Oorsprong en verdeling van water op Aarde

Leobert E.M. de Boer
Lopikerweg 72a
2871 AW Schoonhoven
lemdeboer@hetnet.nl
Gedeeltelijk naar een oorspronkelijk manuscript van
Tom Reijers

Over de precieze oorsprong van water op Aarde kunnen we slechts speculeren. De verdeling van water over de aardbol en vooral de dyamiek in de hydrosfeer, de uitwisselingen tussen hydrosfeer, atmosfeer en lithosfeer en de consequenties die dit alles heeft voor klimaat, erosie, sedimentatie, landschapsmorfologie en het leven op Aarde is een uiterst complexe materie. Het onderstaande artikel geeft daarom slechts een summiere, versimpelde samenvatting van enkele hoofdaspecten.

Afbeelding 1 linkerpagina. | *Een opname van de Orion-nevel, gemaakt door de Europese ruimtetelescoop Herschel. Uit analyses van Herschel-gegevens blijkt dat dit soort interstellaire nevels (waarin nieuwe sterren en planetenstelsels worden geboren) veel moleculair water bevatten. (Foto: ESA/Herschel_images)*

Water in het heelal

Het watermolecuul bestaat uit één zuurstof- (O) en twee waterstofatomen (H). Na de "oerknal" – het begin van ons heelal – was waterstof (één proton met één elektron) het eerste atoom dat zich vormde. In de materiewolk die het gehele, jonge heelal omspande, ontstonden de eerste sterren en sterrenstelsels. In de kernen van sterren fuseert waterstof via een aantal stappen tot helium (twee protonen, twee neutronen, twee elektronen). Via diverse reactiereeksen fuseert een klein deel van de helium tot zwaardere elementen, zoals lithium, borium, stikstof, koolstof en zuurstof, tot en met de zwaarste elementen uit het Periodieke Systeem (ijzer, lood, uranium etc.).

Afhankelijk van zijn massa heeft een ster na 1 tot 8 miljard jaar in zijn kern alle waterstof omgezet in helium. Hij is dan "opgebrand". Grote, zware sterren bereiken dat punt veel eerder dan kleine, lichte sterren. Als het fusieproces in de kern stopt, stort de sterkern onder zijn eigen zwaartekracht ineen en verandert in een klein, zeer compact object (een witte dwerg, een neutronenster of een zwart gat). Op het zelfde moment blaast de ster alle materie uit zijn buitenste lagen met grote snelheid de ruimte in, gepaard gaande met een enorme hoeveelheid straling: kortstondig licht de stervende ster als een *supernova* op.

Het heelal bevat een ontzagwekkende hoeveelheid sterren: duizenden malen meer dan een miljard maal een miljard. Doordat alle sterren na verloop van tijd de materie uit hun buitenste lagen de ruimte inblazen (waaronder de spectaculaire ontploffingen van supernova's), ontstaan er gigantische interstellaire gas/materie-wolken. Sommige daarvan zijn aan de sterrenhemel als "nevels" te zien (bv. de Orion-nevel). Doordat ze zijn afgekoeld bestaan ze niet alleen uit waterstof, helium en alle mogelijke andere atomen, maar konden er zich ook moleculen in vormen, waaronder water. Onlangs (maart 2013) is de aanwezigheid van water met de Europese ruimtetelescoop Herschel (Afb. 1) in dat soort nevels nog eens onomstotelijk vastgesteld.

Plaatselijke materieverdichtingen in interstellaire nevels leiden tot de geboorte van nieuwe, "tweede-generatie-sterren", waarin de cyclus van kernfusies opnieuw begint. Onze zon behoort tot die tweede generatie (of misschien wel tot de derde generatie sterren, want het proces van geboorte en sterven kan zich meerdere malen herhalen). Naast een overmaat aan waterstof, waren water en tal van andere moleculen en atomen dus aanwezig in de materiewolk waaruit de zon ruim 4,5 miljard jaar geleden ontstond. Door de samenballing van materie werd de zon zelf veel te heet om moleculen te laten overleven. Maar rond de zon vormde zich een, door rotatie afgeplatte, materieschijf. Daaruit ontstonden door accretie (samenklontering van materie) de planeten, waar deze moleculen, inclusief H_2O wel intact bleven.

