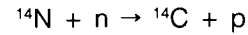


# Dateren met behulp van koolstof-14

J. van der Plicht W.G. Mook

## Koolstof-14 in de biosfeer

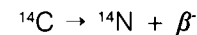
In de natuur komen drie verschillende isotopen van het element koolstof voor: de stabiele isotopen  $^{12}\text{C}$  (ca. 99%) en  $^{13}\text{C}$  (ca. 1%) en het radioactieve isotoop  $^{14}\text{C}$  ( $< 10^{-12}$ ). Dit laatste isotoop wordt geproduceerd door kernreacties van kosmische straling (neutronen) met stikstof in de atmosfeer:



Dit radioactieve koolstofisotoop wordt als  $^{14}\text{CO}_2$  opgenomen in de biosfeer en vervalt vervolgens met een halveringstijd van 5370 jaar. De koolstofcyclus is schematisch weergegeven in fig. 1. Indien we aannemen dat het transport en de productie van  $^{14}\text{C}$  zich in de loop van de tijd heeft gestabiliseerd, is de  $^{14}\text{C}$  activiteit in de atmosferische  $\text{CO}_2$  constant, en daarmee ook die in de rest van de biosfeer. In werkelijkheid bestaan er variaties, waarover later meer. Bij de assimilatie komt het  $^{14}\text{C}$  in planten, en vervolgens ook in mens en dier terecht. Zodra het organisme sterft, houdt uiteraard de uitwisseling van  $^{14}\text{C}$  met de omgeving op en resteert nog slechts het radioactieve verval.

## Het radioactieve verval en datering.

Het isotoop  $^{14}\text{C}$  is radioactief en vervalt onder uitzenden van een electron ( $\beta^-$ ) naar stikstof:



Het radioactieve verval vervolgt een exponentiële vervalswet:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

waarin  $A_0$  de oorspronkelijk  $^{14}\text{C}$ -activiteit is,  $A$  de gemeten  $^{14}\text{C}$ -activiteit,  $t$  de tijdsduur vanaf het moment dat de activiteit  $A_0$  was en  $\lambda$  de zgn. vervalsconstante, welke is gerelateerd aan de halveringstijd  $T_{1/2}$  via

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

Dit volgt op een eenvoudige wijze uit de definitie van halveringstijd:

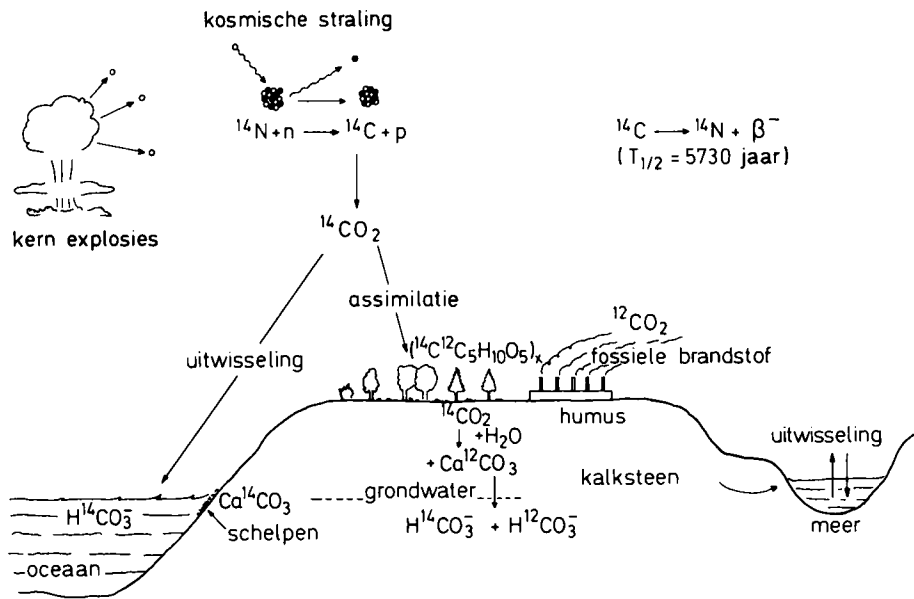


Fig. 1. De koolstofcyclus voor wat betreft het radioactieve isotoop  $^{14}\text{C}$ .

