



▲ Gesteente-opeenvolging in de banded iron formations van West-Australië, waarin cycli van hardere (ijzerrijke) en zachtere (kleirijke) lagen klimaatschommelingen weergeven die een gevolg waren van veranderingen in de precessie (tobeweging van de aardas). Foto: Universiteit Utrecht, met toestemming.

Algemene geologie

Aarde kent steeds langere dagen

door A.J. (Tom) van Loon

Valle del Portet 17, 03726 Benitachell, Spanje

Geocom.VanLoon@gmail.com

We zullen er tijdens ons leven niets van merken, maar de dagen worden steeds langer. De lengte van een dag is de tijdsduur waarin de aarde eenmaal om zijn eigen as draait. Omdat die rotatie in de loop van de geologische tijd iets langzamer is geworden, zijn de dagen op de aarde steeds langer geworden. Gegevens over een kortere duur van de dag in de afgelopen paar honderd miljoen jaar waren al langer bekend, maar in het Precambrium duurden de dagen nóg veel korter, zoals blijkt uit cycli in zeer oude gesteenten.

De lengte van een dag op aarde is uniek. Iedere planeet in ons zonnestelsel heeft een eigen dagduur. Zo duurt een dag op Mercurius 59 aardse dagen en is een dag op Mars vrijwel gelijk aan een aardse dag. Bij Venus is de rotatieduur (en dus de duur van de dag) 243 aardse dagen. Ondanks hun grote omvang draaien Uranus en Jupiter in minder dan een aardse dag om hun as. De dagduur (rotatietijd) staat los van de tijd die de planeten om de zon draaien (de omlooptijd, die overeenkomt met de duur van een jaar van die planeet).

Eén van de bekendste ontdekkingen die een belangrijke rol hebben gespeeld bij het begrijpen van de geologische ontwikkeling van de aarde werd verwoord door Charles Lyell in zijn boek 'Principles of Geology': "The present is the key to the past" (de huidige tijd vormt de sleutel tot het verleden). Hoezeer dit ook heeft bijgedragen aan ons begrip van het geologische verleden, we weten nu dat deze stelling slechts gedeeltelijk waar is. Er waren immers perioden waarin de omstandigheden op aarde sterk afweken van de huidige: grote delen van de aarde waren met ijs bedekt (ijstijden) of er was juist helemaal geen ijs (het grootste deel van de aardgeschiedenis). De aardgeschiedenis begon met een extreem langdurige periode zonder leven op land (afb. 1) en tot het Tertiair waren er nog geen grassen (waardoor erosie veel sneller kon plaatsvinden dan nu). Er waren perioden met veel hogere temperaturen, de atmosfeer had soms veel hogere CO₂-concentraties dan nu, enz.

Wat niet veranderd is, zijn de fysische, chemische en biologische wetmatigheden. Zo is de omlooptijd van de aarde om de zon in wezen (met kleine fluctuaties, maar gemiddeld genomen hetzelfde) gelijk gebleven, zodat de lengte van een jaar op aarde onveranderd is gebleven. De rotatiesnelheid van de aarde om zijn as heeft in de loop van de geologische tijd echter wel veranderingen ondergaan, waardoor ook de lengte van de dag veranderde; omdat die verandering aanzienlijk was, varieerde ook het aantal dagen in een jaar.

