

IN DE GREEP VAN DE TIJD¹⁾H.N.A. PRIEM²⁾

Mark Twain laat één van zijn figuren aan de Mississippi zeggen: "very few things happen at the right time, and the rest do not happen at all". Bij de gebeurtenissen die de ontwikkelingsgeschiedenis van onze planeet hebben bepaald, is het uiteraard een filosofische vraagstelling of het tijdstip waarop zij plaatsvonden wel het juiste moment was. De vraag naar het "wanneer" van geologische gebeurtenissen vormt echter een integrerend deel van alle geologisch onderzoek: in de geologische wetenschappen is men gewend TIJD te zien als de noodzakelijke extra dimensie, onmisbaar om de processen te kunnen interpreteren die zich in en op onze planeet hebben afgespeeld. Reeds James Hutton, die zo'n 200 jaar geleden met het formuleren van het actualiteitsprincipe de geologie bracht uit de sfeer van het middeleeuwse denken in dat van de moderne natuurwetenschappen, stelde dat naast het actualiteitsprincipe alleen een "boundless mass of time" vereist is om geologische processen te verklaren. Hóe grenze-loos deze "boundless mass of time" was, daar hadden Hutton en na hem Charles Lyell echter géén voorstelling van. In principe dachten Hutton en Lyell dat onze planeet onderworpen is aan continue gedaanteveranderingen als gevolg van cycli die zich steeds maar weer opnieuw herhaalden, onder invloed van de inwerking van onveranderlijke processen. Zoals Hutton het uitdrukte: "I see no vestige of a beginning — no prospect of an end."

De veronderstelde beschikbaarheid van een nagenoeg ongelimiteerde hoeveelheid tijd vormde ook een belangrijk argument bij de overwegingen die Charles Darwin hebben geleid tot de ontwikkeling van zijn evolutietheorie. Darwin voelde zich aanvankelijk volstrekt niet beperkt in de hoeveelheid tijd die beschikbaar is geweest voor de evolutionele veranderingen van fauna en flora in de aardgeschiedenis. Zo schatte hij, in de eerste uitgave van "The Origin of Species", dat voor de faunale evolutie sinds het einde van het Krijt omstreeks 300 miljoen jaar nodig zou zijn geweest, een ongehoord lange

tijdsduur voor een wereld die nog maar één generatie eerder dacht in het kader van een aarde met een ouderdom van 6000 jaar. Nu weten wij dat sinds het Krijt 65 miljoen jaar zijn verstreken, zodat Darwin's schatting in grootteorde niet eens zo ver mis was.

Het concept van de "boundless mass of time" kwam echter in moeilijkheden bij de ontwikkelingen binnen de fysica in de tweede helft van de negentiende eeuw. In het bijzonder Lord Kelvin's berekeningen betreffende de warmte-afgifte van aarde en zon, evenals de berekeningen door John Joly van de toename in de geologische tijd van het zoutgehalte in het oceanwater, leidden tot de conclusie dat de ouderdom van de aarde zou liggen in de orde van ten hoogste 100 miljoen jaar. Nu weten wij dat de ouderdom van aarde en zonnestelsel 4600 miljoen jaar bedraagt, zodat de schijnbaar zo exacte berekeningen van Kelvin en Joly vele grootteordes te laag zijn uitgekomen.

Juist de exactheid van Kelvin's en Joly's berekeningen hebben echter geruime tijd grote invloed gehad op het geologisch denken. Tot rond de veertiger jaren van deze eeuw is het getal van 100 miljoen jaar blijven rondspoken, als het ging over de ouderdom van de aarde en de tijdsintervallen waarbinnen geologische processen zich moeten hebben voltrokken. Zelfs Charles Darwin, onder de indruk van het enorme prestige dat Lord Kelvin als fysicus had, heeft in de latere edities van zijn "The Origin of Species" het concept van de nagenoeg ongelimiteerde hoeveelheid tijd die beschikbaar zou zijn geweest laten vallen en heeft geprobeerd zijn gehele schema van evolutionele veranderingen in fauna en flora te persen binnen dit tijdsbestek van 100 miljoen jaar.

Toch was al vlak vóór de eeuwwisseling de basis ontvallen aan de berekeningen van Lord Kelvin, terwijl de ontdekking van steeds meer fossiele zoutafzettingen duidelijk maakte dat de toename van het zoutgehalte in het oceanwater niet, zoals door Joly gepostuleerd, een bij benadering irreversibel proces is geweest. Lord Kelvin's berekeningen werden zinloos bij de ontdekking van de radioactiviteit van uranium in 1896 door Henri Becquerel, binnen enkele jaren gevolgd door de ontdekking van de radioactiviteit van thorium, rubidium en kalium. Toen immers werd duidelijk dat binnen de aardmassa

1) Voordracht tijdens het wetenschappelijk gedeelte van de 62e Jaarvergadering van het Koninklijk Nederlands Geologisch Mijnbouwkundig Genootschap op zaterdag 16 maart 1974 te 's-Gravenhage.

2) Z.W.O.Laboratorium voor Isotopen-Geologie, De Boelelaan 1085, Amsterdam-II.

continu grote hoeveelheden warmte worden geproduceerd tengevolge van de kernmutaties van radioactieve elementen. Deze radiogene warmteproductie is de oorsprong van alle energie die gemoeid is met de endogene geologische processen. De aarde is dus niet, zoals ten tijde van Kelvin nog werd verondersteld, een gesteentebol die na een initiële hete en gesmolten fase alleen maar warmte heeft verloren, maar binnen onze planeet heerst grosso modo een evenwichtstoestand tussen enerzijds radiogene warmteproductie, en anderzijds warmteverlies aan het aardoppervlak en energieverbruik bij endogene processen.

