

Planeet Aarde

Een planeet die tot leven kwam

Manuel Sintubin

KU Leuven, Faculteit Wetenschappen, Celestijnenlaan 200E, B-3001 Leuven, manuel.sintubin@kuleuven.be

Planeet Aarde is een kleine rotsplaneet in een planeetstelsel rond een middelgrote hoofdreeksster, de Zon. Niets bijzonders dus. Zeker in het licht van de ontdekking van steeds meer planeetstelsels en exoplaneten. De vraag die zich dan ook opdringt, is of er ergens in het universum een *Aarde 2.0* te vinden is ... en dus of er – al of niet geëvolueerd – buitenaards leven bestaat.

De vaststelling dat planeten niets bijzonder zijn in ons universum dwingt ons inderdaad vanuit een ander perspectief naar onze eigen planeet te kijken, niet meer vanuit het 'lokale' perspectief van ons 'klassiek' zonnestelsel, maar vanuit het kosmische perspectief. Planeet Aarde is de enige planeet waarvan we zeker weten dat ze (geëvolueerd) leven herbergt. Op onze eigen planeet ligt dan misschien ook de sleutel om een antwoord te kunnen bieden op de vraag naar leven op (aardeachtige) exoplaneten.

Tijdens de vorming van de Aarde, zo'n 4,56 miljard jaar geleden, deed zich een differentiatie voor die resulteerde in de concentrische – dus geordende – opbouw van de Aarde, met een kern, mantel en een korst. De belangrijkste bron van energie die de jonge Aarde vorm gaf, is de interne oerwarmte, die de planeet meekreeg bij de vorming. Maar onze planeet kwam tot leven. Een nieuwe energiebron werd aangetapt. De prille biosfeer ontwikkelde immers een manier om de zonne-energie te 'oogsten'. Planeet Aarde ontwikkelde zich tot een complex, zelfregulerend systeem, waarin de biosfeer een actieve, zelfs dominante rol speelt. Dat robuuste systeem heeft er uiteindelijk ook voor gezorgd dat het klimaat op Aarde vrij constant is gebleven voor meer dan 4 miljard jaar. **Planeet Aarde** is in dat opzicht meer dan gewoon de 'Aarde'. Planeet Aarde incarneert een hoger niveau van planetaire complexiteit, tot nader order uniek in het universum. Vanuit dit Aards perspectief kom je onvermijdelijk tot de vaststelling dat geëvolueerd buitenaards leven misschien toch niet zo vanzelfsprekend is. Leven heeft immers slechts een klein gelegenhedenvenster om vroeg in de geschiedenis van een planeet zodanig te evolueren dat het de planetaire omstandigheden naar zijn hand kan zetten. Anders maakt het prille leven geen kans, sterft het uit en blijft een dode planeet achter.

Deze driedelige cursus is opgebouwd rond drie thema's: 'Earthrise, 50 jaar later'; 'Planeet Aarde, een madeliefjeswereld'; en 'De mens, een planetaire leerling-tovenaar'.

In het eerste deel 'Earthrise, 50 jaar later' starten we ons verhaal op dat bijzondere moment in 1968 waarop de mens de aarde ontdekte. Maar in 1968 valt ook de puzzel in elkaar van een zoektocht naar een overkoepelende theorie om de dynamiek van de aarde te verklaren. Het paradigma van de platentektoniek ziet dat jaar het daglicht. Maar we gaan ook 12 jaar terug in de tijd. In 1956 wordt immers voor het eerst de ouderdom van onze planeet effectief gemeten. De mens ontdekt de diepe tijd en realiseert plots dat hij zelf maar een akkefietje is in het kosmische verhaal.

In het tweede deel 'Planeet Aarde, een madeliefjeswereld' stellen we ons de vraag of Planeet Aarde uniek is in die kosmische wereld vol met (aardse) exoplaneten. We gaan op zoek naar de elementen die onze planeet tot een 'levende planeet' maken.

En uiteindelijk in het derde deel 'De mens, een planetaire leerling-tovenaar' zoomen we in op 'onze wereld' die we – als volwaardige leerling-tovenaar – onherkenbaar aan het veranderen zijn. Vanuit de kennis over hoe onze planeet werkt, ontwaren we hoe groot de uitdagingen zijn waarvoor de mens in de eenentwintigste eeuw staat.

De ontdekking van de tijd

In de tweede helft van de 18^e eeuw overheerste een eerder mechanistische visie op de werking van de aarde. Geleerden gingen op zoek naar tijdloze, universele natuurwetten die de werking van de aarde verklaren. Dit mondde toen uit in een overvloed van **geothorieën**. De aardgeleerden zagen in de werking van de aarde een tijdloze, eeuwig terugkerende opeenvolging van 'werelden'. De Schotse naturalist James Hutton (1726-1797), een van de grondleggers van de geologie, zag dan ook "*no vestige of a beginning, no prospect of an end*" (Royal Society of Edinburgh, 1788). Het enige tijds kader toen was dat van de chronologen. Zo berekende de Ierse aartsbisschop James Ussher (1581-1656) reeds in 1654 op basis van de Bijbelse genealogie de ouderdom van de schepping, in het jaar 4004 voor Christus, zo'n 6000 jaar geleden.

In de 19^e eeuw stond een nieuwe lichte aardgeleerden op die vertrokken vanuit waarnemingen om zo de werking van de aarde empirisch te doorgronden. Een mijlpaal in de ontwikkeling van de geologie was het principe van het **uniformitarianisme**, eerst ontwikkeld door James Hutton, maar later geformaliseerd door de Schotse geoloog Charles Lyell (1797-1875) in zijn *Principles of Geology* (1830-1833). Dit actualiteitsprincipe poneert dat de geologische processen in het verleden identiek zijn aan de processen zoals we ze vandaag om ons heen kunnen waarnemen. Hierbij legt Lyell de nadruk op de geleidelijkheid van de aardse processen. Deze empirische aanpak liet meer en meer uitschijnen dat de aarde een lange prehistorische geschiedenis moet gehad hebben. **Geologie** werd zo de geschiedschrijving van de aarde.

