



HANS VAN DER PLICHT

Centrum voor Isotopen Onderzoek, RijksUniversiteit Groningen,
en Faculteit Archeologie, Universiteit Leiden, j.van.der.plicht@rug.nl

DATEREN MET HET RADIO- ACTIEVE KOOLSTOF ISOTOOP ^{14}C

Bij het opstellen van de tijdschaal tot ongeveer 50.000 jaar geleden speelt radio-actieve koolstof (^{14}C) een grote rol. De ouderdom van kleine hoeveelheden radio-actieve koolstof ^{14}C kan met behulp van twee methoden worden bepaald; de radiometrische en de massa-spectrometrische (AMS). De verkregen uitkomsten kunnen tot 26.000 jaar geleden worden gecalibreerd tot kalenderjaren. Een speciale toepassing die wordt behandeld, is de zogenoemde 'wiggie match' datering voor een veen in Nederland.

Abstract

Radiocarbon has been central to the construction of chronologies (back to 50.000 years ago) for over 50 years. The small amount of natural ^{14}C can be measured by two methods - conventional (radio-metry) and AMS (mass spectrometry). Dates can now be calibrated into calendar years back to 26.000 years. This article provides an overview of the method. One special application, wiggie match dating, for a peat bog from The Netherlands is discussed.

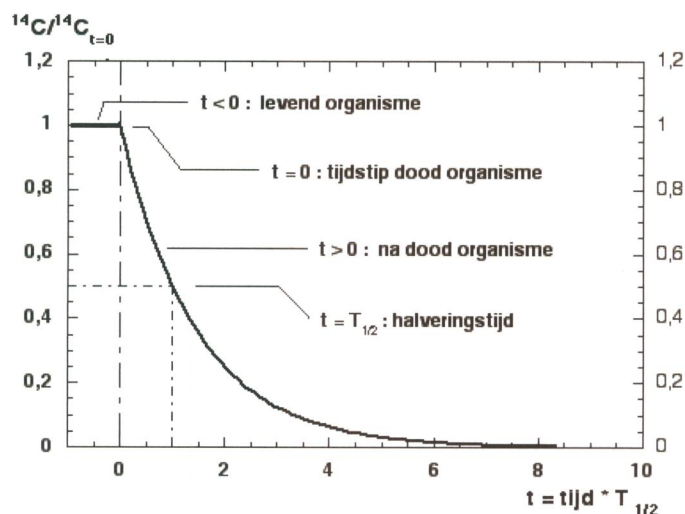
^{14}C in de natuur

In de natuur komen drie verschillende isotopen van

het element koolstof voor: de stabiele isotopen ^{12}C (ca. 99%) en ^{13}C (ca. 1%), en het radioactieve isotoop ^{14}C ($\leftarrow 10^{-12}$). Dit laatste isotoop wordt continu geproduceerd door kernreacties van neutronen (geproduceerd door kosmische straling) met stikstof in de atmosfeer: $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$. Dit radioactieve koolstofisotoop wordt - als $^{14}\text{CO}_2$ - opgenomen in de biosfeer en vervalt vervolgens met een halveringstijd van 5730 jaar. Indien we aannemen dat het transport en de productie van ^{14}C zich in de loop van de tijd heeft gestabiliseerd, is de ^{14}C activiteit van atmosferische 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}C in planten en vervolgens ook in mens en dier terecht. Zodra het organisme sterft, houdt uiteraard de uitwisseling van ^{14}C met de omgeving op en resteert nog slechts het radioactieve verval. Dit verval gebeurt volgens de exponentiële vervalswet (Afb. 1):

$$^{14}\text{C}(t) = ^{14}\text{C}(t=0) e^{-\lambda t}$$

Hierin is $^{14}\text{C}(t)$ de ^{14}C -concentratie als functie van de tijd t , en is λ de vervalconstante, die is gerelateerd aan de halveringstijd $T_{1/2}$. Er geldt: $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$. De halveringstijd is de tijd waarin de radioactiviteit met



Afbeelding 1.
Het verloop van het radioactieve isotoop ^{14}C als functie van de tijd. Het ^{14}C -gehalte (verticale as) is relatief ten opzichte van de standaard (tijdstip $t=0$); de tijd (horizontale as) is in eenheden van de halveringstijd $T_{1/2}$.

de helft is afgenomen: $^{14}\text{C}(t = T_{1/2}) = 0,5 * ^{14}\text{C}(t=0)$. Door dit verval kan de ouderdom (het tijdsverloop sinds de dood van het organisme) van bijvoorbeeld een prehistorisch monster worden bepaald door het meten van het resterende ^{14}C -gehalte in dat monster (zie o.a. Aitken, 1990).

Het meten van ^{14}C

Er zijn twee verschillende methoden om het ^{14}C -gehalte in koolstofhoudende materialen te meten (zie o.a. Bayliss et al., 2004). De oudste methode is gebaseerd op radiometrie - het meten van de radioactiviteit van het nog in het monster aanwezige ^{14}C . Deze methode vergt een speciale meetopstelling voor lage achtergrondstraling, aangezien de radioactiviteit van ^{14}C zeer gering is. De natuurlijke ^{14}C -concentratie komt overeen met een activiteit van 250 Becquerel per kilogram koolstof. Voor monsters met een ouderdom van circa 50.000 jaar (de praktische meetgrens) is dit afgenomen tot minder dan één desintegratie per twee dagen voor een gram koolstof!

