

Droogzwemmen in het

Geen meter onder water ben ik geweest tijdens mijn onderzoek naar steenkoralen. Driedimensionaal groeiden ze in tientallen aan elkaar gekoppelde computers in de polders van de Watergraafsmeer, thuisbasis van de sectie *Computational Science* van de Universiteit van Amsterdam. Wachten op echte, langzaam groeiende koralen had mijn promotie laten duren tot ver na mijn pensioen. En waarom ook wachten? Een computermodel heeft grote voordelen, omdat je eenvoudig kan bepalen welke factoren bijdragen aan de groei. Roeland Merks

rmerks@indiana.edu



Roeland Merks studeerde biologie aan de Universiteit Utrecht en werkte van 1999 tot 2003 als promovendus bij de sectie *Computational Science* van de Universiteit van Amsterdam. Daarna was hij als postdoctoraal onderzoeker verbonden aan het *Biocomplexity Institute* van Indiana University Bloomington in de Verenigde Staten waar hij onderzoek deed aan vertakende bloedvat-

vorming met computersimulaties. Sinds kort werkt hij als Marie Curie-fellow bij de afdeling *Plant Systems Biology* in Gent, onderdeel van het Vlaams Interuniversitair Instituut voor Biotechnologie. Hier ontwikkelt hij simulatiemodellen van bladgroei bij de zandraket. Meer informatie is beschikbaar op zijn internetpagina <http://www.roelandmerks.nl/>.

poliepen gelijk over het koraaloppervlak verdeeld blijven.

PLANECONOMIE OF ANARCHIE?

Koralen halen een belangrijk deel van hun energie uit licht. De poliepen bieden onderdak aan eencellige algen, die in ruil voor een veilige, goed verlichte haven met name suikers aan het koraal afstaan. De rest van hun voedsel, zoals bijvoorbeeld kleine kreeftjes, los organisch materiaal en een grote hoeveelheid kalkzouten en andere anorganische stoffen die nodig zijn voor het skelet, nemen de poliepen op uit het water. De koraalpoliepen vormen zo vertakte, bolvormige, gelobde of korstvormige koralen. De vorm ligt grotendeels genetisch vast, zodat koraalbiologen de soort hieraan meestal kunnen herkennen.

Ze kunnen dit echter niet altijd, doordat de kolonievormen ook afhangen van de omgeving waarin het koraal groeit. Zo blijken koralen die in stromend water groeien vaak robuuster en compacter te zijn dan hun wijdvertakte soortgenoten in stilstaand water. Ook blijken sommige koralen meer takken te hebben op sterk verlichte groeiplaatsen dan op donkerder plekken.

Is een koraal een kolonie onafhankelijke individuen, of zijn ze zó innig met elkaar verbonden dat ze als een geheel opereren? Biologen zijn het hierover oneens. Sommige biologen denken dat koralen als één geheel, actief hun vorm reguleren. De vorm van de koraalkolonie is volgens hen volledig genetisch bepaald. Zo kunnen fijnvertakte koralen meer voedsel opvangen in stilstaand water, terwijl dicht vertakte, compacte groeivormen meer voedsel onderscheppen in stromend water.