Met het eerste volume van Lyell's *Principles of Geology* in zijn bagage vertrok Charles Darwin (1809-1882) op zijn reis rond de wereld aan boord van *HMS Beagle*. Het uniformitarianisme zal zijn denken sterk beïnvloeden wanneer hij de 'evolutie' van de aarde en van het leven op aarde tracht te reconstrueren. Ook hij komt snel tot de vaststelling dat voor 'zijn' evolutie veel tijd nodig is. In de eerste editie van *On the origin of species* (1859) doet hij zelfs een poging om op basis van het uniformitarianisme een ouderdom te berekenen van een bijzondere geologische structuur in Zuid-Engeland. Hij komt uit op een ouderdom van 300 miljoen jaar.

Om de ware ouderdom van de aarde te weten te komen, moeten de geologen wachten tot na de ontdekking van radioactiviteit door de Franse fysicus Henri Becquerel in 1896 en van radioactieve elementen door Marie en Pierre Curie in 1898. In het begin van de 20^e eeuw wordt het principe van de **radiometrische klok** uitgewerkt door de Amerikaanse chemicus Bertram Boltwood en de Britse fysicus Ernest Rutherford. Het is de Britse geoloog Arthur Holmes (1890-1965) die deze radiometrische dateringstechniek voor het eerst gaat toepassen op gesteenten. Het oudste gesteente dat hij dateert, is 1,6 miljard jaar oud. Hij schat dan ook dat de aarde nog een pak ouder moet zijn, mogelijk zelfs 2 à 3 miljard jaar oud. In dezelfde periode doen kosmologen een poging om de ouderdom van het uitdijende heelal te berekenen op basis van de zogenaamde Hubbleconstante, die de verhouding weergeeft van de snelheid waarmee een sterrenstelsel zich van ons af beweegt en de afstand tot dat sterrenstelsel. In 1929 deed Edwin Hubble (1889-1953) zelf een eerste schatting van deze constante en bekam een waarde van 500 km/s per megaparsec. Men kwam uit op een ouderdom van 1,8 miljard jaar, nauwelijks iets ouder dan de oudste gesteenten die Holmes radiometrisch had gedateerd. Er stelde zich een kosmologische ouderdomsprobleem.

Pas in 1956 bepaalde de Amerikaanse geochemicus Clair Cameron Patterson (1922-1995) de ouderdom van de aarde op basis van een radiometrische datering van insluitsels van de Canyon Diablo-meteoriet. Deze datering levert een ouderdom op van ongeveer 4,55 miljard jaar. Later is deze datering nog verfijnd op basis van radiometrische dateringen op andere meteorieten. Vandaag nemen we dan ook aan dat de aarde ongeveer **4,568 miljard jaar** oud is. De meest recente berekening van de ouderdom van het heelal, op basis van het Lambda-CDM model (Planck Collaboration 2015; met een Hubbleconstante van 67,74 km/s per megaparsec), komt uit op een ouderdom van ongeveer **13,779 miljard jaar**.

Dus pas in de tweede helft van de 20^e eeuw ontdekken we de ware ouderdom van de aarde en het heelal. De Amerikaanse auteur John McPhee had het in 1981 dan ook over '*deep time*', een tijds kader dat we als mens misschien wel kunnen meten, maar absoluut niet kunnen vatten. Het is in dit tijds kader dat de kosmische evolutie zich nu gaat afspelen, zowel de 13,8 miljard jaar kosmische geschiedenis, de 4,57 miljard jaar aardse geschiedenis, als de 3,8 miljard jaar geschiedenis van het leven op aarde.

Planeet Aarde, een levende planeet

1968 is een bijzonder jaar in ons verhaal. Het is niet alleen het jaar van het nieuwe paradigma van de platen tektoniek. Op kerstavond maken de Apollo 8-astronauten een memorabele foto van de Aarde die uiteindelijk de manier waarop de mens naar de Aarde kijkt voorgoed heeft veranderd, de **Earthrise**. Astronaut William Anders vatte de verwondering mooi samen: "*We came all this way to explore the Moon, and the most important thing is that we discovered the Earth*".

In dezelfde periode legde de Engelse onafhankelijke wetenschapper **James Lovelock** zich toe op de vraag hoe men zou kunnen achterhalen of er leven is op Mars. Wat hem bij deze denkoefening onmiddellijk opviel, was de totaal andere samenstelling van de atmosfeer van Mars, Venus en de Aarde. In de Aardse atmosfeer zit nauwelijks koolzuurgas (CO_2). De concentratie aan het reactieve zuurstof (O_2) is dan weer uitzonderlijk hoog. Dit betekent dat de Aardse atmosfeer niet in thermodynamisch evenwicht is, maar in een dynamisch evenwicht (*steady state*). Het reactieve zuurstof moet permanent aangemaakt worden. En het is het leven op Aarde dat hiervoor verantwoordelijk is via fotosynthese.

De zwakke-zonparadox

In 1972 opperde de Amerikaanse astronoom Carl Sagan (1934-1996) een schijnbare paradox, de **zwakke-zonparadox**. Uit berekeningen blijkt immers dat de jonge Zon ongeveer 25 à 30% zwakker was dan de Zon vandaag. Dit zou betekenen dat met de huidige atmosferische samenstelling de gemiddelde globale temperatuur op Aarde onder het vriespunt gebleven zou zijn tot ongeveer 2 miljard jaar geleden. Maar sedimentaire gesteenten van meer dan 3,8 miljard jaar bewijzen dat vloeibaar water toen al aanwezig moet geweest zijn op Aarde. Gezien het model van de jonge zwakke Zon niet in vraag wordt gesteld, kan dit alleen maar betekenen dat de atmosferische samenstelling – en het daarbij horende broeikas effect – doorheen de Aardse geschiedenis is gewijzigd.