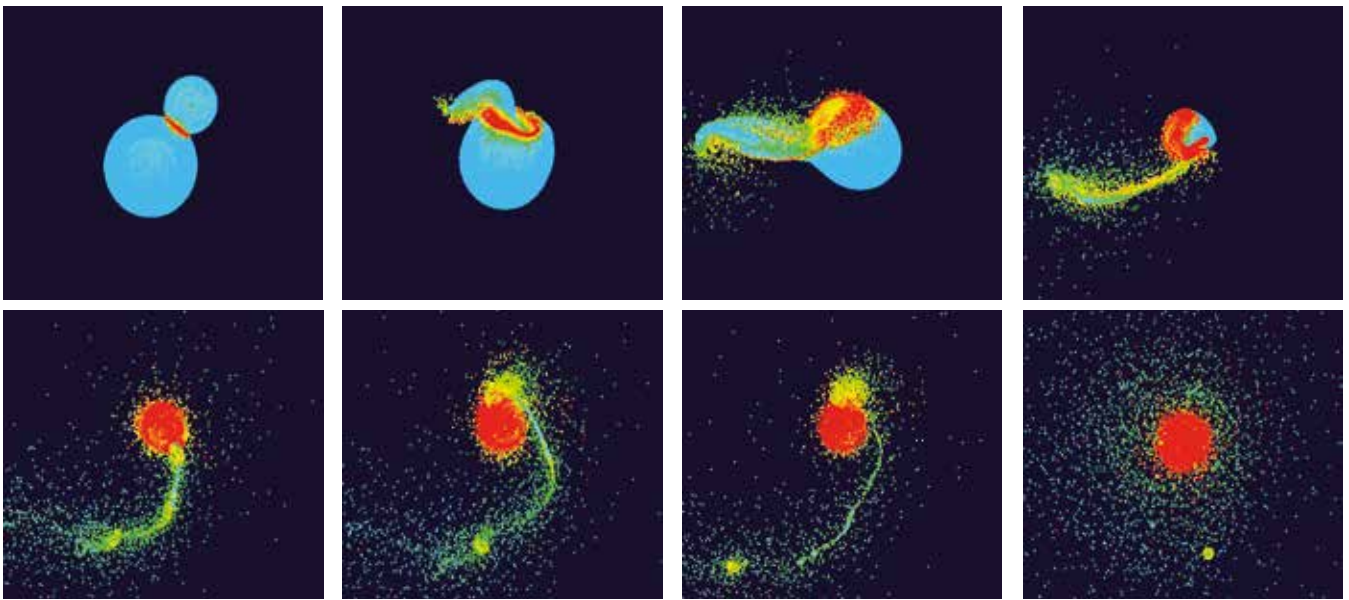


▲ Afb. 1. In het Siluur doken de eerste landplanten op, zoals *Cooksonia pertoni*. De begroeiing van het land met deze planten was aanvankelijk schaars, zodat erosie veel meer vrij spel had dan tegenwoordig. Illustratie: Kevin Boyce via Wikimedia Commons CC BY 3.0.

De rol van de maan

Waarom verandert de rotatiesnelheid van de aarde? Een logische gedachte zou zijn dat dat komt door de wrijving van de vaste aarde met de atmosfeer. Die factor is echter verwaarloosbaar, omdat de atmosfeer in zijn geheel met de aarde mee roteert (zij het met een zekere vertraging). De belangrijkste oorzaak voor de steeds langzamer aardrotatie is de getijdenwerking van de oceanen als gevolg van de aantrekkingskracht van de maan.

De fysica hierachter is zeer ingewikkeld, en het volgende is dan ook een (fysisch niet geheel correcte) versimpeling. De getijden betekenen een dagelijkse verplaatsing van gigantische watermassa's. De energie die daarvoor nodig is, wordt als het ware afgetapt van de rotatie-energie van de aarde. De totale energie van het systeem aarde/maan moet volgens een fundamentele fysische wet echter wel gelijk blijven: de maan



▲ Afb. 2. Enkele fasen uit de ontwikkeling van de maan na een schampende botsing tussen een hemellichaam en de aarde. Materiaal van de aarde (en het andere hemellichaam) wordt de ruimte in geslingerd. Blauwe deeltjes ontsnappen, rode deeltjes vallen terug op aarde; groene en gele deeltjes vertegenwoordigen losgeslagen brokstokken die zullen samenklonteren tot de maan. De aarde en de maan vormen dus samen een systeem waarvan de totale energie gelijk moet blijven. Het hele hier afgebeelde proces vond plaats in ca. 24 uur. Iets aangepast naar Canup (2004), met toestemming.

is immers ontstaan toen een hemellichaam de aarde schampte en een aanzienlijk deel van korst en mantel (uit het gebied waar nu de Indische Oceaan ligt) de ruimte inslingerde. Dit proces is in detail gemodelleerd door Canup et al. (2000). Afb. 2.

