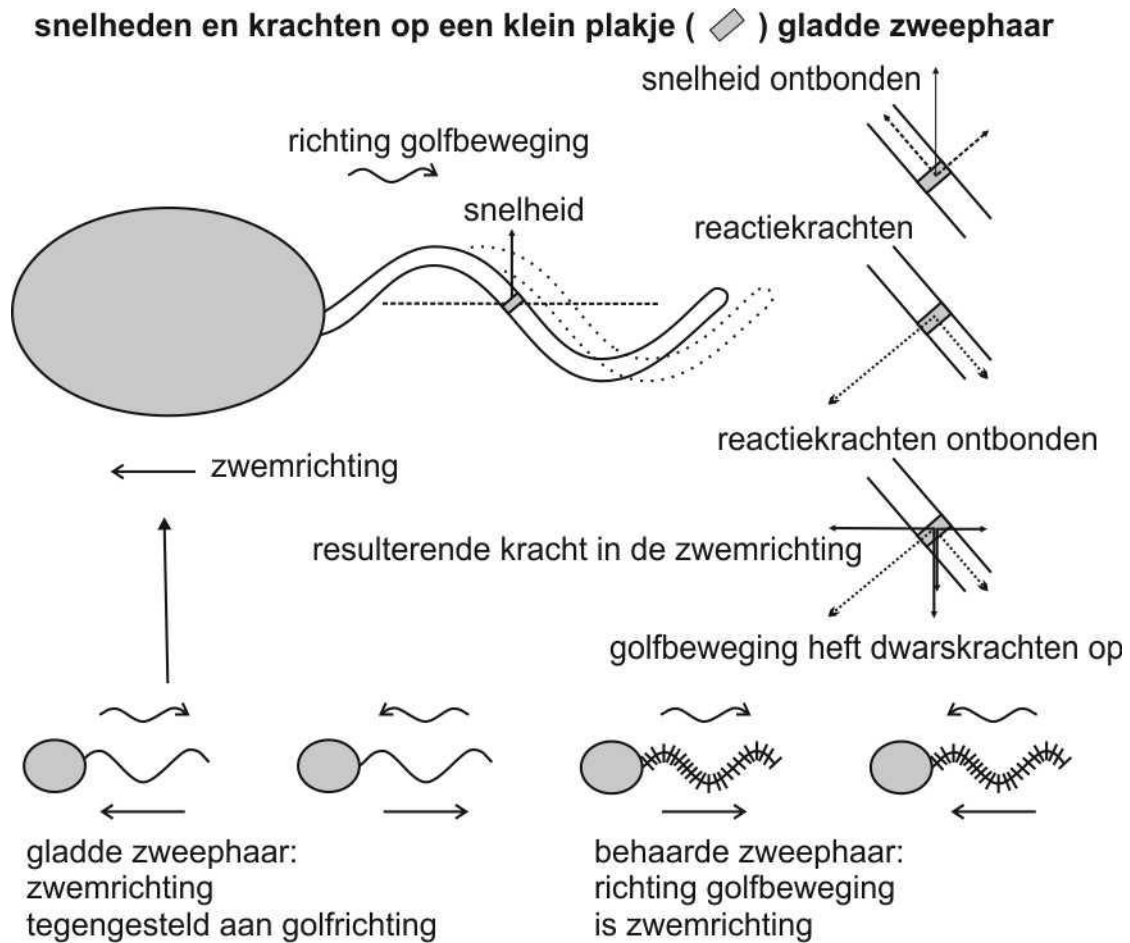


*Het effect van golfbewegingen van zweepharen met en zonder beharing als gevolg van verschillen in weerstand en de reactiekrachten daarop op de zijdelingse beweging van het zweefhaar.*

liggende dubbele buisjes omhoog klimmen, waarbij ze telkens opnieuw hogerop vastmaken en vervolgens door te verkorten trekkracht uitoefenen op de buisjes. De dubbele buisje schuiven een stukje langs elkaar en omdat ze van onder vastzitten en niet van lengte kunnen veranderen, moeten ze daarbij wel buigen. (Onderzoekers die willen weten hoe dit belangrijke proces werkt hebben zich verenigd in de 9+2 club. Op congressen zijn ze te herkennen aan stropdassen met de typische doorsneden met het buisjespatroon!)

Op dwarsdoorsneden zien we een koker met daarin een kring van 9 dubbele buisjes en in het centrum 2 enkele buisjes naast elkaar. De buisjes worden microtubuli genoemd, ze zijn opgebouwd uit het eiwit tubuline en hebben een diameter van  $24 \text{ nm}$ . Aan de dubbele buisjes in de kring zitten over de hele lengte eiwitarmpjes waarmee ze actief verbinding kunnen maken met elkaar. Spaken verbinden de dubbele buisjes met de twee losse in het centrum. De buisjes in de trilharen en zweepharen staan in verbinding met een complex systeem van in tripletten gerangschikt buisjes in de celwand. Hoe ze precies buigen is nog niet helemaal duidelijk. Het idee is dat de eiwitarmpjes aan één kant langs de ernaast

Zweepharen zijn lang en maken golvende bewegingen. Daarmee zijn cellen in staat om te zwemmen of, als ze vastzitten, er water mee in beweging te brengen. Spermacellen van vrijwel alle organismen zwemmen met zweepharen. De amplitude van de golfbeweging van een zweephaar neemt vaak toe naar het uiteinde. De beweging is meestal ingewikkeld driedimensionaal. De golfbeweging kan van de cel af, of ernaartoe lopen. De richting van de kracht op het water hangt niet alleen af van de bewegingsrichting maar ook van de bouw van de zweephaar. Er zijn gladde en behaarde zweepharen. Bij de gladde zwemt de cel tegen de golf-



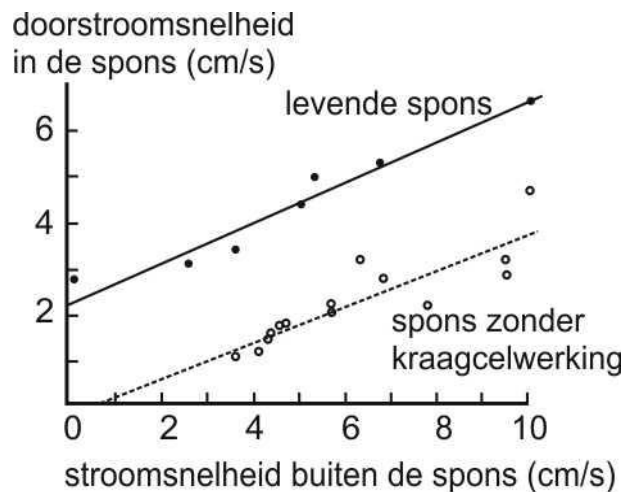
*Het effect van golfbewegingen van zweepharen met en zonder beharing als gevolg van verschillen in weerstand en de reactiekrachten daarop op de zijdelingse beweging van het trilhaar.*

richting in en bij de behaarde in de richting van de golf. Dat komt door het verschil in weerstand die elk stukje van de zweephaar ondervindt bij de beweging. Bij een grote amplitude is de richting van de beweging van elk stukje zweephaar ongeveer dwars op de lengterichting van de zweephaar. De richting van de reactiekracht is tegengesteld en kan worden ontbonden in een kracht in de richting van het stukje zweephaar en een kracht loodrecht daarop. Bij een gladde zweephaar is de laatste het grootst, en bij de behaarde is de kracht in de richting van de

## De oudste filters op aarde

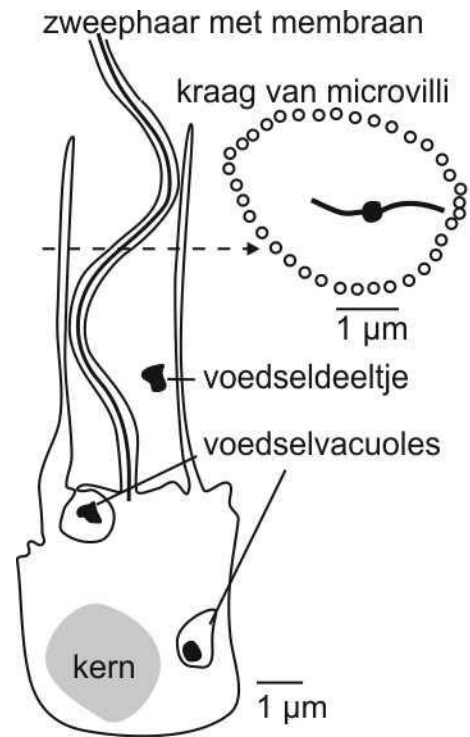
Sponzen zijn de oudste meercellige dieren op aarde die hun voedsel uit het water filteren. Ze hebben een zakvormig lichaam met een grote uitstroomopening aan de bovenzijde en kleine gaatjes in de wand waardoor water de zak instroomt. Deze zit met de onderkant vast op de bodem en is aan de binnenkant bekleed met een laag kraagcellen die verantwoordelijk zijn voor het vangen van eetbare deeltjes. Die cellen nemen dat voedsel ook op en verteren het. Een kraagcel draagt aan de kant van de holte in de zak een lange platte flagel, en daaromheen een kring van staafvormige uitsteeksels, de microvilli. De zweephaar maakt golfbewegingen waardoor water met voedsel naar de cel toe bewogen wordt. Deeltjes worden door de microvilli tegengehouden, de celwand omsluit ze en neemt ze op.

De vorm van de spons kan voor extra doorstroming zorgen door, als een schoorsteen,



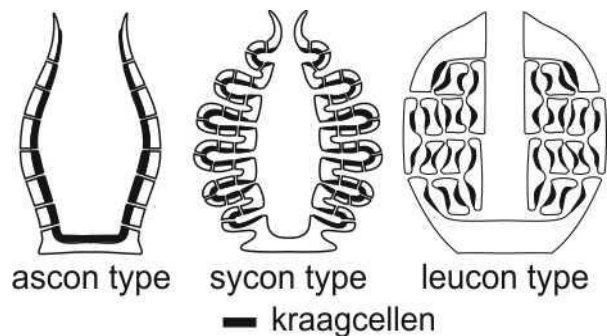
*De doorstroomsnelheid door een spons als functie van de snelheid van het langsstromende water.*

tend veroorzaakt door de acties van de zweepbaren op de kraagcellen. De filtercapaciteit wordt bepaald door het aantal kraagcellen. Bij een simpele zakvormige spons, het ascon-type, hangt dat aantal af van het oppervlak binnen in de zak. Sponzen waarbij door plooiën dat binnenoppervlak sterk is vergroot



*Kraagcel met microvilli en platte zweephaar van een spons.*

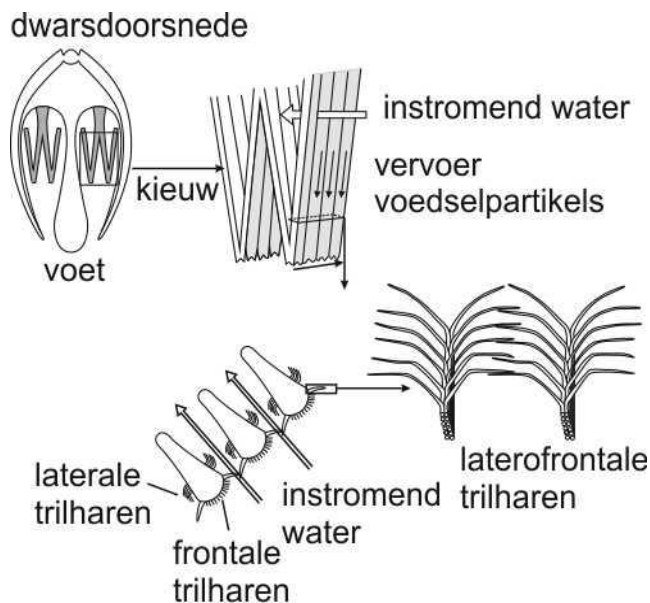
trek te veroorzaken. De grote opening aan de bovenkant steekt uit boven de omgeving en de hydrostatische druk in het langsstromende water is laag ten opzichte van de wat hogere druk bij de bodem waarop de spons vastzit, want daar staat het water vrijwel stil. Door het drukverschil stroomt water door de spons naar de uitstroomopening. Metingen tonen aan dat de stroomsnelheid door de spons recht evenredig toeneemt met de snelheid van het langsstromende water. Wanneer die nul is wordt de doorstroomsnelheid uitslui-



*Vergroting van het oppervlak bezet met kraagcellen bij de verschillende sponzen.*

horen bij het sicon-type. Een nog sterkere vergroting van het oppervlak dat bezet is met kraagcellen wordt bereikt door complexe sponzen die bestaan uit grote aantallen kamers waar water doorstroomt, het leucon-type.

Technisch is een spons niet eenvoudig na te bouwen. Het probleem zit hem in de zweefharen en in de verwijdering van opgevangen deeltjes. De opname van deeltjes door de celwand is een complex proces dat niet te imiteren valt. De autonoom slaande zweefhaar golft naar de cel toe en voert zo water aan. Wel direct bruikbaar is de techniek waarmee stroming passief door de spons wordt opgewekt. Ook over oppervlaktevergroting kunnen we wat van sponzen leren.



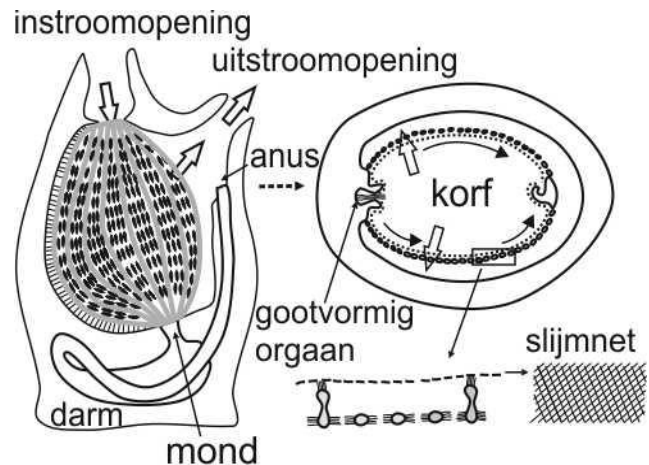
*De werking van het kieuwfilter bij de mossel.*

naast en tegenover elkaar. De tanden van burens overlappen elkaar. Zodra een voedselpartikel op zo'n harkje terecht komt wordt dit met een slaande beweging op een band van trilharen gegooid. Op die band worden ze verpakt in slijm en naar de mond vervoerd. Voor ze de mond ingaan, test een smaakzintuig of ze eetbaar zijn. Niet eetbare deeltjes gaan niet door de darm maar rechtstreeks naar de uitstroomopening. Die fractie van het gefilterde materiaal wordt pseudofeces, neppeep, genoemd. Eetbaar materiaal wordt in de darm verteerd en de echte poep komt er bij de anus, in de buurt van de uitstroomopening, uit en wordt weggespoeld. De trilharen opereren hier als stromingsgenerator, als transportband en, gemodificeerd tot harkjes, als dynamische filters. Zo'n filter verstopt nooit. Dit filterproces kan, in aangepaste vorm, technisch gerealiseerd en voor verschillende toepassingen geschikt gemaakt worden.

Onze verre voorouders, lang voor ze er als vissen uitzagen, leken waarschijnlijk ooit op de zakpijpen die we in alle wereldzeeën tegenkomen. Het bouwplan van die zakpijpen is net als bij de sponzen gebaseerd op de zakvorm, maar in dit geval zonder gaatjes in de wand. Er is een grote instroom- en een iets lager gelegen uitstroomopening. Het water dat binnenkomt wordt opgevangen in een korf. Door de gaten in de korf gaat het water naar de uitstroomopening. De

Tweekleppige weekdieren zoals de mossel gebruiken hun kieuwen als filter. Het bouwplan van de mossel wordt besproken in het hoofdstuk over boren en graven. Hier concentreren we ons op de filtermethode. Water komt binnen door een opening tussen de mantelhelften. De rand van die opening is gekarteld en de uitsteeksels houden grove deeltjes tegen. De waterstroom wordt opgewekt door slaande trilharen op de kieuwen. Die hangen als een, op doorsnede, W-vormig gordijn tussen de mantelhelften. Bij een sterke vergroting zien we kleine openingen in de kieuwen die worden afgesloten door harkvormige organellen, gevormd door aan elkaar geplakte trilharen. Die staan

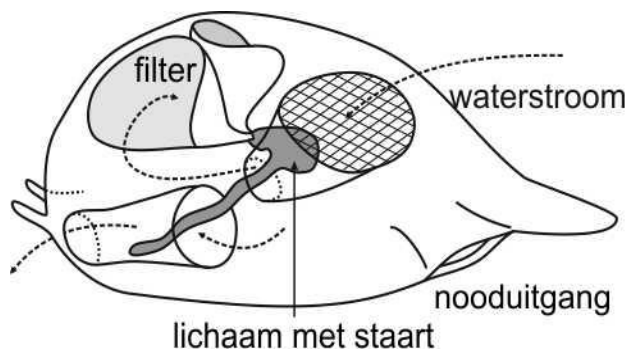
binnenkant van de korf is bedekt met trilharen. Die hebben twee functies: ze wekken de stroming op en verplaatsen een slijmnet. Een gootvormig orgaan met lange trilharen maakt het slijmnet. Dat wordt door andere trilharen langzaam over de binnenkant van de korf verspreid en in de richting van de mond bewogen. Het water gaat door de gaatjes in het slijmnet en laat deeltjes erop achter. Die worden met slijm en al opgenomen door de mond en in de darm verteerd. Uitwerpselen komen in de buurt van de uitstroomopening uit de anus; het slijm wordt hergebruikt. Een bruikbare uitvinding is in dit geval de plakende zeef die constant wordt ververst. Wie vraagt er patent op aan?



*Filteren met een slijmnet en trilharen bij de zakpijp.*

### Geëvolueerde alternatieve technieken

Nauw verwant aan de zakpijpen zijn de mantelvisjes, ze lijken op kikkervisjes en op de larven van zakpijpen. Ze vormen een schoolvoorbeeld van het verschijnsel neotenie: het behouden van larvale kenmerken in het volwassen stadium. (De



*Filterhuisje van het mantelvisje Oikopleura.*

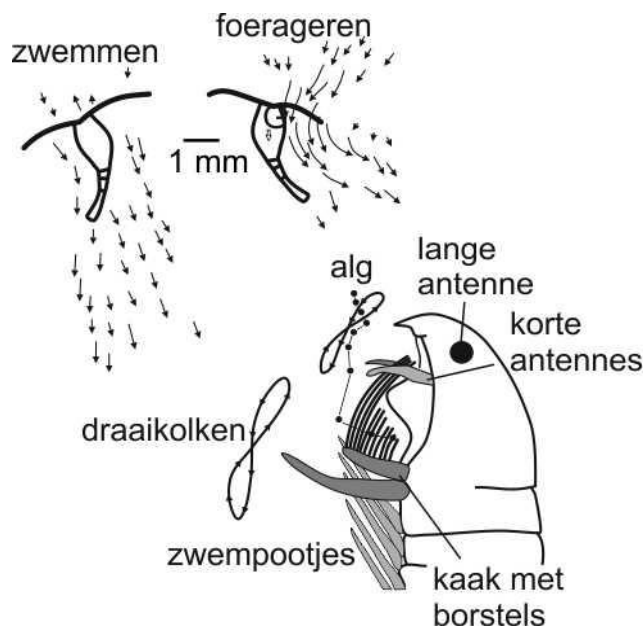
De vorm van het menselijke hoofd is er ook een voorbeeld van.) Mantelvisjes hebben een kop en een lange bewegelijke staart. Ze bouwen een huisje van slijm om zich heen met een in- en een uitstroomopening. De staart gebruiken ze om stroming door het huisje op te wekken. Een grof- en een fijnmazig net achter elkaar vangen deeltjes op. Het filterhuisje wordt dagelijks vernieuwd, of vaker wanneer de netjes verstopt zijn of er gevaar dreigt opge-

geeten te worden. Een ingebouwde schietstoel slingert het mantelvisje dan door een daarvoor bestemd klepje naar buiten en de predator eet alleen het huisje op. Elastische draden aan weerszijden van de nooduitgang slingeren de bewoner naar buiten wanneer die de draad, die hem verbindt met de tegenovergelegen wand, chemisch doorknipt.

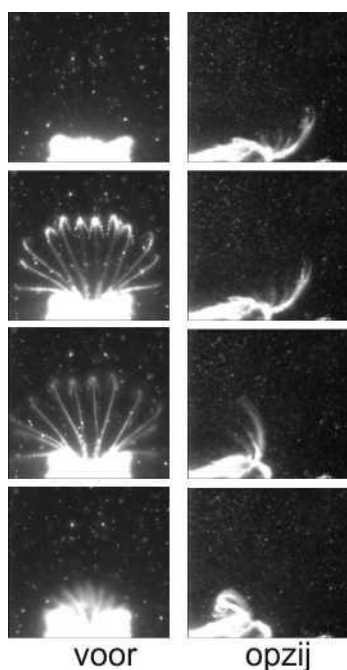
Meervoudig zeven met afnemende maaswijdtes wordt veelvuldig toegepast, bijvoorbeeld bij de bemonstering van zachte bodems of bij de zuivering van pas geslingerde honing.

Roepootkreeftjes eten eencellige, ongeveer 0,1 mm grote algen die ze te pakken krijgen door grote hoeveelheden water te filteren. Ze zijn maar enkele millimeters groot maar toch zwaarder dan water. Wanneer ze niet zwemmen zinken ze. Daarvan maken ze gebruik bij het foerageren.

Volwassen roeipootkreeftjes hebben een kopborststuk en een uitsegmenten bestaand achterlijf. Aan de kop zitten twee lange en twee korte uitsteeksels, de antennes. De mond heeft kaken met en zonder borstels, aan de onderkant van de segmenten van het achterlijf hebben ze meerdere paren zwempootjes. Bij het filteren gaan ze met de kop omhoog rechtop in het water hangen. De zwempootjes wekken een stroming naar beneden op, en zo kan het kreeftje op één plaats blijven hangen. De stroomsnelheid die het zo kan opwekken is gelijk aan de som van de snelheid om het lichaamsgewicht op te heffen plus de normale zwemsnelheid. Eencellige algen komen met de stroming mee; de vraag is hoe het dier ze in zijn mond krijgt. Bij het kopborststuk veroorzaken slaande bewegingen van de kaken en de kleine antennes draaikolken in het langstromende water die de algen in de richting van de mond voeren. Daar komen ze binnen het bereik van de kaken met de borstels waarmee ze naar binnen worden gewerkt. Het gebruik van draaikolken om deeltjes te manipuleren is interessant voor bionische toepassingen.



*Foerageren door filtratie bij een roeipootkreeftje. Boven geven de pijltjes de richting en afstand weer die partikels in 0,4 s afleggen. Onder is de verplaatsing in stapjes van 0,022 s van een voedselpartikel getekend.*



*Waaierslag van een zeepok.*

Andere kleine kreeften zoals krill, bekend als voedsel van walvissen, zeven met een korfje dat gevormd wordt door de zes poten van het kopborststuk. Krill zwemt een halve meter met het korfje open, sluit het en veegt met borstels de algen naar de mond.

