

Inhoud:

Het Geosfeer-Biosfeer Systeem	65	De systematiek van mineralen IV: Oxiden en Hydroxiden	84
Paramoudra's in de Peloponnesos	70	Opaal nader bekeken II	87
Geologie voor iedereen: Mineralen verzamelen, hoe doe je dat? II	73	Het Ei van Columbus, tips van en voor amateurs	90
Brachiopoden I	75	Boekbesprekingen	naast pag. 92

Het Geosfeer-Biosfeer Systeem: wordt de Aarde door het Leven bepaald?

door Prof. Dr. Harry N.A. Priem
NWO en Instituut voor Aardwetenschappen
Rijksuniversiteit Utrecht

Rather, what should be said is that wholeness is what is real, and that fragmentation is the response of this whole to man's action, guided by illusory perception, which is shaped by fragmentary thought.

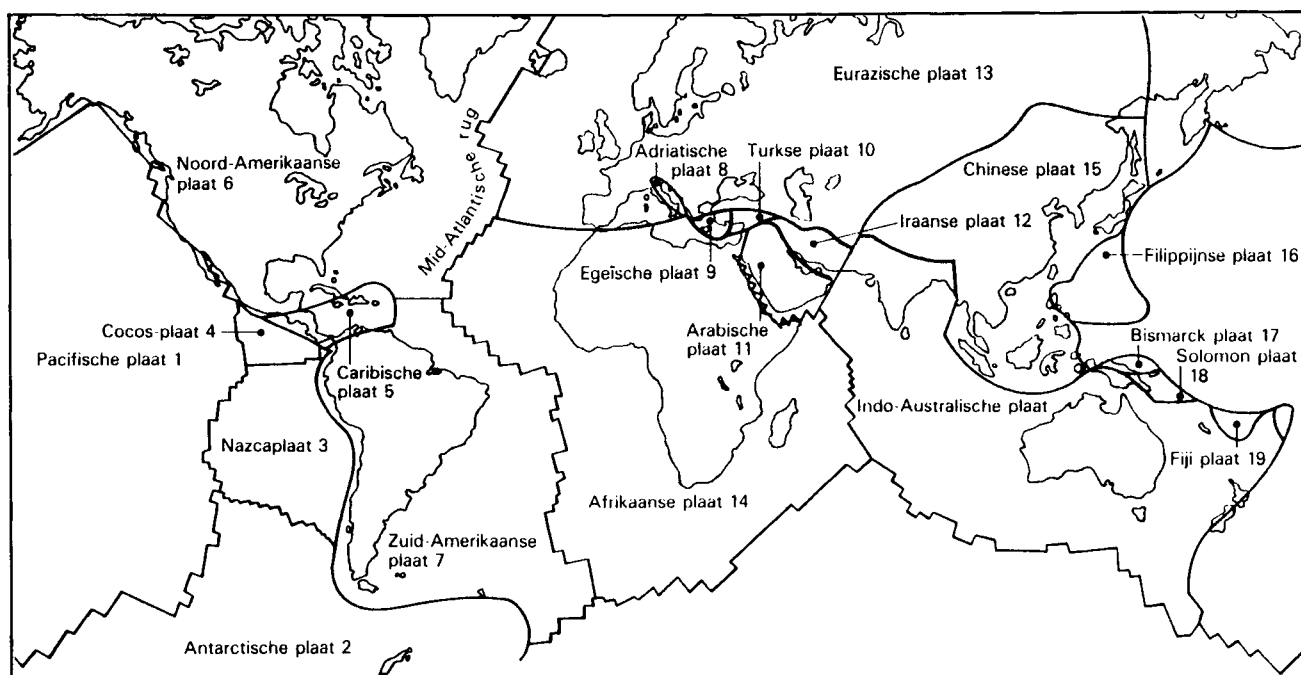
David Bohm : "Wholeness and the implicate order", 1981

Het Systeem Aarde

De wetenschap van de planeet Aarde heeft zich, evenals alle natuurwetenschappen, de laatste eeuwen ontwikkeld naar steeds verder gaande fragmentarisering. Er ontstonden scherp afgebakende vakgebieden, die elk een onderdeel van onze planeet en haar ontwikkeling bestuderen: de atmosfeer, de oceanen, de biosfeer (het totaal van biologische processen op Aarde), de biologische evolutie, de vaste Aarde, de gesteenten en mineralen, etc. De grenzen tussen de onderscheiden vakgebieden worden angstvallig bewaakt door de respectievelijke beoefenaars ervan. De kennis op al deze deelgebieden kon zo enorm toenemen, maar het besef dat zij alle deel uitmaken van één "organische eenheid", de Aarde, raakte op de achtergrond. De laatste jaren wint echter ook in de aardwetenschappen het inzicht weer veld dat alles met alles samenhangt en dat alles invloed heeft op alles. Zo kwam er in de zestiger jaren het concept van de platentektoniek, volgens welke de lithosfeer (de starre, relatief koude buitenste 100-150 km van de Aarde) verdeeld is in een aantal "platen" of "schollen" die ten opzichte van elkaar bewegen als gevolg van langzame stromingen in de diepere delen van de Aarde (afb. 1). In dit concept worden allerlei aspecten van de Aarde en haar ontwikkelingsgeschiedenis met elkaar in verband gebracht, waarvan voorheen de samenhang niet of onvolledig werd onderkend: verplaatsing van continenten over de aardbol, ontstaan en verdwijnen van oceanen, vulkanisme, aardbevingen, ontstaan van

