

De wetenschap van systeem aarde en Gaia

Prof. Dr. P. Westbroek

Gaia Science Center, Leiden Institute of Chemistry, Gorlaeus Laboratories, Leiden University
Einsteinweg 55, 2300 RA Leiden, p.westbroek@chem.leidenuniv.nl

Vertaling uit het Engels: Cees de Jong en Irene Groenendijk

De Aarde is uniek: geen enkel object in het zonnestelsel is meer in detail bekend dan de Aarde. Toch is van alle omringende hemellichamen er niet één zo raadselachtig als onze eigen vertrouwde planeet. Het astronomisch perspectief maakt ons bewust dat onze omgeving niet vanzelfsprekend is, maar in hoge mate afwijkend en uniek. Astronaut James Lovell maakte, op weg naar de Maan, de eerste foto's van de Aarde als hemellichaam. "Het was een moment van grote opwindning", zei hij, "toen ik die kleurrijke globe zag, zo groot als de nagel van mijn duim, in de immense zwarte ruimte verlicht door sterren, wist ik dat dit mijn thuis was, meer nog dan de straat waar ik woon, zelfs meer dan mijn eigen vaderland Amerika".

De aarde verschilt van de andere ons bekende planeten op 4 belangrijke punten. In de eerste plaats heeft onze planeet een prominente biosfeer. Het biotische leefgebied omvat niet alleen de troposfeer, de oceanen en het aardoppervlak, maar dringt verscheidene kilometers door in de vaste Aarde, waar temperaturen tot 120°C heersen.

Ten tweede wordt tweederde van het aardoppervlak bedekt door vloeibaar water. Verondersteld wordt dat ook de oppervlakte van Mars periodiek met water was bedekt, maar de aardse oceaan bestaat al gedurende meer dan 3,8 miljard jaar. Verder vermoeden men een oceaan op Europa, een maan van Jupiter. Als deze al bestaat dan is hij bedekt met een permanente ijslaag. Slechts gedurende uitzonderlijk koude perioden, met name in het Laat-Proterozoïcum (zo'n 600 miljoen jaar geleden), schijnen gletsjers de evenaar van de Aarde bereikt te hebben ('sneeuwbal Aarde', Hoffman en Schrag 2000). Het is hoogst onwaarschijnlijk dat het ijs de vloeibare oceaan volledig scheidde van de atmosfeer.

Het derde belangrijke kenmerk van de aarde is het feit dat de planeet zich langzaam binnenste buiten keert. Gesteenten ondergaan een cyclisch proces van vernieuwing en afbraak, bekend als de gesteentecyclus. Op sommige plekken verdwijnt oude oceanische korst weer in de aarde (subductie), waar het gesteente opsmelt. Op andere plekken bereikt gesmolten gesteente (magma) het aardoppervlak en ontstaat nieuwe aardkorst. Er volgt opstuwung, verwerking, erosie, transport en afzetting waarna nieuw gesteente ontstaat. Uiteindelijk kan een hernieuwde cyclus dit gesteente weer doen opsmelten.

Plaattektoniek is het belangrijkste pro-

ces gedurende de laatste 2,7 miljard jaar. Een karakteristiek effect van de gesteentecyclus is de differentiatie van gesteentesoorten, variërend van zware peridotiet uit de mantel, via de minder zware oceanbasalten tot uiteindelijk de relatief lichte continentale korst van dioriet en graniet. De continenten, die kunnen worden beschouwd als drijvend overblijfsel van deze differentiatie, danken hun bestaan aan hun lichtere samenstelling. Zodoende drijven zij als het ware op de onderliggende mantel. Continenten zijn zeer kenmerkend voor de aarde. Recent ontdekte anomalieën op het oppervlak van Mars kunnen worden geïnterpreteerd als tekenen van tektonische activiteit in de vroege geschiedenis van die planeet. Men veronderstelt dat plaatbewegingen op Mars reeds lang geleden tot stilstand zijn gekomen, door het kleinere volume en de daaruit voortkomende snellere afkoeling van die planeet.

Tenslotte wijkt ook de samenstelling van de aardse atmosfeer af. Venus en Mars hebben een geoxideerde atmosfeer die voornamelijk CO₂ bevat. De grote buitenplaneten Jupiter, Saturnus en Uranus daarentegen hebben hun oorspronkelijk gereduceerde atmosferen behouden (waterstof-methaan-ammoniak). De aardatmosfeer is echter een mengsel van geoxideerde en gereduceerde componenten (zuurstof en stikstof), terwijl CO₂ slechts in geringe hoeveelheden aanwezig is. Met name de aanwezigheid van lage concentraties methaan gecombineerd met zuurstof is een aanwijzing dat de lucht die we inademen ver verwijderd is van het thermodynamisch evenwicht. Dit in tegenstelling tot de atmosferen van de andere planeten.

De verdieping van ons inzicht in het unieke karakter van onze planeet

wordt gezien als de belangrijkste uitdaging van de wetenschap en een voorwaarde voor het voortbestaan van toekomstige generaties.

Het Aardse systeem en de Geobiologie

Een groot aantal aanwijzingen suggereert dat de vier belangrijkste sferen aan de buitenkant van de aarde: de biosfeer, de hydrosfeer, de aardkorst en de atmosfeer, niet afzonderlijk zijn ontstaan maar in onderlinge interactie. De aard van deze interacties is een onderwerp van intensief onderzoek dat meestal wordt aangeduid als 'Earth System Science' (Afb. 1). Hierbij wordt de aarde beschouwd als een samenhangend systeem met diverse interactieve componenten. Het systeem is blootgesteld aan kosmische en endogene krachten. De uitwisseling van stoffen met interne en externe domeinen is, gezien over meerdere miljoenen jaren, verwaarloosbaar. Over een tijdschaal van miljarden jaren kunnen deze uitwisselingen echter niet worden genegeerd.