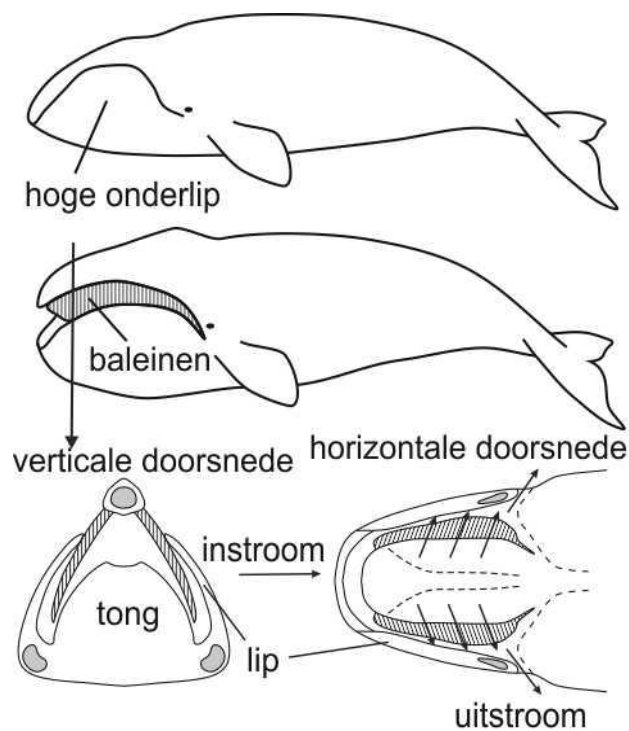
Zeepokken zijn ook kreeftachtigen, in het volwassen stadium zwemmen ze niet maar zitten vast. Ze gebruiken hun zes paar poten aan het borststuk niet meer om voort te bewegen maar om te filteren. De laatste drie paar poten vormen een actieve waaivormige zeef waarmee ze op een ingenieuze manier door het water slaan. Op die poten staan ongeveer tachtig borstels per millimeter ingeplant, samen vormen ze een bijna dichte waaier wanneer ze uit elkaar gaan bij het filteren.

Als het water snel langs de zeepokken stroomt, houden ze de waaier loodrecht op de richting van het aanstromende water en halen die af en toe naar binnen om de vangst te verwerken. Dat gebeurt door de eerste drie paar poten van het borststuk die voor die functie

## Filterende reuzen

Binnen de groep van de kraakbeenvissen (haaien en roggen) leven de grootste soorten van plankton. Duivelsroggen van het geslacht manta vangen het grotere plankton en kleine vissen door met geopende bek langzaam te zwemmen. Verticale flappen aan weerszijden van de bek opening geleiden het water met de prooien naar binnen. Platen op de kieuwbogen dienen als filter.

De reuzenhaai (*Cetorhinus maximus*), de op een na grootste haai, beweegt ook langzaam door het oppervlaktewater en filtert met open bek. De geringe zwemsnelheid zorgt ervoor dat het filter continu werkt en niet spuwt. Dat gebeurt wanneer de doorstroming stagneert door opbouw van druk voor het filter. Twee andere grote haaien, de walvishaai (*Rhincodon typus*, maximaal 13 m lang en 21 ton zwaar, de grootste haai) en de reuzenbekhaai (*Megachasma pelagios*, ontdekt



Het filter van de Groenlandse walvis.

in 1976) filteren actiever. Ze zuigen een grote hap water op door hun bek enorm ver te openen, de mondbodem te laten uitzakken en hun flexibele wangen te spreiden. Dan sluiten ze de mond en persen het water door de kieuwzeef naar buiten. Alles wat groter is dan 2 tot 3 mm blijft achter en wordt zo nu en dan met een kuchende actie verzameld en door de keelholte gespeeld.

Een vergelijkbare verdeling van soorten die passief en actief filteren vinden we bij de baardwalvissen. Die gebruiken baarden of baleinen als filterapparaat. Dat zijn dunne platen hoorn die aan weerszijden in de bek van het monddak naar beneden hangen. Ze hangen ongeveer dwars in de bek - ongeveer, want de buitenrand ligt iets verder naar achteren dan de binnenrand. De afstand tussen de licht gebogen platen is nog geen centimeter. Het water stroomt er vanbinnen naar buiten doorheen. Aan de binnenkant zijn de baleinen gerafeld en borstelig, zoals een ruige baard, vandaar de naam baardwalvissen. Aan de structuur van de baarden is te zien waarop soorten zich specialiseren. Fijne, dunne, haarvormige baarden vangen klein spul, grove borstels zijn geschikt voor het tegenhouden van vissen en inktvissen. Er zijn twee groepen baardwalvissen: de echte walvissen en de vinvissen.

De echte walvissen hebben lange smalle baleinen. De Groenlandse walvis (*Balaena mysticetus*) bijvoorbeeld heeft er 350 aan elke kant; ze zijn 3 tot 4 meter lang. Het verhemelte is sterk verhoogd en zeer hoge onderlippen zorgen er onder andere voor dat de bek nog wel gesloten kan worden. De baleinen buigen naar achteren om bij het sluiten van de bek. Echte walvissen zwemmen langzaam met open mond door dichte concentraties voedsel. Ze zoeken die door te duiken naar



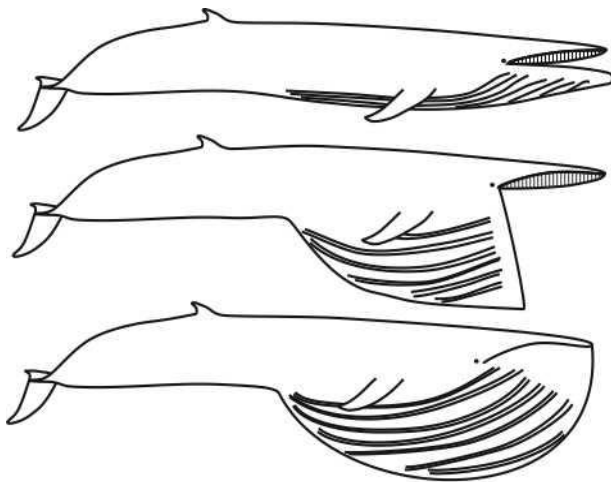
dieptes tot honderd meter, waarbij ze met gesloten mond schuin naar beneden zwemmen en opstijgen. Zo'n duik duurt een kleine tien minuten. Ze zwemmen iets harder naar beneden dan naar boven, met een gemiddelde snelheid van 4 kilometer per uur. Wanneer ze een goede plek gevonden hebben maken ze er een filterduik van. Die duurt gemiddeld vijftien minuten. Op de diepte met de grootste concentratie voedsel openen ze de bek en zwemmen horizontaal door de goed gevulde soep. Het water stroomt de mond van voren binnen, passeert de baleinen en verlaat de bek aan de zijkant. Het gefilterde water wordt links en rechts aan de buitenkant van de baleinzeven met verhoogde snelheid afgevoerd door de kanalen tussen de baleinen en de verhoogde lippen. Die verhoogde snelheid zorgt voor een onderdruk in die kanalen waardoor water gemakkelijker tussen de baleinen doorstroomt vanuit het gebied met hoge druk in de mondholte. Bij de mondhoecken zijn de lippen laag en stroomt het gefilterde water gemakkelijk weg.

Tijdens het filteren is de hoeveelheid gefilterd water gelijk aan het oppervlak van de mondopening maal de zwemsnelheid. Een Groenlandse walvis met mondopening van ongeveer 5 m zwemt tijdens het filteren ongeveer 0,7 m/s (iets meer dan 2,5 km/u). Er gaat dan 3,5 m<sup>3</sup> water per seconde door zijn bek.

De weerstand die het dier bij het zwemmen met open bek ondervindt, is zeer groot en beperkt zijn snelheid ondanks het feit dat hij elke 10 seconden een staartslag maakt (dat is twee maal de frequentie die hij gebruikt om 4 km/u te zwemmen met de bek dicht). Bij die lage snelheid verwerkt de zeef in de bek de doorstroming gemakkelijk en treedt er geen stuwing op voor de mond.

Een nadeel van die geringe snelheid is dat snelle prooidieren hierdoor in staat zijn te ontsnappen. Ontsnappingsnelheden van vissen zijn ongeveer 10 lichaamslengten per seconde. Bij 0,7 m/s kunnen vissen groter dan 7 centimeter de dans ontspringen. Het filteren duurt een minuut of vijf; dan sluiten ze de mond en zwemmen terug naar het oppervlak. Het voedsel dat tussen de baleinen hangt, wordt waarschijnlijk met het water dat zich in de gesloten mond bevindt in omgekeerde richting, van buiten naar binnen, door het baleinengordijn naar de mondholte gespoeld door bewegingen van de dikke tong die als een zuiger werkt. Ze slikken vervolgens de sterk ingedikte soep door.

Actief filterende walvissen, de vinvissen, hebben korte baleinen. De blauwe vinvis (*Balaenoptera musculus*), het grootste dier ooit op aarde, is maximaal 33



Hap van een gewone vinvis.

meter lang en weegt dan zo'n 180 ton. De vijf- tot achthonderd baleinen van deze reus zijn met één meter het langst in het midden van de rij aan elke kant van de bek. De mondbodem van vinvissen is sterk te verwijden door plooiën en groeven.

De dieren nemen grote happen water met plankton, sluiten de mond, trekken de spieren van de tong en de mondbodem samen en persen het water tussen de baleinen door en over de rand van de onderlippen naar buiten. Het

## 7. Boren en Graven

### Biobaggeren

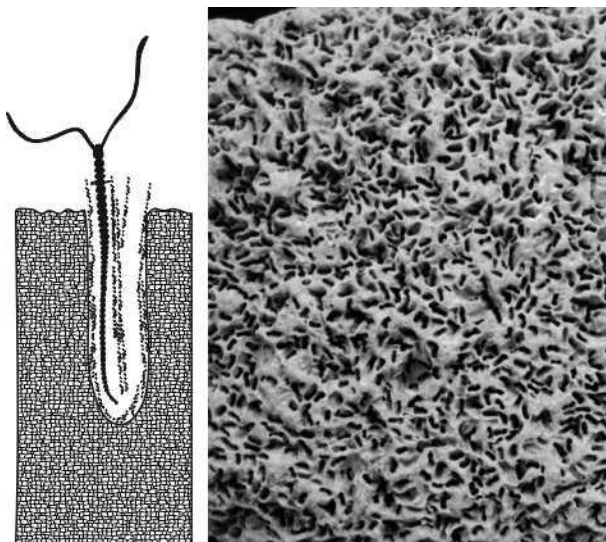
Halverwege de tachtiger jaren van de vorige eeuw zit baggergigant Boskalis Westminster in de problemen. Het aanleggen van havens en vaargeulen in de harde koraalkalk van het Midden Oosten verloopt niet naar wens. De tanden op de draaiende koppen van de machtige snijkopzuigers zijn na een uur versleten en moeten telkens worden vervangen. Dat kost veel tijd en betekent aanzienlijk productieverlies.

Intern beraad had niets opgeleverd en daarom was er een brainstorm bijeenkomst belegd in het kasteel van de voorzitter van de raad van commissarissen. Daar waren externe experts uitgenodigd die vooral geen verstand van baggeren moesten hebben om de kans op geheel nieuwe ideeën te vergroten. Een militaire strateeg, een ontwerper van landbouwmachines, een specialist die alles wist van water en de auteur van dit boek, een bioloog. Uitvoerders van de problematische projecten waren ook ingevlogen.

De bijeenkomst duurde enkele dagen. Het belangrijkste punt van mijn bijdrage als bioloog aan de discussie was dat er van borende en gravende dieren van alles te leren viel, maar dat het nodig was om een diepgaande studie te maken van de natuurlijke baggerprocessen.

Het idee verdween in de grote hoop die er werd geproduceerd. Tot de laatste sessie waarin elke externe expert 15 minuten spreektijd kreeg om een mogelijke oplossing te formuleren. Ik begon met te vragen of het bekend was dat het eiland Helgoland werd afgegraven. Dat gaf commotie onder de baggeraars. Ze wisten daar niets van en wilden weten wie de concessie voor dit megaproject had gekregen.

Ik noemde de firma Polydora en Echinus. Nooit van gehoord! *Polydora ciliata* is een kleine gesegmenteerde borstelworm die gaten maakt in kalkrijke bodems zoals die in de Noordzee rond Helgoland. Hij doet dat door zuur af te schei-



*Polydora*, een borende borstelworm.  
Rechts het gatenpatroon.

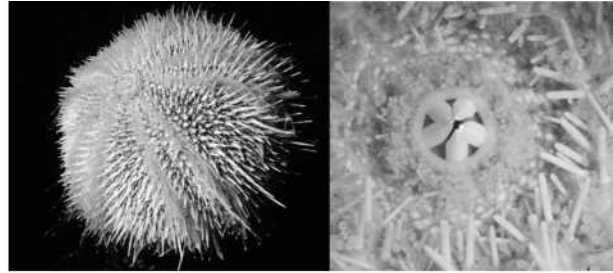
den dat kalk oplost, vervolgens gebruikt hij harde borstels om de zacht geworden kalksteen te verwijderen. Met die gecombineerde chemische en mechanische graafmethode bouwt de worm een U-vormig gat waar zijn lichaam bescherming in vindt. Twee lange tentakels steken door een pijpje van aan elkaar gekitte kalk uit in het water en verzamelen voedsel. *Polydora* is maar enkele centimeters lang en het gat één centimeter diep, maar ze zijn met miljoenen.

De eetbare zee-egel *Echinus esculentus* is verzot op *Polydora* en gebruikt zijn vijf tanden om de bovenlaag van de bodem af te graven met wormen

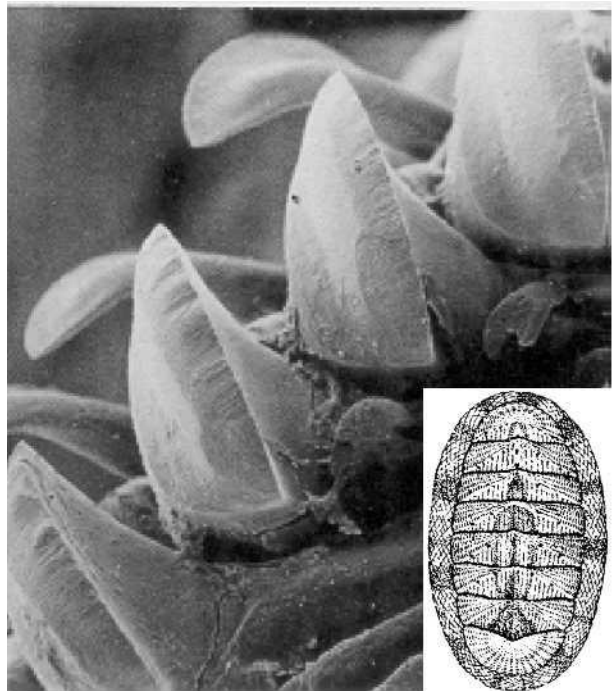
en al. Deze bolvormige zee-egel heeft net als de meeste stekelhuidigen een vijf-stralig symmetrisch lichaam met de mond aan de onderzijde en de anus boven op het lichaam. De lichaamswand bestaat uit rijen aaneengesloten kalkplaten bezet met stekels die door spieren worden bewogen. Op vijf dubbele banen tussen de stekels zitten rijen gaatjes van de mond tot de anus. Daar komen zuigvoetjes uit die deel uit maken van het watervaatstelsel van de zee-egel. Dit is een hydraulisch systeem waarmee de voetjes, die elk in een zuignap eindigen, kunnen worden uitgestoken en bewogen. Met de beweeglijke stekels en de zuigvoetjes verplaatst de zee-egel zich langzaam over de bodem. De tanden werken als een vijftandige grijper. Ze zitten in een ingenieuze botconstructie, de lantaarn van Aristoteles genoemd. Ze worden niet hydraulisch bediend maar bewogen door een effectief hefboomsysteem van botten en kleine spieren dat al door Aristoteles werd beschreven.

De tanden slijten snel maar blijven scherp dankzij interne hardheidsverschillen en ze groeien continu aan. De zuigvoetjes trekken de lantaarn tegen de bodem aan zodat ze er lokaal grote krachten mee kunnen uitoefenen. Ze verwijderen één centimeter bodem in één keer. De brokken kalksteen en de wormen komen via de mond in de darm die door de lantaarn loopt als de zuigbuis door de korf van een snijkopzuiger. De wormen worden verteerd en de grond komt er als poep door de anus aan de bovenkant uit. Op deze wijze baggeren zee-egels rond Helgoland zo'n 30.000 kg bodem per jaar. Dit proces zal onherroepelijk leiden tot het verdwijnen van Helgoland maar het kost veel tijd. Het fossiele koraal waar Boskalis zijn snijkoptanden op stuk bijt wordt ook al miljarden jaren weggevreten door dieren die op zoek zijn naar bescherming of voedsel.

Keverslakken schrapen met kleine tandjes dunne lagen koraal af om algen die er in leven te kunnen verorberen. Mijn voorstel, om middelen ter beschikking te stellen waarmee we precies konden onderzoeken hoe ze dat deden, werd geaccepteerd. De directie zag er wat in, al was het alleen maar omdat er geen andere bruikbare voorstellen uit de brainstorm naar voren kwamen. De praktijkmensen reageerden nogal cynisch maar gunden ons het voordeel van de twijfel. Al met al hebben we 8 jaar aan het probleem ge-



*De eetbare zee-egel Echinus esculentus links. Rechts de mond met vijf tanden aan de onderzijde.*



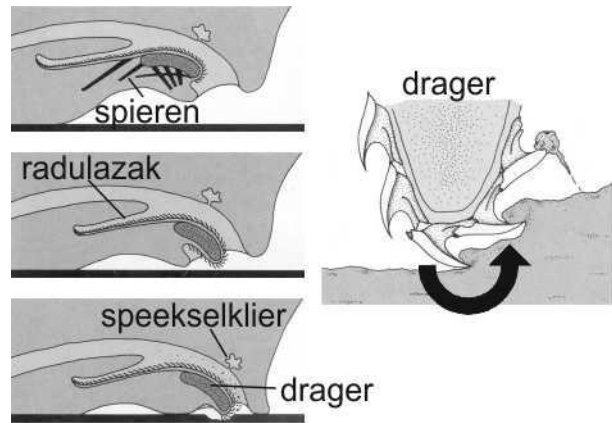
*Tanden op de radula van de keverslak Chiton.*

werkt en de oorzaak van het voortijdig afbreken van de cutteranden gevonden. Daarmee kwam ook een oplossing in zicht.

Tanden van slakken zitten in dwarse rijen op een lange riem, de radula, die er bij elke soort een beetje anders uitziet. Een kenmerk hebben ze gemeen, ze zijn allemaal krom.

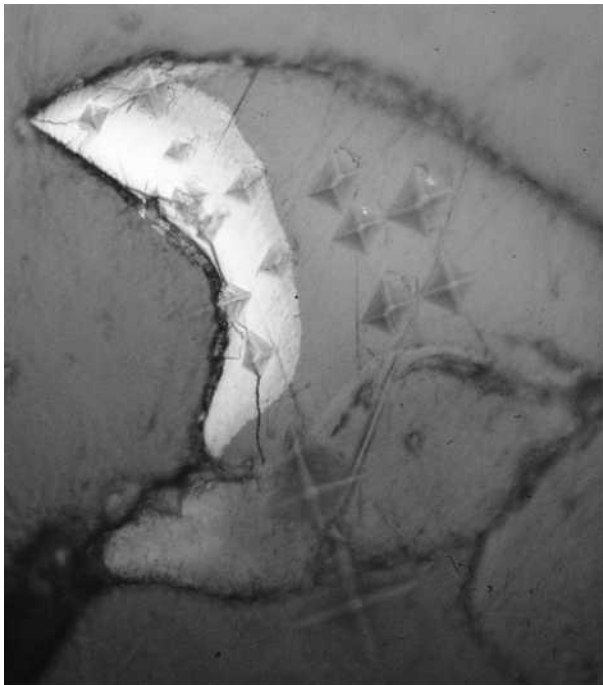
We concentreerden het onderzoek op twee soorten zeeslakken, een keverslak en een napslak.

Op een tandenriem zitten rijen tanden achter elkaar en elke rij bestaat uit een vast aantal elementen. Enkele daarvan doen het graafwerk en andere dienen voor het afvoeren van afgegraven materiaal naar de slokdarm. De riem zit in de mond en wordt over een hard stuk weefsel, de tandenriemdrager, als een tong uitgestoken en op de bodem gedrukt. Dan volgt de schraapbeweging waarbij spieren de riem weer over de tandendrager naar binnen trekken. Slechts enkele rijen tanden zijn daarbij in actie en doen het werk. De riem groeit langzaam door en versleten tanden worden van achter uit vervangen door nieuwe.



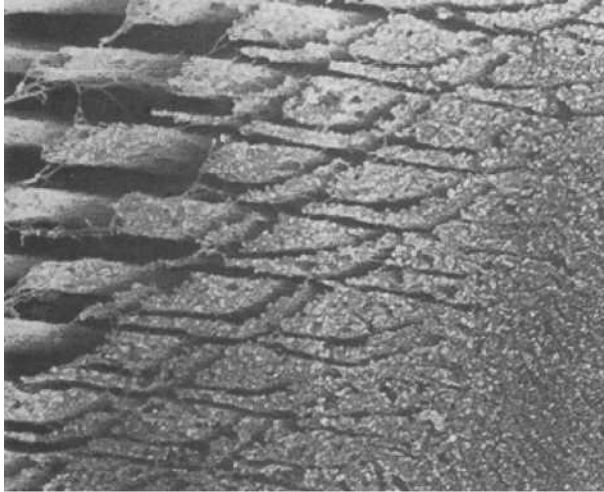
*De werking van een tandenriem bij slakken.*

Schraaptanden hebben een harde snijrand die bestaat uit ijzerhoudende mineralen, zoals magnetiet, ingebed in een matrix van organisch materiaal. De rest van de tand is minder hard en bestaat bij de napslak bijvoorbeeld voornamelijk uit opaal, een oxide van silicium. De organische matrix waarin de harde mineralen hun plaats hebben bestaat uit chitine, een stevige meervoudige suikerverbinding die we ook kennen uit het uitwendige skelet van geleedpotigen zoals insecten.



*Resultaten van een hardheidsmeting aan een doorsnede door een radulatand met diamantindrukken. De indrukken in de snijrand zijn kleiner, die is harder dan de rest.*

Wanneer chitine etende bacteriën de matrix verwijderen zie je dat de inwendige opbouw van de harde snijranden erop is gericht om slijtage zo te laten verlopen dat de tand scherp blijft tot hij helemaal versleten is. Een soort dakpanconstructie zorgt ervoor dat in het gebruik kleine plakjes tegelijk verdwijnen maar dat daar onder een nieuwe snijrand zit die gekarteld en scherp is.