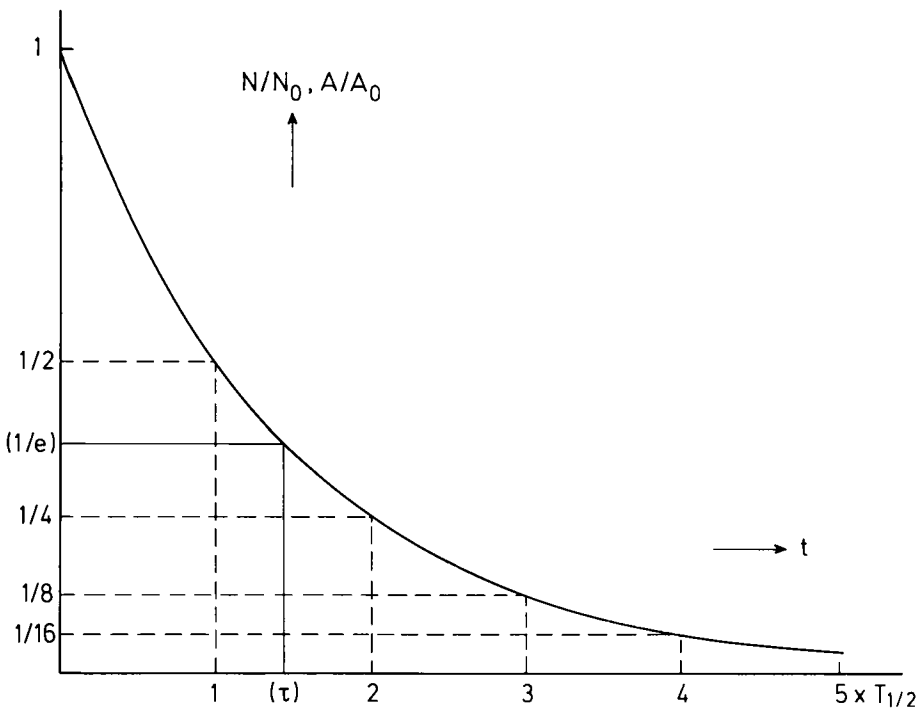


Fig. 2. Exponentiële vervalcurve. Voor  $^{14}\text{C}$  is de (conventionele) halveringstijd  $T_{1/2} = 5568$  jaar en de gemiddelde  $\tau = T_{1/2}/\ln 2 = 8033$  jaar.

$$\frac{A}{A_0} = 1/2 = e^{-\lambda T / 2}$$

(zie ook fig.2). De ouderdom T volgt dan op eenvoudige wijze uit de bovengaande formule:

$$T = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{A}{A_0}$$

De werkelijke berekening van de ouderdom geschiedt volgens bepaalde afspraken:

1. de natuurlijke  $^{14}\text{C}$ -activiteit ( $A_0$ ) is een constante
2. Deze constante is vastgelegd door een standaard, waarvoor men NBS oxaalzuur heeft gekozen;  $A_0 = 0,95 \times$  de  $^{14}\text{C}$ -activiteit van deze standaard
3. de  $^{14}\text{C}$ -ouderdom is gegeven t.o.v. het jaar 1950, aangeduid in jaren BP (Before Present)
4. de halveringstijd ( $T_{1/2}$ ) van  $^{14}\text{C}$  is 5568 jaar.
5. De gemeten  $^{14}\text{C}$ -activiteit wordt gecorrigeerd voor isotopenfractionering tot  $^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -25\text{‰}$ .

Deze conventie verdient enige toelichting. Het nut van de standaard is enerzijds dat alle  $^{14}\text{C}$ -laboratoria hun ouderdommen opgeven t.o.v. deze standaard, dus t.o.v. 1950 en anderzijds dat op deze manier de afname van  $^{14}\text{C}$  (0.12‰ per jaar) automatisch wordt verrekend.

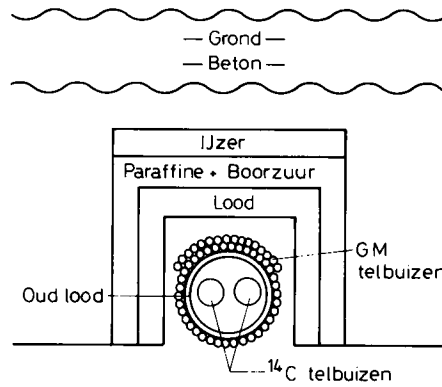
In werkelijkheid is de halveringstijd van  $^{14}\text{C}$  later gemeten als  $5730 \pm 40$  jaar. De conventionele waarde (5568 jaar) is in de eerste jaren van  $^{14}\text{C}$ -datering gebruikt. Het verdient de voorkeur om aan de oorspronkelijke waarde vast te houden zodat gepubliceerde ouderdommen steeds dezelfde betekenis houden. Ook is  $A_0$  in het verleden zeker niet constant geweest. Deze beide effecten -onjuiste halveringstijd en variaties in het atmosferische  $^{14}\text{C}$ -gehalte ( $A_0$ ) in het verleden- zijn feitelijk niet van belang doordat men de  $^{14}\text{C}$ -tijdschaal kan ijken met behulp van jaarringen van bomen. Hierop komen we later terug.

Ook voor de betekenis van de hierboven genoemde fractionering verwijzen we naar hieronder.