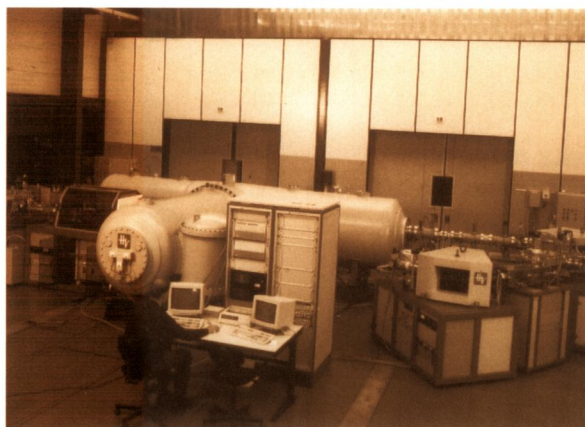
De radiometrie van ^{14}C is ontwikkeld tot een betrouwbare en nauwkeurige methode, maar door het geringe aantal ^{14}C -kernen dat vervalt, is het tegelijkertijd ook een zeer inefficiënte en daardoor tijdrovende methode. Eén meting neemt al gauw enkele dagen in beslag, terwijl bovendien een relatief grote hoeveelheid (enkele grammen) koolstof vereist is.

Er is een nieuwe methode ontwikkeld waarvoor slechts één milligram koolstof nodig is en waarbij de meetduur kan worden teruggebracht tot minder dan een uur. Deze moderne methode is gebaseerd op massaspectrometrie. In een massaspectrometer worden deeltjes op grond van hun verschillende grootte (massa) geanalyseerd door ze een snelheid te geven, te voorzien van een elektrische lading en vervolgens af te buigen door een magneet. Door de Lorentzkracht worden deeltjes met een verschillende massa/ladingverhouding, na de magneet, op verschillende posities gefocuseerd. Als analysetechniek wordt massaspectrometrie doorgaans toegepast, gebaseerd

op moleculen. Voor het element koolstof bijvoorbeeld, worden massa's (en dus isotopen) van elkaar onderscheiden door moleculaire massaspectrometrie van CO_2 . Dit kan alleen voor stabiele isotopen zoals bijvoorbeeld ^{13}C en ^{18}O : $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ en $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ hebben verschillende moleculaire massa's, namelijk 44, 45 en 46.

Deze stabiele isotopen hebben een relatief voorkomen van circa 1 %. Het is nu direct duidelijk dat massaspectrometrie voor $^{14}\text{CO}_2$ niet werkt: dit molecuul heeft massa 46, en is - mede door het zeer geringe voorkomen van ^{14}C - met 'gewone' massaspectrometrie niet op unieke wijze te onderscheiden.

Massaspectrometrie voor ^{14}C blijkt wel mogelijk te zijn door niet van het molecuul $^{14}\text{CO}_2$ uit te gaan, maar van het kerndeeltje ^{14}C . Hiervoor moeten we de deeltjes een veel hogere snelheid geven, wat gebeurt met een kernfysische versneller. Deze bijzondere vorm van massaspectrometrie noemt men AMS (Accelerator Mass Spectrometry). De AMS van de Rijksuniversiteit Groningen is te zien in afbeelding 2. De T-vormige tank in het midden bevat de eigenlijke versneller, werkend met een hoogspanning van 2,5 miljoen Volt (MV); links staat de ionenbron en aan de rechterzijde zijn de afbuigmagneten te zien. Koolstof uit de monsters wordt eerst omgezet in grafiet. De ionenbron



Afbeelding 2.
De AMS faciliteit te Groningen. In het midden de 2.5 MV versneller, links de ionenbron en het injectorgedeelte, rechts de hoge-energie massaspectrometer.

produceert van dit grafiet negatief geladen koolstof-ionen (C^-), die naar een elektrode op 2,5 MV worden versneld. Daar worden ze positief geladen naar C^{3+} , door de elektrode nu afgestoten, en vervolgens met hoge snelheid door de analysemagneten afgebogen. Massaspectrometrie voor ^{14}C is nu mogelijk geworden doordat de massa/ladingverhouding voor $^{14}C^{3+}$ uniek is. Moleculen met massa 14 (zoals $^{12}CH_2$ en ^{13}CH) overleven de versnelspanning niet en breken op. Het meest vervelende isobaar, stikstof (wat immers ook massa 14 heeft) kan geen negatieve ionen vormen zodat ^{14}N geen onderdeel van het systeem is. Met een dergelijke machine kunnen zo $^{14}C/^{12}C$ verhoudingen in het gebied 10^{-12} – 10^{-15} gemeten worden met een precisie van 0,5 %. Ook voor AMS is het meetbereik 50.000 jaar. Het Centrum voor Isotopen Onderzoek van de Rijksuniversiteit Groningen bezit zowel een conventionele als een AMS-faciliteit.

De te dateren materialen zijn monsters van uiteenlopende samenstelling, bijvoorbeeld: hout, houtskool, veen, bodems, botten, schelpen en carbonaten. Van deze materialen moet eerst zuiver CO_2 worden gemaakt. Hiertoe vindt eerst een fysische / chemische voorbehandeling plaats om de dateerbare fractie te verkrijgen. Het gezuiverde materiaal wordt vervolgens verbrand, waarna het monster in de vorm van CO_2 wordt opgevangen. Dit CO_2 bevat dus het gehalte aan $^{14}CO_2$ (en ook de $^{13}CO_2$ nodig voor de fractioneringscorrectie, zie volgende paragraaf) van het te dateren materiaal. Daarnaast kan ook ^{14}C worden gemeten in anorganische monsters zoals atmosferische lucht (CO_2 , CO , CH_4), en aan CO_2 opgelost in water.

Het zuiver verkregen CO_2 wordt rechtstreeks gebruikt voor de radiometrie: het fungeert als telgas voor de proportionele telbuizen. De AMS methode (massaspectrometrie) werkt met vaste stof; daarom wordt het CO_2 voor deze methode omgezet in grafiet.

