



Achtergrondinformatie

Koolstofdatering

De verhouding tussen de koolstofisotopen ^{14}C en ^{12}C in een levend organisme heeft een waarde van $1,3 \cdot 10^{-12}$ – zie de pagina [Toepassingen van ioniserende straling](#). Na de dood van het organisme neemt deze isotopenverhouding af door het radioactief verval van ^{14}C met een halveringstijd van 5730 jaar. Met deze gegevens is de ouderdom van bij archeologisch onderzoek gevonden organisch materiaal te bepalen.

Ouderdomsbepaling

Op de pagina [Eigenschappen van ioniserende straling](#) staat het verband tussen het oorspronkelijk aanwezige aantal radioactieve kernen N_0 , het aantal radioactieve kernen N_t dat op een tijdstip t is overgebleven en de vervalconstante λ :

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Als het oorspronkelijke aantal radioactieve kernen en de vervalconstante bekend zijn, kan uit een meting van het overgebleven aantal radioactieve kernen (of van het door verval gevormde aantal kernen van een nieuw element) de verstreken tijd – de ‘ouderdom’ – worden bepaald.

Het overgebleven aantal radioactieve kernen is op twee manieren te bepalen. Bij de eerste methode wordt met een *telbuis* de activiteit van de overgebleven radioactieve kernen gemeten. Deze methode is echter onnauwkeurig voor isotopen met een heel lange halveringstijd en/of als er maar weinig van het te onderzoeken materiaal beschikbaar is. De activiteit is dan te laag in verhouding tot de altijd aanwezige achtergrondstraling. Het is in dat geval beter om een methode te gebruiken waarbij met een *massaspectrometer* het aantal overgebleven radioactieve kernen op een meer directe manier wordt ‘geteld’.

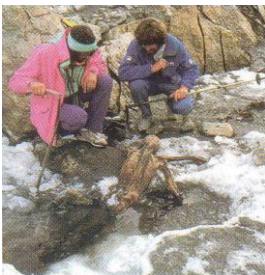
^{14}C -methode

In de natuur komen drie koolstofisotopen voor: ^{12}C (relatief voorkomen: 98,9%), ^{13}C (1,1%) en een zeer geringe hoeveelheid van de radioactieve isotoop ^{14}C die met een halveringstijd van 5730 jaar door β -verval verandert in ^{14}N . Het ^{14}C wordt voortdurend in de bovenste lagen van de atmosfeer aangemaakt door inwerking van kosmische straling. De kosmische productie en het radioactief verval van ^{14}C zijn met elkaar in evenwicht, zodat de hoeveelheid ^{14}C (vooral gebonden in CO_2) in de atmosfeer (ruwweg) constant is.

Planten, dieren en andere levende wezens nemen koolstof op in dezelfde concentratieverhoudingen zoals die zich in de atmosfeer voordoen. Sterft het organisme, dan wordt geen nieuwe koolstof opgenomen en daalt de concentratie ^{14}C door radioactief verval. De verhouding van ^{14}C tot ^{12}C en ^{13}C is daardoor een maat voor de tijd die is verstreken sinds het sterven van het organisme. Deze methode is dus geschikt om de ouderdom van koolstofhoudende dode materialen zoals hout, kleding en botten te bepalen.

Ouderdomscorrectie – Dit is echter een iets te eenvoudige voorstelling van zaken, omdat de productiesnelheid van ^{14}C , en daarmee de verhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, in het verleden niet constant is geweest. Dat hangt samen met veranderingen in het magnetisch veld van zowel de Aarde als de Zon, waardoor de intensiteit van de kosmische straling – en daarmee het evenwicht tussen productie en verval – verandert. Het verband tussen de ouderdom en de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -verhouding is voor de afgelopen twaalfduizend jaar vastgelegd door van stukjes hout, waarvan de ouderdom is bepaald door het tellen van jaarringen van bomen, de verhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ te meten.

Een klein deel van deze ijkromme is weergegeven in het bovenste diagram van figuur 2, waarbij de echte ouderdom op de horizontale as is uitgezet tegen de ^{14}C -ouderdom – de ouderdom die uit de in 1950 gemeten $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -verhouding zou volgen als de productiesnelheid van ^{14}C in het verleden constant zou zijn geweest. Voor nog oudere voorwerpen is gebruik gemaakt van monsters koraal, stalagmiet enzovoort, waardoor de ijkromme zich nu ongeveer vijftigduizend jaar naar het verleden uitstrekt.