Water in het planetenstelsel

Als we van binnen (dicht bij de zon) naar buiten in ons planetenstelsel kijken, zien we dat de stenige planeet Mercurius veel te heet en te klein is om water aan het oppervlak of in de atmosfeer te kunnen bevatten.

Venus is vrijwel even groot als de Aarde, maar heeft een zeer dichte atmosfeer, die voor meer dan 95% uit CO_2 bestaat. Het enorme broeikaseffect dat daardoor ontstaat leidt tot atmosferische temperaturen tot boven de 300 °C, waardoor oppervlaktewater op Venus niet kan bestaan. Het is echter niet onmogelijk, dat er in het verre verleden, toen de zon 30% minder straalde dan tegenwoordig, vloeibaar water op Venus aanwezig is geweest, dat door de stijgende temperatuur in de loop der tijd verloren is gegaan. De Venusatmosfeer bevat nog sporen waterdamp, die echter te klein zijn om waterwolken te vormen (het wolkendek op Venus bestaat uit CO_2).

De Aarde heeft een flinke hoeveelheid water aan het oppervlak, overgaand in H_2O-ijs in de koudere gebieden. De atmosfeer bevat voldoende waterdamp voor de vorming van uit minuscule waterdruppeltjes bestaande wolken.

Allerlei sporen van het transport van erosiemateriaal wijzen er op dat Mars in het begin van zijn geschiedenis behoorlijke hoeveelheden vloeibaar oppervlaktewater heeft gehad. In de loop van zijn geschiedenis is Mars echter vrijwel volledig "uitgedroogd", o.a. doordat de zwaartekracht van Mars (¼ van die op Aarde) te zwak is om watermoleculen in de atmosfeer vast te houden. Alleen in de bodem is (vooral aan de koude polen) waarschijnlijk nog wat water en H_2O-ijs aanwezig.

De grote planeten Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus hebben geen vaste buitenschil. Van oppervlaktewater kan dus geen sprake zijn, hoewel in ieder geval Uranus en Neptunus grote hoeveelheden water-ijs in hun binnenste bevatten. De ringen van Saturnus en Uranus, en de vele manen en maantjes van deze vier planeten bestaan wel uit steenachtig materiaal en bevroren water en methaan (CH_4). Ze staan allemaal veel te ver van de zon om vloeibaar water mogelijk te maken, maar er wordt wel gespeculeerd dat bijvoorbeeld de grote Jupitermaan "Europa" (even groot als onze Maan) onder zijn omringende ijslaag vloeibaar water zou kunnen bevatten.

Pluto, de buitenste van de "klassieke" planeten (kleiner dan onze Maan; tegenwoordig als "dwergplaneet" geclassificeerd) bevat veel water in de vorm van ijs. Nog verder weg, in de Kuipergordel, cirkelen allerlei objecten die te klein zijn om "planeten" genoemd te worden. Ze bestaan waarschijnlijk voor een groot deel uit water-ijs, hetgeen hen de naam "ijsdwergen" verschaft.

H_2O-ijs komt nóg meer voor in de aller-verste bewoners van ons zonnestelsel: de miljoenen kleine objecten die in de Oortwolk, op enorme afstand rond de zon cirkelen. Sommige van deze objecten hebben zeer langgerekte, elliptische omloopbanen, waardoor ze eens in de tientallen tot honderden jaren het centrum van het

zonnestelsel doorkruisen: de zogenaamde "kometen": In de buurt van de zon verdampt (of *sublimeert*) tijdens iedere omloop een beetje van hun ijs, zichtbaar als de komeetstaart.

Conclusie: de Aarde is de enige planeet in ons zonnestelsel met substantiële hoeveelheden vloeibaar oppervlaktewater, water-ijs en waterdamp. De andere "aardachtige planeten" (Mercurius, Venus, Mars) hebben (wellicht) ooit water aan het oppervlak gehad, maar zijn dat kwijtgeraakt. Naarmate we verder van de zon af gaan (manen van Jupiter, ringen van Saturnus, Pluto, ijsdwergen, Oortwolk en kometen) vinden we meer water(ijs) in het zonnestelsel.

