



Oceanen in beweging, een geologische terugblik

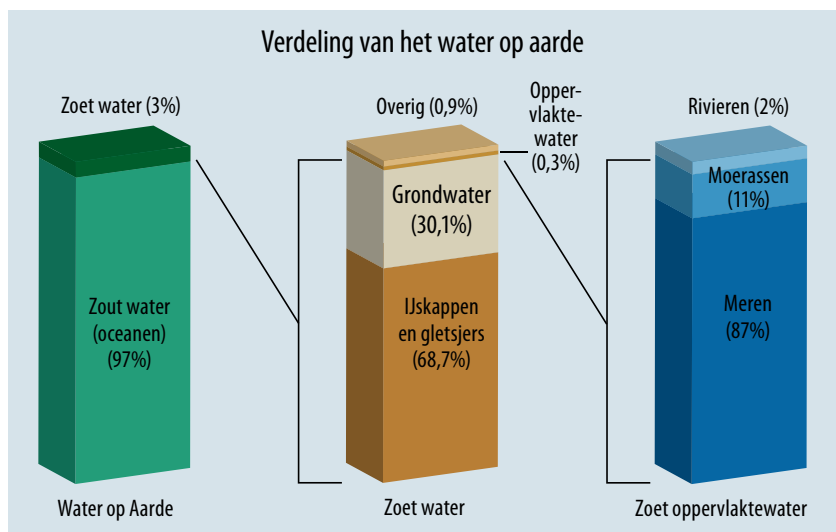
SIMON TROELSTRA
FACULTEIT AARD- EN
LEVENSWETENSCHAPPEN
VU UNIVERSITEIT AMSTERDAM
NCB NATURALIS, LEIDEN
S.R.TROELSTRA@VU.NL

Een van de eerste dingen die we op school leren is de positie van de continenten met daaromheen de oceanen en binnenzeeën. Het is een vertrouwd beeld. Met een gemiddelde diepte van 3680 meter vormen de oceanen een enorm zoutwaterreservoir waarin maar liefst 97% van al het water op Aarde ligt opgeslagen (Afb. 1). Slechts 3% van het water is aanwezig in de vorm van ijskappen, gletsjers, grondwater, meren en rivieren. In perioden waarin er geen ijskappen zijn – het grootste gedeelte van de aardgeschiedenis – is dat nog minder.