### Het detecteren van $^{14}\text{C}$

De radioactiviteit van  $^{14}\text{C}$  is bijzonder gering. Bijvoorbeeld is de activiteit van recente koolstof (in 1950)  $A_0 = 13.56$  desintegraties per minuut per gram koolstof (dpm/g); voor monsters met een ouderdom van 50000 jaar is dit afgenomen tot 0.032 dpm/g.

De radioactiviteit wordt gemeten in  $\text{CO}_2$ , dat als vulgas fungeert voor proportionele telbuizen. Het  $\text{CO}_2$  wordt uit



**Fig. 3. Meetopstelling voor  $^{14}\text{C}$ -dateringen met behulp van proportionele telbuizen.**

de monsters verkregen door verbranding (organische monsters) of door oplossen in zuur (anorganische monsters). De juiste chemische behandelwijze hangt sterk af van het soort monster (bv. bot, veen, kalk, grondwater, enz.), waarover later meer.

De telbuizen zelf dienen van een goede afscherming te worden voorzien tegen straling van buitenaf (zie fig.3). Het ijzer zorgt voor afscherming van  $\gamma$ -straling; neutronen worden gestopt in paraffine/boorzuur; de overblijvende  $\gamma$ -straling na de buitenste afscherming wordt tenslotte weggenomen door lood.

Een ring van Geiger-Müller detectoren om de telbuizen registreert de toch nog niet geabsorbeerde straling (kosmische straling) en fungeert als zgn. 'veto'. Ondanks al deze voorzorgsmaatregelen, zal er altijd een component achtergrondstraling overblijven, welke van alle resultaten moet worden afgetrokken.

### Onzekerheden

De onzekerheid in het meetresultaat wordt aangegeven met de zgn. standaarddeviatie  $\sigma$ , d.w.z. de kans dat de werkelijke uitkomst van de ouderdom tussen  $T - \sigma$  en  $T + \sigma$  ligt, is 68%. De kansverdeling  $P(t)$  is aangegeven in fig. 4, met daarnaast de kans welke het oppervlak onder de curve van de kansverdeling is  $\int P(t) dt$ .

De kans op ouderdom T tussen  $T + \sigma$  en  $T - \sigma$  is 68% (gearceerd), tussen  $T + 2\sigma$  en  $T - 2\sigma$  ongeveer 95%, tussen  $T + 3\sigma$  en  $T - 3\sigma$  99.7%. Voor de ouderdom  $T = -8033 \ln (A/A_0)$  geldt nu als goede benadering:

$$\sigma_T = 8033 \frac{\sigma A}{A} \quad \text{met } \sigma_A = \sqrt{\frac{A+B}{t_m}}$$

Hierin is  $t_m$  de meettijd en B de grootte van de achtergrondstraling (eveneens in tellingen per minuut). Deze laatste wordt gemeten, als er een  $\text{CO}_2$ -monster zonder  $^{14}\text{C}$  (als regel uit

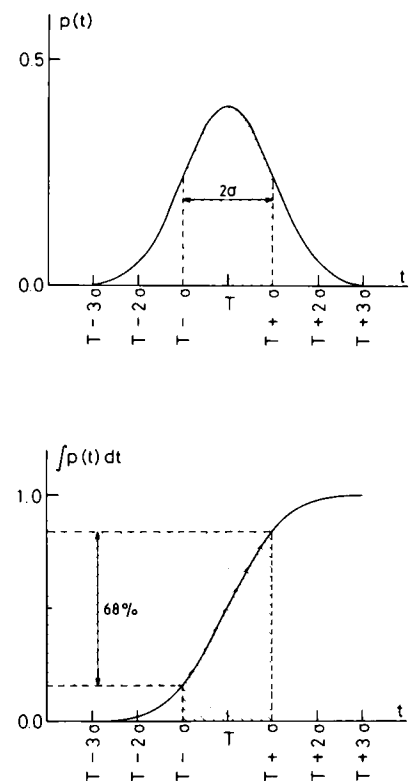
antraciet) in de telbuis is gebracht. Het is duidelijk dat precisie (alleen statistisch gezien) afhangt van meettijd ( $\sigma$  neemt af bij lange meettijd), achtergrond (dient zo laag mogelijk te zijn), en de  $^{14}\text{C}$ -activiteit (welke uiteraard afhangt van de ouderdom en hoeveelheid materiaal).

Als dateringslimiet voor oude monsters wordt gesteld:  $A = 2\sigma$ , waaruit men kan bepalen:

$$T_{\text{max}} = 8033 \ln \left[ \sqrt{t_m} \frac{A_0}{\sqrt{B}} \right]$$

De grootte  $A_0/\sqrt{B}$  is een maat voor de kwaliteit van de telbuis (zgn. 'figure of merit'). Voor een goede telbuis geldt  $A_0/\sqrt{B} \approx 20$ , zodat voor een meettijd  $t_m$  van 2 dagen geldt  $T_{\text{max}} = 50.000$  jaar.

