

Astronomisch dateren van de geologische tijdschaal

C.G. Langereis en F.J. Hilgen

Het is gelukt, tot tien miljoen jaar oude sedimenten zeer nauwkeurig te dateren door deze in verband te brengen met astronomische cycli. Hierdoor kon een nieuwe tijdschaal worden opgesteld, die op allerlei manieren kan worden toegepast. Over dit onderwerp hield dr. Langereis een voordracht tijdens de Contactdag van de NGV te Utrecht op 24 februari 1996. Het onderstaande is een weergave van deze lezing.

Introductie

Net iets meer dan een eeuw geleden, in 1895, schreef G.K. Gilbert in het *Journal of Geology* '... to correlate these with an astronomical cycle of known period, and to deduce from this correlation an estimate in years ...'. Hij had het over regelmatige cycli in sedimentaire afzettingen en was een van de eersten, die zich realiseerden dat deze cycli periodieke veranderingen in klimaat zouden kunnen weerspiegelen, en dat deze op hun beurt weer bepaald waren door de veranderingen in de baan van de Aarde om de Zon. Als men de periodes van deze baanveranderingen zou weten, dacht hij, zou men de tijdsduur van deze afzettingen kunnen bepalen. Opvallend is dat deze schattingen - die vooraf gingen aan de ontdekking van radioactiviteit en de toepassing van radioactief verval voor ouderdomsbepalingen - een veel grotere ouderdom voor onze planeet gaven dan de destijds door Lord Kelvin berekende ouderdom van ongeveer 40 miljoen jaar, gebaseerd op de afkoeling van de Aarde. De invloed van variaties in de baan en de rotatie-as van de Aarde zou in 1941 grote bekendheid krijgen dankzij het werk van Milankovitch. Hij berekende de hoeveelheid zonne-instraling ('insolatie') die de Aarde ontving gedurende de afgelopen honderdduizenden jaren, en probeerde daaruit de ijstijden te verklaren. Het zou echter tot 1976 duren alvorens Hays et al. dit systematisch toepasten op kernen die in de diepzee genomen waren. Zij gebruikten daarvoor de verhouding van lichte en zware zuurstofisotopen, die een benadering geven van de hoeveelheid ijs die op de polen ligt. Sindsdien is het snel gegaan, vooral dankzij het gebruik van computers en steeds betere metho-

den voor het berekenen van de baanbewegingen van de Aarde, met inachtneming van de invloed van de baanbewegingen en de aantrekkingskracht van andere planeten zoals Jupiter. Momenteel kunnen deze baanbewegingen en de variaties in de rotatie-as van de Aarde nauwkeurig berekend worden tot 10 à 20 miljoen jaar geleden.

Astronomische invloeden op het klimaat

De meeste astronomische invloeden ondergaan we zonder daarbij stil te staan: de dag is één omwenteling van

de Aarde om haar as, de maand heeft iets met de omwenteling van de Maan om de Aarde te maken, en het jaar is bepaald door de omwenteling van de Aarde om de Zon. Maar ook de seizoenen zijn astronomisch bepaald, namelijk door de scheefstand ('obliquiteit') van 23,5° van de rotatie-as van de Aarde ten opzichte van het baanvlak om de Zon. Als de aardas recht op stond, zou de zonnestraling altijd loodrecht op de evenaar staan, en zouden er geen seizoenen zijn. Echter, door de scheefstand ontvangt het noordelijk halfrond in januari minder zon dan het zuidelijk halfrond, terwijl dat in juni omgekeerd is.