De wetenschappelijke onzekerheden over de werking van onze planeet komen ten dele voort uit het feit dat verscheidene fundamentele systemen in essentie onbekend zijn. Een samenhangende theorie over de biologische organisatie ontbreekt bijvoorbeeld (Kooijman, 2000). Daarnaast zijn we onwetend over de effecten die het leven kan hebben op de endogene activiteit (Anderson, 1984). Verder vraagt de benadering van 'systeem aarde' een zo nauwkeurig mogelijke kwantificering van de verschillende interacties. Niet alleen in de huidige situatie, maar ook, door reconstructie van het geologische verleden.

De belangrijkste hindernis voor de voortgang van het onderzoek moet

worden gezocht in de interdisciplinaire benadering. Het vraagt een grondige culturele verandering in de uitvoering van onderzoek. Door de indrukwekkende wetenschappelijke vooruitgang gedurende de laatste 50 jaar ontstond een gestage voortgang van specialisaties. Elke discipline ontwikkelde zijn eigen jargon, denkbeelden en aannames. Het resultaat is dat de technische discussie tussen wetenschappers uit verschillende velden hoe langer hoe moeilijker werd. Het is gemakkelijk gezegd dat specialisten uit zeer verschillende disciplines moeten samenwerken, maar het blijkt erg moeilijk interdisciplinaire problemen te selecteren. Toch lijkt in wetenschappelijke kringen een groeiend enthousiasme te ontstaan voor een nieuwe geïntegreerde wetenschap van de aarde.

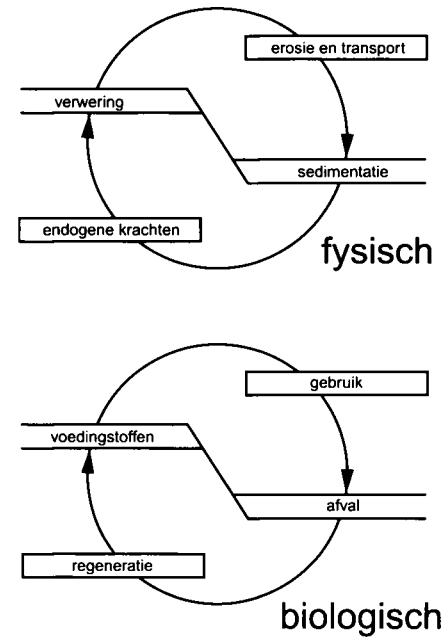
Het begrip en de kwantificering van processen die de biosfeer verbinden met de rest van de wereld (Afb. 1) blijft het meest ongrijpbare aspect van 'systeem aarde'. Tot enkele tientallen jaren geleden werd zowel in de geologie als in de biologie het leven slechts beschouwd als een aanpassing aan de wisselwerking van niet-biologische krachten. Het tegenovergestelde, de invloed van het leven op de dynamiek van de aarde, werd meestal genegeerd. Het voornaamste argument hiervoor was, dat deze invloed in hoge mate variabel was en derhalve over het algemeen moeilijk te kwantificeren. Echter, met toenemend inzicht in de details werd de studie van het leven als geologische kracht onvermijdelijk. Tegenwoordig wordt de wisselwerking tussen de levende wereld en de niet-levende omgeving beschouwd als kernonderwerp in de wetenschap van het 'systeem aarde', beter bekend als Geobiologie (Afb. 1).

Nu volgen enkele voorbeelden van geobiologische interacties. Ik hoop dat u op deze manier een beeld krijgt van de uitdagingen van dit zich volop ontwikkelende werkveld. Als introductie worden eerst enige belangrijke kenmerken van de geschiedenis van "systeem aarde" samengevat.

De geschiedenis van systeem aarde in een dag

De ouderdom van ons zonnestelsel (en dus ook van de aarde) is geschat op 4,57 miljard jaar. Om een idee te krijgen van de verhoudingen in de tijd tussen de belangrijkste geologische gebeurtenissen, is een vergelijking gemaakt met een 24-uurs-dag die loopt van middernacht tot middernacht. Eén uur staat dan tot 190 Ma (miljoen jaar), één minuut is 3 Ma en een seconde 50 duizend jaar.

Op deze tijdschaal zien we het ontstaan van de maan op 20 minuten na middernacht. De accretie (aangroei) van de aarde was om 00.30 uur voltooid. Op dat tijdstip was de afkoeling van het oppervlak en de vorming van de aardkern een feit en de oorspronkelijke 'dichte' atmosfeer was verdwenen. Tot 03.55 uur werd een groot deel van de aardkorst vernietigd door een intens bombardement van meteorieten. Het is onwaarschijnlijk dat leven, indien aanwezig, voor langere tijd kon overleven. Ondanks deze extreme omstandigheden, vinden we fragmenten continentale korst terug vanaf 02.55 uur. Recentelijk zijn er kleine kristallen zirkoon ontdekt in een veel jonger moedergesteente, dat was gedateerd op 01.00 uur (Halliday, 2001). Dit is opmerkelijk, omdat zirkoon ontstaat tijdens de vorming van graniet in aanwezigheid van water. Hieruit kunnen we afleiden dat