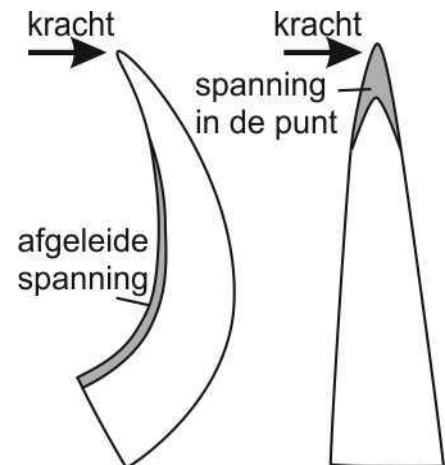
*Inwendige dakpanconstructie die de tanden scherp houdt.*

naar het dikste deel en dat breekt veel minder gemakkelijk af, We hebben dat niet gemeten maar met computermodellen vastgesteld. De uitwendige vorm van een tand wordt in coördinaten opgeslagen in het geheugen van een computert. Vervolgens wordt die vorm helemaal opgedeeld in kleine stukjes. De modelbouwer kent materiaal eigenschappen toe aan alle stukjes. In ons geval gebruiken we de eigenschappen van het staal waar de tanden van cutterzuigers van worden gemaakt. Je zou ook de eigenschappen van de slakentanden kunnen nemen maar die zijn zoals we zagen niet voor de hele tand hetzelfde, harder bij het snijvlak en wat zachter in het ondersteunende deel. Deze verfijningen aanbrengen in snijkoptanden achten we niet realistisch, vandaar de eenvoud van de modellen: een recht model dat de snijkoptand vertegenwoordigt en een krom model met de vorm van een tand van een slak. In het computerprogramma kunnen krachten op de tanden worden gesimuleerd. Na het aanbrengen van een kracht op de punt, dwars op de lengterichting van de tand laat de simulatie zien hoe de spanning zich door de tand verspreidt.



*Rechte tanden op de kop van een cutterzuiger.*

De snijrand van de tanden van de keverslakken blijkt harder te zijn dan het mineraal magnetiet dat vrij in de natuur gevonden wordt. Tijdens de groei worden de magnetietkristallen in de snijranden parallel aan elkaar georiënteerd en dat maakt de tanden harder. Het afbreken van tanden bij het graven wordt voorkomen door de kromme vorm. Dat is het geheim van de smid. Een kracht die op de punt van een rechte tand wordt uitgeoefend wordt opgevangen door de punt en verspreidt zich niet verder. Is die kracht te groot dan breekt de punt af. Bij een kromme tand wordt de kracht door de vorm afgeleid

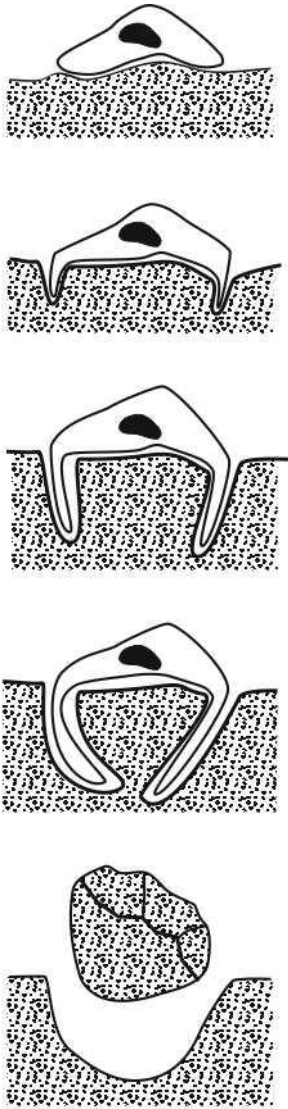


*Krachtengleiding door een kromme en een rechte tand.*

Bij de rechte tand is die het grootst aan de punt bij de plaats waar de kracht aangrijpt, inwendige dakpanconstructie die de tanden scherp houdt. Bij de tand met de vorm van een slakken-tand wordt de spanning afgeleid en verplaatst naar de basis van de holle kant waar de tand op zijn breedst is. De punt wordt zo veel minder zwaar belast.

Bij de rechte tand is die het grootst aan de punt bij de plaats waar de kracht aangrijpt, inwendige dakpanconstructie die de tanden scherp houdt. Bij de tand met de vorm van een slakken-tand wordt de spanning afgeleid en verplaatst naar de basis van de holle kant waar de tand op zijn breedst is. De punt wordt zo veel minder zwaar belast.

De boorkoppen van snijkopzuigers zijn mooi gevormd met gekromde vlakken waarop de tandhouders



Boorproces bij sponzen:  
werking van een etscel.

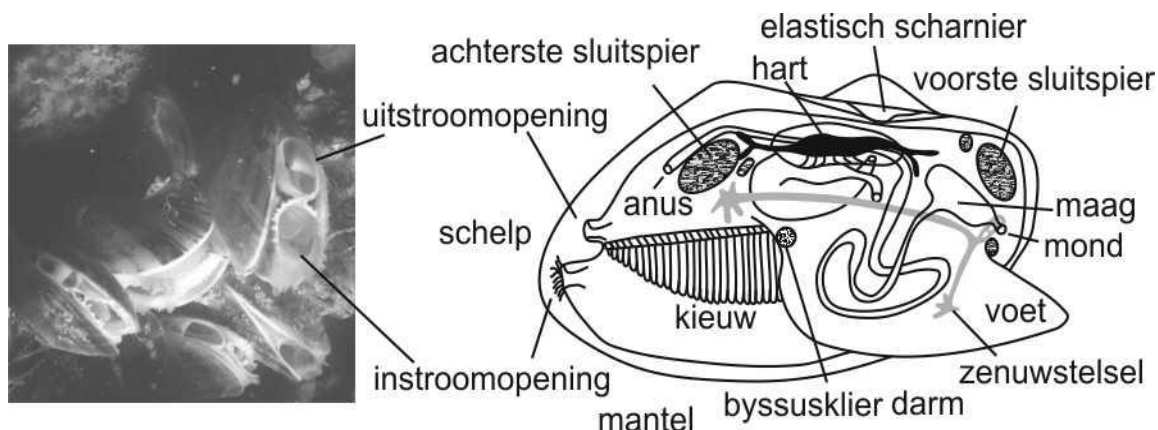
Er zijn ook sponzen die in schelpen van tweekleppige dieren (zoals oesters) boren. De methode die ze gebruiken om dat te doen is interessant. Bij het boorproces spelen speciale etscellen een belangrijke rol. Het zijn vrij bewegende cellen die lange uitsteeksels, filopodia, kunnen vormen. Daarmee kunnen ze plaatselijk een zure substantie afscheiden die kalkverbindingen verbreekt waardoor het kalk oplost. De filopodia dringen zo het koraalkalk binnen en omsluiten en ondermijnen daarbij stukjes koraalkalk tot ze loslaten. Het cellichaam van zo'n etscel is ongeveer 10  $\mu\text{m}$  groot en de doorsnede van de stukjes is ongeveer 90  $\mu\text{m}$ . Slechts 2 tot 3% van het verwijderde materiaal wordt daadwerkelijk opgelost; de rest komt vrij in de vorm van de losse stukjes kalk. Die worden door de waterstroom in de spons afgevoerd. Op koraalriffen verdwijnt op die manier zes kg droog gewogen kalk per  $\text{m}^2$  per jaar.

Het principe om slechts een klein deel van het te verwijderen materiaal op te lossen en zo transporteerbare brokken los te weken is mogelijk bruikbaar. Het gebruik van zure oplosmiddelen bij het verwijderen van kalkhoudend materiaal stuit vaak op milieutechnische bezwaren. In de schoonmaakindustrie worden zure oplosmiddelen veelvuldig toegepast. Een slimmere inzet daarvan zou niet verkeerd zijn. Mogelijk zijn sponzen hier de aanzet tot nieuwe ideeën daarover.

### Boren met schelpen

Paalwormen (geslacht *Teredo*) zijn beruchte vernietigers van houten constructies in zee. Zelfs zware houten balken gaan er in nog geen jaar volledig aan als ze hun gang kunnen gaan. Godefried Snellius ontdekte na een paalwormexplosie in Nederland in 1731 dat het geen wormen waren, maar aan een borend leven extreem aangepaste tweekleppige weekdieren. Hij adviseerde om de dijken met stenen te beschermen in plaats van met hout.

Er zijn naast paalwormen ook andere boormossels die gaten maken in zachte rotsen of zware klei. De omgebouwde schelpen dienen als boor. Om te begrijpen hoe ze zijn aangepast, kijken we eerst naar het bouwplan van een niet-borende tweekleppige, de mossel bijvoorbeeld. De schelpen zijn aan de bovenzijde scharnierend met elkaar verbonden. Elastisch weefsel in het scharnier zorgt ervoor dat de schelpen open staan wanneer ze niet actief met sluitspieren worden gesloten (daarom staan dode, bijvoorbeeld gekookte, mossels open). Binnen de schelphelften is het dier omgeven door een linker en een rechter huidplooi die samen de mantel vormen. Die scheidt calciumcarbonaat af in een organische matrix bij de vorming van de schelp. De mantel dient ook voor de zuurstofopname.

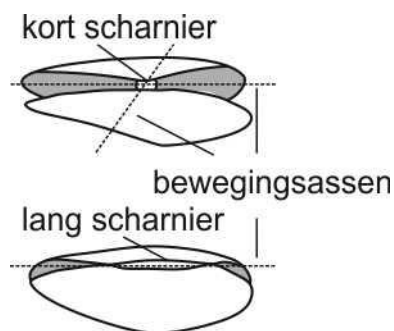


*Anatomie van de mossel Mytilus edulis.*

De mantelranden sluiten tegen elkaar aan, behalve aan de achterzijde, waar ze twee openingen vormen: een instroomopening die voorzien is van een gekartelde rand en daarboven een uitstroomgat met een gladde rand (goed te zien bij gekookte mossels).

Bij diep borende soorten kunnen die openingen aan het eind van lange buisvormige mantelplooien liggen, zodat ze buiten de boorgang uitkomen. Tussen de mantelhelften hangen kieuwen met daartussen een gespierde voet. Boven in de schelp omsluit de mantel het lichaam met de ingewanden en spieren. Het water dat door de instroomopening tussen de mantelhelften komt, stroomt door de kieuwen naar de uitstroomopening. De waterstroom wordt opgewekt door trilharen op de kieuwen, die geen zuurstof opnemen maar voedselpartikels uit het water filtreren en naar de mond vervoeren. Meer hier over in het hoofdstuk Filteren. De voet is een sterk gespierd orgaan dat een belangrijke rol speelt bij verplaatsing en verankering, en dus ook bij het boorproces van borende tweekleppigen. Aan de basis van de voet zit een klier, waarmee stevige draden (byssus) worden afgescheiden die het dier gebruikt om zich te vertuien. Mossels hebben een darm met mond, maag en anus en een hart dat rond de darm gelegen is. Voorste en achterste sluitspieren houden de schelphelften tegen elkaar, tegen de werking van het elastische slot in.

Bij boormossels dient de schelp als boor, een deel van de buitenkant van de



*Verskillende bewegingsmogelijkheden van de schelphelften van de mossel en de boormossel.*

kleppen is ruw en vaak met tanden bezet. De cyclische boorbeweging bestaat uit een werkslag en een herstel-slag. Tijdens de werkslag schrapen de schelpen langs de boorgatwand, zodat materiaal wordt losgemaakt. Het lichaam is bij het boren verankerd met de voet of met byssusdraden. Schelpdieren boren volgens twee principes: een aantal soorten beweegt tijdens de werkslag de schelphelften als één geheel, andere boren met bewegingen van de schelphelften ten opzichte van elkaar. Het scharnier is daarbij kort. Degene die als één geheel opereren hebben een lang scharnier. Door de elastische werking ervan klapt de schelp open tot de ruwe kleppen tegen de wand van de boorgang druk-



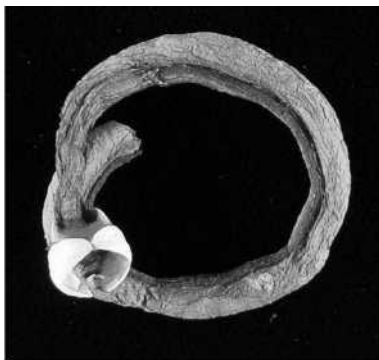
ken. De mantel vult zich met water en sluit de beide mantelopeningen. Spieren in de mantel persen het water naar voren, waardoor de schelphelften verder uit elkaar worden gedrukt en de werkdruk hydraulisch wordt verhoogd. Tijdens de werkslag verkorten voet- spieren de afstand tussen de ankerplaats en de schelp, en schuren de tanden langs de wand.

Er zijn soorten die het voorste schelpdeel daarbij op en neer bewegen. De dichtgeklapte schelp kan vrij in de boorgang bewegen en wordt na de werkslag in een nieuwe uitgangspositie gebracht, waarna de cyclus zich herhaalt. De verankering wordt iets naar voren en soms ook zijdelings verplaatst. In het laatste geval treedt er tijdens de werkslag rotatie op en ontstaat er een ronde boorgang. Schelpen met een kort puntvormig scharnier roteren ook tijdens de herstel-slag maar de werkslag verloopt heel anders. De schelpranden zijn aan de voor- en achterzijde teruggebogen en passen niet meer op elkaar. Het puntvormig scharnier laat beweging rond twee assen toe. De schelp kan open en dicht en de kleppen kunnen afwisselend aan de voor- en achterzijde openen en sluiten, waarbij ze een kantelbeweging rond het scharnier uitvoeren.

Contractie van de voorste sluitspier brengt de scherpe voorranden naar elkaar toe en de achterranden van elkaar af. De voorzijde wordt nu door de voet tegen het substraat gedrukt en samentrekken van de sterke achterste sluitspier wrikt de voorste schelpranden uit elkaar, langs de wand van het boorgat. Het deel van de schelphelften achter het scharnier is vaak langer waardoor een gunstige hefboom ten opzichte van het gewricht ontstaat. Dieren die volgens deze methode in gesteente boren, hebben een zeer kort schelpgedeelte voor het scharnier. De schelpen wijken daar terug waardoor er een grote opening voor de voet tussen de kleppen ontstaat. De voorrand is voorzien van rijen scherpe tanden. Tijdens de werkslag gaan de schelpdelen niet alleen door de achterste sluitspiewerking uit elkaar maar worden ook hier door een verhoogde lichaamsdruk binnen de gesloten mantel tegen de wand gedrukt. De voet wordt schuin naar voren verankerd. Daardoor ontstaat een draaiende beweging tijdens het schrapen die zorgt voor een rond boorgat.



*Boormossel met geboorde gaten in zacht gesteente.*



*Paalworm met schelp.*

Paalwormen zijn boormossels die extreem zijn aangepast aan een borend bestaan. De schelphelften zijn zeer klein ten opzichte van het wormvormig lichaam. Ze hebben geen beschermende functie meer maar zijn tot boorkop gereduceerd. Het schelpoppervlak ziet er uit als een fijn vertande vijl met gootjes tussen de tandenrijen die het verstoppem van de vijl voorkomen en afvoer van het verspaande materiaal vergemakkelijken.

Nauwkeurige bestudering van de schelpen van deze boorspecialisten levert ideeën op voor oppervlak-



testructuren die het verstoppen van vijlen en raspen tegengaan. De twee korte kleppen van de paalworm zijn met twee puntvormige scharnieren met elkaar verbonden. Naast het normale scharnier aan de rugzijde functioneert er aan de buikzijde ook een scharnier. Hierdoor wordt duidelijk dat paalwormen boren met kantelbewegingen van de schelphelften rond de as door beide scharnieren. Contractie van de grote achterste sluitspier wrikt de vóór de scharnieren gelegen schelpdelen uit elkaar. De voet zuigt zich vast aan de wand van het boorgat en drukt de schelphelften tegen de voorkant van de gang. Nu wringt de achterste sluitspier de voorste schelphelften uit elkaar en de scherpe tanden schrapen met een draaiende beweging hout weg. Vervolgens klappen de kleine voorste sluitspieren de schelp weer dicht. Daarbij oefenen de schelpen geen kracht uit op de wand. Dan laat de voet los van de wand en hecht aan op een plaats die onder een kleine hoek gedraaid is ten opzichte van de vorige plek. De boorslag herhaalt zich. De draairichting na elke schraapbeweging blijft gelijk tot de boorkop ongeveer 180° is gedraaid, daarna draait de kop al schrapend over een halve cirkel terug. Het resultaat is een glad en perfect rond boorgat. Paalwormen eten het geboorde hout. Ze kunnen houten constructies in zee vrijwel helemaal verorberen.

De van oorsprong Franse ingenieur Marc Isambard Brunel (1769 - 1849) patenteerde, geïnspireerd door de paalworm, een tunnelgraafmachine waarmee de Thames Tunnel is gebouwd, de eerste tunnel onder een bevaarbare waterweg ooit. Het principe is gebaseerd op een metalen bekisting die langzaam met dommekrachten vooruitgeschoven wordt naarmate er meer grond aan de voorkant is weg gegraven. Direct achter dit schuivende deel wordt de tunnel bekleed met gemetselde muren om instorting te voorkomen.

Paalwormen vormen ook een bekleding van kalksteenachtig materiaal aan de binnenkant van het geboorde gat. Die kokers zijn echter dun en dienen niet als bescherming tegen het instorten van de boorgangen want dat is in hout geen probleem. Brunel's idee is weliswaar gebaseerd op een foute interpretatie van de boorwijze van de paalworm maar het principe van zijn methode wordt nog steeds toegepast bij het graven in zachte bodems waar wél instortgevaar bestaat.

Tal van diersoorten maken gangen in onstabiele bodems en we kunnen vast wat opsteken van de manier waarop ze voorkomen dat de boel instort.

### **Tunnels in zachte bodems**

Tunnelbouw in Nederland is geen gemakkelijke opgave door de zompige consistentie van de bodem op de meeste plaatsen. Alles verzakt en stort in als je niet oppast zoals we allemaal weten door de metroproblemen in Amsterdam en de tunnelrampen in Den Haag. Voor Heerema Ondergrondse Infrastructuur b.v. zetten we de kennis die biologen verzameld hadden op een rijtje. Helaas hebben ze



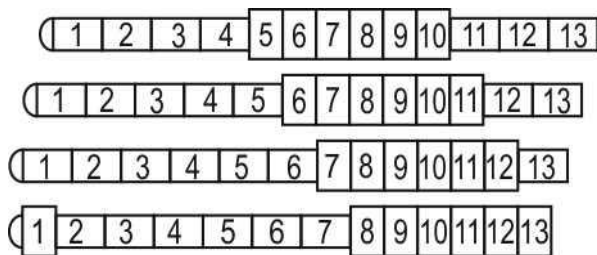
*Door paalwormen aangetast hout.*

over het lichaam kan lopen.

We nemen de regenworm (*Lumbricus terrestris*) als voorbeeld. Darwin heeft er in 1882 een heel boek aan gewijd. Die soort kan dertig centimeter lang worden en graaft diepe verticale gangen in onze tuinen. Het is een worm die bestaat uit honderd tot tweehonderd segmenten. Elk segment is voorzien van acht borstels, twee dubbele boven elkaar aan elke kant. Ze kunnen met spieren worden uitgestoken of teruggetrokken. Er zitten schotten tussen de segmenten. De worm controleert de doorlaatbaarheid voor lichaamsvloeistof via de schotten en kan ze ondoorlaatbaar maken of vloeistoftransport toestaan.

Peristaltisch kruipende wormen graven allemaal op ongeveer dezelfde manier, met vier opeenvolgende graafstadia. Die methode is verschillende keren doornatuurlijke selectieprocessen onafhankelijk ontstaan, en is daarmee evolutionair succesvol.

In de gang zet de regenworm zich schrap door de lengtespieren in een aantal segmenten achter elkaar samen te trekken. Die segmenten worden dik en drukken tegen de wand van de gang. De borstels worden daarbij uitgestoken en helpen bij de verankering. Het tweede stadium is het binnendringen in de bodem vóór in de gang. De worm zoekt daarbij een scheurtje of gaatje in de grond en drukt daar de



*Peristaltisch kruipen.*

ten de segmenten uit. Ze drukken zo op de gangwand tot die de gewenste diameter heeft bereikt. Scheurtjes in de grond worden groter gemaakt. Dit is graafstadium drie.

Een graafcyclus eindigt met het peristaltisch vooruit trekken van het lichaam. De segmenten die voor de verankering zorgden worden dunner door de werking van de kringsspieren en de borstels worden ingetrokken. De segmenten schuiven naar voren en de graafcyclus begint opnieuw.

Regenwormen versterken de binnenkant van hun gangen met aan elkaar geplakte korrels grond, en nabij de uitgang met bladmateriaal. Het is niet duidelijk of de gangwand zo verstevigd wordt, Darwin dacht van wel. De grootste stevigheid ontstaat ongetwijfeld door het hydraulisch samendrukken van de wand direct na het binnen dringen. Na enige graafactiviteit zit de worm vol grond. De voedingsstoffen worden eruit verteerd en de rest wordt buiten aan het oppervlak uitgepoept.

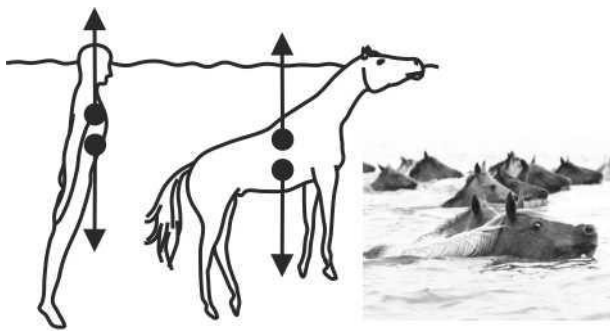
Wat we hier kunnen leren is dat het handig is om in zachte grond een gang niet helemaal uit te graven, maar slechts een deel van het materiaal te verwijderen. Door rondom druk uit te oefenen op de wand wordt de grond in elkaar gedrukt en vormt die een stevige wand, die vervolgens van een betonnen binnenkant

## 8. Bionica voor wedstrijdzwemmers

### De zwemmende mens.

De mens is een van de weinige op het land levende zoogdiersoorten die niet van nature kan zwemmen. Dat komt door onze lichaamsbouw en vooral door de vorm van ons hoofd. We lopen rechtop op lange achterpoten, de longen zitten hoog in het lichaam en we hebben geen snuit. In rust in het water zakken de zware benen naar beneden tot ze recht onder de longen hangen. Het schedeldak blijft bij de meeste mensen net boven het oppervlak, maar het gezicht met de mond en neusopeningen niet. Als we niets doen verdrinken we in die houding.

Bij een paard bijvoorbeeld steken de neusgaten aan het einde van de lange snuit net boven water uit als hij rustig in het water hangt. Vanuit die comfortabele positie kan een paard gemakkelijk zwemmen, maar een mens raakt in paniek.



*De ligging van het oprijfpunt en het zwaartepunt bij mens en paard.*

Ik geloof dan ook niets van de wateraap theorie van mijn Britse collega marien bioloog Sir Alister Hardy. De vroege mens zou een kustbewoner zijn geweest die voor zijn voedsel afhankelijk was van het leven in ondiepe tropische kustwateren. Daarom had hij aanpassingen, zoals de naakte huid en onderhuidse vetopslag, vergelijkbaar met die van andere in het water levende zoogdieren. Er leven nog steeds hele volksstammen van wat de zee biedt,

maar meestal kunnen ze niet eens zwemmen.

Zwemmen kunnen we wel leren. Daarbij bewegen we onze ledematen zodanig dat we het hoofd boven water houden. Om het hardst zwemmen is sport en er zijn tal van zwemslagen. De snelste nummers zijn de 50 en 100 m vrije slag, waarbij de borstcrawl wordt gebruikt. Schoolslag lijkt bij oppervlakkige beschouwing het meest op de zwembeweging van de kikvors. Toch is bij kikkers de beenslag wezenlijk anders. Die schoppen hun poten naar achteren zonder sluitbeweging. Elke poot versnelt daarbij een grote hoeveelheid water in een richting tegengesteld aan de zwemrichting. Bij de vlinderslag komen zwemmers hoog uit het water bij elke slag, ze maken een soort dolfinnslag met hun benen. Op de rug zwemmen, kan op verschillende manieren maar bij wedstrijden wordt de rugcrawl gebruikt.

