
Astronomische cycli: hun invloed op het klimaat op Aarde

Een metronoom voor de geologische tijdschaal

door Frederik J. Hilgen, Wout Krijgsman en Lucas J. Lourens, Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht

Samenvatting

Binnen de geologie wordt absolute ouderdom vooral bepaald met behulp van technieken die gebaseerd zijn op het verval van radioactieve isotopen van elementen zoals uranium, kalium and koolstof. Sinds kort maakt een alternatieve methode, de ouderdomsbepaling met behulp van astronomische cycli, opgang. Bij deze methode worden cyclische veranderingen in het sediment gekoppeld aan curven die astronomen hebben uitgerekend voor de veranderingen in de baan van de Aarde en de stand van de aardas in het geologische verleden. Deze astronomische cycli oefenen invloed uit op ons klimaat en de klimaatsveranderingen die daar het gevolg van zijn worden vastgelegd in de sedimentaire archieven van de Aarde.

Relatieve en absolute (radiometrische) ouderdomsbepalingen

Tijd is onlosmakelijk verbonden met de Aardwetenschappen. Het nauwkeurig bepalen van de ouderdom is onmisbaar voor het begrijpen van processen, die zich op de Aarde hebben afgespeeld en voor het bepalen van de snelheid van verandering. Geologische tijd, in het Engels spreekt men wel over *Deep Time*, wordt meestal uitgedrukt in miljoenen of zelfs miljarden jaren, ouderdommen die ons normale begrip van de tijd ver te boven gaan.

Geologen hebben niet altijd de beschikking gehad over nauwkeurige meetmethodes om de werkelijke, of wel de absolute, ouderdom te bepalen. Bij gebrek aan een absolute dateringsmethode maakte men in de 19de eeuw gebruik van de relatieve dateringsmethode waarbij de (chronologische) volgorde van gebeurtenissen in de tijd werd bepaald zonder dat daar absolute ouderdommen aan werden toegekend. Daarbij werd vooral gebruik gemaakt van de Wet van de Superpositie van Steno (sedimentlagen worden vrijwel horizontaal afgezet waarbij de bovenliggende laag later is afgezet en dus jonger is dan de onderliggende) en de onomkeerbaarheid van evolutie (bepaalde fossielen zijn kenmerkend voor een bepaald geologisch periode). Met behulp van deze methode waren geologen in de 19de eeuw heel goed in staat om een - relatieve - geologische tijdschaal voor de geschiedenis van de Aarde op te stellen. Maar desondanks bleef het frustrerend dat men geen greep kreeg op de

absolute ouderdom, met name de absolute ouderdom van de Aarde. Wel realiseerde men zich dat de Aarde heel oud moest zijn. Tenslotte is er veel tijd nodig voor de - langzame - ontwikkeling van het leven op Aarde en de Aarde zelf. Voor wat betreft het laatste moeten we vooral verwijzen naar het werk van de Schotse geoloog James Hutton die aan het eind van de 18de eeuw tot het inzicht kwam dat grootschalige hoekdiscordanties (dat wil zeggen gesteentelagen die een hoek maken met daaronderliggende gekantelde en/of geplooidere oudere lagen) verklaard moesten worden door een periode van afzetting van de oudere lagen, gevolgd door een periode van gebergtevorming en erosie en tenslotte hernieuwde afzetting van sedimentlagen. Gezien de snelheid waarmee deze processen heden ten dage verlopen is daar veel tijd voor nodig. Dit besef van een hoge ouderdom van de Aarde bracht Hutton in 1788 treffend onder woorden: *'The result, therefore, of our present inquiry is, that we find no vestige of a beginning - no prospect of an end'*. Schattingen op basis van de snelheid van sedimentatie en evolutie kwamen uit op enkele honderden miljoenen jaren voor een (beperkt) deel van de geologische geschiedenis van de Aarde. Haaks op deze ideeën stond het werk van Lord Kelvin, die op basis van een afkoelingsmodel in de tweede helft van de 19de eeuw berekende dat de Aarde slechts 100 miljoen jaar oud was. Naderhand werd deze ouderdom nog verder terug gebracht tot 40 en zelfs tot 20 miljoen jaar.

Aan de felle discussie over de ouderdom van de Aarde kwam aan het begin van de vorige eeuw een abrupt einde met de ontwikkeling van de radiometrische dateringsmethode, die volgde op de ontdekking van de radioactiviteit aan het einde van de 19de eeuw. Deze methode om de absolute ouderdom te bepalen maakt gebruik van het radioactieve verval van bepaalde isotopen waarbij de absolute ouderdom berekend wordt met behulp van de vervalsnelheid van de instabiele isotopen en de verhouding tussen moeder- en dochterproducten. Duidelijk is dat Kleven geen rekening had gehouden met de energie (warmte) die vrijkomt bij het verval van radioactieve elementen in de Aarde, om de eenvoudige reden dat proces toen nog niet bekend was.

Astronomische dateringsmethode en theorie van de ijsstijden

De radiometrische methode leverde voor het eerst een nauwkeurige en algemeen aanvaarde absolute ouderdom voor de

Aarde op. Toch heeft de Amerikaanse geoloog Gilbert al in 1895 een verhaal gepubliceerd met de passende titel *"On the sedimentary measurement of Cretaceous time"* waarin hij de absolute duur voor een deel van de Krijt-periode bepaalde. Gilbert nam aan dat regelmatige afwisselingen van kalk- en kleilagen het gevolg zijn van veranderingen in het klimaat die samenhangen

met de precessie cyclus met een periode van 21.000 jaar (zie intermezzo). Zo kwam hij uit op een tijdsspanne van 21 miljoen jaar voor een deel van de Krijt periode. Deze duur komt goed overeen met die volgens de meest recente geologische tijdscha- len die gebaseerd zijn op de radiometrische dateringsmethode!

Intermezzo

De door Gilbert veronderstelde klimaatschommelingen hangen samen met veranderingen in de instraling van de Zon, die veroorzaakt worden door periodieke veranderingen in de vorm van de aardbaan en de stand van de aardas (afb. 1). Deze laatste veranderingen zijn het gevolg van de gravitatieve aantrekking van de Zon, de Maan en de andere planeten. Astronomen kunnen deze veranderingen terugrekenen in de tijd met behulp van astronomische oplossingen voor het zonnestelsel.