gebergtektoniek, sommige facetten van de biologische evolutie, ontstaan van aardolie- en ertsafzettingen, etc. Naast de platentektoniek is er de laatste jaren een nieuw concept ontstaan, waarbij allerlei aspecten van de buitenkant van de Aarde - oceanen, atmosfeer, biosfeer, aardkost (de dunne oppervlakte van de Aarde) en hun interacties - worden benaderd als één geïntegreerd systeem, het *geosfeer-biosfeer systeem*. Dit concept vormt het thema van een internationaal onderzoeksprogramma dat onder auspiciën van de International Council of Scientific Unions (ICSU) van 1990 tot 2000 zal gaan lopen. De ondertitel van dit "International Geosphere Biosphere Programme" luidt "A Study of Global Change": het uiteindelijke doel van het programma is om via de kennis van ontwikkeling en functionering van het geosfeer-biosfeer systeem beter inzicht te krijgen in de toekomstige consequenties van grootschalige veranderingen in het aardse milieu als gevolg van menselijke activiteiten.

Het geosfeer-biosfeer systeem maakt de Aarde tot een anomalie in een zonnestelsel, dat voor het overige waarschijnlijk geen bijzondere indruk zou maken op imaginaire onderzoekers afkomstig van een ander deel van de Melkweg. De zon is immers een gewone ster - op hun kosmische exploratieris moeten buitenaardse reizigers talloze van dergelijke sterren, omringd door planeten, zijn tegengekomen. De Aarde zou echter reeds van verre de aandacht trekken door twee eigenschappen, die nergens anders in ons zonnestelsel worden aangetroffen en misschien ook elders in



Afb. 1 . De lithosfeer van de Aarde is verdeeld in een mozaïek van een twintigtal platen.

het heelal niet of zelden: de absurde samenstelling van de atmosfeer, en de geprononceerde tweedeling van het aardoppervlak.

De Absurde Atmosfeer

De aardatmosfeer bestaat uit een mengsel van gassen dat op het eerste gezicht lijkt te spotten met de wetten van chemisch evenwicht. Zo kan, zuiver chemisch bezien, vrije zuurstof (O_2) eigenlijk geen hoofdbestanddeel zijn (21%) naast een aardoppervlak dat een overvloed aan oxydeerbare materialen bevat en makkelijk in staat is alle zuurstof in de atmosfeer te binden. Naast dit hoge O_2 -gehalte zijn de geringe concentraties (10^{-7} - $10^{-6}\%$) van reactieve gassen als methaan (CH_4), ammoniak (NH_3), distikstofoxide (lachgas, N_2O) en waterstof (H_2) miljarden malen hoger dan in een evenwichtssituatie het geval kan zijn (Tabel 1). Dit is een natuurlijk fenomeen en niet het gevolg van menselijke activiteiten. Zelfs de concentratie stikstof (N_2 , 78%) is veel te hoog: de eigenlijke stabiele vorm van stikstof is niet het gas, maar zijn nitraationen (NO_3^-) die in het oceaanwater zijn opgelost.

Dat dit bizarre gasmengsel toch blijft bestaan is het gevolg van het feit dat de aardatmosfeer géén op zichzelf staand fenomeen is, maar een integrerend deel van een complex systeem waarvan ook de biosfeer, de oceanen en de continenten deel uitmaken. In dit systeem is het de fotosynthese van planten onder invloed van zonne-energie die het hoge O_2 -gehalte in de atmosfeer in stand houdt. Andere processen in de biosfeer, tezamen met vulkanische activiteiten, zijn verantwoordelijk voor de hoge concentraties stikstof en reactieve gassen.