De ^{14}C -conventie

Dateren met behulp van de eenvoudige exponentiële vervalswet (Afb. 1) is alleen mogelijk als de halve-

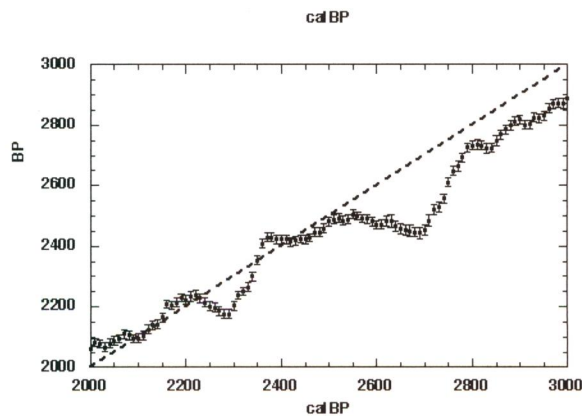
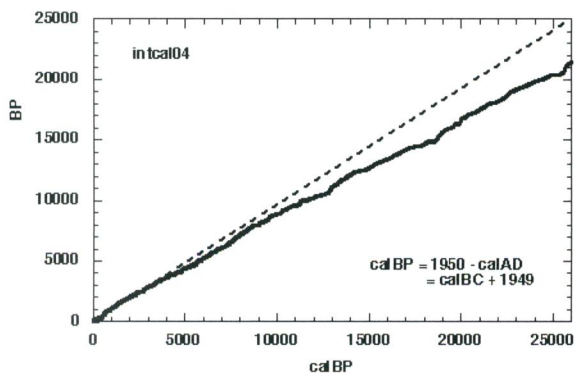
ringstijd ($T_{1/2}$) en beginconcentratie van ^{14}C ($t=0$) goed bekend en constant zijn. Er is echter met beide een probleem. Zo is in de eerste jaren van ^{14}C -datering voor $T_{1/2}$ de waarde 5568 gebruikt; de echte waarde bleek later 5730 ± 40 jaar te zijn. Verder is het ^{14}C -gehalte in de atmosfeer niet constant, maar varieert met veranderingen in het magneetveld van de aarde en met wisselende zonne-activiteit. Beide beïnvloeden de hoeveelheid kosmische straling en dus de ^{14}C -productie in de atmosfeer. Tevens is het ^{14}C -gehalte in de atmosfeer (en dus in de biosfeer) afhankelijk van veranderingen in het CO_2 evenwicht tussen oceaan en atmosfeer.

Bovendien is er het verschijnsel isotopenfractionering: massa-afhankelijke effecten in fysische, chemische en biologische processen in zowel de natuur als in het laboratorium veranderen de concentratie van ^{14}C , en dus de 'ouderdom'. Het bekendste voorbeeld van dit effect is de fotosynthese. Door de verschillende molecuulmassa's van de isotopen van CO_2 , bevatten planten minder ^{14}C na de assimilatie dan de atmosfeer waarin ze groeien en lijken daardoor dus ouder. Maar ze bevatten ook minder ^{13}C dan de atmosfeer. Aangezien het ^{13}C gehalte in de plant constant is (in tegenstelling tot ^{14}C , wat vervalt) weten we wat de isotopenfractionering is, door - naast het ^{14}C -gehalte - ook het ^{13}C -gehalte te meten in de plant.

De oplossing voor al deze problemen is het definiëren van een eigen tijdschaal voor ^{14}C .

Deze conventie houdt in:

- gebruik van de oorspronkelijke halveringstijd 5568 jaar;
- correctie voor fractionering tot een bepaalde standaardwaarde met behulp van het stabiele isotoop ^{13}C ($^{13}\delta = -25\text{ ‰}$, waarbij $^{13}\delta$ is gedefinieerd als $^{13}\delta = \frac{[^{13}C/^{12}C]_{\text{monster}}}{[^{13}C/^{12}C]_{\text{standaard}}} - 1$);
- de ^{14}C -radioactiviteit wordt gemeten relatief ten opzichte van een bepaalde standaard (oxaalzuur), welke overeenkomt met het jaar 1950. De tijdseenheid voor ^{14}C -ouderdommen is BP (Before Present), waarbij 'Present' dus met 1950 overeenkomt (Mook en Van der Plicht, 1999).



Afbeelding 3.

- a. De ijkgrafiek voor ^{14}C : verticaal, ^{14}C -tijd (in BP); horizontaal, kalendertijd in (calBP, kalenderjaren t.o.v. 1950). Het Holocene gedeelte is verkregen door middel van dendrochronologisch gedateerd hout. Voor het oudere gedeelte is de ijkgrafiek doorgetrokken met behulp van metingen aan koralen en foraminiferen, gedateerd met zowel ^{14}C als U-isotopen.
- b. Detail uit afbeelding 3a (het 3e millennium BC) waarin de fluctuaties ('wiggles') in de ijkgrafiek goed zijn te zien.

Deze definitie is weloverwogen gekozen. De oorspronkelijke halveringstijd is gehandhaafd zodat de eerste ^{14}C -dateringen ook nu nog dezelfde betekenis hebben. De standaard is en blijft 1950 omdat de standaard radioactiviteit (oxaalzuur) daarmee overeenkomt. Het verval na 1950 is niet relevant want dat treedt op voor zowel de standaard (het oxaalzuur) als voor het monster. Alleen 'Present' is, toegegeven, een ongelukkig gekozen term. Die betekenis kunnen we het beste vergeten, we moeten alleen onthouden dat ^{14}C -dateringen worden uitgedrukt in de tijdseenheid 'BP'.