De vorm van de aardbaan beschrijft niet altijd een perfecte cirkel, maar is meestal ellipsvormig waarbij de Zon in één van de brandpunten van de ellips staat. Dit betekent dat de Aarde gedurende een deel van het jaar dicht bij de Zon staat en dus meer dan gemiddelde instraling ontvangt, en de rest van het jaar er juist verder vanaf staat. In totaal ontvangt de Aarde echter iets meer zonnestraling bij een

ellipsvormige aardbaan dan wanneer de baan cirkelvormig is. **Excentriciteit** beschrijft deze veranderingen in de vorm van de aardbaan van vrijwel cirkelvormig tot ellipsvormig. De belangrijkste periodes van de excentriciteit cyclus zijn 100.000 en 400.000 jaar (afb. 1). De seizoenen worden niet door de excentriciteit bepaald maar door de scheefstand van de aardas ten opzichte van het baanvlak. Ook deze scheefstand of **obliquiteit** is niet constant maar varieert tussen de 22° en 25° met een belangrijkste periode van 41.000 jaar (afb. 1). Dit kleine hoekverschil heeft merkbare gevolgen voor het contrast tussen de seizoenen: bij een grotere scheefstand wordt het verschil tussen de zomer en winter groter. Het effect is vooral op hogere breedtegraad merkbaar en is hetzelfde voor het Noordelijk en het Zuidelijk Halfrond.

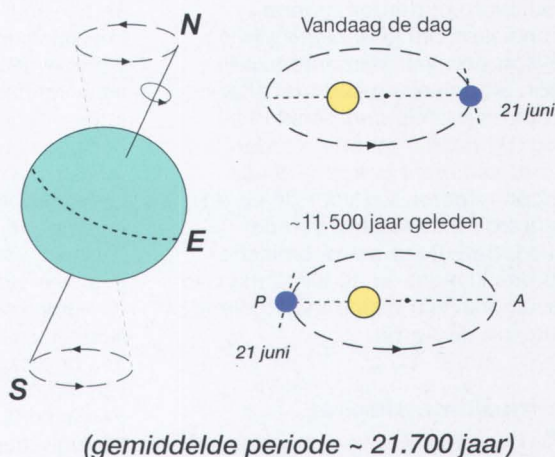
Behalve een verandering in de scheefstand maakt de aardas ook nog een andere beweging, die de astronomische **precessie**-cyclus wordt genoemd en een periode van 26.000 jaar heeft. Deze beweging laat zich het best vergelijken met het zwalken van een snel draaiende tol: terwijl de punt van de tol op zijn plaats blijft, cirkelt de draaiingsas traag rond.

Ook de aardas maakt zo'n beweging, met het centrum van de Aarde als scharnierpunt. Doordat de beweging van de (excentrische) aardbaan zelf tegengesteld is aan de bewegingsrichting van de Aarde om de Zon heeft de precessie-cyclus die van invloed is op ons klimaat (*climatic precession*) overigens een kortere periode van gemiddeld 21.700 jaar (afb. 1). Deze precessiecyclus speelt

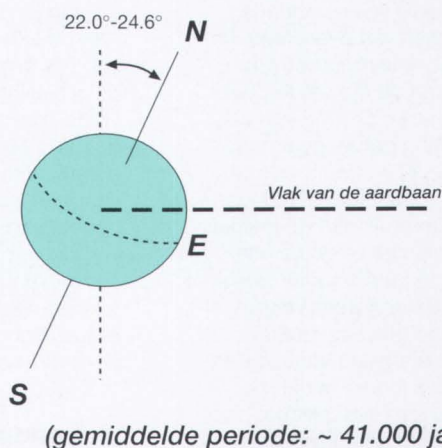
klimatologisch pas een rol als de aardbaan ellipsvormig is. Tegenwoordig is de aardbaan ellipsvormig en staat de Aarde het dichtst bij de Zon als het winter is op het noordelijk halfrond en er het verst vandaan als het zomer is. Dit betekent dat onze winters zachter dan gemiddeld zijn en onze zomers koeler. Op het Zuidelijk Halfrond ligt dat anders en zijn de winters juist kouder en de zomers warmer, wat een groter seizoenscontrast tot gevolg heeft. Tengevolge van de precessiebeweging was deze situatie 11.000 jaar geleden precies andersom.

Met andere woorden de tolbeweging zorgt ervoor dat de seizoenscontrasten tussen het Noordelijk en het Zuidelijk Halfrond wisselen met een periode van 21.000 jaar. Duidelijk is dat het effect van precessie op de seizoenscontrasten groter wordt naarmate de aardbaan sterker ellipsvormig is.

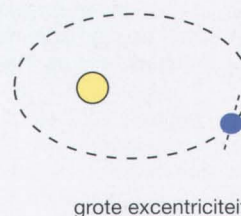
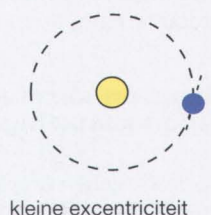
Precessie van de equinoxes



Obliquiteit (scheefstand van de aardas)

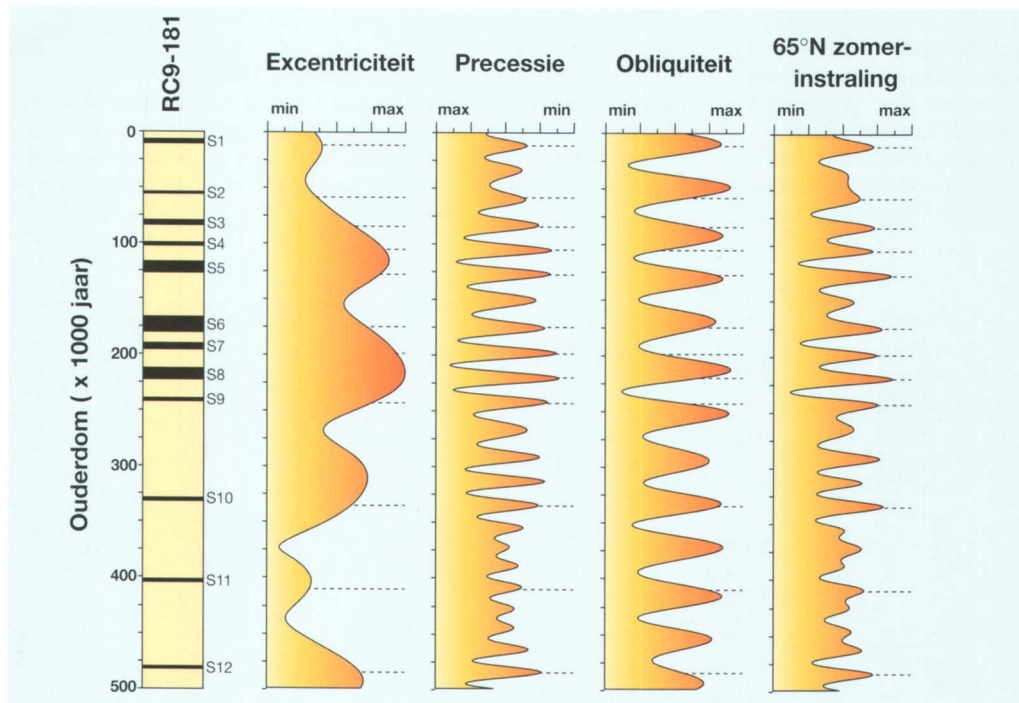


Excentriciteit



(gemiddelde periodes:
~100.000 en 400.000 jaar)

Afb. 1. De astronomische cycli in de baan van de Aarde en de stand van de aardas.