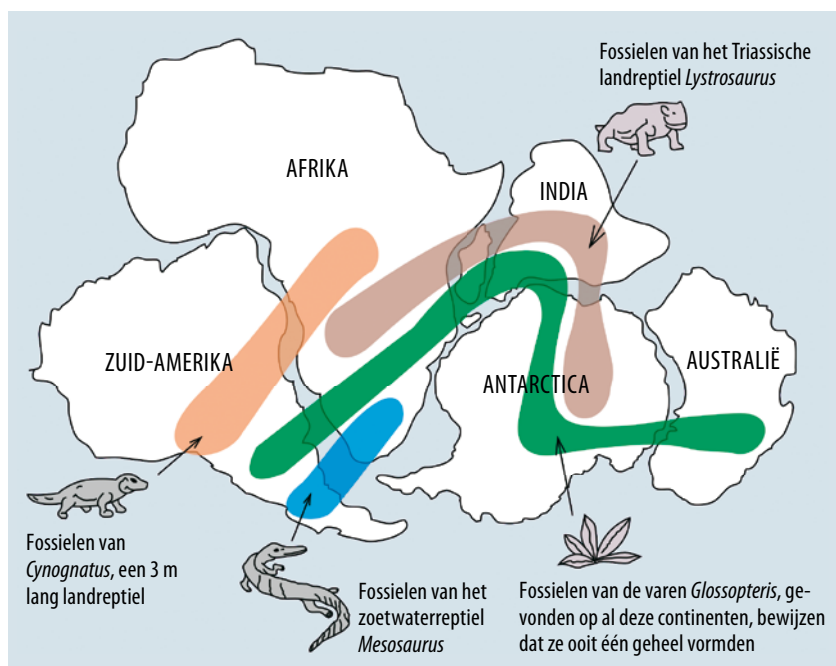


Geologisch gezien is de huidige verdeling van land en zee een momentopname; immers, sinds de ontdekking van de platentektoniek weten we dat de continenten voortdurend in beweging zijn, supercontinenten ontstaan en breken weer op, oceanen openen zich en verdwijnen; een proces van tientallen tot honderden miljoenen jaren. Een goed voorbeeld kunnen we zien in de Atlantische Oceaan: hier loopt van noord naar zuid een lange bergachtige keten: de midden-atlantische rug. Het is de grens tussen twee platen, die langzaam uit elkaar drijven met een gemiddelde snelheid van twee centimeter per jaar, een proces dat al miljoenen jaren aan de gang is. De Atlantische Oceaan wordt dus nog steeds breder. Een binnenzee als de Middellandse Zee daarentegen wordt vanwege de noordwaardse beweging van Afrika ieder jaar twee centimeter minder breed. Over ongeveer 40 miljoen jaar, geologisch gezien niet eens zo'n lange periode, zal deze zee geheel verdwenen zijn.

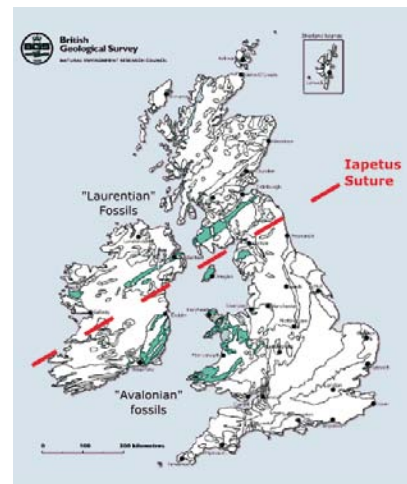
De grondlegger van de platentektoniek is Alfred Wegener, die deze theorie al in het begin van de twintigste eeuw opschreef. Het zou echter nog tot na 1970 duren, voordat zijn theorie algemeen werd geaccepteerd.



AFBEELDING 1. | Verdeling van het water op Aarde. Let op het verspringen van de schaal.



AFBEELDING 2. | Fossilvoorkomens op de verschillende continenten konden worden verklaard door het bestaan van een groot supercontinent.



AFBEELDING 3. | De Iapetus-sutuur. Mooi is te zien hoe Schotland en Noord-Ierland tot een andere plaat behoren met ieder een eigen fossielinhoud.

Oceanen beslaan meer dan tweederde van het aardoppervlak. Het is gemakkelijk te begrijpen dat deze enorme watermassa steeds van grote invloed is geweest op allerlei processen op Aarde, zoals de ontwikkeling van het leven, de daaraan gekoppelde koolstofcyclus en het klimaat. Hoewel al veel onderzoek uitgevoerd is, herbergen de oceanen nog vele geheimen, vooral in de diepere delen. De recente vondst van een onbekende groep bacteriën in de diepe Marianentrog is hiervan een goed voorbeeld.

Wat weten we van de vroegere oceanen?

De theorie van de platentektoniek heeft er voor gezorgd dat we de ontwikkeling van continenten en oceanen beter kunnen begrijpen. Daarnaast is er het enorme geologische archief van gesteenten en fossielen waardoor we het geologisch verleden als puzzelstukjes in elkaar kunnen passen. Bovendien, gebruik makend van het feit dat ijzerdeeltjes zich als kompasnaaldjes gedragen en, eenmaal in een gesteente vastgelegd, hun oude noord/zuid oriëntatie behouden, kunnen we de koers van een continent door de tijd goed volgen. Er staan ons dus allerlei technieken ter beschikking om de geschiedenis van continenten en oceanen te reconstrueren.

Een mooi voorbeeld hiervan is de land/zee verdeling van ongeveer 250 miljoen jaar geleden, rondom de Perm-Trias grens. Alfred Wegener



ontdekte dat op alle continenten een aantal karakteristieke fossielen werd aangetroffen, met name de plant *Glossopteris*. Met de huidige positie van de continenten was dit niet te verklaren. Door de continenten uit te knippen en in elkaar te passen bleek dat met de aanwezigheid van een toenmalig supercontinent (*Pangea*) de fossielvoorkomens goed te verklaren waren (Afb. 2).

Tegelijkertijd werd duidelijk, dat een aantal van de huidige oceanen nog niet of slechts in embryonale vorm bestonden. Een geweldige ontdekking met grote consequenties voor het geologisch denken.