De oorspronkelijke Aardse koolzuurgasatmosfeer is dan ook omgebouwd in de huidige stikstof-zuurstofatmosfeer. Twee processen zijn hiervoor verantwoordelijk, enerzijds het massaal vastleggen van koolzuurgas, met een sterke reductie van het broeikas effect tot gevolg, en anderzijds het produceren van het reactieve zuurstof. Het leven op Aarde is verantwoordelijk voor beide processen, enerzijds door de aanmaak van kalkgesteente in het silicaatverweringsproces, anderzijds door fotosynthese. Leven blijkt dan ook cruciaal te zijn voor de homeostasis van de **Aardse madeliefjeswereld**. Want zonder leven had de oorspronkelijke koolzuur atmosfeer bij een steeds helderder wordende Zon onvermijdelijk een uit-de-hand-lopend broeikas effect veroorzaakt. De Aarde zou hetzelfde lot beschoren zijn geweest als onze zusterplaneet Venus.

Een madeliefjeswereld

Hoofdrekssterren, zoals de Zon, worden steeds helderder tijdens hun bestaan. De planetaire omstandigheden veranderen dan ook tijdens de levensduur van elke planeet rond een dergelijke ster. James Lovelock ontwikkelde in de jaren '70 een computersimulatie van een virtuele planeet rond zo'n ster waarop enkel witte en zwarte madeliefjes groeien, de **madeliefjeswereld** (*Daisyworld*). Enkel door de groei van witte en/of zwarte madeliefjes wordt de globale temperatuur op de madeliefjeswereld optimaal gehouden voor de madeliefjes. Hij ziet zijn zelfregulerende madeliefjeswereld als een mooi voorbeeld van een levende planeet (zie fig. 1).

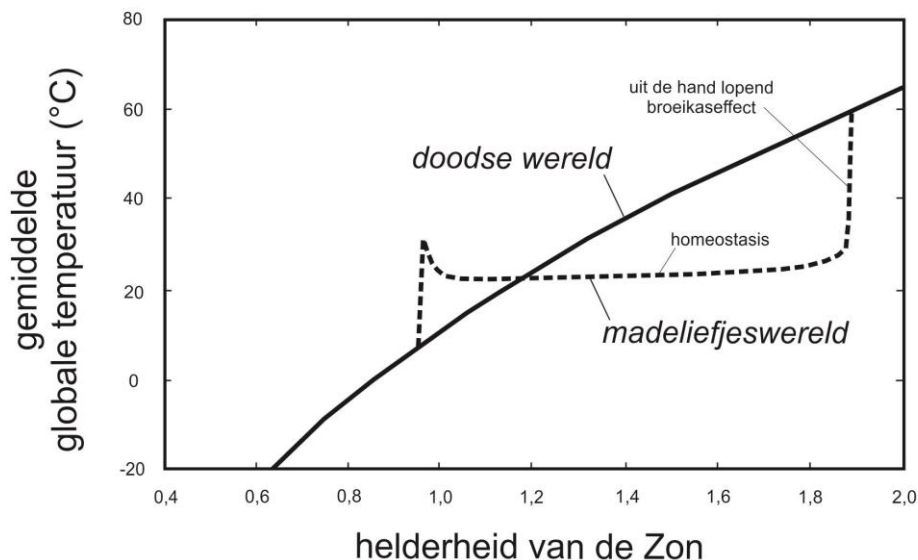


Fig. 1. De evolutie van de globale planetaire temperatuur op de madeliefjeswereld bij toenemende helderheid van de Zon (Sintubin 2012).

De planetaire geschiedenis van de madeliefjeswereld begint met de massale groei van zwarte madeliefjes in het evenaarsgebied om voldoende warmte van de zwakke jonge ster vast te houden. Een positieve terugkoppeling leidt tot een toename van de planetaire temperatuur. Bij toenemende helderheid verdringen

witte madeliefjes geleidelijk de zwarte madeliefjes uit het evenaarsgebied naar de polen toe. De witte madeliefjes zorgen voor een negatieve terugkoppeling. De competitie van witte en zwarte madeliefjes leidt tot de fase van een stabiele planetaire temperatuur, de **homeostasis**. Door verder toenemende helderheid van de ster wordt het uiteindelijk ook te warm voor de laatste witte madeliefjes rond de polen. De madeliefjeswereld verliest het pleit aan een uit-de-hand-lopend broeikaseffect.

Gaia

Deze denkoefening leidde James Lovelock tot de ontwikkeling van het concept van een levende planeet, **Gaia**, genoemd naar de Griekse godin van de Aarde. Voor hem evolueerde de biosfeer zich niet onafhankelijk van de Aarde door zich aan te passen aan veranderende planetaire omstandigheden. Daarentegen beschouwt hij de biosfeer als een actieve kracht die de Aardse systemen mee vormgeeft, zodanig zelfs dat de biosfeer de planetaire omstandigheden comfortabel tracht te houden voor het leven op Aarde zelf. Het leven op Aarde wordt gezien als een integraal deel van het Aardse, zelfregulerende systeem. Naast **platentektoniek** en **water**, blijkt **leven** op Aarde het derde fundament van Planeet Aarde te zijn.

Zuurstof

Toen het prille leven de overstap maakte van **anoxogene fotosynthese**, waarbij H₂S als electronendonor dient, naar **oxygene fotosynthese**, waarbij het alom aanwezige H₂O als electronendonor dient, kwam plots een afvalproduct vrij, zuurstof (O₂). In de vroege atmosfeer was er nauwelijks zuurstof aanwezig. Alles wijst erop dat rond 2,2 miljard jaar geleden de zuurstofconcentratie in de atmosfeer op geologische relatief korte tijd sterk is toegenomen. We spreken van de **zuurstofcrisis** (*Great Oxidation Event*). Dit moet immers geleid hebben tot het massaal uitsterven van anaeroob leven. Maar een zuurstofrijke atmosfeer zorgde ook voor nieuwe Goudlokjevoorwaarden. Rond 1,8 miljard jaar geleden verschenen de **eukaryoten** op het toneel. Celademhaling liet toe een volgende stap in complexiteit te zetten. Uiteindelijk resulteert dit in meercelligheid. Die **meercelligheid** komt zo'n 540 miljoen jaar geleden tot bloei tijdens de Cambrische Explosie.