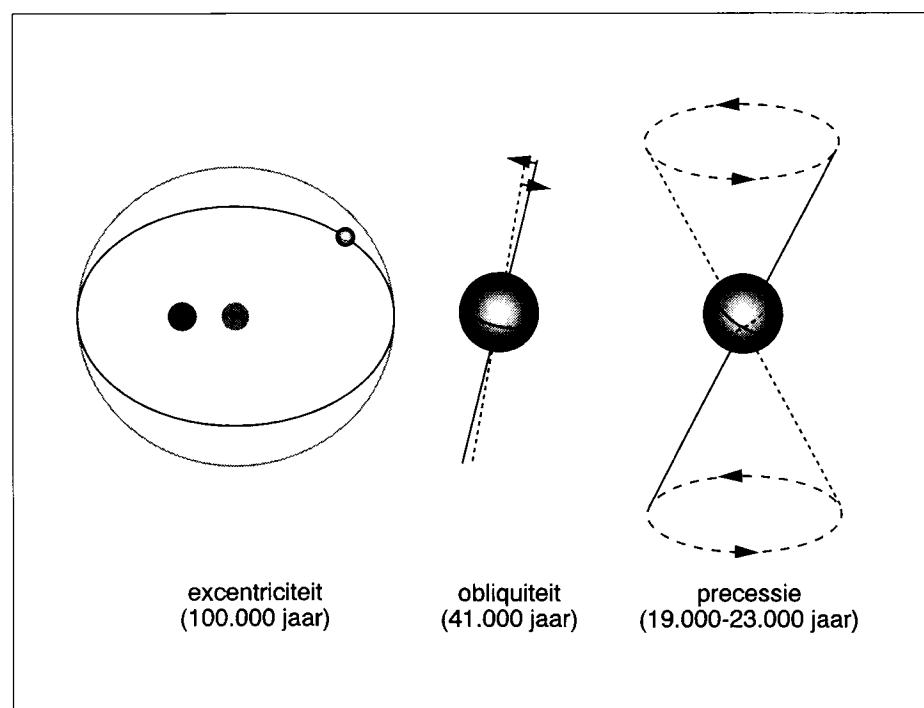


Fig 1. De bewegingen die de Aarde ondergaat zijn onderhevig aan periodieke veranderingen. De baan van de aarde verandert tussen cirkelvormig en ellipsvormig met perioden van 100.000 en van 400.000 jaar. Bij de cirkelvorm staat de Aarde altijd even ver van de Zon af, bij de ellipsvorm ontvangt de Aarde een deel van het jaar minder zonnestraling dan de rest van het jaar, omdat de Zon dan in een van de brandpunten van de ellips staat. De scheefstand of obliquiteit van de aardas verandert tussen 22.0° en 24.6°, met een periode van 41.000 jaar. Ook maakt de aardas een tolbeweging (precessie) door, met periodes van 19.000 en 23.000 jaar

De meeste van deze veranderingen uit zich in geologische opeenvolgingen. Dagelijkse en maandelijkse veranderingen vinden we terug in getijde- of strandafzettingen. Jaarlijkse veranderingen vormen jaarringen in bomen - die ook wel archeologisch of fossiel bewaard blijven en in de dendrochronologie gebruikt worden voor dateringen - maar ook in meersedimenten (warven) en in ijskappen aan de polen (de Groenlandse ijskernen) of in korraalafzettingen rond de evenaar. Ook de 11- en 22-jarige zonnevlekcyclus vinden we terug in de geologie, vooral in meersedimenten. Echter, enkele van de belangrijkste astronomische periodieke veranderingen ondergaan we niet bewust tijdens een mensenleven, maar vinden we wel degelijk terug in de geologie, en dat zijn de langperiodieke variaties van de precessie en de obliquiteit van de rotatie-as en de excentriciteit van de baan van de Aarde om de Zon (fig. 1).

Een zeer belangrijke rol speelt de excentriciteit van de aardbaan om de zon. Deze mate van ellipsvormigheid verandert met periodes van ongeveer 100.000 jaar en 400.000 jaar. De excentriciteit is nul als de baan cirkelvormig is, en ongelijk aan nul als deze de vorm van een ellips heeft. Als de baan een cirkel is, staat de zon in het middelpunt. De afstand Aarde - Zon is dan altijd gelijk gedurende een omwenteling (een jaar), en de Aarde ontvangt gemiddeld over het jaar evenveel zonnestraling. We hebben echter dan nog steeds seizoenen (zomer en winter) door de scheefstand van de rotatie-as. Nu blijkt echter, dat de scheefstand met een periode van 41.000 jaar verandert tussen 22,0° en 24,6°, dus met een uitslag van ongeveer 1,3° naar beide kanten rond het gemiddelde van 23,3°. Zelfs dit kleine hoekverschil heeft tot gevolg dat de seizoenen contrasten merkbaar veranderen: naarmate de aardas scheef staat wordt het contrast tussen zomer en winter groter. Dit is vooral te merken op hogere breedtegraden, dicht bij de pool; op de evenaar is het directe effect verwaarloosbaar.

Als de aardbaan echter ellipsvormig is, staat de zon in één van de brandpunten van de ellips. Dit betekent, dat gedurende een deel van het jaar de Aarde dicht bij de Zon staat en dus meer dan gemiddeld zonnestraling ontvangt, en het andere deel van het

jaar er juist verder van af (fig. 1). In totaal ontvang de Aarde echter iets minder zonnestraling - ongeveer 1 à 1,5% - dan wanneer de baan cirkelvormig is. Op het moment dat de baan ellipsvormig is, gaat de precessie van de aardas een belangrijke rol spelen. Deze precessie is een tolbeweging van de aardas (fig. 1), met een periode van gemiddeld 21.700 jaar (strikt genomen heeft de echte precessiebeweging een periode van 25.000 - 26.000 jaar, maar voor ons is de precessie van de equinoxes, ook wel 'climatic precession' genoemd, van belang: deze heeft een kortere periode door de tegengestelde beweging van de excentrische aardbaan zelf).

In een excentrische aardbaan worden een perihelium en een aphelium onderscheiden. In het perihelium staat de Aarde het dichtst bij de Zon en in het aphelium er het verst vanaf. Tegenwoordig bereikt de Aarde het perihelium gedurende onze noordelijke winter en het aphelium gedurende de zomer. Dit houdt in, dat we op het noordelijk halfrond relatief zachte winters en koude zomers hebben, terwijl dit op het zuidelijk halfrond omgekeerd is: koude winters en warme zomers. Tengevolge van de precessiebeweging was dit 11.000 jaar geleden precies andersom. We hadden toen warme zomers en koude winters, en op het zuidelijk halfrond had men koude zomers en zachte winters. Kortom: de tolbeweging van de aardas zorgt ervoor, dat de seizoenscontrasten tussen het noordelijk en zuidelijk halfrond wisselen met een periode van 21.700 jaar, en deze contrasten zijn groter naarmate de aardbaan meer ellipsvormig is.