We zien dus dat oceanen komen en gaan. Wanneer alle continenten samenklonteren, gemiddeld eens per 500 miljoen jaar, ontstaat een supercontinent met een omliggende wereldocean. In het verleden zijn dat o.a. *Mirovoi*, de ocean rond het vroegere supercontinent Rodina (1,1 miljard – 750 miljoen jaar geleden) en *Panthalassa*, de wereldocean rondom het supercontinent Pangaea (300–250 miljoen jaar geleden).

Waar continentale platen tegen elkaar botsen zal de tussenliggende ocean verdwijnen. Met gedetailleerd veldwerk kunnen de sporen van de verdwenen ocean vaak nog terug worden gevonden in het landschap in de vorm van een zogenaamde *sutuur*, een grenslijn met aan weerszijde totaal verschillende gesteenten en fossielinhoud. Hier zijn de continenten definitief tegen elkaar gebotst en is het laatste restje ocean er tussenuit geperst. Een goed voorbeeld is de *Iapetus sutuur*, het restant van de gelijknamige ocean, die vroeger tussen de oude continenten Baltica en Avalonia lag (Afb. 3). Deze ocean verdween in het Siluur en kan nu als een sutuur in Schotland en Ierland gevolgd worden. Mooi te zien is dat de noordelijke gedeelten van Ierland en Schotland tot een heel andere facies behoren dan de zuidelijke gedeelten. De Iapetus Ocean is er inderdaad als het ware tussenuit geperst. Een ander voorbeeld is de Oeral-sutuur, de sluiting van de paleozoische ocean tussen Siberië en het Baltische gebied. Ook dit fenomeen is in het landschap goed te vervolgen.

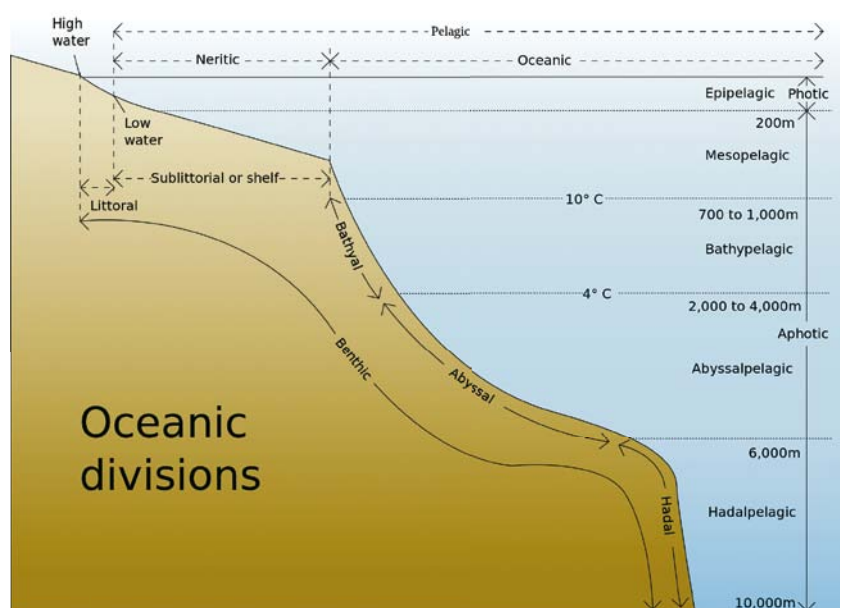
In het artikel over de oorsprong van water op Aarde in dit nummer van G&H op pagina 112, staat beschreven waar het water op Aarde vandaan

komt. Het wetenschappelijk debat over de fysisch/chemische condities in de vroege oceanen, zoals temperatuur, zoutgehalte, zuurstofgehalte, duurt nog voort. Temperaturen op Aarde moesten eerst zodanig zijn dat water kon condenseren. Bewijs voor stromend water vinden we in 3,8 miljard jaar oude afzettingen in de buurt van Isukasia (Groenland). Hier zijn sedimentaire gesteenten ontsloten, ontstaan uit afbraak producten van nóg oudere afzettingen. Deze afbraak ontstond doordat in water opgelost CO_2 in regen neerviel en door zijn zuurgraad vaste gesteenten kon verweren. De hydrologische cyclus (verdamping, uitregenen, terugvloeien naar de oceaan) bestond dus al in het vroege Archaicum. Het aardoppervlak was in eerste instantie onherbergzaam. Er was nog geen leven, de atmosfeer was giftig, en de oceanen zuurstofloos. Lang is gedacht dat de vroege oceanen warm waren (van 50–80 °C), maar recent onderzoek wijst op een meer gematigde temperatuur van niet meer dan 40 °C of zelfs van 26–35 °C, een temperatuur die niet veel afwijkt van huidige tropische watertemperaturen.