De ontdekking van de radioactiviteit maakte echter niet alleen definitief een einde aan Kelvin's argumenten voor een ouderdom van ten hoogste 100 miljoen jaar voor aarde en zonnestelsel. Radioactieve processen leveren ook een betrouwbare en nauwkeurige methode van tijdmeting, met behulp waarvan het mogelijk is gebeurtenissen te dateren in de ontwikkelingsgeschiedenis van de aarde en andere vaste lichamen in ons zonnestelsel. Het is deze methode van tijdmeting, de *isotopen-geochronologie*, waar ik verder over zal spreken.

Zes jaar na de ontdekking van de radioactiviteit door Becquerel postuleerden Ernest Rutherford en Frederick Soddy dat radioactieve straling in feite een begeleidend verschijnsel was bij de mutatie van een radioactief element in andere elementen. Zij concludeerden dat één van de radiogene dochterproducten van uranium het edelgas helium is. Dit bracht Rutherford op het idee dat het mogelijk moet zijn van een radioactief mineraal de ouderdom te bepalen, door gebruik te maken van de accumulatie van het radiogene dochterproduct die in dat mineraal heeft plaatsgevonden. Naarmate een uranium-houdend mineraal ouder is bevat het méér helium, zodat de helium/uranium verhouding een maat moet vormen voor de ouderdom van het uranium-helium mutatiesysteem, en dus voor de ouderdom van het mineraal. Rutherford testte dit concept terstond door een fergusoniet te onderzoeken uit een pegmatiet in Connecticut, voor welk mineraal hij een uranium-helium ouderdom berekende van omstreeks 500 miljoen jaar. Hij presenteerde deze berekening in 1904 tijdens het International Congress of Arts and Sciences te St. Louis in Missouri, aldus de geologische wetenschappen verrijkend met de eerste radiometrische ouderdomsbepaling.

Rutherford onderkende bij deze eerste radiometrische ouderdomsbepaling ten volle dat de uranium-helium ouderdom van 500 miljoen jaar waarschijnlijk slechts een minimum-ouderdom representeert, omdat het in hoge mate onwaarschijnlijk is dat een deel van het radiogeen geproduceerde helium niet uit het mineraal zou zijn ontsnapt. Hij bracht daarmee een probleem naar voren dat ook hedentendage nog een uiterst hinderlijke voetangel vormt op het pad van de isotopen-geochronologie, het probleem namelijk of een mineraal of gesteente in zijn geschiedenis al dan niet een gesloten systeem is gebleven ten opzichte van de elementen van het radioactieve mutatiesysteem. Een tweede voorbehoud dat

Rutherford maakte betrof de onzekerheid ten aanzien van de vervalsconstante, het getal dat aangeeft een hoe groot deel van de uraniumatomen binnen een bepaalde tijdseenheid muteert. Deze vervalsconstante was in de pionierstijd van Rutherford nog zeer onnauwkeurig bekend. Dit probleem is hedentendage, zowel wat uranium betreft als ten aanzien van de andere radionucliden, tot aanzienlijk geringere omvang teruggebracht, aangezien de onzekerheden in de vervalsconstanten van de verschillende radionucliden thans ten hoogste zo'n zes procent bedragen.

Kort na de eerste radiometrische ouderdomsbepaling toonden Rutherford en Boltwood aan dat uit uranium behalve helium ook lood als radiogeen product ontstaat. Zij concludeerden dat ouderdomsbepaling van een uranium-houdend mineraal dus ook mogelijk moet zijn door de verhouding van radiogeen lood tot uranium vast te stellen, een dateringsmethode die door Boltwood in 1907 voor het eerst is toegepast. Omdat het verlies van radiogeen lood uit een mineraal tengevolge van diffusie aanzienlijk geringer moet zijn dan dat van radiogeen helium, meenden Rutherford en Boltwood terecht dat uranium-lood dateringen aanzienlijk betrouwbaarder moeten zijn dan uranium-helium dateringen.

Men zou kunnen denken dat deze methode om de ouderdommen van mineralen te bepalen door gebruik te maken van hun uranium/helium en vooral hun uranium/lood verhoudingen in de geologische wereld met enthousiasme werden ontvangen. Niets is echter minder waar. Men was zo gehecht geraakt aan Kelvin's berekening van ten hoogste 100 miljoen jaar voor de ouderdom van de aarde, dat de door Rutherford en Boltwood gemeten veel hogere ouderdommen met grote scepsis werden ontvangen. Voor de meeste geologen was het pleit beslecht toen in 1908 de resultaten werden gepubliceerd van uranium-lood dateringen van verschillende uraniummineralen uit éénzelfde pegmatiet in Texas, waarbij ouderdommen werden verkregen variërend van enkele honderden miljoenen tot meer dan 10 miljard jaar. In de geologische wereld werd toen de methode van ouderdomsbepaling met behulp van radioactieve elementen bijgezet bij het perpetuum mobile en andere vreugdeloze uitingen van menselijk vernuft. Tot in de dertiger jaren hield men het algemeen op een ouderdom van aarde en zonnestelsel in de orde van ten hoogste 100 miljoen jaar.