Het wereldrecord 100 m vrije slag in een 50 m bad staat nu op 46,9 s (Cesar Cielo Filho, Rome 2009). De gemiddelde snelheid is daarbij iets meer dan 2 m/s, dat is ongeveer 7,7 km/u. (De tijden gaan langzaam naar beneden met honderdsten van seconden bij elk nieuw record). Je moet flink doorstappen om het bij te houden maar rennen hoeft niet. (Een normale wandelsnelheid is 5 km/u).

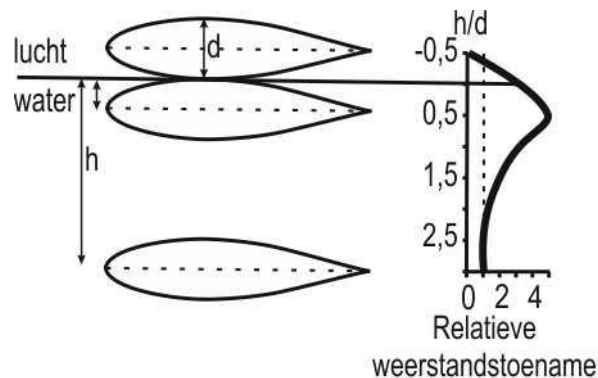
Dolfijnen van het formaat van een mens zwemmen wel vier keer zo snel. Het wereldrecord op het koningsnummer zou dus veel scherper kunnen. Welke factoren maken het nu zo moeilijk om dit record te verbeteren?

Bij wedstrijden zijn er strikte regels welke er voor moeten zorgen dat iedere

deelnemer gelijke kansen heeft. Je begint met een startduik. Vervolgens mag je maximaal 15 m onder water zwemmen en moet je de resterende 35 m naar het keerpunt van een 50 m lang zwembad aan het oppervlak afleggen. Na het keerpunt is het opnieuw toegestaan 15 m onder water te zwemmen. Tenslotte resten er 35 m tot de finish. In totaal mag er dus 30 m onder water gezwommen worden en 70 m aan het oppervlak. We gaan zo'n race over 100 m in een 50 m lang bad analyseren om te zien hoe die is opgebouwd en wat we daarbij van zwemmende dieren kunnen leren.

Zwemmers starten vanaf een startblok op de kant. De startduik lijkt bij topzwemmers nauwelijks voor verbetering vatbaar; toch zijn er een paar zaken die we van duikende dieren kunnen leren. Fervente duikers zoals pinguïns, jan-vangenten en ijsvogels spatten vrijwel niet bij het doorbreken van het wateroppervlak. Spattend water wordt tegen de zwaartekracht in omhoog gegooid. Dat levert weerstand op die ten koste gaat van de snelheid onder water. De startduik moet het lichaam een zo hoog mogelijke snelheid in voorwaartse richting bezorgen. Daarnaast is het ook zaak zo snel mogelijk de juiste diepte te bereiken, want heel vlak duiken is niet optimaal. Elke wedstrijdzwemmer moet door metingen tijdens de trainingen achter het beste compromis zien te komen.

Een belangrijke tip: duikende zoogdieren en vogels ademen maximaal uit voor ze onder water verdwijnen, omdat ze daardoor minder sterk opdrijven. Opgeblazen longen verplaatsen meer water en opdrijvende krachten worden erdoor vergroot. Met lege longen wordt de stuwkracht van de zwembeweging vooral gebruikt om de voorwaartse snelheid op te voeren en niet verspild aan correcties om op de juiste diepte te blijven.



*De grafiek rechts geeft de relatie weer tussen de weerstand van een gestroomlijnd lichaam met een maximale diameter  $d$  en de diepte  $h$  onder de waterspiegel.*

Wat is die juiste diepte? Proeven met vissen en met gestroomlijnde voorwerpen hebben aangetoond dat de weerstand bij voortbeweging op een diepte van meer dan 3 maal de grootste diameter 5 maal kleiner is dan die aan het oppervlak. Dat komt door de golven die daar ontstaan. Het is dus gunstig om over de maximaal toegestane afstand op een kleine meter diepte te zwemmen.

Het krachtenspel op de zwemmer onder water is zeer complex. Die werkelijkheid kan vereenvoudigd worden

door globaal te kijken naar de verticale en horizontale krachten die overal op het lichaam aangrijpen en door die samen te stellen.

### Krachten op een zwemmer

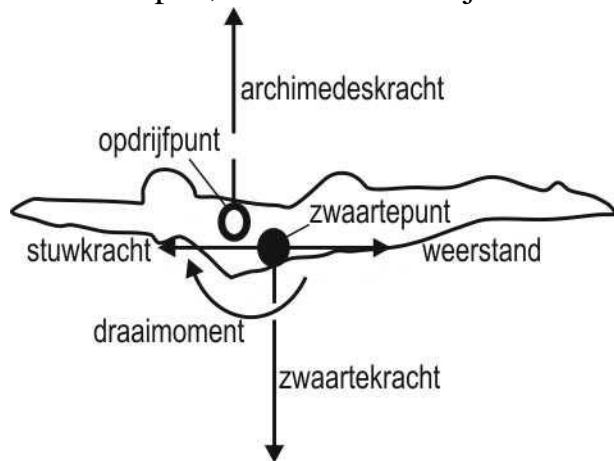
Volgens Archimedes ondervindt elk ondergedompeld lichaam een opwaartse kracht die gelijk is aan het gewicht van het verplaatste water (zoet water weegt ongeveer 1 kg/liter ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )).

Samengesteld grijpen de archimedeskrachten aan in het oprijfpunt. De positie van het oprijfpunt hangt af van de verdeling van het volume van het lichaam en is daarom niet eenvoudig aan te wijzen, temeer daar dat punt bij een bewegend lichaam niet op een plek blijft liggen.

Dat geldt ook voor het zwaartepunt waar alle neerwaartse, door de zwaartekracht veroorzaakte krachten, samen komen. De plaats van het zwaartepunt hangt af van de verdeling van de massa over de lengte van het lichaam.

Zwaartepunt en oprijfpunt vallen vrijwel nooit samen, omdat volume- en gewichtsverdeling verschillen over de lengte van een zwemmer. Het gevolg hiervan is een draaimoment, dat het lichaam in een positie probeert te draaien waarin het oprijfpunt boven het zwaartepunt ligt. Dat is de houding die in de eerste alinea van dit hoofdstuk beschreven staat.

Oprijfkracht (volume van het verplaatste water maal het soortelijk gewicht van water maal de versnelling van de zwaartekracht) en zwaartekracht (de massa van de zwemmer maal de versnelling van de zwaartekracht) zullen elkaar niet veel ontlopen, want de soortelijke massa van een mens is met  $1050 \text{ kg/m}^3$ , maar weinig hoger dan die van water.



*Samengestelde krachten en resulterende draaimomenten op het lichaam van een zwemmer onder water.*

Even een rekensommetje ter verduidelijking: Filho, de huidige wereldrecordhouder weegt  $80 \text{ kg}$  en wordt dus door de versnelling van de zwaartekracht van  $9,81 \text{ m/s}^2$  met  $785 \text{ N}$  naar beneden getrokken. Het massieve deel van zijn lichaam, dat  $80 \text{ kg}$  weegt, vertegenwoordigt (met een soortelijke massa van  $1050 \text{ kg/m}^3$ ) een volume van ongeveer  $0,076 \text{ m}^3$  ( $80 \text{ kg} : 1050 \text{ kg/m}^3$ ). Het volume van de met lucht gevulde longen zit daar niet bij. Stel dat zijn longinhoud  $6 \text{ liter}$  is dan is het totale volume  $0,082 \text{ m}^3$ . Dat is het vo-

lume verplaatst water en geeft een oprijvende kracht van zo'n  $804 \text{ N}$  ( $0,082 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Het verschil met zijn gewicht is  $19 \text{ N}$ , en dat is zijn positieve drijfvermogen. Mocht Filho de duiksport willen beoefenen dan kan hij zijn drijfvermogen compenseren met een loodblokje van twee kilogram.

Een zwemmer ondervindt vooral hinder van het draaimoment dat hij voortdurend moet compenseren als hij horizontaal door het water wil glijden. De longen zitten hoog in het lichaam en daardoor wil zijn hoofd omhoog en willen zijn benen omlaag. Het opheffen van die neiging kost voortdurend energie.

De horizontale krachten kunnen we zo samenstellen dat ze aangrijpen in het zwaartepunt. De opgewekte stuwkracht wordt tegengewerkt door de totale weerstand.

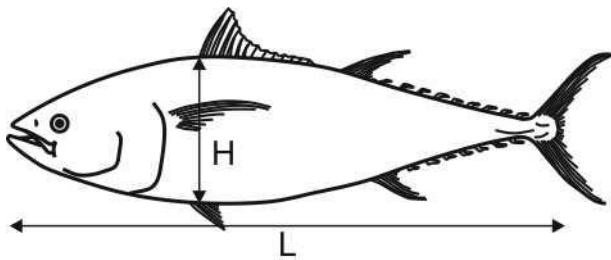
Weerstand in water wordt veroorzaakt door wrijving tussen waterdeeltjes met verschillende snelheden en door de traagheid van in beweging gebrachte watermassa's.

Globaal kunnen we stellen dat bij voortbeweging in water en lucht de weer-

## Vormweerstand

Vormweerstand (ook wel drukweerstand genoemd) heeft te maken met de vorm van de zwemmer. Het water wordt weggedrukt en verzet zich daar tegen. Een dun naaldvormig lichaam, dat in de lengterichting door het water gaat, heeft de minste vormweerstand maar ook een heel klein volume. Een bol heeft de grootste relatieve inhoud maar ook de grootste vormweerstand.

Snel zwemmende dieren hebben een gestroomlijnd lichaam, dat een kruising lijkt te zijn tussen een naald en een bol. Zo'n lichaam heeft de minste vormweerstand bij het grootste volume. Hoe ziet dat er uit? Het is een sigaarvormig bijna rolrond lichaam met een spits toelopend achterlijf zoals dat van een tonijn, een van de snelste vissen. De grootste dikte zit vanaf de voorkant op ongeveer een derde van de lengte. Een dergelijk gestroomlijnd lichaam heeft de minste vormweerstand



*Het gestroomlijnde lichaam van een tonijn. De verhouding tussen de hoogte  $H$  en de lengte  $L$  is 0,25.*

wanneer de verhouding tussen de dikte en de lengte ongeveer een kwart is. Bij pinguïns en witte haaien is die verhouding 0,26; bij tonijnen en bij de tuimelaar (een dolfijn) precies 0,25.

Niet alle vissen zijn gestroomlijnd, een paling bijvoorbeeld heeft een dikte lengteverhouding van 0,05. Die is dus meer naaldvormig en veel te slank, maar daar staat tegenover dat hij met dat lange dunne lichaam achteruit kan zwemmen en dat kunnen tonijnen niet.

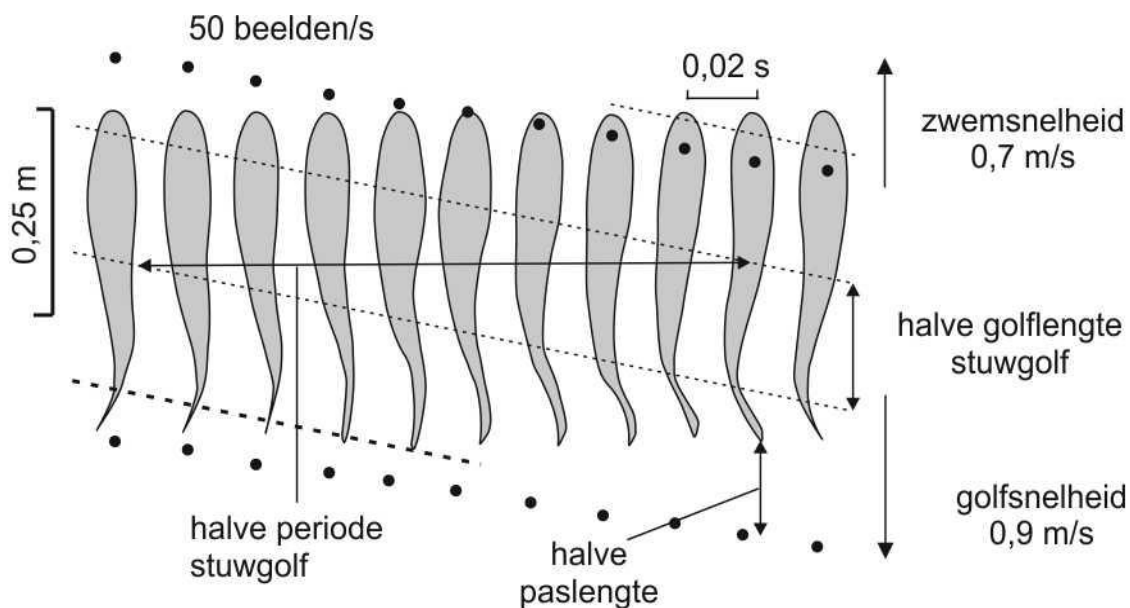
Niet alle vissen zijn gestroomlijnd, een paling bijvoorbeeld heeft een dikte lengteverhouding van 0,05. Die is dus meer naaldvormig en veel te

## Weerstand door de zwembeweging

Het genereren van stuwkracht veroorzaakt geïnduceerde weerstand.. Om het lichaam naar voren te duwen wordt water zo veel mogelijk naar achteren versneld. Het bewegen van water in andere richtingen dan de richting tegengesteld aan de zwemrichting levert extra weerstand en is niet effectief.

Onder water gebruiken wedstrijdzwemmers een soort dolfijnslag. Dolfijnen zwemmen met een verticale golfbeweging op het lichaam, waarvan de amplitude naar achteren toeneemt. Bij de staart is de totale uitwijking van boven naar beneden ongeveer een derde van de lichaamslengte. Natuurlijke selectie heeft er voor gezorgd dat die waarde optimaal is.

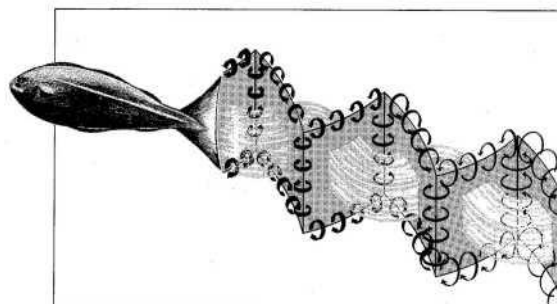
Vissen zwemmen ook met een golf die van voor naar achter over hun lichaam loopt met toenemende amplitude. Bij vissen is de beweging in het horizontale vlak, maar dat maakt voor het principe van de voortstuwingsmethode niets uit. De snelheid waarmee de golf naar achteren loopt is groter dan de zwemsnelheid. De beweging is er op gericht om zo veel mogelijk water naar achteren te stuwten. Het kielzog van een vis laat zien hoe dat gebeurt: tijdens de slag wordt er door de staartvin water naar achteren versneld. Aan de boven en onderkant van de vin ontsnapt het water aan de stuwdruk en vormt een rij wervelingen over de vin. Aan het einde van de slag draait de richting om en daarbij wordt een verticale kolom wervelend water achtergelaten. De draairichting van de horizontale en verticale draaikolken is dezelfde. Bij de heen en weer gaande beweging van de staart



Zwembewegingen van een 42 cm lange kabeljauw van boven gefilmd. De vis zwemt vooruit ten opzichte van de achtergrond die wordt weergegeven door twee zwarte stippen. De opeenvolgende beelden zijn voor de duidelijkheid naar rechts verschoven over een vaste afstand, die een tijdsperiode van 0,02 s representeert. De gestippelde lijnen verbinden naar achteren lopende toppen en dalen van de stuwgolf op het lichaam.

vormen ze aan elkaar gekoppelde ringen. Door die ringen zigzagt de naar achteren gestuwde straal water; de draairichting van de wervels versterkt die straalaandrijving.

Een zwemmer heeft aan het eind van zijn lichaam een paar voeten en geen mooie platte staart. Voeten en onderbenen lijken niet erg op een vin en zullen daardoor maar een deel van het versnelde water de goede richting uit stuwen. Veel kracht gaat hierbij verloren.



Waterbewegingen in het kielzog van een koolvis.

Na de startduik schiet de zwemmer met gestrekt lichaam door het water. Daarbij neemt de snelheid af door de weerstand die hij ondervindt. Uit de afname van de snelheid kun je de weerstand schatten: die is namelijk gelijk aan de massa die vertraagd wordt maal de vertraging.

Metingen aan een dolfijn van 85 kg die onder water uitdrijft bij een snelheid van ongeveer 2,5 m/s laten een vertraging zien van zo'n  $0,18 \text{ m/s}^2$ . Dat dier heeft dus een weerstand in de orde van grootte van 15 ( $85 \times 0,18$ ) N. (Het is een grove schatting want de onbekende massa van het mee vertraagde water is niet meegeteld). Een mens zal daar dik boven zitten, maar meer dan een factor 2 zal het niet zijn.

Op een bepaald moment dreigt de uitdrijfsnelheid lager te worden dan de snelheid die met actief zwemmen kan worden gehaald. Het is voor elke wed-

diepte met de minste weerstand. Zwendend in de lucht is de weerstand praktisch nul en ondertussen halen ze adem. De wetenschappelijke term voor dit gedrag is porpoising, een Nederlands woord bestaat nog niet; letterlijk vertaald zou het 'tuimelaren' kunnen zijn. Zwemmers kunnen dat niet, de snelheid die ze halen is met ongeveer 2 m/s veel te laag om zichzelf als een projectiel boven water uit te schieten. Dolfijnen zwemmen harder dan 6 m/s (22 km/u) bij het tuimelaren en pinguïns harder dan 3,5 m/s (12 km/u).



*Boven water springende langsnuif dolfijnen (Stenella longirostris) bij het 'tuimelaren'.*

Modelberekeningen door Daniel Weihs van het Technion in Haifa tonen aan dat de zwemkosten door dit gedrag ongeveer een kwart lager kunnen zijn. Daarbij hield hij echter geen rekening met de extra energie, die in het spatten gaat zitten, bij het verlaten en terugkeren in het water. Hoeveel dat is weten we niet, maar dat het energie kost is duidelijk.

Een zwemmer die spat, slaat liters water de lucht in. Elke liter is een kilo en vertegenwoordigt een kracht van 10 N. Minder spatten scheelt mogelijk niet zo zeer in de snelheid, maar in ieder geval wel in het energieverbruik.

### **Het keerpunt**

De bespaarde energie kan worden gebruikt bij het keerpunt. Daar komt het aan op kracht in de strekspieren van de benen en op techniek. De afzet dient zo lang en zo krachtig mogelijk te zijn. De lengte van de afzet wordt bepaald door de beenlengte en door de hurkhouding met de voeten tegen de muur. Wanneer die zo diep mogelijk is, kan de afzet langer worden en de bijbehorende versnelling groter.

De klauwkikvors zet zich af tegen het water en hij heeft om die slag te verlengen een bekken dat langs de wervelkolom kan schuiven. Zwemmers hebben dat niet en moeten dus zo veel mogelijk hun gehele beenlengte benutten. Het is verder zaak om voor het keerpunt uit te ademen om zo de toegestane 15 m op de optimale diepte te zwemmen zonder extra opwaartse kracht.

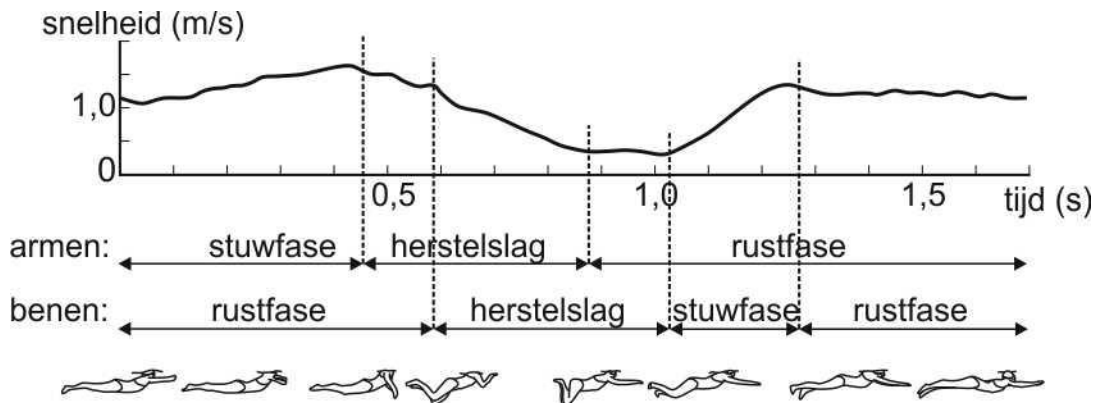
### **Meettechnieken**

De tijden op de 100 m vrije slag, die in 25 m baden worden gezwommen, zijn sneller. Dat komt waarschijnlijk door het grotere aantal keerpunten en door de dubbele afstand die onder water kan worden afgelegd (60 m i.p.v. 30 m). Zekerheid hierover kunnen we krijgen door bestudering van high speed filmopnamen met een camera in vaste positie. Met een dergelijke opstelling is het mogelijk snelheden, versnellingen en vertragingen te meten uit verplaatsingen in de tijd. Bij zwemmers kunnen beeldfrequenties van 50 tot 100 beelden/s al voldoende informatie opleveren. De camera staat dwars op de zwemrichting opgesteld ergens halverwege het bad en maakt beelden van de zwemmer onder water. Het is handig om enkele vaste punten op het lichaam zo te markeren dat ze goed in



beeld komen.

Als voorbeeld dient het snelheidsverloop tijdens een schoolslagcyclus ge-



*Bewegingsanalyse schoolslag.*

filmd met 50 beelden/s, de tijd tussen de beelden is heel constant. Dat maakt het mogelijk om de snelheid op elk moment te berekenen uit de verplaatsing tussen twee opeenvolgende beelden. Een 1.75 m lange zwemster zwemt tijdens een cyclus 2,05 m in 1,74 s, de grafiek laat het verloop van de voorwaartse snelheid van een markeerpunt op het lichaam zien. Beelden van de beweging zijn onder de grafiek getekend. Daaraan is te zien hoe de armen en benen tijdens die zwembewegingen worden gebruikt.

Onze metingen tonen aan dat de snelheid niet constant is, maar eerst toeneemt tijdens de stuwfase van de armen en vervolgens afneemt wanneer de armen worden ingetrokken terwijl de benen ook nog bezig zijn met de herstelslag. De snelheid neemt weer toe bij het naar achteren strekken en sluiten van de benen. Tijdens de uitdrijffase neemt de snelheid ten gevolge van de weerstand vrijwel rechtlijnig af. De snelheid tussen 0,5 en 1 s daalt sterker omdat de weerstand op de zwemmer, die op dat moment herstelbewegingen met armen en benen uitvoert, dan groter is. De vertraging kan lager uitvallen, wanneer de herstelbewegingen anders worden uitgevoerd; bijvoorbeeld met een andere snelheid of dicht bij het lichaam. Ook de versnellingen tijdens het stuwen zijn afhankelijk van de techniek van de slag. Door daar aandacht aan te besteden kan de totale snelheid worden opgevoerd.