Agressieve straling werd nog niet door een beschermende ozonlaag tegengehouden. De eerste zuurstof werd geproduceerd door de *cyanobacteria*. Tussen 2,45–1,85 miljoen jaar geleden produceerden deze via fotosynthese uit CO_2 en water, onder invloed van zonlicht, suikers en zuurstof. De eerste zuurstof werd gebruikt om elementen als ijzer en silica te oxideren. Zo ontstonden dikke afzettingen van ijzer- en silica-oxiden, de zogenaamde *Banded Iron Formation* (BIF; Afb. 4).

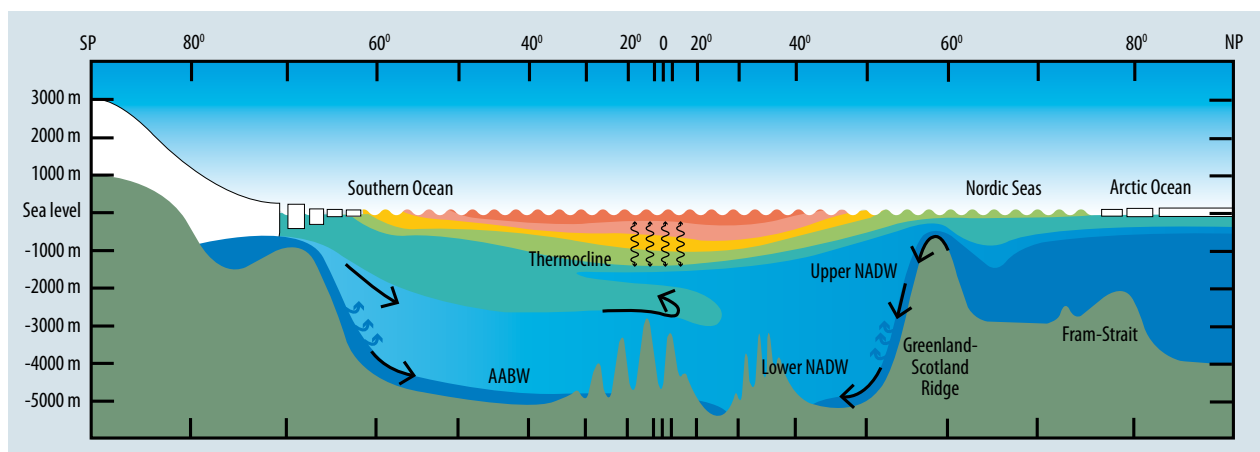


AFBEELDING 4. | *Banded Iron Formatie, afwisselende Fe- en Si-oxide laagjes en pyriet.*



AFBEELDING 5. | *Horizontale en verticale zonering van een oceanbekken. Let op de snelle afname met diepte van zonlicht en temperatuur.*





AFBEELDING 6. | Noord/zuid doorsnede door de Atlantische Oceaan. De verschillende watermassa's zijn duidelijk te onderscheiden.

Belangrijke BIF-voorkomens vinden we in Australië, Zuid-Afrika en Amerika en deze zijn belangrijke bronnen van ijzererts. De diepe oceanen in het Precambrium bleven nog lang *anoxisch* (zuurstofloos). Sinds het Cambrium heeft deze situatie in de diepzee steeds gefluctueerd, *oxische* (zuurstofrijke) periodes wisselden af met anoxische condities waarin bodemleven niet mogelijk was. Gedurende deze periodes werden vaak zwarte schalies gevormd, bewijs dat het neerduwrelde organische materiaal niet meer werd afgebroken.

Geometrie van oceanen

Door de actieve platentektoniek heeft de geometrie van de vroegere oceanen voortdurend gevarieerd. De vroegere supercontinenten waren omringd door een wereld-oceaan, in andere tijdvakken waren er juist vele oceanen en binnenzeeën. Ook de af- of aanwezigheid van ijskappen zorgde voor grote variatie in zeespiegelstand. De geometrie van een oceanbekken is bepalend voor de processen die hierin plaatsvinden. Veel van het leven in de oceanen speelt zich in de *fotische zone* af, het gedeelte van de waterkolom waarin het zonlicht nog kan doordringen. Afbeelding 5 laat zien dat in de huidige oceanen deze parameter – en ook de temperatuur – snel met de diepte afnemen. Het biologisch rijkste deel van een oceanbekken is dan ook de kustzone waar voldoende licht is en waar voedingsstoffen overvloedig zijn.