De bewegingsenergie die de aarde heeft in de vorm van zijn rotatiesnelheid, neemt – zoals hierboven aangeduid – door de getijdenwerking af; deze energie wordt overgedragen aan de maan. Door de overgedragen energie krijgt de maan een hogere snelheid. Omdat zijn omlooptijd om de aarde gelijk moet blijven, moet hij zijn baan langer maken, en dat doet hij door een baan op iets meer afstand van de aarde te nemen. In de praktijk betekent dit dus dat de afstand van de aarde tot de maan toeneemt. Die afstand neemt nu jaarlijks met ca. 3,84 cm toe (niet echt veel, gezien de huidige afstand van ca. 384.000 km). Door deze toenemende afstand vermindert de aantrekkingskracht van de maan (en dus de getijdenwerking, en dus ook de overdracht van rotatie-energie) geleidelijk (maar ook zeer langzaam). Overigens oefenen ook andere hemellichamen in de vorm van getijden invloed uit op de aarde. Dat geldt vooral (zij het voor een veel geringer deel) voor de zon; zoals verderop besproken oefent de zon een belangrijke invloed uit op de atmosfeer, waar grootschalige luchtverplaatsingen ook een soort van getijden vormen.



▲ Afb. 3. Boorkern uit de BIFs in West-Australië. De opeenvolgende laagjes zijn gedetailleerd zichtbaar. Foto: Universiteit Utrecht, met toestemming.

ouderdom (in Ma)	geologische periode	dagen per jaar	uren per dag
0	huidige tijd	365	24,0
70	Laat-Krijt	370	23,7
220	Laat-Trias	372	23,5
290	Laat-Carboon	383	22,9
340	Vroeg-Carboon	398	22,0
380	Laat-Devoon	399	22,0
395	Midden-Devoon	405	21,6
410	Vroeg-Devoon	410	21,4
420	Laat-Siluur	400	21,9
430	Midden-Siluur	413	21,2
440	Vroeg Siluur	421	20,8
450	Laat-Ordovicium	414	21,2
510	Midden-Cambrium	424	20,7
600	Ediacarium	417	21,0
900	Cryogenium	486	18,1

▲ Tabel 1. Aantal dagen per jaar en daglengte. Bron: NASA.

Onregelmatig proces

Omdat de rotatiesnelheid van de aarde afneemt, neemt de lengte van een dag toe. Een Utrechtse onderzoeksgroep berekende (Lantink et al., 2022) dat een dag 2,46 miljard jaar geleden ongeveer 19 uur duurde. Ze kwamen tot die conclusie op basis van cycli in banded iron formations (BIFs) in West-Australië (zie de kopfoto). De gedetailleerde gelaagdheid in die gesteenten is nog beter te zien in boorkernen van dat materiaal (afb. 3). Gewoonlijk werd aangenomen dat de rotatie van de aarde heel geleidelijk afnam, en dat de dagen dus ook heel geleidelijk langer werden. Daardoor ‘pasten’ er steeds minder dagen in een jaar. Recent onderzoek (Mitchell & Kirscher, 2023) wijst er nu echter op, dat het niet om

een geleidelijk proces ging, maar dat de toename van de lengte van de dag (nu 1,7–1,8 milliseconde per eeuw) onregelmatig plaatsvond, en dat er zelfs perioden waren waarin de daglengte afnam! Hun berekeningen gaan veel verder in de aardgeschiedenis terug dan eerdere onderzoeken, en zijn ook veel gedetailleerder. Deze onderzoekers zijn overigens niet de eersten die opmerkten dat de veranderende daglengte geen regelmatig proces was. Tot die conclusie was ook de NASA al eerder gekomen (<http://spacemath.gsfc.nasa.gov>), zij het alleen voor de laatste 900 miljoen jaar. In Tabel 1 zijn deze op geologische gegevens en de veranderende afstand tot de maan gebaseerde waarden van de NASA weergegeven.

