



Vlaanderen
is erfgoed



^{14}C : dateren met radiokoolstof

Handleiding Onroerend Erfgoed

Agentschap
Onroerend
Erfgoed

www.onroenderfgoed.be

COLOFON

TITEL

¹⁴C: dateren met radiokoolstof

REEKS

Handleidingen agentschap Onroerend Erfgoed nr. 21

AUTEURS

Kristof Haneca, Anton Ervynck, Mark Van Strydonck

JAAR VAN UITGAVE

2019

Een uitgave van agentschap Onroerend Erfgoed, Wetenschappelijke instelling van de Vlaamse Overheid, Beleidsdomein Omgeving
Published by the Flanders Heritage Agency Scientific Institution of the Flemish Government, policy area Environment

VERANTWOORDELIJKE UITGEVER

Sonja Vanblaere

OMSLAGILLUSTRATIE

Het Automated Graphitization Equipment (AGE) in het radiokoolstoflaboratorium van het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (foto KIK).
Foto's en illustraties: © Onroerend Erfgoed, tenzij anders vermeld.

agentschap Onroerend Erfgoed
Havenlaan 88 bus 5
1000 Brussel
T +32 2 553 16 50
info@onroenderfgoed.be
www.onroenderfgoed.be

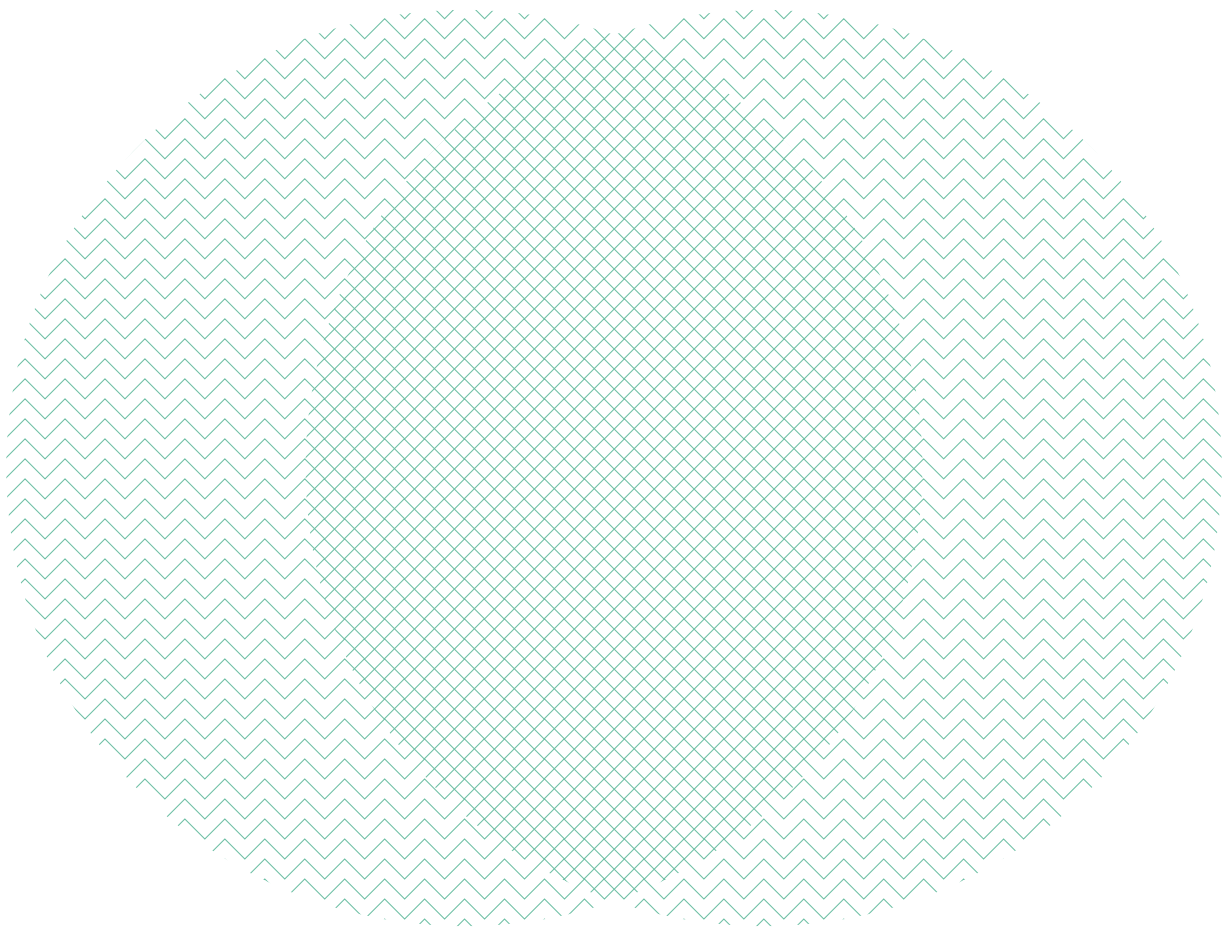
Dit werk is beschikbaar onder de Open Data Licentie Vlaanderen v. 1.2.
This work is licensed under the Free Open Data Licence Flanders v. 1.2.

Dit werk is beschikbaar onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie.
Bezoek <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> om een kopie te zien van de licentie.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

ISSN 2565-7003
D/2019/3241/063

^{14}C : dateren met radiokoolstof

Kristof Haneca, Anton Ervynck, Mark Van Strydonck



Inhoudstafel

HOOFDSTUK 1	7
INLEIDING	
HOOFDSTUK 2	11
HET PRINCIPE VAN EEN ¹⁴ C-DATERING	
2.1 Het chemisch element koolstof	12
2.2 Het ontstaan van radiokoolstof	13
2.3 De koolstofcyclus	14
2.4 Radioactiviteit	15
2.5 Ouderdom bepalen	16
2.6 Meetfout en statistische onzekerheid	16
2.7 Isotopenfractionatie: <i>size matters</i>	18
2.8 Aquatische systemen	19
2.9 Voedsel en stabiele isotopen	20
HOOFDSTUK 3	23
KALIBRATIE	
HOOFDSTUK 4	29
ONDERZOEKSVRAGEN EN -STRATEGIE	
4.1 Welk materiaal?	30
4.2 Selectie van geschikt materiaal	32
4.3 Dateringsstrategie	33
4.4 Oud-houteffect	35
4.5 Residueel en intrusief materiaal	36
4.6 Periode en precisie	37
HOOFDSTUK 5	43
BEMONSTEREN	
5.1 Hoeveel materiaal?	44
5.2 Documentatie	46
5.3 Mogelijke verontreiniging	47
5.4 Chemische voorbehandeling en transformatie	48

HOOFDSTUK 6	51
VAN RAPPORT TOT INTERPRETATIE	
6.1 Rapporteren	52
6.2 Reservoireffect?	53
6.3 Op dieet?	54
HOOFDSTUK 7	57
BAYESIAANSE ANALYSE	
7.1 Modelling	58
7.2 Gelijktijdigheid	59
7.3 Sequenties en fasering	60
7.4 Historische gebeurtenissen en gekende ijkpunten	62
7.5 Gesommeerde probabiliteiten	62
7.6 <i>Wiggle matching</i>	63
7.7 Valkuilen	64
BRONNEN	67
BEGRIPPEN	71
BIJLAGE: HANDLEIDING OXCAL	75
1 Inleiding	76
2 Kalibreren	77
2.1 Kalibratie van één datering	77
2.2 Kalibratie meerdere dateringen	79
2.3 Datainvoer via Excel	81
2.4 Grafieken en tabellen	82
3 Een datering simuleren	83
4 Dateringen combineren	84
4.1 R_Combine	84
4.2 Combine	84
4.3 Difference	85
5 Densiteitsplot	86
6 Fasering en chronologie	86
6.1 Modelopbouw	87
6.2 Historische datum of gebeurtenis	89
6.3 Hoe lang?	91
6.4 Kwaliteitscontrole en evaluatie	91



HOOFDSTUK **1**
INLEIDING

De toepassing van radiokoolstofdateringen op organisch en anorganisch materiaal uit archeologische sporen, landschappelijke elementen of gebouwd erfgoed heeft, sinds de ontdekking van deze methode in het midden van de 20ste eeuw (Arnold & Libby 1949; Taylor 1987: 97), een ware aardverschuiving teweeggebracht in onze kennis van het verleden. De zogenaamde ‘radiokoolstof-revolutie’ zorgde de afgelopen decennia voor een beter afgelijnd chronologisch kader van verschillende culturele perioden en natuurlijke processen, en voor een preciezere datering van gebeurtenissen uit het verleden.

Vandaag is radiokoolstofdatering niet meer weg te denken uit het erfgoedonderzoek. Naar schatting worden alleen al in Vlaanderen – op het moment van schrijven – zo’n 1500 dateringen per jaar uitgevoerd. Deze resulteren in chronologische ankerpunten voor de evaluatie en interpretatie van archeologische vondsten, sporen, structuren en natuurlijke fenomenen die worden aangetroffen in het bodemarchief. Ook binnen het bouwhistorisch onderzoek wordt dankbaar gebruik gemaakt van deze dateringstechniek. Kalkmortel is immers ook een gekende bron van ‘oude’ koolstof, die toelaat om de ouderdom van dit materiaal te achterhalen. Daarnaast maken organische materialen sowieso vaak deel uit van gebouwd erfgoed.

Deze handleiding is bedoeld voor erfgoedonderzoekers die hun kennis over de radiokoolstofdateringstechniek willen aanscherpen. Een betere kennis van de onderliggende processen zal immers leiden tot een betere staalname (hoofdstukken 2 en 3), tot een realistische vraagstelling (hoofdstuk 4), en zal teleurstellingen voorkomen. Vele vragen duiken daarbij op. Wanneer is een radiokoolstofdatering zinlijk? Welk materiaal komt in aanmerking en welke dateringsvragen zijn hiermee te beantwoorden? Wat zijn de addertjes onder het gras? Uiteraard zijn bij dit alles de correcte rapportage en interpretatie van een radiokoolstofouderdom van groot belang.

Naast de radioactieve koolstof – die toelaat een ouderdomsbepaling uit te voeren – worden in wat volgt ook de stabiele koolstof- en stikstofsotopen kort onder de loep genomen (2.9 en 6.3). Deze chemische elementen laten immers toe om dieetreconstructies te maken of reservoir-effecten (6.2) op te sporen. Beide aspecten hebben hun invloed op het dateringsresultaat.

Voor wie reeds voldoende ervaring heeft met het selecteren van geschikte stalen (hoofdstuk 5), en het rapporteren en interpreteren van de uiteindelijke radiokoolstofdateringen (hoofdstuk 6), kan een praktische handleiding voor het softwarepakket OxCal van nut zijn. Zeker wanneer meerdere radiokoolstofdateringen beschikbaar zijn uit eenzelfde spoor, structuur of elkaar opeenvolgende lagen, kan een gespecialiseerd softwarepakket als OxCal een handige hulp zijn bij de analyse en de rapportage onder de vorm van grafieken en tabellen (zie hoofdstuk 7 en BIJLAGE). Door stratigrafische informatie mee in rekening te brengen, kan de kenniswinst en precisie van individuele dateringen zelfs verhoogd worden, wat uiteindelijk toch het doel is van een dateringsonderzoek.

“The determination of the chronology of ancient civilizations may be said to be the main archeological problem and task of radiocarbon dating”
(Nobel Foundation 1964).



HOOFDSTUK **2**

**HET PRINCIPE VAN
EEN ¹⁴C-DATERING**

2.1 HET CHEMISCH ELEMENT KOOLSTOF

Eerst en vooral kan wat duidelijkheid scheppen in de gangbare terminologie geen kwaad. Veelal worden 'radiokoolstof' en de notaties C-14, C^{14} , ^{14}C of koolstof-14 vlot door en naast elkaar gebruikt. Volgens internationale afspraken binnen de scheikunde is ^{14}C echter de enige correcte afgekorte benaming voor radiokoolstof. Het is de weerslag van de chemische karakterisatie van het element koolstof dat met de hoofdletter C (van carbon) is opgenomen in het periodiek systeem der elementen, ook wel de tabel van Mendelejev genoemd. In die tabel staan de gekende chemische elementen geordend volgens het aantal protonen in hun atoomkern (= het atoomnummer). Het aantal protonen in de atoomkern bepaalt immers het element. Koolstof heeft atoomnummer 6, wat wil zeggen dat dit element 6 protonen heeft in zijn kern en 6 elektronen die cirkelen rond die kern (figuur 1). Doorgaans betekent dit dat er ook 6 neutronen aanwezig zijn in de kern, en dat wordt genoteerd als $^{12}_6\text{C}$ waarbij 12 het totale aantal kerndeeltjes (protonen en neutronen) weergeeft en 6 het aantal protonen. Vrijwel alle massa bevindt zich in de atoomkern (protonen en neutronen).

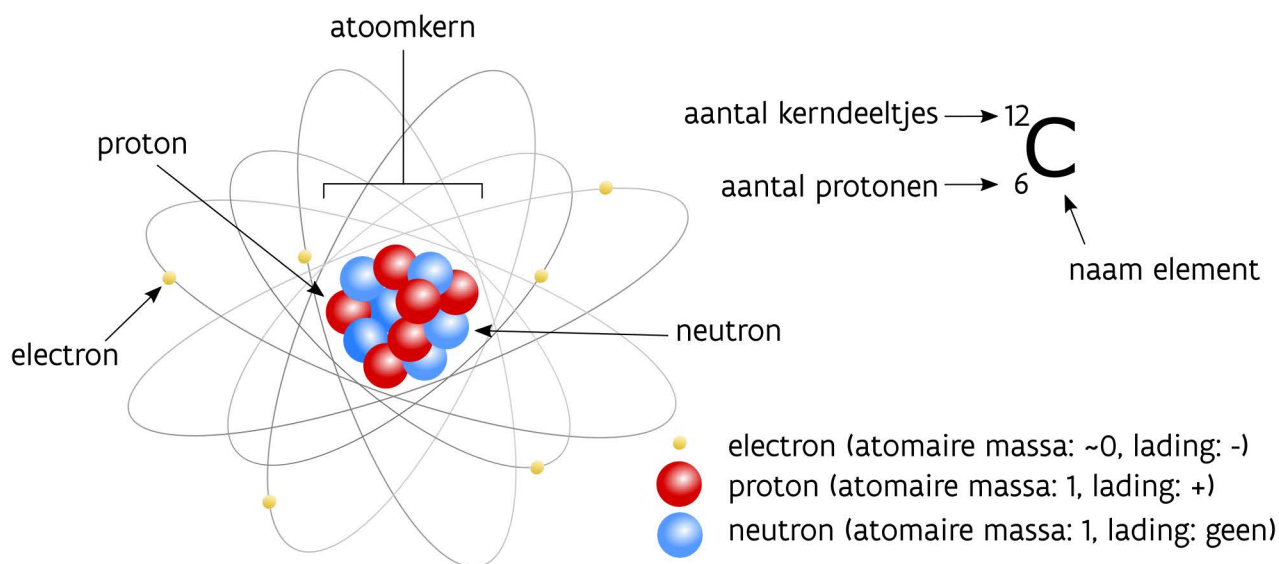


FIG 1: Het atoommodel voor koolstof.