De geometrie van een oceanbekken bepaalt ook welke sedimenten er in verschillende delen van een oceanbekken accumuleren. In de ondiepe gedeelten worden de door rivieren aangevoerde grovere sedimenten afgezet. Met toenemende diepte neemt de korrelgrootte af en accumuleren fijnkorrelige sedimenten. In de niet polaire gedeelten van de oceanen bestaat een groot gedeelte van het sediment uit naar beneden gedwarrelde kalkskeletjes van plankton, voornamelijk foraminiferen en kalkalgen. Het kalkgehalte van deze sedimenten is hoog, soms is het pure kalk. De *White Cliffs of Dover* vormen zelfs het schrijfkrijt: ze bestaan voornamelijk uit de afgestorven skeletjes van kalkalgen.

Op dieptes tussen de 4000 en 5000 meter is het oceanwater onderverzadigd aan kalk. Dit betekent dat de naar beneden zinkende kalkskeletjes rond die diepte oplossen en niet meer de bodem bereiken. Dit niveau heet de *Calciumcarbonaat Compensatie Diepte* (CCD). De skeletjes van organismen die kiezel (silica) voor de bouw gebruiken bereiken de bodem wel, dit zijn met name de radiolaria. In de diepste gedeelten van de oceanen vindt daarom geen kalksedimentatie maar kiezelsedimentatie plaats.

Tenslotte, de oceanen zijn geen homogene bakken met water. In afbeelding 5 is een N/Z doorsnede door de Atlantische Oceaan te zien. Duidelijk zijn de verschillende watermassa's (lagen) te onderscheiden: het *Noord-Atlantisch Diep Water* (NADW) afkomstig van water dat bij Groenland naar de diepte zinkt, het *Antarctisch Bodem Water* (AABW) afkomstig van antarctisch smeltwater, en de *Intermediaire en Oppervlakte Watermassa's*. De meer intens blauwe kleuren corre-

sponderen met hogere concentraties CO_2 en bepalen mede de diepte van de CCD (zie boven).