Welke technieken kunnen we verder gebruiken om wereldrecords te verbeteren? Bij vissen werd pas goed duidelijk hoe ze zwommen toen de stroming rond het lichaam zichtbaar gemaakt werd en aan nauwkeurige analyse onderworpen. Je kunt dan zien hoeveel water er in de goede richting versneld wordt en hoeveel er in andere richtingen gaat zonder bijdrage te leveren aan de voortstuwing. Water is doorzichtig, stroming kun je zien wanneer er deeltjes in zitten die met het water mee bewegen. Het beste zijn kleine deeltjes die zweven. Zwembadbeheerders houden niet van troebel water en zijn niet genegen zwevende deeltjes toe te voegen aan het badwater. Luchtbelletjes vervuilen het water niet, maar hebben als nadeel dat ze opstijgen.

Mijn voorstel is: leg in de lengterichting van het zwembad een slang die met

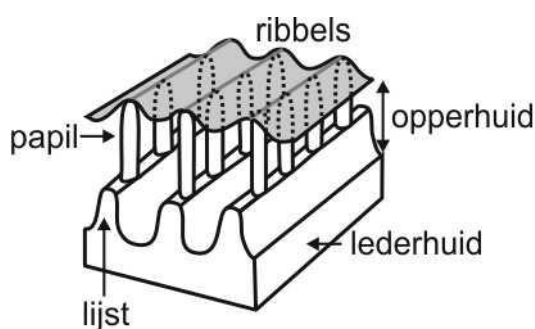
loodblokjes op de bodem gehouden wordt. Die slang is lek geprikt, zodat er uit een rij kleine gaatjes over de hele lengte luchtbelletjes komen. Die stijgen op als een gordijn. De zwemmer zwemt langs of door het gordijn, terwijl een snelle camera opnamen maakt van het bewegende lichaam en de wervelende belletjes. Op twee opeenvolgende beelden zijn dezelfde bellen te zien na verplaatsing in de tijd tussen twee beelden. De richting van de verplaatsing van elk belletje is de resultante van de richting van de stroming en de opwaartse beweging, de afstand geeft een beeld van de snelheid van de verplaatsing in die richting. De opwaartse component van de beweging kan worden berekend uit het volume van het belletje. Die wordt vervolgens afgetrokken van het eerste resultaat en we vinden de ware verplaatsing en de juiste richting. Er is software beschikbaar waarmee deze analyses snel en op grote schaal kunnen worden uitgevoerd. Zo krijg je inzicht in de interacties tussen zwemmer en water. Dat levert gegevens op over de efficiëntie van de zwembewegingen en geeft aanwijzingen voor verbetering van de slag met verhoging van de snelheid als resultaat.

Nieuwe wereldrecords kunnen we verwachten van lange zwemmers (twee meter plus), die een perfecte startduik maken en zo lang als toegestaan met een dolfijns slag onder water zwemmen. Ze hebben lange benen om bij het keerpunt een lange afzet te kunnen maken en zwemmen aan het oppervlak vrijwel zonder te spatten. Alle bewegingen die ze maken, stuwen vooral water naar achteren, ze drijven na start en keerpunt lang genoeg uit met gestrekt lichaam om optimaal van de verminderde weerstand in die houding te profiteren. Het zwempak dat ze dragen speelt geen rol van betekenis.

## Zwempakken

Dolfijnen hebben niet alleen een prachtig gestroomlijnd lichaam maar ook een gladde onbehaarde huid. Zouden we daar iets van kunnen leren?

De huid van zoogdieren bestaat uit twee lagen: een opperhuid aan de buitenkant en de lederhuid daar onder. Deze lagen zijn minder dan één mm dik bij walvisachtigen. Daarom kan de huid van walvissen niet worden gebruikt om er leer van te maken. (De huid van de penis vormt daarop een uitzondering. De hoogle-



Model van de huidstructuur van walvisachtigen.

raar dierkunde in Amsterdam waar ik deze kennis aan dank, professor E.J. Slijper, had een stoel die bekleed was met penisleer van potvissen.)

Exclusief voor walvissen zijn lange lijsten bezet met papillen van de lederhuid, die binnen dringen in de opperhuid. De rijen papillen zitten diep in de opperhuid en eindigen net onder het oppervlak. Van de buitenkant lijken het parallelle ribbels die vaak schuin van voor naar achteren over het lichaam lopen. De afstand tussen de ribbels varieert van 0,5 tot 2 mm. De richting waar-

in ze lopen is wel in verband gebracht met de richting van de stroming bij het zwemmen, maar dat verhaal klopt niet. Een weerstandsverminderend effect is ook

nooit aangetoond. De rijen papillen zouden mogelijk een tastfunctie kunnen hebben, maar we weten het niet. De huidstructuur van walvissen als voorbeeld voor zwempakken gebruiken is door de complexe microstructuur het door het gebrek aan kennis over de functie weinig zinvol. Maar er is meer aan de hand met de huid van dolfijnen.

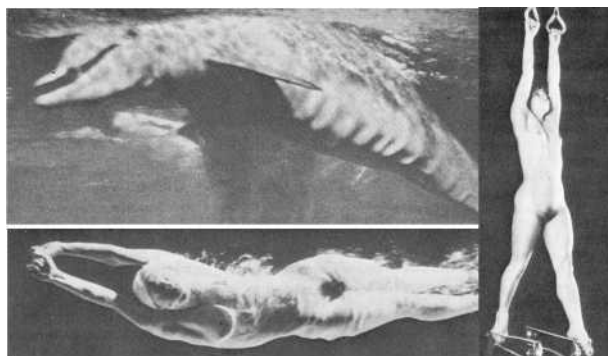
In 1955 berichtte Frank Essapian over grote huidplooien bij snel zwemmende en versnellende dolfijnen in het aquarium van Marineland Florida. Hij zag naar achteren verlopende dikke dwarse rimpels. Onderzoekers vroegen zich af of dat een passief effect was of dat dolfijnen die plooien met opzet konden laten ontstaan om daarmee weerstand bij hoge snelheden te verminderen. In het begin van de zeventiger jaren van de vorige eeuw was dat een hot item, vooral in de USA en de Sovjet Unie. De koude oorlog rivalen hoopten natuurlijk ieder als eerste het mechanisme te kunnen ontrafelen om daarmee hun onderzeeboten sneller te kunnen maken.

In 1960 beweerde de Amerikaan Kramer dat hij een weerstandsvermindering van 59% had aangetoond bij een torpedo, die was uitgerust met een imitatie dolfijnenhuid met plooien. Tot nu toe is het echter nooit gelukt vergelijkbare resultaten te bereiken door de proeven te herhalen.

Aan de Sovjet kant werkte Yu. G. Aleyef, een bionicus avant la lettre, aan dit probleem. Hij publiceerde een samenvatting van zijn artikelen in het Engels in het boek *Nekton* (Uitgegeven in 1977 door Dr. W. Junk bv., den Haag). Het is gedrukt op glanzend papier met foto's van goede kwaliteit. Hij gaat er van uit dat de rimpels passief zijn en veroorzaakt worden door wrijving.

Aleyefs hypothese is dat dolfijnen er eerder last van hebben omdat het hun weerstand verhoogt. Om die met experimentele gegevens te onderbouwen deed hij geen proeven met dolfijnen maar met veertig blote dames tussen de zeventien en achtentwintig jaar van de nationale zwemploeg (daar kon hij als hoge partij-bons waarschijnlijk gemakkelijker aankomen dan aan dolfijnen).

Vrouwen hebben volgens Aleyev net als dolfijnen een onderhuidse vetlaag



*Foto's die moeten aantonen dat de rimpels op snel zwemmende dolfijnen door de stroming ontstaan en de weerstand verhogen. Een zwemster die met hoge snelheid door het water wordt getrokken heeft ze ook. Dezelfde dame heeft een gladde huid wanneer ze in de lucht zwembewegingen uitvoert.*

en zijn onbehaard. Daarom zijn ze zonder meer met dolfijnen te vergelijken. Hij trok ze op 0,5 tot 1,5 m diepte aan een kabel door het water en liet zien dat bij een snelheid tussen 2 en 4 m s<sup>-1</sup> borsten, buik, heupen en billen rimpels vertoonden. Toen hij de dames een strak zwempak liet aantrekken, was dat effect weg en verminderde de weerstand tot 94% van de waarde zonder pak.

Mannen hadden geen last van rimpels, hij stelde dat vast door een straal water op zijn bovenbeen te richten. Er gebeurde niets.

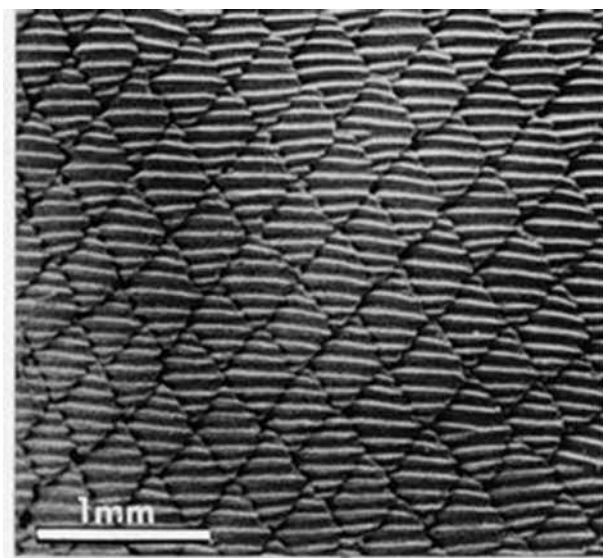
Om na te gaan of bewegende vetrimpels kunnen ontstaan door hydro-

dynamische krachten alleen, mat hij de elasticiteit van de huid door druk uit te oefenen op tal van plaatsen op het lichaam. Onder water werden de dames gefilmd. Ze werden beplakt met draadjes, die de stoomrichting op plaatsen over het lichaam moesten aangeven. Om te bewijzen dat de rimpels werden veroorzaakt door de interactie met het water en niet door spieren in de huid, moesten de dames boven water hangend aan ringen dezelfde zwembewegingen uitvoeren. Dat leverde natuurlijk niet het gewenste bewijs, want de twee situaties zijn niet vergelijkbaar, maar in elk geval wel series pikante plaatjes. Ik vroeg mijn Russische collega Romanenko of de oorspronkelijke artikelen erg veel aandacht hadden gekregen in de preutse Sovjettijd. Dat bleek niet het geval te zijn, want de druk- en papierkwaliteit van de Russische publicaties waren zo slecht dat je weinig details zag.

Strakke pakken vooral voor dames zijn sindsdien in zwang, bij heren zijn ze niet zo populair, omdat er een opgesloten gevoel door ontstaat en dat zwemt niet lekker.

In 2004 lanceerde Speedo het snelste zwempak ooit: Het 'Sharkskin' (haaienhuid) pak. Op advies van de curator voor vissen van het Natural History Museum in London, Ollie Crimmen, imiteerde het pak de schubben van een haai. Dat museum heeft een enorme collectie dode haaien, fossiel en recent, die allemaal schubben met ribbels hebben. Welke haai als voorbeeld diende, is nooit duidelijk gemaakt. Het werd een hele hype met claims over de verbetering van prestaties tot meer dan 10%. Vreemd genoeg werd er niet gerefereerd aan studies in Duitsland uit de jaren tachtig van de heren Reif en Bechert. Reif keek met behulp van een scanning elektronenmicroscop naar de schubben van snel zwemmende haaien uit de open oceaan en vond dat elke schub kleine ribbels en groeven heeft. De vorm en afmetingen van de schubben en de structuur van de ribbels variëren met de plaats op het lichaam.

Een haai heeft dus niet slechts een enkel type schub. De schubben zijn heel klein. Die van een 2,55 m lange Galapagoshaai (*Carcharhinus galapagensis*) zijn minder dan 1 mm lang en de groeven 0,1 mm breed. De groeven op de schubben



Schubben op een 2,25 m lange galapagos haai.

liggen in elkaars verlengde. Bechert denkt dat de ribbels richting geven aan de langs stromende waterdeeltjes. Hierdoor wordt het ontstaan van grove turbulentie onderdrukt en dat vermindert de weerstand.

Later is dit proefondervindelijk bevestigd door Japanse onderzoekers. Onder de schubben zit ruimte waar zeewater vrij toegang heeft. Die ruimte helpt mee om ernstige turbulentie te voorkomen door de drukverschillen te egaliseren die tot afbrekende stroming en heftige turbulentie zouden kunnen leiden.

De zwempakken hadden slechts één type namaak schubstructuur. De

## 9. Vliegkunst

Vliegen is de mens niet van nature gegeven, maar hij heeft er wel altijd van gedroomd. Daedalus en Icarus probeerden aan de tiran Midas van Kreta te ontsnappen door met was veren aan hun armen te plakken om zo over zee naar Italië te vliegen. Icarus kwam te dicht bij de zon waardoor de was smolt en de veren loslieten.

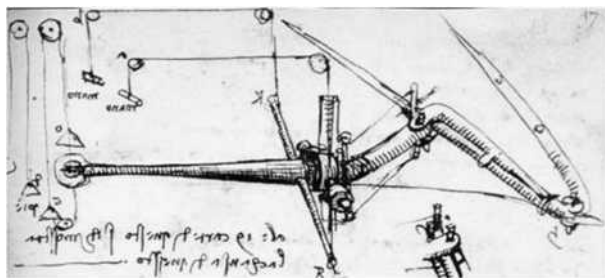
Duizenden jaren later lukte dit kunststuk wel, met de ‘daedalus’, een door mankracht aangedreven toestel. Hoe is die ontwikkeling geweest en wat hebben we daarbij van de natuur kunnen leren?

Vliegtuigen hebben technisch een extreme graad van perfectie bereikt. Het principe waarmee de meeste in de lucht blijven is ontleend aan één van de technieken die vogels gebruiken.

De meeste diersoorten op aarde vliegen. Wat kunnen we van ze leren?

### De eerste bionicus

Leonardo da Vinci (1452 - 1519) is in zijn tijd op de goede weg; hij bestudeert de vliegkunst van vogels en vleermuizen met als doel een bemand vliegtuig te bouwen. Zijn aantekenboekje *Sul volo degli Uccelli* (1509) was lang zoek maar is rond 1900 weer opgedoken. Daarin brengt hij op de laatste bladzijde (18, verso) zijn droom als volgt onder woorden: ‘Vanaf de berg die de naam van de grote vogel draagt zal de beroemde vogel opvliegen en de wereld vullen met zijn grote faam.’ Dat beviel niet helemaal dus nogmaals op de binnenkant van de kaft: ‘Voor de eerste keer zal de grote vogel opvliegen vanaf de rug van de geweldige zwaan, de hele wereld vullend met verbazing en alle geschriften met zijn roemrijke daad, tot eeuwige faam van het nest waarin hij geboren werd.’ (De berg die de naam draagt van de grote vogel is de Monte Ceceri bij Fiesole in de buurt van Florence.)



Leonardo da Vinci: vleugelontwerp.

Hij concentreert zich op het waarnemen van de interacties tussen vliegende vogels en de lucht. Ook ontwerpt hij vleugels die duidelijk niet gebaseerd zijn op de anatomie van vogelvleugels maar voortkomen uit zijn interpretatie van de krachten die op vogelvleugels werken.

Zijn schetsen van vliegende vogels en vleermuizen zijn verbazingwekkend accuraat, en lijken op de beelden die je tegenwoordig kunt maken met een hoge snelheidscamera. Ze laten bovendien vaak de vermeende stroming van de lucht zien. Tekeningen benadrukken de vorm en de houding van de handvleugel. Een landende vogel is getekend met uitgestoken duimvleugels en naar achteren gerichte handvleugels.

Hij vertaalt zijn waarnemingen in wetten die de vogelvlucht beheersen. De teksten lijken op instructies voor vogels. Op pagina 6 verso schrijft hij bijvoorbeeld: ‘Wanneer de wind van onderen tegen een vleugelpunt slaat kan de vogel omklappen indien het dier niet een van twee maatregelen neemt. De vleugel in

## Gevaarlijke vliegekunst

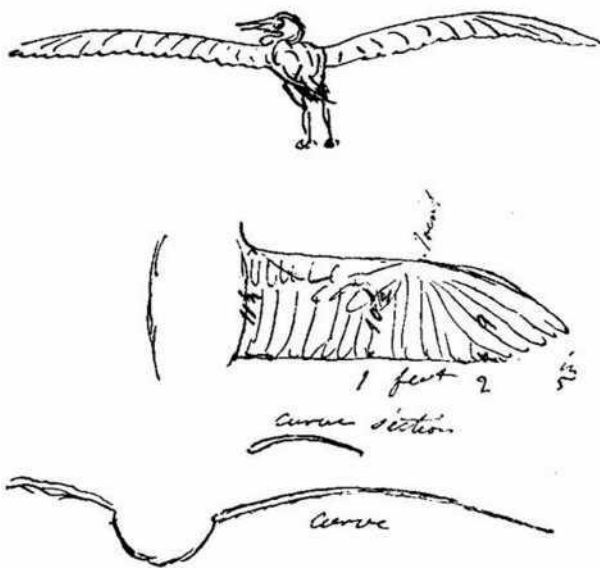
Sir George Cayley (1773-1857) kon niet zo goed tekenen als Leonardo da Vinci maar was er evenzeer van overtuigd dat de mens kon leren vliegen door de natuur goed te bestuderen. Hij was een rijke edelman die het zich kon permitteren om de eindversies van zijn ontwerpen te graveren in zilveren platen. Zijn belangrijkste doel in het leven was een bemand vliegtuig te ontwikkelen dat kon zweven maar ook stuwkracht kon genereren door mankracht, met een stoommachine of een buskruit motor.

Helaas had hij ook met da Vinci gemeen dat hij nauwelijks publiceerde. Op drie wetenschappelijke artikelen na, bestaat zijn nalatenschap uit ongeorganiseerde warrige notities en uit brieven. Hij is zijn tijd 100 jaar vooruit wanneer hij voorspelt dat vliegen, over grote afstanden met machines vol mensen, de maatschappij fundamenteel zal veranderen.

Cayley is overtuigd bionicus: het zaadpluis van de gele Morgenster inspireert hem tot het ontwerpen van een parachute en hij meet en berekent afstanden die roterende zaden van de esdoorn kunnen afleggen. Uit waarnemingen aan vliegende vogels ontstaat de gedachte dat stuw- en liftkracht als twee aparte krachten op een vliegende vogel werken. Zijn notitieboek uit 1801 vermeldt dat vogels in slagvlucht afwisselend stuw- en liftkracht genereren. In zijn officiële publicaties uit 1809 en 1810 vinden we hier echter geen melding meer van. Waarschijnlijk is hij tot het inzicht gekomen dat dit niet klopt, wel blijft hij ervan overtuigd dat stuw- en liftkracht gescheiden dienen te worden beschouwd om vliegen te kunnen begrijpen.

Op 19 februari 1808 schiet hij een reiger, meet en weegt die vogel en komt tot de conclusie dat het dier ongeveer een kwart vierkante meter vleugeloppervlak per kilo lichaamsgewicht tot zijn beschikking heeft ( $1,32 \text{ feet}^2/\text{pound}$ ). Met andere woorden, de vleugelbelasting is  $4 \text{ kg/m}^2$ . (Dat getal is sterk afhankelijk van de soort, het lichaamsgewicht en de leefgewoontes van vogels en varieert van  $2 \text{ kg/m}^2$  voor een kolibrie tot  $23 \text{ kg/m}^2$  bij een alk. Een eend zit op de helft hiervan en roofvogels houden veel speelruimte over met slechts ongeveer  $3 \text{ kg/m}^2$ .) Die waarde is van belang bij het ontwerpen van vliegtuigen.

Zijn schetsen laten zien dat de vleugels in de lengterichting gebogen zijn en dat dwarsdoorsneden een gebogen profiel hebben, hol van onderen, met een ronde voorkant en een scherpe achterrand. Bij een luchtstroom over een dergelijk profiel ontstaat er een gebied met onderdruk boven het bolle oppervlak aan de bovenkant en een naar beneden gerichte stroming achter de vleugel. Het is een rake constatering maar het is niet duidelijk hoe hij hierop komt.



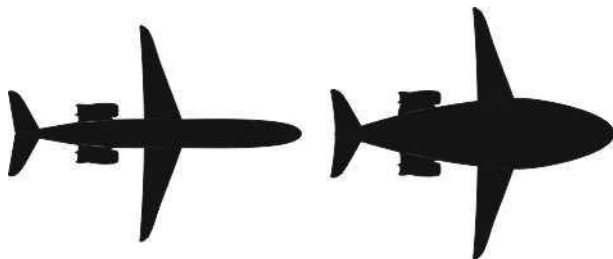
Cayley's reiger.

Hij gebruikt een krachtenbalans met een roterende arm. De draaiende beweging wordt via een katrol aangedreven door een valgewicht. Aan het einde van de arm zit de te testen vleugel die vrij verticaal kan scharnieren. De liftkracht is het gewicht dat nodig is om het profiel horizontaal te houden tijdens de rotatie. De weerstand berekent hij uit de draaisnelheid. Cayley ontdekt dat schuin van beneden aangestroomde vlakke platen, veren en vleugels opwaartse krachten onder vinden, die blijken te variëren met het kwadraat van de aanstroomsnelheid en met de dichtheid van lucht.

Een jaar later ontleedt Cayley een kraai. Of hij die ook zelf geschoten heeft vertelt het verhaal niet. Hij ontdekt dat de grote vliegspier dient voor de neerslag. Die hecht aan op de voorkant van het opperarmbeen, trekt de vleugel naar beneden en draait hem naar voren. Aan de achterkant aan het opperarmbeen zit, met een pees, de kleine vliegspier vast. Die zit op het borstbeen onder de grote, zorgt voor de opslag en draait de vleugel over de lengteas naar achteren. De bewegingen die de vleugels van ornithopters (vliegtuigen met slaande vleugels) moeten maken worden hieruit afgeleid.

De derde publicatie bevat de eerste kwantitatieve gegevens over vliegende vogels ooit. Vertaald naar metrische eenheden vliegt een roek met een snelheid van 10,5 m/s (37,8 km/u) en legt per vleugelslag 3,9 m af. De verticale afstand die de vleugelpunt bij elke slag aflegt is 0,23 m. Met die getallen berekent hij de verticale snelheid van de vleugelpunt op 1,2 m/s. Het is weer niet duidelijk hoe hij aan de getallen komt.

Sir George ontwerpt voor vliegtuigen en zeppelins lichamen met de minste weerstand; als voorbeeld daarvoor neemt hij de lichaamsvorm van een forel, een

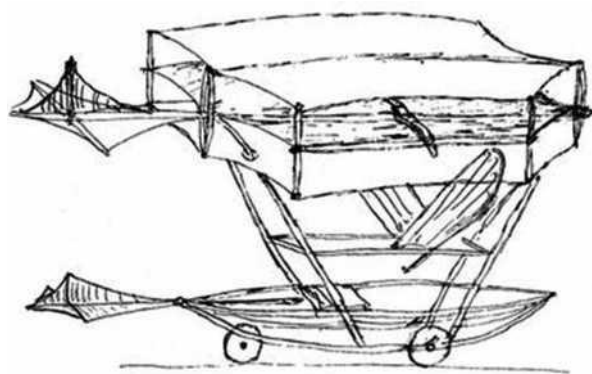


*Fokker 100 en Fokker gestroomlijnd.*

dolfijn en een houtsnip. Hij gaat af op wat de natuur te bieden heeft, kennelijk zonder zich af te vragen waarom het lichamen zijn met de minste weerstand. Hij heeft dus de stroomlijn vorm ontdekt maar weet niet dat deze vorm bij de minste weerstand het grootste volume heeft. Ook de precieze eigenschappen zijn hem ontgaan. (Zie het hoofdstuk 'Bionica voor wedstrijdzwemmers' voor meer informatie over gestroomlijnde lichamen.) Toch zou, met de inzichten van Cayley, de Fokker 100 er heel anders uitzien. En zouden er met dezelfde vlieggkosten veel meer passagiers in kunnen worden vervoerd.