Toch bleven enkele fysici en geologen er van overtuigd dat het principe van de radiometrische ouderdomsbepaling gezond moest zijn. Zij bleven doorgaan met het bestuderen van uranium-lood en uranium-helium verhoudingen in uraniummineralen en begonnen geleidelijk inzicht te krijgen in de problemen die zich bij deze systemen kunnen voordoen. De belangrijkste onder hen was de Engelse geoloog Arthur Holmes, die dan ook als de grondlegger van de moderne isotopen-geochronologie kan worden beschouwd.

Ik zal verder niet ingaan op de vele moeizame stappen die moesten worden gezet, vóórdat de door Rutherford voorge-

stelde dateringsmethode met behulp van radioactieve elementen was geëvolueerd tot de gesophisticieerde isotopen-geochronologie die hedentendage wordt beoefend. De principes zijn nog steeds dezelfde als die welke zijn geformuleerd door Rutherford, maar de kennis omtrent de radioactieve mutatiesystemen en de geochemie van de elementen in deze mutatiesystemen is sedert Rutherford aanzienlijk toegenomen, terwijl vooral de laatste 20 jaar geheel nieuwe meetapparatuur en analysemethoden ter beschikking zijn gekomen.

De principes van de isotopen-geochronologie zijn eenvoudig. De ouderdom van een radioactief mutatiesysteem volgt rechtstreeks uit de verhouding van het aantal nucliden van het radiogene dochterproduct en dat van het radioactieve moederelement, en de vervalsconstante (illustreerd aan de hand van een eenvoudig mutatiesysteem als dat van rubidium, waarbij het radioactieve isotoop rubidium-87 via β -emissie muteert tot het 87 isotoop van strontium. De halveringstijd (een andere uitdrukkingvorm voor de vervalsconstante) is voor dit nuclide helaas nog niet precies bekend, maar ligt ergens tussen 47.2 en 50.0 miljard jaar. De radiometrische ouderdom van dit mutatiesysteem in een mineraal of gesteente volgt dus rechtstreeks uit de hoeveelheidsverhouding van radiogeen strontium en rubidium-87:

$$T = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[\frac{{}^{87}\text{Sr (rad.)}}{{}^{87}\text{Rb}} + 1 \right]$$

De onzekerheid van 6% in de vervalsconstante werkt uiteraard rechtstreeks door als onzekerheid in de Rb-Sr ouderdom. Deze onzekerheid heeft echter géén invloed op geologische correlaties en dergelijke, mits bij de ouderdomsberekening maar steeds duidelijk wordt afgesproken welke waarde is gebruikt voor de rubidium-ervalsconstante.

Uiteraard zijn de analytische problemen bij dit alles niet zo eenvoudig, maar over deze technische aspecten zal ik hier niet spreken. U wilt wel aannemen dat het bepalen van de hoeveelheid van het radioactieve moederelement en die van het radiogene dochterproduct mogelijk is, zelfs, zoals vaak het geval is, in hoeveelheden in de orde van één ppm. Ook zal ik hier niet ingaan op de problemen van geochemische aard die zich kunnen voordoen. Deze zijn nagenoeg steeds te herleiden tot de vraag in hoeverre een radioactief mutatiesysteem in een of ander mineraal of gesteente heeft voldaan aan de fundamentele voorwaarde voor radiometrische ouderdomsbepaling: dat het mineraal of gesteente steeds een gesloten systeem is gebleven ten opzichte van de betreffende elementen. Aan deze fundamentele voorwaarde blijkt niet altijd te zijn voldaan. Het geval van de uraniummineralen uit de pegmatiet in Texas dat ik zo juist memoreerde, waarvan de gemeten radiometrische ouderdommen varieerden van enkele honderden miljoenen tot meer van 10 miljard jaar, is een typisch voorbeeld van niet-gesloten mineraalsystemen. Deze uraniummineralen hebben in hun geschiedenis variërende hoeveelheden uranium verloren, waardoor de bepaalde radiometrische ouderdommen nu veel te hoog zijn. Een dergelijk

open-systeem gedrag is, zoals de ervaring heeft geleerd, karakteristiek voor uranium- en thoriummineralen. De sterke radioactiviteit van deze mineralen maakt dat met de tijd in toenemende mate roosterstoringen ontstaan, hetgeen deze mineralen ongeschikt maakt om als gesloten systeem te kunnen optreden. In tegenstelling dus tot de pionierstijd van Rutherford, Boltwood en Holmes, die hun onderzoek geheel richtten op uranium- en thoriummineralen, houdt de isotopen-geochronologie zich hedentendage in hoofdzaak bezig met mineralen en gesteenten waarin de radioactieve elementen slechts in sporenhoeveelheden aanwezig zijn.

Ook bij dergelijke mineralen en gesteenten zijn afwijkingen van het gesloten-systeem-gedrag echter niet zeldzaam. Dit maakt dat in de regel voor een ouderdomsbepaling niet kan worden volstaan met onderzoek van één enkel gesteente-monster. De vaststelling van de ouderdom van een bepaald gesteente vereist normaliter een uitgebreid onderzoek aan series gesteentemonsters en mineraalconcentraten, waarbij verschillende radioactieve mutatiesystemen naast elkaar worden bekeken.