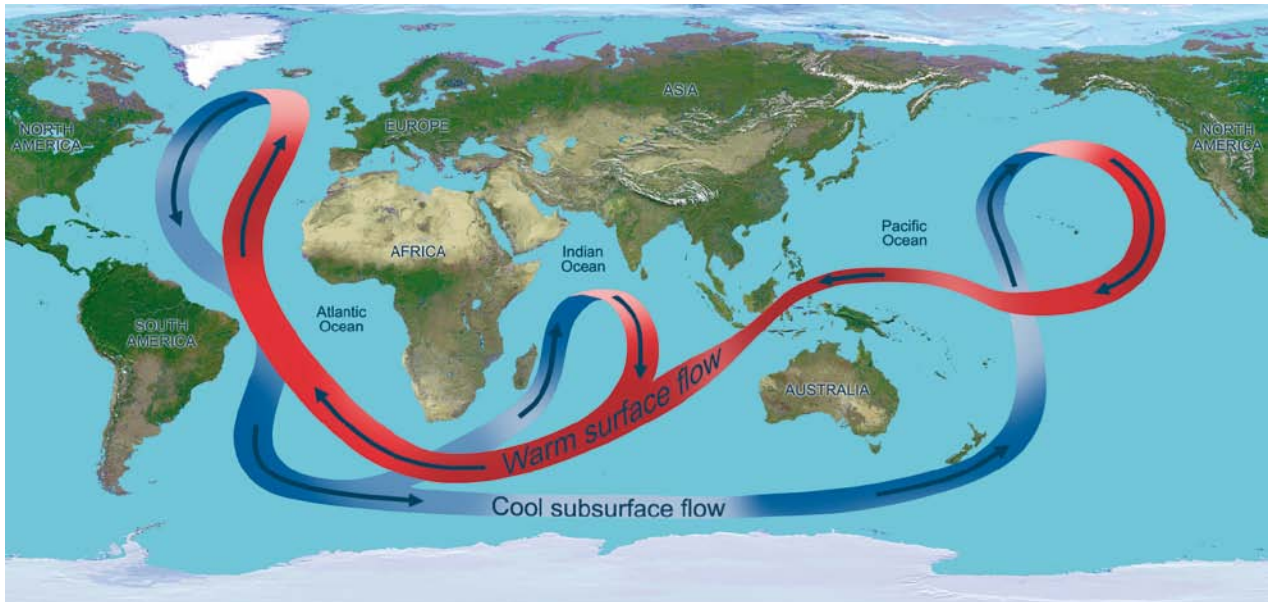
Oceanen en leven

Het aardoppervlak was in eerste instantie erg onherbergzaam. Er was nog geen leven, de atmosfeer was giftig, en de oceanen waren zuurstofloos. Agres-sieve straling op het land werd nog niet door een beschermende ozonlaag tegengehouden. De eerste zuurstof werd, zoals we eerder zagen, geproduceerd door cyanobacteria en werd gebruikt om elementen als ijzer en silica te oxideren tot BIF's (Afb. 4). Pas toen dat proces eindigde, kwam er zuurstof vrij voor andere processen. Vrije zuurstof is extreem giftig, vandaar dat de aanwezigheid ervan aanvankelijk leidde tot een massa-extinctie van het bestaande leven, met name onder de bacteriën. Anderzijds begon met de aanwezigheid van vrije zuurstof in de atmosfeer de opbouw van de ozon-laag, die de Aarde beschermt tegen schadelijke straling. De zuurstof in de oceanen gaf een nieuwe impuls aan de evolutie van het leven.

Tussen 850 en 630 miljoen jaar geleden traden er een aantal koude periodes op die tezamen bekend staan als de *Snowball Earth* periode. De Aarde was toen grotendeels bedekt door ijsmassa's waardoor een statische fase ontstond, die uiteindelijk door de werking van vulkanen die CO_2 uitstootten, werd opgeheven. Meer over deze periode in het artikel van Troelstra "*Ijs in geologische tijd*" in dit nummer op pagina 138.

Na het smelten van het ijs waren de oceanen koud en zaten vol voedingsstoffen. Dit luidde het begin van een





AFBEELDING 7. | Schematische weergave van de Great Ocean Conveyor Belt, de lopende band in de oceanen die warmte naar het noorden transporteert en zo de tropen afkoelt.

nieuwe periode in, het *Ediacaran* (635–542 miljoen jaar geleden), waarin de ontwikkeling plaatsvindt naar de organismen zoals we die nu kennen. Alle organismen uit het Ediacaran hadden nog geen skelet. Hiervoor was een verandering in de oceaanchemie nodig die leidde tot de *biomineralisatie*, de vorming van skeletten..

Dit gebeurde tijdens de Cambrische Explosie. Deze valt in een periode van grote veranderingen, wellicht de belangrijkste periode uit de aardgeschiedenis. Vanaf dit moment worden de grote lijnen in de evolutie van het leven uitgezet. Veranderingen in plaatconfiguratie (tektoniek) en de chemie van de oceanen en atmosfeer zijn van beslissende invloed op de ontwikkeling van de biosfeer.

Een tweede belangrijke gebeurtenis in het Cambrium is de *Substraat Revolutie*. In het Ediacaran bestond de zeebodem nog uit stevige algenmatten, waarop allerlei organismen zich konden vasthechten. In het Cambrium ontstonden voor het eerst gravende organismen (wormen) die verticale gangen maakten. Hierdoor ging de matstructuur verloren en ontstonden “moderne”, losse sedimenten. Voor vastzittende organismen was geen plaats meer, behalve op rotsachtige bodems. Tijdens het Paleozoïcum (543 – 250 miljoen jaar geleden) evolueerde het leven in de oceanen snel. Na de vredige wereld van het Ediacaran ontstonden rovers

(predatoren) die actief op zoek gingen naar een prooi. Op de zeebodem speelden de trilobieten een grote rol, in de kustzones ontstonden rifstructuren en dichte velden zeelelies. De fossiele resten hiervan vinden we o.a. in de bekende Belgische stinkkalken. De vissen maakten een grote ontwikkeling door, in het plankton dreeven graptolieten en acritarchen. Vanaf het Siluur en vooral in het Devoon begonnen de planten langzaam het land te koloniseren. Een bloeitijd was het Carboon waarin de continenten een equatoriale ligging kregen en enorme bossen (steenkol!) aanwezig waren. Het supercontinent *Pangaea* ontstond en oceanen verdwenen. *Pangaea* werd omgeven door de wereldoceaan *Panthalassa*.