Het huidige plantendek op Aarde is in staat om in 2 à 3 duizend jaar de totale hoeveelheid O_2 in de atmosfeer te produceren. Deze hoge concentratie van wat in feite het afvalproduct is van biologische processen en in de aardatmosfeer oorspronkelijk niet thuis hoorde, representeert dus eigenlijk een geval van milieuverontreiniging op gigantische schaal. Dit geldt ook voor de veel te hoge concentraties stikstof en reactieve gassen. Zelfregulerende processen binnen het geosfeer-biosfeer systeem zorgen ervoor dat de concentraties van deze gassen ongeveer op hetzelfde niveau blijven. Zo representeert het O_2 -gehalte een evenwichtstoestand

tussen enerzijds fotosynthetische produktie, en anderzijds continue verwijdering door oxydatie van gesteenten aan het landoppervlak en ademhaling in de biosfeer. Analoge toestanden van stationair evenwicht bestaan ten aanzien van de samenstelling van het oceaanwater (zoutgehalte, concentraties metalen) en de lage concentratie kooldioxide (CO_2) in de atmosfeer. Wat het laatste betreft: het CO_2 -gehalte in de atmosfeer vertoont op geologisch korte termijn aanzienlijke schommelingen. Zo leert onderzoek van luchtbelletjes in boorkernen in de ijskappen van de Noord- en Zuidpoolgebieden dat het gehalte 15.000 jaar geleden, tijdens de laatste IJstijd, slechts 2/3 was van dat van een eeuw geleden (0,027%). De laatste 100 jaar is het CO_2 -gehalte aanzienlijk gestegen (tot 0,035%) als gevolg van de grootschalige verbranding van fossiele brandstoffen. De bufferwerking van het als bicarbonaat in de oceanen opgeslagen CO_2 (vijftigmaal zoveel als in de atmosfeer) maakt echter dat na enkele honderden jaren aan deze stijging een eind moet komen. Op langere termijn wordt het CO_2 -gehalte in de atmosfeer bovendien gebufferd door de enorme hoeveelheden kalksteen in sedimentaire formaties (waarin honderdduizendmaal zoveel CO_2 is vastgelegd als zich in de atmosfeer bevindt) die door biologische processen uit oceaanwater zijn geprecipiteerd en als gevolg van geologische processen voor een belangrijk deel in de continentale massa's zijn opgenomen.

Alleen geologisch zeer bijzondere processen zijn in staat de toestand van stationair evenwicht in het geosfeer-biosfeer systeem te verstoren. Tot dergelijke processen behoren, bijvoorbeeld, de inslag op Aarde van een mega-meteoriet of komeet, zoals o.a. 65 miljoen jaar geleden aan het eind van het Krijt heeft plaatsgevonden, met o.a. ingrijpende gevolgen voor de biosfeer. Ook vulkanische erupties van enorme omvang zouden het evenwicht kunnen verstoren, misschien de uitstoot van steeds meer industrieel afval, en een oorlog met massale inzet van kernwapens. Na een dergelijke "catastrofale" verstoring herstelt de toestand van stationair evenwicht in het geosfeer-biosfeer systeem zich, geologisch bezien, weer snel - binnen enkele duizenden of honderdduizenden jaren.

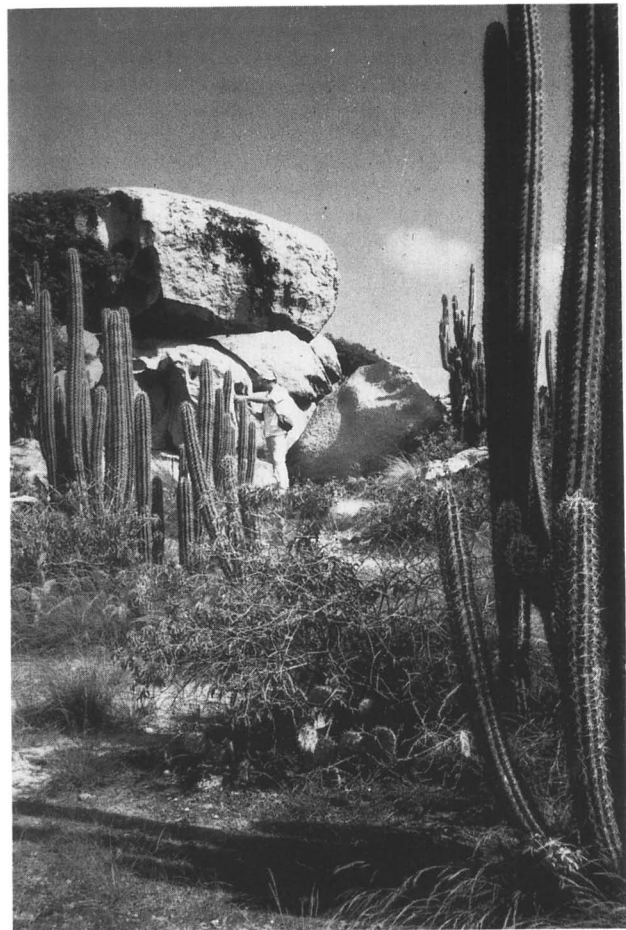
De Raadselachtige Continenten

De andere opvallende eigenschap die het aangezicht van de Aarde bepaalt, is de tweedeling van het aardoppervlak in topografisch hooggelegen en laaggelegen gebieden, met een gemiddeld hoogteverschil van 3900 meter. Deze tweedeling reflecteert een fundamenteel verschil in chemische samenstelling (afb. 2). De