De ^{14}C -klok, op deze wijze gedefinieerd, loopt dus uit de pas met de fysieke klok (door de 'verkeerde' $T_{1/2}$) en kan bovendien zowel trager als sneller gaan lopen (door een variërend natuurlijk ^{14}C -gehalte in de tijd). De ^{14}C -tijdschaal loopt dan ook niet synchroon met de historische. Een ^{14}C -chronologie is dus nog geen historische chronologie, net zo min als een aardewerk-chronologie of een pollenstratigrafie zomaar langs de kalender kunnen worden gelegd. Er is natuurlijk wel een relatie tussen de ^{14}C -tijdschaal en de historische tijdschaal. Deze relatie kan worden vastgesteld door ijking.

Ijken van de ^{14}C -tijdschaal

Het ijken van de ^{14}C -tijdschaal is mogelijk, als het verband bekend is tussen BP (de ^{14}C -tijd) en de echte (kalender)tijd. Dit verband kan worden bepaald door het dateren van monsters met zowel de ^{14}C -methode als met een andere onafhankelijke (bij voorkeur 'absolute') methode. Een voor de hand liggende methode is dendrochronologie; er zijn inmiddels vele duizenden dateringen met jaarringen van bomen verricht. Deze op dendrometingen gebaseerde ijkgegevens gaan bijna 12.000 jaar terug.

De ijkgrafiek is dit jaar uitgebreid tot 26.000 jaren terug (Reimer et al., 2004), met dateringen van marine data - koralen gedateerd met zowel ^{14}C als U-isotopen (welke laatste men dan als 'absoluut' moet aannemen), en gelamineerde afzettingen van het Cariaco basin (^{14}C -gedateerde foraminiferen). De complete

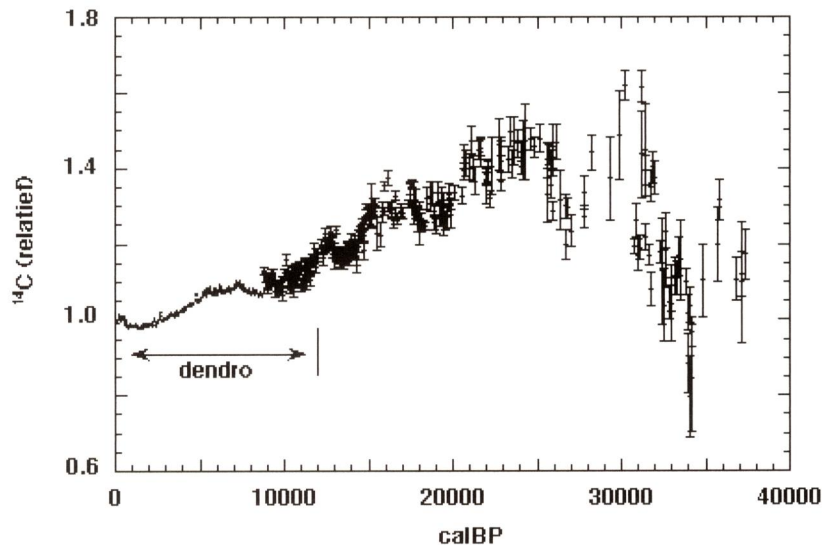
ijkgrafiek is weergegeven in afbeelding 3. Deze grafiek is vastgesteld door de internationale ^{14}C gemeenschap en staat bekend als intcal04. De grafiek geeft het grillige verband weer tussen de ^{14}C -tijdschaal (BP, verticaal) en de historische absolute tijdschaal (per conventie genoteerd als calBC of calAD; horizontaal). Ook wordt wel de eenheid calBP gebruikt, wat staat voor kalenderjaren ten opzichte van 1950: $\text{calBP} = 1950 - \text{calAD}$. Dit is de rechte lijn in afbeelding 3 (a en b), en komt overeen met een constant ^{14}C -gehalte in de tijd.

We merken nog op dat ook de eenheid calBP niet eenduidig gebruikt wordt, met name in de aardwetenschappen. De hierboven gegeven definitie is absoluut. Maar chronologieën gebaseerd op dateringsmethoden zoals met isotopen uit de U-reeks, ESR, etc. zijn niet absoluut (ze bevatten meet- en andere fouten). Hetzelfde geldt voor ijskernen; de chronologieën zijn uitgedrukt in calBP maar toch verschillend, waarbij 'Present' ook nog het jaar van boren betekent.

De algemene trend van de ijkgrafiek (Afb. 3a) kan worden verklaard met behulp van het aardmagnetisch veld. De veldsterkte neemt af terug in de tijd, waardoor een hogere flux kosmische straling door het aardmagnetisch veld wordt ingevangen en dus een hogere ^{14}C -productie in de atmosfeer tot gevolg heeft. Hierdoor correspondeert bijvoorbeeld 10.000 ^{14}C -jaren geleden (BP) met ruwweg 12.000 echte jaren geleden (10.000 calBC).

Daarnaast herkennen we, gesuperponeerd op de lange termijn trend, fluctuaties in het ^{14}C -gehalte. Deze fluctuaties worden 'wiggles' genoemd. Deze kunnen worden verklaard door fluctuaties in de activiteit van de zon (in ieder geval voor het Holocene) of een sterk wisselende CO_2 -uitwisseling tussen oceaan en atmosfeer (in ieder geval tijdens het Laat-Glaciaal), of een combinatie van beide. Gedetailleerde spectraalanalyses laten periodes zien van 11, 90, 210 en 2400 jaar. De periode van 11 jaar komt overeen met de bekende zonnevlekkencyclus, die van 2400 jaar hangt vermoedelijk samen met een mondiale klimaatcyclus.

Afbeelding 4.
Atmosferisch ^{14}C -gehalte gedurende de laatste 45.000 jaar, zoals gemeten aan gevarvde afzettingen uit Japan. Links (tot ca. 10.000 jaar) de gegevens van de jaarringen waaraan de varvenchronologie is aangepast.



De wiggles zijn in afbeelding 3a niet te zien vanwege de schaal. Een gedetailleerd stukje ijkgrafiek (het derde millennium BC) is weergegeven in afbeelding 3b.