In het Mesozoïcum (Trias, Jura en Krijt; 250–65 miljoen jaar geleden) viel *Pangaea* uiteen. Het was een warme periode met stijgende zeespiegels. Belangrijke planktonische groepen als de dinoflagellaten, planktonische foraminiferen en kalkig nanoplankton ontstonden; voor het eerst vond er biogene kalksedimentatie plaats in de diepzee (bv. de *White Cliffs of Dover*). De meteorietinslag aan het einde van het Krijt leidde tot massaal uitsterven.

Het Kenozoïcum (vanaf 65 miljoen jaar geleden) zag vele nieuwe vormen in zee ontstaan. De vorming van ijskappen op Antarctica en Groenland veroorzaakte sterke zeespiegeldaling, met intensieve fluctuaties tijdens de glaciële/interglaciële cycli.

Oceanen en klimaat

Het belangrijkste mechanisme achter alle processen op Aarde is de actieve platen-tektoniek. Deze zorgt er voor dat alle materie steeds wordt gerecycled in zogenaamde kringlopen. Naast de waterkringloop kennen we onder andere de koolstof, stikstof, fosfor en silica kringloop. Zonder deze kringlopen zou het leven op Aarde spoedig tot stilstand zijn gekomen. Immers als alle CO_2 was vastgelegd, als kalkgesteenten of kool, zou er zonder recycling geen koolstof meer aanwezig zijn voor nieuw leven op Aarde.

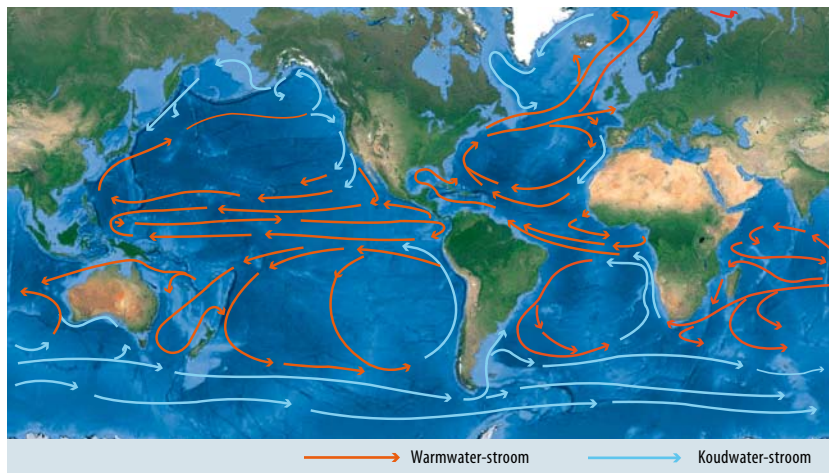
De platen-tektonische configuratie bepaalt ook het patroon van de oceaanstromingen. Afbeelding 7 toont een vereenvoudigd beeld van de grootschalige thermohaliene (= door temperatuur en zoutgehalte aangedreven) oceaancirculatie, die bekend staat onder de naam *Global Ocean Conveyor (Belt) (GOC)*, oftewel de lopende band van de oceaan. Te zien is hoe warm oppervlaktewater uit de tropen via Indonesië, de zuidpunt van Afrika en het Caribisch gebied naar het noorden stroomt, daar afkoelt en afzinkt, waarna een lange tocht over de oceaانبodem naar het zuiden volgt. Het bodemwater duikt op in de Stille Oceaan en begint daar aan de terugreis. Gesteld kan worden dat de GOC de