Herkomst van water op Aarde

Op hoofdlijnen zijn er drie theorieën om de aanwezigheid van vloeibaar water aan het oppervlak op Aarde te verklaren:

1. Water was reeds tijdens de vorming van Aarde door accretie van materie in de planetaire schijf rond de zon (4,5 miljard jaar geleden) in de huidige hoeveelheid aanwezig. De zich vormende Aarde werd door de samenballing van materie volledig vloeibaar, waardoor de atomen/moleculen zich naar hun soortelijk gewicht konden rangschikken. Water, als een van de lichtste moleculen, kwam in de buitenste laag (de atmosfeer) terecht en regende, na afkoeling tot minder dan 100 °C, op het aardoppervlak neer om zo de oceanen/hydrosfeer te vormen.
2. De gesteentevormende mineralen in de lithosfeer en de aardmantel bevatten (vooral in de vorm van OH-groepen) meer dan voldoende water om alle oceanen te vullen zie het artikel van Beunk, "Water in de endogene processen" in dit nummer op pagina 118. Via het (vooral in het begin van de aardgeschiedenis uitbundige) vulkanisme kwam een deel van dit water in de atmosfeer terecht en regende, na afkoeling, als water neer.
3. In de eerste paar honderd miljoen jaar van de aardgeschiedenis vond het zogenaamde "kosmische bombardement" plaats. De net ontstane planeten verstoorden elkaars omloopbanen en die van talloze andere rond de zon cirkelende objecten, van asteroïden tot kometen.

Afbeelding 2. | *De atmosfeer bevat slechts een geringe fractie van al het water op Aarde. Toch bepalen wolken in belangrijke mate ons klimaat.*

Het gevolg: talloze inslagen op alle planeten van het zonnestelsel, en soms zelfs botsingen tussen complete planeten. Op die manier zouden vooral de voornamelijk uit ijs bestaande kometen met hun elliptische banen massaal op de Aarde zijn ingeslagen en op die manier het water op onze planeet hebben gebracht.

Tegenwoordig wordt de derde van deze theorieën als de meest waarschijnlijke beschouwd, hoewel de eerste twee uiteraard ook een bijdrage zullen hebben geleverd aan de hoeveelheid oppervlaktewater op aarde.

Als deze "kometentheorie" klopt, is er overigens alle reden om aan te nemen dat de buurplaneten van de Aarde (Mars & Venus) evenveel water uit de buitendelen van het zonnestelsel ontvingen, en aanvankelijk dus oppervlaktewater moeten hebben gehad.

NB: Doe eens even een simpele rekensom: de inhoud van een bol is $4/3\pi^3$; het soortelijk gewicht van water/ijs is ca. 1.000 kg/m^3. Een komeet met een diameter van bv. 100 km bevat dus ca. 500.000 km^3 water/ijs = 5.10^{17} kg. Om het totaal aan (oceaan)water (= meer dan 10^{21} kg) op aarde te brengen, zouden er dus minstens 2.000 kometen met een doorsnede van 100 km ingeslagen moeten zijn! En dat, terwijl de inslag die 65 miljoen jaar geleden een einde maakte aan de periode van de dinosauriërs, een diameter had van amper 20 km. Het vroege kosmische bombardement moet dus gigantisch zijn geweest!

Hoeveel water is er op Aarde?

Zeventig procent van het huidige aardoppervlak is bedekt met oceanen, die gemiddeld 3,7 km diep zijn. Daaruit blijkt, dat er in totaal ruim 1,3 miljoen Teraton (Tt = biljoen ton) oceaanwater is. De hoeveelheden water op het land