Daarnaast bestaan er varianten van koolstof met meer kerndeeltjes, bijvoorbeeld met 7 (^{13}C) en 8 (^{14}C) neutronen in de kern (figuur 2). Die varianten van eenzelfde element worden isotopen genoemd. Bij de koolstofatomen in de aardse atmosfeer bestaat het overgrote deel (98,9%) uit de variant met 12 kerndeeltjes (6 protonen + 6 neutronen) en bestaat slechts 1,1% uit ^{13}C (6 protonen + 7 neutronen). De isotoop ^{14}C is een derde, maar uiterst zeldzaam fenomeen in vergelijking met ^{12}C , en zelfs ^{13}C . Zo kan men in de atmosfeer doorgaans slecht één ^{14}C -isotoop vinden op 1.000.000.000.000 (duizend miljard) atomen koolstof. Aangezien er meer kerndeeltjes aanwezig zijn bij ^{13}C en ^{14}C (respectievelijk één of twee extra neutronen, met atomaire massa 1), zijn dit ook zwaardere isotopen in vergelijking met de meest courant voorkomende ^{12}C .

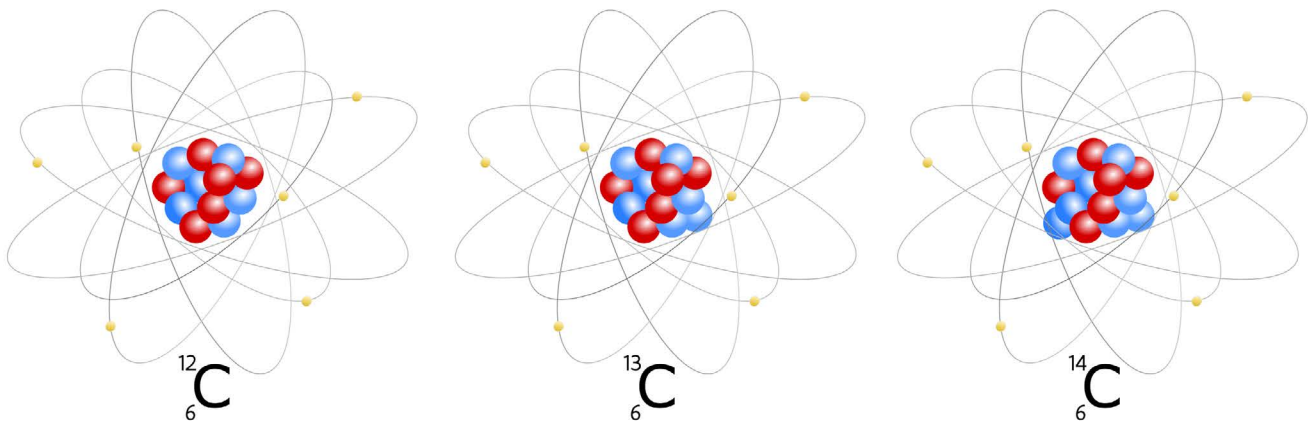


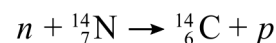
FIG 2: Atoommodel voor drie isotopen van het element koolstof. De isotopen ^{13}C en ^{14}C hebben respectievelijk één en twee neutronen (blauw) meer in hun atoomkern dan de meest courante koolstofisotoop ^{12}C . Het aantal protonen (rood) blijft gelijk.

“In de atmosfeer tref je slecht één ^{14}C -isotoop aan op 1.000.000.000.000 atomen koolstof.”

Isotopen van een element verschillen dan wel in het aantal kerndeeltjes (dus in hun natuurkundige kenmerken), maar de chemische reacties die ze aangaan met andere atomen worden daardoor niet beïnvloed. Ze reageren met andere woorden op een gelijkaardige manier met andere atomen en moleculen, en vormen er samen identiek dezelfde (nieuwe) chemische stoffen mee. Koolstof reageert bijvoorbeeld samen met zuurstof tot de molecule koolstofdioxide (CO_2), ongeacht welke koolstofisotoop betrokken is in deze chemische reactie.

2.2 HET ONTSTAAN VAN RADIOKOOLOSTOF

^{14}C is de zwaarste isotoop van koolstof die in de natuur voorkomt. Hij wordt gevormd in de bovenste laag van de atmosfeer, op ca. 15 km hoogte, door de interactie van zogenaamde ‘thermische neutronen’ (n) met stikstofatomen (meer bepaald de isotoop $^{14}_7\text{N}$ met 7 protonen en 7 neutronen in de kern). De thermische neutronen worden gevormd als gevolg van kosmische straling die de dampkring binnendringt. Ze hebben voldoende energie om een proton (p) uit de kern van een stikstofatoom te verdringen, en daarvan de plaats in te nemen. Hierdoor ontstaat een koolstofatoom met 14 kerndeeltjes (6 protonen + 8 neutronen): de ^{14}C -isotoop



De productie van ^{14}C blijft wel miniem en wordt wereldwijd geschat op niet meer dan 7,5 kg per jaar. Eens zich een ^{14}C -isotoop gevormd heeft, zal dit met de in de lucht aanwezige zuurstofmoleculen oxideren tot koolstofdioxide ($^{14}\text{CO}_2$). Deze moleculen vermengen zich met CO_2 die is opgebouwd met de courante ^{12}C -isotopen en samen komen ze in de koolstofcyclus terecht (figuur 3).

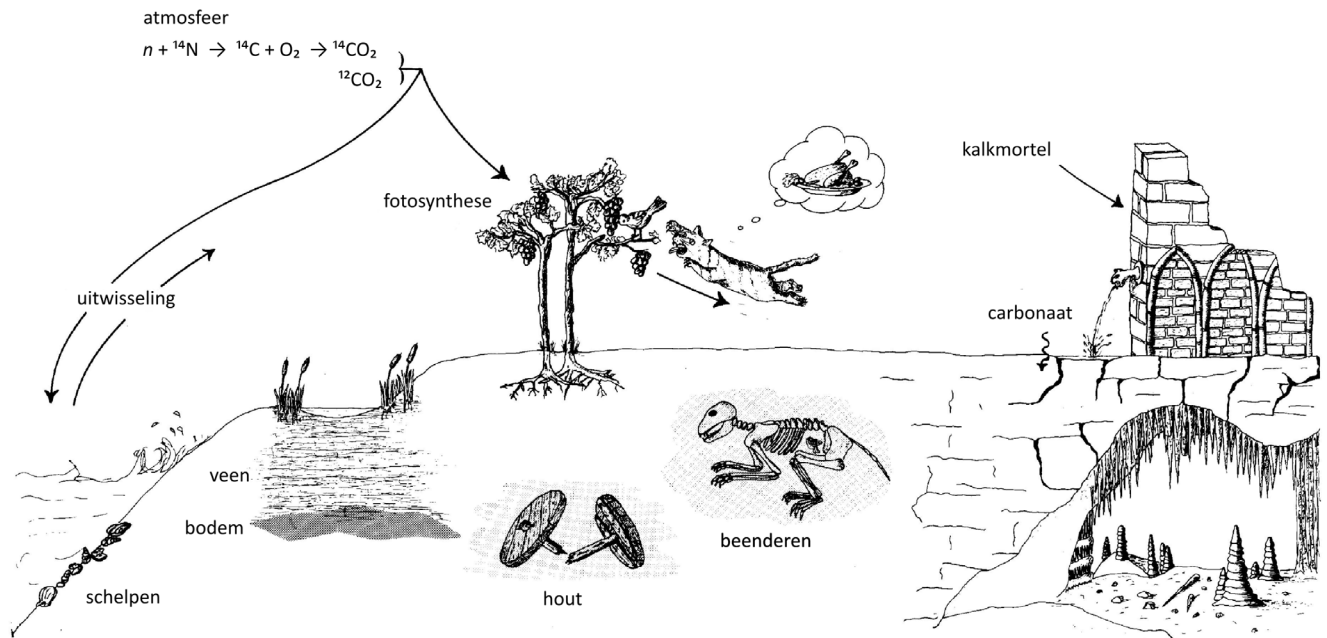


FIG 3: Vereenvoudigde voorstelling van de koolstofcyclus. (© KIK/IRPA, Brussel)

2.3 DE KOOLSTOF CYCLUS

Koolstof is de essentiële bouwsteen voor alle leven op aarde. Elk levend organisme neemt koolstof op en verwerkt het bij de opbouw van nieuwe cellen. Planten doen dit via fotosynthese – nemen zowel ^{12}C , ^{13}C en ^{14}C op – en vormen op zich een voedselbron voor mens en dier. De hele voedselketen is dan ook van koolstof doordrongen, van de kleinste eencelligen tot vleeseters *pur sang*.

Een gigantische ‘voorraad’ aan koolstof zit echter opgeslagen in de oceanen. Daar kan de opgeslagen koolstof, onder de vorm van carbonaten (verbindingen van koolstof en zuurstof, samen met calcium), de grondstof vormen waaruit koralen, schelpen en vele kleine organismen zijn opgebouwd.

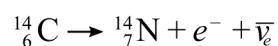
De CO_2 die door levende wezens wordt opgeslagen, komt uiteindelijk weer vrij wanneer hun organisch materiaal na de dood vergaet. Maar daarom wordt die vrijgekomen CO_2 nog niet onmiddellijk in de atmosfeer opgenomen. Koolstof uit planten en dieren kan worden weggespoeld in waterlopen, opgenomen in de bodem of in organische afzettingen zoals veen, via grondwaterbewegingen verplaatst, of simpelweg gevangen blijven in organisch materiaal dat aan desintegratie ontsnapt en zo deel van het archeologisch bodemarchief wordt. Constructiehout dat droog en gevrijwaard blijft van schimmel of ernstige insectenvraat kan eeuwenlang zijn mechanische eigenschappen behouden en een structurele functie blijven uitoefenen in historische gebouwen, en zo de in het hout vastgelegde koolstof uit de koolstofcyclus onttrekken.

“Koolstof is de essentiële bouwsteen voor alle leven op aarde. Elk levend organisme neemt koolstof op en verwerkt het bij de opbouw van nieuwe cellen.”

Een totaal ander en heel specifiek (menselijk) proces, dat relevant is in het erfgoedonderzoek maar buiten de natuurlijke koolstofcyclus staat, vormt de aanmaak van kalkmortel. Tijdens dit proces wordt ongebluste kalk (bereid door het branden van kalksteen of schelpen) gemengd met water en zand, en wordt koolstof uit de atmosfeer (onder de vorm van CO_2) vastgelegd in de mortel (Hajdas *et al.* 2017). Later kan die CO_2 door verwerking weer vrijkomen. Ook bij de productie van andere materialen, zoals ijzer of loodcarbonaat, kan koolstof gevangen worden. Deze materialen dateren is daardoor in sommige gevallen wel mogelijk, al berust dit voorlopig nog op experimenteel onderzoek (zie 4.1).

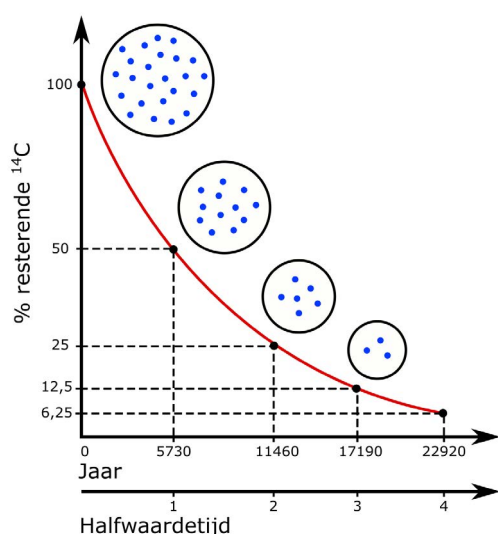
2.4 RADIOACTIVITEIT

Door een uitgesproken onevenwicht in de verhouding van neutronen en protonen in de atoomkern kunnen bepaalde isotopen onstabiel zijn. Ze ondergaan vroeg of laat een spontane transformatie waarbij een vorm van straling vrijkomt. Dit spontane proces wordt omschreven als **radioactief verval**. In het geval van de instabiele isotoop ^{14}C stoot één van de neutronen tijdens dit proces een electron (e^-) en een anti-neutrino ($\bar{\nu}$) uit, en wordt zo een proton. Daardoor transformeert het instabiele koolstofisotoop (met 6 protonen en 8 neutronen in de kern) in een stabiel stikstofisotoop, met 7 protonen en 7 neutronen in de kern.