TABEL 1

Radioactieve mutatiesystemen die in de isotopen-geochronologie worden benut

	Half-life, 10^9 year
${}^{238}\text{U} \xrightarrow{6\beta^-} {}^{206}\text{Pb} (+ 8^4\text{He})$	4.51
${}^{235}\text{U} \xrightarrow{4\beta^-} {}^{207}\text{Pb} (+ 7^4\text{He})$	0.713
${}^{232}\text{Th} \xrightarrow{4\beta^-} {}^{208}\text{Pb} (+ 6^4\text{He})$	14.1
${}^{87}\text{Rb} \xrightarrow{\beta^-} {}^{87}\text{Sr}$	47.2 or 50.0
${}^{40}\text{K} \begin{cases} \xrightarrow{\text{el. capture}} {}^{40}\text{Ar} (11\%) \\ \xrightarrow{\beta^-} {}^{40}\text{Ca} (89\%) \end{cases}$	1.3

De radioactieve mutatiesystemen die in de isotopen-geochronologie worden benut zijn weergegeven in Tabel 1. Behalve deze zijn er natuurlijk méér radioactieve elementen in de vaste materie van ons zonnestelsel. Om als radioactieve klok te kunnen dienen moet het radioactieve element echter een halveringstijd hebben die ligt in dezelfde orde van grootte als de ouderdom van het zonnestelsel, d.w.z. ongeveer tussen 10^8 en 10^{11} jaar. Bovendien moet aan een aantal geochemische voorwaarden zijn voldaan, waarvan de belangrijkste is dat de radionuclide en het dochterproduct géén overeenkomstige chemische eigenschappen bezitten. Deze voorwaarden maken dat van de radioactieve elementen er slechts vijf mutatiesystemen zijn die op grote schaal toepassing vinden als radioactieve klokken: de beide uranium-lood systemen, het thorium-lood systeem, het rubidium-strontium systeem, en het kalium-argon systeem.

De fundamentele aanname bij al deze radioactieve klokken is uiteraard dat de vervalsconstantes van de radionucliden onder alle geologisch mogelijke omstandigheden en gedu-

rende de gehele 4600 miljoen jaar van de geologische tijd, inderdaad constant zijn gebleven. Dit is een vraag die vaak wordt gesteld: is de vervalsconstante van een radionuclide werkelijk een universele, onveranderlijke constante? Deze onveranderlijkheid volgt in eerste instantie uit de kernfysica; de totale massa van ons zonnestelsel is immers te gering om ooit omstandigheden te hebben doen bestaan, waaronder de kernmutaties van de radioactieve atoomkernen waar het hier om gaat (uranium, thorium, rubidium en kalium) ooit kunnen zijn beïnvloed door externe chemische en fysische condities. Nu is er echter in de fysica van vandaag ook een neiging om te twijfelen aan de onveranderlijkheid van allerlei zogenaamde natuurconstanten. Zo wordt bijvoorbeeld gefilosofeerd over afname van de gravitatieconstante in de loop van de tijd en de eventuele invloed die veranderingen van de gravitatieconstante kunnen hebben gehad op allerlei andere natuurconstanten, zoals bijvoorbeeld op de vervalsconstanten van radioactieve nucliden. Het is daarom erg gelukkig dat wij in de gesteenten zelf het bewijs vinden dat de vervalsconstanten van radioactieve nucliden binnen enkele procenten inderdaad constant zijn gebleven, in ieder geval gedurende de laatste 3500 miljoen jaar. Wij vinden dit bewijs in de zogenaamde plechroïtische halo's die in sommige mineralen ontstaan rond ingesloten radioactieve mineraalfasen, tengevolge van de ionisatie die wordt teweeggebracht door het continue bombardement met geëmitteerde alfadeeltjes. Het bekendst zijn uiteraard de donkere halo's rond ingesloten zirkoonkorreltjes in biotiet, een verschijnsel welbekend aan een ieder die wel eens slijpplaatjes van kristallijne gesteenten heeft bestudeerd, iets wat merkwaardigerwijs in Nederland niet meer een onderdeel vormt van elke opleiding die zich richt op het onderzoek van kristallijne gesteenten. Indien wij deze halo's nader onderzoeken, dan blijken zij te zijn opgebouwd uit een groot aantal concentrische ringen. Elke ring vertegenwoordigt de dracht van de alfa-deeltjes die door een radionuclide worden uitgezonden. Nu is de dracht van een alfadeeltje direct gerelateerd aan de vervalsconstante van het emitterende radionuclide. De verschillende ringen in een halo corresponderen dus met verschillende alfa-emitterende leden van de uranium- en thorium-vervalreeksen, waarbij de straal van iedere ring een functie is van de vervalsconstante van het corresponderende radionuclide. Dit is een fysisch gegeven.

Indien de vervalsconstante van een radionuclide in de loop van de geologische geschiedenis geleidelijk zou zijn veranderd, dan zou de met dat radionuclide corresponderende ring in de halo in een drie miljard jaar oud gesteente, door het geleidelijk veranderen van de dracht van de alfa-deeltjes, dus breder moeten zijn dan de overeenkomstige ring in de plechroïtische halo in een 10 miljoen jaar oud gesteente. Deze kwestie is uitvoerig onderzocht in gesteenten van allerlei ouderdommen, maar de conclusie is eenduidig: er is géén verschil tussen de oudste aardse gesteenten en zeer jonge gesteenten, voor zover het de breedtes van de ringen in plechroïtische halo's betreft. De onveranderlijkheid van de vervalsconstanten door de geologische tijd is hierdoor, althans binnen de waarnemingsnauwkeurigheid van enkele procenten,

gedemonstreerd, in ieder geval voor de alfa-emitterende leden van de uranium- en thorium-vervalreeksen.