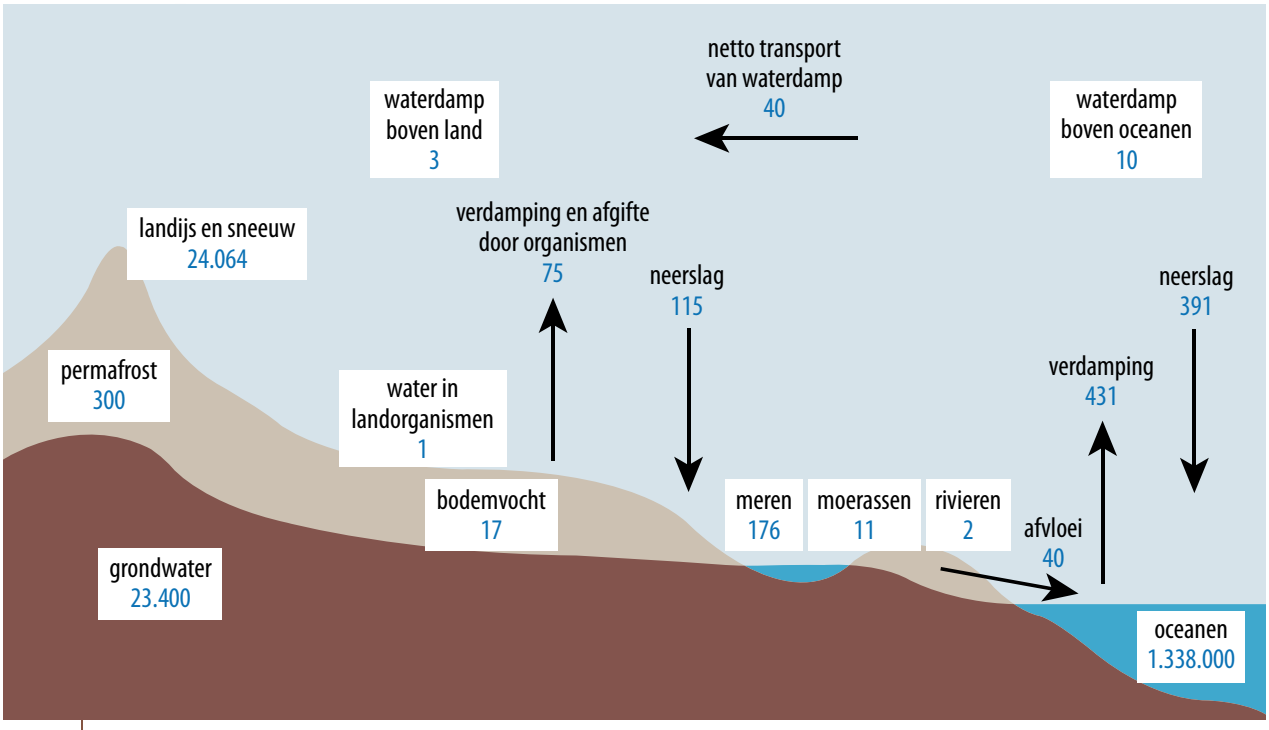
(meren, moerassen, rivieren, bodemwater, grondwater, sneeuw, gletsjers, permafrost-ijs en ijskappen) vertegenwoordigen samen slechts ca. 60.000 Tt. De atmosfeer bevat in totaal nog geen 15 Tt water (getallen ontleend aan Smil, 2002). Daarmee komt de totale hoeveelheid water in de buitenste lagen van de Aarde op ca. 1,4 miljoen Tt (exclusief het water dat in verschillende vormen in mineralen en gesteenten gebonden is; zie het artikel van Beunk in dit nummer op pagina 118.

Ten opzichte van de totale massa van de Aarde (6 miljard Tt) bedraagt de hoeveelheid water slechts 0,025%. Ondanks dit uiterst geringe percentage speelt water in de buitenste lagen van onze planeet een zeer bepalende rol: erosie, materiaaltransport, sedimentatie, leven, warmte-uitwisseling, klimaat, en zelfs grootschalige processen als de platentektoniek worden allemaal in hoge mate door die kleine hoeveelheid water beïnvloed.

De verdeling van water op Aarde

Aangenomen wordt dat de hoeveelheid water op Aarde sinds de vorming van de eerste oceanen (meer dan 4 miljard jaar geleden) door alle geologische perioden heen min of meer constant is gebleven. Aanvankelijk (in de eerste miljard jaar) kan een kleine hoeveelheid water zijn "weggelekt" door *foto-dissociatie* (het onder invloed van zonlicht uiteenvallen van H_2O in H en O_2, waarna het lichte H ontsnapte naar de ruimte). Toen de atmosfeer eenmaal vrije zuurstof begon te bevatten (met name geproduceerd door het leven), werd de door dissociatie gevormde waterstof echter direct weer aan zuurstof gebonden om zo opnieuw water te vormen. Bovendien zorgde ook vulkanisme voortdurend voor toevoer van (zij het geringe) hoeveelheden water vanuit diepe magma's naar de atmosfeer.