Afb. 2. Vergelijking van de ouderdommen van de jongste sapropelen (over de laatste 0.5 miljoen jaar) met de door astronomen berekende curven voor de veranderingen in de baan van de Aarde, de stand van de aardas en de zomerinstraling op 65° NB in het geologisch verleden.

delen van de vroegere zeebodem opgeheven zijn en nu boven de zeespiegel liggen. Aan de andere kant is de Middellandse Zee bijzonder gevoelig om dergelijke schommelingen in het klimaat te registreren vanwege zijn ligging en afgesloten karakter van de open oceaan.

Het idee dat veranderingen in de aardbaan klimaatsveranderingen kunnen veroorzaken werd daarvoor al door Adh mar en Croll gebruikt om het ontstaan van de ijstijden te verklaren. Deze astronomische theorie van de ijstijden werd tijdens de eerste helft van deze eeuw door Milankovitch verder uitgewerkt. Milankovitch koppelde de bekende opeenvolging van de G nz-, Mindel-, Riss- en Würm-ijstijden aan de door hem berekende instraling van de Zon op hoge breedte (65 ) op het noordelijk halfrond en ging er daarbij vanuit dat koude zomers tot het ontstaan van een ijstijd leiden. Door deze koppeling aan een instralingscurve wordt de geologische opname van de ijstijden voor het eerst onafhankelijk van radiometrische ouderdomsbepalingen gedateerd.

De astronomische theorie van de ijstijden is nu algemeen geaccepteerd en heeft gedurende de laatste tientallen jaren een grote vlucht genomen. De geschiedenis van de ijstijden kan het best nagegaan worden aan de hand van veranderingen in de verhouding van de stabiele zuurstofisotopen ^{16}O en ^{18}O in fossiele kalkskeletjes die gevonden worden in kernen van de bodem van de oceaan. Omdat het lichtere isotoop, ^{16}O , preferentieel wordt aangerijkt in ijs staat de verhouding van de stabiele zuurstofisotopen in direct verband met de hoeveelheid ijs op Aarde. De gedetailleerde geschiedenis van de ijstijden is nu zeer goed gedocumenteerd. De stabiele zuurstofisotopen opnames laten zeer overtuigend de veranderingen in het ijsvolume zien die het gevolg zijn van de invloed van de cyclische veranderingen in de baanparameters van de Aarde op het klimaat. Al deze veranderingen zijn gekoppeld aan astronomische curven en zijn dus onafhankelijk gedateerd van radiometrische dateringen.

Astronomische tijdschaal voor het Mediterrane Neogeen

De cyclische veranderingen in de aardbaan zijn echter niet alleen verantwoordelijk voor het optreden van de ijstijden maar leiden voortdurend tot klimaatschommelingen die vastgelegd worden in het sedimentaire archief van de geschiedenis van het klimaat op Aarde. De Middellandse Zee is bij uitstek een geschikt gebied om onderzoek te doen naar de astronomische sturing van het klimaat. Aan de ene kant komt dat doordat Afrika tegen Europa opbotst waardoor het gebied geodynamisch zeer actief is, en

Het Plio-Pleistoceen en de uitbreiding naar het Mioceen

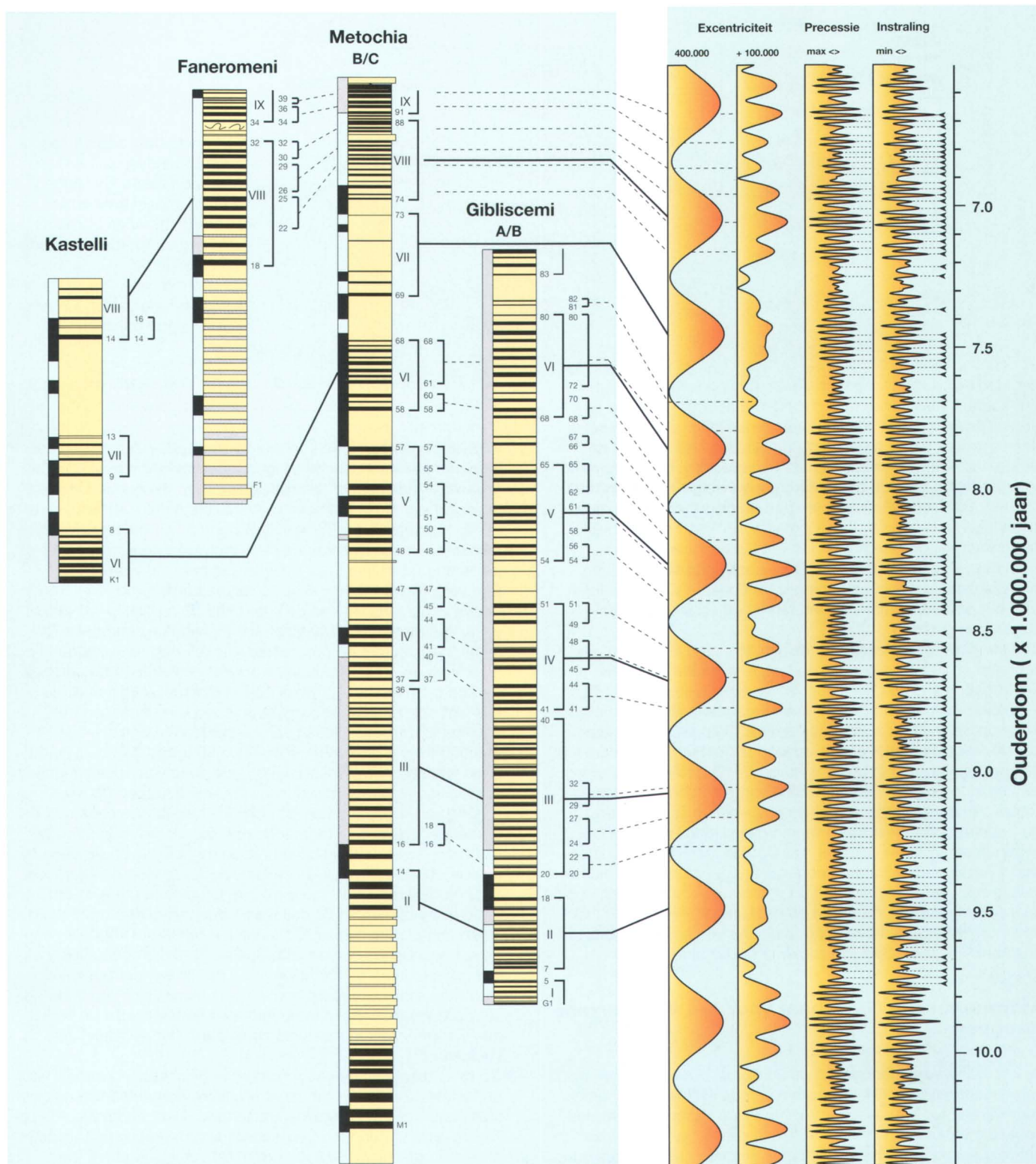
In de sedimentpakketten van de Middellandse Zee zijn op zeer regelmatig afstand donkere lagen ingeschakeld die rijk zijn aan organisch materiaal en sapropelen worden genoemd. Deze sapropelen zijn afgezet tijdens vrijwel zuurstofloze omstandigheden op de toenmalige zeebodem. Met behulp van de stabiele zuurstofisotopen opname kan de ouderdom van de sapropelen over de laatste 0.5 miljoen jaar nauwkeurig bepaald worden. Een vergelijking met de astronomische curven voor de veranderingen in de aardbaan en de stand van de aardas in het geologisch verleden (afb. 2) laat zien dat individuele sapropelen samenhangen met de precessiecyclus of, nog nauwkeuriger, met minima in de precessie-index wanneer de Aarde het dichtst bij de Zon staat als het zomer is op het Noordelijk Halfrond. Het laat ook zien dat sapropeel groepen samenhangen met maxima in de excentriciteit van de aardbaan van zowel de 100.000 (kleine groepen) als de 400.000 (grote groepen) jaarcyclus. Alternierende afwisselingen in de dikte van opeenvolgende sapropelen ("dik-dun-dik-dun") wijzen tenslotte op de extra invloed van de cyclus van de obliquiteit via interferentie met de precessiecyclus; de interferentie ontstaat doordat de periode van de precessiecyclus bijna precies de helft is van de periode van de obliquiteitscyclus. Deze faserelaties tussen de sapropeelcycli en de astronomische cycli zijn vervolgens gebruikt om oudere sapropelen en de daarmee samenhangende grijze mergellagen met een laag kalkgehalte laag voor laag te koppelen aan de astronomische curven (afb. 3, 4 en 5). Deze correlaties (ook wel *orbital tuning* genoemd) leveren niet alleen betrouwbare astronomische ouderdommen voor de sapropelen op, maar ook voor alle veranderingen in de fauna en flora, en voor de omkeringen van het aardmagneetveld zoals die in het sediment zijn vastgelegd.