De constantheid van de vervalsconstanten kunnen wij dus voor de duur van de geologische geschiedenis als zekerheid aannemen. De analysemethoden zijn thans dusdanig ontwikkeld dat het analyseren van de betreffende isotopen géén onoverkomelijke problemen meer stelt, zij het dan dat hiervoor een uitgebreide apparatuur en uitrusting nodig zijn. Indien in de geologische geschiedenis verstoringen zijn opgetreden van het gesloten-systeem gedrag van gesteenten en mineralen, dan kunnen wij dat in de regel onderkennen door vergelijking van de verschillende radioactieve klokken in uiteenlopende gesteenten en gesepareerde mineralen. In principe is het dus mogelijk vast te stellen hoeveel jaren zijn verlopen sinds een gesteente is gevormd of gemetamorfoseerd. Deze dateringen maken het dan weer mogelijk allerlei gebeurtenissen in de ontwikkelingsgeschiedenis van onze planeet van jaartallen te voorzien.

De isotopen-geochronologie verschaft de geologische wetenschappen dus de werktuigen om gebeurtenissen in de geologische geschiedenis te voorzien van jaartallen. Nu is een eerste probleem hierbij dat een belangrijk deel van het geologisch onderzoek zich richt op sedimentaire gesteenten, terwijl met de isotopen-geochronologie uitsluitend sommige mineralen en kristallijne gesteenten kunnen worden gedateerd, zoals granieten en basalten. Om sedimentaire gesteenten te dateren kan men een indirecte methode volgen, door enerzijds een kristallijn gesteente te dateren waarop het sedimentaire gesteente is afgezet, en anderzijds bijvoorbeeld een dolerietgang die het sediment doorsnijdt. Men bepaalt aldus een maximum- en een minimum-ouderdom voor de depositie van het sediment. Andere, meer directe methoden zijn het dateren en een sedimentair gesteente van het authigene mineraal glaukoniet, hetgeen in de praktijk echter veel problemen blijkt te geven, dan wel het dateren van laagjes vulkanisch materiaal die tussen de sedimenten zijn ingeschakeld. Het laatste geeft verreweg de beste resultaten, vooral het dateren van ingeschakelde laagjes van vulkanische, zure of intermediaire tuffen.

Een voorbeeld van een dergelijke aanpak levert de datering van de Roraima Formatie in N.O. Zuid-Amerika, welke zo'n 450,000 km² overdekt van het kristallijne basement van het Guiana Schild in Venezuela, Guyana, Brazilië en Suriname (de Tafelberg). Deze Formatie, die in Venezuela een dikte bereikt van zo'n 2400 meter, bestaat uit niet-metamorfe zandstenen en conglomeraten met ingeschakelde laagjes rhyolietisch en ignimbrisch materiaal. De ouderdom van deze Formatie is lang een raadsel geweest. Men dacht aan Mesozoïsch en zelfs aan Tertiair, tot op grond van radiometrische ouderdomsbepalingen bleek dat dolerietgangen die de Formatie doorsnijden 1699 ± 27 Ma geleden zijn gevormd. De onderliggende granieten van het Guiana Schild zijn 1920 ± 40 Ma oud, zodat de Roraima sedimentatie tussen 1920 en 1700 Ma geleden moet hebben plaatsgevonden. Om deze ouderdom nader te preciseren hebben wij vervolgens op de

Tafelberg ingeschakelde rhyolitische en ignimbrische laagjes bemonsterd en deze vervolgens gedateerd. De ouderdom bleek 1695 ± 18 Ma te zijn, binnen de foutengrenzen even oud als de dolerieten die de Formatie doorsnijden.

Geconcludeerd kan dus worden dat de depositie van de Roraima sedimenten op het Guiana Schild rond 1700 Ma geleden heeft plaats gevonden, direct gevolgd door intrusies van basaltisch magma.

Door toepassing van deze directe en indirecte dateringsmethoden is de op fossielen gebaseerde geologische tijdschaal thans van een raamwerk van absolute jaartallen voorzien. De indirecte methode laat echter in de regel nog een ruime marge tussen de maximum- en de minimum-ouderdom, terwijl directe datering van fossielhoudende sedimentaire gesteenten vaak niet mogelijk is door het ontbreken van laagjes vulkanisch materiaal. De jaartallen in deze tijdschaal zijn door deze beperkingen dan nog niet alle zo nauwkeurig als men zou wensen: er zijn nog veel te weinig voorkomens bekend van laagjes vulkanisch materiaal geassocieerd met sedimentaire afzettingen die op grond van hun fossielinhoud stratigrafisch goed zijn gedocumenteerd. Dergelijke voorkomens, die dringend noodzakelijk zijn om tot een andere precisering van de jaartallen in de geologische tijdschaal te komen, beveel ik gaarne aan onder de aandacht van diegenen van U die bij olie-exploratie of anderszins in sedimentaire gesteenten werkzaam zijn. Ondanks deze nog bestaande onnauwkeurigheden, geeft de thans beschikbare tijdstabel (Tabel 2) toch een goede indruk van de tijdsduur van het Phanerozoicum en van de tijdsintervallen die corresponderen met de verschillende geologische periodes. Uit deze tabel blijkt o.a. dat de tijdsduren van de verschillende geologische periodes nogal variëren, van 90 Ma voor het Carboon tot 20 Ma voor het Siluur. Aangezien deze periodes zijn gebaseerd op duidelijk te onderscheiden stadia in de faunale evolutie, lijkt het dus dat de snelheid van de evolutionele veranderingen in de fauna nogal veranderlijk is geweest.