Bij levende wezens, die koolstof rechtstreeks uit de atmosfeer assimileren of die onrechtstreeks door de inname van voedsel verwerven, bouwt zich een dynamisch evenwicht op tussen de opname van ^{14}C en het radioactief verval ervan. In levende wezens stralen er ^{14}C -isotopen weg maar komen er ook steeds nieuwe bij. En vermits levende wezens hun eigen structuren steeds weer vernieuwen (afbreken en heropbouwen) is het interne gehalte aan ^{14}C in overeenstemming met dat in de atmosfeer. Bij het overlijden van een dier of persoon, of het afsterven van een plant, wordt dit dynamisch evenwicht echter verbroken. Op dat moment blijft het gehalte aan ^{14}C -isotopen in het stoffelijk overschot of de organische resten dalen, door het radioactieve verval, maar komen er geen nieuwe meer bij. Bij het overlijden begint als het ware een interne klok te lopen: de radioactieve isotopen 'tikken weg' en worden niet meer aangevuld.

Nu is de snelheid waarmee het radioactief verval verloopt, constant en gekend. Ze wordt beschreven door een parameter die men de **halfwaardetijd** noemt, de tijd nodig om van alle aanwezige ^{14}C -atomen nog de helft over te houden. De meest accurate bepaling van de halfwaardetijd van ^{14}C -isotopen is 5730 (± 40) jaar. Dit betekent dat na 5730 jaar gemiddeld de helft van de originele hoeveelheid ^{14}C -isotopen is gedesintegreerd. Na nog eens 5730 jaar zal opnieuw gemiddeld de helft van de nog aanwezige onstabiele isotopen vervallen zijn tot stabiele stikstof en blijft er dus slechts een kwart meer over van de originele hoeveelheid ^{14}C (figuur 4).



Tijdens de beginjaren van het onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van radiokoolstof werd de halfwaardetijd wat minder precies bepaald en kwam men tot een waarde van 5568 (± 30) jaar. Aangezien de preciezere bepaling van de halfwaardetijd pas jaren later werd uitgevoerd, en er ondertussen al heel wat radiokoolstofdateringen waren gerapporteerd, heeft men ervoor gekozen toch verder te werken met de oude, minder precieze halfwaardetijd (Stuiver & Polach 1977). Op zich is dit geen groot probleem, aangezien de kalibratiecurves (zie verder) hiermee rekening houden.

FIG 4: Evolutie van het ^{14}C -gehalte in functie van de tijd.

2.5 OUDERDOM BEPALEN

Het bepalen van de ouderdom van een stukje organisch of anorganisch materiaal steunt op het meten van het aandeel aan radioactieve isotopen die (nog) aanwezig zijn in het materiaal. Het meten van de hoeveelheid ^{14}C -isotopen is echter geen sinecure en vereist precisie-instrumenten (want ^{14}C is uitermate zeldzaam, zie eerder). Proportionele gastellers en detectoren op basis van vloeistof-scintillatie waren de eerste toestellen die in staat waren de radioactiviteit van een staal te meten, wat dan een maat was voor het gehalte aan ^{14}C . Vanaf de jaren 1980 bood *Accelerated Mass Spectrometry* (**AMS**) echter de mogelijkheid om in plaats van de radioactiviteit rechtstreeks de verschillende isotopen (^{12}C , ^{13}C en ^{14}C) zelf te tellen, op basis van het verschil in hun massa. Deze techniek is daardoor in staat meteen de verhoudingen $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in het onderzochte staal te bepalen. Momenteel komen vernieuwde en compacte versies van AMS-machines op de markt, bijvoorbeeld de MICADAS (Mini carbon dating system, ^{10}M IONplus) (figuur 5). Deze toestellen laten toe om met grote precisie de verhouding van de verschillende koolstofisotopen te meten voor zeer kleine stalen, in slechts enkele uren tijd. Ze hebben het bijkomend voordeel dat ze veel minder plaats innemen dan de oude AMS-toestellen, minder energie verbruiken, eenvoudiger te bedienen zijn en een beduidend lagere onderhoudskost hebben.



FIG 5: Opstelling van een MICADAS aan het KIK/IRPA te Brussel. (© KIK/IRPA, Brussel)

De radiokoolstofouderdom van een organisch staal wordt steeds gerapporteerd in jaren **BP** (before present). Deze term verwijst naar het aantal jaren voor het arbitraire jaar 0, wat initieel het jaar was waarin de ^{14}C -datering werd uitgevoerd. Al snel werd before present vastgelegd als het aantal jaar vóór 1950 - niet geheel toevallig omdat in december 1949 de eerste wetenschappelijke publicatie met radiokoolstofdateringen verscheen (Arnold & Libby 1949). Sindsdien worden alle ^{14}C -dateringen in BP uitgedrukt. Dat we ondertussen al lang na 1950 zijn wordt bij de rapportage van een datering uiteraard in rekening gebracht.

Om de radiokoolstofouderdom van een stuk organisch materiaal te berekenen, wordt de verhouding van de oorspronkelijke radioactiviteit van het onderzochte materiaal en de gemeten (resterende) radioactiviteit vergeleken met een internationale standaard, die de theoretische radiokoolstof-activiteit van het jaar 0 (= 1950 AD) benadert. Bij AMS-metingen doet men hetzelfde maar met de directe tellingen van de isotopen als maatstaf, in plaats van de radioactiviteit.

Met de huidige meetinstrumenten kan men zelfs bij 50.000 jaar oud materiaal nog de aanwezige ^{14}C detecteren. Bij het dateren van dergelijk oud materiaal (>40.000 BP) moeten we ons bewust zijn dat we op de detectielimiet balanceren en (vooral) dat een uiterst minieme verontreiniging van het onderzochte materiaal (bv. met recentere koolstof) het dateringsresultaat compleet kan verstoren. In nog ouder materiaal is het ^{14}C -gehalte te klein om nog betrouwbaar gemeten te kunnen worden en moet er beroep gedaan worden op andere dateringstechnieken.

2.6 MEETFOUT EN STATISTISCHE ONZEKERHEID

De kwaliteit van een radiokoolstofdatering wordt bepaald door de precisie en accuraatheid van het meetresultaat. Een resultaat is **precies** wanneer herhaalde metingen van een zelfde fenomeen steeds bijna dezelfde uitkomst geven. Een resultaat is **accuraat** als de metingen overeenkomen met de werkelijke waarde (figuur 6).

Beide parameters worden enerzijds bepaald door de meetonzekerheid en anderzijds door de meetfout. De **meetonzekerheid** ontstaat doordat herhaalde metingen van hetzelfde staal steeds verschillende, licht afwijkende waarden zullen geven. Dit is geen meetfout, maar een eigenschap van het radioactieve proces. Deze meetonzekerheid is bij AMS-metingen en radiometrische analyses te beschrijven met een normaalverdelingscurve of Gauss-curve. Men noemt dit ook een **waarschijnlijkheidsverdeling**. De klokvorm van de verdeling wordt bepaald door twee parameters: het gemiddelde (μ) en de standaardafwijking (σ of sigma) op dit gemiddelde. Een radiokoolstofdatering zal daardoor steeds gerapporteerd worden als een gemiddelde waarde, uitgedrukt als de radiokoolstofouderdom van het onderzochte staal in jaren BP, én de onzekerheid op deze ouderdom uitgedrukt door de standaardafwijking ($\pm \sigma$). De grootte van de standaardafwijking bepaalt in grote mate de precisie van de meting. Een grote standaardafwijking betekent een ruimer bereik waarin de werkelijke ouderdom te situeren is. Deze standaardafwijking wordt enkel bepaald door het meetproces, waarin de grootte van het onderzochte staal, de meettijd en de ouderdom van het staal een rol spelen.

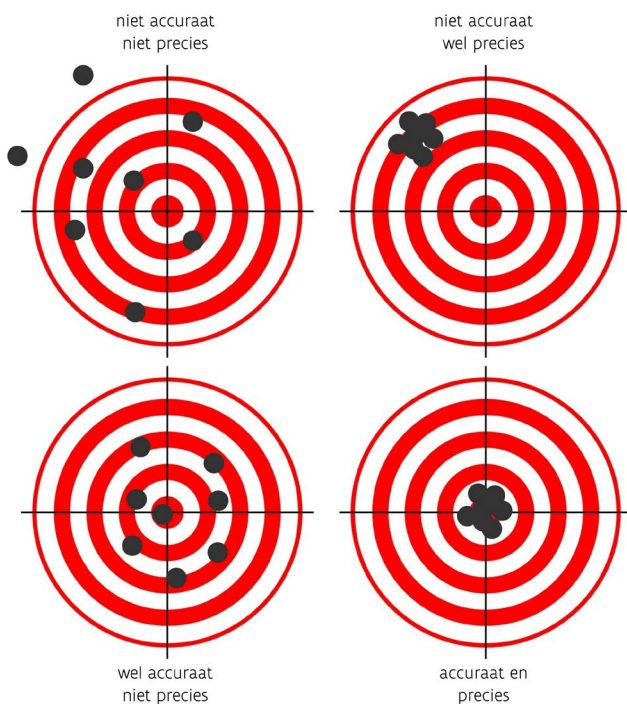


FIG 6: Visuele voorstelling van accuraatheid en precisie, aan de hand van een schietschijf.

De normaalverdeling heeft enkele interessante eigenschappen (figuur 7). Zo kan het wiskundig aangetoond worden dat 68,2% van alle metingen binnen het bereik van $\mu - \sigma$ tot $\mu + \sigma$ zullen liggen. Nemen we dit interval rond het gemiddelde iets ruimer, namelijk 2 x de standaardafwijking langs elke zijde, dan liggen 95,4% van de metingen binnen dit interval. Het komt erop neer dat bij 20 herhaalde metingen op hetzelfde staal, 19 keer de werkelijke ouderdom binnen het 2-sigma interval zal liggen (95 op 100 gevallen). Bijgevolg is dit bij 1 op de 20 meting niet het geval en zal de werkelijke ouderdom dus verder afwijken van de meting. Alhoewel de precieze afbakening van dit 95,4% betrouwbaarheidsinterval geen wiskundige of fysische betekenis heeft, kunnen we intuïtief meestal overweg met deze onzekerheid. Dat wordt duidelijker als we vergelijken met de range van 1 x de standaardafwijking rond het gemiddelde. Dan moeten we er rekening mee houden dat op 20 herhaalde metingen op hetzelfde staal, iets minder dan 14 keer de werkelijke ouderdom binnen het 1-sigma interval zal liggen (68 op 100 gevallen). Met de nauwe range (1-sigma) is de datering strakker omschreven maar de onzekerheid van die inschatting is vrij groot. Met de bredere range (2-sigma) is de datering breder omschreven maar is die inschatting veel betrouwbaarder.

“Een 95,4% betrouwbaarheidsinterval wil zeggen dat bij 20 herhaalde analyses op hetzelfde staal, de gemeten radiokoolstofouderdom 19 keer binnen dat interval zal liggen.”

Daarnaast kunnen **meetfouten** ontstaan door toevallige en systematische fouten in het laboratorium. Men kan deze opsporen door een staal met gekende ouderdom meermaals te meten. Niet-systematische fouten, waarbij een staal de ene keer iets te oud en de andere keer iets te jong dateert, zijn het moeilijkst om in het laboratorium te corrigeren. Daarom gaan de meeste laboratoria hun meetonzekerheid iets verhogen. Met andere woorden verlagen laboratoria hun precisie om rekening te houden met de laboratoriumfouten. Systematische fouten daarentegen beïnvloeden de accuraatheid en moeten absoluut vermeden worden door regelmatig blanco's en stalen met gekende ouderdom te meten en – uiteraard – uiterst nauwgezet te werk te gaan in het laboratorium.

Soms ervaart een onderzoeker die een datering laat uitvoeren een gebrek aan accuraatheid (of een vermoeden daarvan) maar is dit niet de verantwoordelijkheid van het dateringslaboratorium. Een radiokoolstofanalyse dateert immers een materiaal terwijl de erfgoedonderzoeker vooral geïnteresseerd is in de gebeurtenis die geassocieerd is met dit materiaal. Hoe beter beiden bij elkaar aansluiten, hoe accurater de datering van de gebeurtenis zal zijn. Soms is de relatie tussen materiaal en gebeurtenis echter verstoord door fenomenen zoals residualiteit, intrusiviteit en complexe depositiegeschiedenissen (zie 4.5). Een uitgekiende bemonsteringsstrategie en selectie van het meest geschikte materiaal is dan ook van het grootste belang (zie hoofdstuk 4).

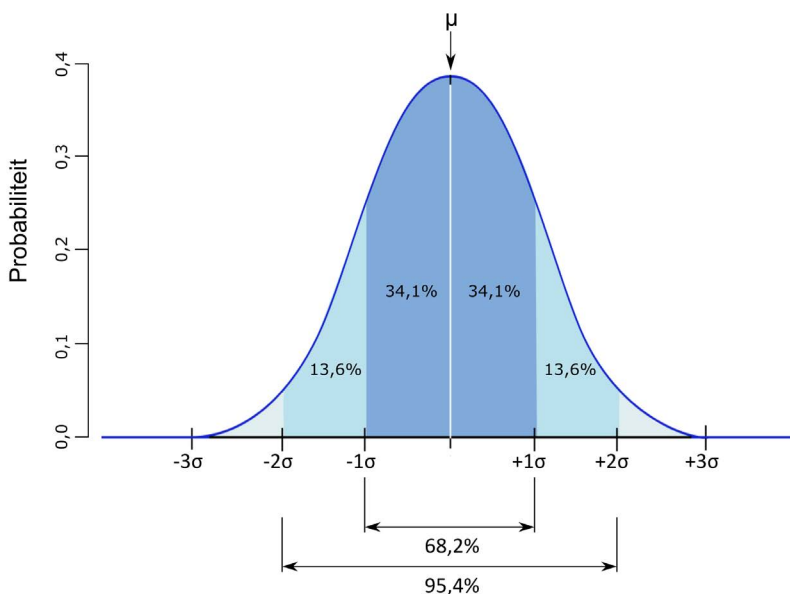


FIG 7: De normaalverdeling met karakteristieke parameters, μ = het gemiddelde en σ = de standaardafwijking.