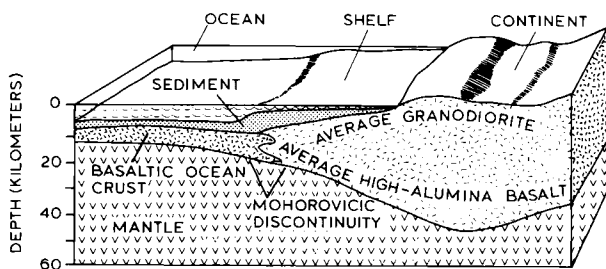
aardkorst in de laaggelegen gebieden, de vloer van de oceanen (60% van het aardoppervlak), bestaat uit *basalt*, een donker, relatief zwaar gesteente bestaande uit mineralen als calciumrijke plagioklaas (labradoriet), augiet en ijzeroxiden, soms ook olivijn. In de hooggelegen gebieden, de continenten, wordt de aardkorst gekenmerkt door een grote verscheidenheid van gesteenten, met als gemiddelde samenstelling die van het zowel in kleur als gewicht lichtere gesteente *dioriet* (afb. 3), bestaande uit mineralen als natrium-calcium-plagioklaas (andesien), hoornblende, enige kwarts en soms augiet. Het vulkanische equivalent van het dieptegesteente dioriet is *andesiet*. Chemisch verschilt dioriet (andesiet) van basalt door hogere gehalten silicium, kalium en natrium, en lagere gehalten ijzer, magnesium en calcium (zie onderschrift afb. 2). Als gevolg van het verschil in soortelijk gewicht, 3,0 voor basalt en 2,8 voor dioriet, is de continentale korst dikker (gemiddelde dikte 40 km) dan de oceanische korst (dikte 6 km), waardoor het isostatisch evenwicht van de aardkorst ten opzichte van de daaronder liggende aardmassa wordt gehandhaafd (vergelijk een ijsberg die in water drijft). Dit streven naar isostasie en het verschil in soortelijk gewicht liggen ten grondslag aan het hoogteverschil tussen continenten en oceaانبodem.

De continenten vormen een belangrijke schakel in het geheel van factoren dat het geosfeer-biosfeer systeem reguleert. Het plantendek van het landoppervlak zorgt voor een belangrijk deel van de fotosynthetische zuurproductie. Anderzijds wordt biogeen geproduceerde zuurstof continu gebonden bij verweering en andere reacties aan het oppervlak, waarbij geologische processen ervoor zorgen dat voortdurend nieuwe oxydeerbare materialen worden blootgelegd. Ook vormen de boven zeeniveau gelegen landmassa's het platform waarop een belangrijk deel van de biologische evolutie zich heeft afgespeeld - zonder continenten zou het verschijnsel Leven beperkt zijn gebleven tot mariene milieus en misschien vulkanische eilandjes.

Continentale korst lijkt een unieke eigenschap te zijn van de planeet Aarde. Alle waarnemingen wijzen erop, dat continentale



Afb. 3. Kwarts-dioriet (tonaliet) van Aruba, Nederlandse Antillen, een voorbeeld van nieuwvorming van continentale korst 88,5, ongeveer 0,8 miljoen jaar geleden (Boven-Krijt).



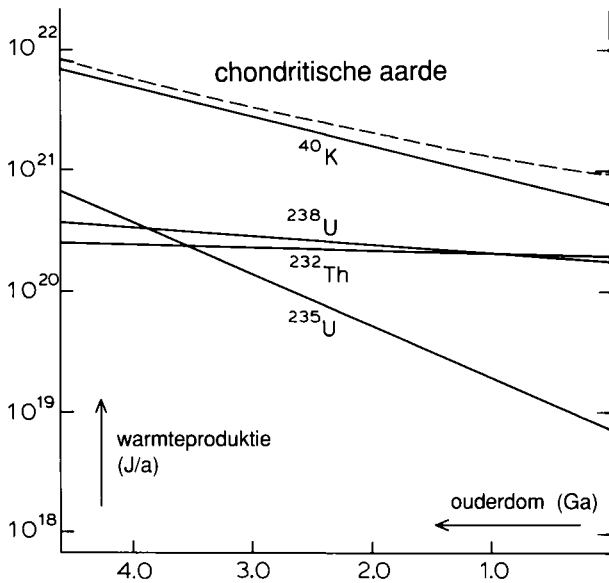
Afb. 2. Schematische doorsnede door de aardkorst. De oceanische korst bestaat uit basalt (soortelijk gewicht 3,0) en is 6 km dik. De continentale korst heeft de gemiddelde samenstelling van dioriet (soortelijk gewicht 2,8) en is gemiddeld 40 km dik. Er is een verschil in de gemiddelde samenstelling tussen het bovenste en het onderste deel van de continentale korst: respectievelijk granodioriet en aluminiumrijke basalt. De Mohorovičić discontinuïteit representeert de overgang van de aardkorst naar de aardmantel. De chemische samenstelling van de oceanische en de continentale korst is (in gewicht-%):