Op deze manier is een astronomische tijdschaal opgesteld voor de laatste 12 miljoen jaar in het Mediterrane gebied. De nieuwe tijdschaal wekt in eerste instantie sterk af van de bestaande op kalium-argondateringen gebaseerde tijdschalen (astronomische ouderdommen zo'n 5-10% ouder). Dit verschil kon het best verklaard worden door de gedeeltelijke omzetting van basalten en/of de onvolledige ontgassing van veldspaten die gebruikt werden voor de K/Ar-dateringen. De astronomische tijdschaal werd echter al snel bevestigd door radiometrische dateringen met behulp van de nieuwe Ar/Ar-laserfusietechniek. Daarnaast

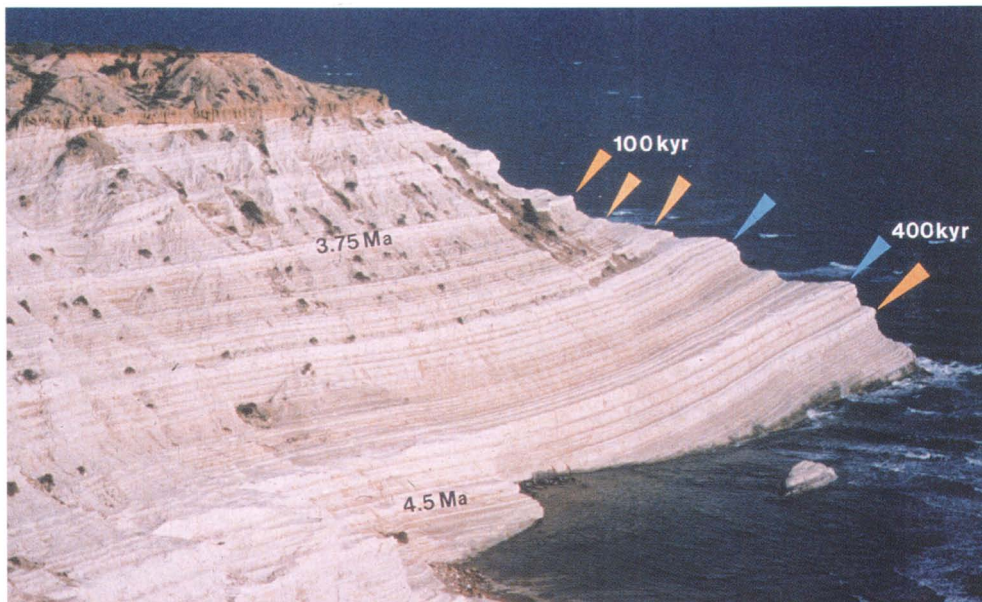
was de astronomische tijdschaal volledig in overeenstemming met de astronomische tuning van cyclische opeenvolgingen afkomstig uit diepzeekernen van de open oceaan. Tenslotte kon met behulp van de sapropeelpatronen, en dan met name van die patronen die het gevolg zijn van de interferentie tussen precessie en obliquiteit, uitgemaakt worden welke astronomische berekeningen voor het zonnestelsel (er zijn er verscheidene) het meest nauwkeurig zijn vanuit een geologisch perspectief.

"The Messinian Gap"

Bij de uitbreiding van de astronomische tijdschaal naar 12 miljoen jaar werd het interval tussen 5.3 en 6.8 miljoen jaar geleden in eerste instantie overgeslagen. Tijdens deze periode, die het Messinien wordt genoemd, werden er voor dit soort onderzoek minder geschikte lagen, zoals diatomieten en zouten (tot 2000 m dik), in de Middellandse Zee afgezet. Deze zoutcrisis van het



Afb. 3. Astronomische "tuning" van sapropelen van Miocene ouderdom aan de astronomische curven. Deze tuning (correlatie) werd tot stand gebracht door eerst de grote groepen donkere lagen of sapropelen - aangeduid met de Romeinse cijfers I t/m IX - naar opeenvolgende maxima van de 400.000 jaar excentriciteitscyclus te correleren. Vervolgens werden kleine groepen sapropelen naar maxima van de 100.000 jaar excentriciteitscyclus gecorreleerd. Tenslotte werden individuele sapropelen aan minima in de precessie-index gekoppeld.