Hierbij moet wel worden benadrukt dat de gegevens waarop deze cijfers zijn gebaseerd vaak zeer beperkt zijn. Het gaat deels om metingen van groeilijnen in daarvoor geschikte fossielen, zoals koralen en rudisten, maar ook om zeer precieze gegevens over de thans langzaam toenemende afstand van de aarde tot de maan, die sinds enkele tientallen jaren gemeten kan worden met laserstralen die van het maanoppervlak worden teruggekaatst.

Verder moet worden bedacht dat inmiddels duidelijk is geworden dat er een verband bestaat tussen de (veranderende) daglengte en de (veranderende) afstand tussen aarde en maan. Kvale et al. (1999) stelden reeds vast, op basis van de analyse van de diktes van laagjes in getijdenafzettingen, dat de toename van de afstand aarde-maan onregelmatig geweest moet zijn (zie ook Van Loon, 2000),

Theorie klopt niet met praktijk ...

De verandering van de daglengte gedurende de geologische geschiedenis van de aarde kan uiteraard, naast de bovengenoemde benaderingen op basis van geologische gegevens, ook worden berekend op basis van puur fysische wetten. Omdat de wetmatigheden van de fysica niet veranderen, leidt dat, in tegenstelling tot bovengenoemde uitkomsten, tot een zeer regelmatige toename van de daglengte en een evenredige afname van het aantal dagen per jaar. Zo'n berekening is onder meer uitgevoerd door Arab (2009), uitgaande van de huidige kennis omtrent de kosmische uitdijing van het heelal (Tabel 2). Die berekeningen komen voor de periode van het prille begin van de aarde uit op een daglengte van zes uur per dag, maar de zo gevonden theoretische daglengtes wijken soms significant af van de daglengtes gevonden op basis van de waarden in Tabel 1, die op geologische gegevens zijn gebaseerd. Dat kan worden verklaard doordat bepaalde processen (zoals de atmosferische getijden) niet in deze berekeningen zijn opgenomen.

Metten van de daglengte

Alleen met uiterst verfijnde technieken is het mogelijk om de precieze daglengte vast te stellen. Dat kan tegen-

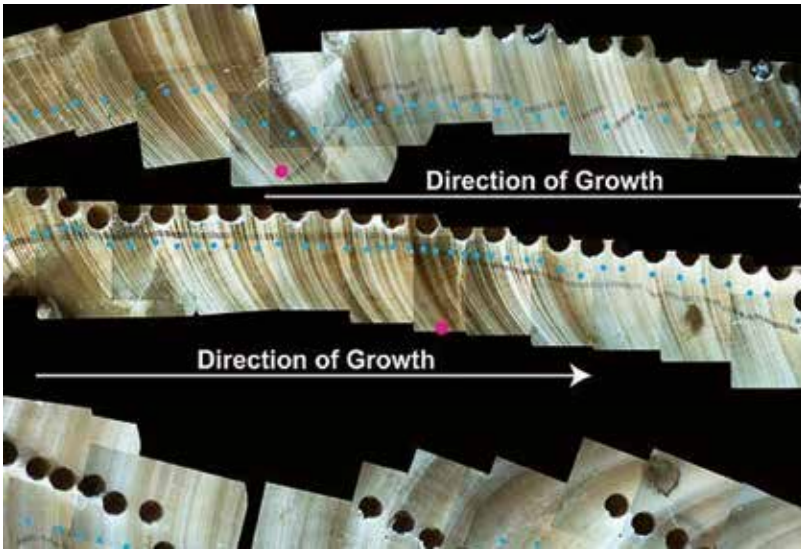
ouderdom (in Ma)	geologische periode	dagen per jaar	uren per dag
65	Paleoceen (Danien)	370,9	23,6
136	Vroeg-Krijt (Valanginien)	377,2	23,2
180	Vroeg-Jura (Toarcien)	381,2	23,0
230	Laat-Trias (Carnien)	385,9	22,7
280	Vroeg-Perm (Kungurien)	390,6	22,4
345	Vroeg-Carboon (Viséen)	396,8	22,1
405	Vroeg-Devoon (Emsien)	402,6	21,7
500	Cambrium (Guzhangien)	412,2	21,3
600	Laat-Neoproterozoïcum (Ediacarium)	422,6	20,7
715	Midden-Neoproterozoïcum (Cryogenium)	435,0	20,1
800	laat Vroeg-Neoproterozoïcum (Tonium)	450,2	19,5
900	vroeg Vroeg-Neoproterozoïcum (Tonium)	456,0	19,2
1200	grens Midden/Laat Mesoproterozoïcum (Ectasium/Stenium)	493,2	17,7
2000	Midden-Paleoproterozoïcum (grens Rhyacium/Orosirium)	615,4	14,2
2500	grens Neoarcheïcum/Paleoproterozoïcum	714,0	12,3
3000	Mesoarcheïcum	835,9	10,5
3560	Eoarcheïcum	1009,5	8,7
4500	begin Hadeïcum	1434,0	6,1