Cayley ontwerpt en bouwt de eerste door mankracht aangedreven vliegtuigen en test er zeker twee van. Het zijn ornithopters met slaande vleugels voor de voortstuwing en vaste vleugels voor de liftkracht. Zijn paardenknecht, een jonge man, bedient de flappende

de minste weerstand. Hij heeft dus de stroomlijn vorm ontdekt maar weet niet dat deze vorm bij de minste weerstand het grootste volume heeft. Ook de precieze eigenschappen zijn hem ontgaan. (Zie het hoofdstuk 'Bionica voor wedstrijdzwemmers' voor meer informatie over gestroomlijnde lichamen.)



*Cayley: ornithopter.*

dens de vlucht. De belangrijkste vinding die voortkomt uit Lilienthal's vele proeven en waarnemingen is het bestaan van de sterke omhoog gerichte dwarskracht, de liftkracht, op gekromde vlakken die onder een kleine hoek worden aangestroomd.

Lilienthal is helemaal gek van ooievaars en hij suggereert dat deze dieren in de buurt van mensen willen wonen omdat ze door God gezonden zijn om de mens te tonen hoe hij moet vliegen. Zijn passie blijkt ook uit de opdracht in dichtvorm, voor alle lezers met een aangeboren wens om te kunnen vliegen:

*An jeden, dem es eingeboren,  
Daß sein Gefühl hinauf und vorwärts dringt,  
Wenn über uns, im blauen Raum verloren,  
Ihr schmetternd Lied die Lerche singt,  
Wenn über schroffen Fichtenhöhen  
Der Adler ausgebreitet schwebt,  
Und über Flächen, über Seen  
Der Kranich nach der Heimat strebt.*

Lilienthal bouwt verschillende zweefstoellen waarmee hij met succes vliegt. Jammer genoeg voor hem en voor de ontwikkeling van de vliegkunst wordt een mislukte vlucht hem op 48 jarige leeftijd noodlottig.

### **Opkomst van de luchtvaart**

In de VS volgen de gebroeders Wright de ontwikkelingen in Europa op de voet. Ze helpen de weduwe van Lilienthal uit de financiële problemen. Ze bouwen zweefvliegtuigen en een gemotoriseerd toestel dat voortgestuwd wordt door een propeller en ontdekken hoe ze die machine in de lucht onder controle kunnen houden.

Het principe van de vleugelbouw dat Lilienthal afleidde uit de armvleugel van vogels wordt algemeen aanvaard door vliegtuigbouwers. Dat zijn er steeds meer na het succes van de Wright broers. Er ontstaat een vliegtuigindustrie gebaseerd op het armvleugel profiel van vogels. Het werkt, de mens vliegt maar hij weet nog niet hoe want het mechanisme is nog niet begrepen.

Het is heel bijzonder te beseffen dat aan het einde van het eerste decennium van de vorige eeuw de mens een machine heeft uitgevonden waarmee gevlogen kan worden. Geen stap voor stap geëvolueerde ontwikkeling van een bekend apparaat maar een geheel nieuw concept. Het is geen Ornithopter geworden met flappende vleugels en ook geen modificatie van het zeppelin ontwerp. Het is een machine met vaste vleugels (2 of 4) die opwaartse kracht leveren bij een bepaalde snelheid. Draaiende propellers, aangedreven door een verbrandingsmotor, zorgen voor stuwkracht en in een soort koetsje zitten de piloot en de passagiers. Horizontale en verticale staartvlakken zorgen voor de nodige controle. Het toestel wil de lucht in nadat het een bepaalde snelheid heeft bereikt en moet ook bij de landing die minimale snelheid hebben anders valt het uit de lucht.

Er zijn nog veel problemen met het onder controle houden van alle variabelen in drie dimensies. De broers Wright vinden de belangrijkste antwoorden daar-



maximaal is. Die vertraging wordt in de aerodynamica het wagnereffect genoemd.

Een startend vliegtuig verhoogt de snelheid op de startbaan net zo lang tot de startwervel van zijn vleugels loslaat. Dan stijgt het op. De piloot hoeft er door gas te geven alleen maar voor te zorgen dat die snelheid bereikt wordt. In een Boeing 747 is dat moment goed te zien als je een zitplaats net boven de vleugel hebt. De vleugelpunt hangt aanvankelijk een beetje naar beneden maar klapt in één keer meters omhoog wanneer de snelheid hoog genoeg is en de startwervel afbreekt. Die wervel blijft op de startbaan achter en vormt daar een gevaar voor vliegtuigen die te vlak achter de 747 vertrekken. Tal van kleine toestellen zijn op die manier verongelukt. Vandaar de aanzienlijke afstand die startende vliegtuigen in acht moeten nemen.

Bij het landen gebeurt het omgekeerde. Het vliegtuig moet neerkomen met een snelheid waarbij de vleugel nog lift genereert. Dan pas remt hij af, produceert de vleugel een stopwervel en is de lift verdwenen.

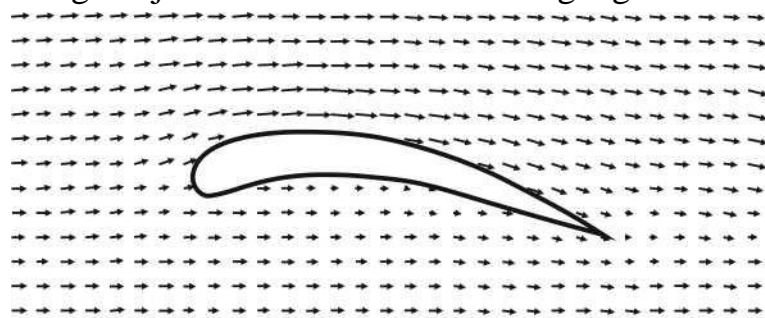
Dank zij Wagner snappen we nu hoe de lift ontstaat maar hoe die gehandhaafd wordt tijdens de vlucht vergt nog wat meer uitleg want er zijn nog tal van aspecten niet helemaal duidelijk.

### **De werking van een conventionele vleugel**

Maken we de stroming zichtbaar rond een vleugel die lift genereert dan zien we wat de lucht doet. Als voorbeeld gebruik ik een eigen experiment met een model van de armvleugel van een noordse stormvogel, een prima zwever. Het model is niet in de lucht maar in een watertunnel getest. Door de hogere dichtheid van het water kunnen zowel de stroomsnelheid als de grootte van het model klein zijn terwijl de werking niet verschilt van die op ware grootte in lucht.

De stroming is zichtbaar gemaakt door in het water zwevende deeltjes (met hetzelfde soortelijk gewicht als water) te verlichten met een dunne plaat laserlicht in één vlak loodrecht op de lengteas van de vleugel. Het vleugelprofiel is gemaakt van doorzichtig perspex. Het laserlicht schijnt daar doorheen waardoor alle deeltjes rondom de vleugel zichtbaar zijn. Een high speed camera registreert de positie van de deeltjes en uit opeenvolgende beelden kan de richting en de snelheid van de verplaatsing worden vastgesteld. De pijltjes tonen het resultaat van die analyse.

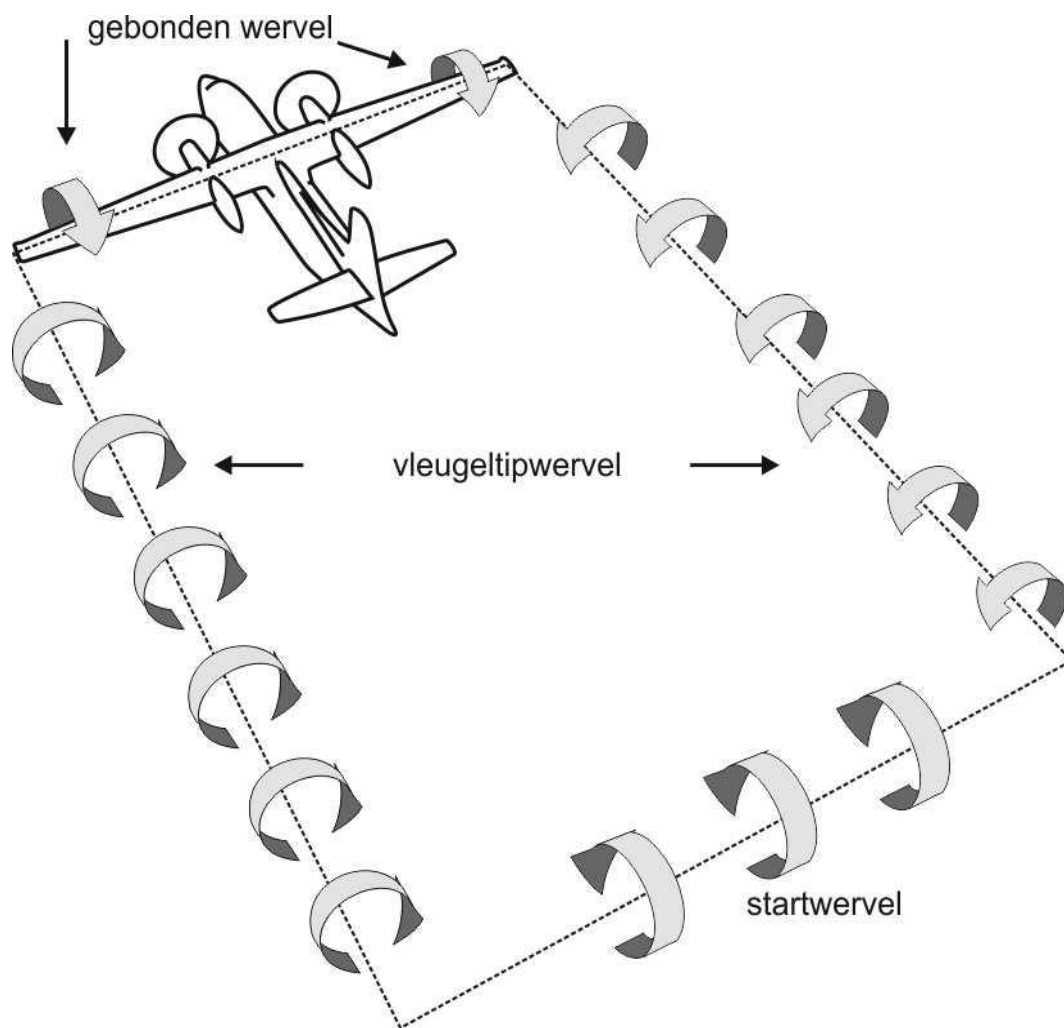
Het beeld is bij gelijke stroomsnelheid heel constant en de krachten op de vleugel zijn stabiel. Net voor de vleugel gaat de stroming iets omhoog, boven de



*De stroming rond een perspex model van een armvleugelprofiel van een noordse stormvogel. De pijltjes geven de richting en de relatieve snelheid van de stroming weer.*

vleugel zijn de pijltjes het langst en is de snelheid het hoogst. Boven de achterrand buigt de stroming met de contour van het profiel mee naar beneden. Aan de onderkant is de snelheid laag en stagneert de stroming in het holle deel.

Hoe kunnen we dit bewegingspatroon van de



*Wervelsystemen bij een conventioneel vliegtuig.*

### **Kan het ook anders?**

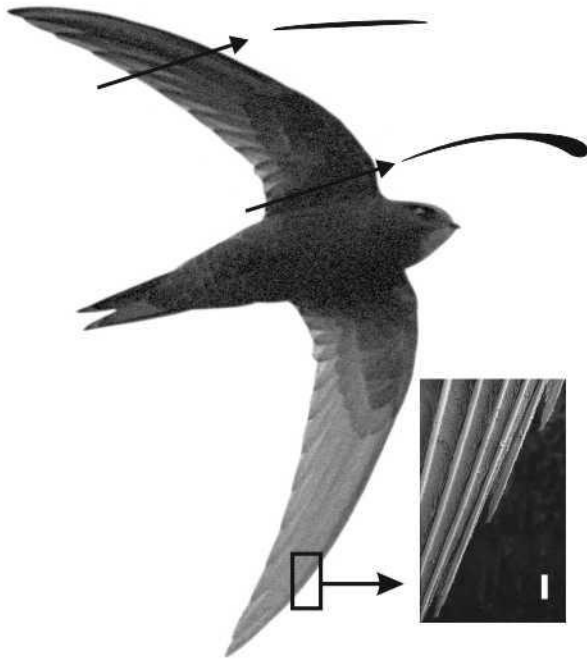
De ontdekking van de werking van de armvleugel van de ooievaar en andere grote vogels door Lilienthal en Wagner heeft dus verstrekkende gevolgen. De vliegtuigindustrie gaat er mee aan de haal. Biologen denken ook dat het vliegen van vogels hiermee verklaard is en baseren er modellen op waarmee het energieverbruik van vogels kan worden geschat. Er zijn natuurlijk vragen onbeantwoord. Voor zwevende vogels is bovenstaande mogelijk het belangrijkste principe waarmee ze opwaartse kracht genereren, maar geldt dat ook voor de slagvlucht, voor het zweven bij lage snelheden en voor het starten en landen?

We weten nu dat de vleugels van conventionele vliegtuigen en de armvleugels van vogels pas boven een bepaalde snelheid lift produceren en dat de lucht het vleugelprofiel netjes moet volgen zonder los te breken. Bij een te grote aanstroomhoek kan dat laatste gemakkelijk gebeuren en verdwijnt de opwaartse kracht onmiddellijk.

Wat gebeurt er wanneer een vleugel op en neer slaat tijdens de vlucht? Vliegtuigbouwers zijn hier niet erg van gediend. Vliegtuigvleugels mogen niet te stijf zijn want dan kunnen ze afbreken wanneer turbulente vliegcondities ze heftig op en neer bewegen. De op en neer gaande beweging moet wel binnen de perken

wen de nacht door. Ze vliegen daar tegen de wind in met ongeveer de snelheid van de wind zodat ze zich nauwelijks verplaatsen ten opzichte van de aarde. Overdag keren ze terug in luchtlagen waar insecten talrijk zijn. De gierzwaluw copuleert zelfs in de vlucht.

Tijdens het verzorgen van de jongen maken ze soms lange reizen om aan voldoende insecten te komen. Gierzwaluwen uit Oxford vlogen bij slecht weer naar Brussel heen en weer. Op zomeravonden vliegen ze gierend over de daken in de steden en dorpen waar ze broeden en halen snelheden tot 112 km/u. Tijdens de trek van en naar Afrika vliegen ze rond de 70 km/u.



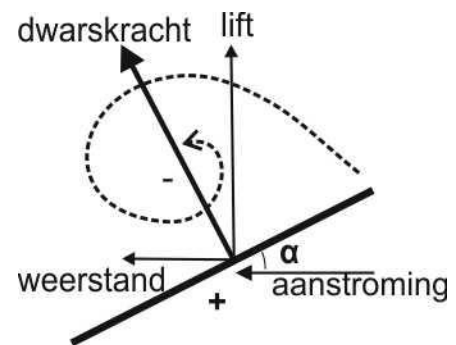
Een zwevende gierzwaluw (foto J.F. Cornuet) met vleugelprofielen van de arm en de handvleugel. De inzet is een foto van de scherpe voorrand van de handvleugel (de schaalstreep is 0,1 mm).

De armvleugel telt zeven kleine slagpennen, de hand heeft er elf; tien daarvan zijn fors gebouwd, nummer 11 is kort en stijf en ondersteunt de tiende, die de voorrand van de handvleugel vormt. Die voorrand, gevormd door de smalle vlag van slagpen 10, is één veer dik, is vlijmscherp en vertoont onder de microscoop een gekartelde structuur. Het vleugelprofiel is vlak bij het lichaam conventioneel met een ronde voorkant, bolle bovenzijde en scherpe achterrand. Het profiel van de handvleugel is vlak en van voren vlijmscherp. Hoe kan dat deel van de vleugel lift genereren?

We testten een model in dezelfde watertunnel waarin het doorzichtige profiel van de noordse stormvogel duidelijk maakte hoe een conventionele vleugel dat doet. Het model werd met de armvleugelkant aan de wand bevestigd; de vleugelpunt zat iets voorbij het centrum van de tunnel. De handvleugel, naar achteren gebogen over een hoek van  $60^\circ$ , had een aanstroomhoek van onderen van ongeveer  $5^\circ$ .

Over de handvleugel had het verschil met het stormvogel profiel had niet groter kunnen zijn. Het water volgt het vleugeloppervlak niet maar vormt een draaikolk boven de scherpe voorrand. Naar de vleugelpunt toe wordt die draaikolk steeds dikker.

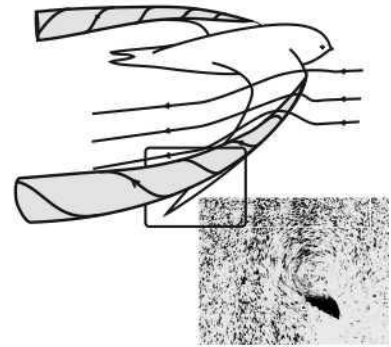
Dat stromingspatroon wordt een voorrandwervel genoemd (Leading Edge Vortex - LEV - in het Engels); het lijkt op een tornado. Onder de vleugel stagneert de stroming enigszins, waardoor de snelheid daar laag is en de druk hoog. In de



Voorrandwervel boven een vlakke plaat, aangestroomd onder een hoek  $\alpha$ . Het drukverschil levert een dwarskracht, te ontbinden in lift en weerstand.

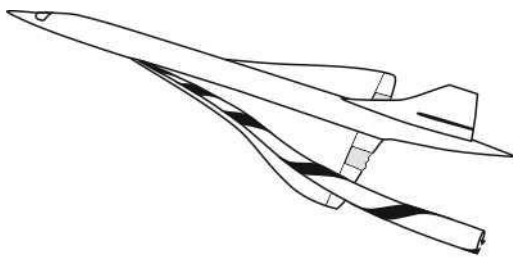
wervel boven de voorrand draait het water snel in de rondte waardoor er een sterke onderdruk ontstaat. Dat verschil in druk tilt de vleugel op.

De naar achter gebogen voorrand zorgt ervoor dat de wervel door de stroming wordt afgevoerd naar de vleugelpunt, hij wordt onderweg steeds groter en is conisch. Hij krijgt daardoor geen kans om op een plek heel groot te worden en af te breken. De tornadowervel wordt als het ware continue ververst. Door het wervel-systeem wordt de aanstromende vloeistof voor de vleugel naar boven en er achter naar beneden afgebogen, waardoor de lift werking wordt versterkt. Dit stromingspatroon heeft geen tijd nodig om te ontstaan zoals de conventionele stroming rond de armvleugel. De liftwerking is er dan ook onmiddellijk en blijft ook bestaan als de stroomsnelheid afneemt. Dit aërodynamische principe van de handvleugel van de meeste vogels was in de vijftiger jaren van de vorige eeuw ook in de techniek ontdekt aan een van onder aangestroomde deltavormige vleugel met een scherpe voorrand.



*Voorrandwervels bij de gierzwaluw.*

Er zijn verschillende vliegtuigen ontwikkeld die het gebruikten, het be-



*De voorrandwervel op de Concorde.*

kendste is de Concorde. De scherpe naar achteren gebogen vleugels snijden de lucht aan waardoor er een conische voorrandwervel ontstaat die dit toestel in de lucht houdt. De dwarskracht, die ontstaat door het drukverschil tussen de positieve druk aan de onderzijde van de vleugel en de onderdruk in de kern van de wervel, staat loodrecht op het oppervlak van de vleugel. Die kracht kan

worden ontbonden in een horizontale weerstand en een verticale lift kracht. Door de aanstroombloek te veranderen kan de verhouding tussen lift en weerstand worden gewijzigd.

Vogels gebruiken de handvleugel met dit principe vooral tijdens het starten en landen. Als je goed kijkt blijken heel veel vogels vlak voor de landing de handvleugel naar achteren te vouwen om vervolgens beheerst zonder voorwaartse snelheid neer te komen.

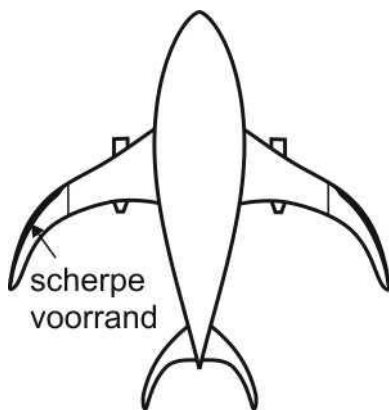
Er zijn enkele soorten vogels die geen scherpe voorrand aan de handvleugel hebben. Albatrossen en reuzenstormvogels zijn extreme vliegers die alleen maar aan land komen om te broeden. Ze zijn uitstekend aangepast aan het leven op de open oceaan waar ze zwevend gebruik maken van de harde windcondities die daar heersen. De slagpennen van de handvleugels zijn veel dikker dan die van andere vogels. Op elkaar liggend vormen ze een ronde voorrand en geven de handvleugel een conventioneel profiel. Daarmee kunnen ze geen voorrandwervel opwekken; de vleugels van deze soorten werken over de hele lengte als de vleugels van een conventioneel vliegtuig. Dat maakt starten en landen moeilijker. Ze landen tegen de wind in met vrij hoge snelheid en komen bij weinig wind nogal eens in de problemen. Ook het starten vanaf een vlak stuk land of vanaf zee is met

weinig wind problematisch. Maar dit zijn uitzonderingen; de meeste vogels hebben twee systemen om lift te genereren die tegengestelde eisen stellen aan de omstroming van de vleugels. De stroming over de armvleugel moet het vleugelprofiel netjes volgen en wordt aan de achterrand naar beneden afgebogen. Bij de handvleugel breekt de luchtstroom meteen af en vormt een wervel boven op de voorrand van de vleugel.

Op de grens tussen arm- en handvleugel hebben bijna alle vogels (kolibries uitgezonderd) een duimvleugel, de alula. Het is een klein vleugeltje dat uit enkele slagpennetjes bestaat, het zit vast aan het duimskelet en kan worden opgetild en naar voren bewogen. De functies van de duimvleugel zijn nog steeds niet helemaal duidelijk. Mogelijk genereert de alula een wervel die de twee verschillende stroompatronen over de vleugel scheidt. Het kan ook zo zijn dat de duimvleugel het ontstaan van de voorrandwervel over de handvleugel bevordert vooral bij lage snelheden tijdens het starten en landen.

Er zijn meer voorbeelden te vinden van structuren op de voorrand van vleugels op de plaats waar de vleugel naar achteren afbuigt. Vleermuizen en *Pteranodons* (uitgestorven vliegende reptielen) hebben op die plekken klauwtjes. De oervogel *Archaeopteryx* heeft drie nagels op het polsgewricht die het dier waarschijnlijk naar believen kon uitsteken of intrekken. Bij zeeschildpadden zien we uitstekende dikke nagels op de voorflippers op de plaatsen waar buiging naar achteren begint. Ook vliegtuigen gebruiken wervelgeneratoren om de stroming op verschillende delen van de vleugel te scheiden.