Afb. 4. Cyclische afwisselingen in mariene afzettingen van Pliocene ouderdom zoals die aangetroffen worden aan de zuidkust van Sicilië. Op de foto zijn maxima in het kalkgehalte aangegeven die samenhangen met de 100.000 en 400.000 cycli in de excentriciteit van de aardbaan. De kleinschalige cycli hangen vooral met precessie samen. (foto: L. J. Lourens)

Messinien ontstond doordat de verbindingen met de Atlantische Oceaan geheel of vrijwel geheel werden verbroken door de botsing tussen Europa en Afrika, wat indamping van de Middellandse Zee en de afzetting van dikke zoutpakketten tot gevolg had. De Middellandse Zee liep pas weer vol toen de verbinding met de oceaan aan het begin van het Pliocen, dat wil zeggen 5.3 miljoen jaar geleden, op spectaculaire wijze werd hersteld. Al snel bleek echter dat de afwijkende lagen van het Messinien ook cyclisch van aard waren (afb. 6) en gebruikt konden worden om het ontstane gat in de astronomische tijdschaal te dichten. Uit het onderzoek bleek verder dat de belangrijkste fase van zoutafzetting in het hele Middellandse Zee gebied op precies hetzelfde moment begint en dat de zoutcycli met dezelfde astronomisch bepaalde klimaatsveranderingen samenhangen als de sapropelen, en niet met schommelingen van de zeespiegel die het gevolg zijn van ijsstijden. Tijdens het Messinien werden deze ijsstijden vooral gestuurd door de cyclus van de obliquiteit, dus met een periode van 41.000 jaar.

Continental opeenvolgingen

Tot dusver heeft onze aandacht zich volledig gericht op lagen die op de bodem van de zee waren afgezet. Om veranderingen in het klimaat in het verre verleden te begrijpen is het echter



Afb. 5. Sapropelen van Miocene ouderdom zoals die ontsloten zijn bij Monte Gibliscemi op Sicilië. Zowel de invloed van precessie (individuele sapropelen) als de excentriciteit (groepjes sapropelen) is duidelijk zichtbaar. (foto: W. Krijgsman)

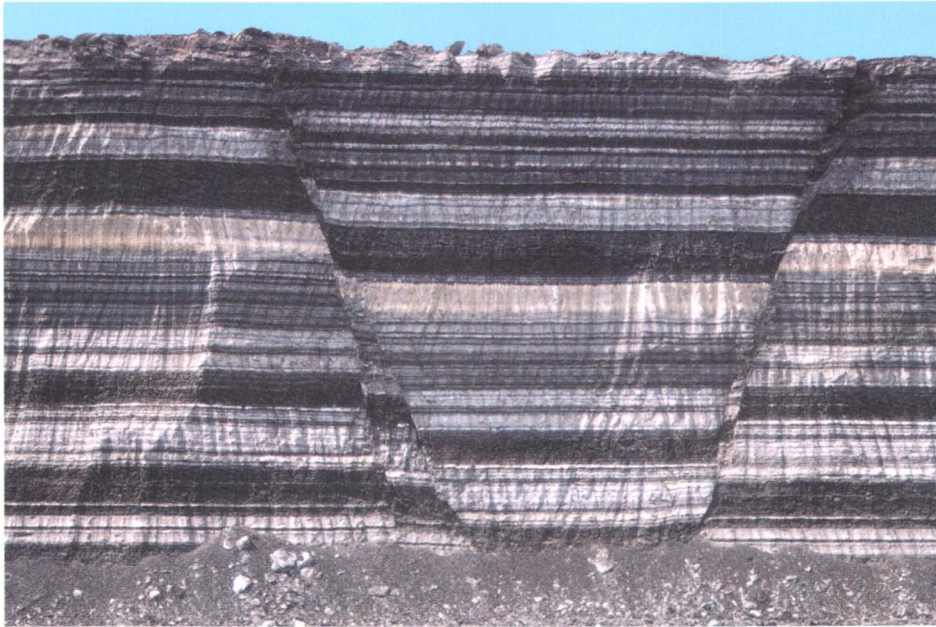
noodzakelijk om lagen die op het continent, en dan met name in meren, zijn afgezet in het onderzoek te betrekken. Deze lagen geven immers een schat aan informatie over klimaatsveranderingen ter plekke.

Het opstellen van een astronomische tijdschaal voor deze continentale afzettingen zal dan ook inzicht moeten geven in de gelijktijdige invloed van astronomisch gestuurde veranderingen in het klimaat op afzettingsmilieus in zee en op het land. In het Ptolemais bekken van Noord-Griekenland komen fossiele meerafzettingen van Pliocene ouderdom voor. Ook deze afzettingen zijn cyclisch van aard (afb. 7) en bevatten veel fossiele plantenresten in de vorm van lignietlagen. De meerafzettingen zijn uitstekend ontsloten in enorme open groeves waar de ligniet (met behulp van reusachtige graafmachines, de zogenaamde excavators) in grote hoeveelheden ontgonnen wordt. De ligniet gaat vervolgens rechtstreeks naar de nabij gelegen elektriciteitscentrales die voor meer dan 50% in de energiebehoefte van Griekenland voorzien.



Afb. 6. Cyclische afwisselingen in de evaporieten (gips) van het Messinien op Sicilië. Deze cycli hangen samen met precessie. (foto: F. J. Hilgen)

De ouderdom van de meerafzettingen werd in eerste instantie bepaald met behulp van de magnetostratigrafie (de discipline die zich bezig houdt met de omkeringen van het aardmagnetisch veld zoals die vastgelegd worden in het sediment), de biostratigrafie (gebaseerd op fossiele kleine zoogdierjes) en het radiometrisch dateren van de ingeschakelde vulkanische aslagen. Hierna konden de cycli gekoppeld worden aan de astronomische curven. De cycli zelf weerspiegelen schommelingen in de waterpiegel van het meer. Bij een lage waterstand werden lignietlagen afgezet in moerassen langs de rand van het meer. Fossiele stuifmeelkorrels laten zien dat deze lagen inderdaad de droge fase van de door precessie gestuurde klimaatcyclus vertegenwoordigen.