De hoeveelheid water mag dan constant zijn gebleven, de verdeling van water over de aardbol heeft door de tijd sterke wisselingen doorgemaakt. Waarschijnlijk was de oorspronkelijke oeroceaan veel groter dan het totaal aan huidige oceanen en besloeg hij vrijwel het gehele aardoppervlak. Door vulkanisme en tektonische processen groeide het landoppervlak *(accretie)* tot, lang geleden, de huidige 70%-30% verdeling van oceaan-continentoppervlak werd bereikt. Platentektoniek en de daarmee samenhangende continentverschuiving bleef echter voortdurend leiden tot een herverdeling van de positie van de oceanen en continenten. Een van de aspecten die daarbij van belang zijn, is de vraag of er op een gegeven moment wel of geen continenten aan één of beide polen liggen. Een continent aan een koude pool verhoogt namelijk de kans op de vorming van landijs, en dus op een wereldwijde daling van de zeespiegel. Weer even een rekensom: op dit moment bedraagt de hoeveelheid ijs op de continenten bijna 2% van de totale hoeveelheid water, terwijl de oceanen gemiddeld 3,7 km diep zijn. Een verdubbeling van de hoeveelheid landijs zou dus betekenen dat er 2% minder water in de oceanen is, waarmee de gemiddelde diepte dus met 2% afneemt, hetgeen neerkomt op een wereldwijde zeespiegeldaling van 75 m. Daarnaast kunnen ook tektonische bewegingen (zeebodem-rijzing/daling) leiden tot verschillen in het zeespiegelniveau. Omdat het overgrote deel van het leven op aarde zich afspeelt in ondiepe kustwateren en laaggelegen delen van de continenten, leidden flinke dalingen en rijzingen van het zeeniveau in het geologische verleden regelmatig tot massa-uitstervingen. De beide artikelen van Troelstra in dit nummer op pagina 124 en 138, gaan nader in op de gevolgen van continental drift op de verdeling van water en ijs op Aarde en de daarmee samenhangende klimaatsontwikkelingen.



Afbeelding 3. | *De hoeveelheden water op aarde in Teratonnen (Tt; 1 Tt = 1 biljoen ton = 10^{15} kg). In de hokjes zijn de aanwezige hoeveelheden in oceanen, atmosfeer etc. weergegeven. De pijlen geven de hoeveelheden aan die jaarlijks deelnemen aan de kringloop van verdamping, neerslag en afvloei. (Bron: Smil, 2002)*

Oceanen	96,5%
Continenten	
Meren, moerassen, rivieren	0,014%
Bodemvocht	0,0012%
Grondwater	1,7%
Gletsjers, sneeuw, landijs	1,7%
Permafrost	0,02%
Atmosfeer	
Boven de oceanen	0,007%
Boven de continenten	0,002%
Biosfeer	
Organismen op het land	0,00007%

Tabel 1. | *De verdeling van water op Aarde over oceanen, atmosfeer en continenten (in procenten van de totale hoeveelheid H_2O op Aarde, exclusief in gesteenten gebonden water). (Gegevens volgens Smil, 2002; NB in andere bronnen vindt men soms iets afwijkende percentages. Voor het grote beeld zijn dat soort verschillen echter niet relevant.)*

Tabel 1 geeft een vereenvoudigd beeld van de huidige verdeling van water (c.q. ijs). Zoals reeds gezegd, zijn de hoeveelheden H_2O op het land en in de atmosfeer zeer gering ten opzichte van de totale hoeveelheid oceaanwater. Toch spelen juist die hoeveelheden een belangrijke rol in de aardse waterkringlopen.