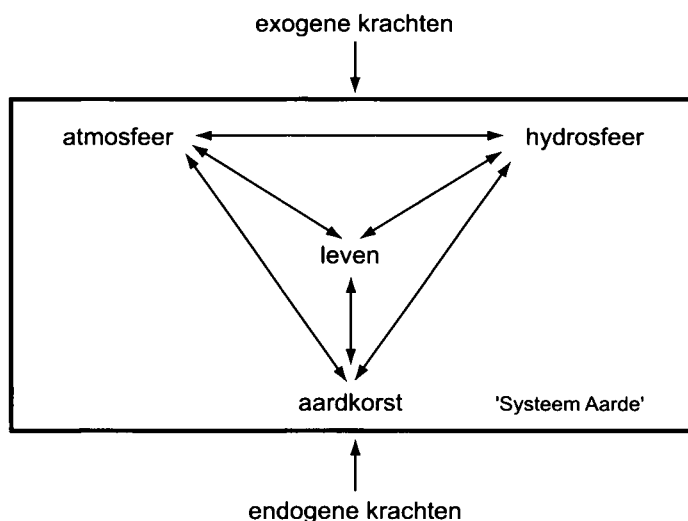


Afb. 2. De gesteentecyclus. A: vanuit een geofysisch, en B: vanuit een geobiologisch oogpunt.

slechts korte tijd na de accretie van de aarde, continenten en mogelijk zelfs oceanen hebben bestaan.

De oudste aanwijzingen van biologische activiteit dateren van 04.00 uur, slechts 5 minuten nadat het bombardement uit de ruimte stopte. De vroegste fossielen, van bacteriële herkomst, zijn gevonden in gesteenten met een leeftijd van zo'n 04.45 uur. De oudste nog herkenbare restanten van plaattektonische activiteit zijn gevormd om 10.00 uur. De aardatmosfeer bleef gereduceerd, met CO₂ en methaan als belangrijkste bestanddelen, tot ongeveer 12.00 uur. Toen begonnen merkbare hoeveelheden zuurstof (tot ongeveer 1% van het huidige niveau) zich op te hopen. Deze gebeurtenis markeert een knelpunt voor de biologische evolutie, omdat zuurstof in principe een agressief gif is. Het tot dusver ontstane anaëroobe leven werd gedwongen zich terug te trekken in een zuurstofloze omgeving, zoals de diepzee en de sedimenten. Alleen die organismen met afdoende effectieve ontgiftingsmechanismen waren in staat om direct contact met de lucht te overleven.

Eukaryote cellen zoals de onze, met organellen (deel van een cel met een specifieke functie) en een kern, deden hun entree rond de klok van 17.00 uur. Dus, gedurende 13 uur bestond het leven uit bacteriën. In het verleden is het belang van bacteriën erg onderschat. Nu weten we dat in feite alle stofwisselingen zich vroeg in de



Afb. 1. Het onderwerp van de 'wetenschap van systeem aarde'

aardgeschiedenis ontwikkelden in de wereld van de bacteriën. Zelfs vandaag de dag worden de biogeochemische cycli sterk aangewakkerd door bacteriën. Eukaryoten, door symbiose voortgekomen uit bacteriën, hebben slechts een klein aandeel in de veelheid van milieus die het leven bevolkt. Meercellig leven verscheen rond 20.00 uur, en het merendeel van de bouwplannen van de bestaande dieren ontwikkelde zich, in een verrassend korte periode van 3 minuten rond 21.10 uur. Vaatplanten koloniseerden de continenten om 21.50 uur. Om 2 minuten voor middernacht ontstond de mens en 3,7 milliseconden voor middernacht vond de industriële revolutie plaats.

Op deze 24-uurs tijdschaal maken de cycli een gedenkwaardige indruk. Zo is de gemiddelde tijdsduur van de gesteentecyclus zo'n 2 uur, en wordt de oceaانبodem elk half uur vernieuwd. Het water in de oceanen wordt elke seconde ververs. In precies 18 seconden zouden de rivieren een hoeveelheid opgelost materiaal leveren, gelijk aan hetgeen al in de oceanen is opgelost. Het duurt 0,2 respectievelijk 140 milliseconden om alle CO₂ en zuurstof in de atmosfeer door de biosfeer te laten stromen. Het is duidelijk dat het ononderbroken leven vanaf 04.00 uur tot vandaag de variaties in het leefmilieu strikt limiteert, in weerwil van de razende dynamiek van het planetaire systeem. Voor de voortgaande reproductie van de condities waaronder het leven kan overleven, moeten niet enkel de lithosfeer, maar ook de andere componenten van het Aardse systeem - hydrosfeer, atmosfeer en biosfeer - in een recyclingschaal zijn geweest gedurende lange tijd.

Globaal bekeken blijkt uit het geologisch verleden dat het 'systeem aarde' zich niet geleidelijk ontwikkelde, maar wordt gekarakteriseerd door een afwisseling van lange statische perio-

den en plotselinge gebeurtenissen en veranderingen waarbij nieuwe mechanismen en levensvormen ontstonden.

Leven en de gesteentecyclus

Het concept van de gesteentecyclus werd voor het eerst geformuleerd door James Hutton aan het eind van de 18e eeuw. Later is dit principe in verband gebracht met de theorie van de plaattektoniek. Het reliëf op aarde wordt veroorzaakt door endogene processen, zoals gebergtevorming, vulkanisme, spreiding en subductie. Deze processen worden aangedreven door de energie van de aarde die ontstaat bij radioactief verval.