Overigens is de op het eerste gezicht wellicht wonderlijke definitie van BP (zoals de 'foute' halveringstijd) nu meer begrijpelijk: via de ijkgrafiek kan een ^{14}C -ouderdom (in BP) altijd worden omgezet in een historische ouderdom (in calBC, calAD of calBP). Invoeren van een herziene halveringstijd voor de berekening van de ^{14}C -ouderdom zou juist een enorme verwarring introduceren. De gekozen conventie zorgt ervoor dat ^{14}C -ouderdommen in BP altijd dezelfde betekenis hebben. De ijkgrafiek verdisconteert de aanvankelijke complicaties van de ^{14}C -dateringsmethode betreffende de waarde van de halveringstijd en het variërende ^{14}C -gehalte in de atmosfeer.

Een doorbraak met 'varven'

Voor ijking van de ^{14}C -tijdschaal is het nodig materialen te dateren met zowel ^{14}C als een andere, onafhankelijke en absolute methode. In principe is alleen dendrochronologie (boomjaarringen) absoluut. De ijkgegevens (Afb. 3) gebaseerd op dendrochronologie bestrijken nu het gehele Holoceen. Voorbij de 'boomgrens' moeten we onze toevlucht zoeken tot andere methoden. Recent is de ijkgrafiek met behulp van marine gegevens uitgebreid tot 26.000 jaar (Afb. 3); de betreffende marine gegevens waarop deze curve is gebaseerd, blijken goed genoeg om als 'absoluut gedateerd' te worden beschouwd. Behalve voor ijkingdoeleinden (het transformeren van ^{14}C -dateringen naar kalenderjaren) representeert de ijkgrafiek uiteraard het verloop van het ^{14}C -gehalte in de natuur. Dit is een gevoelige graadmeter voor de dramatische wisselingen in klimaat en oceaancirculatie tijdens de overgang van ijstijd naar huidig klimaat.

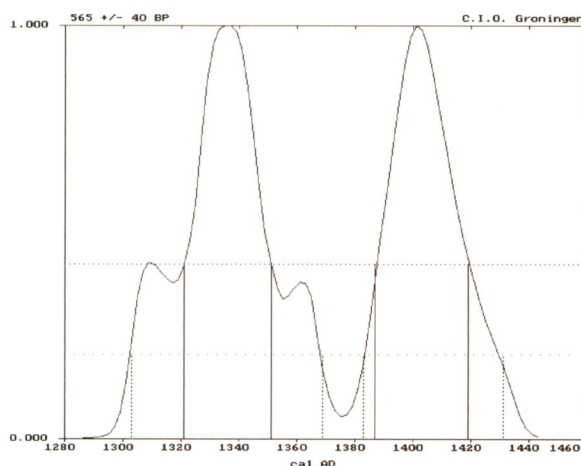
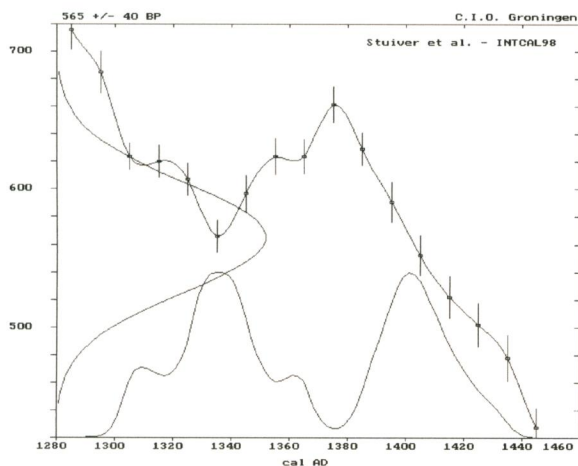
Voor het verkrijgen van atmosferische ^{14}C -concentraties als functie van de kalendertijd voor nog oudere monsters, zijn we vooralsnog afhankelijk van andere archieven die zowel met ^{14}C , als met een andere, onafhankelijke methode gedateerd kunnen worden. We

beperken ons hier tot de zogenaamde varven-chronologie. Varven zijn sedimentlaagjes (laminaties), waarin jaarlijkse cycli (operevolgende zomer/winter signalen) zichtbaar zijn. In de klei op de bodem van het Suigetsu meer in Japan, is de gelaagdheid veroorzaakt door algenbloei in het voorjaar, wat zichtbare witte laagjes in donkere klei oplevert. Dit meer is uniek aangezien de varven teruggaan tot circa 100.000 jaar en dus meer dan het gehele ^{14}C -bereik van circa 50.000 jaar bevatten. Uit deze laagjes is organisch materiaal verzameld (takjes, plantenresten, insecten e.d.) en met ^{14}C gedateerd. De verkrijgbare hoeveelheden zijn dermate gering dat ze alleen met AMS meetbaar zijn. Inmiddels zijn meer dan 300 ^{14}C -monsters uit dit meersediment gemeten met de Groninger AMS (Kitagawa and Van der Plicht, 1998). Na aanpassing van het jongste gedeelte aan de dendrochronologie, werd afgeleid dat de varven chronologie een tijdvak beslaat van ruim 29.000 jaren (vanaf 6.880 v. Chr.). Het oudste stuk van de varvenchronologie is nog niet geteld; de tijdas is hier geëxtrapoleerd onder aanname van een constante sedimentatie-snelheid.

We merken nog op dat fouten gemaakt kunnen worden vanwege missende stukken sediment. Dit kan worden nagegaan doordat in het sediment vulkanische lagen aanwezig zijn. Sommige daarvan kunnen worden herleid tot vulkanische uitbarstingen uit het verleden, die onafhankelijk zijn gedateerd. De cumulatieve fout is geschat op maximaal 2.000 jaar voor de oudste monsters.