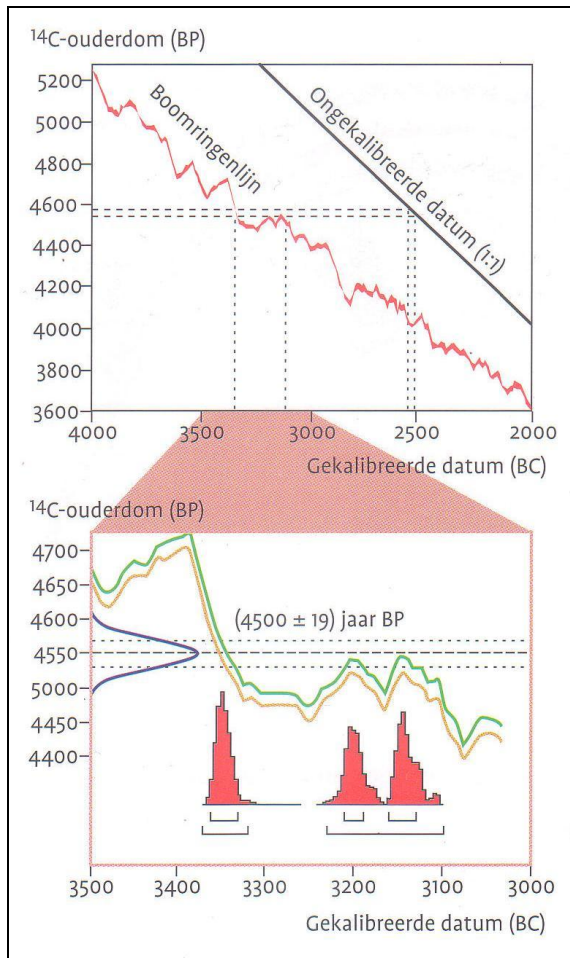


Figuur 1 – Bergbeklimmers onderzoeken het gedeeltelijk van ijs ontdane lichaam van de ijsman Ötzi.

De ijsman Ötzi

Op 19 september 1991 vonden twee bergbeklimmers op de grens van Oostenrijk en Italië het lichaam van een mens dat half uit een laag ijs stak (zie figuur 1). De ijsman kreeg al snel de bijnaam Ötzi, naar het nabijgelegen Ötztal. De ouderdom van Ötzi werd vastgesteld door koolstofdatering van bot en weefsel. Het resultaat daarvan is te zien in

het onderste diagram van figuur 2, waar het relevante deel van de ijkkromme in meer detail is weergegeven. Vanwege de schommelingen in de ijkkromme is het verband tussen de ^{14}C -ouderdom (4550 ± 19 jaar) en de echte ouderdom niet eenduidig: het zou 3360-3300, 3210-3190 en 3160-3130 BC kunnen zijn. Maar in elk geval is de waarschijnlijkheid groot dat deze tussen 3370 en 3100 BC ligt.



Figuur 2 – Het bovenste diagram geeft een deel van de ijkkromme voor koolstofdatering. De rechte lijn onder 45° geeft de een-op-een-vertaling van de ^{14}C -ouderdom (verticaal) naar een 'ongekalibreerde datum' (horizontaal): de ouderdom in de vorm van een jaartal BC zonder rekening te houden met de benodigde ouderdomscorrectie. De rode lijn geeft de boomringenlijn. Dat is het verband tussen de gemeten ^{14}C -ouderdom (verticaal) en de 'gekalibreerde datum' (horizontaal): de echte ouderdom in de vorm van het jaartal BC.

In het bovenste diagram is de met koolstofdatering gemeten ^{14}C -ouderdom van de ijsman Ötzi weergegeven: 4550 ± 19 jaar. De snijpunten van de horizontale ^{14}C -ouderdomslijn met de ongekalibreerde datumlijn en de boomringenlijn laten zien dat de echte ouderdom niet 2510 BC is, maar ergens tussen 3500 en 3000 BC ligt.

Het in het onderste diagram uitvergroete deel van de boomringenlijn laat zien dat er – als gevolg van de schommelingen in die boomringenlijn – drie mogelijke antwoorden zijn op de vraag naar de ouderdom van Ötzi. Die drie antwoorden liggen binnen een periode van zo'n 270 jaar: ergens tussen 3370 en 3100 BC.