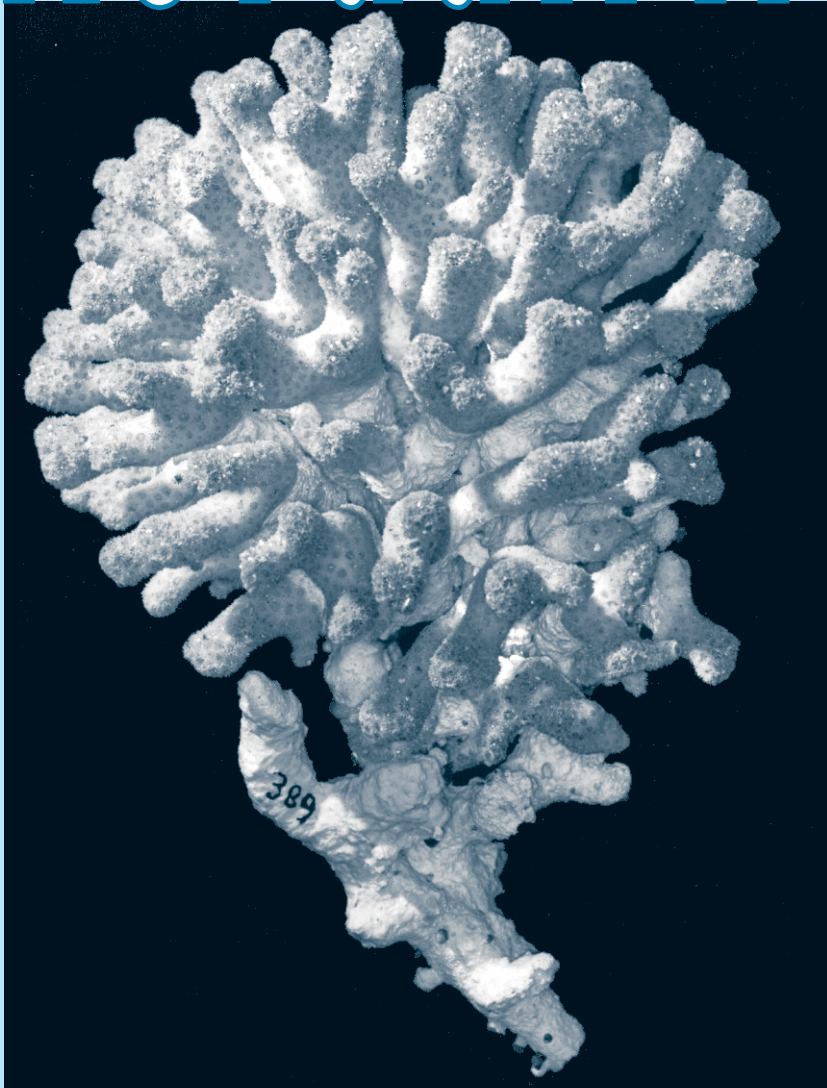
Anderen zoeken de oorzaak in een meer passief milieueffect op afzonderlijke koraalpoliepen. In deze zienswijze wordt de vorm van het koraal minder sterk in een 'genetisch keurslijf' geperst, waardoor vooral omgevings-

Door mijn onderzoek ben ik heel wat te weten gekomen over de kolonies van koraalpoliepen – kleine, gelijkvormige zeeanemonen die met elkaar verbonden zijn via weefselbruggen. De diertjes bouwen een skelet van aragoniet, een soort kalk. Als de poliepen dood zijn, blijft het vaak prachtig vertakte, witte koraalskelet over. De poliepen leven hierop in skeletstructuurtjes, de skeletnapjes.

De koraalpoliepen zetten op de bodem van zo'n skeletnapje en bij de verbindende weefselbruggen nieuwe kalk af op het oude kalkskelet, waardoor het skelet als geheel groeit. Bij de meeste koraalsoorten groeit het skelet slechts enkele centimeters per jaar. Op bolle stukken van een koraal zullen de poliepen door de groei van het skelet uit elkaar worden gedreven. Het lijkt op een gestipte ballon, de stippen komen steeds verder uit elkaar te staan bij het opblazen. Als de poliepen een zekere afstand tot elkaar krijgen, zal ertussen een nieuwe poliep ontstaan. Bij welke afstand dat gebeurt, hangt af van de soort.

Op holle gedeelten worden de poliepen door de groei van het skelet juist dichter op elkaar gedrongen. Niet alle poliepen overleven dit, waardoor de

koraalrif



Figuur 1
Skelet van het vertakte steenkoraal *Madracis mirabilis*. [foto: Louis van der Laan]

invloeden het groeimechanisme zullen beïnvloeden. Zo zou de hoeveelheid voedsel die het koraal kan opnemen mede bepaald kunnen worden door waterstroming, waardoor de groei – en daardoor de kolonievorm – door de omgeving wordt gestuurd.

HET SCHEERMES VAN OCKHAM

Het is lastig een onderscheid te maken tussen deze twee mogelijke verklaringen. Beide theorieën doen immers de

voorspelling dat koraalvormen afhangen van hun omgeving. Natuurkundigen gaan daarom vaak uit van een stelling door Willem van Ockham (circa 1285–1349), bekend als Ockham's razor, het scheermes van Ockham. Deze Fransiscaner monnik, die doceerde in Oxford, stelde “pluralitas non est ponenda sine necessitate”, poneer geen veelvoud zonder noodzaak. Als twee verklaringen dezelfde uitwerking hebben, dan is de verklaring waarin het minste