▲ Tabel 2. Door Arab (2009) berekende aantal dagen per jaar en daglengte.

woordig zelfs met een nauwkeurigheid van enkele nanosecondes (een nanoseconde is een miljardste seconde, ofwel een miljoenste milliseconde). Voor het verre verleden kon dit uiteraard alleen op basis van geologische gegevens worden berekend.

Eén van de eerste methoden was het tellen van de fijnkorrelige laagjes in wadafzettingen. Op basis van het herkennen van bijv. springtij kon worden bepaald hoeveel dagen er in een maand gingen. Geen wonder dat deze onnauwkeurige methode meer bekritiseerd dan omarmd werd! Later is veel gebruik gemaakt van de groeiringen in diverse organismen. Zo kon onder meer worden vastgesteld aan de hand van groeiringen in rudisten (afb. 4), dat een jaar bij een gelijke omlooptijd van de aarde om de zon in het Laat-Krijt 372 dagen moet hebben geteld en dat de dagen dus ruwweg een half uur korter duurden dan tegenwoordig (De Winter et al., 2020). Daaraan heb ik al eerder aandacht besteed (Van Loon, 2020).

Met cyclostratigrafie werd het bepalen van de daglengte op aarde veel eenvoudiger. Met deze methode kunnen cyclische gesteente-afwisselingen in stratigrafische opeenvolgingen (geologisch) zeer nauwkeurig worden gedateerd op basis van de regelmaat van de astronomische factoren, die Milankovitch al kon correleren aan de afwisseling van Pleistocene ijstijden en tussenijstijden. Tal van recente publicaties geven ook aan dat in gesteenten teruggevonden cycli (afb. 5) zeer nauwkeurig kunnen worden gedateerd, omdat de Milankovitch-



▲ Afb. 4. Fotomosaïek van microscopische opnames van een deel van de schelp van *Torreitessanchezi*, een rudist. De dagelijkse groeilijnen zijn duidelijk te onderscheiden. De gedeeltes tussen twee rode stippen geven de aangroei gedurende een jaar weer. De afstanden tussen twee opeenvolgende blauwe stippen geven de aangroei weer tijdens een getijdencyclus van twee weken. Foto: American Geophysical Union, met toestemming.

cycli zelf verschillen in duur en intensiteit vertonen, zodat opeenvolgende cycli nooit precies gelijk zijn. Net als de opeenvolgende groeiringen in bomen kunnen ze dus worden vergeleken met een gedateerd standaardpatroon, waarin de 'best fit' wordt gezocht.