Afb. 7. Cyclische afwisselingen van lignieten en kalk in meerafzettingen van Pliocene ouderdom bij Ptolemais (Griekenland). (foto: J. Steenbrink)

Ook in het Calatayud-Teruel bekken van Spanje zijn opvallende cyclische meerafzettingen aangetroffen maar deze dateren uit het Mioceen (afb. 8). De opeenvolging van de verschillende lagen bestaat uit een zeer regelmatige afwisseling van kalk en klei, die werd afgezet aan de rand van een meer dat omgeven was met puinwaaiers. Ook deze cycli weerspiegelen schommelingen in de waterstand van het meer die het gevolg zijn van astronomisch gestuurde veranderingen in het klimaat. De cyclische opeenvolging laat duidelijk de invloed van excentriciteit (zowel de 100.000 als de 400.000 jaar cyclus), obliquiteit en precessie zien en lijkt zeer geschikt om de astronomische tijdschaal uit te breiden tot 13 miljoen jaar geleden. Deze opeenvolging is fraai ontsloten in natuurlijke amfitheaters in de buurt van het dorpje Orera. Mede gezien het wetenschappelijk belang is voorgesteld om deze unieke ontsluitingen op te nemen op de lijst van ons geologisch erfgoed.

Astronomische gestuurde veranderingen in het klimaat

De astronomische tijdschaal is vanwege zijn grotere nauwkeurigheid en hoger oplossend vermogen een grote stap vooruit. Een belangrijke toepassing ligt op het gebied van de geschiedenis van de spreiding van de oceaانبodems en de snelheid waarmee dit heeft plaatsgevonden. Ook kan nauwkeuriger worden vastgesteld of soorten gelijktijdig zijn ontstaan of uitgestorven. De belangrijkste toepassing van deze tijdschaal ligt echter op het gebied van de veranderingen in het klimaat in het verre verleden. Eén van de meest fascinerende vragen blijft natuurlijk de precieze oorzaak en het mechanisme van de afzetting van de sedimentaire cycli in het Middellandse Zee gebied. Zoals we eerder gezien hebben wordt een sapropeel afgezet tijdens een precessieminimum wanneer de Aarde het dichtst bij de Zon staat als het zomer is op het Noordelijk Halfrond. Deze configuratie leidt tot warmere zomers, een intensivering van het moessysteem en een verhoogde neerslag op lage breedte. Gedetailleerd paleoklimatologisch onderzoek toont aan, dat de sapropelen en de daarmee samenhangende grijze kalkarme lagen inderdaad zijn afgezet tijdens natte periodes van de klimaatcyclus. In praktijk komt dit neer op een toename in de afvoer van rivieren zoals de Nijl ten gevolge van de verhoogde neerslag waardoor een laag met een lager zoutgehalte en een lagere dichtheid zich over het oppervlak van de Middellandse Zee kan verspreiden. Het gevolg is dat er dan minder diepwater gevormd wordt, waardoor er zuurstofarme of zelfs zuurstofloze omstandigheden op de bodem ontstaan. Dit zuurstofgebrek

wordt nog versterkt door een verhoogde mariene productiviteit in het oppervlaktewater waardoor meer organisch materiaal naar beneden dwarrelt en zuurstof wordt verbruikt door oxidatie. Kortom de ideale voorwaarden voor de afzetting van een sapropeel. De tegengestelde droge fase van de klimaatcyclus daarentegen wordt gekenmerkt door een sterk verhoogde aanvoer van stof dat door winden als de Sirocco vanuit brongebieden in de Sahara wordt aangevoerd. Een enkele keer reiken deze winden zover naar het noorden dat het woestijnstof ook in ons land uitregent, de kenmerkende rode vlekjes op onze net gewassen auto's achterlatend. Dit stof heeft een bepaalde samenstelling wat betreft kleimineralen en chemische elementen die we ook terugvinden in de lagen die op de zeebodem zijn afgezet tijdens de droge perioden van de klimaatcyclus.



Afb. 8. Cyclische afwisselingen in meerafzettingen van Mioceen ouderdom zoals die bij Orera in Spanje worden aangetroffen. (foto: H. Abdul Aziz)

De meest recente klimaatcyclus

De laatste neerslagrijke periode, ook wel pluviaal genoemd, heeft zich vrij kort geleden tijdens het Holoceen voorgedaan en heeft geleid tot de afzetting van de jongste sapropeel op de bodem van de Middellandse Zee, met een ouderdom van tussen de 10.000 en 4.000 jaar. Behalve geologisch en klimatologisch

van groot belang zijnde heeft de neerslagrijke periode ook belangrijke gevolgen gehad voor de culturele ontwikkeling van de mens en mogelijk een rol gespeeld bij de overgang van jager-verzamelaars naar de landbouw. Tijdens het pluviaal werd de omvang van de Sahara flink gereduceerd en werd een groot deel van deze (huidige) woestijn bewoond. Het is dan ook uit deze periode dat de rotstekeningen van nijlpaarden en krokodillen uit het centrale deel van de Sahara stammen. Ook de verwerking van de romp van de Sfinx kan het best verklaard worden door de veel hogere neerslag tijdens dit pluviaal. Dit wijst erop dat de Egyptische cultuur veel verder teruggaat in de tijd dan tot voor kort werd aangenomen. Maar ook de droge fase van de laatste klimaatcyclus heeft grote gevolgen gehad. Aan het begin ervan komt er een eind aan de menselijke bewoning van uitgestrekte delen van de huidige Sahara, terwijl de bewoning en de landbouw in het Midden Oosten zich daarna concentreerde in de rivierdalen. Nog verder naar het oosten leidt het vrij plotselinge begin van de droge fase tot de ineenstorting van de stedelijke Harappa cultuur in de Indus vallei.

Tenslotte is het aannemelijk dat de oude Egyptenaren en mogelijk ook andere volkeren al vroeg op de hoogte zijn geweest van de astronomische precessie cyclus (en dus niet "climatic precession") met een periode van 26.000 jaar. Zij waren immers uitstekende astronomen en het effect van de cyclus kan binnen enkele generaties herkend worden aan het verschuiven van het lentepunt (plek waar de zon opkomt bij het begin van de lente wanneer de Zon loodrecht boven de equator en dag en nacht even lang duren) ten opzichte van de sterren. Zo zijn er theorieën waarbij de oriëntatie van de Sfinx en het grondplan voor de bouw van de piramides van Gizeh terug gevoerd wordt op de positie van de sterren aan de hemel van ongeveer 12.500 jaar geleden. Tot voor kort werd echter algemeen aangenomen dat de astronomische precessie cyclus pas ongeveer 125 jaar voor Christus door de Griekse astronoom Hipparchus werd ontdekt. Aangezien het hier om een extra beweging van de buitenste sfeer van de sterren ging moest het wel om de invloed van een machtige god gaan. Op deze (her?)ontdekking van de precessiecyclus is de geheime Mithrascultus tijdens het Romeinse rijk gebaseerd. Het doden van een stier door Mithras gold als symbool voor de cultus en staat voor het opschuiven van de opkomst van de Zon in het lentepunt van het sterrenbeeld Stier naar het volgende sterrenbeeld in de dierenriem, Ram. Op het ogenblik verschuift het lentepunt ten gevolge van de precessiecyclus van het sterrenbeeld Vissen naar Waterman, waarmee de *Age of Aquarius* een aanvang neemt.