De hierboven behandelde onzekerheid in de datering (de standaarddeviatie) geldt alleen voor het meettechnische gedeelte. Er zijn uiteraard ook andere bronnen van fouten, zoals verontreinigingen en de onzekerheden ten gevolge van de ijkingsproblematiek. Voor dit laatste verwijzen we naar later. Voor de eigenschappen van de Groninger telbuizen verwijzen we eveneens naar een later hoofdstuk.



**Fig. 4. Gaussische kansverdeling, van belang voor het vaststellen van onzekerheden in de datering.**

## Isotopenfractionering

Bij chemische reacties treden veelal selectiemechanismen op voor de verschillende isotopen. Bijvoorbeeld, planten assimileren  $^{12}\text{CO}_2$  gemakkelijker dan  $^{13}\text{CO}_2$  en dit op zijn beurt gemakkelijker dan  $^{14}\text{CO}_2$ . Bij het bepalen van ouderdommen met behulp van  $^{14}\text{C}$  dient men derhalve voor dit effect te corrigeren. Dit kan door - behalve het relatieve  $^{14}\text{C}$ -gehalte - ook het  $^{13}\text{C}$ -gehalte van het materiaal te bepalen. Het relatieve  $^{13}\text{C}$ -gehalte wordt aangegeven als delta-waarde gedefinieerd als:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{monster}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standaard}}} - 1 \quad (\times 1000\text{‰})$$

Als standaard geldt - per conventie - het zgn. PDB carbonaat afkomstig van een Belemmiet uit de Noord-Amerikaanse Pee Dee Formatie. Deze  $\delta^{13}\text{C}$  wordt gemeten met behulp van massaspectrometrie in de vorm van  $\text{CO}_2$  evenals de  $^{14}\text{C}$ -meting.

In zeer goede benadering geldt dat de isotopenfractionering voor  $^{14}\text{C}$  twee maal zo groot is als voor  $^{13}\text{C}$ . Via het stabiele isotoop  $^{13}\text{C}$  kunnen we dus de fractioneringscorrectie bepalen. Per conventie heeft men een waarde van  $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$  als referentie aangenomen voor  $^{14}\text{C}$ -dateringen, aangezien deze waarde geldt voor de meeste hout- en veenmonsters. Indien we deze correctie toepassen op de hierboven gegeven formule voor de berekening van de ouderdom, volgt dat de correctie in ouderdom

$$\Delta T = (\delta^{13}\text{C} + 25) \times 16 \text{ jaar}$$

Monsters waarvoor  $\delta^{13}\text{C} = -25\text{‰}$  behoeven uiteraard geen correctie; een monster met  $\delta^{13}\text{C} = -24\text{‰}$  is in feite  $1\text{‰}$  verrijkt in  $^{13}\text{C}$ , had dus oorspronkelijk  $2\text{‰}$  meer  $^{14}\text{C}$  en is dan schijnbaar 16 jaar te jong.

Door hetzelfde  $\text{CO}_2$ -gas voor zowel  $^{13}\text{C}$ - als  $^{14}\text{C}$ -bepaling te gebruiken, worden ook veranderingen in de isotopenverhouding geïntroduceerd door behandeling in het laboratorium automatisch gecorrigeerd.

## Het calibreren van de $^{14}\text{C}$ -tidschaal

Tot nu toe zijn we er vanuit gegaan dat de  $A_0$  een constante is, oftewel de hoeveelheid  $^{14}\text{C}$  in de atmosfeer is constant. Uit metingen van  $^{14}\text{C}$ -ouderdommen van jaarringen in bomen, welke dendrochronologisch op één jaar nauwkeurig gedateerd zijn, is dit niet juist gebleken. Zo blijkt dat een datering van 7000 BP niet overeenkomt met 5050 BC (volgens  $\text{BC} = \text{BP} - 1950$ )

maar met omstreeks 5850 BC - een correctie van 800 jaar! Op grond van metingen aan jaarringen heeft men nu ijkcurves samengesteld, welke teruggaan tot 7200 BC. De meest gebruikte en aanbevolen curves zijn die van Stuiver en Pearson en Pearson en Stuiver, welke teruggaan tot 2500 BC. Deze zijn gepubliceerd in het tijdschrift Radiocarbon uit 1986. Met behulp van deze ijkcurves kan men de  $^{14}\text{C}$ -ouderdommen, gemeten in BP, vertalen naar ouderdommen in kalenderjaren (weergegeven als cal AD of cal BC). De ijkcurve met alle gegevens zoals gepubliceerd in Radiocarbon is gegeven in fig. 5. Het feit dat de  $^{14}\text{C}$ -concentratie (of  $A_0$ ) niet constant is, volgt direct uit de afwijkingen van de rechte lijn  $\text{BP} = 1950 - \text{cal AD}$ . Deze rechte lijn is eveneens in de figuur gegeven. Uit de ijkcurve kunnen we de volgende trends herkennen:

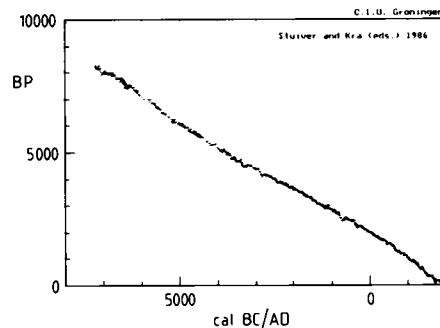


Fig. 5. Overzicht van de ijkingsgegevens zoals gemeten aan jaarringen.

1. een lange termijn effect: op een tijdschaal van duizenden jaren, zien we een sinus-achtige kromme met een periode van ca. 9000 jaar, welke de verandering van het aardmagnetisch veld volgt;
2. een middellange-termijn effect: dit zijn variaties met een periode van ca. 200 jaar, welke samenhangen met veranderingen in de zonneactiviteit;
3. korte-termijn variaties (niet zichtbaar in de figuur): de 11-jarige zonnevlekencyclus heeft ook variaties tot gevolg, welke echter voor ons doel verwaarloosbaar klein zijn.

Volledigheidshalve zij vermeld dat in deze eeuw door toedoen van menselijke activiteit ook het  $^{14}\text{C}$ -gehalte in de atmosfeer is veranderd:

- A. door het grootschalig gebruik van fossiele brandstof, welke geen  $^{14}\text{C}$  bevat, nam het  $^{14}\text{C}$ -gehalte in de atmosfeer van 1800 tot 1950 langzaam af tot 2‰ onder het natuurlijke,
- B. door kernexplosies in de atmosfeer na 1950 raakte het  $^{14}\text{C}$ -gehalte verduddeld in 1963 en neemt sedertdien af tot ongeveer 20‰ boven het natuurlijke gehalte in 1989.

Een probleem bij het gebruik van de ijkcurve is het niet-monotone karakter ervan, zodat een datering in BP (1 getal langs de y-as) kan overeenkomen met meerdere getallen langs de x-as (de kalenderas). Bovendien, waar een datering een gaussische kansverdeling heeft met een standaarddeviatie, zoals aangegeven in fig. 4, is de vertaling van een datering met foutengrens in een geïjkt getal langs de kalenderas niet doorzichtig. Waarschijnlijkheidsverdelingen langs de kalenderas kunnen worden berekend met behulp van door ons speciaal hiervoor ontwikkelde computerprogramma's. Een voorbeeld van een ijkingsprocedure is gegeven in fig. 6 voor een ouderdom van  $500 \pm 70$  BP. In het bovenste gedeelte van de figuur zien we de gaussische waarschijnlijkheidsverdeling van de  $^{14}\text{C}$ -datering ( $500 \pm 70$  BP) langs de verticale as uitgezet. De dendrochronologische bepaalde ijkpunten zijn verbonden met elkaar door een berekende ijkfunctie. De uiteindelijk verkregen geïjkte waarschijnlijkheidsverdeling is uitgezet langs de horizontale as. Voor een kwantitatieve interpretatie verwijzen we naar het onderste gedeelte van de figuur waar dezelfde geïjkte verdeling is uitgezet, samen met de cumulatieve som hiervan (de getrokken lijn). Deze laatste is analoog aan de lijn getekend in fig. 4b. De geïjkte verdeling kan worden verdeeld in drie pieken: 1280-1370-, 1370-1530 en 1530-1640 cal AD. Met behulp van de cumulatieve som (fig.6b) welke is

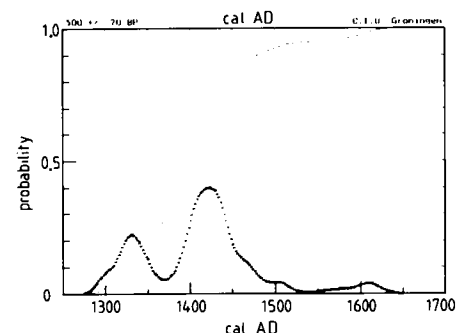
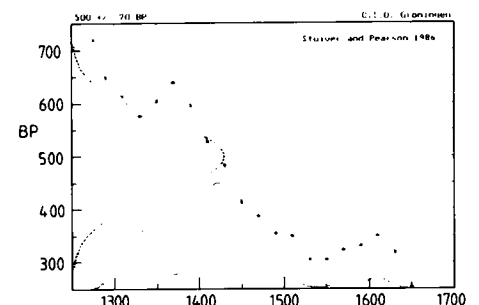


Fig. 6. Het ijken van de datering  $500 \pm 70$  BP.

genormaliseerd op 100%, kunnen we aflezen dat deze 3 pieken elk een waarschijnlijkheid hebben van respectievelijk 28, 67 en 5%.