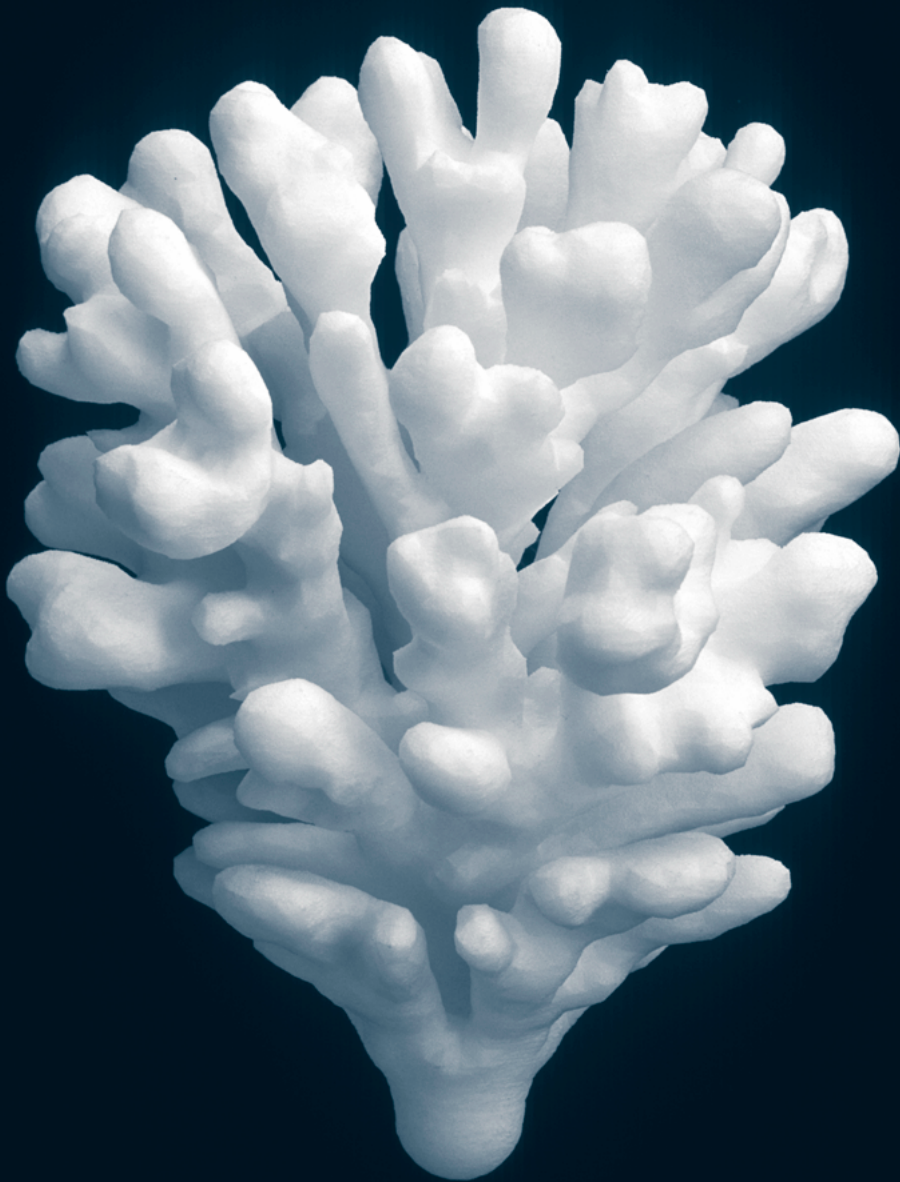
aantal factoren meespeelt het waarschijnlijkst. Als het licht in huis uitvalt, maar alle lampen in de buurt doen het nog wel, dan zou de elektriciteitscentrale kapot kunnen zijn, terwijl de burens een noodaggregaat hebben. Of de stoppen zijn doorgeslagen.

In de biologie zal een eenvoudige verklaring in veel gevallen juist voortkomen uit een veelvoud, of herhaling van simpele elementen. De meeste organismen bestaan immers uit een groot aantal gelijkvormige modules. Een groot, maar beperkt aantal typen cellen met identiek DNA vormt een plant of dier. De cellen vormen weefsel, zoals bindweefsel, spierweefsel of zenuwweefsel. Deze weefsels vormen kleine, zich voortdurend herhalende orgaanmodules, zoals longblaasjes samen de longen vormen. Zouden we niet méér kunnen begrijpen over de complexe structuur en functie van planten en dieren als we meer te weten komen over de interactie tussen een veelvoud van kleine, eenvoudige modules?