Exogene processen, aangedreven door de energie van de zon, vervlakken het reliëf van de aardkorst. Zodra gesteenten aan het aardoppervlak komen, begint de verwerking. Het ontstane puin (grind, zand en klei) en opgeloste materialen worden door gletsjers, rivieren en de wind vervoerd naar de oceanen (erosie en transport). Zij eindigen als sediment dat uiteindelijk de diepzeebodem bedekt. Vandaaruit zorgt de lopende band van de plaattektoniek er voor dat de sedimenten worden getransporteerd via de subductiezones naar de diepe aarde. Via de voortdurende cyclus van gebergtevorming en vulkanisme worden ze uiteindelijk weer teruggebracht naar het aardoppervlak.

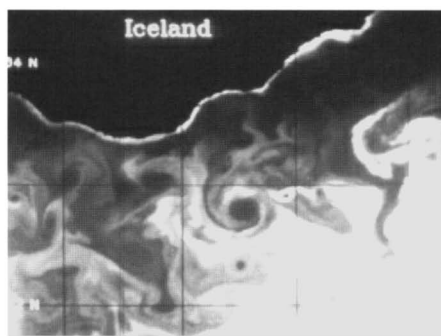
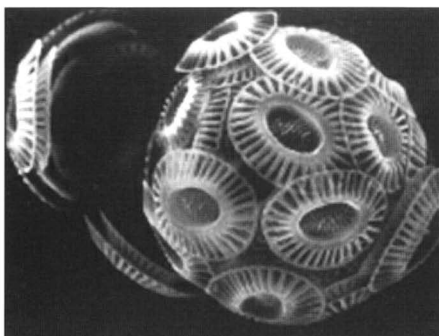
Het leven speelt zich af op het raakvlak met het gesteente, water en lucht, en in het licht van de zon. Hierdoor kan het leven een actieve rol spelen, met name in die processen van de gesteentecyclus die plaatsvinden aan het aardoppervlak: verwerking, erosie, transport en sedimentatie. De aard van deze biologische tussenkomst blijkt vooral uit het contrast tussen de trage beweging van de plaattektoniek en gebergtevorming en de hevige activiteit van het leven zelf. Het leven wordt voorzien van essen-

tiële voedingsstoffen, zoals fosfaat, ijzer, koper en molybdeen, die in minieme concentraties vrijkomen uit de diepe aarde. Door de evolutie van een groot aantal mechanismen, waarmee organismen kunnen profiteren van de gelimiteerde voedingsstoffenvoorraad, kan het leven standhouden.

Door groeiende activiteit van biologische systemen nam de verwerking dramatische vormen aan. Hierdoor kwamen er meer voedingsstoffen (mineralen) vrij. Schimmels, bacteriën en plantenwortels dringen door in kleine barsten in het gesteente. Op deze wijze ontstaan micromilieus waar de mineralen al kunnen worden afgebroken. Vanuit biologisch oogpunt kan verwerking worden vergeleken met mijnbouw: ruwe materialen worden weggenomen uit het gesteente en toegevoegd aan het leven.

De voedingsstoffen worden dan in de cyclus gehouden door een uitgebreide biologische recycling. De verwerde aardlagen (bodems) spelen een belangrijke rol bij dit hergebruik. Ze vormen een essentiële laag voor de vegetatie. Plantenresten worden hier afgebroken door organismen, waardoor de vrijgekomen voedingsstoffen opnieuw vrijkomen voor de planten. Overtollige voedingsstoffen worden uitgewassen of teruggenomen uit de cyclus door middel van opslag in het celmateriaal, door neerslaan of verdampen. Bepaalde voedingsstoffen worden daarentegen gewoonlijk zeer efficiënt gerecycled. De voedingsstromen worden door de leefgemeenschappen zodanig verdeeld, dat de concentraties zijn aangepast aan de lokale behoeften.

Hoewel levende systemen de afbraak van gesteenten in het verwerkingsproces bevorderen, blijven de restanten in de bodem op hun plaats door verschillende mechanismen. Overgroei, wortel- en slijmproductie zijn voorbeelden van stabiliserende factoren. Desalniettemin is het hergebruik van voedingsstoffen nooit oneindig. De biologisch gekatalyseerde cycli zijn nooit waterdicht en op langere termijn worden de voedingsstoffen verdund. Leefgemeenschappen worden ondermijnd en verdwijnen; de bodembedekking wordt weggewassen en verse gesteenten komen aan het oppervlak. Nu kan het proces opnieuw beginnen. Ondertussen kunnen de uitgewassen voedingsstoffen de biologische activiteit stroomafwaarts stimuleren. Door deze voedingsstromen blijft ook het leven in de oceanen gehandhaafd.



Afb. 3. *Emiliana*. Links: een enkele cel (diameter 0,01 millimeter) met coccoliten van kalk. Rechts: de bloei ten zuiden van IJsland, gezien vanuit de ruimte.