Gevolgen voor de standaard geologische tijdschaal

Intercalibratie met radiometrische methode

Op het ogenblik zijn er verschillende geologische tijdschalen in omloop die ieder een iets andere ouderdom voor dezelfde geologische gebeurtenis of grens laten zien. Deze verschillen ontstaan doordat er van verschillende radiometrische gegevens wordt uitgegaan bij het opstellen van deze tijdschalen. De onzekerheid wordt verder bepaald door de nauwkeurigheid van de gebruikte radiometrische methode. Deze bedraagt zo'n 1.0-1.5% voor de veel gebruikte Ar/Ar methode wat vooral een gevolg is van de onzekerheid in de absolute ouderdom van dateringsstandaarden die bij deze methode gebruikt worden. Daarnaast is het oplossend vermogen van dergelijke tijdschalen beperkt; deze varieert van enkele honderdduizenden tot soms wel een miljoen jaar. Het grote voordeel van de astronomisch tijdschaal is niet alleen zijn grotere nauwkeurigheid (geschat op 0.05 % op 5 miljoen jaar en 0.2 % op 10 miljoen jaar geleden) maar ook zijn veel grotere oplossend vermogen van minder dan een halve precessie cyclus of te wel zo'n 10.000 jaar. Vanwege deze voordelen vormt de astronomische tijdschaal tegenwoordig de basis voor het allerjongste deel van de standaard geologische tijdschaal. Een ander belangrijk voordeel is

dat geologische grenzen, zoals de Mioceen/Plioceen- en de Plioceen/Pleistoceen-grens direct aan deze tijdschaal gekoppeld zijn. Dit komt omdat deze grenzen formeel gedefinieerd zijn in de astronomisch gedateerde opeenvolgingen in het Middellandse Zee-gebied.

Een probleem is dat de standaard tijdschaal nu gebaseerd is op twee verschillende absolute dateringsmethodes, namelijk de astronomische methode voor het jongste deel en de radiometrische methode voor het oudere deel van de geologische tijdschaal. Het is dus van groot belang om deze twee onafhankelijke methodes aan elkaar te koppelen. De meest directe manier om dit te doen is door radiometrische en astronomische ouderdommen van vulkanische aslagen waarvan de astronomische ouderdom bekend is met elkaar te vergelijken. De voorlopige uitkomsten suggereren dat de astronomische ouderdommen systematisch ouder zijn dan de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ouderdommen.

Uitbreiding van de astronomische tijdschaal in het geologisch verleden

De belangrijkste uitkomst van de discussie die recentelijk gevoerd werd tijdens een symposium in Londen gewijd aan de astronomische tuning van de geologische tijdschaal is, dat de tijd rijp is om het hele Cenozoïkum en Mesozoïkum (dat wil zeggen de laatste 245 miljoen jaar) astronomisch te gaan dateren. Een nadeel hierbij is het chaotisch aspect van het zonnestelsel waardoor de astronomische cycli niet nauwkeurig teruggerekend kunnen worden dan tot zo'n 20-30 miljoen jaar geleden. Dit nadeel is echter overkomelijk omdat met name de 400.000 jaar excentriciteit cyclus mogelijk zeer stabiel is over dit gehele tijdsinterval.

Ondertussen heeft Prof. Shackleton van de Universiteit van Cambridge de astronomische tijdschaal met behulp van diepzee kernen uit de open oceaan al uitgebreid tot ongeveer 30 miljoen jaar geleden. Dergelijke hele lange opeenvolgingen laten ook duidelijk de invloed van lang-periodische veranderingen in de obliquiteit (1.2 miljoen jaar) en de excentriciteit (2.35 miljoen jaar) zien en hun mogelijke samenhang met zeespiegelschommelingen en hun expressie in sedimentaire opeenvolgingen als zogenaamde derde orde stratigrafische sequenties.

Andere astronomische cycli

Behalve de invloed van de cyclische veranderingen in de baan van de Aarde, ook wel Milankovitch cycli genoemd, is ook de invloed van andere astronomische cycli zoals de dag en het jaar terug te vinden in de geologische archieven. Tegenwoordig wordt er veel onderzoek gedaan naar jaarlaminæ in fijngeaagde afzettingen uit zeeën en meren. Zo speelt de jaarcyclus een zeer belangrijke rol bij het opstellen van hoge resolutie tijdschalen voor de laatste 50.000 tot 100.000 jaar. Een mooi voorbeeld is het klassieke onderzoek van De Geer aan de jaarlaminæ (varven) die in meren aan het front van het zich terugtrekkende landijs werden afgezet. Andere voorbeelden zijn het onderzoek aan boomringen (dendrochronologie) en het paleoklimatologisch zeer belangrijke onderzoek aan de geaagde ijskernen van Groenland. Een laatste voorbeeld van jaarlaminæ grijpt terug op fijngeaagde zoutafzettingen uit het Perm. In deze opeenvolging werd door Anderson de dikte van 260.000 opeenvolgende jaarlaminæ gemeten. Veranderingen in de dikte van deze laminæ laten bijvoorbeeld zeer overtuigend de invloed van de precessie cyclus zien. Door dergelijk hoge resolutie onderzoek zijn ook cycli met periodes van tussen de 1.000 en 12.000 jaar aan het licht gekomen, maar het is nog niet duidelijk of deze cycli met primaire "Milankovitch" cycli samenhangen of met bijvoorbeeld periodieke veranderingen in de activiteit van de Zon. Naast de jaarcyclus is ook de invloed van de elfjarige zonnevlek cyclus herkend in ijskernen en meerafzettingen. Verder is de invloed van de cycli van de Maan in getijdenafzettingen terug gevonden, zelfs in sedimenten met een zeer hoge ouderdom van 800 tot zelfs 2500 miljoen jaar. Deze fossiele getijdencycli geven

informatie over het aantal dagen in een maand waardoor de afstand van de Aarde tot de Maan berekend kan worden. De dagcyclus vinden we tenslotte terug in groeiringen van sommige soorten (fossiele) koralen en schelpen. Door deze zeer gedetailleerd te onderzoeken is men in staat geweest om het aantal dagen in een jaar te bepalen. Het aantal dagen per jaar neemt toe in het geologische verleden omdat de Maan vroeger dichterbij de Aarde stond waardoor deze sneller rond draaide. Op basis van deze gegevens kan opnieuw de afstand Aarde-Maan berekend worden.