2.7 ISOTOPENFRACTIONATIE: *SIZE MATTERS*

Meet men de verhouding van koolstofisotopen in de atmosfeer (CO_2) en in planten, dan blijken er in planten verhoudingsgewijs minder zwaardere isotopen (^{13}C en ^{14}C) aanwezig zijn. Er worden dus iets meer lichte isotopen dan zware isotopen opgenomen tijdens de fotosynthese. Daardoor zal in nieuw gevormd plantenmateriaal een kleiner aandeel aan ^{14}C te vinden zijn in vergelijking met de atmosfeer waaruit de koolstof, onder de vorm van CO_2 , werd gehaald. Er treedt dus een kleine verschuiving op in de onderlinge verhouding van de lichtere ^{12}C t.o.v. de zwaardere isotopen ^{13}C en ^{14}C . Dit fenomeen wordt omschreven als **isotopenfractionatie**.

Fractionatie komt voor op elk niveau in de voedselketen (de zogenaamde trofische niveaus). Planten worden gegeten door dier en mens. Tijdens de spijsvertering wordt het plantenmateriaal afgebroken tot kleinere componenten die op hun beurt, via complexe biochemische processen, weer de bouwstenen vormen voor nieuwe, nu dierlijke of menselijke weefsels. Bij deze biochemische reacties treedt opnieuw isotopenfractionatie op, maar nu in de andere richting dan bij de fotosynthese. De zwaardere isotopen zijn deze keer in het voordeel. Deze processen worden per trofisch niveau herhaald en zorgen ervoor dat hoe hoger men zich in de voedselketen bevindt, hoe groter de aanrijking is met zwaardere koolstofisotopen ten opzichte van het plantenmateriaal onderaan de voedselketen. Een toppredator, die kleinere carnivoren eet, die op hun beurt kleine dieren verorberen welke hun voeding uit planten halen, zal verhoudingsgewijs meer zware koolstofisotopen in zich dragen dan een dier onderaan de voedselketen. Aangezien er door dit proces van fractionatie meer ^{14}C in een organisme zal 'ingebouwd' worden, leidt dit tot een schijnbare 'verjonging' in radiokoolstofjaren van het organisme ten opzichte van de verorberde prooien.

De fractionatie wordt gemeten door de verhouding $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ te meten t.o.v. een standaard, en wordt uitgedrukt als $\delta^{13}\text{C}$ (delta- ^{13}C , uitgedrukt in promille, ‰). Het is nu zo dat deze waarde steeds de helft bedraagt van de fractionatie van $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, wat betekent dat als de $\delta^{13}\text{C}$ met een bepaalde waarde verschoven is, de fractionatie van $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dat met een

“Een dier dat hoog in de voedselketen staat, zal verhoudingsgewijs meer zware isotopen – en dus ook ^{14}C – in zich dragen dan een dier onderaan de voedselketen.”

dubbele waarde zal gedaan hebben. Het meten van de $\delta^{13}\text{C}$ laat op die manier toe voor de ^{14}C -metingen een correctie voor de fractionatie uit te voeren. Voor de atmosferische CO_2 is de waarde voor $\delta^{13}\text{C}$ gelijk aan -8‰ (dus een lagere verhouding dan de algemene standaard, die als nulpunt dient). Bij planten kunnen er drie grote groepen onderscheiden worden. De meest voorkomende planten in West Europa volgen een heel gelijkaardig biochemisch proces tijdens de fotosynthese (ze worden C-3 planten genoemd) en hebben daardoor ook gelijkaardige $\delta^{13}\text{C}$ -waarden van ongeveer -23‰. Voor hout en houtskool is de isotopenfractionatie t.o.v. de internationale standaard gelijk aan -25‰. De zogenaamde C-4 planten (zoals maïs, grassen en gierst, die door een ‘alternatieve’ fotosynthese beter droogte kunnen weerstaan) nemen het meest efficiënt de zwaardere isotopen op, wat resulteert in een minder negatieve $\delta^{13}\text{C}$ van -10‰. Indien er geen correctie wordt uitgevoerd om de hierboven beschreven processen te compenseren, kan er een afwijking tot 200 jaar in de radiokoolstofouderdom sluipen.

Het radiokoolstoflaboratorium rapporteert steeds de radiokoolstofouderdom rekening houdend met de isotopenfractionatie. We spreken dan over een **conventionele radiokoolstofdatering**. Het is steeds deze ouderdomsbepaling die moet gekalibreerd worden (zie hoofdstuk 3) om de radiokoolstofouderdom om te zetten in werkelijke kalenderjaren.

2.8 AQUATISCHE SYSTEMEN

Alles wat hierboven beschreven staat, geldt voor terrestrische systemen, elke leefomgeving op het land dus. Voor aquatische systemen (oceanen, zeeën, grote meren, rivieren) is er een belangrijke nuance. Het gehalte aan ^{14}C is in grote watervolumes immers beduidend lager dan in terrestrische systemen. Het relatieve aandeel van radioactieve koolstof die door inspoeling in grote waterbekkens terechtkomt is niet erg groot is. De voornaamste koolstofbron is te situeren aan het wateroppervlak, waar CO_2 met de atmosfeer wordt uitgewisseld. Ook hier treedt fractionatie op, waarna een traag proces start waarbij de opgenomen koolstof zich mengt in de diepere lagen van de oceaan. Die diepere waterlagen hebben dus weinig rechtstreeks contact met de atmosfeer, waardoor dit water schijnbaar ouder is dan het bovenliggende oppervlaktewater en daardoor ook een andere verhouding aan koolstofisotopen heeft. Aangezien water uit de diepzee niet of nauwelijks wordt ‘aangevuld’ met recente koolstof uit de atmosfeer en (in het geval van ^{14}C) het radioactieve verval gewoon doorgaat, zijn er verhoudingsgewijs minder zwaardere koolstofisotopen aanwezig dan in de atmosfeer.

Hetzelfde geldt voor diepere zoetwatermassa's zoals meren. Dit lagere ^{14}C -gehalte in aquatische systemen wordt het **reservoir-effect** genoemd (Alves *et al.* 2018). Organismen die in een aquatische biosfeer leven zullen daardoor vanaf het begin van de voedselketen ook een andere verhouding aan $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ opnemen tijdens hun groei. Het komt er op neer dat de oceanen – en bijgevolg de levende wezens die er in leven en de opgeloste koolstof assimileren – een schijnbaar oudere leeftijd hebben t.o.v. de atmosfeer (zie 6.2). In het reservoir van de Noordzee ligt het ^{14}C -gehalte zodanig laag dat een vandaag gevangen vis schijnbaar al ca. 400 jaar dood is. Toch blijft een radiokoolstofdatering voor aquatisch materiaal – zowel planten als dieren – mogelijk. Daarvoor wordt bij het omrekenen van de conventionele radiokoolstofouderdom naar kalenderjaren (= kalibratie, zie hoofdstuk 3) voor materiaal uit aquatische systemen – of dieren die hun voedsel uitsluitend uit de zee halen – een aangepaste kalibratiecurve gebruikt.

Ook het startpunt om de fractionatie doorheen de voedselketen in rekening te brengen, is lichtjes anders. In **grote meren, zeeën en oceanen** is het in het water opgeloste CO_2 initieel al minder negatief in zijn $\delta^{13}\text{C}$ waarde in vergelijking met wat op het land het geval is (door fractionatie bij de uitwisseling van CO_2 tussen atmosfeer en wateroppervlak). Dat vertaalt zich dan ook doorheen de mariene voedselketen. Schelp- en schaaldieren – die zich onderaan de voedselketen bevinden – hebben $\delta^{13}\text{C}$ waarden van slechts -14‰ tot -12‰, terwijl dit bij de schelpen zelf gemiddeld 0‰ bedraagt (schelpen worden grotendeels opgebouwd met in het water opgeloste koolstofverbindingen). Bij

vissen, en zeker bij vissen die kleinere vissen eten, ligt dit wat hoger (minder negatief). Visetende zoogdieren zoals zehonden staan helemaal bovenaan deze voedselketen en hebben daardoor de hoogste $\delta^{13}\text{C}$ waarden. Het summum is echter een landdier dat andere visetende zoogdieren eet: de ijsbeer. Waterplanten die CO_2 (gedeeltelijk) uit het water halen (met bladeren onder de waterspiegel) hebben sterk variabele ^{13}C -waarden die zowel minder negatief kunnen zijn dan landplanten tot in tegendeel extreem negatief. Wanneer resten van aquatische organismen geda-teerd worden, wordt de meting van de verhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ opnieuw gecorrigeerd via de verhouding $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, en wordt zo een conventionele radiokoolstofouderdom berekend.

“Het lagere ^{14}C -gehalte in oceanen, meren en rivieren wordt het reservoir-effect genoemd.”

2.9 VOEDSEL EN STABIELE ISOTOPEN

Zoals hierboven beschreven, speelt isotopenfractionatie zich af in elk organisme en tussen elk (trofisch) niveau van de voedselketen. Dieren die planten eten (herbivoren) hebben een meer negatieve $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ verhouding in hun lichaam dan vleeseters (carnivoren). Herbivoren hebben m.a.w. relatief minder zware koolstofisotopen in hun weefsels opge-nomen dan carnivoren. Omnivoren zitten daar tussenin.

Ook bij stikstof (chemisch element N) treden er parallele processen op. Stikstof is een veel voorkomend element dat aanwezig is in de lucht en de bodem, en geassimileerd wordt door alle levende wezens. Het kent eveneens een aantal isotopen: naast ^{14}N komt ook de stabiele ^{15}N -isotoop van nature voor. De verhouding van $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ten opzichte van een standaard wordt opnieuw uitgedrukt als $\delta^{15}\text{N}$. Naarmate men zich hoger in de voedselpiramide bevindt, zal men door fractionatie bij de processen van de stofwisseling hogere waarden van deze verhouding meten, dit zowel bij dieren die hun voeding op het land of in zee vinden (figuur 8).

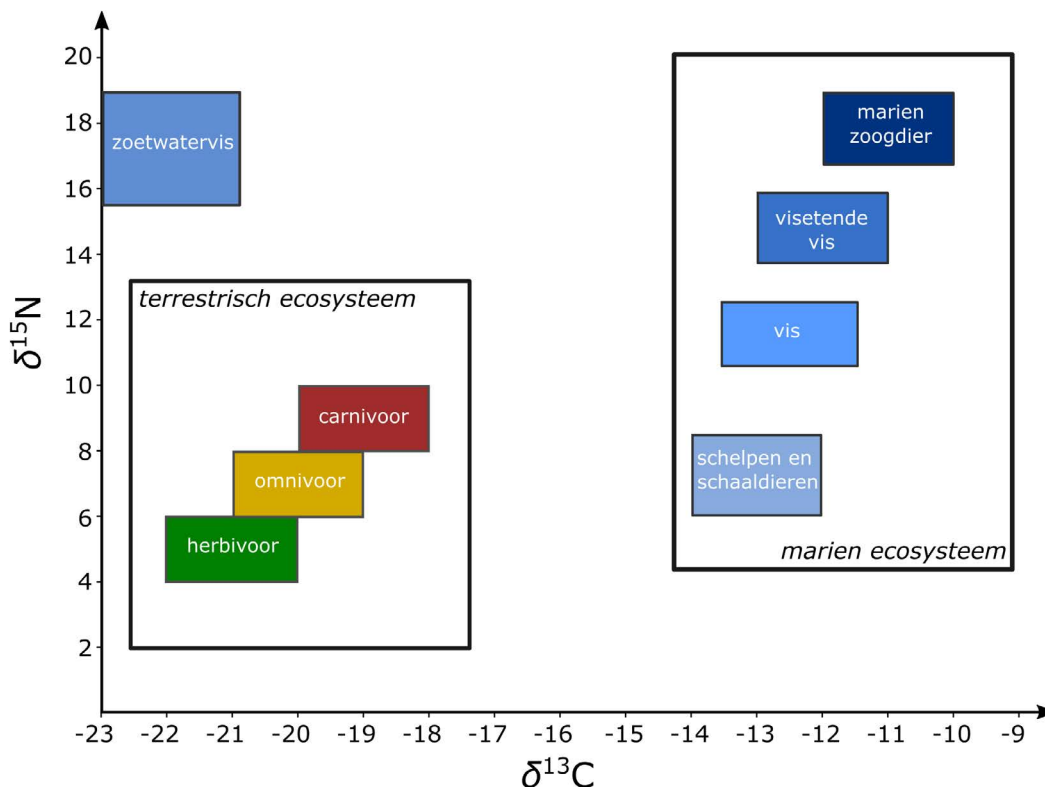


FIG 8: Sterk vereenvoudigde, schematische voorstelling van het effect van isotopenfractionatie voor koolstof en stikstof gemeten in botmateriaal van dieren met een verschillend dieet en plaats in de voedselketen (naar Müldner 2009).

Bij archeologisch onderzoek komt met regelmaat dierlijk en menselijk botmateriaal aan het licht. De organische component van beenderen, het eiwit collageen, leent zich goed voor de analyse van de isotopenverhouding van zowel koolstof als stikstof. De gecombineerde interpretatie van beide elementen kan zo een goed idee geven over het dieet van een dier of mens. De isotopenverhoudingen van koolstof en stikstof in botmateriaal leren dus in welk segment van de voedselketen een dier of zelfs een bepaalde persoon thuishoorde. Dit gegeven zal van belang blijken bij de interpretatie van radiokoolstofdateringen (zie 6.3).

Het klimaat heeft echter ook een belangrijke invloed op de isotopenverhoudingen van zowel koolstof als stikstof. Zo is in gebieden met een hogere gemiddelde temperatuur de verhouding $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in plantenmateriaal iets minder negatief in vergelijking met onze regio. De verhouding tussen ^{15}N - en ^{14}N -stikstofisotopen zal in droge, warme regio's hoger liggen in vergelijking met Noordwest-Europa (Amundson *et al.* 2003). Het terrestrisch model in figuur 8 is dus enkel geldig voor onze regio. In organisch materiaal uit Mediterraan gebied of de Siberische graslanden liggen de isotopenverhoudingen van koolstof en stikstof iets hoger of lager, waardoor het isotopenmodel voor die regio's in blok verschuift. Deze vaststelling kan gebruikt worden binnen het erfgoedonderzoek. Zo werd op basis van de koolstof-isotopenverhouding aangetoond dat hoornpitten van zogenaamde 'longhorn' runderen – gevonden tijdens het archeologisch onderzoek van een postmiddeleeuws leerlooiersite in het historische centrum van Brugge – wel dege-lijjk afkomstig waren van lokaal grootgebrachte runderen, en niet van geïmporteerde dieren uit meer zuidelijke (en dus warmere) gebieden (Ervynck *et al.* 2003).