Maar een zuurstofrijke atmosfeer opende nog een andere opportuniteit voor het leven op Aarde. Hoog in de atmosfeer, meer specifiek in de stratosfeer (op zo'n 25 à 30 km hoogte), wordt vanuit zuurstof (O₂) ozon (O₃) aangemaakt onder invloed van de hoogenergetische ultravioletstraling van de Zon. Eigenlijk is dit een dynamische evenwicht tussen zuurstof en ozon, de Chapmancyclus, dat ervoor zorgt dat de schadelijke UV-straling wordt tegengehouden. Dit UV-schild, de **ozonlaag**, heeft dan ook het leven op Aarde toegelaten de ondiepe zeeën en uiteindelijk ook het land te koloniseren.

Platentektoniek, meer dan een planetair afkoelingsmechanisme

In 1968 kreeg het nieuwe paradigma van de platentektoniek dus finaal vorm. Sindsdien kijken geologen op een totaal andere manier naar de Aarde. Tot nader order is platentektoniek een uniek proces in ons zonnestelsel, en bij uitbreiding in het universum. Sindsdien hebben we echter ook geleerd dat platentektoniek een van de drie fundamentelementen vormt – naast water en leven – van het zelfregulerende systeem, dat we **Planeet Aarde** noemen.

Planetaire afkoeling

Gesteenten zijn zeer slechte warmtegeleiders. Indien de warmteoverdracht van de interne warmte door de aardkorst dus enkel zou gebeuren via warmtegeleiding, dan zou veel warmte gevangen blijven onder de aardkorst. Onder de aardkorst zou het geleidelijk opwarmen wat zou leiden tot het opsmelten van de aardkorst en vervolgens globaal vulkanisme. Het grootste deel van de warmteoverdracht gebeurt echter ter hoogte van de mid-oceanische spreidingsruggen, de plaats waar twee tektonische platen uit elkaar drijven. Deze warmteoverdracht gebeurt door **advectie**. Het oceaankorst sijpelt de oceaankorst in, wordt vervolgens opgewarmd ter hoogte van de spreidingsruggen. Het hete water wordt terug de oceaankorst ingestuwd. We krijgen een hydrothermale circulatie (cf. *'black smokers'*) ter hoogte van de spreidingsruggen die op een efficiënte manier zorgt voor voldoende warmteoverdracht zodat geen interne warmte wordt vastgehouden onder de aardkorst. Deze hydrothermale circulatie combineert dus twee fundamentelementen van Planeet Aarde, water en platentektoniek. Beiden zorgen voor de planetaire afkoeling.

Subductie

De buitenste schil van de Aarde is opgedeeld in 'stijve' **tektonische platen**. Er zijn drie typen plaatgrens: (1) een divergente plaatgrens, waar twee tektonische platen uit elkaar drijven; (2) een convergente plaatgrens, waar twee tektonische platen naar elkaar toe drijven; en (3) een conservatieve plaatgrens, waar twee tektonische platen langs elkaar heen schuiven. Terwijl de divergente plaatgrenzen – de mid-oceanische spreidingsruggen – een cruciale rol spelen in de planetaire afkoeling, blijken de **subductiezones**, de plaatsen waar oceanisch deel van een tektonische plaat onder een andere tektonische plaat duikt, ook een hoofdrol spelen in het Aardse systeem. En dit om verschillende redenen. Vooreerst is subductie de drijvende kracht

achter de plaattektonische bewegingen. Of meer specifiek, de subductietrekkkracht die een wegduikende tektonische plaat uitoefent op de rest van de tektonische plaat. Subductie zorgt ook voor de aanvoer van water in de mantel. We krijgen zo onder de lithosferische platen een 'natte' mantel. Dit is cruciaal om het opsmelten van mantelgesteente – en dus vulkanisme – überhaupt mogelijk te maken. Dat vulkanisme speelt dan weer een belangrijke rol in de globale klimaatregulering (zie verder). Bovendien vindt door het vulkanisme ter hoogte van de subductiezones een belangrijk proces plaats, namelijk dat van de vorming van continentale korst.

Continentalen

Stel u eens een Aarde voor zonder continenten. Het aardoppervlak zou volledig ingenomen zijn door een oceaan. Maar als een waterwereld zou onze planeet nooit geworden zijn zoals we ze vandaag kennen. De vorming van continentale korst is dan ook essentieel voor het tot stand komen van Planeet Aarde.

De primaire korst op Aarde was een afkoelingskorst (anorthosiet) van de prille magmaocean. Bij de initiatie van platentektoniek ontstaat door het partieel opsmelten van het mantelgesteente (peridotiet) een secundaire korst, bestaande uit basalt. Deze secundaire korst vormt de **oceanische korst**. De 'stijfheid' van de oceanische korst is in belangrijke mate verantwoordelijk voor de stijve tektonische platen. Ter hoogte van subductiezones, waar oceanische korst terug de mantel induikt, vindt opnieuw een partieel opsmelten plaats, maar nu van de secundaire, basaltische, oceanische korst. Het resultaat is een tertiaire korst, namelijk **continentale korst** (granodioriet). Dit unieke differentiatieproces zorgt er wel voor dat het gesteente steeds lichter wordt. De granodiorietische continentale korst heeft een lagere dichtheid dan de basaltische oceanische korst.