Een merkwaardig miljard jaar

Gebruikmakend van de aantekeningen van Milankovitch en daarop gebaseerde berekeningen, die in de laatste zeven jaar zijn uitgevoerd, konden Mitchell & Kirscher (2023), dankzij moderne computerapparatuur, voor een zeer lange periode (teruggaand tot ver in het Precambrium) de rotatiesnelheid van de aarde berekenen. Daarbij hielden ze rekening met het feit dat de dagelijkse opwarming van de aardatmosfeer door de zon ook invloed heeft op de getijden, zowel van water als van lucht. Belangrijk in dit verband is dat in het vroege Precambrium, toen de aardrotatie significant sneller was dan nu, de getijdenwerking in zee als gevolg van de maan relatief geringer was dan de grootschalige



▲ Afb. 5. Milankovitch-cycli in een gesteentepakket van 600 miljoen jaar oud. Foto: Ross Mitchell, met toestemming van de Chinese Academie van Wetenschappen.

luchtverplaatsingen (atmosferische getijden) in de aardatmosfeer veroorzaakt door de (wereldwijd gezien ongelijke) opwarming door de zon. Die atmosferische getijden leidden, in tegenstelling tot de mariene getijden, juist tot een snellere aardrotatie. Fysisch is dit een zeer gecompliceerd samenspel van twee elkaar tegenwerkende (of soms juist samenwerkende) krachten. Daaraan besteed ik hier nu geen aandacht.

Door de afnemende en tijdelijk toenemende rotatiesnelheden als gevolg van, respectievelijk, de maan en de zon, bleef op een gegeven moment de daglengte tijdelijk constant op negentien uur. Dat 'tijdelijk' duurde maar liefst ongeveer een miljard jaar, tussen ruwweg 2 miljard en 1 miljard jaar geleden. Buitengewoon intrigerend (maar vooralsnog onverklaard) is dat zowel het begin als het einde van deze periode werd gekenmerkt door een zeer sterke toe-

name van het zuurstofgehalte in de atmosfeer, maar dat deze periode zelf ('the boring billion') werd gekenmerkt door tektonische en geochemische rust en een gebrek aan verdere ontwikkeling van het leven. Direct na deze 'boring billion' kreeg de ontwikkeling van het leven weer een sterke impuls.

Als mens merken we tijdens ons leven – en zelfs tijdens de hele menselijke geschiedenis – niets van de astronomische toename van de daglengte. Maar toch: iedere dag krijgen we iets meer tijd. Een goede reden om dit niet zo eenvoudige artikel nog eens extra rustig na te lezen.

Referenties

- Arab, A.I., 2009. The length of the day: a cosmological perspective. *Progress in Physics* 1, 8-11.
- Canup, R.M., 2004. Simulations of a late lunar-forming impact. *Icarus* 168, 433-456.
- De Winter, N.J., Goderis, S., Van Malderen, S.J.M., Sinnesael, M., Vansteenberge, S., Snoeck, C., Belza, J., Vanhaecke, F. & Claeys, P., 2020. Subdaily-scale chemical variability in a *Torreites sanchezi* rudist shell: implications for rudist paleobiology and the Cretaceous day/night cycle. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 35, e2019PA003723.
- Kvale, E.P., Johnson, H.W., Sonett, Ch.P., Archer, A.W. & Zawitoski, A., 1999. Calculating lunar retreat rates using tidal rhythmites. *Journal of Sedimentary Research* 69, 1154-1168.
- Lantink, L., Davies, J.H.F.L., Ovtcharov, M. & Hilgen, F.J., 2022. Milankovitch cycles in banded iron formations constrain the Earth-Moon system 2.46 billion years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119(40), e2117146119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2117146119>.
- Mitchell, R.N. & Kirscher, U., 2023. Mid-Proterozoic day length stalled by tidal resonance. *Nature Geoscience*, <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01202-6>.
- Van Loon, A.J., 2000. Afstand tussen maan en aarde neemt grillig toe, blijkt uit getijdenafzettingen. *NGV-Geonieuws* 2(1), 89.
- Van Loon, A.J., 2020. Groeiringen in rudist bewijs voor kortere dag tijdens Laat-Krijt. *Gea* 53(2), 13-15.