HOOFDSTUK **3**
KALIBRATIE

De hierboven beschreven methode om de radiokoolstofouderdom te bepalen gaat uit van de veronderstelling dat het ^{14}C -gehalte in de atmosfeer gelijk is gebleven door de eeuwen heen. Dat is echter niet geheel waar. Natuurlijke variaties in het aardmagnetisme en de zonneactiviteit veroorzaken wisselingen in het aardmagnetisch veld, waardoor een steeds wisselende hoeveelheid kosmische straling de atmosfeer binnendringt. Dit heeft tot gevolg dat de concentratie ^{14}C in de atmosfeer nooit geheel constant was (en is). Deze variaties werden in kaart gebracht door het ^{14}C -gehalte te meten in houtstalen met exact gekende ouderdom. Die zijn afkomstig van dendrochronologisch gedateerd hout, waarbij men van elke jaarring weet in welk jaar die werd gevormd (zie de handleiding “Dendrochronologie en erfgoedonderzoek”, Haneca 2017). Door het vergelijken van de gemeten conventionele radiokoolstofouderdom en de werkelijke ouderdom van een jaarring kan voor de afgelopen 14.000 jaar een zogenaamde **kalibratiecurve** worden opgesteld die de relatie tussen beide weergeeft (Reimer *et al.* 2013). Voor oudere periodes is de kalibratiecurve gebaseerd op de datering van organisch materiaal uit jaarlijkse sedimentlaagjes in diepe meren (varven) en op koolstof gehaald uit de aangroeilagen van koralen. De meersedimenten hebben een andere kleur in zomer en winter waardoor ze ook een gelaagdheid tonen waarin de opeenvolgende jaren van elkaar te onderscheiden zijn. Koralen worden gedateerd met andere ‘radiometrische’ methoden dan ^{14}C , waarna de resultaten kunnen vergeleken worden met de ^{14}C -datering. De huidige kalibratiecurve gaat terug in de tijd tot aan de detectielimieten van de meetinstrumenten en zo kan men materiaal tot 50.000 jaar oud kalibreren. Dergelijk oud materiaal betrouwbaar meten blijft echter een uiterst gevoelige en moeilijke opdracht (zie ook 2.5).

De kalibratiecurve laat toe om een radiokoolstofouderdom – gerapporteerd in jaren BP en een standaardafwijking op deze meting – om te rekenen naar een bereik van kalenderjaren, uitgedrukt in jaren BC (vóór het begin van onze jaartelling) of AD (na het begin van onze jaartelling). Dit resulteert meestal in een groter bereik aan mogelijke jaren, in vergelijking met de radiokoolstofouderdom. Dit komt door de doorgaans grillige vorm van de kalibratiecurve en door de foutenmarge op de kalibratiecurve (figuur 9).

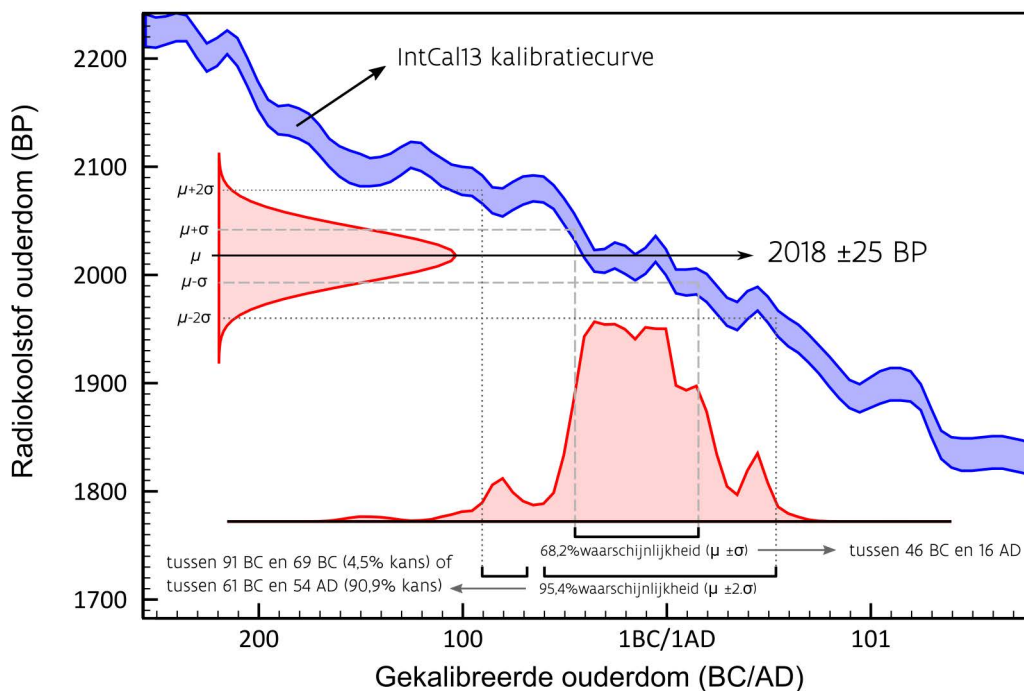


FIG 9: Kalibratie van een radiokoolstof-ouderdom (2018 ± 25 BP).

Op basis van de kalibratiecurve kan ook een grafiek worden opgebouwd die, doorheen de tijd, het verschil weergeeft tussen de conventionele radiokoolstofouderdom en de werkelijke kalenderjaren. Op die grafiek is te zien dat ^{14}C -jaren tot 200 ‘jaar’ te oud zijn tijdens het eerste millennium AD, maar tot 800 jaar te jong in het 5de millennium BC (figuur 10). De relatie tussen de conventionele radiokoolstofouderdom en de werkelijke kalenderjaren is dus niet alleen wisselend van jaar tot jaar maar vertoont ook bredere trends doorheen de tijd.

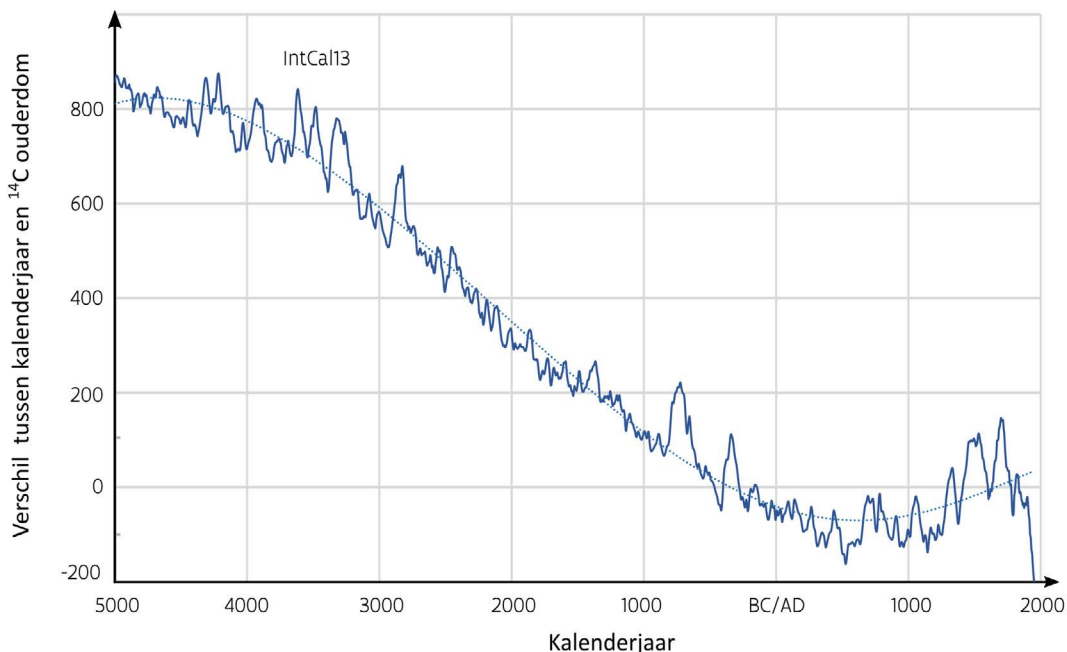


FIG 10: Evolutie van het verschil tussen de kalenderouderdom en de radiokoolstofouderdom tussen 5000 BC en 1950 AD, berekend op basis van de IntCal13 kalibratiecurve.

Zoals eerder aangehaald (zie 2.2), bepaalt de zonneactiviteit voor een groot deel de aanmaak van ^{14}C in onze atmosfeer. Tussen 1645 en 1715 werden door toenmalige astronomen uitzonderlijk weinig zonnevlekken geobserveerd (een periode nu gekend als het 'Maunder-minimum'), wat wijst op een extreem lage zonneactiviteit, wat een verhoogde vorming van ^{14}C in de aardse atmosfeer tot gevolg had. De zonneactiviteit was tijdens de kleine ijstijd (15de-19de eeuw) bovendien al vrij laag. Door deze astronomische fenomenen heeft de kalibratiecurve vanaf 1650 AD een vrij grillig en plateauvormig verloop (figuur 10).

Het meest recente deel van de kalibratiecurve laat zien dat er aan het begin van de 20ste eeuw in de atmosfeer minder ^{14}C aanwezig was dan ooit voorheen. Dit komt omdat vanaf halweg de 19de eeuw de verbranding van fossiele brandstoffen enorm steeg door de industriële revolutie. Fossiele brandstoffen bestaan uit miljoenen jaren oude koolstof, en bevatten dus geen ^{14}C meer. Aangezien deze oude koolstof massaal in de atmosfeer terechtkwam, kregen alle 'deelnemers' aan de koolstofcyclus minder ^{14}C in hun weefsels, en dus een oudere radiokoolstofouderdom.

Vlak na de eerste nucleaire testen en het gebruik van atoombommen in 1945, en vooral tijdens de daaropvolgende wapenwedloop met tal van nucleaire experimenten in de atmosfeer, steeg halweg de 20ste eeuw het gehalte aan ^{14}C in de atmosfeer exponentieel, tot meer dan 100% boven het gemiddelde 'normale' niveau van vóór de postmiddeleeuwse periode (Hua *et al.* 2013). In de noordelijke hemisfeer bereikte het gehalte aan ^{14}C daardoor een piekwaarde in 1963, een fenomeen waarnaar nu wordt verwezen als de 'bomb peak' (figuur 11). In de zuidelijke hemisfeer werd een gelijkaardige piekwaarde geregistreerd in 1965.

Een radiokoolstofanalyse op recent gevormd organisch materiaal wordt niet uitgedrukt als een conventionele ^{14}C ouderdom. Aangezien 1950 als het referentiejaar 0 BP werd vastgelegd, zouden meer recente materialen een negatieve ^{14}C ouderdom moeten krijgen, wat theoretisch uiteraard niet wenselijk is. In dergelijke gevallen wordt daarom niet langer de conventionele ^{14}C ouderdom berekend, maar de *fraction modern carbon* ($F^{14}\text{C}$) of, als percentage uitgedrukt: het *percentage modern carbon* (pMC). Dit is de verhouding van de gemeten ^{14}C -activiteit ten opzichte van de internationaal vastgelegde standaard.

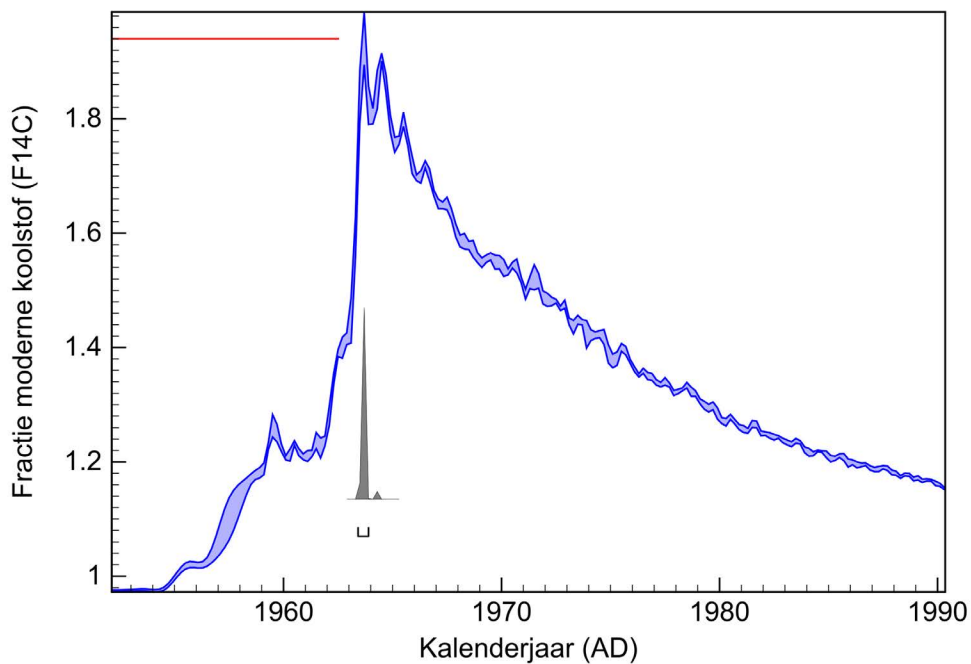


FIG 11: De 'bomb peak' zoals geobserveerd in het noordelijk halfrond, met maximale waarde in 1963, als gevolg van thermonucleaire testen tijdens de wapenwedloop in de jaren '1950 en '1960. De huidige kalibratiecurve voor de periode na 1950 in onze regio is Bomb13NH1 (Hua *et al.* 2013).

Het grillige verloop van de kalibratiecurve in het meest recente, 'postmiddeleeuwse' deel van de chronologie geeft aan dat het quasi onmogelijk is om materiaal daterend van na 1650 AD met enige precisie met de radiokoolstofmethode te dateren. De methode kan echter nog wel gebruikt worden om 20ste-eeuwse vervalsingen van oudere of originele kunstwerken te onderscheiden, maar niet om ze exact te dateren. Dat beperkt de range van de radiokoolstofmethode dus van *ca.* 50.000 jaar geleden tot het midden van de 17de eeuw.