De lager dichtheid van continentale korst heeft een aantal belangrijke gevolgen voor het Aardse systeem. De soliede aardkorst 'drijft' als het ware op de meer viskeuze mantel. Deze eigenschap kennen we als **isostasie**. Hoe lichter de korst, hoe minder diep deze wegzakt in de mantel, dus hoe hoger een mogelijk reliëf. Oceanische korst is relatief zwaar (gemiddelde dichtheid van $\sim 2,9 \text{ g/cm}^3$) en zakt dus diep weg in de mantel. Vandaar ook dat de oceanen gemiddeld 4 à 5 km diep zijn. Continentale korst is relatief licht (gemiddelde dichtheid van $\sim 2,7 \text{ g/cm}^3$) en blijft dus 'bovendrijven'. Vandaar ook dat er continenten bestaan die boven het zeeniveau uitsteken. De Aarde is hierdoor geen waterplaneet. De gemiddelde hoogte van de continenten is ongeveer 1000 meter. Continenten zouden dus niet bestaan hebben zonder de vorming van tertiaire korst, dus zonder platentektoniek.

Doordat continentale korst een lage dichtheid heeft, kan deze ook niet langer meer gerecycleerd worden ter hoogte van de subductiezones. Bij subductie wordt de continentale korst er als het ware afgeschraapt. Eenmaal gevormd, blijft continentale korst dus aan het aardoppervlak bestaan. De totale hoeveelheid continentale korst neemt dus permanent toe. Continenten groeien steeds aan. Wanneer nu continenten ter hoogte van een subductiezone met elkaar 'botsen', ontstaan gebergten. Ook deze gaan hun rol spelen in de klimaatregulering door het creëren van een potentieel aan verweering en erosie (zie verder).

Continentendrift

Een gevolg van de plaattektonische bewegingen is dat continenten ten opzichte van elkaar verschuiven. Reeds bij het begin van de 20^e eeuw had Alfred Wegener dit concept van de **continentendrift** geponeerd in zijn boek over *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Dat de geografische configuratie van continenten constant verandert, heeft enerzijds een belangrijke invloed op de circulatie in oceanen en de atmosfeer, en dus de warmtehuishouding op Planeet Aarde. Anderzijds speelt de geografische configuratie van de continenten een cruciale rol in de evolutie van het leven en de biodiversiteit.

Opmerkelijk is dat op bepaalde momenten in de Aardse geschiedenis alle continenten versmelten in een **supercontinent**. We ontwaren een supercontinentcyclus, waarbij een supercontinent uiteenvalt in kleinere continenten die eerst van elkaar wegdrijven, maar die vervolgens terug naar elkaar beginnen te bewegen om uiteindelijk een nieuw supercontinent te vormen. Deze supercontinentcyclus blijkt een enorme impact te hebben op het Aardse klimaat. Het is immers verantwoordelijk voor de afwisseling tussen **broeikastijden** en **ijskeldertijden** (zie verder).

Systeem Aarde

Rond meer en meer sterren worden planeetstelsels ontdekt. Ook worden meer en meer aardeachtige exoplaneten ontdekt. En meer en meer worden exoplaneten gedetecteerd in de bewoonbare zone. Voor velen is de vraag dan ook niet meer of er buitenaards leven is, maar wanneer we het gaan ontdekken. Maar laten we ons terugkeren naar die ene planeet in het universum, waarvan we zeker zijn dat ze leven herbergt: Planeet Aarde. Als we beter begrijpen hoe deze levende planeet echt werkt en welke rol leven hierin speelt, wordt het misschien makkelijker te antwoorden op de vraag of leven op exoplaneten in de bewoonbare zone rond een ster eerder de regel dan de uitzondering is.

Systeemdenken

Een **systeem** is een geïntegreerd geheel dat bestaat uit een aantal onderdelen die met elkaar interageren en/of van elkaar afhankelijk zijn. Een systeem is gescheiden van zijn omgeving en kan op verschillende manieren in relatie staan met zijn omgeving. In een **open systeem** is er een uitwisseling van energie en materie met de omgeving. In een **gesloten systeem** is er enkel een uitwisseling van energie met de omgeving. In een **geïsoleerd systeem** is er geen uitwisseling met de omgeving. Een dergelijk systeem evolueert naar thermodynamisch evenwicht. Planeet Aarde kan gezien worden als een gesloten systeem. De uitwisseling van materie met de kosmische omgeving is immers verwaarloosbaar.

Door de uitwisseling van energie en/of materie met de omgeving ontstaat een dynamisch evenwicht binnen het systeem, onderhouden door wisselwerkingen tussen systeemonderdelen. Essentieel in deze interne dynamiek zijn de **gekoppelde processen** (*coupling*). Een positieve koppeling werkt versterkend, een negatieve koppeling werkt afzwakkend. Deze gekoppelde processen maken deel uit van een **terugkoppeling** (*feedback*), waarbij een deel van het resultaat van een proces terug als invoer van het proces dienstdoet. Een positieve terugkoppeling leidt tot een uit de hand lopende versterking van het proces. Een negatieve terugkoppeling heeft een stabiliserend effect op het zelfregulerende systeem. Negatieve terugkoppeling is dan ook cruciaal om een dynamische evenwicht (*steady state*) van het systeem in stand te houden.

Een zelfregulerend systeem kent ook verschillende **functioneringstoestanden**, waarin een dynamisch evenwicht onderhouden wordt door het stabiliserende effect van negatieve terugkoppelingen. Een functioneringstoestand kan tot op een zeker niveau fluctuaties in zijn omgevingseigenschappen verdragen. Als echter een omgevingseigenschap een zekere drempelwaarde overschrijdt, is het mogelijk dat het systeem omslaat naar een andere functioneringstoestand. Planeet Aarde kent twee functioneringstoestanden: een broeikaswereld (*Greenhouse world*), eerder de regel, en een ijskelderwereld (*Icehouse World*), eerder de uitzondering. Deze Aardse functioneringstoestanden hangen nauw samen met de supercontinentcyclus. Sinds 2,5 miljoen jaar is de Aarde terug in de ijskelder gedoken.