Samenvattend kunnen we dus zeggen dat de 41.000 jaar verandering van de obliquiteit zorgt voor seizoenscontrasten die vooral op hogere breedtegraden merkbaar zijn, terwijl de periode van 21.700 jaar in de precessie zorgt voor seizoenscontrasten tussen noordelijk en zuidelijk halfrond die groter zijn naarmate de excentriciteit - met periodes van 100.000 en 400.000 jaar - van de aardbaan groter is. Een ingewikkeld samenspel van astronomische bewegingen dus, die we echter met moderne technieken en berekeningsmethoden zeer nauwkeurig kunnen bepalen.

Astronomische invloeden op de geologie

Het ingewikkelde samenspel van astronomische bewegingen vinden we terug als veranderingen in het klimaat op Aarde, zoals de ijstijden die het afgelopen miljoen jaar - niet helemaal regelmatig, maar ongeveer om de 100.000 jaar - voorkwamen. Die klimaatsinvloeden zien we op hun beurt terug in de geologie, vooral in de sedimenten die op dat moment afgezet worden op het land - in meren en via rivieren - of in zee. Een goed voorbeeld hiervan zien we in een sedimentkern die in de bodem van de Middellandse Zee genomen is (fig. 3). In deze sedimenten komen zogenaamde 'sapropelen' voor: dit zijn donkere en soms zwarte lagen met een relatief hoog gehalte aan organisch materiaal die onder zuurstofloze omstandigheden op de zeebodem afgezet worden. Het blijkt echter dat deze lagen niet willekeurig voorkomen, maar een bepaald patroon vormen. We zien een grote cluster over de afgelopen 400.000 jaar (S1 - S10) die weer onderverdeeld is in kleinere clusters van ongeveer 100.000 jaar. Vooral de kleine clusters (S2-S3-S4-S5) en (S6-S7-S8-S9) zijn goed ontwikkeld. Het lijkt er dus op dat deze grote clusters samenhangen met de 400.000 jaar-periode van de excentriciteit (van ongeveer 0 tot 400.000 jaar, met een maximum rond 200.000 jaar (fig. 3), die op zijn beurt gemoduleerd wordt door de 100.000 jaar-periode van de excentriciteit. Deze laatste periode is dan weer verantwoordelijk voor de kleine clusters, met maxima op ca. 110, 210 en 300 ka (ka = duizend jaar).

Verder blijkt, dat binnen de kleine clusters de individuele sapropelen heel duidelijk correleren met de precessie-index. Het is in fig. 3 duidelijk te zien, dat de invloed van precessie groter is naarmate de excentriciteit van de aardbaan groter is, maar tevens dat sapropelen precies overeenkomen met minima in de precessie. Niet ieder precessie-minimum is overigens zichtbaar als een donker sapropeel, maar gedetailleerd onderzoek laat zien dat het sediment tijdens de kleinere minima wel degelijk afwijken de eigenschappen vertoont, bijvoorbeeld aan de hand van geochemische



Fig. 2. De kaap van Punta di Maiata, aan de zuidkust van Sicilië. De opeenvolgende lagen laten goed de astronomische veranderingen zien. De duidelijke witte banken zijn extra rijk aan kalk en komen overeen met minima in de excentriciteit van de aardbaan.

eigenschappen, die overeenkomen met sapropelitische omstandigheden. We kunnen echter nog een stapje verder gaan. Als we de sapropeelpatronen in meer detail bekijken, zien we, dat ze binnen een kleine cluster afwisselend dik en dun zijn. Bijvoorbeeld de dikke S6, de dunne S7, de dikke S8 en de dunne S9 (fig. 3).

Dit suggereert, dat er ook een invloed is van de obliquiteit, die bijna een dubbele periode heeft ten opzichte van de precessie. Die bijna dubbele periode zorgt ervoor dat de invloed van precessie de ene keer versterkt wordt en de andere keer verzwakt. En inderdaad: als we nu de hoeveelheid zonne-instraling berekenen die de Aarde ontvangt (de instralingcurve in fig. 3) en die afhankelijk is van zowel precessie als obliquiteit, zien we dat patroon keurig gereflecteerd in de dikte van de sapropelen. Maxima in de insolutie komen overeen met sapropeelvorming, waarbij grotere maxima zorgen voor dikke sapropelen, en relatief kleinere maxima voor dunne. Het lijkt er dus op, dat - in ieder geval in het Middellandse Zeegebied - sapropelen overeenkomen met warmere perioden. Dit kan ook geïllustreerd worden

met behulp van de verhouding van lichte en zware zuurstofisotopen ($\delta^{18}\text{O}$ in fig. 3) die gemeten worden aan fossiel plankton dat zich in het sediment bevindt.

Aangezien er meer van de lichte zuurstofisotoop in ijs (en dus in ijskappen) opgeslagen wordt, komen 'lichte' (negatieve) waarden overeen met kleinere ijskappen en dus met relatief warme perioden: er is meer ijs gesmolten, waardoor het zeewater verrijkt wordt met de lichte zuurstofisotoop en dit wordt opgenomen in de kalkskeletjes van plankton. De 'zware' (positieve) waarden komen dan overeen met koude perioden, waarin er grotere ijskappen zijn. We zien dus dat klimaatsvariëaties in geologische opeenvolgingen - zowel in de vorm van klimaat (ijskap) indicatoren als $\delta^{18}\text{O}$ in de vorm van afwijkende sedimentlagen - terug te zien zijn in astronomische curven.