In de complexiteitstheorie, een relatief nieuwe tak van de natuurkunde, bestudeert men het gedrag van grote verzamelingen elementen of agents die zich elk voor zich gedragen volgens een klein aantal strikte regels. Grote verzamelingen van deze agents blijken nieuw gedrag te vertonen dat niet te voorspellen valt uit de eenvoudige regels van het individu. Zo ontstaan in verkeersmodellen opstoppingen door enkele ongeduldige, inhalende chauffeurs, en blijken heel domme computermieren in een simulatie toch handige mierenpaadjes te kunnen bouwen of eitjes te kunnen sorteren.

ZELFZUCHTIGE COMPUTERPOLIEPEN

Groepen zelfstandige individuen kunnen dus meer dan vooraf viel te verwachten. Zouden zelfzuchtige individuen óók grillige koralen kunnen vormen? Een simulatie met computerpo-



Figuur 2
Driedimensionale print van een fijn vertakt, gesimuleerd koraal. [foto: Ronald van Weeren]

6

liepen die zich gedragen volgens vaste, zelfzuchtige regels, helpt deze vraag te beantwoorden. De computerpoliepen zetten meer skelet af, naarmate ze meer voedsel uit het water opnemen. Ze leven als flatbewoners op hetzelfde skelet, maar trekken zich weinig aan van hun burens. Is dit voldoende voor het ontstaan van vertakkende groei? Hoe hangt de vorm van het koraal af van het gedrag van de poliepen; vertakken koralen van poliepen die voedsel met hun burens delen? En kan de omgeving het gedrag van poliepen dusdanig beïnvloeden dat de vorm van de kolonie verandert?

Hoe brengt het water het voedsel naar de poliepen? In de eerste plaats gebeurt dat door diffusie. Daarnaast worden in het water opgeloste stoffen ook meegevoerd door de stroming en deining van het zeewater, ofwel *advection*.

De rooster-Boltzmann-methode, een relatief nieuwe manier voor berekeningen van stromingsdynamica, beschrijft deze *advection*-diffusie. Deze techniek is afgeleid van roostergassen, en simuleert de bewegingen en botsingen van virtuele vloeistofdeeltjes op een regelmatig rooster. Als koningen op een driedimensionaal schaakbord, springen de deeltjes van het ene roosterpunt naar het volgende, waar ze op elkaar botsen. Ze wisselen van snelheid, terwijl de totale impuls en massa per roosterpunt behouden blijft. Dit eenvoudige model van een vloeistof gedraagt zich volgens de numeriek veel moeilijker oplosbare, macroscopische vloeistofdynamica-vergelijkingen van Navier en Stokes. Het voordeel van roostergassen boven meer traditionele numerieke methodes, waaronder de eindige-elementenmethode, is

echter dat ze eenvoudiger stromingen kan berekenen rond ingewikkelde structuren, zoals koralen.

Ook is het rooster gemakkelijk over tientallen computers te verdelen, geen overbodige luxe wanneer we de groei van een heel koraal willen volgen. Voor een goede nauwkeurigheid moeten de berekeningen echter worden gemiddeld over de bewegingen van vele deeltjes. De rooster-Boltzmann-methode volgt, in plaats van de individuele deeltjes, de kans op de aanwezigheid en snelheid van de vloeistofdeeltjes, waardoor middeling achteraf overbodig is en de berekeningen aanzienlijk sneller verlopen. Maar het is nog niet zo eenvoudig als bij roostergassen om de botsing tussen de deeltjes te simuleren. Een veel gebruikte oplossing is gebaseerd op een discrete Maxwell-Boltzmann-verdeling, die voor gegeven impulsmoment en vloeistofdichtheid stelt welk gedeelte van de deeltjes in evenwicht naar elk van de omliggende roosterpunten zal stromen. Omdat we weten dat de deeltjessnelheden zich geleidelijk herverdelen volgens de Maxwell-Boltzmann-verdeling, verkrijgen we de snelheden op tijd t door te interpoleren tussen de huidige verdeling en de evenwichtsverdeling met behouden impuls en dichtheid. Hoe verder we interpoleren, hoe hoger de kinematische viscositeit van de gesimuleerde vloeistof. Zodra we door herhaling van deze stappen een stabiel stromingsveld rond het koraal hebben gevonden, berekenen we de *advection*-diffusie van het voedsel door een 'gekleurd' deeltje toe te voegen, dat we in ieder roosterpunt over de omliggende punten verdelen naar rato van het aantal vloeistofdeeltjes dat in die richting stroomt.