Systeem Aarde in een notendop

Systeem Aarde zien we dus als een gesloten systeem. De aandrijving van het Aardse systeem wordt in belangrijke mate bepaald door de thermische geschiedenis van de planeet, in het bijzonder door de wijze waarop de planeet geleidelijk afkoelt. Systeem Aarde heeft twee energieleveranciers, de interne oerwarmte en zonne-energie. De onderdelen van Systeem Aarde zijn een aantal sferen, reservoirs van energie en materiaal. Deze sferen zijn open subsystemen. De vier subsystemen van Systeem Aarde zijn de **geosfeer**, de **atmosfeer**, de **hydrosfeer**, en de **biosfeer**. Door zelfregulering tracht Systeem Aarde de planetaire omstandigheden zoveel mogelijk te stabiliseren. Het systeem is dan ook in permanente verandering (*global change*). Systeem Aarde reageert op veranderingen die van buiten of van binnen komen.

Uiteindelijk zijn er drie fundamenten van Systeem Aarde: **platentektoniek**, **water** en **leven**. Neem een van deze fundamenten weg en het systeem valt in duigen. Zonder platentektoniek geen leven, maar zonder leven ook geen platentektoniek of vloeibaar water.

Wanneer begon de platentektoniek?

Alles wijst erop dat reeds vroeg in de Aardse geschiedenis continentale korst gevormd werd. De oudste zirkoon, een zo goed als onverwoestbaar mineraal dat typisch is voor 'jonge' continentale korst, is immers meer dan 4,3 miljard jaar oud. Maar dit betekent ook dat er toen al water – en dus oceanen – moet aanwezig geweest zijn aan het aardoppervlak. En een vorm van recyclage van oceanische korst.

Wanneer platentektoniek geïnitieerd is, blijft nog altijd een van de grote '*origins*' vragen in de geologie. We zijn zo goed als zeker dat er al platentektoniek was zo'n miljard jaar geleden. Maar wat daarvoor? Diverse andere theorieën situeren de aanvang van platentektoniek tussen de 2,8 en de 4,3 miljard jaar geleden.

Wanneer ontstonden de oceanen?

De oudste zirkonen wijzen dus al op de aanwezigheid van water op onze jonge Aarde. Alles wijst er nu op dat reeds 4 miljard jaar geleden oceanen het aardoppervlak bedekte. Omdat toen de continenten nog maar ontzettend klein waren, kan men gerust spreken van een waterwereld.

De oorsprong van de oceanen is nog steeds geen uitgemaakte zaak. Een klassiek model suggereert een buitenaardse oorsprong van het water op Aarde, afkomstig van primitieve meteorieten en waterrijke kometen, die miljoenen jaren lang na de solidificatie van de laatste magmaoceaan op de jonge Aarde terecht kwamen. Recent onderzoek wijst dan weer meer in de richting dat het Aardse water mogelijk afkomstig is uit de zonnenevel. Het water uit de zonnenevel zou net door de magmaoceaan geabsorbeerd zijn geweest.

Wanneer ontstond het leven?

Recente studies wijzen meer en meer uit dat het leven op Aarde ontzettend vroeg ontstaan is en uiterst snel aan het evolutionaire avontuur begonnen is. De **RNA wereld** is mogelijk zo'n 4,2 miljard jaar oud. Onze laatste

gemeenschappelijke voorouder, **LUCA** (*Last Universal Common Ancestor*), leefde zo'n 3,8 à 4,0 miljard jaar geleden, tijdens het *Late Heavy Bombardement*, een periode van intense inslagen. Uiteindelijk zal het meer dan 3 miljard jaar duren alvorens het leven alle registers opentrekt met een explosie van meercellig leven (de zogenaamde 'Cambriëse explosie').

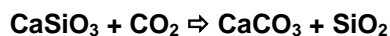
Aardse klimaatregulering

Alles wijst erop dat vloeibaar water zo goed als altijd aanwezig is geweest op Aarde. Dit betekent een uitermate klimaatstabiliteit gedurende meer dan 4 miljard jaar. Vloeibaar water aan het aardoppervlak betekent immers dat de gemiddelde globale temperatuur in het nauwe bereik tussen 0°C en 100°C is gebleven.

De biogeochemische **koolstofcyclus** kan gezien worden als de natuurlijke thermostaat van Planeet Aarde. Deze biogeochemische cyclus betreft het belangrijke broeikasgas, koolzuurgas (CO₂). De koolstofcyclus is illustratief van het stabiliserende effect van een negatieve terugkoppeling in het Aardse systeem, waarbij de vier sferen betrokken zijn. Koolzuurgas komt vrij in de atmosfeer door vulkanisme en gebergtevorming (geosfeer), celademhaling en verrotting van organisch materiaal (biosfeer), en door verdamping (hydrosfeer). Koolzuurgas wordt uit de atmosfeer gehaald door oplossing in de oceanen (hydrosfeer), fotosynthese en begraving van organisch materiaal (biosfeer), en de neerslag van kalkgesteenten (geosfeer). Dit maakt dat de geosfeer het grootste koolstofreservoir is op Aarde. Daarnaast is de hydrosfeer, meer specifiek de oceanen, het grootste 'actieve' koolstofreservoir. De oceanen hebben immers een bufferend effect op de fluctuaties in atmosferische koolzuurgasconcentratie op termijnen van duizenden jaren, terwijl het geosfeerreservoir eerder zijn invloed laat gelden op termijnen van miljoenen jaren.