Uit onderzoek van diepzeesedimenten in Zuid-Italië, die door opheffing nu op het land bereikbaar zijn, blijkt dat deze sapropeelpatronen zich vrij consistent voorzetten (Hilgen, 1991a).

De astronomische tijdschaal

Als we dus in geologische opeenvolgingen klimaatsvariëaties kunnen herkennen, kunnen we deze correleren met de astronomische oplossingen. Dit hebben we gedaan met behulp van de bovengenoemde sapropeelpatronen, (Hilgen, 1991a). In oudere sedimenten waren deze sapropelen niet meer te herkennen, maar gelukkig bleek dat de klimaatsvariëaties op een andere manier herkenbaar waren, en wel als 'carbonaat-cycli' in het centrale Middellandse Zee-gebied, vooral aan de zuidkust van Sicilië, zoals bij Punta di Maiata (fig. 2.). Deze carbonaat-cycli worden gevormd door een wisselend gehalte aan kalk (CaCO_3) afkomstig van planktonische foraminiferen en kalkig nannoplankton dat na afsterven in de bovenste waterlaag naar beneden dwarrelt en in het sediment terecht komt.

Deze variaties in kalk zijn goed te zien op de foto: afwisselend als kalkige, harde, witte banken en als kleiige, zachtere en veelal grijze banken. De grijze banken komen - net als de sapropelen - overeen met minima in de

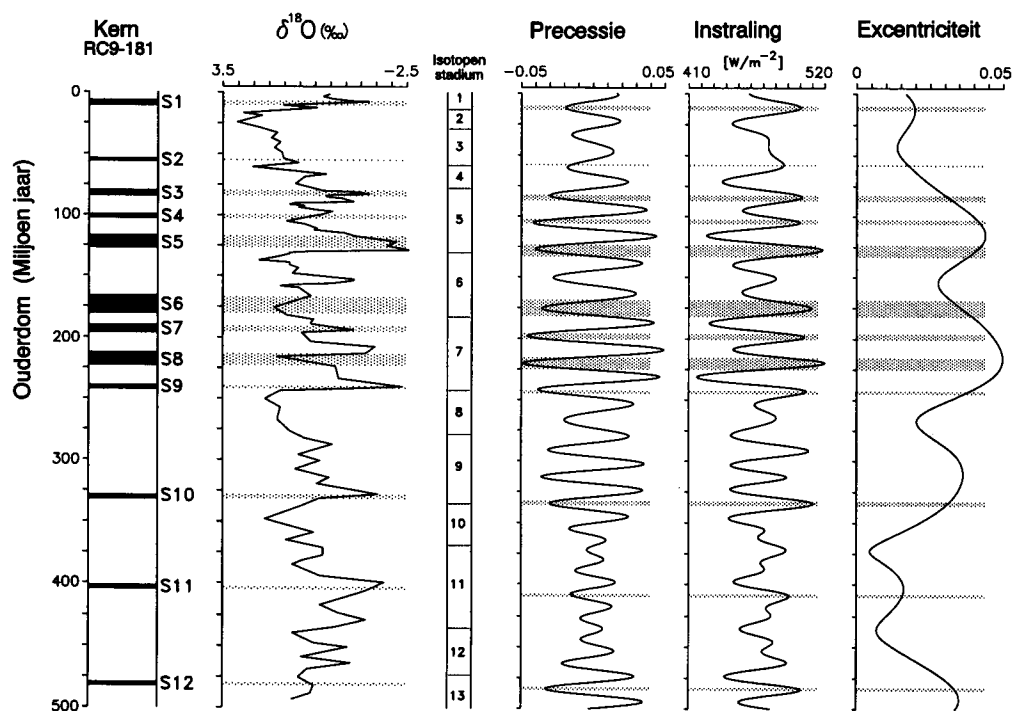


Fig. 3. Een sedimentkern uit de Middellandse Zee bevat donkere lagen (zwart) die sapropelen genoemd worden (S1 t/m S10). De verhouding van lichte en zware zuurstofisotopen ($\delta^{18}\text{O}$) geeft een indicatie van de temperatuur op Aarde: zwaardere (positieve) waarden wijzen op koude perioden (ijstijden), lichtere (negatieve) waarden op warmere perioden. De sapropelen komen goed overeen met minima in de precessie, ofwel met maxima in de insolatatie: de hoeveelheid instraling die de Aarde ontvangt, in dit geval op 65° noordelijke breedtegraad. De excentriciteit van de aardbaan bepaalt de mate waarin de precessie (en de insolatatie) maxima en minima vertoont.

precessie-index, en de witte banken met maxima. Het kalkgehalte komt ook goed tot uiting in het verweringsprofiel: de kalkarme banken verweren iets makkelijker, waardoor de witte, kalkrijke banken uitsteken. We vinden dus een regelmatige opeenvolging van grijze (precessie-minimum) en witte (precessie-maximum) lagen. Bovendien blijkt dat het gemiddelde kalkgehalte over langere periodes samenhangt met de excentriciteit: bij minima in de excentriciteit vinden we maximale gehalten aan kalk. Deze uiteten zich in het sedimentaire profiel dan weer als dikke, harde kalkbanken om de 100.000 jaar en als extra dikke banken om de 400.000 jaar. Deze zijn op de foto van Punta di Maiata goed te herkennen. In de correlatie naar de astronomische curven herkennen we dat de (extra) dikke banken overeenkomen met periodes waarin de precessie geen grote uitslagen vertoont (fig. 3), en dus de excentriciteit van de aardbaan minimaal is.