Conventionele verkeersvliegtuigen hebben een lange start- en landingsbaan nodig omdat ze pas voldoende lift kunnen produceren boven een bepaalde snelheid. Vooral het landen met hoge snelheid vormt een groot risico. Een te lage snelheid net voor de landing kan rampzalig zijn. De vleugels produceren dan van het ene moment op het andere geen opwaartse kracht meer en het vliegtuig valt als een steen uit de lucht. Het ongeval van 25 februari 2009 met de Boeing 737 van Turkish airlines op Schiphol is daar een triest voorbeeld van. Anderhalve kilometer voor de landingsbaan vloog het toestel te langzaam en crashte in de polder. Die extreem harde landing had voorkomen kunnen worden wanneer het toestel had kunnen beschikken over naar achteren gebogen vleugeluiteinden waarop een voorrandwervel ook bij lage snelheid nog opwaartse kracht kan leveren. Een dergelijk ontwerp, gebaseerd op de twee principes die vogels gebruiken, heeft een veel kortere startbaan nodig want al bij lage snelheid komt het toestel van de grond.



'Boeing 737 Swift'.

## Vliegen is niet moeilijk

In de natuur is vliegen de gewoonste zaak van de wereld. De meeste diersoorten op aarde zijn insecten en die vliegen vrijwel allemaal. Insecten zijn geleedpotigen met een uitwendig skelet. Het lichaam is opgebouwd uit een kop, een borststuk en

een achterlijf. Aan het borst stuk zitten drie paar poten en in principe twee paar vleugels.

Anders dan bij vliegende gewervelde dieren zijn de vleugels geen gemodificeerde ledematen. Eén paar vleugels kan gereduceerd zijn of gemodificeerd tot schilden zoals bij kevers of, bij vliegen, tot kleine knotsvormige orgaantjes, de halters. Halters functioneren als een gyroscoop, ze slingeren met hoge snelheid rond en verzetten zich tegen verandering van de draaias. Dat geeft het insect vervolgens een indicatie van zijn houding in een driedimensionale ruimte ten opzichte van de houding waarin de halters op snelheid gebracht zijn. Insectenvleugels zijn uitstulpingen van de huid en bestaan uit twee op elkaar gegroeide vliezen. Bij het ontpoppen, vouwen de vleugels zich uit doordat bloed onder druk in aderen tussen de vliezen wordt gepompt. Vervolgens wordt het bloed uit de vleugels teruggetrokken en drogen ze op.

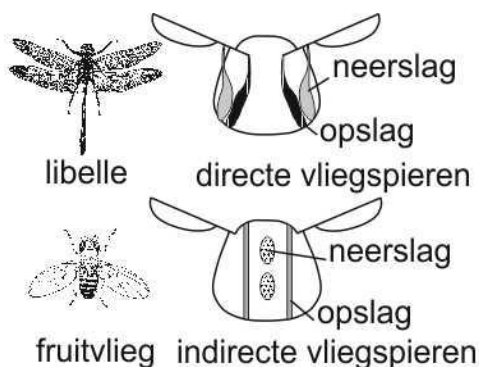
De hoofdaderen lopen grofweg in de lengterichting van de vleugel, we vinden ook zijtakken en dwarsverbindingen. Aan het vleugeloppervlak vormen de aders ribbels en knikpunten. Die kunnen het profiel van insectenvleugels heel complex maken; net als golfplaten ontleen ze hun stevigheid aan de geribbelde structuur. De variatie is overweldigend groot. Vleugels kunnen los en onafhankelijk van elkaar bewegen of gekoppeld zijn. Ze kunnen tijdens de vlucht van vorm veranderen en buigen en torderen in alle richtingen. Verdikte of gekartelde voorranden hebben waarschijnlijk nog onbekende aerodynamische functies. Insecten kunnen liftkrachten tot meer dan drie maal hun lichaamsgewicht opwekken en vijf maal hun lichaamsgewicht aan stuwkracht produceren.

Globaal kunnen we vliegapparaten indelen in twee systemen: vleugels die direct of vleugels die indirect door spieren worden aangedreven.

Het eerste ontwerp is met 350 miljoen jaar het oudste. In afzettingen uit het carboon vinden we fossielen van grote libellen. Libellen kunnen met hun twee paar vleugels stilstaan in de lucht, achteruit vliegen en de hoge snelheden halen die ze nodig hebben om hun prooien, andere vliegende insecten, te vangen. Er zitten geen spieren in de vleugels, die zijn licht, de aderen zijn met lucht gevuld, en sterk door de golfplaatstructuur. De vleugels zijn met complexe gewrichten verbonden met het borststuk. Bij dit ontwerp zitten er in het borststuk aparte spieren voor de neerslag en de opslag. Ze hechten via pezen aan een vleugel, de neerslagspier aan de buitenkant van het scharnierpunt, de opslagspier aan de binnenkant van dat punt. Voor elke samentrekking krijgen die spieren een zenuwimpuls,

dus twee impulsen per slag: een voor de neerslag en een voor de opslag. De slagfrequentie van dit systeem is maximaal 25 Hz, sneller kunnen de zenuwen niet vuren.

Kleinere spieren hechten ook aan op het gewricht, regelen de slagamplitude en de aanstroomhoek en verzorgen de houding en de vorm van de vleugel in interactie met krachten die de lucht erop uitoefent. Libellen kunnen de voorste en achterste vleugels onafhankelijk van elkaar bewegen. Synchron, al of niet in



*Twee vliegtechnieken van insecten.*

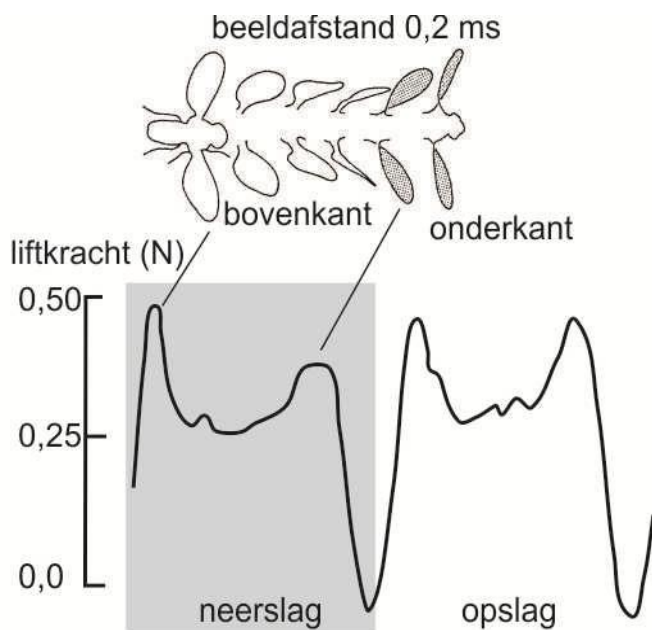
fase met elkaar, of in tegenfase. Alleen de libellen en haften vliegen zo, alle andere insecten gebruiken indirect werkende spieren en kunnen hun vleugels boven het lichaam vouwen. De vliegspieren zitten niet vast aan de vleugels maar aan de wanden van het borststuk. De spieren voor de neerslag zitten gespannen tussen de voor- en achterwand van het borststuk. Als ze samentrekken maken ze het borststuk korter en hoger, waardoor de vleugel naar beneden slaat. De spieren voor de opslag hechten er boven en onder aan, en verlagen en verlengen het borststuk bij contractie. Daardoor slaan de vleugels omhoog. De contracties van beide spiergroepen wisselen elkaar in hoog tempo af; ze brengen daardoor het borststuk in trilling met een eigen frequentie. De spieren trillen vervolgens mee en worden geprikkeld door de uitrekking. Het gevolg is dat het dak van het borststuk op en neer trilt en de vleugels slaan mee met dezelfde frequentie. Zenuwimpulsen zijn slechts af en toe nodig om het trillende systeem op gang te houden. De vleugels zitten zo aan het borststuk dat ze met de trilling op en neer gaan. Het gewricht is ingewikkeld en variabel. Vleugels kunnen in sommige gevallen losgekoppeld worden zodat ze stilstaan terwijl het borststuk trilt (er zit een vrijloop op).

In insectenscharnieren zit de meest elastische stof op aarde: resiline. Het is 97% elastisch. Een (nog niet bestaande) tennisbal van resiline die van een hoogte van 1 meter valt zou terugstuiven tot 97 centimeter. Met dit systeem kunnen slagfrequenties worden bereikt tot 1000 Hz, want de snelheid van zenuwimpulsen is hier geen beperkende factor.

Er zijn binnen de insecten tal van manieren geëvolueerd om stuwkracht en lift te genereren en altijd is het een combinatie van technieken. Vlinders bijvoorbeeld starten op een speciale manier. De vleugels zitten tegen elkaar gevouwen boven het lichaam. Ze slaan neer en de lucht vult de vrij komende ruimte meteen in met twee wervels. De onderdruk in die draaiende luchtmassa's tilt de vlinder op. De opslag die volgt perst de lucht naar achteren tussen de vleugels vandaan waardoor stuwkracht ontstaat die voor voorwaartse snelheid zorgt. De achterrand

van vliedervleugels is vaak gekarteld. Daardoor wordt de lucht in aparte stralen afgevoerd.

De vliegtechniek van het fruitvliegje *Drosophila* is intensief onderzocht. Beelden met een frequentie van 5000 beelden per seconde laten een slagfrequentie zien van 250 Hz. De neerslag is dan te zien in 6 beelden met een tijdsafstand van 0,2 milliseconde tussen de beelden. Aan zo'n klein vliegend beestje is het moeilijk meten, de slag is te snel en de krach-



Krachtontwikkeling bij de vleugelslag van de fruitvlieg.

## 10. Extreme aanpassingen

Hoofdstuk 2 illustreert hoe door de werking van natuurlijke selectie nieuwe soorten op aarde ontstaan en hoe dat kan leiden tot functionele diversiteit binnen groepen van nauw verwante soorten. Soms gaat de evolutie heel ver in een bepaalde richting waardoor er extreem gespecialiseerde organismen zijn ontstaan. Wanneer we van de natuur willen leren zijn die gevallen bijzonder veelbelovend.

Zo zagen we in hoofdstuk 9 hoe de gierzwaluw zich in menig opzicht kwalificeert als de beste vlieger op aarde. Recordhouders zijn vaak tot in de kleinste details aangepast aan hun specialiteit. Hier volgen twee andere voorbeelden.

De potvis, een zoogdier nota bene, benut een extreme en rijke voedselbron op enkele kilometers diepte in de oceaan. Om die te kunnen exploiteren heeft natuurlijke selectie deze tandwalvis niet alleen de beste duiker ter wereld gemaakt, maar ook uitgerust met een ingenieuze vangmethode.

Het andere voorbeeld betreft de snelste zwemmer op aarde. Om die titel te kunnen voeren zit de zwaardvis vol bizarre en onverwachte aanpassingen. De voorbeelden hebben gemeen dat de kennis over de details nog lang niet volledig is en dat toepassing van de technische snufjes niet direct voor de hand ligt. Toch denk ik dat dit boek de plaats is om te laten zien hoe ver natuurlijke selectie kan komen bij het oplossen van de gekste problemen.

### Zeezoogdieren

Natuurlijke selectie is vreemd verlopen bij het ontstaan van walvissen. Zo'n 30 miljoen jaar geleden was er een op het land levend evenhoevig zoogdier (verwant aan herten, runderen, varkens, schapen en nijlpaarden) dat in zee naar voedsel zocht. Bij de nakomelingen van deze soort zijn er generaties lang erfelijke eigenschappen geselecteerd die het verblijf in het water gemakkelijker maakten. De achterste ledematen en het bekken verdwenen en werden vervangen door een horizontale staartvin aan het einde van een verlengde wervelkolom. Bij de moderne walvissen zijn soms nog restanten van het bekken en het skelet van de achterpoten terug te vinden, los in het lichaam zonder verbinding met de rest van het skelet. In embryo's beginnen de achterste extremiteiten zich aanvankelijk nog te ontwikkelen om vervolgens te verdwijnen.



chevron beenderen

*Staartskelet van de potvis uit het Natuurhistorisch Museum Rotterdam. (foto: Jaap van Leeuwen)*

De horizontale staartvin wordt op en neer bewogen door spieren aan de boven en onderzijde van de wervelkolom. De spieren voor de opslag zitten aan een kant vast aan de uitsteeksels aan de rugzijde van de wervels. De meeste gewervelde dieren, van vissen tot zoogdieren, hebben zulke uitsteeksels. Bij walvisachtigen ontwikkelden zich ook aan de onderkant van de wervels, achter de buikholte, V-vormige botstructuren, de chevron beenderen. De spieren die zorgen voor de neerslag van de staart hechten hierop

aan.

De voorste extremiteiten zijn in de loop van de evolutie omgebouwd van poten tot vinnen. Daarbij is het aantal vingerkootjes sterk toegenomen. De effici-



entie van de interactie met het water is daardoor geoptimaliseerd maar de mogelijkheid om er op te steunen is verloren gegaan.

Vreemd genoeg hebben natuurlijke selectieprocessen het ademhalingsstelsel niet aangepast. Aan het oppervlak moeten walvissen nog steeds met hun longen zuurstof uit de lucht opnemen. Toch zijn walvissen veel extremer aangepast aan het leven in zee dan zeehonden en zeeleeuwen, want ze komen hun hele leven niet aan land en de jongen worden in het water geboren.

De koppen van walvissen evolueerden in twee richtingen. Bij de baardwalvissen hebben tanden plaats gemaakt voor baleinen die het filterapparaat vormen waarmee relatief klein voedsel, zoals krill garnalen, massaal uit het water gezeefd wordt (zie het hoofdstuk Filteren). Tandwalvissen leven van grotere prooien en hebben hun tanden behouden. De orka bijvoorbeeld gebruikt ze om zijn prooien, andere zeezoogdieren en vissen, te doden en in stukken te scheuren.

### De potvis

Onder de tandwalvissen neemt de potvis een bizarre plaats in. Het is de enige overgebleven soort van een verder ausgestorven familie. Volwassen potvissen hebben twintig tot vierentwintig tanden in hun onderkaak; de bovenkaak is meestal tandeloos. Soms zit er nog wel de aanzet voor een paar maar die komen niet te voorschijn. (Bij ons gebeurt dat ook wel met verstandskiezen.) Potvistanden zijn kegelvormig en staan ver uit elkaar in een rij op de linker en rechter kaakhelft.



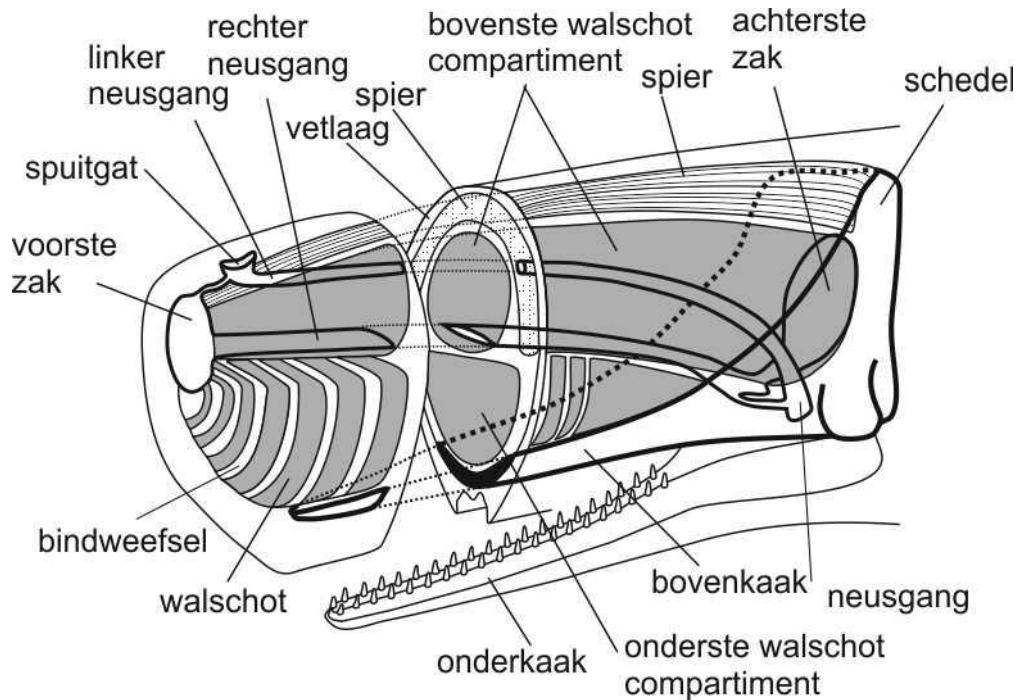
Potvis.

Het gewicht van de kop van de potvis is een derde van het lichaamsgewicht en is daarmee zwaarder dan die van elk ander dier op aarde. Vandaar de wetenschappelijke naam: *Physeter macrocephalus*. Dat betekent vrij vertaald 'de spuiters met de grote kop'. In die kop zitten de grootste hersenen van alle diersoorten op aarde, ze wegen bij een volwassen mannetje wel 9 kilo. Mannelijke dieren zijn het grootst, ze werden vroeger twintig meter lang en wogen rond de 57.000 kg. Door de intensieve walvisvaart na de Tweede Wereldoorlog worden ze nu meestal niet langer dan achttien meter. Mogelijk verandert dit weer nu ze beschermd worden en dus door kunnen groeien. (Dat duurt even want ze worden zeventig jaar oud en planten zich pas voort wanneer ze de dertig gepasseerd zijn.

De vrouwtjes werpen elke drie tot zes jaar, na een draagtijd van veertien tot zestien maanden, één jong per keer. Een jong wordt nog jaren (soms wel dertien jaar) gezoogd door de moeder.

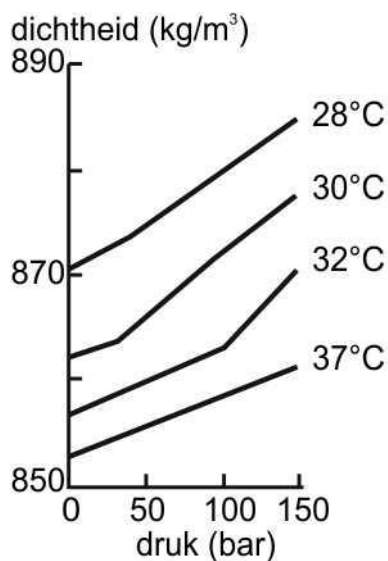
De functionele anatomie van de kop maakt de potvis op een unieke wijze geschikt om een rijke maar moeilijk te bereiken voedselbron te exploiteren. Potvissen jagen namelijk bij voorkeur op grote pijlintvissen in de diepzee.

Voor op de schedel zit een enorme bult. Die bevat walschot, ook wel cetaceum of spermaceti genoemd, een wasachtige substantie waar de cosmetische industrie en de walvisvaarders gek op waren. Het maakt deel uit van een complex orgaan, het spermacetieorgaan; daarmee regelen potvissen hun drijfvermogen.



*Potvis: kopstructuren.*

Vrouwtjes van veertien ton hebben twee ton walschot in hun kop, grote mannetjes tot wel vijftien ton. Walschot is vloeibaar bij temperaturen boven de 33°C en hard wanneer de temperatuur beneden de 30°C zakt. Dan is het volume het kleinst en dus het soortelijk gewicht het hoogst. De bult voor op de kop is eigenlijk een extreem dik opgezwollen neus. Het grootste deel daarvan wordt ingenomen door twee massa's walschot. Het bovenste deel is half omgeven door een grote spier. Deze zit aan de achterkant vast aan de voorkant van de schedel. Aan de onderzijde is het walschot verpakt in achter elkaar gelegen pakketten gescheiden door lagen pezig bindweefsel. Deze hele massa rust op de bovenkant van de naar voren uitstekende bovenkaak.



*Het effect van druk en temperatuur op de dichtheid van spermacetolie.*

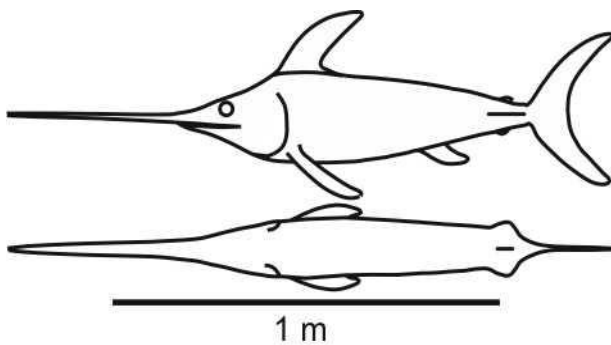
De walschotcompartimenten zijn voorzien van een uitgebreid bloedvatstelsel. Aan de buitenkant is de bult omgeven door een dikke vetlaag; ook daar lopen bloedvaten doorheen. Het spuitgat zit vooraan boven op de bult en is niet rond maar sikkelvormig. Het geeft toegang tot twee complexe, lange neusgangen. De linker neusgang is rond op doorsnede en heeft een gespierde wand. Die loopt aan de linkerkant van de kop met een boog naar de luchtpijp welke in verbinding staat met de longen. De rechter neusgang is veel complexer gebouwd. Bij het spuitgat zit een nauwe verbinding met een voorste zak. Van daaruit loopt een brede platte gang naar achteren, midden tussen de bovenste en onderste massa walschot. Bij de schedel eindigt de rechter neusgang in een achterste zak. Daar

## Extreme aanpassingen van de zwaardvis

De snelste zwemmer ter wereld is de zwaardvis, *Xiphias gladius*, een grote top-predator uit de open oceaan. Volwassen exemplaren werden wel 4,5 meter lang (tegenwoordig halen ze hooguit een lengte van 3,5 meter omdat er te intensief op wordt gevestigd).

De bouw van het lichaam wordt gekenmerkt door het lange zwaard dat bij volwassen exemplaren tussen de 40 en 45% van de totale lengte inneemt. Het is een verlenging van de bovenkaak. De zwaardvis is de enige vis met een hol in plaats van een bol voorhoofd.

Zwaardvissen hebben geen tanden en jagen hun prooi op tot die volkomen uitgeput is en gemakkelijk kan worden verorberd. Naar schatting halen ze snelheden van meer dan 100 km/u. Net als een formule 1- auto zit de zwaardvis van voor tot achter vol met gadgets die de snelheid bevorderen.



Zij- en bovenaanzicht van de zwaardvis.

Laten we vooraan beginnen. Het zwaard is vertikaal afgeplat, van opzij gezien dun en van boven en onder breed. Het gaat over in het holle profiel van de kop, het lichaam wordt snel dikker tot het zijn grootste formaat bereikt op de plaats waar de rugvin begint. Dat dikste punt ligt verder naar voren dan bij snelle zwemmers zonder zwaard zoals tonijnen. Het lichaam achter de kop bestaat voornamelijk uit

de grote spiermassa waar het bij de visserij om begonnen is. Het loopt taps toe naar de staartwortel, het einde van het lichaam net voor de staarvin.

De staartwortel is vertikaal afgeplat met aan elke kant een scherpe horizontale kiel. Van opzij gezien is de staartwortel dun en plat, zeker vergeleken met het zijdelings oppervlak van de hoge sikkelvormige staartvin. Er zit een vinnetje boven en onder op de staartwortel in het midden van het lichaam. De bovenste en onderste voorrand van de staartvin zijn naar achteren gebogen en de achterrand vormt een sikkel. De staart van de vis is helemaal gebouwd op het produceren van grote hoeveelheden stuwkracht in korte tijd. De lichaamsspieren zorgen via de staartwortel voor de heen en weer slaande beweging van de staartvin. De kielen verminderen de weerstand van de staartwortel bij de zijwaartse beweging. De kleine vinnetjes spelen ongetwijfeld een belangrijke rol bij de verdeling van water over de staart. Het langsstromende water bereikt dank zij die voorzieningen vrijwel ongestoord de staartvin. Horizontale doorsneden door die vin laten een ronde voorrand en een scherpe achterrand zien. Tijdens de slag wordt het langsstromende water door de staartvinbeweging naar achteren versneld. Reactiekrachten duwen de vis vooruit.