Continental silicaatverwerking

Als deel van de gesteentecyclus vormt de **continentale silicaatverwerking** een cruciaal onderdeel van de Aardse klimaatregulering. Op de continenten ondergaat continentaal korstmateriaal, dat voornamelijk bestaat uit silicaten (bv. wollastoniet CaSiO₃) een chemische verwerking. Daarvoor is atmosferisch koolzuurgas (CO₂) nodig, en natuurlijk ook water. De opgeloste ionen worden door de rivieren afgevoerd naar de oceanen, waar biologische actoren de carbonaationen gaan opnemen in hun kalkskelet (calciet CaCO₃). Eenmaal afgestorven, accumuleren de kalkskeletten op de bodem van de oceanen en zeeën ter vorming van kalkgesteenten. Vanuit een aards perspectief zijn kalkgesteenten eigenlijk niets meer dan opgeslagen atmosferisch koolzuurgas. Dit silicaatverwerkingsproces kan samengevat worden in de **Ureyreactie**:



Dit silicaatverwerkingsproces is temperatuursafhankelijk. Hierin schuilt de cruciale rol die continentale silicaatverwerking speelt in de klimaatregulering. Dit proces verloopt immers gemakkelijker bij hogere temperaturen. Dus als het klimaat opwarmt, verloopt deze reactie vlotter. Hierdoor wordt er meer atmosferisch koolzuurgas vastgelegd in kalkgesteenten. De atmosferische koolzuurgasconcentratie daalt, waardoor het broeikaseffect vermindert en er een globale klimaatafkoeling optreedt. Omgekeerd, bij een klimaatafkoeling verloopt deze reactie minder efficiënt. Hierdoor wordt er relatief minder atmosferisch koolzuurgas vastgelegd in kalkgesteenten. De atmosferische koolzuurgasconcentratie stijgt, waardoor het broeikaseffect versterkt wordt en er een globale klimaatopwarming optreedt. Dit silicaatverwerkingsproces is dan ook een schoolboekvoorbeeld van een negatieve terugkoppeling, eigen aan het Aardse systeem.

Voor dit silicaatverwerkingsproces zijn volgende elementen essentieel: (1) het voorkomen van continentale korst (bronmateriaal) en van gebergten (verwerkings- en erosiepotentieel), dus platentektoniek; (2) water, als medium waarin het ganse proces zich afspeelt; en (3) leven, dat zorgt voor het vastleggen van het koolzuurgas in kalkgesteenten. Misschien is dat laatste wel de belangrijkste bijdrage van de biosfeer aan het in stand houden van het Aardse systeem. Al meer dan 3 miljard jaar doet de biosfeer niets anders dan koolzuurgas uit de atmosfeer vast te leggen.

Goudlokjeplaneet

Dat Planeet Aarde de levende planeet geworden is zoals we ze vandaag kennen, lijkt wel een toevalstreffer. Alles was *just right*. Planeet Aarde is dan ook een **Goudlokjeplaneet**. Platentektoniek, water én leven hebben zeer vroeg in de Aardse geschiedenis samen gezorgd voor een robuuste klimaatregulering die de planetaire omstandigheden meer dan 4 miljard jaar vrij stabiel gehouden heeft niettegenstaande de steeds helderder wordende Zon. Maar ook toevalligheden, zoals zuurstof, hebben onvoorziene opportuniteiten gecreëerd op de onvermijdelijke weg naar toenemende complexiteit.

Bewoonbare exoplaneten?

In de jaren '60 vroeg James Lovelock zich af of er leven op Mars zou kunnen voorkomen. Sinds 1995, naar aanleiding van de ontdekking van de eerste exoplaneet rond de zonachtige ster 51 Pegasi door de astronomen Michel Mayor en Didier Queloz, dienen we echter die vraag te herformuleren: zou er leven op een exoplaneet

kunnen voorkomen? De vaststelling dat op Aarde het leven heel snel aanwezig was, doet veronderstellen dat leven vrij makkelijk kan ontstaan en dat leven dan mogelijk ook wijdverbreid moet zijn in het universum.

Het concept van de **bewoonbare zone** (*habitable zone*) rond een ster krijg zo vorm. De bewoonbare zone wordt gezien als de schil rond een ster (*ecosphere*) waarin de planetaire omstandigheden gunstig kunnen zijn voor het ontstaan, de ontwikkeling en het behoud van leven. In deze schil kan de oppervlaktetemperatuur van de planeet 'just right' (Goudlokjecondities) zijn om vloeibaar water toe te laten. Vloeibaar water wordt immers gezien als essentieel voor leven.

'Gaiaanse' flessenhals

Vanuit dit Aardse perspectief kijken we opnieuw naar de kansen van leven op 'bewoonbare' exoplaneten. Is leven onvermijdelijk? Of toch niet?

Hierbij kijken we naar de mogelijk evolutie van de **planetaire omstandigheden** (*planetary environments*) doorheen de tijd (zie fig. 2). Daarnaast hebben we de **bewoonbare zone** (*circumstellar habitable zone*) rond de evoluerende ster. Om leven te doen ontstaan, definiëren we de **abiogenese bewoonbare zone** (*abiogenesis habitable zone*), zijnde de initiële Goudlokjecondities die het ontstaan van leven uit de minerale wereld mogelijk maken. Deze omstandigheden kunnen anders zijn dan deze waarin leven verder gaat evolueren. Tenslotte hebben we dan nog de **bewoonde omstandigheden** (*inhabited environments*), zijnde de planetaire omstandigheden waarin leven kan gedijen.

Stel dat de abiogenese bewoonbare zone, dat aan veel striktere voorwaarden voldoet dan de bewoonbare zone, buiten de planetaire omstandigheden ligt, dan zal leven niet kunnen ontstaan om deze planeet. We spreken over een **emergentieflessenhals** (*emergence bottleneck*).

Stel nu dat de abiogenese bewoonbare zone wel binnen de initiële planetaire omstandigheden ligt, dan kan leven ontstaan (zie fig. 2). Het leven ontstaat. We hebben de eerste hindernis, de emergentieflessenhals, genomen. We hebben nu geleerd uit het Aardse verhaal dat de planetaire omstandigheden zodanig evolueren dat ze snel niet meer optimaal zijn voor het prille leven. De planetaire omstandigheden evolueren traag maar zeker weg uit de bewoonbare zone rond de evoluerende ster. Dit kan fataal aflopen voor het prille leven dat gedoemd is vroeg in de planetaire geschiedenis uit te sterven. Dit is de '**Gaiaanse**' flessenhals (*Gaian bottleneck*).