De meetresultaten verkregen van het Suigetsu meer zijn weergegeven in afbeelding 4. De gegevens zijn nu niet geplot als ijkgrafiek, maar (verticaal) als relatief ^{14}C -gehalte ten opzichte van de standaard, en (horizontaal) als kalenderjaren ten opzichte van 1950, het 'standaardjaar'. De boomringgegevens zijn eveneens in afbeelding 4 getekend. De varvencurve is aan deze jaarrijscurve aangepast.

De trend op de lange termijn is kwalitatief te verklaren aan de hand van paleomagnetisme. In het oudere gedeelte (vóór 20.000 jaar geleden) zijn er boven op



Afbeelding 5. Voorbeeld van ijking van een ^{14}C -datering. De datering 565 ± 40 BP (langs de verticale as uitgezet in Afb. 5a) komt overeen met een geïkt resultaat 1321-1351 en 1387-1419 calAD. De geïkte waarschijnlijkheidsverdeling is langs de horizontale as uitgezet, en ook in Afb. 5b.

de lange termijn trend twee 'pieken' waarneembaar met een verhoogd ^{14}C -gehalte, circa 23.000 en 31.000 jaar geleden. Opmerkelijk is dat er ook voor twee andere kosmogene isotopen, ^{10}Be en ^{36}Cl , verhoogde productie is waargenomen in ijskernen afkomstig uit het poolijs en in diverse andere sedimenten. Ook deze kosmogene isotopen kunnen alleen met de AMS techniek gemeten worden.

De piek bij 23.000 is waarschijnlijk veroorzaakt door een zogenaamde excursie in het aardmagnetische veld. Met de piek rond 31.000 is meer aan de hand. De 'absolute' dateringen wijken onderling nogal van elkaar af (enkele millennia). Ook hier is een bijzonder scherpe excursie in het geomagnetische veld een mogelijke verklaring.

De Lake Suigetsucurve is geen ijkgrafiek als zodanig. Recent zijn namelijk andere 'ijkgrafieken' verkregen (marine sedimenten, en druipstenen gedateerd met zowel ^{14}C als U-isotopen) die eveneens tot 50.000 jaar teruggaan. Alle ijkgrafieken verschillen aanzienlijk van elkaar, wat natuurlijk niet kan. Voor een gedetailleerde discussie verwijzen we naar de literatuur (Van der Plicht, 2004; Van der Plicht et al., 2004). We laten hier alleen de varven van Lake Suigetsu zien, omdat deze gegevens - als enige - gemeten zijn aan terrestrisch ^{14}C -materiaal, omdat de gegevens de eerste doorbraak (ijkgegevens voor vrijwel het gehele ^{14}C -meetbereik) vormen, en omdat deze unieke gegevens in Groningen zijn gemeten.

Wiggles in de ijkgrafiek

Een voorbeeld van ^{14}C -ijking is gegeven in afbeelding 5. Een monster is met de ^{14}C -methode gedateerd op 565 ± 40 BB. Voor de ijking dient het BP resultaat te worden vertaald naar historische jaren met behulp van de eijkgrafiek. Afbeelding 5a laat het relevante stukje ijkgrafiek zien. De meetpunten hebben een resolutie van 10 (kalender)jaren. De ^{14}C -fluctuaties zijn duidelijk te zien. Deze fluctuaties (wiggles) kunnen meerdere oplossingen veroorzaken voor de ijking: één ^{14}C -getal (565 BP) komt in dit voorbeeld overeen met

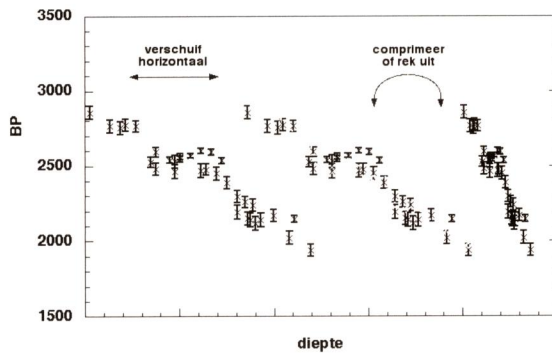
2 mogelijkheden langs de historische kalender (1335 en 1402 AD). Dit is met stippellijnen aangegeven in afbeelding 5a.

Ingewikkelder wordt de zaak als we de fouten meenemen in de discussie. De ^{14}C -datering 565 ± 40 BP is langs de verticale as geplote met de bijbehorende waarschijnlijkheidsverdeling (Gaussisch genaamd). De fout van 40 is de zogenoemde 1σ fout. Door het grillige verloop van de ijkgrafiek is de resulterende waarschijnlijkheidsverdeling langs de kalender-as niet meer eenvoudig Gaussisch. Het computerprogramma geeft de resultaten weer in de vorm van 1σ en 2σ intervallen - zie afbeelding 5b. Het 1σ interval is in dit voorbeeld 1321-1351 en 1387-1419 calAD (getrokken verticale lijnen). Met andere woorden, de ^{14}C -datering 565 ± 40 BP komt overeen met het geïkte resultaat 1321-1351 en 1387-1419 calAD. De gestippelde verticale lijnen in afbeelding 5b komen overeen met het 2σ interval. Diverse illustratieve voorbeelden van ijkingen met computerprogramma's worden gegeven in Van der Plicht en Mook (1987).

Het is duidelijk dat de wiggles in het algemeen een beperking vormen voor de ^{14}C -dateringsmethode. IJking levert doorgaans complicaties op, soms zelfs meerdere mogelijkheden (zoals de 2 intervallen van afb. 5). In sommige tijdstrajecten kan de ^{14}C -methode soms zelfs onbruikbaar zijn, zoals tijdens het 'Halstatt-plateau' in het eerste millennium BC: door een vlak stuk in de ijkgrafiek (zie Afb. 6b) komt een ^{14}C -datering van 2450 BP (zelfs indien gemeten met grote precisie) overeen met circa 800-400 BC, 4 eeuwen dus. Niet echt bruikbaar voor de Klassieke Archeologie.