	oceanische korst (basalt)	continentale korst (gemiddeld "dioriet")
SiO ₂	49.5	57.3
TiO ₂	1.5	0.9
Al ₂ O ₃	16.0	15.9
FeO	10.5	9.1
MgO	7.7	5.3
CaO	11.3	11.3
Na ₂ O	2.8	3.1
K ₂ O	0.15	1.1

korst met een samenstelling vergelijkbaar met die van de Aarde nergens anders in ons zonnestelsel voorkomt. Basalt daarentegen lijkt wijd verbreid te zijn op alle planeten en planetaire objecten. Op Aarde ontstaat basalt door de gedeeltelijke opsmelting bij temperaturen van ongeveer 1500°C van delen van de aardmantel (de aardmassa tot een diepte van 2900 km, in hoofdzaak bestaande uit ijzer-magnesiumsilikaat), waarna de zo ontstane basaltische smelt (magma) naar boven stijgt. Analoge processen spelen (of speelden) zich op andere planeten en planetaire objecten af. Over de processen die leiden tot de vorming van de continentale korst bestaat minder duidelijkheid. Waarom is continentale korst, met gemiddeld dioritische samenstelling, alleen op onze planeet aanwezig?

"De wateren stonden boven de bergen" (Psalm 104)

Continentvorming is, in tegenstelling tot de vorming van de oceanische korst, uniek voor onze planeet, dus moeten factoren een rol spelen die alleen op Aarde voorkomen. Een waarschijnlijk model is, dat continenten hun ontstaan danken aan twee categorieën van geologische processen. Enerzijds die van het geosfeer-biosfeer systeem, met als aandrijvende kracht de ingevangen zonne-energie: 3,4 · 10²⁴ joule/jaar (ter vergelijking: het totale energieverbruik van de mensheid bedraagt in de orde van 3,0 · 10²⁰ joule/jaar). Anderzijds de processen van de platen-tektoniek, die zich voltrekken als gevolg van langzame stromingen in de aardmantel en die hun energie onttelen aan de eigen warmteproductie van onze planeet door het radioactief verval van uranium, thorium en kalium. Deze "radioactieve warmteproductie" van de



Afb. 4. De kouder wordende Aarde. Aangenomen is dat de gemiddelde samenstelling van de Aarde overeenkomt met die van chondritische meteorieten, waarin de concentraties van de warmteproducerende radioactieve isotopen zijn: 0,01 ppm (microgram/gram) uranium-238, $7 \cdot 10^5$ ppm uranium-235, 0,04 ppm thorium-232 en 0,1 ppm kalium-40. De getrokken lijnen representeren de afname van de totale warmteproductie (in joule/jaar) in de Aarde voor elk van deze isotopen. De onderbroken lijn representeert op elk tijdstip van de aardgeschiedenis de totale radioactieve warmteproductie van de Aarde.

Aarde bedraagt thans ongeveer 10^{21} joule/jaar, maar was in het verleden veel hoger als gevolg van de geleidelijke afname van de hoeveelheden van de warmteproducerende elementen ten gevolge van radioactief verval - zo was 4 miljard jaar geleden de warmteproductie van de Aarde zes maal hoger dan tegenwoordig (afb. 4).

Tot de processen van de platen-tektoniek behoort ook de continue opvulling van de spleten tussen platen die uit elkaar bewegen (divergeren) met uit de aardmantel opwellend basaltisch magma. Dergelijke spleten liggen langs de kam van onderzeese bergruggen in de oceanen, bijvoorbeeld de Mid-Atlantische Rug in de Atlantische Oceaan (met daarop o.a. de vulkanische eilanden IJsland en Tristan da Cunha). De uit elkaar bewegende platen groeien zo van achteren voortdurend aan met nieuwe oceanische korst. Deze aangroei wordt gecompenseerd door verdwijning van oceanische korst langs zones waar platen tegen elkaar worden geduwd: subductie, waarbij oceanische korst naar beneden wordt geperst en weer in de aardmantel wordt opgenomen. Oceanische korst heeft dus slechts een beperkte levensduur - geboren uit de aardmantel in de mid-oceanische ruggen, keert het na maximaal 200 miljoen jaar langs subductiezones in de aardmantel terug.