HOOFDSTUK **4**

**ONDERZOEKSVRAGEN
EN -STRATEGIE**

In principe kan alle organisch materiaal gedateerd worden met de radiokoolstoftechniek. Organisch materiaal bevat koolstof en zal dus oorspronkelijk ook een fractie radioactieve koolstof in zich hebben opgeslagen, wat een ouderdomsbepaling mogelijk maakt. Toch zijn er enkele belangrijke beperkingen en aandachtspunten die zowel de materiaalkeuze als de vraagstelling moeten sturen. Dat geldt ook voor anorganisch materiaal, waarbij de keuze al veel beperkter is vermits niet alle anorganische stoffen koolstof bevatten.

De radiokoolstofmethode dateert een materiaal, maar de erfgoedonderzoeker wil de datering van een bepaalde gebeurtenis of activiteit bepalen. Het is dan ook uitermate belangrijk om een innig verband te hebben tussen het dateerbaar materiaal en deze gebeurtenis of activiteit. Binnen het erfgoedonderzoek wordt dit verband afgeleid uit de kennis die men heeft opgebouwd tijdens archeologische bodemingrepen of bouwhistorisch onderzoek. De veronderstellingen (en de onzekerheid hierop) die aan de basis liggen van deze verbanden tussen materiaal en activiteit moeten steeds zorgvuldig en kritisch geanalyseerd worden.

“De radiokoolstofmethode dateert een materiaal.
De erfgoedonderzoeker wil de datering van een
gebeurtenis of activiteit bepalen.”

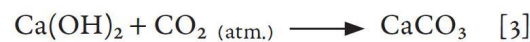
Een staalname en datering van materiaal met een gekende tafonomische achtergrond en een bij de opgravingen of bouwhistorisch onderzoek goed geëvalueerd stratigrafisch verband zal de kenniswinst maximaliseren (Ervynck *et al.* 2015). Rijzen er na de radiokoolstofdatering vragen over de herkomst van het materiaal, het onderlinge verband tussen het staal en het archeologisch spoor of de activiteit die men wil dateren, dan is de uitgevoerde analyse een verkwisting van tijd en middelen. Een adequate staalname en selectie van geschikt materiaal vormt het fundament van de uiteindelijke dateringsresultaten en hun interpretatie (Ashmore 1999).

4.1 WELK MATERIAAL?

Eén van de meest gedateerde materialen is **hout**, zowel in droge, waterverzadigde als verkoelde toestand. Hout is dan ook één van de meest gebruikte grondstoffen doorheen de geschiedenis van de mens. Bovendien vraagt het materiaal slechts een vrij eenvoudige behandeling voorafgaand aan de radiokoolstofdatering (zie 5.4). Andere plantaardige resten, zoals **zaden en vruchten**, zijn eveneens ideaal materiaal om tot een radiokoolstofdatering te komen. Uit pakketten van niet-vergane plantenresten, zoals veenlagen, kunnen zowel bulkstalen als specifieke macroresten (zaden, stukjes hout, ...) voor een datering geselecteerd worden. **Vezels** van plantaardige oorsprong, al dan niet verwerkt in touw, kledij of ander textiel zijn eveneens opgebouwd uit koolstofverbindingen en kunnen dus een datering opleveren.

Beenderen, zowel van dier als mens, bevatten aanzienlijke hoeveelheden koolstof. Indien beendermateriaal in het bodemarchief bewaard is gebleven, bestaat echter de kans dat het botweefsel (recente) koolstof heeft uitgewisseld met in de bodem aanwezige koolstofverbindingen (zoals humuszuren, ...). Een stukje bot dateren kan daardoor een te jonge radiokoolstofdatering opleveren. Om dat te verhopen worden eiwitcomponenten – hoofdzakelijk collageen – uit het botmateriaal geëxtraheerd. Dit collageen is tijdens het ‘verblijf in de bodem’ niet geneigd om meer recente koolstof in te bouwen en vormt zo een betrouwbare bron van oude koolstof voor de radiokoolstofanalyse. Bij **crematies** kunnen stukken witverbrand bot ook een datering opleveren. Hier is in regel geen collageen meer aanwezig, en moet men noodgedwongen een ander bestanddeel – in dit geval het anorganische apatiet – afzonderen en dateren. Apatiet is een mineraal waarin ook koolstof kan opgenomen zijn. Ook **tanden, hoorn** en **haar** zijn geschikt materiaal voor een radiokoolstofdatering. Hoorn en haar zijn opgebouwd uit keratine, een eiwit dat als bron voor de koolstofdatering kan worden gebruikt. Bij tanden kan koolstof worden gehaald uit de verschillende delen: email, dentine en cementum. Gelooid **huid** die tot leer werd verwerkt, of ruwe huid die onder droge of extreem natte omstandigheden bewaard is gebleven, kan eveneens bemonsterd worden voor een radiokoolstofanalyse.

Voor de bouw van historische gebouwen werden doorgaans niet-hydraulische of slechts gedeeltelijk hydraulische **mortels** gebruikt als bindmiddel tussen de natuur- of bakstenen bouwelementen (Van Baelen *et al.* 2003). Niet-hydraulische (kalk)mortel hardt uit door blootstelling aan de lucht, de hydraulische variant wordt hard door reactie met nevenbestanddelen zoals klei, kalk en water. In principe wordt een niet-hydraulische kalkmortel als volgt bereid (figuur 12). Kalksteen of schelpen, al dan niet tot poeder vermalen, worden op hoge temperatuur gebracht waardoor het calciumcarbonaat (CaCO_3) ontbindt tot calciumoxide (CaO) of ongebluste kalk, en CO_2 (reactie 1). Aan de ongebluste kalk wordt water (H_2O) toegevoegd zodat calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) of gebluste kalk ontstaat (reactie 2). Die wordt vermengd met een vulmiddel (zoals bv. zand) waardoor men mortel bekomt. Na het metselen zal de gebluste kalk zich binden met koolstofdioxide uit de lucht en opnieuw calciumcarbonaat vormen (reactie 3). Dit calciumcarbonaat vormt uiteindelijk de uitgeharde mortel tussen de natuur- of bakstenen.



Uit reactie 3 blijkt duidelijk dat er rechtstreeks CO_2 uit de lucht wordt ingebouwd in de calciumcarbonaatmoleculen, terwijl de originele, 'oude' CO_2 tijdens het verhitten (reactie 1) is uitgestoten. De ^{14}C -concentratie in de mortel weerspiegelt met andere woorden de ^{14}C -concentratie van de atmosfeer ten tijde van de bouw van het metselwerk. Na deze reactie gaat het radioactieve verval van de koolstofisotopen verder zijn gang terwijl er geen uitwisseling meer is met de atmosfeer en de ^{14}C dus niet wordt aangevuld. In principe is mortel dus even goed te dateren met de radio-koolstofmethode als een stuk hout of een dierlijk of menselijk bot.

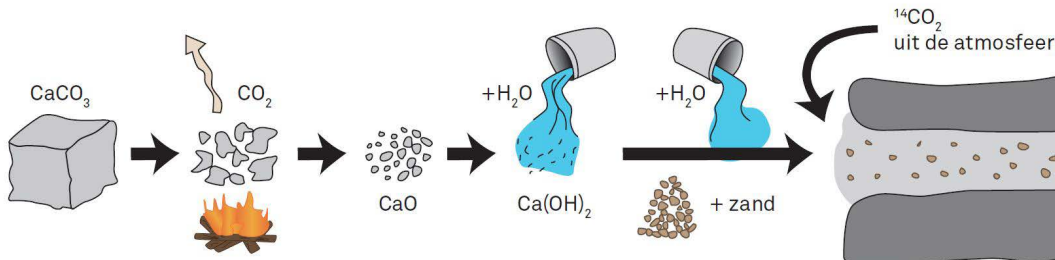


FIG 12: Proces van aanmaak en toepassing van een hydraulische kalkmortel (naar Heinemeier *et al.* 2010).

Soms wordt ervoor geopteerd om niet zozeer de mortel op zich te dateren, maar partikels **houtschool** ingesloten in de mortel. Men gaat er dan van uit dat die afkomstig zijn van het vuur waarin de kalksteen of de schelpen werden gebrand om ongebluste kalk te bekomen. Er zijn echter scenario's denkbaar die deze veronderstelling kunnen ondergraven en die aldus een te oude datering opleveren. Zo kan houtschool eeuwenlang in de (zand)bodem bewaard blijven en tijdens het mengen van de mortel met zand in de mortel terecht komen. Soms is het afkomstig van gerecycleerd (en dus ouder) hout dat gebruik werd als brandstof bij het verhitten van de kalksteen. Om nog maar te zwijgen over een mogelijk 'oud-houteffect' (zie 4.4). Een extreme vorm van contaminatie kan optreden wanneer steenkool is gebruikt om de kalk te branden. Kleine partikels van deze fossiele brandstof kunnen in de mortel zijn opgenomen en zien er op het eerste gezicht uit als archeologische houtschool.

Een aantal andere, niet-organische materialen worden onder bepaalde omstandigheden ook aanzien als betrouwbare bron van oude, te dateren koolstof, al is dit dikwijls nog onderzoek in een experimenteel stadium. Zo kon loodcarbonaat uit de vermeende grafkist van Sint-Idesbald gedateerd worden en werd bevestigd dat de menselijke resten niet van deze heilige konden komen. Het loodcarbonaat ontstond tijdens de ontbinding van het begraven menselijke lichaam, waarbij methaan (CH_4) en koolstofdioxide (CO_2) uit de menselijke resten vrijkomen, die op hun beurt reageerden met de loden grafkist. De koolstof in het loodcarbonaat is dus afkomstig van het lichaam van de overledene en aldus een geschikte bron om het overlijden van deze persoon te dateren (Van Strydonck *et al.* 2016).

Daarnaast vinden we loodcarbonaat soms terug in zalfpotjes of andere toiletartikelen: dit product heeft in poedervorm een bleke kleur welke in het oude Egypte al werd gebruikt als cosmetica. Tijdens het productieproces van dit gegeerde poeder wordt koolstof uit de atmosfeer in het loodcarbonaat vastgelegd, wat nu – met een aangepast laboratoriumprotocol – een radiokoolstofdatering mogelijk maakt (Beck *et al.* 2018). Ook de koolstof gevangen in ijzer kan een datering van het smeltproces opleveren, op voorwaarde dat geen steenkool werd gebruikt, maar houtskool als brandstof (Cook *et al.* 2003). Steenkool bevat immers geen ^{14}C meer door het eeuwenlange radioactief verval, waardoor een veel te oude datering zou bekomen worden.

4.2 SELECTIE VAN GESCHIKT MATERIAAL

Indien men een gebeurtenis in het verleden, zoals bijvoorbeeld de vulling van een archeologisch spoor, chronologisch wil plaatsen, stelt zich – bij geschikte bewaringsomstandigheden – allereerst de keuze van het te dateren materiaal (het soort en type van vondst). **Zaden en vruchten** dienen zich dikwijls aan als ideaal materiaal om vondsten, sporen of structuren te dateren. Ze komen in het bodemarchief zowel voor **in verkoolde als onverkoolde vorm** en zijn kortlevende structuren, dus niet onderhevig aan een oud-houteffect (zie verder, 4.3). Belangrijk is wel om terrestrische soorten uit te kiezen, zo vermijdt men het aquatisch reservoir-effect (zie 2.8).

Ook **houtskool** en hout zijn zeer geschikt dateringsmateriaal maar kunnen onderhevig zijn aan een oud-houteffect (zie 4.3). Dieren- en mensenresten laten zich eveneens goed dateren maar bij crematies kunnen complicerende factoren optreden (zie 4.4). Resten van **aquatische dieren** worden best uitgesloten, vanwege het moeilijk te bepalen reservoir-effect, en dat geldt ook voor de resten van dieren die aquatische organismen tot voedsel nemen. Om die reden kan ook het dieet van vroegere mensen het dateren van hun resten bemoeilijken (zie 2.9). Het botmateriaal van grazende dieren (met een dieet van louter terrestrische planten) is daarom beter geschikt materiaal.

Wanneer **mensenresten** worden gedateerd, vormen deze van jong gestorven personen een wat meer betrouwbare keuze dan deze van oudere individuen. Tijdens het leven gaat de op- en afbouw van weefsels steeds weer door (= remodeleren) waardoor het ^{14}C -gehalte in een lichaam hetzelfde blijft als in de atmosfeer. Een skeletdeel van een jong gestorven persoon dateren zal daardoor een goede benadering geven voor het tijdstip van overlijden. Bij oudere mensen verloopt deze remodelering echter niet meer zo vlot, waardoor in hun skelet steeds meer 'oude' koolstof blijft zitten. Indien men botmateriaal dateert van een persoon die ouder was dan 60 jaar op het moment van overlijden, zal er tussen de radiokoolstofdateringen en het tijdstip van overlijden een verschil van ca. 30 jaar optreden (Ubelaker *et al.* 2015). Bij huisdieren die voor de vleesvoorziening worden gebruikt, stelt dit probleem van remodelering zich nauwelijks omdat zij toch op vrij jonge leeftijd worden geslacht.

In veel gevallen lijkt een datering op zaden en vruchten, of jong houtig materiaal (vanwege het oud-houteffect, zie 4.4) een goede keuze. Men dient er zich wel steeds van bewust te zijn dat **verkoold** materiaal inert is tegen biologische degradatie en honderden, zelfs duizenden jaren in het bodemarchief aanwezig kan zijn zonder te vergaan. Mogelijk zijn verkoolde zaden en vruchten of kleine partikels houtskool in het bodemarchief dus residueel (zie ook 4.5). Ook gecremeerd menselijk of dierlijk botmateriaal kan trouwens lang in de bodem bewaard blijven en als residuele vondst in archeologische sporen opduiken. Indien men echter zeker is dat het verkoolde materiaal niet residueel is of men net het branden van houtskool, een crematieproces of een brand wil dateren, is het uiteraard wel geschikt om die gebeurtenis te dateren. In bodemomstandigheden waarin onverkoolde planten- of dierenmateriaal in regel niet bewaart (zoals droge zand- of leembodems) maar dit toch aanwezig is, is de kans groot dat het om recente, intrusieve resten gaat. In die gevallen is een datering van het onverkoolde materiaal zinloos en vormen de verkoolde resten een betere optie.