Uiteindelijk worden de verbruikte eindproducten van organismen gedumpt op de diepzeebodem en ingesloten in de zich langzaam accumulerende sedimentlagen. Spreiding van de oceanische platen brengt de resten naar een diepzeetrog waar het door subductie verdwijnt. Het sediment wordt blootgesteld aan hoge temperatuur en druk en wordt opgestuwd tot een gebergte. Zo komen de voedingsstoffen beschikbaar als grondstof voor een nieuwe cyclus. De plaattektoniek dient niet enkel als afvoersysteem voor mineralen, ze is ook verantwoordelijk voor het regenereren van verse voedingsstoffen uit de restanten. Het is maar de vraag of het leven zou kunnen bestaan zonder plaattektoniek. Terwijl afbeelding 2a de klassieke fysische interpretatie toont van de gesteentecyclus laat afbeelding 2b hetzelfde proces zien met een biologische blik.

Het gedrag van levende systemen in relatie met gifstoffen is geheel anders. Net als voedingsstoffen komen deze stoffen vrij bij verwerking van gesteenten. Voorts komen gifstoffen voor in lucht en water. Zij kunnen zelfs ontstaan als bijproducten van biologisch gekatalyseerde reacties. Er is een enorme variatie aan mechanismen die giftige materialen actief verwijderen uit biologische systemen. In de celwanden van veel bacteriën kunnen zich bijvoorbeeld zware metalen ophopen, om op die manier weggehouden te worden van het celmechanisme.

Dode of levende organismen, waarin zware metalen opgeslagen zijn, worden opgenomen in het sediment. Hierdoor worden de bovenstaande wateren gezuiverd. In de oceaan worden giftige materialen onttrokken uit de bovenste waterlagen waar plankton floreert. Zowel stikstof en zwavelverbindingen als bijvoorbeeld kwik kunnen verdampen en vrijkomen in de atmosfeer. Zodoende kunnen gifstoffen, in tegenstelling tot de voedingsstoffen, onttrokken worden uit de biologische cyclus, of zelfs worden verwijderd uit de biosfeer. Enkele stoffen kunnen worden omgezet in nuttige en ongevaarlijke materialen, waarna ze worden ingebed in de voedingscycli. Tenslotte eindigen de meeste gifstoffen in het diepzeesediment, samen met de restanten van levende organismen. Na heel lange tijd kunnen ze door de dynamiek van de Aarde terugkomen in de cyclus.

Eén aspect vraagt nadere uitleg. Het interactieproces van het leven met de

gesteentecyclus kost energie. Zonder de straling van de zon zou dit proces spoedig eindigen. Het licht wordt door levende organismen opgevangen en omgezet in chemische energie. Deze energie verspreidt zich door het fijne netwerk van de biosfeer en zet zo de gehele 'machinerie' in werking. Tenslotte verlaat het de ruimte. De biosfeer is een nietige, maar complexe, hoog energetische laag rondom de aarde. De geochemische stromen komen hier samen tot uitgebreide zelforganiserende en zichzelf-herhalende systemen. In het verre verleden zijn ze voortgekomen uit niet biologische geochemische stromen. Dit is leven: een erg bijzonder geochemisch proces. Biochemie is een onderdeel van de geochemie.

Emiliana - demonstratie van biologische kracht

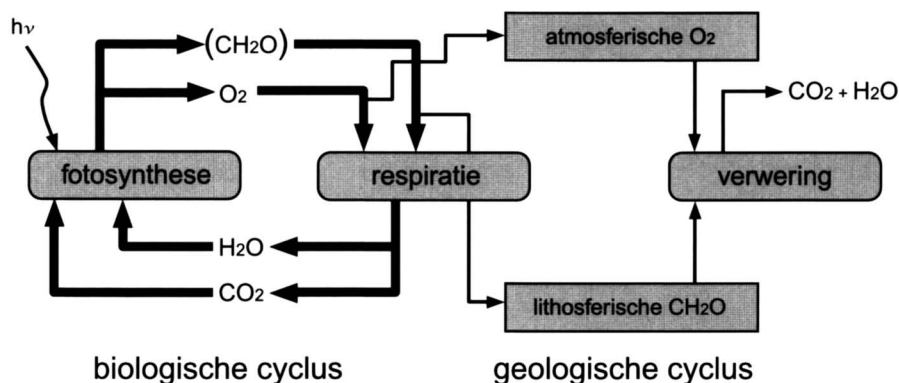
Het voorbeeld van de mariene eencellige alg *Emiliana* is een voorbeeld van het niet-lineaire karakter van de biologische betrokkenheid in de dynamiek van de Aarde. De cel (Afb. 3a), ongeveer een honderdste millimeter in diameter, is omgeven door elegante schalen van calciumcarbonaat, of kalk. Deze schalen, of coccolieten, worden geproduceerd in een speciaal blaasje binnen in de cel. Als de vorming is afgerond, worden de schalen getransporteerd naar het celoppervlak. *Emiliana* komt in astronomische hoeveelheden voor in de oceanen. De cellen kunnen zich elke nacht delen, zolang de levensomstandigheden gunstig zijn. Met name in de late lente in de Noord-Atlantische Oceaan, op gemiddelde breedte, lijkt niets een snelle verspreiding in de weg te staan. Enorme bloei is het resultaat, hetgeen vanuit de ruimte zichtbaar is (Afb. 3b). Deze bloei duurt verscheidene weken, totdat ze eindigt door etende schaaldieren of door virusinfecties. De cel-

len en de coccolieten zinken naar de oceanabodem.