tropen afkoelt en het klimaat bij ons (als Warme Golfstroom) aangenamer maakt dan voor deze breedtegraad normaal is. Vergelijk de situatie op dezelfde breedtegraad in Canada, waar de invloed van de koude Labradorstroom het klimaat dramatisch bepaalt. Afbeelding 7 is een versimpeling; in werkelijkheid bestaat het systeem uit een complex geheel van oppervlakte en diepere waterstromingen. Afbeelding 8 toont een aantal van de belangrijkste huidige stromingen. Opvallend zijn de grote lussen, de zogenaamde *gyres* in het centrum van de oceanen. Dit zijn als het ware de woestijnen van de zee, gebieden met weinig voedingsstoffen en weinig biologische productiviteit. Te zien is dat iedere gyre een warme en een koude component heeft. Bovendien worden de westkanten van de continenten beïnvloed door koude stromingen, de oostkanten door warme. Dat heeft grote consequenties voor het leven in die gebieden. Een voorbeeld is de verspreiding van koraalriffen op Aarde (Afb. 9). Duidelijk te zien is, dat de rifzone beperkt is tot het gebied tussen 30 graden noorder- en zuiderbreedte en dat de riffen voornamelijk aan de (warme) oostkant van de continenten voorkomen, een duidelijke koppeling aan de heersende oceaanstromingen. NB: de noordelijke Atlantische Oceaan vormt een uitzondering op de “west/koud-oost/warm-regel”. De warme golfstroom loopt daar langs de Europese west-kusten; de koude langs de Noord-Amerikaanse oostkust.

Oceanen en toekomst

Op langere termijn zullen veranderingen in de dimensie en positie van de oceanen vooral het resultaat van de platentektoniek zijn. Sommige oceanen zullen nog groter worden, andere zullen verdwijnen. Modellen laten zien dat over 250 miljoen jaar een nieuw supercontinent zal zijn ontstaan: een enkele grote landmassa met daaromheen een grote wereld oceaan. Er zijn dan 500 miljoen jaar voorbij gegaan sinds het uiteenvallen van het vorige supercontinent Pangaea en de wereldoceaan Panthalassa. De voortgaande tektonische ontwikkeling van de Aarde zal net als in het verleden sterke invloed hebben op de evolutie van het leven en het klimaat op Aarde.



AFBEELDING 8. | De belangrijkste warme en koude oppervlactestromingen.



AFBEELDING 9. | De huidige verspreiding van koraalriffen (geel) op Aarde.

Op korte termijn kan de invloed van de mens echter aanzienlijke gevolgen voor de oceanen hebben. De opwarming van de atmosfeer heeft allereerst invloed op de aanwezigheid van ijs op Aarde. De dimensies van het zee-ijs nemen jaarlijks af, waardoor minder zonlicht wordt teruggekaatst (albedo-effect) en de oceanen langzaam opwarmen. Bij opwarming zal het water uitzetten (thermische expansie) en dus een zeespiegelstijging tot gevolg hebben.

Naast het zee-ijs zullen ook de ijskappen en gletsjers verder afsmelten. Smeltende ijskappen leveren zoet water aan de oceanen. Berekend is, dat het smelten van de ijskap op Groenland een stijging van de zeespiegel met 6 meter ten gevolge zal hebben, smelt van de ijskap op Antarctica voegt daar nog eens 60 meter aan toe. De stijging zal niet overal op Aarde dezelfde waarde hebben (zie het artikel van De Boer & Van de Wal in dit nummer op pagina 144)). Het verdwijnen van zee-ijs en de toevoer van zoetwater naar de oceanen zal behoorlijke gevolgen hebben voor de oceaancirculatie en dus ook voor het klimaat op Aarde.

De afgelopen decennia heeft de mens voor een sterke toename in CO_2 -gehalte in de atmosfeer gezorgd. Tussen de 30-40% van deze toename wordt door de oceanen opgenomen. Hierdoor is de pH van de oceanen afgenomen van 8,24 naar 8,14, met andere woorden, de oceanen worden zuurder. Dit kan grote consequenties hebben voor calcificerende organismen zoals koralen en kalkig nannoplankton. Hierdoor wordt de koolstofcyclus verstoord met gevolgen voor het aardse klimaat. Terugdringen van verdere CO_2 -uitstoot is dus van het hoogste belang.

De invloed van de mens op de oceanen is verder duidelijk merkbaar in de vervuiling. Steeds beter wordt bekend dat zich in de oceanen enorme hoeveelheden microplastics bevinden, die in grote concentraties worden aangetroffen in organismen als vissen en zeevogels.

De gevolgen van overbevissing zijn nu al duidelijk te merken. Menselijk handelen grijpt diep in het functioneren van mariene ecosystemen in, zonder dat we de rol van de oceanen in detail kennen. We moeten dus zorgvuldig met onze oceanen omgaan, hoewel ze ook zonder ons hun eeuwige cyclus zullen voortzetten.