Tijdens haar levenscyclus, van geboorte uit tot wederopneming in de aardmantel, ondergaat de oceanische korst chemische veranderingen (vooral hydratatie, opname van water) door reacties met oceanwater. Deze reacties treden in het bijzonder op bij de onderzeese opwelling van het hete, basaltische magma, maar ook tijdens het verblijf van de oceanische korst op de oceaانبodem, op weg naar de subductiezone. Bovendien worden op de oceaانبodem allerlei sedimenten afgezet, ten dele van biologische oorsprong (zoals calciumcarbonaat, kalksteen). De oceaenvloer die langs subductiezones in de aardmantel wordt geperst, heeft dus een andere chemische samenstelling dan het basaltisch magma dat in de mid-oceanische ruggen opwelt. Wanneer dit materiaal (chemisch veranderde basaltische korst + sedimenten) op een diepte van ongeveer 100 km in de subductiezone is

gekomen, vindt bij de daar heersende druk en temperatuur (1200-1300°C) een gedeeltelijke opsmelting (enkele procenten) plaats. Het magma dat zo ontstaat heeft echter niet een basaltische, maar een dioritische samenstelling. Dit dioritische magma stijgt op en manifesteert zich aan het aardoppervlak als continentale korst. Herhaaldelijk smelten en stollen doet in de loop van de tijd uit dit dioritisch materiaal de uiteenlopende gesteentetypen ontstaan, die de continentale korst karakteriseren.

Zonder de chemische veranderingen die het basaltische gesteente in de oceaan ondergaat, zou dioritisch magma niet of slechts in zeer geringe hoeveelheden (via magmatische differentiatie) kunnen genereren uit de oceanische korst in subductiezones. Dit verklaart waarom continentale korst, in tegenstelling tot basaltische gesteenten, niet (of sporadisch?) voorkomt op de andere planeten van ons zonnestelsel: er was en is géén of onvoldoende water voor de reacties zoals die op Aarde tussen basalt en oceaanwater plaatsvinden. In het bijzonder moet er voldoende water zijn om de mid-oceanische ruggen te bedekken, waar het basaltische magma opwelt en de belangrijkste reacties optreden. Continenten spelen dus niet alleen een essentiële rol in het geheel van het geosfeer-biosfeer systeem - het ontstaan van de continenten is zelf weer afhankelijk van het bestaan van de oceanen.

“Gij vernieuwt het gelaat des aardrijks” (Psalm 104)

In tegenstelling tot de oceanische korst kan de lichtere continentale korst niet langs subductiezones in de aardmantel worden geperst (vergelijk weer het drijven van een ijsberg op water). Continentale korst, eenmaal gevormd, blijft altijd bestaan - hoewel deze wél allerlei veranderingen kan ondergaan.

Radioactieve ouderdomsbepalingen hebben aangetoond dat de oudste delen van de continenten 3,93 miljard jaar geleden zijn gevormd. Er zijn aanwijzingen dat misschien al 4,3 miljard jaar gelden enige continentale korst aanwezig was. Dat was dus al betrekkelijk kort na het ontstaan van zonnestelsel en Aarde, 4,55 miljard jaar geleden. Met het verstrijken van de geologische tijd is het volume van de continenten voortdurend toegenomen (afb. 5). Ook thans ontstaat nog steeds nieuwe continentale korst, bijvoorbeeld langs de Andes-keten in Zuid-Amerika en in de vulkanen van Oost-Indonesië. Het grootste deel, zo'n 70-80% van het totale volume continentale korst, is echter in een betrekkelijk korte periode ontstaan, tussen 3,0 en 2,5 miljard jaar geleden. Deze periode markeert het einde van de primitieve beginfase van de Aarde, het Archaeicum, en het begin van de moderne aardgeschiedenis.