Afbeelding 4. | *Het atmosferische gedeelte van de waterkringloop verloopt zeer snel. Boven het Caribisch gebied is op deze foto een cycloon te zien.*

Waterkringlopen

Onder de hedendaagse atmosferische omstandigheden (met een druk van 1 atmosfeer aan het aardoppervlak) bevriest water bij 0 °C en gaat het geheel over in waterdamp bij 100 °C. Gedeeltelijke verdamping treedt echter ook binnen dat traject op; zelfs ijs verdampt *(sublimeert)* in geringe mate. Dit verdampingsproces en de temperatuurwisselingen van plaats tot plaats, van laag tot hoog en van tijd tot tijd (dag/nacht, seizoenen) zorgen tezamen voor de waterkringloop, die voortdurend water vanaf het oceaanoppervlak in de atmosfeer brengt, van waaruit het gedeeltelijk boven de continenten terecht komt en daar als neerslag een belangrijke rol speelt in onder andere de chemische en mechanische verwering van gesteenten en het transport van erosieproducten naar lagergelegen gebieden en kustwateren.

Het watertransport door de atmosfeer vindt voornamelijk plaats in de vorm van wolken, die worden gevormd doordat verdampt oceaanwater in de koudere luchtlagen condenseert. De wolkenmassa's spelen bovendien een belangrijke rol in het locale en wereldwijde klimaat.

Afbeelding 3 geeft een globaal beeld van de hoeveelheden water die jaarlijks uit de oceanen verdampen, boven de oceanen en op de continenten weer als neerslag naar beneden komen en via grondwater, meren en rivieren weer terugvloeien naar de oceanen. Hoewel water natuurlijk zeer lang in meren, gletsjers en in de bodem "gevangen" kan blijven, spelen delen van deze kringloop zich zeer snel af. Een cycloon met enorme watermassa's die voor de westkust van Afrika ontstaat, bereikt binnen twee weken de kust van Noord-Amerika. Een dag of tien na overvloedige regenval in Midden-Europa (uit depressies die een week eerder bij Canada ontstonden), bereiken de rivieren in Nederland en Noord-Duitsland hun hoogste peil; en weer een paar dagen later is het meeste water al weer terug in zee.

Naast de oceaan/atmosfeer/continent/oceaan-kringloop spelen ook oceaanstromingen een belangrijke rol, vooral bij de temperatuurhuishouding in de buitenste lagen van onze planeet. Een ingewikkeld patroon van oppervlakkige stromingen brengt voortdurend opgewarmd oppervlaktewater vanuit de tropische gebieden naar de koudere regionen. Omdat warm water (aan het oppervlak) lichter is dan koud water (in de diepte) vindt er lokaal gezien nauwelijks verticaal transport (van ondiep naar diep e.o.) plaats. Op wereldwijde schaal is er echter wel degelijk sprake van een verticale kringloop van oceaanwater. Opgewarmd tropisch water stroomt aan het oppervlak naar de Noordpool, koelt daar af en zakt dus naar beneden. In de diepte stroomt het terug naar de tropen, waar het weer opwarmt en omhoog stijgt Daarna begint de volgende ronde.

Deze wereldwijde oceaankringloop is vele malen trager dan de kringloop via de atmosfeer (één "rondje" duurt meer dan 1.500 jaar!), maar verplaatst gigantische massa's water. De invloed ervan op klimaat en temperatuurverdeling op Aarde is dan ook enorm. Daarop wordt door Troelstra in zijn bijdragen over "Oceanen in beweging" en "IJs in de geologische tijd" (beide in dit nummer op pagina 124 en 138) nader ingegaan.

Als laatste waterkringloop kunnen we nog de uiterst trage (vele miljoenen jaren) cyclus noemen waarbij water in subductiezones mee de diepte in gaat en via vulkanisme weer in de atmosfeer terugkeert (zie de bijdrage van Frank Beunk in dit nummer op pagina 118).