In fig. 7 geven we ter illustratie nog de ijking van  $500 \pm 20$  BP, dus dezelfde datering met een kleinere fout. De kansverdelingen langs de x- en y-as hiervan zijn in dezelfde figuur als fig. 6a ingetekend. De Gaussische kansverdeling van het meetresultaat snijdt de ijkkromme in een gebied dat praktisch een rechte lijn is, zodat de geijkte kromme eveneens een (bijna) Gaussische vorm heeft. Het is uit deze vergelijking direct duidelijk wat het gevolg van de 'wiggles' is, nl. het introduceren van afwijkingen van een Gaussische vorm en zelfs het ontstaan van afzonderlijke pieken. Dit gegeven noodzaakt ons tot analyses zoals die van fig. 6b.

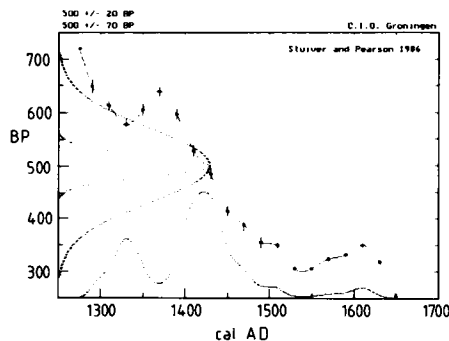


Fig. 7. Vergelijking van het ijken van  $500 \pm 20$  BP en  $500 \pm 70$  BP.

### Wiggle Matching

Het voorkomen van de 'wiggles' kan worden gebruikt voor ijking met zeer goede precisie door middel van de zogenaamde 'wiggle matching' procedure. Dit zal worden geïllustreerd aan de hand van een serie  $^{14}\text{C}$ -dateringen van een veenafzetting, in dit geval uit Ierland. We gaan uit van een serie  $^{14}\text{C}$ -dateringen van een veenafzetting welke gevormd is met een constante groeisnelheid. Een dergelijke serie dateringen wordt grafisch uitgezet analoog aan de  $^{14}\text{C}$ -calibratiegrafieken, d.w.z. met de dateringen (in BP) langs de y-as en de diepte (in willekeurige eenheden) langs de x-as.

Als de groeisnelheid van het veen constant is, en het verband tussen  $^{14}\text{C}$ -ouderdom (BP) en gecalibreerde ouderdom (cal BC/AD) lineair is, liggen de punten  $y(x)$  van de grafiek eveneens langs een rechte lijn. We weten dat het verband tussen BP en Cal BC/AD niet lineair is: de ijkkromme bevat 'wiggles'. Deze wiggles vinden we uiteraard terug in het verband met  $^{14}\text{C}$ -ouderdom en diepte. Dit verschijnsel maakt het mogelijk de serie dateringen van het veen nauwkeurig

te ijken door het verband tussen de  $^{14}\text{C}$ -ouderdommen en de diepte aan te passen aan de ijkkromme, i.e. het verband tussen  $^{14}\text{C}$ -ouderdom en kalenderjaren.

Een voorbeeld van een dergelijke aanpassing ('wiggle matching') is gegeven in fig. 8. De serie bevat 4  $^{14}\text{C}$ -dateringen van een veenafzetting uit Ierland. De data zijn op twee manieren aangepast aan de ijkkromme, weergegeven door middel van gesloten cirkels en open cirkels. De gesloten cirkels komen overeen met een geringe groeisnelheid, die open cirkels met een grote groeisnelheid. De groeisnelheid is hier constant verondersteld, d.w.z. de diepte (langs de x-as uitgezet) is evenredig met de kalenderjaren-as.

Voor een goede toepassing van deze procedure zijn  $^{14}\text{C}$ -dateringen vereist van veenmonsters met geringe onderlinge afstand. In het algemeen levert dit hoeveelheden materiaal op welke niet toereikend zijn voor ouderdomsbepaling met behulp van telbuizen. Analyses van geringe hoeveelheden materiaal (enkele mg.) is wel mogelijk met een modernere techniek: AMS (Accelerator Mass Spectrometry). Het Groninger laboratorium zal omstreeks 1992 over een dergelijk apparaat kunnen beschikken.

Volledigheidshalve zij opgemerkt dat 'wiggle matching' veelal wordt toegepast aan series  $^{14}\text{C}$ -dateringen van bomen, welke dendrochronologisch

(nog) niet zijn gedateerd. In dit geval is de procedure eenvoudiger omdat de groeisnelheid van bomen uiteraard bekend is via hun jaarringen. De onderlinge afstand langs de x-as van de serie punten ligt dan vast; alleen de 'absolute' waarde langs de kalenderjaren-as moet nog bepaald worden door middel van het aanpassen.