Aardewerk op zich is niet via radiokoolstof te dateren, maar aan de binnenzijde van een pot, pan of kruik heeft zich soms een korst van etensresten opgebouwd. Aangezien die etensresten rechtstreeks gelinkt zijn aan het gebruik van het recipiënt, kan een radiokoolstofdatering op dat organisch materiaal wel een betrouwbare datering voor het gebruiksvoorwerp opleveren. Een meer doorgedreven residu-analyse kan bijkomend nog details onthullen over de inhoud van het recipiënt, wat soms nodig is om een reservoir-effect uit te sluiten (zie 2.8).

4.3 DATERINGSSTRATEGIE

De selectie van het te dateren materiaal hangt in grote mate samen met de onderzoeksvraag. Eerst moet men 'scherpstellen' welke gebeurtenis men wil dateren. Daarna kan men op zoek naar het meest geschikte materiaal. Bij archeologisch dateringsonderzoek moet de vraagstelling dus steeds duidelijk geformuleerd worden. Als een vondst uit een spoor wordt gedateerd, wil men dan de ouderdom te weten komen van de vondst op zich (ongeacht zijn mogelijk residuele of intrusieve aard) of wil men via de datering van de vondst weten uit welke tijd het spoor stamt? En gaat in het laatste geval de interesse dan naar de aanleg van het spoor, naar het gebruik of naar de opgave?

Als bij een archeologisch terreinonderzoek een kistbegrafing wordt aangetroffen kan men zowel het menselijk skeletmateriaal als het hout van de kist dateren. Zowel bot als hout zijn immers opgebouwd met koolstof. Met het botmateriaal dateer je het overlijden van de persoon in kwestie, met het hout dateer je het kappen van de boom waaruit de planken voor de kist gezaagd zijn. Vermoedelijk is men eerder geïnteresseerd in het eerste. De radiokoolstofdatering van de kist kan echter wel overwogen worden indien het botmateriaal te sterk gedegradieerd is.

Dezelfde vraag stelt zich bijvoorbeeld bij het archeologisch onderzoek van een houten waterput (Debruyne *et al.* 2013). Wil men de aanleg dateren, dan is het materiaal waarmee de bekisting is uitgevoerd waarschijnlijk het meest geschikt om te dateren. Indien een dendrochronologische analyse geen uitsluitsel kon geven, kan een radiokoolstofdatering op een stuk spinhout van de planken van de bekisting overwogen worden (wanneer die niet uit hergebruikt hout is samengesteld). Ook kleinere stukjes van twijgen (jong hout) waarmee grotere onderdelen aan elkaar vast zijn gemaakt, vormen geschikt materiaal om de aanleg te helpen dateren. Eventueel kan ook materiaal uit de aanlegkuil hiervoor in aanmerking komen, al dient men er zich bewust van te zijn dat in de aanlegkuil dikwijls **residueel materiaal** is beland, dat bovendien een vermenging kan zijn van vondsten met uiteenlopende dateringen. Het gebruik van de waterput zal eerder te dateren vallen door materiaal uit de bezinkingslaag te dateren, tot stand gekomen uit toevallig in de put gedwarfeld materiaal. Dat is tenminste zo indien het niet om herwerkt, residueel materiaal gaat, dat vanuit oudere archeologische contexten in de vulling is terechtgekomen. Aangezien een waterput (normaal gezien) regelmatig werd geruimd, zullen niet-residuele vondsten uit de gebruiksfase vooral uit klein materiaal bestaan (zaden, vruchten, kleine dierenresten, kleine artefacten,...). Dit materiaal kan via een radiokoolstofanalyse gedateerd worden. Een rituele depositie onderin de schachtvulling maar bovenaan het sediment uit de gebruiksfase kan een datering geven voor de opgave van de structuur, en aldus ook een schatting geven van hoe lang de put in gebruik is geweest, indien de aanleg goed gedateerd kon worden. Het materiaal afgezet na de (soms rituele) opgave van de put moet, wat de datering betreft, opgesplitst worden in natuurlijke afzettingen die in de schacht belandden (omdat die als een val voor dieren en plantenresten werkte) en door de mens aangebracht afval of andere afzettingen. Bij die laatste antropogene deposities kan steeds residueel materiaal zitten, wat het risico oplevert voor een te oude datering voor het tijdstip van opgave. De sterkte van de analyse zit steeds in het in verband brengen van de dateringen van verschillende structurelementen, en een goede tafonomische en stratigrafische analyse.

Een voorbeeld van hoe de interactie tussen ¹⁴C-analyses en dendrochronologische dateringen de interpretatie van bepaalde structuren of gebruiksfasen kan scherper stellen, wordt geleverd door de archeologische site Kluizenmolen (Sint-Gillis-Waas) waar in 2010 een waterput dendrochronologisch werd gedateerd, met een veldatum die te situeren is tussen 52 en 61 AD. Uit diezelfde waterput werd ook een takje uit de organische basisvulling gedateerd met de radiokoolstofmethode. Dit leverde een datering op van 2001 ± 31 BP (RICH-20248), wat gekalibreerd met 95,4% probabilliteit een datering tussen 88 BC en 76 BC (1,6%) of 56 BC en 72 AD (93,8%) oplevert. Koppelen we dit terug met de dendrochronologische datering, en nemen we aan dat de organische opvulling zich pas begon te vormen na de opgave van de waterput, dan is de kans groot dat deze maximaal 11 tot 20 jaar in gebruik geweest (figuur 13). De combinatie van beide dateringstechnieken laat toe om tot een meer diepgaande interpretatie te komen. Al gaan we er wel vanuit dat het gedateerde takje niet residueel is.

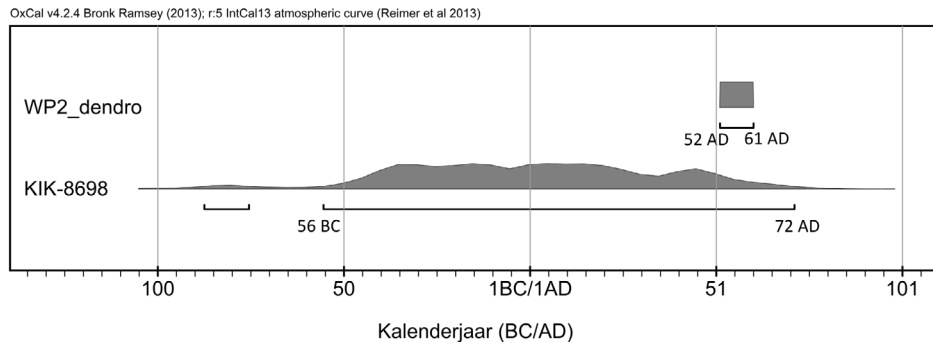


FIG 13: De dendrochronologische datering van de Romeinse waterput WP2 van de site Kluizenmolen en de gekalibreerde radiokoolstofdatering van een takje uit de organische vulling van de waterput. Daaruit valt af te leiden dat deze waterput maximaal 11 tot 20 jaar in gebruik was, als we aannemen dat de organische opvulling pas startte na opgave van de waterput.

Bij **bouwhistorisch onderzoek** is het soms wat zoeken naar geschikt materiaal om te dateren. Kalkmortel is daar vaak een mogelijke bron van 'oude' koolstof, en is meteen ook rechtstreeks in verband te brengen met een historische activiteit: het metselen van muurwerk (Hajdas *et al.* 2017, Heinemeier *et al.* 2010). Historische kapconstructies – die vaak een nauw verband vertonen met het muurwerk of een bepaalde bouwfase – zijn samengesteld uit tientallen stukken bouwhout. Indien op een keper, balk of plank nog spinhout (zie 4.4) aanwezig is, kan de radiokoolstofdatering van zo'n stuk bouwhout een uitstekende datering opleveren voor het kappen van de bomen waaruit die balken werden gezaagd (als dendrochronologisch onderzoek geen uitkomst biedt). Al dient men rekening te houden met de beoogde vraagstelling en precisie (zie verder, 4.6). Soms zitten interessante stukken organisch materiaal wat beter verstopt, of worden ze niet meteen opgemerkt. Houten stelwiggen, die onder een kolom of sokkel werden aangebracht bij de opbouw van een natuurstenen constructie, zijn daar een voorbeeld van (figuur 14).



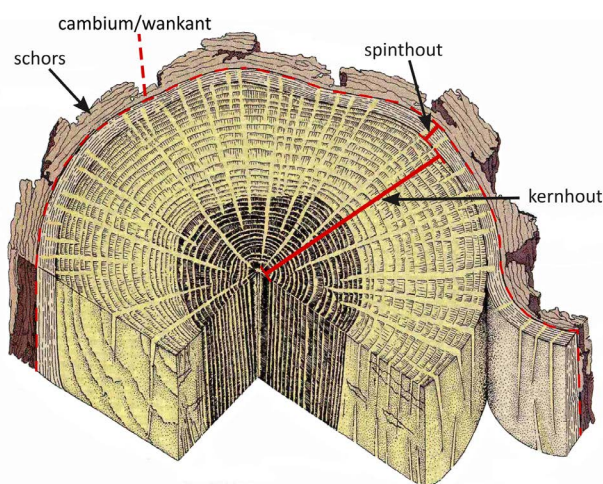
FIG 14: Stelwiggen tussen de sokkels en de schachten van de colonnetten van het triforium van het zuidtransept en het schip in de O.L.V.-basiliek van Tongeren. Deze wigvormige stukjes hout werden geselecteerd voor een ^{14}C -datering aangezien ze rechtstreeks in verband staan met de bouw van het triforium.

Tot slot een bedenking die eigenlijk bij aanvang moet gemaakt worden: zijn er reeds andere bronnen gekend die een scherpe datering opleveren en is een radiokoolstofdatering dus wel nodig? Indien een archeologische context al scherp gedateerd is door het aanwezige aardewerk (in sommige culturele perioden kan dit), kan een radiokoolstofdatering waarschijnlijk weinig (of geen) extra informatie opleveren. Zeker als men bedenkt dat een gekalibreerde radiokoolstofdatering met 95% statistische zekerheid meestal een bereik heeft dat al vlug 80 tot 100 jaar omvat. In meerdere culturele perioden kan het aardewerk nauwer gedateerd worden. Een radiokoolstofdatering is wellicht ook niet nodig indien een spoor gedateerd is door muntvondsten of een historische omkadering kent (althoewel historische bronnen altijd kritisch moeten bekeken worden). Hout dat dendrochronologisch kan gedateerd worden behoeft natuurlijk ook geen radiokoolstofanalyse. Het is aangeraden bij dergelijke afwegingen ook steeds de kalibratiecurve te bekijken, gezien de verwachte precisie na kalibratie sterk per periode kan verschillen (zie verder, 4.6).

Natuurlijk kan het binnen een spoor toch nuttig zijn een ^{14}C -datering van bepaalde vondstcategorieën te confronteren met de dateringen (cultureel, historisch of radiometrisch) van andere types van vondsten, bijvoorbeeld wanneer er een vermoeden is van tafonomische vermenging binnen het vondstensemble. Het kan dan gaan om residuele of intrusieve objecten (zie 4.5), of in het algemeen om vondstensembles van gemengde oorsprong.

4.4 OUD-HOUTEFFECT

Het oud-houteffect wordt tegenwoordig als een soort containerbegrip gebruikt voor alles wat mis kan gaan bij het dateren van hout en houtskool uit archeologische, bouwhistorische en museale contexten. In oorsprong verwijst het naar de problemen die kunnen opduiken bij het dateren van **kernhout**. Kernhout is het dode houtweefsel waarin geen actief transport van water en voedingsstoffen meer kan plaatsvinden. Het bevindt zich in het centrale gedeelte van een stam en wordt omgeven door het **spinhout**, dat aan de buitenzijde van de stam gelegen is, net onder de schors (zie figuur 15 en Haneca 2017 voor meer detail). Bij een levende boom wordt elk jaar een nieuw laagje hout gevormd vanuit een weefsellaag (het cambium) die zich net onder de schors bevindt. Het 'jongste', meest recent gevormd hout situeert zich dus aan de buitenzijde van een stam. Naarmate de boom ouder wordt, zal zich een steeds groter leeftijdsverschil opbouwen tussen de meest recent gevormde jaarring aan de buitenzijde van de stam en het centrale gedeelte van een boom, dat enkel uit dood houtweefsel bestaat. Aangezien sommige bomen wel honderden jaren oud kunnen worden, kan de datering van een stuk kernhout (dat dus mogelijk werd gevormd toen een eeuwenoude boom nog maar enkele jaren oud was) een sterk vertekend beeld opleveren van het kappen van die boom (meestal de gebeurtenis die men wil dateren). Een radiokoolstofdatering van een stuk kernhout is daardoor slechts te interpreteren als een *post quem*-datering, en ligt mogelijk vele decennia ver verwijderd van de werkelijke kapdatum.



Om terug te keren naar het voorbeeld van de waterput, blijkt het dus belangrijk zich te realiseren dat een exacte datering van de aanleg van de put (zowel via dendrochronologie als radiokoolstofdatering) enkel mogelijk wordt wanneer het jongste hout van de gekapte en gebruikte bomen of takken aanwezig is: spinhout dus, al dan niet met schors. Indien er geen spinhout (met schors) meer aanwezig is op het constructiehout, levert een datering enkel een *terminus post quem* op voor de aanleg van de waterput.

Dit oud-houteffect kan voor een deel omzeild worden door een aantal vuistregels in acht te nemen:

FIG 15: Doorsnede van een eikenhouten stam.