We kunnen nu dus, door iedere bank te correleren met de astronomische oplossingen, onze astronomische tijdschaal uitbreiden, in dit geval tot 5,3 miljoen jaar geleden (Hilgen, 1991b), tot aan de grens van het Mioceen en

Pliocene. In het Middellandse Zee-gebied wordt herkenning van oudere cyclische sedimenten dan bemoeilijkt, doordat de Middellandse Zee in die tijd vrijwel afgesloten was van de open (Atlantische) oceaan, waardoor er tijdens de saliniteitscrisis van het Messinien (de bovenste etage van het Mioceen) dikke zoutpakketten werden gevormd. Ondanks deze complicatie hebben we de astronomische tijdschaal inmiddels uitgebreid naar bijna 10 miljoen jaar (Hilgen et al., 1995); deze tijdschaal heeft een nauwkeurigheid van een paar duizend jaar over dit tijdsinterval: we praten dus over een nauwkeurigheid beter dan 0,05%!

De astronomisch gecalibreerde geologische tijdschaal die we op deze manier construeren - na veel onderzoek, veldwerk en eindeloos gepuzzel en controleren - is dus uiterst nauwkeurig, mits uiteraard de astronomische oplossingen nauwkeurig zijn. Hiervoor gebruiken we oplossing La90 van Laskar (1990) die het beste de geologisch geregistreerde veranderingen weergeeft, zoals onderzocht is door Lourens et al. (1996) van de Faculteit Aardwetenschappen in Utrecht. Het grote voordeel van de astronomische tijdschaal is dat we niet afhankelijk zijn

van radiometrische dateringen - waarvoor je geschikte mineralen nodig hebt, die je alleen in lava's of vulkanische aslagen kunt vinden - maar vooral blijkt, dat deze tijdschaal veel nauwkeuriger is. Dit was al gebleken uit een eerder onderzoek (Hilgen en Langereis, 1989) waarvan de uitkomsten verschillen toonden met ouderdommen die gebaseerd waren op radiometrische dateringen. We konden toen al suggereren - en dit is later bevestigd, zie bijvoorbeeld Berggren et al. (1995) - dat de oorzaak lag bij de K/Ar-dateringsmethode, die vrijwel steevast te jonge ouderdommen gaf: tot 5-10%.

Inmiddels vindt een nieuwe radiometrische dateringsmethode steeds bredere toepassing, een methode die gebaseerd is op het vergelijken van verschillende argon-isotopen. Dit gebeurt met moderne laser-technologie, waarbij individuele mineralen gebruikt worden die het meest geschikt zijn en de beste resultaten geven. Hiervoor werken we samen met dr. Jan Wijbrans van het Isotopen Laboratorium van de Vrije Universiteit in Amsterdam. Het blijkt dat we met deze Ar/Ar-methode ouderdommen vinden die zéér goed overeenkomen met de astronomische