Het is duidelijk dat de invloed van verschillende astronomische cycli terug te vinden is in de opeenvolging van lagen die de geschiedenis van onze Aarde hebben vastgelegd. Het herkennen van deze cycli speelt bij onderzoek naar de ontwikkelingen van het klimaat op Aarde in het geologisch verleden een zeer belangrijke rol. De nadruk in dit verhaal ligt echter op het belang van de cycli in de baanparameters van de Aarde om een betere greep te krijgen op de factor tijd, de factor die zo'n fundamentele rol speelt binnen de geologie.

Literatuur

- Buaval, R., Hancock, G. (1997) *Keepers of Genesis*. Arrow Books, The Random House Group, London.
- Calvo, J.P., Abdul Aziz, H., Hilgen, F., Sanz-Rubio, E., Krijgsman, W. (1999) The Orera section (Calatayud Basin, NE Spain): A remarkable cyclically bedded lacustrine succession from the Spanish Miocene. In: Baretino, D., Vallejo, M., Gallego (editors) *Towards the balanced management and conservation of the geological heritage in the new millennium*, pp. 186-192, Madrid, Spain.
- Coulson, D. (1999) Ancient art of the Sahara. *National Geographic*, Vol. 195, 6 (zie ook <http://www.tara.org.uk>).
- Gilbert, G.K. (1895) Sedimentary measurement of Cretaceous time. *J. Geol.*, Vol. 3, 121-127.
- Hancock, G. (1995) *Fingerprinting of the Gods*. Arrow Books, The Random House Group, London.
- Hilgen, F.J. (1991) Extension of the astronomically calibrated (polarity) time scale to the Miocene-Pliocene boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 107, 349-368.
- Imbrie, J., Imbrie, K.P. (1979) *Ice ages, solving the mystery*. Enslow Publ., Short Hills, New Jersey.
- Krijgsman, W., Hilgen, F.J., Raffi, I., Sierro, F.J., Wilson, D.S. (1999) Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, Vol. 400, 652-655.
- Lourens, L.J., Hilgen, F.J., Zachariasse, W.J., van Hoof, A.A.M., Antonarakou, A., Vergnaud-Grazzini, C. (1996) Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical time scale. *Paleoceanography*, Vol. 11, 391-413.
- Milankovitch, M. (1941) *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem*. Akad. R. Serbe, Vol. 133, 1-633.
- Shackleton, N.J., McCave, I.N., Weedon, G.P. (1999) Astronomical (Milankovitch) calibration of the geological time-scale. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 357, 1731-2007.
- Ulansey, D. (1989) *The origins of the Mithraic mysteries (Cosmology and salvation in the Ancient world)*, Oxford, Univ. Press (zie ook <http://www.well.com/user/davide/mithra.htm>).

Gesteenten op Groenland onthullen karakteristieken van de aardmantel in de zeer vroege geschiedenis van de aarde

Gesteenten van zo'n 3,8 miljoen jaar oud geven, via de isotopenverhoudingen van de elementen hafnium (Hf) en neodymium (Nd), aan dat de aardmantel in het begin van de aardgeschiedenis veel heterogener was dan nu. Er zijn slechts zeer weinig gesteenten uit het begin van de aardgeschiedenis bekend, en dergelijke gesteenten hebben inmiddels zoveel gebeurtenissen meegemaakt dat ze vaak geen kenmerken meer hebben die hun eerste fase weerspiegelen. Een nieuwe analyse van dergelijke gesteenten op Groenland - door veel geologen beschouwd als de oudste op aarde - heeft echter opvallende resultaten opgeleverd. De gesteenten, die met nieuwe technieken werden onderzocht door een team van Amerikaanse en Deense geologen, blijken nog enkele geochemische eigenschappen bewaard te hebben uit het stadium toen ze ontstonden in de aardmantel. Die moet toen nog in een fase van differentiatie hebben verkeerd, na het ontstaan van de aarde door accretie van materiaal in de aardbaan rondom de zon. Voor het begrip van de ontwikkeling van de aarde is dit van groot belang, want gesteenten die nu vanuit de aardmantel door vulkanische activiteit aan het aardoppervlak komen, vertonen allang geen kenmerken meer die te danken zijn aan de eerste fase van de aardgeschiedenis. Enkele zeldzame gassen die bij vulkaanuitbarstingen vrijkomen vertonen soms nog wel dergelijke karakteristieken, maar die geven lang niet zoveel informatie als het onderzoek van de 'primitieve' Groenlandse gesteenten nu heeft opgeleverd.

Algemeen werd aangenomen dat op aarde binnen enkele honderden miljoenen jaren na zijn ontstaan een situatie werd bereikt waarin de aardkorst en daarna de aardmantel zich konden differentiëren als gevolg van een ver genoeg gevorderde afkoeling, mogelijk vanuit een soort magma-zee. Wanneer dat proces plaatsvond, was tot nu toe onbekend. Uit de uitgevoerde analyse blijkt nu dat 3,8 miljard jaar geleden nog steeds een differentiatieproces bezig was, wat ook impliceert dat op dat moment nog steeds niet alle oorspronkelijke warmte was afgegeven aan het wereldruim (de huidige aardwarmte is 'nieuw', en ontstaat als gevolg van het natuurlijke verval van radioactieve elementen). Waarschijnlijk was de afkoeling zelfs nog zo weinig ver gevorderd dat er nog een zeer grote warmte-afgifte plaatsvond. De onderzoekers achten het op basis van de onderzochte gesteenten waarschijnlijk dat er een tot nu toe onbekende thermische grenslaag heeft bestaan, die invloed heeft gehad op de convectiestromen in het inwendige der aarde. Die grenslaag, mogelijk op de huidige grens van aardkern en aardmantel, zou verantwoordelijk kunnen zijn geweest voor een 'reservoir' met een relatief tekort aan uranium, thorium en kalium; omdat deze (deels) radioactieve elementen bij verval warmte produceren, zou er een 'boekhoudkundig' tekort aan warmte-afgifte zijn geweest. Dat zou zijn sporen in de huidige inwendige structuur van de aarde hebben nagelaten. Daarmee zouden enkele tot nu toe niet goed begrepen (seismische) eigenschappen van de aarde kunnen worden verklaard.

Albarède, F., Blichert-Toft, J., Vervoort, J.D., Gleason, J.D. & Rosing, M., 2000. Hf-Nd isotope evidence for a transient dynamic regime in the early terrestrial mantle. *Nature* 404, p. 488-490.

A.J. van Loon