Meetmethode

Bij de ^{14}C -methode voor ouderdomsbepaling is het overgebleven aantal radioactieve kernen op twee manieren te bepalen: met een *telbuis* en met een *massaspectrometer*.

Telbuis – Bij deze eerste methode wordt de *activiteit* van de overgebleven radioactieve kernen gemeten. Dat gebeurt door het monster te vergassen, het zo gevormde CO_2 – dat dus een beetje $^{14}\text{CO}_2$ bevat – in de telbuis te brengen en daarmee de bij het verval van ^{14}C uitgezonden β -deeltjes te tellen. De telbuis is zo goed mogelijk met oud lood, ijzer en beton afgeschermd van de natuurlijke achtergrondstraling.

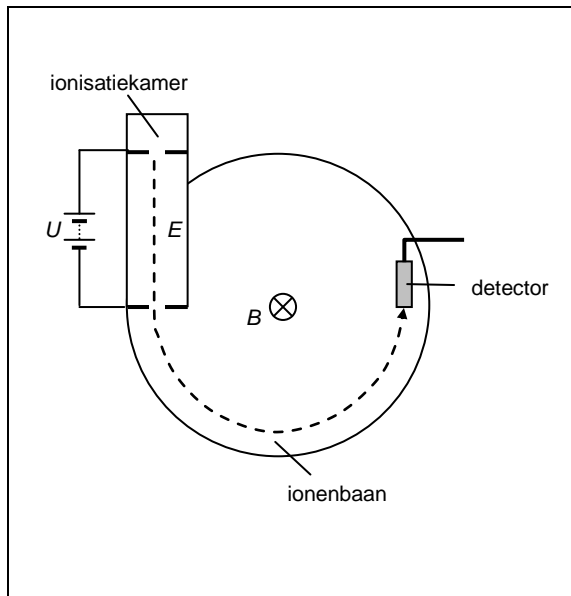
Deze methode vraagt relatief grote hoeveelheden van het te onderzoeken materiaal en lange meettijden om voldoende gegevens te krijgen. Als voorbeeld: één gram recente koolstof geeft in zo'n telbuis ongeveer dertien desintegraties per minuut, terwijl dat voor een vijftigduizend jaar oud monster minder dan één per twee dagen zou zijn.

Massaspectrometer – Bij deze tweede methode wordt het aantal overgebleven radioactieve kernen op een meer directe manier 'geteld'. In een massaspectrometer gebeurt dat door het monster te verdampen, de zo verkregen 'losse' atomen te ioniseren, deze ionen eerst in een in een elektrisch veld te versnellen en daarna in een magnetisch veld af te buigen en ten slotte met een detector te tellen (zie figuur 3).

De versnelde ionen bewegen in het magnetisch veld van de massaspectrometer in een halve cirkelbaan. De spanning U over de versnel-elektroden en de sterkte B van het magnetisch veld zijn zo in te stellen dat de ^{14}C -ionen precies op de detector terecht komen, en daarmee geteld kunnen worden.

Met een massaspectrometer zijn $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -verhoudingen tot 10^{-15} te meten. Een groot voordeel is dat het te onderzoeken monster duizendmaal kleiner kan zijn dan voor de

telbuis-methode nodig is. Er kan dus met minieme hoeveelheden materiaal worden gewerkt: voor koolstof minder dan één milligram. Daardoor is het mogelijk om ook kostbare kunstwerken te dateren zonder dat deze zichtbare schade oplopen.



Figuur 3 – Massaspectrometer. Na ionisatie doorlopen de ionen een elektrisch veld E . De snelheid v van de ionen bij het verlaten van dat elektrisch veld hangt af van de spanning over de twee versnel-elektroden:

$$q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}$$

In deze formule is U de spanning over de versnel-elektroden, q de lading en m de massa van de ionen.

De versnelde ionen komen daarna in een homogeen magnetisch veld B (loodrecht op het vlak van de tekening). Daarin ondervinden ze een kracht: de *lorentzkracht*. Deze lorentzkracht veroorzaakt een kromming van de baan waarlangs de ionen bewegen. Bij een bewegingsrichting loodrecht op de richting van een homogeen magnetisch veld is deze baan cirkelvormig en is de baansnelheid van de ionen constant. De lorentzkracht F_L levert de voor deze cirkelbeweging benodigde middelpuntzoekende kracht F_{mpz} . Met dat gegeven is – bij een bekende snelheid v van de ionen – de straal r van de cirkelbaan te bepalen:

$$F_L = F_{mpz} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$$

In deze formule is B de sterkte van het magnetisch veld, q de lading en m de massa van de ionen.