TABEL 2
Tijdschaal van het Phanerozoicum.

	Age, Ma	
QUATERNARY	2.1	
TERTIARY	Pliocene	7
	Miocene	26
	Oligocene	38
	Eocene	54
	Palaeocene	65
CRETACEOUS	135?	
JURASSIC	205?	
TRIASSIC	245?	
PERMIAN	290?	
CARBONIFEROUS	380	
DEVONIAN	430?	
SILURIAN	450	
ORDOVICIAN	500	
CAMBRIAN	610?	

$\lambda^{87}\text{Rb} = 1.39 \times 10^{-11}/\text{a}$

De meest spectaculaire resultaten heeft de isotopen-geochronologie achter bereikt in het onderzoek van het Precambrium, het deel van de aardgeschiedenis ouder dan 600 Ma. Wij weten thans dat de geologische geschiedenis van het Precambrium 3 miljard jaar omvat tegen een tijdsduur van het Phanerozoicum van 600 miljoen jaar, d.w.z. dat 5/6 van de geregordeerde geologische geschiedenis in het Precambrium ligt. Grote delen van de continentale delen der aardkorst bestaan uit Precambrium. Tot zo'n 15 jaar geleden stond de geoloog voor onoverkomelijke moeilijkheden bij de ontrafeling van de geologische geschiedenis van deze Precambriese schilden, omdat fossielen in de daarvoor in aanmerking komende gesteenten van sedimentaire herkomst zeer schaars zijn, en dan nog uitsluitend enigmatica dan wel weinig karakteristieke levensvormen als lagen en dergelijke. Dit maakte dat chronostratigrafische indelingen en correlaties over grote afstanden onmogelijk waren.

Het Baltische Schild in Noord Europa en het Noord-Amerikaanse schild zijn van oudsher de schildgebieden die relatief het beste zijn onderzocht. Sinds de tweede helft van de vorige eeuw is vooral in het Baltische Schild van Zweden en Finland intensief geologisch speurwerk verricht, waarbij men op grond van contact-relaties langs intrusieve gesteenten, van tectonische structuren, en van allerlei lithologische kenmerken toch heeft geprobeerd een chronostratigrafie op te stellen. De in 1962 gepubliceerde officiële geologische kaart van Zweden, bijvoorbeeld, geeft een indeling van het Precambrium in vijf cycli die op deze wijze zijn onderscheiden; bij deze indeling zijn behalve veldwaarnemingen echter ook al enkele van de eerste radiometrische ouderdomsbepalingen in aanmerking genomen. Het isotopen-geochronologisch onderzoek in dit gebied is echter pas in de tweede helft van de zestiger jaren op enige schaal aangepakt, waarbij ook ons Amsterdamse laboratorium veel werk heeft verzet. Op grond van dit dateringswerk is het nu duidelijk geworden dat in het Precambrium van het Baltische schild niet vijf, maar slechts drie grote episodes te onderscheiden zijn, episodes die worden gekenmerkt door het optreden op grote schaal van orogene bewegingen, granitisch en rhyolitisch magmatisme, en metamorfose. Een chronostratigrafische kolom als in Tabel 3 is een poging tot ordening van de beschikbare gegevens in Noorwegen, maar deze lijkt in hoofdzaak ook te gelden voor Zweden en Finland. De eerste grote episode, met een ouderdom rond 2800 Ma, is hier aangeduid als pre-Karelian (géén officiële naam) en correspondeert met het Kenoran of Algoman in Noord Amerika. Migmatieten en granulieten die tijdens deze episode zijn gevormd beslaan grote gebieden in oost en noord Finland en noordelijk Noorwegen. Het gehele Baltische schild, inclusief deze zeer oude gebieden, draagt vervolgens de sporen van orogenese, metamorfose, granietvorming en rhyolitisch magmatisme tijdens de tweede grote episode, het Svecofennian. In Noorwegen beslaat deze periode, die uit een orogene en een post-orogene fase bestaat, het tijdsinterval van circa 1900 tot 1550 Ma, maar in Zweden en Finland gaat er nog een oudere fase van

TABEL 3
Provisionele chronostratigrafische kolom van het precambrium in Noorwegen.

explosion vulcanism (Fen area)	575 Ma
basaltic magmatism (dolerite dikes)	around 900 Ma?
SVECONORWEGIAN EPISODE (southern Norway)	
termination of uplift & cooling	between 850 and 900 Ma
post-tectonic granitic magmatism	between 900 and 950 Ma
folding movements, high-grade metamorphism & granitic magmatism	between 950 and 1200 Ma
Jotnian basalts & sandstones	around 1300 Ma
anorogenic granitic magmatism	around 1400 Ma
basaltic magmatism (hyperite-dolerite dikes)	around 1550 Ma?
SVECOFENNIAN (SVECOKARELIAN) EPISODE	
post-tectonic granites, acid/basic volcanics & sediments (Supracrustals)	between 1550 and 1700 Ma
folding movements, high-grade metamorphism & granitic magmatism	between 1700 and 1900 Ma
PRE-KARELIAN EPISODE	
high-grade metamorphism (Lofoten area)	around 2800 Ma
	$\lambda^{87}\text{Rb} = 1.39 \times 10^{-11}/\text{a}$