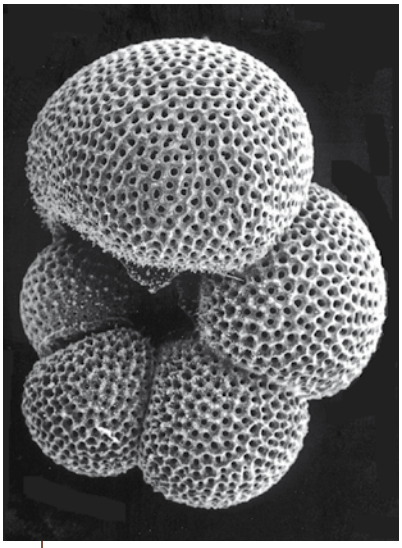
Zoet en zout water

Bij de verdamping van door de zon opgewarmd oceaanwater wordt water in feite gedestilleerd. Zoals bekend, is "aquadest" een agressief oplosmiddel voor allerlei organische en anorganische stoffen. Bovendien zorgen kleine hoeveelheden CO_2 en O_2 die tijdens het verblijf van wolken in de atmosfeer in hun minuscule waterdruppeltjes oplossen ervoor dat ook bepaalde mineralen die niet of nauwelijks in water oplosbaar zijn, worden omgezet in ionen die wel oplossen ("chemische verwering"). Het jaarlijks via de oceaan/atmosfeer/continent/oceaan-kringloop naar de oceanen terugvloeiende water (40 Tt) brengt daardoor voortdurend opgeloste zout/mineraal-ionen mee naar zee (in totaal 4 Gt/jaar).

De huidige gemiddelde zoutconcentratie in de oceanen bedraagt ruim 3%. Omdat oceaanwater de overgrote meerderheid vormt van al het water op Aarde (ca. 96%), is zoet water een relatieve zeldzaamheid (waarvan dan ook nog eens de helft vastgelegd is in ijsmassa's).

Aangenomen wordt dat de aanvankelijke zoutconcentratie in de oorspronkelijke oeroceaan veel lager was, hoewel ook daarin ongetwijfeld via het vroege vulkanisme al zouten/mineralen aanwezig waren. Er wordt wel eens verondersteld dat de vroege oceanen een zoutconcentratie gehad moeten hebben die in de buurt van de "fysiologische" concentratie in levende organismen (0,9%) lag. Dit, omdat het oudste leven in de oceaanwater ontstond en gebaat was bij een zo gering mogelijk verschil in concentratie *binnen* en *buiten* de cel (zie het artikel van De Boer "Water en Leven" in dit nummer op pagina 130). De continue toevoer van zouten gedurende miljarden jaren deed het zoutgehalte in de oceanen gestaag stijgen, totdat er (op het huidige niveau van ca. 3%) een evenwicht ontstond tussen aanvoer en neerslag van zouten. Bij dat laatste spelen twee hoofdmechanismen een rol: chemische (anorganische) neerslag en "biomineralisatie". Chemische neerslag treedt op als water verzadigd raakt met bepaalde zouten. In de open oceanen wordt dat punt nooit bereikt, maar wel bij indamping in ondiepe baaien en binnenzeeën, waardoor honderden meters dikke zoutpakketten kunnen ontstaan, die vervolgens na afdekking met sedimenten aan de kringloop worden onttrokken.

Afbeelding 5. | *Niet alleen in ondiepe baaien en binnenzeeën kan door indamping zout neerslaan, maar ook in meren op de continenten. Hier: Mono Lake, Californië, USA.*



Afbeelding 6. | *De kalkskeletjes van foraminiferen ontstaan door "biomineralisatie". Dode foraminiferen dragen in belangrijke mate bij aan de opbouw van dikke kalkpakketten op de oceaanbodem. (Foto: met dank aan Simon Troelstra, Faculteit voor Aard- en Levenswetenschappen, VU Amsterdam).*

Biomineralisatie is het proces waarbij levende organismen mineralen binden ten behoeve van de opbouw van hun inwendige of uitwendige skelet. De hoofdrol spelen daarbij de kalkskeletjes van eencellige zee/oceaan-organismen, die zorgen voor de opstapeling van soms meer dan 1.000 meter dikke kalkafzettingen. Ook die kalk wordt vervolgens vele miljoenen jaren lang aan de kringloop onttrokken, totdat ze door gebergtevorming weer "boven water" komt en opnieuw kan worden betrokken in de cyclus van verwering en afvoer naar zee.

(AANBEVOLEN) LITERATUUR

Smil, V., 2002.
The Earth's bioshere. The MIT Press, Cambridge, London: 346 pp. (ISBN 0-262-19472-4).

Ball, Ph., 2003.
H_2O, a bibliography of water. Phoenix Paperback, London: 387 pp.