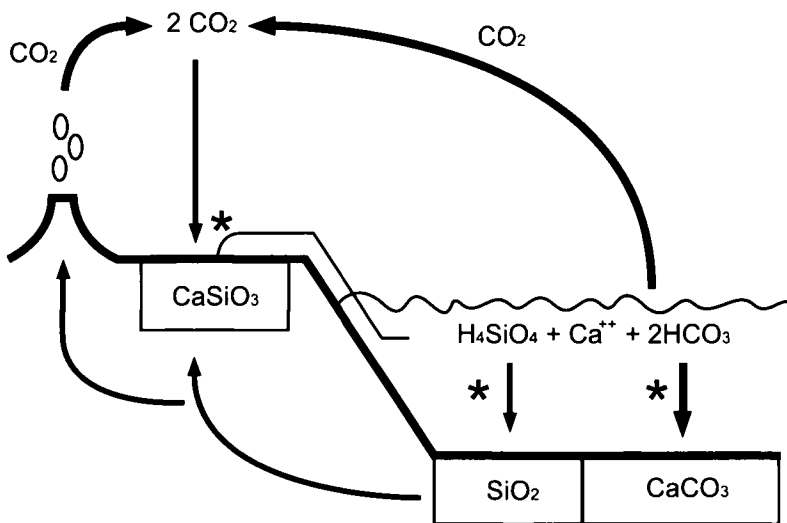
Emiliana is één van de honderden soorten planktonische organismen die calciumcarbonaat produceren en leven in de bovenste laag van de oceanische waterkolom. Gezamenlijk beïnvloeden deze organismen zowel de gesteentecyclus als het wereldklimaat. Door de afvoer van calciumcarbonaat en organisch materiaal naar de oceanabodem verdwijnt koolstof uit de atmosfeer. Dit proces beïnvloedt de concentratie van kooldioxide, het broeikasgas. Bovendien komt bij de bloei een zwavelhoudend gas (DMS) in de atmosfeer. Hoger in de atmosfeer wordt dit gas geoxideerd tot zwavelzuurdruppels. Deze bevorderen de vorming van witte wolken. Omdat deze wolken zonnestralen terugkaatsen, hebben ze een afkoelend effect. Daarnaast veroorzaken ze de neerslag van natuurlijke zure regen.

De neerdwarrelende kalk en de organische koolstof vormen dikke lagen op de oceanabodem, die gedurende miljoenen jaren ophopen. Zulke lagen zijn lokaal zichtbaar in de kalkkliffen bij Dover. Deze sedimenten vormen een geologisch archief, dat wordt gebruikt om de lange historie van dit systeem te reconstrueren.

Coccolieten evolueerden ongeveer 200 miljoen jaar geleden. Het ontstaan ervan was afhankelijk van de 'uitvinding' van een minieme vacuole (blaasje) in de cel. De sedimentatie van calciumcarbonaat kon plaatsvinden in een veel groter gebied van de randen van de oceanen (koraalriffen) tot op de oceanabodem. Uit onderzoek blijkt dat deze geologische gebeurtenis grote gevolgen voor het klimaat had. Enorme hoeveelheden calciumcarbonaat kwamen via sub-



Afb. 4. Productie en accumulatie van atmosferische zuurstof door de koppeling van organische koolstof in de biologische en geologische cycli. De biologische cyclus heeft een snelle recycling en kleine wereldwijde reservoirs, en de geologische cyclus een langzame recycling en enorme reservoirs.



Afb. 5. De calcium silicium-carbonaat cyclus als een wereldwijde thermostaat. Om 1 mol calcium silicaat (CaSiO_3) te verwerken is 2 mol atmosferisch CO_2 (en water - niet afgebeeld) nodig. De opgeloste verweringsproducten (ionen van silicium zuur (H_4SiO_4), calcium (Ca^{++}) en bicarbonaat (HCO_3^-)) stromen via rivieren naar de oceaan. Deze stoffen worden uit het oceaanoanwater verwijderd door de neerslag van silicium (SiO_2) en kalksteen of kalk (CaCO_3). Bij de vorming van kalksteen, komt 1 mol CO_2 terug in de atmosfeer. Subductie van sediment in diepzeetroggen wordt gevolgd door regeneratie van calcium silicaat en het vrijkomen van 1 mol CO_2 bij vulkanische activiteit.

Een toename van subductie snelheid leidt tot een toenemende concentratie van CO_2 in de atmosfeer en tot het warmer worden van het klimaat. Bij hogere temperaturen neemt de verwerkingssnelheid toe. Hierdoor wordt CO_2 sneller afgevoerd uit de atmosfeer. Dit leidt tot verlaging van de temperatuur. Dit systeem gedraagt zich als een wereldwijde thermostaat over perioden langer dan 1000 jaar. * geven biologisch versterkte processen aan.

ductie van de oceaانبodem in de diepere aarde terecht. Deze aardplaten smolten gedeeltelijk op, waarna het ontstane magma via vulkanen weer het aardoppervlak bereikte. Dit leidde tot aanzienlijke toename van CO_2 -uitstoot in de atmosfeer als gevolg van dit vulkanisme. Zonder die kleine vacuolen zouden we nu vastgevroren zitten in een verschrikkelijke ijstijd.

Onderzoek naar het fenomeen *Emiliana* is een goed voorbeeld van interdisciplinaire wetenschap. Meer dan honderd wetenschappers nemen deel aan dit onderzoek. Onder hen zijn genetici, fysiologen, ecologen, oceanografen, klimatologen, geologen en modellers. De onderliggende gedachte is dat het begrip en de kwantificering van dit fenomeen model kan staan voor het onderzoek van geobiologische interacties in het algemeen.