### Chemische verwijdering van verontreiniging

De betrouwbaarheid van een  $^{14}\text{C}$ -ouderdomsbepaling is onder andere afhankelijk van verontreiniging van het te dateren materiaal met koolstof van andere oorsprong, zoals plantewortels of inspoeling van humeuze stoffen afkomstig van stratigrafisch andere lagen. In het algemeen bevat het verontreinigende materiaal meer  $^{14}\text{C}$ , zodat de gemeten ouderdom jonger wordt. Het effect van een bepaald percentage verontreiniging is ernstiger naarmate het monster ouder is. Het materiaal moet om deze reden fysisch/chemische behandeling ondergaan om mogelijke verontreinigingen te verwijderen. In de eerste plaats worden wortels verwijderd, houtskool wordt uit het bodemmateriaal gezeefd, en de buitenste laag van botten, hout e.d. wordt verwijderd.

De verdere chemische behandeling hangt sterk af van het soort te dateren

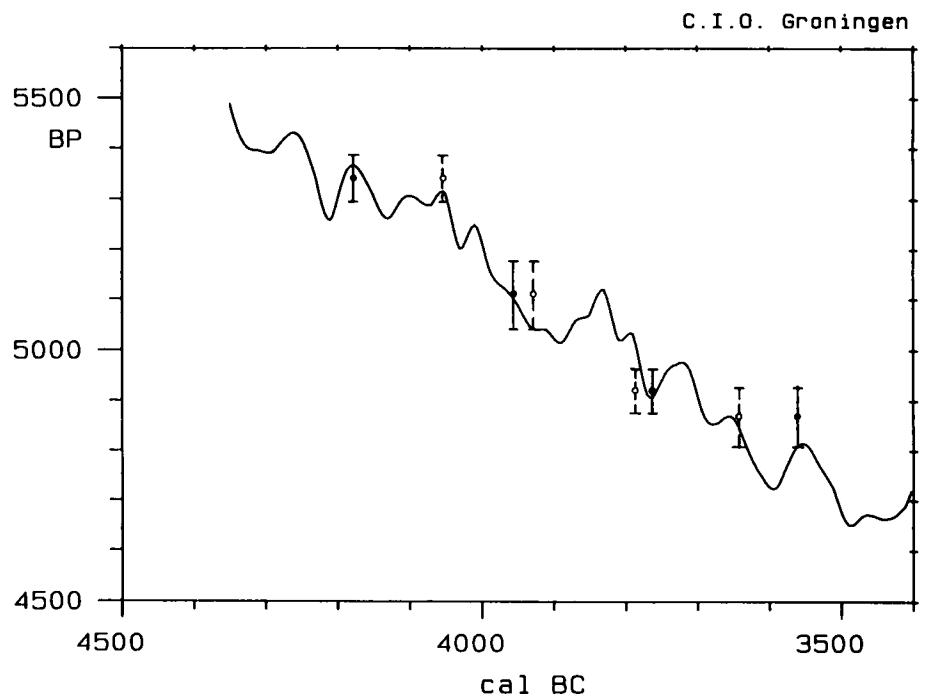


Fig. 8. Illustraties van 'wiggle matching': het aanpassen van een serie van 4  $^{14}\text{C}$  dateringen van veen aan de ijkkromme met twee verschillende (constante) groeisnelheden: gesloten cirkels, geringe groeisnelheid; open cirkels, grote groeisnelheid. Anders dan bij wiggle matching van hout (jaarringen) ligt hierbij de onderlinge horizontale afstand (dieptes) niet vast, slechts de ijging ten opzichte van elkaar.

materiaal. Voor een voorbeeld, bestaat de chemische behandeling uit drie stappen:

1. extractie met HCL om carbonaat en fulvozuren te verwijderen.
2. extractie met NaOH voor verwijdering van humuszuur;
3. aanzuren met HCL, gevolgd door afzanding van het residu. Deze behandeling wordt 'AAA' (Acid-Alkali-Acid voor zuur-loog-zuur) genoemd, en wordt in het algemeen ook toegepast op materialen zoals hout, houtskool en organische afzettingen. Schelpen en koralen volgen alleen stap 1, welke de 'A' behandeling wordt genoemd.

Voor de hierboven genoemde (en andere) materialen verschillen de chemische behandelingsmethoden nog in detail, waarop hier niet nader wordt ingegaan. Het verkregen residu dient vervolgens omgezet te worden tot CO<sub>2</sub>, het vulgas voor de proportionele telbuizen. Dit vulgas dient zeer zuiver CO<sub>2</sub> te zijn: bepaalde verontreinigingen tot een paar ppm kunnen een goede werking van een telbuis verstoren. De bij de verbranding tot CO<sub>2</sub> vrijkomende andere producten worden dan ook verwijderd langs chemische/cryogene weg.