We weten overigens niet wat er precies gebeurt want zwaardvissen zijn nooit onder experimentele condities gehouden. Sterker nog, er zijn zelfs nauwelijks observaties onder water gedaan.

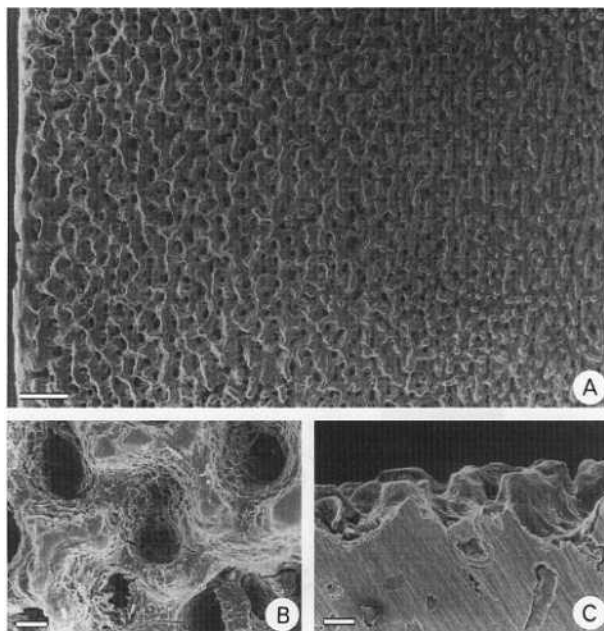
Uit anatomische details kunnen we inschattingen maken over de functies die het meest voor de hand liggen. De grote rugvin en de anaalvin zijn stijf en niet

inklapbaar, ze zorgen voor stabiliteit in de lengterichting waardoor het dier niet door de terugslag van elke slag van richting verandert. De borstsvinnen zijn ook stug maar wel beweeglijk. Het ligt voor de hand dat ze dienen als hoogteroer en helpen bij het op koers houden van de vis tijdens het versnellen.

Er zijn tegenstrijdige verhalen in omloop over de functie van het zwaard. De voor de hand liggende gedachte is dat het een wapen is; de naam suggereert die al. Er zijn verhalen over het doorboren van vijanden, het in stukken hakken van prooien en het tot zinken brengen van bootjes, maar het is twijfelachtig of dit laatste opzettelijk was. Zwaardvissen leven in de oceaan waar ze normaal geen objecten tegenkomen die ze moeten ontwijken. Ze kunnen hard zwemmen maar zijn niet gebouwd op wendbaarheid. Remmen kunnen ze ook niet. Het is dan ook niet verwonderlijk dat er af en toe aanvaringen zijn wanneer je zo slecht kunt manoeuvreren.

Het zwaard breekt gemakkelijk vlak bij de kop af. Een prooi die aan het zwaard gespietst zit, is daar moeilijk vanaf te krijgen, zeker als je niet achteruit kunt zwemmen. Verder is het zwaard bot en ruw, kenmerken die niet gewenst zijn wanneer het als wapen gebruikt moet worden.

Ik denk dat die extreme bovenkaak dient om microturbulentie op te wekken om zo de zwemweerstand te verlagen. De argumenten die pleiten voor een weerstandsverminderend effect zijn sterker dan de waarnemingen die voor de slachtfunctie pleiten.

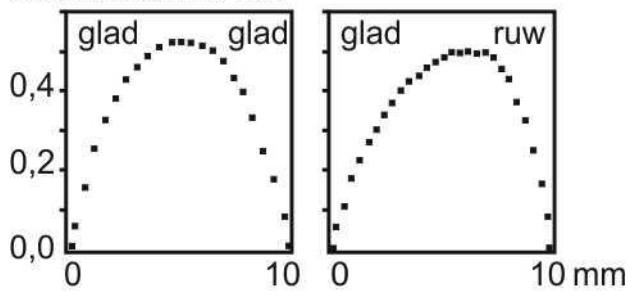


Scanning Electronenmikroskopische foto van de oppervlaktestructuren van een 76 cm lang zwaard van *Xipias gladius* op 8 cm van de punt. A. Overzicht (schaalstreep 1 mm). B. Sterkere vergroting (schaalstreep 0,1 mm). C. Dwarsdoorsnede door het oppervlak (schaalstreep 0,1 mm).

Bij de punt is het zwaardoppervlak ruw als grof schuurpapier, door een complexe structuur van knobbeltjes en gaten. De gaatjes staan met elkaar in verbinding in het bot, waardoor het oppervlak niet alleen ruw maar ook poreus is. Naar het lichaam toe mindert de ruwheid. Beelden gemaakt met de scanning elektronen microscoop van het oppervlak op ongeveer 10% van de lengte vanaf de punt laten zien dat de knobbeltjes ongeveer 0,1 mm hoog zijn. Bij de punt zijn ze 0,2 mm hoog. De knobbeltjes lijken min of meer in rijen te liggen. Tussen de knobbels zien we gaten met een diameter van ongeveer 0,1 - 0,2 mm.

Doorsneden door het zwaard op die plaats tonen aan dat de gaten met elkaar in verbinding staan. Langs stromend water reageert anders op een ruwe wand dan op een gladde. In een rechthoekige buis met aan een kant een ruwe wand en aan de andere kant een gladde, stroomt er meer water door de

stroomsnelheid m/s



*Snelheidsverdeling in een stromingskanaal met twee gladde wanden en in een kanaal met een gladde en een ruwe wand.*

ruwe kant. Daar zorgt het ruwe oppervlak er voor dat waterdeeltjes in een trillende beweging komen en er een microturbulente stroming ontstaat. Daardoor is de snelheidstoename groter en de laagdikte waarin die plaats vindt dunner.

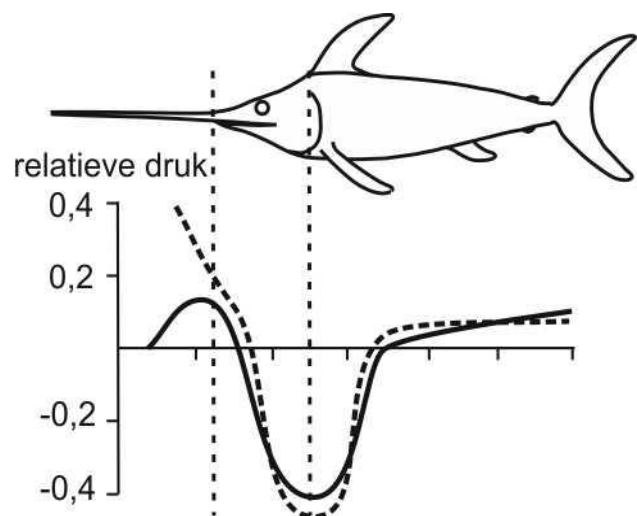
In snel stromend water is de statische druk laag en er kunnen gemakkelijk plaatselijke drukverschillen ontstaan die kolken veroorzaken of zelfs het water doen losbreken van het oppervlak waar het langs stroomt. Die verschijnselen gaan gepaard met verhoogde weerstand. Om die drukverschillen laag te houden is het poreuze oppervlak bij de punt van het zwaard waarschijnlijk van belang. Door de aanwezigheid van het dunne zwaard wordt het stilstaande water waarin de vis doordringt waarschijnlijk microturbulent gemaakt waardoor het gemakkelijker wordt voor het dikke lichaam om er in door te dringen.

Dat is ook te zien aan het effect dat de aanwezigheid van het zwaard heeft op de dynamische drukverdeling over het lichaam. Die is getest door metingen aan een houten model van negentig centimeter mét zwaard en zónder zwaard in een stromingskanaal met een stroomsnelheid van 21 km/u. Zonder zwaard ondervindt de punt van de kop een hoge dynamische druk door de botsende waterdeeltjes. Met zwaard is die bij het begin van de kop de helft minder. Opvallend is de drastische vermindering van de relatieve dynamische druk (relatief ten opzichte van de statische druk) over de holle kop tot de plaats waar de rugvin begint en het lichaam het dikst is. In dat gebied is de relatieve dynamische druk negatief.

Volwassen zwaardvissen hebben vrijwel geen schubben maar jongere dieren wel. Ze zijn heel klein en zitten verspreid over het lichaam. De schubben zien er vreemd uit, ze zijn voorzien van kleine uitstekende stekeltjes en een rond gat. De afmetingen van die structuren zijn in de orde van 0,1 mm. We hebben geen

helft met de ruwe wand dan door de andere helft.

Dat komt door de snelheidsverdeling. Tegen beide wanden aan staat het water stil, het plakt er als het ware aan. Van de wand af neemt de snelheid toe tot het de maximale stroomsnelheid bereikt in het centrum van de buis. Aan de gladde kant is die snelheidstoename geleidelijk en de dikte van de laag voor de maximale snelheid bereikt wordt groter dan aan de



*Drukverdeling over de bovenzijde van een houten model van een zwaardvis. De getrokken curve is met zwaard, en de gestippelde zonder.*

idee waar ze voor dienen en waarom ze later verdwijnen.

Zwaardvissen hebben grote ogen waarmee ze ook in diep water (ze bewegen zich tussen het oppervlak en een diepte van 500 m) goed kunnen zien. Kennelijk is dat erg belangrijk want een deel van een van de oogspieren is omgebouwd tot een warmtebron waarmee de hersenen en de retina verwarmd worden.

### Nieuwe ontdekkingen

Het is niet gemakkelijk om aan zwaardvissen te komen voor functioneel morfologisch onderzoek. Ze zijn erg duur en de kop wordt er meestal op zee al afgehaald omdat de vissers niet willen dat het gewicht ervan meetelt bij het quotum dat ze aan land mogen brengen.

In de Middellandse zee wordt al duizenden jaren op zwaardvis gevestigd. Op de schijf van Phaistos, een beroemd kleitablet uit de Minoïsche tijd van Kreta (1700-1600 v.Chr.), staan gestempelde pictogrammen in spiralen gerangschikt.

Niemand weet de betekenis ervan. Een van de pictogrammen stelt een vis voor, zes keer staat die op het tablet. De maker ervan was een goede waarnemer maar waarschijnlijk geen visser. De stempel laat volgens mij een zwaardvis zien zonder zwaard. Geen enkele andere vis komt wat vorm, plaats en aantal vinnen betreft in aanmerking. Waarschijnlijk braken vissers in die tijd meteen na de vangst op zee het zwaard af om te voorkomen dat ze gewond raakten door de spartelende vis. Landrotten kregen dus nooit hele zwaardvissen te zien. Bionica kan ook archeologische raadsels oplossen.



*De vis op de schijf van Phaistos is een zwaardvis zonder zwaard.*

Ook rond Corsica wordt op zwaardvis gevestigd. Daar leidde ik meer dan vijftig jaar elk voorjaar een marien biologische excursie. Mijn eerste zwaard kreeg ik ooit van een visser uit Calvi. Op weg naar huis zat het samen met een Corsicaanse kaas in mijn koffer die per abuis van de band op Schiphol werd geplukt door mensen uit den Haag. Toen ze een dag later de vergissing bemerkten boden ze aan het zelf terug te brengen. Ze wilden er achter komen wat die enorme stank veroorzaakte die om dat koffer hing. Het zwaard bleek door de hoge temperatuur een sterk ruikende olieachtige substantie af te scheiden en de kaas was onder die omstandigheden ook op zijn best.

Dat zwaard is het begin geweest van jarenlang onderzoek en het levert nog steeds meer vragen dan antwoorden. Het is niet gemakkelijk om aan hele zwaardvissen te komen en zeker niet om een exemplaar van 1,6 m in een MRI scan van het academisch ziekenhuis in Groningen te krijgen.

Mijn visser uit Calvi sloeg er eens in maart twee aan de haak die ik kon kopen. De excursie begon pas begin mei en ze werden tot die tijd opgeslagen in een grote diepvries van het marien biologisch station Stareso. Toen we ter plekke kwamen bleken ze krom te zijn ingevroren omdat de diepvries niet lang genoeg was. In het water van de haven van het instituut zijn ze ontdooid en in hun normale positie terug gebracht. De kok bleek bereid tijdelijk zijn grote diepvries als huisvesting voor onze gestrekte zwaardvissen af te staan.

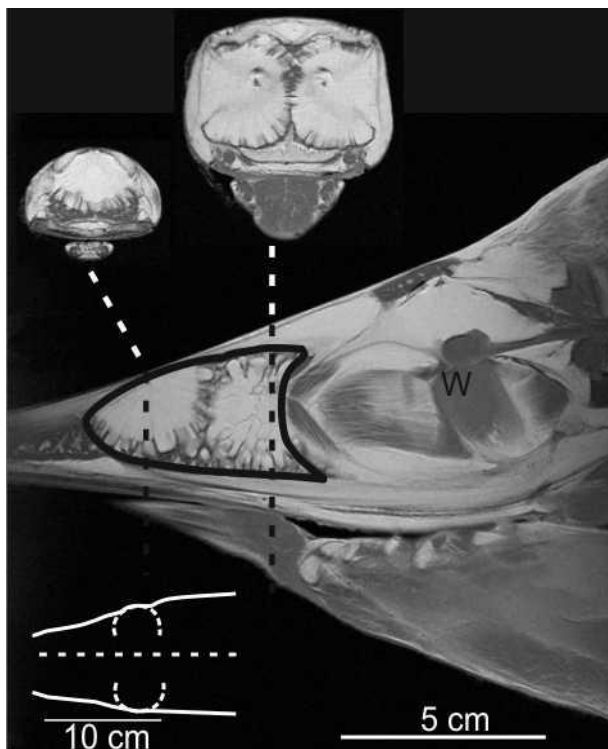
Na afloop van de excursie vlogen we toen vanaf Calvi naar Schiphol met

een Nederlandse chartermaatschappij. De grondstewardess was een studente die de excursie het jaar daarvoor had gedaan en verliefd was geworden op Corsica en op een eilandbewoner, vandaar die baan. Zij zorgde ervoor dat de, in schuimrubber matrassen gewikkelde diepgevroren beesten aan boord kwamen. Op Schiphol zagen we ze op de band terug. De douane was niet nieuwsgierig, enkele Amsterdammers wel. Die vertelden we dat opa en oma het toch te warm hadden gekregen op Ibiza en waren bezweken, maar dat we ze niet zomaar wilden achter laten na een fijne vakantie. Thuis bleken ze nog goed bevroren en belandden de zwaardvissen in een speciaal aangeschafte diepvries.

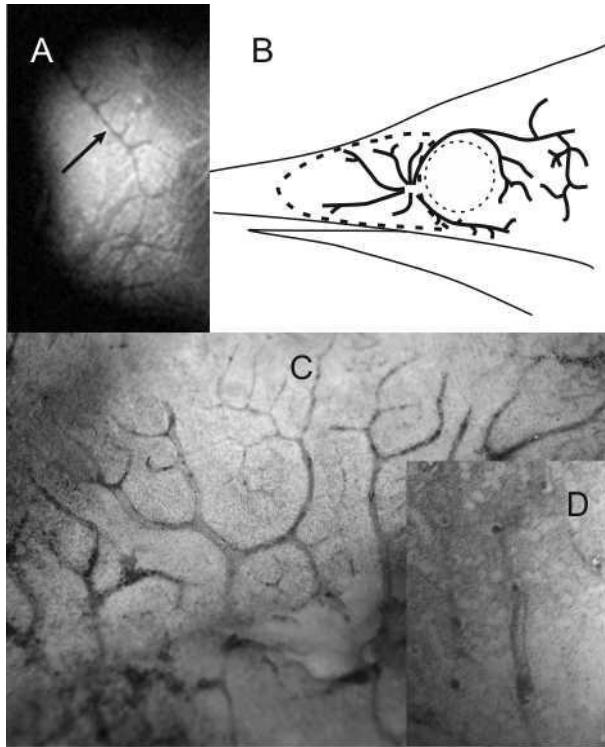
Het academisch ziekenhuis in Groningen beschikt over de nieuwste MRI apparatuur. Zo'n apparaat staat 24 uur per dag aan, maar 's nachts zijn er meestal geen patiënten. Het lukte dank zij de enthousiaste medewerking van het MRI team om in die loze uren 657 scans te maken verdeeld over de hele lengte van de ontdooide zwaardvis. Uit voorzorg had het hoofd van de afdeling gezorgd voor een spuitbus boslucht zodat de eerste patiënten de volgende ochtend niet zouden denken dat ze in een viswinkel terecht waren gekomen. We zijn nog lang niet uitgekeken op de foto's maar de belangrijkste ontdekking tot nu toe is een grote olie producerende klier vooraan in de kop, aan het einde van het zwaard. Die klier neemt zo veel ruimte in dat het bot van het zwaard eromheen erg dun is en daarom op die plaats gemakkelijk af breekt. De olie uit de klier is bij kamertemperatuur vloeibaar maar stolt bij 8°C. Het is

een verzameling vetzuren met o.a. 2,5% palmitinezuur, 2,4% oliezuur, 0,5% myristinezuur en 0,4% stearinezuur.

Doctoraal student Roelant Snoek ontdekte, terwijl hij op zoek was naar een verbinding tussen de klier en de neusopening, bij toeval de bestemming van de olie. Ik had hem op het verkeerde spoor gezet en zijn zoektocht had niets opgeleverd. Teleurgesteld maakte hij nog enkele foto's van het neusgat voor zijn verslag. Daarbij zakte een van de lichtbronnen tegen de huid van de kop en maakt een complex systeem van haarvaten zichtbaar dat nooit eerder was waargenomen. Die haarvaten bleken in verbinding te staan met de olie producerende klieren en uit te monden in kleine (0,05 mm) en grotere (0,3 mm) poriën in de huid van de kop. De olie komt daaruit naar buiten. Mogelijk dient het verwarmingsapparaat bij de ogen ook voor het warm en vloeibaar houden van de olie. De olie



MRI scan midden door de kop van een zwaardvis (stippellijn in tekening bovenaanzicht links onder). MRI scans van dwarsdoorsneden op 2 plaatsen. De olieproducerende klier is zwart omljnd, W is de warmte producerende spier achter de ogen.



Het netwerk van haarvaten in de kop van de zwaardvis. A. De buitenste MRI scan rechts. De pijl wijst naar een deel van het netwerk van haarvaten achter het oog. B. Een gedeeltelijke reconstructie van de belangrijkste aanvoervaten van het netwerk. C. Een deel van de huid van een kieuwdeksel met haarvaten. D Detail van een haarvat met openingen naar buiten.

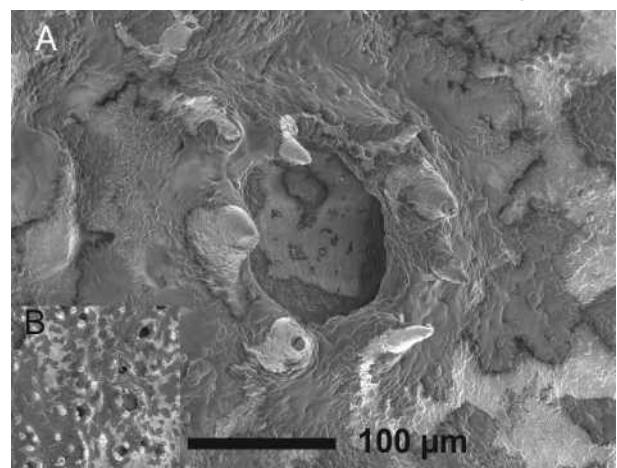
bieden en die beperking zou wel eens te maken kunnen hebben met de  $8^{\circ}\text{C}$  grens die wordt bepaald door de stollings-temperatuur van de olie.

Verder onderzoek wordt bemoeilijkt door het feit dat levende zwaardvissen zich door hun levenswijze onttrekken aan waarnemingen. Wel is het mogelijk om proeven te doen - mocht een instantie zich hiervoor interesseren - waarmee het weerstandverminderende effect van de olie en de stekeltjes kan worden bestudeerd.

Weerstandvermindering door ruwe geoliede oppervlakken staat al lang in de belangstelling van ingenieurs overal ter wereld zonder dat er grote doorbraken te melden zijn. Hernieuwd onderzoek naar de structuren zoals we die vinden bij de zwaardvis kan daar verandering in brengen.

vloeit uit de poriën en wordt als een dunne laag vast gehouden door kleine stekeltjes. Die staan verspreid op de huid (ongeveer  $15 \text{ per mm}^2$ ), aan de randen van de gaten.

De olie maakt de huid waterafstotend en zou daardoor heel goed voor een aanzienlijke weerstandsvermindering kunnen zorgen, maar bewijzen zijn er nog niet. De olieklieren en het bijbehorende haarvatensysteem komen niet bij andere vissen voor en zijn dus een geheel nieuwe evolutionaire vinding. We vermoeden dat de onderdruk die boven de holle kop van de zwaardvis ontstaat de olie uit de poriën zuigt tijdens het zwemmen. In het westelijke deel van de Noord Atlantische Oceaan zijn zwaardvissen gevangen en uitgerust met temperatuur en diepte registrerende loggers. De resultaten laten zien dat zwaardvissen er overdag in diep water jagen bij temperaturen tot minimaal  $8^{\circ}\text{C}$ . 's Nachts zwemmen ze in warmer water niet dieper dan 100 m. Zwaardvissen leven niet in koude ge-



Poriën in het netwerk van haarvaten. A. Detail van een porie, omringd door tandjes. B Een stukje huid van  $1 \text{ mm}^2$  rond de porie.



## Eenheden en afkortingen

### *Afstand:*

m: meter, eenheid van afstand. km: kilometer, 1000 m

mm: millimeter,  $10^{-3}$  m

$\mu\text{m}$ : micrometer,  $10^{-6}$  m

nm: nanometer,  $10^{-9}$  m

### *Hoeken:*

rad: radialen,  $360^\circ = 2\pi$  rad

$^\circ$ : graden,  $1^\circ = 0,0175$  rad

### *Tijd:*

s: seconde, eenheid van tijd. u: uur, 60 minuten, 3600 s. ms: milliseconde,  $10^{-3}$  s

### *Frequentie:*

Hz: Herz, gebeurtenissen/s

### *Massa:*

kg: kilogram, eenheid van massa

g: gram, een duizendste kilogram,  $10^{-3}$  kg

ton: 1000 kilogram,  $10^3$  kg

Da: Dalton, moleculaire massa eenheid,  $1,66 \times 10^{-27}$  kg

### *Snelheid:*

m/s: meter per seconde

km/u: kilometer per uur

### *Versnelling:*

$\text{m/s}^2$ : meter per seconde in het kwadraat, versnelling

g: versnelling van de zwaartekracht,  $9,81 \text{ m/s}^2$

### *Kracht:*

$\text{kg m/s}^2$ : massa maal versnelling

N: Newton,  $1 \text{ kg m/s}^2$

### *Gewicht:*

N: massa maal de versnelling van de zwaartekracht, g

### *Druk:*

Pa: Pascal,  $1 \text{ N/m}^2$

bar: 100 000 pascal,  $10 \text{ N/cm}^2$

atm:  $1,01 \times 10^5$  Pa, 1,01 bar, 10,3 m waterkolom

### *Impuls van een bewegend lichaam:*

Ns =  $\text{kg m/s}$ : massa maal snelheid