Een primitief geosfeer-biosfeer systeem was al operationeel vóór de massale continentvorming 3,0-2,5 miljard jaar geleden, maar dit gaf de Aarde toen nog niet haar bijzondere karakter. De Aarde was geheel bedekt met oceaan, hier en daar onderbroken door basalt-vulkanen en eilandjes bestaande uit continentale korst. De atmosfeer had in den beginne een “natuurlijke” samenstelling, zoals nu op Mars en Venus: voornamelijk kooldioxide, zeer weinig stikstof, en slechts sporen vrije zuurstof. De biosfeer was al aanwezig vanaf (ten minste) 3,8 miljard jaar geleden, zoals blijkt uit

Tabel I. Evenwichts- en werkelijke concentraties (in volume-%) van enkele gassen in de aardatmosfeer

		evenwicht ¹⁾	werkelijk
stikstof	N ₂	<10 ⁻⁸	78
methaan	CH ₄	<10 ⁻³³	1,7 · 10 ⁻⁴
distikstofoxide	N ₂ O	<10 ⁻¹⁸	3 · 10 ⁻⁵
ammoniak	NH ₃	<10 ⁻³³	10 ⁻⁷
waterstof	H ₂	<10 ⁻³³	5,3 · 10 ⁻⁵

¹⁾ Op basis van de huidige zuurstofconcentratie (21% O₂)

de isotopische samenstelling van koolstof in sedimenten die toen zijn afgezet. De oudste echte fossielen worden gevonden in sedimenten die 3,5 miljard jaar geleden zijn afgezet: kalkafscheidende algen (stromatolieten). Productie van zuurstof als gevolg van biologische fotosynthese moet toen al operationeel zijn geweest.

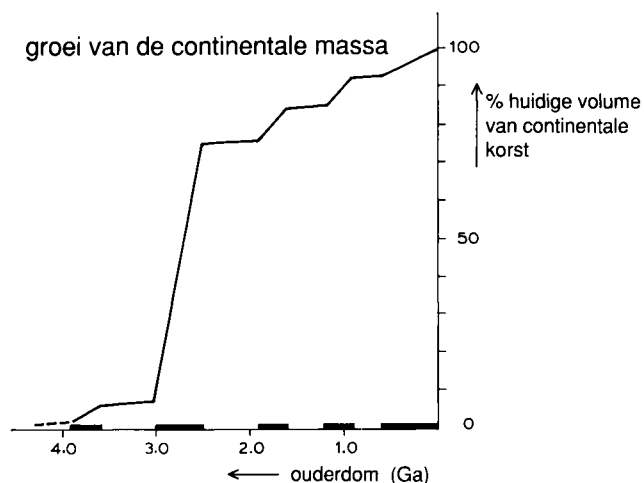
De fotosynthese deed het atmosferisch O₂-gehalte geleidelijk toenemen. Anderzijds maakte het toenemende O₂-gehalte steeds verder gaande diversificatie en verbreiding van de biosfeer mogelijk. Een belangrijke factor hierbij was de ozonlaag, waarvan de omvang direct gerelateerd is aan het atmosferisch O₂-gehalte. Ozon filtert de voor DNA-moleculen vernietigende ultraviolette zonnestraling in het 2400-2900 Å golflengtegebied. Zonder ozonlaag is leven alleen mogelijk enkele meters onder het oceanoppervlak (waarbij de waterkolom de lethale ultraviolette straling filtert) en op beschutte plaatsen.

De groeiende ozonlaag stelde dus steeds meer milieus open voor de biosfeer. Bovendien maakte de toename in het atmosferisch O₂-gehalte de evolutie van meercellige organismen mogelijk - deze hebben zuurstofgas nodig om (chemische) energie te transporteren naar de afzonderlijke lichaamscellen. Op grond van de fysiologische kenmerken van fossiele invertebrate dieren wordt geconcludeerd, dat het atmosferisch O₂-gehalte 700 miljoen jaar geleden (de oudste fossiele invertebraten-fauna) een niveau had bereikt van ongeveer 7 % van het huidige niveau, en 570 miljoen jaar geleden (begin van het Cambrium) een niveau van ongeveer 10 %. Een kritisch punt voor de biosfeer werd bereikt in het Siluur, ongeveer 425 miljoen jaar geleden. Het atmosferisch zuurstofgehalte was toen zo ver gestegen dat de filterwerking van de ozonlaag de verbreiding van de biosfeer over het landoppervlak mogelijk maakte: eerst planten en insecten en aan het eind van het Devoon de amfibieën. De continenten werden overdekt door vegetatie, waardoor het atmosferisch O₂-gehalte nog verder ging stijgen. Dit gehalte kan in het geologisch verleden aan schommelingen onderhevig zijn geweest, maar veel hogere waarden dan het huidige niveau kan het nooit hebben bereikt - ten minste sinds de laatste 100 miljoen jaar, in het Krijt, is het gestabiliseerd op ongeveer 21 %.