### Gegevens betreffende het <sup>14</sup>C laboratorium in Groningen

Het <sup>14</sup>C laboratorium is in het bezit van een aantal proportionele telbuizen zoals is aangegeven in tabel 1. Hiervan worden met 9 telbuizen vrijwel doorlopend <sup>14</sup>C-analyses verricht. Voor de volledigheid zijn ook twee telbuizen waarmee gewoonlijk tritium (<sup>3</sup>H) wordt gemeten. Behalve technische gegevens kan de gebruiker hieruit eenvoudig relevante gegevens zoals hoeveelheid benodigde koolstof en maximale ouderdom aflezen. In tabel 2 is het koolstofgehalte gegeven van veel voorkomende materialen, alsmede de hoeveelheid droog materiaal (in gram) nodig om 1 gram koolstof te verkrijgen voor <sup>14</sup>C-analyse.

Adres van de auteurs:  
Centrum voor Isotopen Onderzoek  
Rijksuniversiteit  
Westersingel 34  
9718 CM Groningen

### Literatuur

Mook, W.G. and Streurman, H.J., 1983: Physical and chemical aspects of radiocarbon dating. in Proc. Symp. <sup>14</sup>C and Archaeology, Groningen, 1981. Pact Publ. no. 8, p.31-55

Mook, W.G. and Waterbolk, H.T., 1985: Handbook for Archaeologist, no. 3, Radiocarbon Dating. European Science Foundation, Strasbourg

Pearson, G.W. and Stuiver, M., 1986: High-precision calibration of the radiocarbon time scale, 500-2500 BC, in Stuiver, M. and Kra, R.S., eds., Internl. <sup>14</sup>C conf., 12th Proc. Radiocarbon 28, no.2b, p 839-862

Van der Plicht, J. and Mook, W.G., 1989: Automatic Radiocarbon calibration: Illustrative examples. Palaeohistoria 29, p. 173-182.

Van der Plicht, J. and Mook, W.G., Calibration of radiocarbon ages by computer. Proc. 13th Intern. Radiocarbon Conference, Dubrovnik, 1988 (eds. Stuiver, M. and Kra, R.C.). Accepted for publication in Radiocarbon.

Stuiver, M. and Kra, R.S., eds., 1986: Calibration issue, Internatl. conf., 12th Proc., Radiocarbon, 28, no. 2b, p. 805-1030.

Stuiver, M. and Pearson, G.W., 1986: High-precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC, in Stuiver, M. and Kra, R.S., eds, Internatl. <sup>14</sup>C conf, 12th, Proc. Radiocarbon, 28, no. 2b, p. 805-838.

Tabel 1. De proportionele gastelbuizen

Telbuis	Aantal	materiaal	volume (ml)	druk (mbar)	minimum hoeveelheid C (gram)	max. ouderdom (BP)*	A <sub>0</sub> (dpm)	B (dpm)
1	1	kwarts	750	2856	1.5	48700	13.59	1.15
2	1	kwarts	1710	2756	3.0	51500	31.64	2.3
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1	kwarts	1663	2800	-	<sup>3</sup> H	45 **	1.1
5	1	koper	1517	3100	-	<sup>3</sup> H	49 **	0.8
6	1	kwarts	1690	2800	3.0	48000	31.15	2.8
7	1	kwarts	532	2667	1.0	47100	9.675	1.1
8	1	koper	288	3067	0.75	46000	6.017	0.8
9(totaal)	7	kwarts	6840	2907	12.5	58000	119.3	9.4
9A	1	kwarts	977	2907	1.9	47000	17.5	1.7
9B	3	kwarts	2931	2907	5.3	52000	50.2	3.6
9C	3	kwarts	2931	2907	5.3	52000	51.5	3.8

\* 48 uur meettijd

\*\* TU/dpm

Tabel 2. Koolstofgehalte van verschillende typen <sup>14</sup>C monstermateriaal en de hoeveelheid droog materiaal in grammen dat nodig is om 1 gram koolstof te krijgen voor een <sup>14</sup>C-analyse.

	%C	Behandeling		
		geen	A	AAA
Hout (nat)	25	4	5	8.0
Hout (droog)	50	2	2.5	4.0
Houtskool	70	2	2.5	3.5
Veen (nat)	5	20	25	40
Veen (droog)	50	2	2.5	4.0
Humus	0-5	40	50	120
Bot	0-5	-	50	-
Verkoold bot	0-5	-	40	40
Carbonaat	12	10	15	-
Diep-zee kernen	0-5	40	50	-

A = extractie met zuur (HCl)

AAA = extractie met zuur (HCl), loog (NaOH) en zuur (HCl)