Meer informatie over de werking en de toepassingen van een massaspectrometer is te vinden op: <http://wikipedia.nl> > zoekwoord: massaspectrometrie

Bron

- van der Woude, A. & R.J. de Meijer (2003), *Radioactiviteit*. Wetenschappelijke Bibliotheek deel 77, Natuurwetenschap & Techniek.

1 Ouderdomsbepaling

Een opgegraven bot heeft een koolstofmassa van 200 g. De gemeten ^{14}C -activiteit in deze koolstof is 25 Bq. Wat is dan de ^{14}C -ouderdom van het bot? Gebruik bij het beantwoorden van deze vraag de formules op de pagina [Eigenschappen van ioniserende straling](#).

Als het niet lukt om deze vraag zonder hulp te beantwoorden, gebruik dan de volgende aanwijzingen en deelvragen.

Gemeten is de huidige activiteit A_t van het koolstof (25 Bq) op dit moment – dat we het tijdstip t zullen noemen. Voor die activiteit geldt de volgende formule:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \tag{1}$$

In deze formule zijn A_t en de vervalconstante λ bekend. De vervalconstante is namelijk te berekenen uit de bekende ^{14}C -halveringstijd $t_{1/2}$ van 5730 jaar:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \tag{2}$$

- Laat met een berekening zien dat de vervalconstante λ van ^{14}C een waarde heeft van $3,84 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$.

Om nu met formule [1] de ouderdom t te kunnen berekenen, moet alleen de activiteit A_0 van het ^{14}C op het moment van doodgaan van het organisme – het tijdstip $t = 0 \text{ s}$ – nog bekend zijn. Voor deze activiteit geldt de volgende formule:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0 \tag{3}$$

In deze formule is N_0 het aantal atomen ^{14}C op het tijdstip $t = 0 \text{ s}$. De grootheid N_0 is te berekenen uit het aantal koolstofatomen in het bot en de bekende isotopenverhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($1,2 \cdot 10^{-12}$) in een levend organisme. Als we N_0 weten, kunnen we eerst met formule [3] A_0 berekenen, en daarna met formule [1] de ouderdom t .

- Laat met een berekening zien dat de koolstofmassa van het bot (200 g) overeenkomt met 16,7 mol koolstof, en dat dit weer overeenkomt met $1,01 \cdot 10^{25}$ atomen koolstof.
- Laat met een berekening zien dat N_0 – het aantal atomen ^{14}C in het bot op het tijdstip $t = 0 \text{ s}$ – een waarde heeft van $1,21 \cdot 10^{13}$. Gebruik daarbij de bekende isotopen-

verhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($1,2 \cdot 10^{-12}$).

- Laat met een berekening zien dat de activiteit A_0 van het bot op het tijdstip $t = 0$ s een waarde heeft van 46,5 Bq. Gebruik daarbij formule [3].
- Laat met een berekening zien dat de ^{14}C -ouderdom t van het bot een waarde heeft van $5,1 \cdot 10^3$ jaar. Gebruik daarbij formule [1].

Op deze manier is uit de gemeten koolstofmassa en de huidige activiteit van het ^{14}C in het bot de ^{14}C -ouderdom bepaald op zo'n 5100 jaar. Daarbij is verder alleen maar gebruik gemaakt van de bekende halveringstijd van ^{14}C en van de bekende isotopenverhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ in een levend organisme.

2 Ouderdomscorrectie

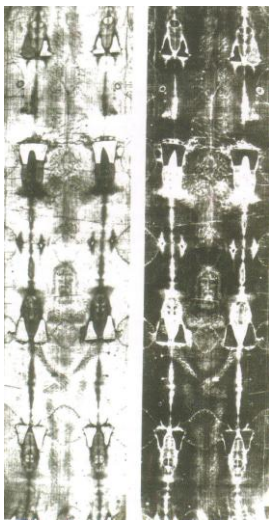
De ouderdomsbepaling van het bot in opdracht 1 levert als resultaat een ^{14}C -ouderdom van $5,1 \cdot 10^3$ jaar.

- Bepaal met behulp van figuur 2 de echte ouderdom van dit bot. Hoe groot is dus de benodigde ouderdomscorrectie?