Gaia

De aardatmosfeer dankt zijn bestaan aan de biosfeer. Oceanen maken de vorming van continentale korst mogelijk, maar de oceanen hebben hun bestaan waarschijnlijk zelf ook aan de biosfeer te danken. Dit laatste hangt samen met de rol die kooldioxide-gas speelt in het geosfeer-biosfeer systeem. De lage concentratie kooldioxide in de atmosfeer (ongeveer 0,02-0,03%) wordt gehandhaafd door biologische processen, zoals de opslag van enorme hoeveelheden koolstof in organisch materiaal (levende organismen, organische koolstof in sedimenten, aardolie en aardgas) en calciumcarbonaat (kalksteenafzettingen). Zonder biosfeer zou de atmosfeer voor meer dan 90% uit kooldioxide bestaan, zoals het geval is op Mars en Venus. Het resulterende broeikas-effect zou dan moeten leiden tot verdamping van de oceanen en uiteindelijk, via ontleding van watermoleculen in de buitenste atmosfeer en ontsnapping van het zo ontstane waterstof, tot verlies van alle water. Een dergelijk proces is waarschijnlijk opgetreden op Venus in de eerste paar honderd miljoen jaar van haar bestaan.

Onze planeet zou aan dit lot ontsnapt kunnen zijn door de tijdige verschijning (ten minste 3,8 miljard jaar geleden) van de biosfeer als integrerend deel van het systeem Aarde. Sedertdien heeft de biosfeer in sterke mate het aanzien van de Aarde bepaald. Er zijn speculaties dat de biosfeer hierbij geen passieve rol speelt. De biosfeer zou niet louter een haast oneindig grote diversiteit zijn van telkens andere manifestaties van het verschijnsel Leven die zich aanpassen aan hun natuurlijke omgeving, maar de biosfeer zou actief haar woonomgeving modelleren tot condities die voor haar functionering en ontwikkeling optimaal zijn. Dit is de *Gaia-hypothese*, waarbij onder Gaia wordt verstaan: het geheel van de biosfeer en haar planetaire omgeving. Eén entiteit, die zichzelf in



Afb.5. Toename van het totale volume van de continentale aardkorst met het verstrijken van de geologische tijd. De toename is niet gelijkmatig: er zijn vijf perioden (zwarte blokken) van versnelde groei, met als belangrijkste periode 3,0-2,5 Ga (miljard jaar) geleden, toen 70-80% van het huidige volume van de continentale korst is gevormd.

stand houdt door allerlei zelfregulerende mechanismen en met eigenschappen die méér zijn dan de som van de afzonderlijke delen van het geosfeer-biosfeer systeem. Gaia zou een "super-organisme" representeren, waarbij de verhouding tussen de biosfeer en haar abiotische omgeving analoog zou zijn aan die tussen, bijvoorbeeld, een dierlijk organisme en zijn bloedsomloop-systeem.

Bestaat er inderdaad zoiets als Gaia, dat zich manifesteert als het aardse geosfeer-biosfeer systeem? Modelleert de biosfeer inderdaad "bewust" de planetaire omgeving tot voor haar optimale condities? Een fascinerende hypothese, met verreikende wereldbeschouwelijke consequenties! De Gaia-hypothese wordt echter zeker niet algemeen aanvaard. De samenhang en onderlinge beïnvloeding van de verschillende delen van het geosfeer-biosfeer systeem impliceren immers niet noodzakelijkerwijs het bestaan van een adaptief controle-systeem uitgaande van de biosfeer. Vooral nog lijkt even zo goed de "klassieke" theorie mogelijk, dat de biosfeer zich door middel van de biologische evolutie steeds zo goed mogelijk adapteert aan veranderingen in de planetaire omgeving, welke veranderingen zij zelf door haar activiteiten (zoals fotosynthese) "onbedoeld" mede bepaalt. Al deze intrigerende vragen kunnen op grond van de beschikbare geologische informatie (nog) niet eenduidig worden beantwoord.

Maar of Gaia bestaat of niet, de laatste jaren is het inzicht gegroeid dat aardmantel, continenten, oceanen, atmosfeer en biosfeer één enkel systeem vormen, dat sinds tenminste de laatste 4 miljard jaar operationeel is geweest en de Aarde tot een buitenbeentje in ons Zonnestelsel heeft gemaakt. De werking en eigenschappen van elk onderdeel van dit complexe systeem kunnen alleen goed worden begrepen uit hun onderlinge samenhang en wisselwerking. Om met de wetenschapsfilosoof David Bohm te spreken, conform zijn citaat in de aanhef van dit artikel: "Het is de totaliteit die de werkelijkheid representeert. De fragmentarisering van die totaliteit is de weerslag van menselijk handelen, zoals dat wordt bepaald door illusoire waarnemingen, die hun vorm krijgen door fragmentarisch denken".



Deze bijdrage is in verkorte vorm verschenen in de bijlage *Wetenschap & Onderwijs van NRC-Handelsblad*, 16 februari 1988, onder de titel "Gevormd door het Leven".