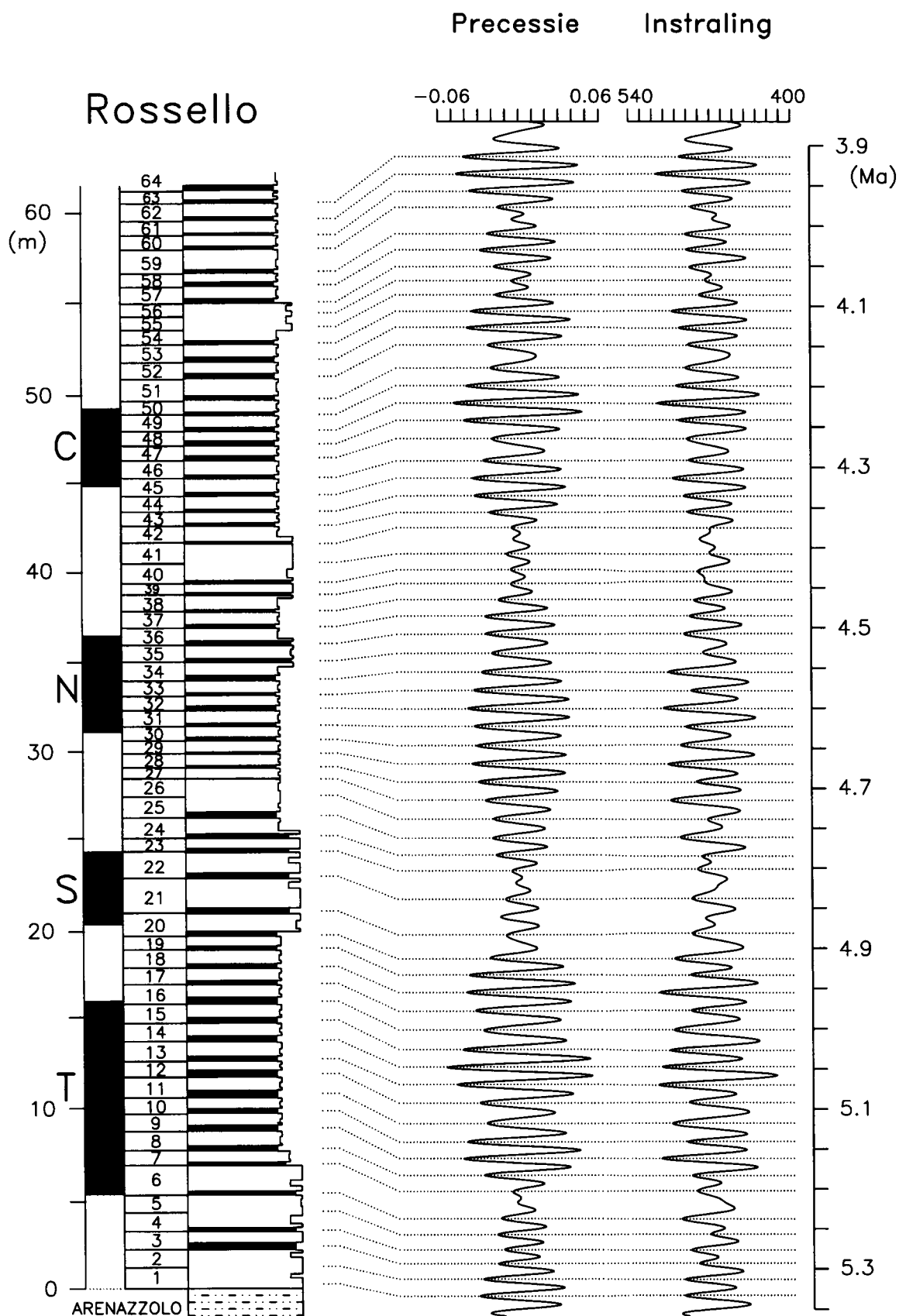


Fig. 4. Sedimentaire cycli met afwisselend hoog (wit) en laag (zwart) kalkgehalte. Deze carbonaatcycli zijn door klimaatsveranderingen bepaald en kunnen gerelateerd worden aan veranderingen in de precessie of insolutie. Het blijkt dat kalkarme lagen overeenkomen met minima (maxima) in de precessie (insolutie). De cycli zijn genummerd vanaf de grens tussen het Mioceen en het Pliocene, die een astronomische ouderdom heeft van 5.33 Ma. La90 is de door Laskar (1990) berekende astronomische oplossing die de beste correlatie geeft met de geologische opeenvolging van deze carbonaatcycli. De zwart-witte kolom links geeft de polariteit van het aardmagnetisch veld weer: zwart betekent normaal ofwel noord-gericht, wit is omgekeerd ofwel zuid-gericht.

dateringen. Zo vinden we voor een aslaag op Kreta een astronomische ouderdom van 6,941 Ma (miljoen jaar), bij een Ar/Ar-ouderdom van 6,936 - 0,006 Ma: dus identiek binnen de foutenmarge. Dit is een positieve test voor de consistentie en 'robuustheid' van beide methoden, en voor de nauwkeurigheid van de astronomische oplossingen.

Toepassingen van de astronomische tijdschaal

We mogen de astronomische tijdschaal dus rustig beschouwen als een 'chronometer in de aardwetenschappen', en daar zijn uiteraard toepassingen bij te bedenken. Zo kunnen we in het Middellandse Zee-gebied uiterst nauwkeurig het verschijnen en verdwijnen van allerlei soorten microfossielen dateren. Toepassing van de nieuwe tijdschaal is heel belangrijk in onderzoek naar met name astronomisch bepaalde veranderingen in het klimaat. Bij dit onderzoek worden kleine fossielen zoals planktonische foraminiferen gebruikt om veranderingen in de temperatuur en de productiviteit van het oppervlaktewater van de Middellandse Zee te reconstrueren. Deze veranderingen worden dan vergeleken met andere klimaatsindicatoren, waardoor we beter begrijpen hoe het Mediterrane klimaat vroeger was en bijvoorbeeld beïnvloed werd door het eveneens astronomisch gestuurde moessonsysteem. Op het ogenblik worden ook continentale opeenvolgingen in het onderzoek betrokken om de gelijktijdige invloed van de cyclische klimaatveranderingen op mariene en continentale afzettingssmilieus te doorgronden.