3 Problemen met ^{14}C -datering

Een bekend voorbeeld van koolstofdatering is die van de *Lijkwade van Turijn* of de *Sindone* (zie figuur 4). Dit zou de lijkwade van Christus zijn geweest. In 1988 gaf een ^{14}C -datering van enkele draadjes van de lijkwade echter aan dat dit doodskleed zeer waarschijnlijk uit de late Middeleeuwen dateert: het linnen van de lijkwade was gemaakt tussen 1260 en 1390.

- Lees eerst het volgende fragment van een krantenartikel uit 1997. Geef daarna aan met welke twee factoren bij de ^{14}C -datering in 1988 geen rekening is gehouden.



Figuur 4 – De Lijkwade van Turijn.

De Lijkwade van Turijn

Al spoedig na de uitkomst van de ^{14}C -datering in 1988 veegden andere wetenschappers de vloer aan met dat onderzoek. Als gevolg van twee branden zou de chemische structuur van het doek grondig zijn gewijzigd. In de zesde of zevende eeuw zou een monnik er een smeulend stukje wierrook op hebben laten vallen. Een brand in december 1532 in de kapel van de her-togen van Savoye in de Franse stad Chambéry – waar het doek zich destijds bevond – tastte de rand van de Sindone aan.

Juist stukjes van die rand zijn gebruikt voor de datering. Experts van de Sedov-laboratoria in

Moskou hebben de brand van 1532 gesimuleerd en de gevolgen daarvan bestudeerd op doeken die met zekerheid uit de eerste en tweede eeuw na Christus stammen. Maar ^{14}C -datering gaf anders aan. Conclusie: deze methode is waarde-loos voor de datering van de Sindone.

Microbiologen van de universiteit van Texas kwamen om andere redenen tot dezelfde conclusie. Ze ontdekten bij hun onderzoek van de Sindone-monstertjes dat om het weefsel een flinterdun laagje van bacteriën en schimmels zat. Bij het toepassen van de ^{14}C -methode was dus de leeftijd van deze jongere 'biolaag' meegenomen.

Bron: *de Volkskrant*, 26 april 1997 – Jan van der Putten: *Lijkwade maakt gelovigen weer blij*.

- Leg voor elk van de twee in het artikel genoemde factoren uit waarom de ^{14}C -datering in 1988 een te jonge leeftijd voor de lijkwade heeft opgeleverd.

4 Massaspectrometer

In de massaspectrometer van figuur 3 worden de ionen eerst versneld in een elektrisch veld en daarna afgebogen in een magnetisch veld.

- Leg uit waarom de ruimte waarin de ionen in het elektrisch en magnetisch veld bewegen vacuüm is gepompt.
- Leg uit dat de in figuur 3 getekende spanning U inderdaad zorgt voor het versnellen van de positieve ^{14}C -ionen.
- Leg uit dat het in figuur 3 getekende magnetisch veld B (loodrecht het vlak van tekening *in*) inderdaad zorgt voor het afbuigen van de positieve ^{14}C -ionen in de aangegeven richting.
- Zijn met een massaspectrometer ook negatieve ionen te versnellen en af te buigen? Zo nee, waarom niet? Zo ja, wat moet er dan aan de instelling van de versnelspanning U en de sterkte B van het magnetisch veld veranderen?
- Laat met één formule zien dat – bij een vaste waarde van de versnelspanning U en de sterkte B van het magnetisch veld – de straal r van de ionenbaan in het magnetisch veld alleen afhangt van de massa m van de ionen. Aanwijzing: Combineer de twee formules uit het bijschrift van figuur 3.
- In de massaspectrometer van figuur 3 zijn de versnelspanning U en de sterkte B van het magnetisch veld zo ingesteld dat de ^{14}C -ionen op de detector terecht komen.

Beredeneer met de formule uit de vorige vraag of de straal r van de ionenbaan in het magnetisch veld voor de ^{12}C -ionen uit het monster in de ionisatiekamer bij deze instelling van U en B groter of kleiner is dan de baanstraal van de ^{14}C -ionen. En beredeneer vervolgens hoe de sterkte B van het magnetisch veld moet worden veranderd om de ^{14}C -ionen op de detector te laten invallen.

- Het woord 'massaspectrometer' is te vertalen als 'een apparaat voor het meten van een spectrum'. Het woord 'spectrum' ken je uit de golfoptica: een continu spectrum of een lijnenspectrum van licht. Om welk spectrum gaat het bij een massaspectrometer? Aanwijzing: Gebruik je antwoord op de vorige twee vragen.