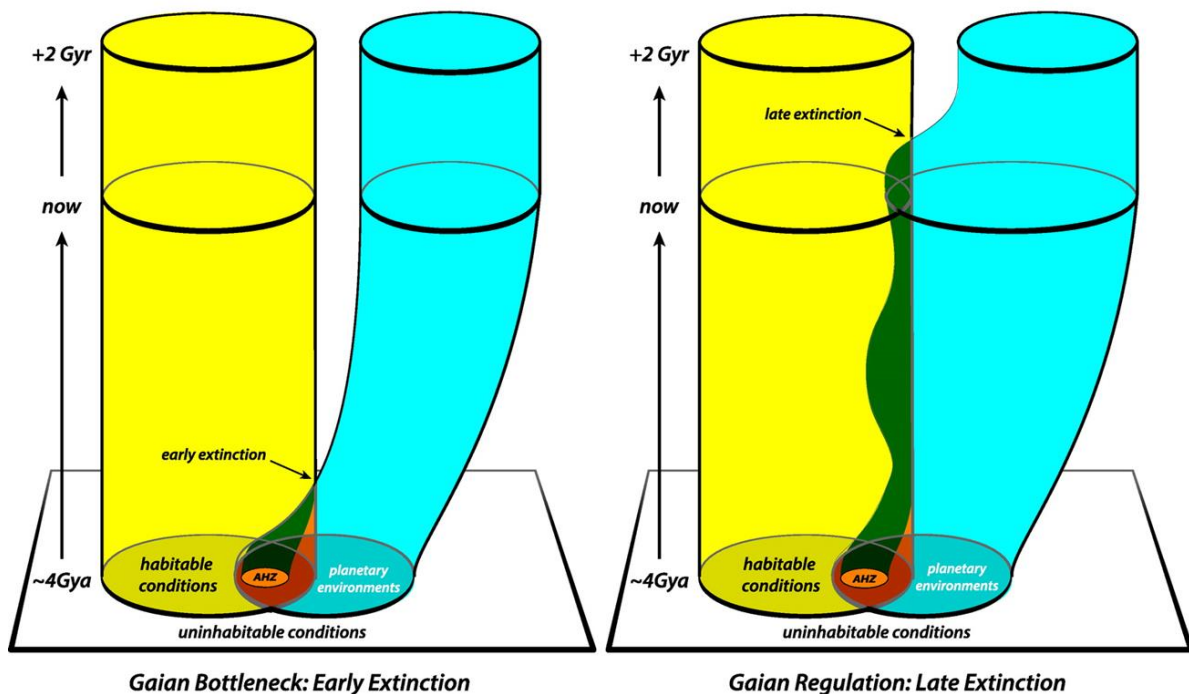


Fig. 3. De evolutie van een planeet waarop het leven ontstaat in de **abiogenese bewoonbare zone** (AHZ) als deel van de **bewoonbare zone** (geel). Links is de evolutie weergegeven van een planeet waar het leven de planetaire omstandigheden (licht blauw) niet wijzigt. Het leven sterft vroeg uit ('early extinction'). Dit is de '**Gaiaanse**' flessenhals. Rechts is de evolutie weergegeven van een planeet waar het leven de planetaire omstandigheden wel wijzigt en zo een **bewoonde zone** (groen) creëert. Het leven sterft hier laat uit in de planetaire geschiedenis ('late extinction'). We spreken van een '**Gaiaanse**' regulering (Chopra & Lineweaver 2016).

Het Aardse verhaal leert ons dat het leven zeer vroeg in de Aardse geschiedenis het heft in eigen handen heeft genomen en aan grootschalige *geo-engineering* is begonnen. Denk maar aan de totale transformatie van de Aardse atmosfeer. Deze *geo-engineering* zorgt er nu voor dat er binnen de veranderende planetaire omstandigheden bewoonde omstandigheden aanwezig blijven waarin het leven kan gedijen en kan evolueren (zie fig. 2). Enkel als het leven mee de planetaire omstandigheden vorm gaat geven, kan de tweede hindernis, de 'Gaiaanse' flessenhals, genomen worden. We spreken dan over een '**Gaiaanse**' regulering (*Gaian regulation*). Dit heeft zich voorgedaan op Planeet Aarde. Het verhaal van de madeliefjeswereld indachtig, zal ook het leven het pleit verliezen en niet langer de bewoonde omstandigheden kunnen onderhouden in de steeds wijzigende planetaire omstandigheden. Het leven wacht een late extinctie. Dit is ook het lot van het leven op Aarde. De planeet evolueert dan naar een levenloze planeet ver buiten de circumstellaire bewoonbare zone. Eenmaal dit stadium in de evolutie bereikt is, is er geen weg terug.

Vanuit dit perspectief resten er maar enkele mogelijkheden als we (exo)planeten beschouwen die zich in een circumstellaire bewoonbare zone bevinden: (1) er is nooit leven ontstaan (emergentieflessenhals); (2) er is pril leven aanwezig (vóór een mogelijke 'Gaiaanse' flessenhals); (3) er is geen leven meer aanwezig (na een 'Gaiaanse' flessenhals; vroege extinctie); (4) er is geëvolueerd leven aanwezig (een bewoonde planeet); of (5) er is geen leven meer aanwezig (na een late extinctie). Vanuit het perspectief van onze eigen Goudlokjeplaneet is duidelijk dat die 'Gaiaanse' flessenhals de grootste horde is die enkel in Goudlokjecondities kan genomen worden. Dit leidt tot de stelling dat een bewoonbare planeet eigenlijk een bewoonde planeet moet zijn. Of met andere woorden, dat het wel eens zou kunnen zijn dat we, hier op onze Goudlokjeplaneet, alleen zijn in het universum.

Meer lezen:

Chaisson, E. J. 2001. Cosmic Evolution. The Rise of Complexity in Nature. Cambridge, Massachusetts, 274 pp. ISBN 0-674-00342-X

Chopra, A. & Lineweaver, C. H. 2016. The Case for a Gaian Bottleneck: The Biology of Habitability. *Astrobiology* **16**, 7-22. DOI: 10.1089/ast.2015.1387

Sintubin, M. 2012. De wetenschap van de aarde. Over een levende planeet. ACCO, Leuven, 343 pp. ISBN 978-90-334-8551-0