Zuurstof

Een goed voorbeeld van interactie tussen biologische en geologische processen is de vraag, hoe de oorspronkelijk reducerende atmosfeer ongeveer 2,2 miljard jaar geleden kon veranderen in de huidige geoxideerde atmosfeer. Afbeelding 4 toont het onderliggende mechanisme. Vrije zuurstof is een bijproduct van de fotosynthese. Bij dit proces zetten bepaalde

micro-organismen, algen en planten zonnestraling om in chemische energie, waarvan al het andere leven afhankelijk is. Het relatief inerte kooldioxide en water zijn omgezet in een reactief mengsel - organisch materiaal (CH_2O) en zuurstof. Respiratie processen keren de reactie om zodat kooldioxide en water opnieuw worden gevormd. Dit moet begonnen zijn, kort na het ontstaan van het leven. De cyclus is niet helemaal gesloten, omdat een kleine hoeveelheid (ongeveer een duizendste) van de in de biologische cyclus geproduceerde organische koolstof wordt ingesloten in de zich ophopende sedimentlagen. Het blijft daar gedurende een zeer lange tijd (de gemiddelde tijd is in de orde van 300 miljoen jaar), totdat het vrijkomt door tektonische krachten op het continentale oppervlak. Door verwerking reageert het met zuurstof en wordt het weer omgezet in CO_2 en water.

Op deze manier kon een gigantisch reservoir van organisch materiaal worden gevormd in de aardkorst, ongeveer 15.000 maal de op dit moment levende biomassa. Voor elke molecuul organisch koolstof dat op deze wijze uit de biologische circulatie is teruggenomen, is een molecuul zuurstof vrijgemaakt. Oorspronkelijk kon het gas niet in de atmosfeer worden

opgenomen. Het reageerde onmiddellijk met gereduceerde ijzer en zwavel, geleverd door de gesteentecyclus. Het resultaat waren enorme reservoirs van geoxideerd ijzer en sulfaat (roest en gips). Deze zijn opgeslagen in de aardkorst samen met organisch koolstof. Zodoende was de geochemische tendens, waarbij ijzer en zwavel werden omgezet van de gereduceerde naar geoxideerde vorm, karakteristiek voor de vroege ontwikkeling van de aarde. Uiteindelijk ontstond een stabiele situatie toen de oxidatie en reductie snelheden in balans kwamen. Het was op dit punt, dat zuurstof zich vrijelijk kon ophopen in de atmosfeer.

Zodoende werkt de biologische cyclus als producent en de geologische cyclus als verzamelaar van atmosferische zuurstof (Afb. 4). Gedurende de geologische tijd heeft de aarde, als resultaat van deze wisselwerking, een enorme hoeveelheid fossiele energie opgeslagen. Onze planeet is een chemische batterij met de geoxideerde pool aan de buitenkant en de gereduceerde pool aan de binnenkant van de planeet.

Het is duidelijk dat biologie en geologie afzonderlijk nooit het ontstaan van de zuurstofatmosfeer kunnen verklaren. Recent onderzoek, dat zich toelegt op kleinere details van deze cruciale tendens in de aardgeschiedenis, vraagt een hechte samenwerking tussen specialisten in deze beide werkvelden. Dit onderzoek richt zich nu op de oorsprong en de evolutie van fotosynthese en respiratie. En op de doeltreffendheid van deze processen, omdat ze afhankelijk zijn van de beschikbaarheid van voedingsstoffen in de oceanen. Minstens zo belangrijk is de rol van tektonische processen waarbij de ruimte wordt gecreëerd voor sedimentaccumulatie. Nu blijkt dat het huidige zuurstofniveau van 21% van de totale atmosfeer pas bereikt is in het Laat-Paleozoïcum, minder dan 400 miljoen jaar geleden. Hierbij schijnt de verovering van het land door vaatplanten een doorslaggevende rol te hebben gespeeld.

Vermeld moet worden dat de oorspronkelijke oxidatie van de atmosfeer niet volledig verklaard kan worden door het scenario van afbeelding 4. De figuur verklaart de recycling van het organisch reservoir in de geologische cyclus, maar voorziet niet in een mechanisme waarmee dit reservoir voldoende kan toenemen voor ophoping van vrije zuurstof. Catling e.a. (2001), en Kasting (2001) introduceren

een nieuwe hypothese, die volgens hen werkt naast de recycling van organisch materiaal. Als bewijs suggereren zij dat een overvloed van methaan, vrijgekomen door biologische systemen in de oorspronkelijke zuurstofloze atmosfeer, hoog in de atmosfeer uit elkaar valt onder invloed van de zonnestraling. Moleculaire waterstof dat tijdens dit proces vrijkwam zou massaal naar de ruimte zijn ontsnapt. De buitenkant van de aarde kwam hierdoor in een toenemende geoxideerde staat. Toen zuurstof eenmaal in de atmosfeer kon blijven, werd het methaan geoxideerd, zodat de vlucht van waterstof naar de ruimte werd gesmoord. Deze hypothese versterkt nadrukkelijk het argument dat de evolutie van atmosferische zuurstof alleen kan worden begrepen door multidisciplinair onderzoek. Hierbij moeten zowel biologie (de productie van methaan) als de fysische wetenschap van de aarde (afbraak van methaan en vrijmaking van waterstof) betrokken zijn.