(M)ETEN IS WETEN

Een gebogen oppervlak waarover de poliepen verspreid liggen, stelt het koraalskelet voor. Langdurige berekeningen brengen het voedseltransport rond het koraal in kaart. Elk poliepje neemt zijn voedsel op vanuit een beetje vloeistof dichtbij het koraaloppervlak. Deze afstand is gelijk aan de hoogte

van een echte koraalpoliep. Het koraaloppervlak neemt zelf geen voedsel op. Nadat van elke poliep duidelijk is hoeveel voedsel deze heeft opgenomen, kan het koraal een stukje groeien. Elke poliep duwt zichzelf een eindje omhoog door nieuw kalkskelet af te zetten. Hoe meer bouwstoffen de poliep opneemt, hoe meer skelet hij aanmaakt en hoe verder hij zich omhoog duwt. Zodra de nieuwe positie van alle poliepen bekend is, verbinden we ze met een nieuw koraaloppervlak. Het hele proces kan zo weer opnieuw beginnen voor het volgende groeilaagje. Zo groeiden veelvormige driedimensionale koralen op het scherm.

Figuur 2 laat een voorbeeld zien van de vormen die zo ontstaan. Het zelfzuchtige computerkoraal lijkt sterk op het echte koraal in figuur 1. Het koraal is regelmatig vertakt, de topjes van het koraal vormen een bolvorm en houden een regelmatige afstand tot elkaar aan. Hoewel het model niet kan bewijzen dat koraalpoliepen zelfzuchtig zijn, laat het wel zien dat zelfzuchtige poliepen koralen kunnen vormen. En dit neemt een belangrijk argument uit handen van biologen die de regelmatige vormen van koralen verklaren door het hele koraal als één, strak gereguleerd individu te beschouwen.

Hoe worden de vertakkingen gevormd? Een poliep op een heuveltje van het koraal, hoe klein ook, steekt een beetje uit en kan daarom nét iets meer voedsel opnemen dan zijn minder-gelukkigere burens. De poliep kan dus meer skelet afzetten dan naburige poliepen en hoogt zijn heuveltje verder op. Het proces versterkt zichzelf, zodat de heuveltjes uitgroeien tot takken. Een gelijksoortig mechanisme verklaart het ontstaan van bliksem-schichten, de verplaatsing van aardolie door het inpompen van water en de vorming van vertakkende kristallen.

COMMUNISTISCHE POLIEPEN

Koralen lijken echter beter toegerust te zijn op vertakkende groei dan bliksem-schichten of mineralen. Op bolle stukken van het oppervlak waaieren poliepen een beetje uit. Hierdoor hebben ze

minder last van elkaar, en kunnen ze iets meer voedsel opnemen dan de andere op platte en holle gedeelten. Je zou verwachten dat het waaier-effect minder sterk wordt als de poliepen verder van elkaar staan. De uiteinden van poliepen zijn dan immers al ver van elkaar verwijderd, zodat verder uitwaaieren weinig winst oplevert. Inderdaad vertakken de koralen minder sterk en krijgen ze dikkere takken als de poliepen minder dicht op elkaar staan (figuur 3).

De eigenschappen van de individuele poliepen, zoals de onderlinge afstand waarop ze een dochterpoliep afsplitsen, hebben blijkbaar grote invloed op de vorm van het koraal. Kunnen sociale poliepen, die via verbindende weefselbruggen voedsel met elkaar delen, óók vertakkende kolonies vor-

men? We verspreidden de hoeveelheid opgenomen voedsel over naburige poliepen voordat we een volgende laagje op het koraal aanbrachten. Als de poliepen hun voedsel delen met enkele omliggende poliepen, krijgen ze dikkere takken.

Maar 'communistische' poliepen, die elke poliep een even grote punt van de taart geven, vormen enkel bolvormige kolonies. Nieuwsgierig blijven we ook naar de invloed van de omgeving. Wat doet waterstroming met de poliepen? Hoe verandert lichtval de vorm van het koraal? Voor deze vragen moet ik maar eens inspiratie opdoen door naar een echt koraalrif in de zee te duiken. Maar het antwoord zal toch moeten komen met hulp van driedimensionale computersimulaties.



Figuur 3
Driedimensionale print van een dik vertakt, gesimuleerd koraal waarin de poliepen ver uit elkaar staan. [foto: Ronald van Weeren]