Een andere zeer belangrijke toepassing is het dateren van omkeringen van het aardmagneetveld. Dit magneetveld zorgt ervoor dat een kompas altijd naar het noorden wijst. Het is in het geologisch verleden echter herhaaldelijk en op onregelmatige tijdstippen van polariteit veranderd: de magnetische noordpool werd een zuidpool, en vice versa. Deze omkeringen van het veld hebben te maken met processen in de vloeibare buitenkern van de Aarde (maar dit is een verhaal apart). Nu wordt het aardmagneetveld, en dus ook zijn noord- of zuidrichting, geregistreerd in sedimenten

op het moment dat deze gevormd worden. Dit gebeurt, doordat magnetische mineralen - meestal ijzeroxiden of ijzersulfiden - zich als kompasjes richten volgens het op dat moment heersende veld. Bij verdere sedimentatie en compactie worden deze deeltjes vastgelegd, een paar centimeter onder het sedimentoppervlak. Door nu georiënteerde monsters van dat sediment te nemen, en de magnetisatie van de monsters te meten, kunnen we dus bepalen of de polariteit normaal was (noord-gericht, zoals het huidige veld) of omgekeerd, en dus zuid-gericht. In fig. 4 zijn die polariteiten te zien als zwart (normaal) of wit (omgekeerd) in de linker kolom. Door over de afgelopen 10 miljoen jaar die omkeringen van het aardmagneetveld te bepalen in alle secties die we onderzocht hebben (Langereis en Hilgen, 1991; Krijgsman et al., 1995), kunnen we de ouderdom ervan dus met een grote (astronomische) nauwkeurigheid bepalen. Dit is een belangrijke toepassing, onder meer omdat we op deze manier door alleen het polariteitspatroon van een sedimentaire opeenvolging te meten, en dat patroon te vergelijken met een goed gekende standaard magnetische tijdschaal, de ouderdommen van deze opeenvolgingen nauwkeurig kunnen bepalen: 'magnetostratigrafisch dateren'.

Nu is er zo'n standaard magnetische tijdschaal, en die is gebaseerd op de magnetische omkeringen die vastgelegd zijn in de oceaankorst, aan weerszijden van spreidende oceaandruggen. Dit zijn de plaatsen waar materiaal diep uit de mantel naar boven komt en aan weerszijden uitvloeit, waardoor de continenten uiteen drijven ('continental drift'). Er is echter een nadeel aan het patroon van die omkeringen op de oceaانبodem: ze zijn niet te dateren. Men moet dus indirect enkele goed herkenbare omkeringen dateren, bijvoorbeeld die in de lava's van IJsland, en de (radiometrische) ouderdommen ervan gebruiken als ijkpunten in het patroon op de zeebodem. Alle omkeringen daartussen worden dan bepaald door interpolatie tussen deze ijkpunten, waarbij we uiteraard moeten aannemen, dat de spreidingssnelheid van de oceaandruggen in de tussenliggende tijd nooit veranderd is. Deze standaard magne-

tische tijdschaal heeft dus twee nadelen: de ouderdommen van de ijkpunten zijn voornamelijk radiometrisch bepaald met behulp van de K/Ar-methode - al wint de nieuwe Ar/Ar-methode snel terrein - en dus niet zo nauwkeurig als in de astronomische tijdschaal, en de meeste omkeringen zijn indirect bepaald door interpolatie.

Als we echter gebruik maken van de astronomische tijdschaal voor de omkeringen van het aardmagneetveld, dan blijkt, dat over de afgelopen vijf miljoen jaar de veranderingen in spreidingssnelheden van de verschillende oceanische ruggen over de gehele wereld een veel logischer en consistent beeld vormen ten aanzien van plaatbewegingen ('platentektoniek'). Bovendien blijkt, dat de snelheden nu zeer goed overeenkomen met de snelheden die we meten met behulp van laser-afstandsmetingen vanuit satellieten; met andere woorden: de snelheden, waarmee sommige continenten uit elkaar drijven, zijn over de afgelopen vijf miljoen jaar constant gebleven en in overeenstemming met de huidige snelheden die we meten. Mede om die reden is de astronomische (magnetische) tijdschaal dan ook volledig geïntegreerd in de laatste versie van de standaard magnetische - en geologische - tijdschaal. Ook het laatste plaattektonische model, dat als standaard geldt voor de onderlinge bewegingen van alle continenten op Aarde, is aangepast aan de astronomische tijdschaal zoals die vooral door het Utrechtse onderzoek tot stand gekomen is.

Summary

A new method of dating the geological record involves the correlation of characteristic sedimentary cycle patterns to computed time series of astronomical variations in the Earth's orbit and spin axis. This astronomical time scale has now been established for the past 10 million years, and has an unprecedented accuracy and precision of several thousand years. Important applications of the new time scale are manifold and include, for instance, studies of paleoclimate, seafloor spreading history and geomagnetic reversal frequency. The astronomical ages are highly consistent with those obtained by single-crystal laser-

fusion (Ar/Ar) radiometric dating techniques.

Adres van de auteurs

Universiteit Utrecht
Faculteit Aardwetenschappen
Budapestlaan 17
3584 CD Utrecht

Literatuur

Berggren, W.A., F.J. Hilgen, C.G. Langereis, D.V. Kent, J.D. Obradovich, I. Raffi, M. Raymo & N.J. Shackleton (1995). Late Neogene (Pliocene-Pleistocene) chronology: New perspectives in high resolution stratigraphy, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107, 1272-1287.

G.K. Gilbert (1895). Sedimentary measurement of geologic time. *J. Geol.* 3, 121-127.

J.D. Hays, J. Imbrie & N.J. Shackleton (1976). Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science* 194, 1121-1132.

F.J. Hilgen (1991a). Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implications for the geomagnetic polarity time scale. *Earth planet. Sci. Lett.* 104, 226-244.