Anderszins kunnen de wiggles worden gebruikt om de nauwkeurigheid van ^{14}C -dateringen juist te vergroten. Dit kan als er sprake is van een serie monsters waarvan de onderlinge afstand in de tijd bekend is. Deze methode heet wiggle matching. Uiteraard leent hout zich hier goed voor: de onderlinge afstand in de tijd ligt vast door de jaarringen. Dit wordt vaak toegepast op een stuk hout dat niet met dendrochronologie

Afbeelding 6a.



dateerbaar is. De jaarringen van zo'n stuk hout vormen wel een chronologie, welke qua dendo 'zwevend' is. Een serie ^{14}C -metingen vormen dan in wezen een stukje ijkgrafiek, dat aan de 'echte' ijkgrafiek kan worden aangepast.

Het bekendste voorbeeld van wiggle matching in de Nederlandse Archeologie betreft het 'Kasteel van Amsterdam' waarbij voor hout aangetroffen in de fundering een vergelijking werd gemaakt tussen dendrochronologie en ^{14}C . Hiervoor verwijzen we naar de literatuur (Van der Plicht, 1995; Van der Plicht et al., 1995).

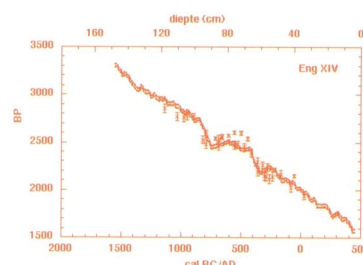
Op deze manier (met een serie onderling gerelateerde monsters) kunnen zwevende (qua dendrochronologie) houtmonsters nauwkeurig worden gedateerd, nauwkeuriger dan met een enkele houtdatering mogelijk zou zijn.

Een waarschuwing is wel op zijn plaats: er is veel hout nodig (ca. 50 gram) per meting; de ^{14}C -meting moet zo nauwkeurig mogelijk worden gedaan (wat wil zeggen gedurende een ongewoon lange meettijd); het aantal jaarringen tussen kern en spint moet voldoende zijn; en tenslotte is er ook een eindigheid aan de nauwkeurigheid in de ijkgrafiek (welke uiteindelijk ook een serie precisie-metingen aan dendrochronologisch gedateerd hout is).

Behalve voor jaarringen in hout, is wiggle-matching ook mogelijk voor sedimenten en veenpakketten. De diepte in een boorkern is immers ook een maat voor de ouderdom. Als de sedimentatie- of groeisnelheid constant verloopt in de (kalender) tijd, zijn in een serie ^{14}C -dateringen als functie van de diepte vaak de ^{14}C -wiggles te herkennen. We hebben dan weer een zwevend stukje ijkgrafiek, welke kan worden aangepast aan de 'echte' ijkgrafiek. Dit is wel complexer dan met jaarringen aan hout. Daarvan weten we dat bijvoorbeeld ringnummer 1 en ringnummer 100 een eeuw verschillen in kalendertijd; een diepte van 1 centimeter en 100 centimeter hebben een onbekende afstand in de kalendertijd. Een serie ^{14}C -jaarring metingen hoeven we alleen maar van links naar rechts te schuiven, totdat we een goede aanpassing hebben aan de ijkgrafiek; voor een serie ^{14}C -

metingen als functie van de diepte geldt dit ook, maar moet ook nog de diepteschaal worden aangepast aan de kalenderas. Met andere woorden, de groeisnelheid moet bepaald worden. Een dergelijke wiggle-match heeft dus 2 parameters, voor jaarringen is dit 1. In werkelijkheid zijn er vaak nog meer parameters; er kunnen hiaten zijn, de groeisnelheid hoeft niet lineair te zijn in de tijd, en er kunnen reservoir-effecten optreden. Op deze plaats gaan we hier niet verder op in, maar beperken we ons tot een illustratief voorbeeld (Afb. 6). Het betreft hier AMS metingen verricht aan plantenresten (macrofossielen) afkomstig uit Engbertsdijk-veen in Twente (Blaauw et al., 2004).

Een serie van 33 ^{14}C -metingen (in BP) is als functie van diepte weergegeven in afbeelding 6a. Deze serie kan worden aangepast aan de ijkgrafiek, door de 2 genoemde parameters te variëren. We kunnen de serie horizontaal verschuiven (net als bij een jaarringen serie) langs de kalenderas, en de serie comprimeren (hogere sedimentatiesnelheid) of uitrekken (lagere sedimentatiesnelheid), totdat de serie past op de ijkgrafiek (Afb. 6b). Op deze manier is de serie monsters tot op 20 jaar nauwkeurig te dateren. Gedetailleerde analyse van de vegetatie laat duidelijke natte en droge perioden in het hoogveen zien, welke dus nauwkeurig gedateerd zijn. Het blijkt dat voor hoogveen in het algemeen (vergelijkbare waarnemingen zijn gedaan voor vele andere hoogveenen) de natte perioden samenvallen met een lager dan normaal ^{14}C -gehalte in de atmosfeer (zoals immers blijkt uit de ijkgrafiek). Aangezien de ^{14}C -variaties (wiggles) worden veroorzaakt door de zon, suggereert dit onderzoek dat er een relatie is tussen verandering in zonneactiviteit en klimaatverandering. De discussie over 'solar forcing of climatic change' is een uiterst actueel thema in de huidige literatuur (Van Geel et al., 1999; Blaauw, 2003).



Afbeelding 6.
Wiggle matching van
macrofossielen, met
AMS gedateerd, aan
de ^{14}C -ijkgrafiek. De
macrofossielen zijn
afkomstig van Eng-
bertsdijksveen. Voor
details zie tekst.