vulkanisme en sedimentatie vooraf aan de orogene fase, beginnend bij ongeveer 2100 Ma. Na het Svecofennian, dat correspondeert met het Hudsonian of Penokian in Noord Amerika, kunnen er in Noorwegen en Zweden nog een drietal kleinere gebeurtenissen worden onderscheiden. Eerst een episode van basaltisch magmatisme met een ouderdom van vermoedelijk omstreeks 1550 Ma. Vervolgens is op enkele plaatsen anorogeen granitisch magmatisme herkend, met een ouderdom rond 1400 Ma. Daarna volgt de depositie van de Jotnische zandstenen geassocieerd met basaltuitvloeiingen, rond 1300 Ma. Dan komt er weer een zeer belangrijke episode, het Sveconorwegian, dat het tijdsinterval van 1200 tot 850 Ma omvat. De Svevonorwegische episode, die naast zuidelijk Noorwegen en ZW Zweden misschien ook noordelijk Noorwegen heeft beïnvloed, correspondeert met het Grenville in Noord Amerika. Direct ná het Sveconorwegian is er lokaal nog wat basaltisch magmatisme en tenslotte, op 575 Ma (dus eigenlijk al in het Onder Cambrium), treedt plaatselijk wat explosievulkanisme op, met als bekendste voorbeeld het carbonatiet-complex van het Fen-gebied. Op het Baltische schild dat het resultaat is van deze Precambrische gebeurtenissen ontwikkelt zich in het Paleozoicum het Caledonische orogeen. De hoofdfase van de Caledonische orogene bewegingen, metamorfose en granitisch magmatisme ligt rond 450 Ma, waarna het nog geruime tijd heeft geduurd vóór het Caledonisch blok zover was afgekoeld dat de mineralen gesloten systemen konden worden voor de radioactieve mutatiesystemen. De mineraalouderdommen in het Caledonicum liggen dan ook grotendeels rond 400 Ma, met als ondergrens ongeveer 380 Ma. Tenslotte ontstond op het Baltische schild tijdens het Perm de bekende Oslo slenk met zijn magmatisme.

Ik laat deze provisorische chronostratigrafische tabel van het Noorse deel van het Baltische schild zien als voorbeeld van de ontrafeling van de geologische geschiedenis van een schildgebied, gebaseerd op een combinatie van uiteenlopende veldwaarnemingen en isotopen-geochronologisch onderzoek. Van het Noord-Amerikaanse schild is ook een dergelijke chronostratigrafische tabel op te stellen, maar de overige

schildgebieden zijn voornamelijk aanzienlijk minder goed bestudeerd. Toch beginnen ook andere Precambrische gebieden, in het bijzonder de Guina's, Brazilië, Afrika en Australië, de laatste jaren beter bekend te worden. Probeert men een aantal van de significante, thans beschikbare gegevens van de verschillende schildgebieden samen te vatten in een diagram, dan komt men tot een schematische voorstelling van de ontwikkelingsgeschiedenis van onze planeet zoals afgebeeld in Fig. 1. Aan het begin staat de condensatie van de aarde en de andere vaste lichamen van ons zonnestelsel, 4600 Ma geleden. Deze ouderdom van 4600 Ma vinden wij terug in meteorieten en in sommige bestanddelen van de regoliet op de naam. Daarna zijn er uit het eerste miljard jaar van de aardgeschiedenis géén gesteenten bewaard gebleven. De oudste tot dusverre bekende aardse gesteenten zijn complexen van granitische gneissen in ZW Groenland, met een ouderdom van 3650 Ma. Toen was er dus in ieder geval al een aardkorst met dezelfde samenstelling als wij thans hebben. In de Precambrische schilden zijn er vervolgens een drietal episodes te onderscheiden van "world-wide orogenic activities", die wij in het Baltische schild zo juist hebben aangeduid met de namen pre-Karelisch, Svecofennisch en Sveconorwegisch. Daarna komen in het Phanerozoicum drie "world-wide" orogene perioden, in Europa bekend onder de namen Cadomien (waartoe ook het Caledonicum behoort), dan het Hercynien, en tenslotte het Alpinicum. Nemen wij achter de tijdsintervallen van de drie grote Precambrische episodes in aanmerking, dan kan men zich afvragen of in ieder geval het Cadomien en het Hercynien niet als fasen van één enkele episode van het Precambrische type moeten worden gezien, waarbij misschien ook nog wel het Alpinicum gerekend moet worden.

U ziet in het diagram van Fig. 1 ook enkele feiten weergegeven, die te maken hebben met de evolutie van atmosfeer en leven. Tot ongeveer 1800 Ma geleden moet het zuurstofgehalte van de atmosfeer hebben gelegen beneden een niveau dat ongeveer 1% bedroeg van het huidige gehalte, zoals blijkt uit de depositie van anaerobe sedimenten als de "gold

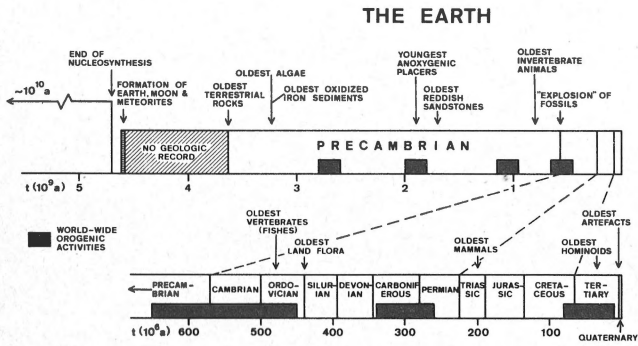


Fig. 1 Schematische voorstelling van enkele belangrijke gebeurtenissen in de ontwikkelingsgeschiedenis van de planeet Aarde.