F.J. Hilgen (1991b). Extension of the astronomically calibrated (polarity) time scale to the Miocene/Pliocene boundary. *Earth planet. Sci. Lett.* 107, 349-368.

F.J. Hilgen, W. Krijgsman, C.G. Langereis, L.J. Lourens, A. Santarelli & W.J. Zachariasse (1995). Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136, 495-510.

F.J. Hilgen & C.G. Langereis (1989). Periodicities of CaCO₃ cycles in the Pliocene of Sicily: Discrepancies with the quasi-periods of the Earth's orbital cycles? *Terra Nova* 1, 409-415.

C.G. Langereis & F.J. Hilgen (1991). The Rossello composite: a Mediterranean and

global standard reference section for the Early to early Late Pliocene. *Earth. planet. Sci. Lett.*, 104, 211-225.

W. Krijgsman, F.J. Hilgen, C.G. Langereis, A. Santarelli & W.J. Zachariasse (1995). Late Miocene magnetostratigraphy, biostratigraphy and cyclostratigraphy in the Mediterranean, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 136, 475-499.

J. Laskar (1990). The chaotic motion of the solar system: a numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus* 88, 266-291.

Lourens, L.J., F.J. Hilgen, W.J. Zachariasse, A.A.M. van Hoof, A. Antonarakou & C. Vergnaud-Grazzini (1996). Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical time scale, *Paleoceanography*, 11, 391-413.

M. Milankovitch (1941). *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. R. Serb. Sci. Spec. Publ. 132, Sect. Math. Nat. Sci. 33, 1941 (English transl. by Isr. Program. Transl.; Publ. for U.S. Dep. Comm. and Nat. Sci. Found., Washington D.C., 1969)

Boekbespreking

Twée studieboeken over fysische geografie

Henk Oosterink

H.J.A. Berendsen: De vorming van het land. Inleiding in de geologie en geomorfologie.

296 blz., afb. Van Gorcum, Assen, 1996. ISBN 9023231023. Prijs f 75,-.

H.J.A. Berendsen: Fysisch-geografisch onderzoek. Thema's en methoden.

214 blz., afb. Van Gorcum, Assen, 1996. ISBN 9023231031. Prijs f 55,-.

In het eerstgenoemde boek wordt de ontstaansgeschiedenis van Nederland behandeld. Het gaat daarbij vooral om de landschapscomponenten gesteente en reliëf, die zorgen voor de grootste differentiatie in het landschap. De nadruk valt sterk op het Kwartair, omdat in deze periode vrijwel alle aan het oppervlak voorkomende afzettingen zijn ontstaan. Ook worden de delfstoffen besproken die in de ondergrond en aan het oppervlak voorkomen. Het boek is weliswaar vooral bedoeld als studieboek voor studenten in de fysische geografie en kwartairgeologie, maar ook voor leraren, onderzoekers, en diegenen die door hun werkzaamheden in planning en beleid of uit pure belangstelling genteresseerd zijn in de ontstaansgeschiedenis en natuurlijke gesteldheid van ons land, kan dit boek een nuttige functie vervullen.

Tegelijk met dit boek verscheen 'Fysisch-geografisch onderzoek. Thema's en methoden'. Daarin worden de methoden (en de daarmee behaalde resultaten) behandeld die gebruikt worden

om de ontstaanswijze van het substraat (gesteente en reliëf) te ontrafelen. Daarnaast worden de verschillende afzettingsmilieus besproken die in Nederland voorkomen. De aandacht is daarbij niet alleen gericht op Nederland, maar (indien nodig voor een goed begrip van de situatie) op de gehele wereld. Ook bevat dit boek een aantal onderzoeksmethoden, die van belang zijn voor fysisch-geografisch veldwerk.

Door de grote hoeveelheid beschikbare literatuur over Nederland is er juist nu behoefte aan een totaal-overzicht van de fysische geografie, waarin niet alleen de verschillende landschapscomponenten (de 'geofactoren' gesteente, reliëf, klimaat, bodem, water, lucht, plant, dier, mens) elk afzonderlijk op een overzichtelijke wijze worden behandeld, maar waarin uiteindelijk ook de samenhang tussen deze factoren aan bod komt. De overige landschapsfactoren en de samenhang ertussen komen aan de orde in de overige boeken uit de reeks, die op een later tijdstip zullen verschijnen.

De huidige beperkte cursusduur in het hoger onderwijs vereist een zeer gericht aanpak. Dit geldt zowel voor de didactiek als voor inhoud en omvang van de literatuur. Ook de kosten van de literatuur spelen een belangrijke rol. Om deze redenen is in dit boek veel aandacht geschonken aan de didactiek, onder meer door vragen en opdrachten, en door het gebruik van margeteksten. Het boek is ruim geïllustreerd, maar getracht is om de kosten zo laag mogelijk te houden.

Er is naar gestreefd, de boeken zodanig op te zetten, dat de lezer ook zonder uitgebreide kennis van andere vakgebieden (geologie, klimatologie, bodemkunde, hydrologie, vegetatiekunde), de stof kan begrijpen.

Hierin is men wel bijzonder geslaagd!

Adres van de auteur

Hortensialaan 64
7101 XH Winterswijk