Wereldwijde regulatie en Gaia

De bovenstaande voorbeelden illustreren het belang van het leven als drijvende kracht in de dynamiek van de aarde. Toch zou het merendeel van de geologische krachten, die door biologische systemen zijn beïnvloed, ook werken zonder de aanwezigheid van leven. Alleen in combinatie met fysische en chemische processen kan de immense invloed van leven ophopen gedurende de geologische tijd. Het idee van wereldwijde regulatie brengt het argument een stap verder.

Lovelock (1979, 1988, 2000) wees op het feit dat het leven zonder onderbreking kon voortgaan van 3,8 miljard jaar geleden tot op de dag van vandaag. Dit ondanks een toename van zonnestraling met 25% en grote catastrofale gebeurtenissen, zoals meteorietinslagen die van tijd tot tijd het aardoppervlak verwoestten. Lovelock verklaarde dit door de aarde voor te stellen als een georganiseerde eenheid. Wereldwijde regulatiemechanismen, voortkomend uit de vele interacties tussen het leven en haar omgeving, handhaven automatisch gunstige voorwaarden voor het voortbestaan van het leven. Vooruitzien of planning is niet nodig. Er is geen 'deus ex machina' noodzakelijk. Het systeem, dat Gaia heet, handhaaft zichzelf als de vlam van een kaars. Lovelock vergeleek de aarde met een superorganisme, dat een interne zelfregulatie handhaaft, precies zoals wij de bloeddruk of de temperatuur in onze licha-

men handhaven.

De 'Gaia hypothese' is verworpen op grond van het feit dat hij niet kan worden weerlegd (Kirschner, 1991). Gaia zou waar zijn, ongeacht de feiten. Verder is de analogie met een superorganisme niet perfect, omdat de aarde niet reproduceert en evolutie door natuurlijke selectie ontbreekt door afwezigheid van concurrenten. Daarbij komt dat de geologische geschiedenis aantoont dat de aarde niet geheel zelfregulerend is, omdat het systeem grote veranderingen heeft ondergaan tijdens haar bestaan.

Ondanks deze kritiek kan de indrukwekkende invloed van de Gaia hypothese op de wetenschap van systeem aarde niet worden genegeerd. Ten eerste gaf het Gaia-idee een nieuwe impuls aan de systeembenadering, die reeds werd verkend door Vernadsky, en meer recent door Robert Garrels, Heinrich Holland en vele anderen. Ten tweede zette Gaia het idee van wereldwijde regulatie in de schijnwerpers. Sinds Gaia is geïntroduceerd, zijn er verscheidene wereldwijd opererende terugkoppelingsmechanismen voorgesteld, zowel positief als negatief. Voorbeelden zijn de calcium - silicium - carbonaat cyclus, zoals afgebeeld in afbeelding 5 en gemodelleerd door Berner (1994) (zie ook Lovelock en Kump, 1994 en Westbroek 2000), en een voorgesteld mechanisme voor regulatie van atmosferische zuurstof (Watson en Lenton).

Ondanks deze eerste ontwikkelingen is ons begrip van wereldwijde regulatie nog zeer onvolledig. Enkele terugkoppelingen zijn in detail bestudeerd en vele worden waarschijnlijk ontdekt in de toekomst. Belangrijk is dat Gaia de werking van het gehele aardse systeem omvat, zoals het blijkt uit alle co-evolutionaire interacties en terugkoppelingen samen. Een compleet begrip van Gaia is duidelijk nog buiten bereik. Desalniettemin vind ik dat de term Gaia de voorkeur verdient boven de meer algemene term 'wetenschap van systeem aarde'. De laatste term is weinig stimulerend voor biologen om samen te werken met geologen. Bovendien herinnert 'Gaia' ons aan onze grote onwetendheid van de dynamiek van de aarde en haar geschiedenis. En tot slot trekt de naam van de oude Griekse godin de aandacht van het brede publiek en helpt ons om wereldwijd respect op te brengen voor de planeet die wij bevolken.

Literatuur

- Anderson, D.L., 1984. The Earth as a planet: paradigms and paradoxes. *Science* 223: 347-354.
- Berner, R.A., 1994. Geocarb-II - A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *Amer. J. Sci.* 294: (1) 56-91
- Catling, D.C., Zahnle, K.J., McKay, P., 2001. Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early earth. *Science* 293, 839-843
- Halliday, A.N. 2001. In the beginning... *Nature* 409: 144-145.
- Hoffman, P.F. and Schrag, D.P., 2000. Snowball Earth. *Scient. Amer.* 282, 68-75.
- Kasting, J.F., 2001. The rise of atmospheric oxygen. *Science* 293: 819-820
- Kirschner, J.W., 1991. The Gaia hypotheses: are they testable? Are they useful? In: *Scientists on Gaia*, S.H. Schneider and P.J. Boston, eds. MIT Press, 38-46.
- Kooijman, S.A.L.M. 2000. Dynamic energy and mass budgets in biological systems. Cambridge Univ. Pr, Cambridge.
- Lovelock, J.E., 1979. Gaia: a new look at life on Earth. Oxford Univ. Press.
- Lovelock, J.E., 1988. The ages of Gaia. A biography of our living Earth. Norton, New York, London. xx + 252 pp.
- Lovelock, J.E. and Kump, L.R., 1994. Failure of climate regulation in a geophysiological model. *Nature* 369: 732-734.
- Lovelock, J.E., 2000. *Homage to Gaia*. Oxford Univ. Press
- Watson, A, and T. Lenton, 2000. *Global Biogeochemical Cycles*.
- Westbroek, P. 2000. Let's reclaim Gaia for science. *Palaeontologia electr.* 3(1). ISSN 1094-8074.