LITERATUUR

- Aitken, M.J., 1990. Science based dating in Archaeology, Longman, London 1990, ISBN 0-582-05498-2.
- Bayliss, A., McCormac, G., and van der Plicht, J., 2004. An illustrated guide to measuring radio-carbon from archaeological samples. Physics Education 39, 2, p.137-144.
- Blaauw, M., 2003. An investigation of Holocene sun-climate relationships using numerical C-14 wiggle-match dating of peat deposits. Proefschrift, Universiteit van Amsterdam, ISBN 90-76894-29-9.
- Blaauw, M., van Geel, B., and van der Plicht, J., 2004. Solar forcing of climatic change during the mid-Holocene: indications from raised bogs in The Netherlands. The Holocene 14, p.35-44.
- Van Geel, B., Raspopov, O.M., Renssen, H., van der Plicht, J., Dergachev, V.A., and Meijer, H.A.J., 1999. The role of solar forcing upon climate change. Quaternary Science Reviews 18, p.331-338.
- Kitagawa, H., and van der Plicht, J., 1998. Atmospheric Radiocarbon calibration to 45.000 yr BP: Late Glacial fluctuations and cosmogenic isotope production. Science 279, p.1187-1190.
- Mook, W.G., and van der Plicht, J., 1999. Reporting ^{14}C activities and concentrations. Radiocarbon 41, 3, p.227-239.
- Van der Plicht, J., and Mook, W.G., 1987. Automatic Radiocarbon Calibration: illustrative examples. Palaeohistoria 29, p.173-182.
- Van der Plicht, J., 1995. Nogmaals 'Kasteel van Amstel' - de ^{14}C datering. Spiegel Historiae 7/8, p.270-272.
- Van der Plicht, J., Jansma, E., and Kars, H., 1995. The 'Amsterdam Castle': a case study of wiggle matching and the proper calibration curve. Radiocarbon 37, p.965-968.
- Van der Plicht, J., 2004. Radiocarbon calibration - past, present and future. Nuclear Instruments and Methods B223-224, p.353-358.
- Van der Plicht, J., et al., 2004. NOTCAL04 - comparison/calibration ^{14}C records 26-50 ka. Radiocarbon 46, 3, p.1225-1238.
- Reimer, P.J., et al., 2004. INTCAL04 terrestrial radiocarbon age calibration 0-26 ka. Radiocarbon 46, 3, p.1029-1058.

INTERNET

www.cio.phys.rug.nl
www.radiocarbon.org

NEDERLANDS CENTRUM VOOR LUMINESCENTIEDATERING SYMPOSIUM 2005

DATUM Vrijdag 23 september 2005
THEMA Luminescentiedatering: toepassingen en onderzoek
LOCATIE TUDelft, Reactor Instituut Delft
 (Fermi zaal) Mekelweg 15, 2629 JB Delft (tel. 015 2786712)

VOORLOPIG PROGRAMMA

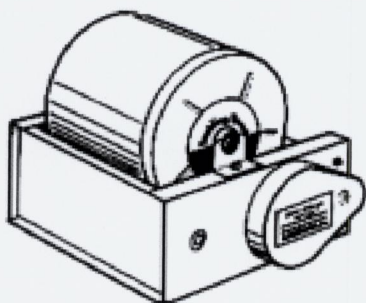
13.30	Welkom (Tim van der Hagen, TUDelft RID)	15.15	Optical dating of fluvial deposits in and around a Roman barge (Jakob Wallinga, NCL / TUDelft)
13.35	Reconstruction of the former IJ estuary using radiocarbon and optical dating (Peter Vos, TNO-NITG)	15.35	Multidisciplinary tracing of 120.000 years of environmental change and glacial forcing in the alluvial architecture of the Rhine-Meuse River system (Freek Busschers, VU / TNO NITG)
13.55	Exploring the methodology for optical dating of Chinese loess (Jan-Pieter Buylaert, Gent)	15.55	Optical dating of individual grains of quartz from deposits younger than 300 years (Mirko Ballarini, NCL / TUDelft)
14.15	IRSL dating of aeolian activity phases in South-West Sweden during the Late Holocene (Femke Davids, UU / NCL)	16.15	Outlook for NCL research (Jakob Wallinga, NCL / TUDelft)
14.35	To be announced (Jan van Mourik, UvA)	16.30	Rondleiding NCL labs & borrel
14.55	Thee pauze		

Het definitieve programma en aanvullende informatie wordt gepubliceerd op www.ncl-lumdat.nl
 Het symposium is vrij toegankelijk. Aanmelden is verplicht in verband met veiligheidsmaatregelen bij het RID. Aanmelden kan tot 20 september door een e-mail te sturen naar NCL@tnw.tudelft.nl.
 Toegang tot het RID is alleen mogelijk met identificatie.

MTN-Giethoorn

Importeur LORTONE® Steenbewerkingsmachines

Kanaaldijk 18
 8355 VJ Giethoorn
 Tel: 0521-361544
 Fax: 0521-362105



Ruim 32 jaar LORTONE® (èn de service) in Nederland
 Standhouder op de meeste Nederlandse mineraalbeurzen

Grote collectie zilveren sieraden
 met en zonder edelstenen (veel eigen ontwerpen)

Estwing geologen gereedschap
Kunststof standaards en opbergdoosjes
Edelsteenhangars
Ruwe mineralen: slijpbaar voor trommel en cabochons
Furnituren o.a. zilveren
Cabochons en trommelstenen
Microscopen en Loepen en meer...

Bezoek onze showroom (na tel. afspraak vragen naar Elly ten Napel of Thoni Meijer)
 of neem een kijkje op onze internet-site: <http://www.mtn.nl> • E-mail: info@mtn.nl