-uranium reefs". De uraniumhoudende conglomeraten in het Blind River gebied in Canada zijn de jongste van dergelijke afzettingen, met een ouderdom rond 1800 Ma. Daarna is het zuurstofgehalte zover gestegen dat zich de eerste afzettingen van rode zandstenen konden vormen, waarvan wij de oudste afzettingen aantreffen in de Roraima Formatie van Zuid-Amerika; wij hebben zo juist gezien dat de ouderdom van deze Formatie omstreeks 1700 Ma bedraagt. Wat de evolutie van fauna en flora betreft: reeds in de Onverwacht Serie van het Swaziland Systeem in Zuid Afrika, met een ouderdom rond 3300 Ma, zijn fossielen van blauw-groene algen gerapporteerd. De oudste fossielen van invertebraten zijn omstreeks 700 Ma oud. Het eerste landleven verschijnt omstreeks 400 Ma geleden, hetgeen betekent dat het zuurstofgehalte in de atmosfeer toen tot ongeveer zo'n 10% van het huidige niveau moet zijn gestegen. Fossielen van vissen verschijnen op 480 Ma en van zoogdieren op 200 Ma. Fossielen van de eerste Primaten zijn ongeveer 32 Ma oud en van de eerste hominide levensvormen ongeveer 4 Ma. De oudste hominide levensvormen die met artefacten zijn geassocieerd, dateren uit lagen met een ouderdom van omstreeks 2.5 Ma.

Na dit diagram van de ontwikkelingsgeschiedenis der aarde ziet U in Fig. 2 een soortgelijk diagram van onze naaste buurman, de maan, zoals dat kan worden opgesteld op grond van de thans beschikbare gegevens. De vormingsouderdom van 4600 Ma is bewaard gebleven in sommige gesteente-fragmentjes van de regoliet, het losse oppervlaktemateriaal. Daarna is er zo'n 500 Ma géén "lunar record". Een opvallende concentratie van gesteenteouderdommen ligt tussen 3900 en 4100 Ma, vooral in de breccies die grote delen van het maanoppervlak bedekken. Er is wel verondersteld dat deze

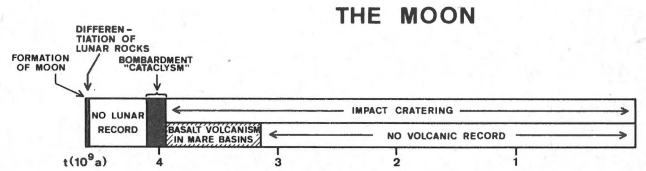


Fig. 2 Schematische voorstelling van enkele belangrijke gebeurtenissen in de ontwikkelingsgeschiedenis van de maan.

episode rond 4 miljard jaar een periode representeert waarbinnen op grote schaal planetesimals door de maan zijn ingevangen, welke inslagen verantwoordelijk zouden zijn voor het ontstaan van de grote mare-gebieden. Na de vorming van de maren vond in de maregebieden tot zo'n 3150 Ma geleden op grote schaal basaltisch vulkanisme plaats. Er zijn géén aanwijzingen voor vulkanische activiteiten jonger dan 3150 Ma. Wél zijn er tot in recente tijd kleine inslagkraters gevormd, waarvan de ouderdommen kunnen worden vastgesteld door het dateren van de smeltfragmentjes.

Ik heb met U enkele grote sprongen gemaakt door een geschiedenis die zo'n 4600 Ma beslaat. De isotopen-geochronologie probeert jaartallen te zetten bij de gebeurtenissen in deze geschiedenis. Deze jaartallen zijn van groot belang voor allerlei praktische problemen bij het geologische kaarteringswerk, in het bijzonder in Precambrische gebieden, waar zij een onmisbaar hulpmiddel vormen. Daarnaast geven zij ook antwoord op de vraag naar het "wanneer", een vraag die een integrerend deel vormt van het menselijk denken en die ten grondslag ligt aan alle onderzoek naar het verleden, of dat nu de geschiedenis van de mensheid betreft dan wel de ontwikkelingsgeschiedenis van onze planeet. Maar ook helpen deze jaartallen om een beter inzicht te krijgen in de processen die zich binnen onze planeet afspelen, door deze processen te voorzien van de dimensie TIJD.

Geochronologie is vernoemd naar de god CHRONOS en zijn moeder GAIA: CHRONOS de personificatie van de TIJD die alles voortbrengt, maar ook alles weer vernietigt, en GAIA de personificatie van de AARDE. De vader van CHRONOS was OURANOS, de eerste god die uit de chaos voortkwam, de personificatie van de kosmos en de naamgever van ons element URANIUM. De isotopen-geochronologie is dus een waardig petekind van deze oude goden, waar dit vakgebied immers tot doel heeft het ontstaan en vergaan van gebergtekens en alle andere gedaanteveranderingen van de aarde te verbinden aan de dimensie tijd, met als referentie radioactieve klokken als die van het element uranium.