- Dateer enkel stukken hout waaraan nog schors vast zit. Het hout net onder de schors is het ideale materiaal om het vellen van die boom (en dus het stuk hout dat uit de stam werd gehaald) te dateren.
- Indien geen schors aanwezig is, kan spinhout gedateerd worden. De aanwezigheid van spinhout betekent immers dat slechts een beperkt aantal jaarringen ontbreekt tot aan de schors of laatste gevormde jaarring voor het kappen van die boom.
- Dunne takjes of twijgen zijn voor een datering interessanter dan grote stukken hout (zonder schors of spint). Aan takjes en twijgen zit dikwijls wel nog de schors en ze zijn opgebouwd uit hout dat in slechts één of een beperkt aantal jaren werd gevormd.
- Indien enkel stukken hout voorhanden zijn waar geen schors meer aan vasthangt, wordt best een selectie gemaakt op basis van de houtsoort. Hout van relatief kortlevende bomen en struiken (zoals hazelaar, wilg, els,...) krijgt dan de voorkeur op langlevende soorten zoals eik en beuk. Bij die laatste groep is het risico op een aanzienlijk oud-houteffect beduidend hoger. Hout of houtskool moet dus eerst op soort worden gebracht (gedetermineerd) vooraleer het als radiokoolstofstaal te gebruiken.

Schors op zich kan ook onderhevig zijn aan een oud-houteffect. Het is immers houtweefsel dat zich heeft opgebouwd doorheen de levensloop van een groeiende boom. In tegenstelling tot het hout bevindt het oudste materiaal zich aan de buitenzijde van de schors. Bij dunne takken stelt zich dit probleem niet, aangezien daar de schors eveneens nog dun is en zich heeft opgebouwd over een beperkt aantal jaren.

Daarnaast wordt de term oud-houteffect ook soms aangehaald indien er sprake is van **hergebruik** van ouder bouw hout. De datering van hergebruikt, ouder materiaal zal uiteraard geen verband houden met de gebeurtenis die men wil dateren, maar een (veel) oudere uitkomst opleveren. Een goede inspectie en selectie van het beschikbare materiaal kan ervoor zorgen dat hergebruikt bouw hout tijdig wordt herkend (bv. door de aanwezigheid van niet-functionele verbindingen, bewerkingssporen of een sterk afwijkende vorm t.o.v. het andere hout uit dezelfde collectie).

Hiermee verwant is het gebruik van hout van bomen die op dat ogenblik al een tijd dood waren. Soms stonden die nog recht, soms gaat het om gevallen exemplaren maar in beide gevallen kan de sterfdatum van de boom beduidend ouder zijn dan de datum van het gebruik van het hout. De impact van deze praktijk valt helaas heel moeilijk te detecteren.

Tot slot kan er ook een oud-houteffect optreden bij **crematies**, waar (oud) hout wordt gebruikt op de brandstapel. Indien men een wat oudere boomstam of tak als brandhout gebruikt bij een crematieritueel komt alle opgeslagen koolstof onder de vorm van CO₂ vrij bij het aanmaken van de brandstapel. De stoffelijke resten van de overledene worden tijdens dit ritueel verbrand en de botten ondergaan een crematieproces. Tijdens deze crematie wordt er uiteindelijk ook CO₂ opgenomen uit de omgevende atmosfeer en ingebouwd in het gecremeerde bot (Olson *et al.* 2013; Snoeck *et al.* 2014; Van Strydonck *et al.* 2010). Op de brandstapel bestaat die atmosfeer echter voor een groot deel uit CO₂ die is vrijgekomen tijdens het verbranden van het hout. Het 'oudere' hout uit het centrum van een stam kan aldus een verouderend effect hebben op het gecremeerde botmateriaal. De bekomen dateringen kunnen daardoor te oud uitvallen.

4.5 RESIDUEEL EN INTRUSIEF MATERIAAL

Het organisch materiaal dat men aantreft tijdens archeologisch onderzoek is niet altijd rechtstreeks in verband te brengen met de gebeurtenis die men wil dateren. Stukjes gecremeerd bot, houtskool, zaden of ander klein botanisch materiaal kunnen reeds lang voor een bewoningsfase al in het bodemarchief aanwezig zijn, of later, na opgave van een site, ingespoeld raken in de archeologische sporen. Zelfs niet-verbrand botmateriaal dat niet binnen een archeologisch spoor of duidelijke stratigrafie wordt aangetroffen, kan evengoed al eeuwenlang rondslingeren in het bodemarchief. Indien dergelijk materiaal wordt geselecteerd voor een radiokoolstofanalyse zal dit onvermijdelijk leiden tot een foutieve interpretatie van de te dateren gebeurtenis. De bekomen datering kan dan moeilijk in verband gebracht worden met de sporen die men wil dateren.

Interpretatieproblemen treden vaak op bij het dateren van gebouwplattegronden op basis van de houtskool aangetroffen in paalgaten (nog los van het oud-houteffect). De houtskool kan net als ander verkoold materiaal eeuwenlang circuleren in de bodem. Daarom moet men rekening houden met het feit dat stukjes houtskool niet noodzakelijk verband houden met het te dateren archeologisch spoor. Ze kunnen als residueel materiaal in het paalgat terechtgekomen zijn, bij de aanleg of de uitbraak van de structuur. Evengoed kunnen ze intrusief zijn, en in het archeologisch spoor terechtgekomen zijn als nazakking op de plaats van een uitgebroken paal. Zelden is in paalsporen nog materiaal aanwezig dat rechtstreeks aan de aanleg van het verdwenen gebouw gerelateerd is.

Bij het selecteren van geschikt materiaal uit Mesolitische haardkuilen, komen dikwijls verkoold stukjes schil van hazelnoten in het vizier. Tijdens het Mesolithicum vormden geroosterde hazelnoten een belangrijk deel van het dieet van de lokale jager-verzamelaars. Het frequent roosteren van hazelnoten heeft er echter voor gezorgd dat vele verkoold schillen in de bovenste bodemlaag werden opgenomen. Indien later een haardkuil werd gemaakt op dezelfde kampplaats, kunnen deze verdwaalde stukjes makkelijk in deze kuil herwerkt raken. Dit werd meermaals aangetoond in een vindplaats te Verrebroek waar stukjes houtskool een veel betrouwbaardere datering gaven voor de haardkuilen dan de daarin gevonden (veel oudere) stukjes verkoold hazelnootschil (Van Strydonck *et al.* 2001).

Vermijd in het algemeen om hout of houtskool te dateren van soorten die niet langer (bv. grove den, *Pinus sylvestris*, in de Romeinse periode) of uiterst zeldzaam (bv. venijnboom, *Taxus baccata*) in de regio voorkwamen op het moment dat het materiaal deel werd van een archeologisch spoor. Zo werden in een Romeins brandrestengraf op de site Hoge Dijken te Jabbeke verkoold stukjes grove den gevonden. De datering van een stukje houtskool leerde al

snel dat het inderdaad residueel materiaal betrof met een gekalibreerde ouderdom tussen 7480 en 7130 BC (Deforce 2009). Dit toont nogmaals aan dat verkoold hout eeuwenlang in de bodem kan achterblijven.

Een ander voorbeeld is het **gebruik van (sub)fossiel hout** uit oude veenlagen als bouwhout. Net over de landsgrens, in Ellewoutsdijk (NL), werden houten huizen uit de Romeinse periode ontdekt. De eikenhouten palen konden via dendrochronologisch onderzoek gedateerd worden in de 1ste en 2de eeuw AD. De minstens 7 tot 8 m lange middenstaanders of dakdragende palen van de huizen bleken gemaakt van grove den (*Pinus sylvestris*, zogenaamd grenenhout), een boomsoort die tijdens de Romeinse periode vermoedelijk niet meer in onze regio voorkwam. Daarnaast waren voor de huizenbouw ook talrijke, knoestige palen van *Taxus* gebruikt. Na radiokoolstofdatering van zowel het grenenhout als de *Taxus* bleken deze houten onderdelen tot 5500 jaar oud te zijn. Ze werden door de lokale Romeinse bevolking uit het veen getrokken, met metalen bijlen bewerkt en gerecycleerd als bouwhout (Van Rijn 2003).

Daarnaast kan er ook een ‘aanrijking’ met recentere koolstof optreden van organisch materiaal uit archeologische contexten. Een goed voorbeeld van een dergelijke, ongewenste ‘vervuiling’ is de aanwezigheid van fijne **plantenwortels** in ouder organisch materiaal, zoals bijvoorbeeld verkoold of waterverzadigd hout uit een archeologische site (figuur 16). Deze wortels zijn aangemaakt door planten die hun koolstof uit de (huidige) atmosfeer hebben gehaald, en zijn dus opgebouwd met ‘recentere’ koolstof dan het doorwortelde oude hout. Stukken hout met recentere doorworteling worden daardoor best vermeden of ondergaan een reiniging tijdens de voorbehandeling in het labo door het manueel verwijderen van alle elementen die niets met het te dateren materiaal te maken hebben.

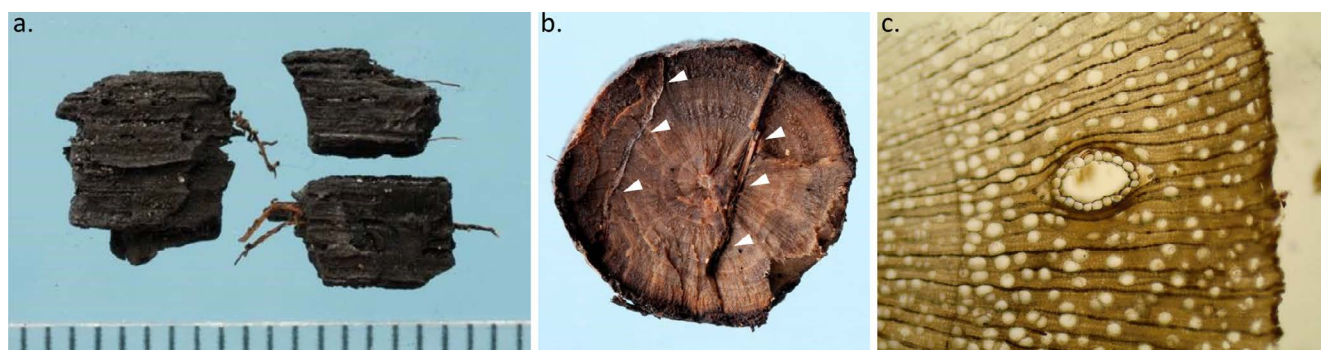
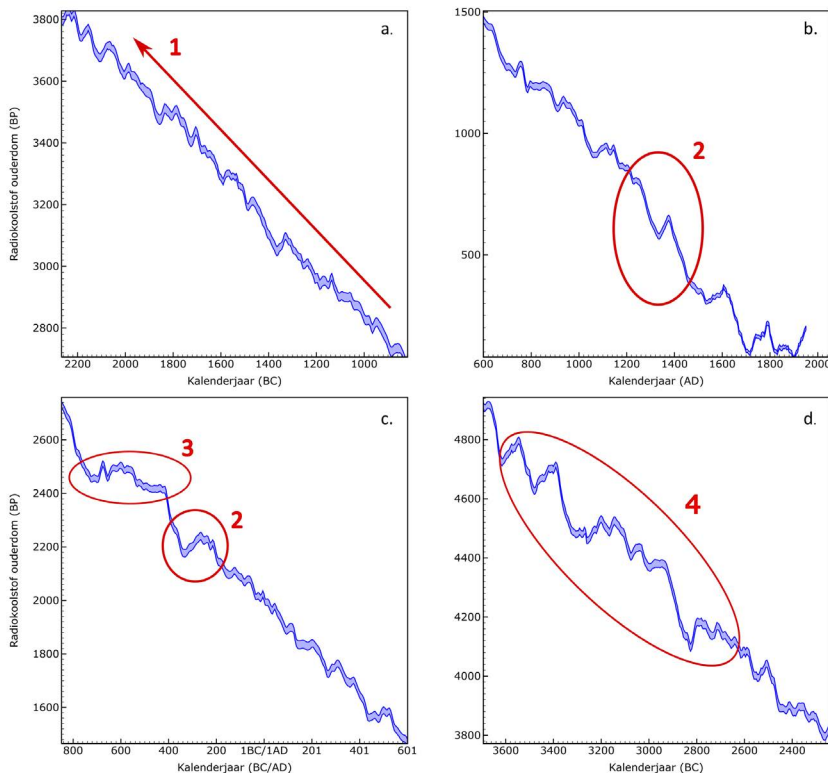


FIG 16: Voorbeelden van stukjes hout en houtskool waar recentere wortels doorheen groeiden: a. houtskoolfragmenten met recente doorworteling uit een Romeins crematiegraf uit Jabbeke (JA06HD S85), b. doorworteling van een dennenhouten paaltje en c. van een wilgentwijg uit een Romeinse vlechtwerkmand uit Dudzele. (foto's © Onroerend Erfgoed | K. Deforce)

Ook het bouwhistorisch onderzoek is niet vrijgesteld van intrusief of residueel materiaal. Stukjes houtskool die we in kalkmortels terugvinden, dateren soms (veel) ouder dan verwacht of mogelijk. We veronderstellen dat deze residuele houtskool in de mortel terecht kwam tijdens het branden van kalksteen, schelpen of botten (met hout of houtskool als brandstof) of tijdens het vermengen van de ongebluste kalk met zand. Uiteraard kunnen stukken houtskool in een mortel ook een oud-houteffect in zich meedragen. Bij het archeologisch onderzoek in de Basiliek van Tongeren werden uit eenzelfde bouwphase soms meerdere houtskooldateringen van de mortel uitgevoerd. Geen overbodige luxe, zo bleek, want er werden ook duidelijk te oude dateringen opgemeten (Vanderhoeven *et al.* 2018). Door meerdere stalen per bouwphase te dateren kan men alvast de grootste anomalieën opsporen.

4.6 PERIODE EN PRECISIE

De verwachtingen die men heeft bij het uitvoeren van een radiokoolstofdatering kunnen op voorhand als minder of meer realistisch worden ingeschat door eerst de kalibratiecurve te bekijken. Doorgaans heeft men al een ruwe inschatting van de verwachte ouderdom van het materiaal en door de vorm van de kalibratiecurve voor die te verwachten periode te bekijken, krijgt men een eerste indruk van de te verwachten precisie. Concreet kan de kalibratiecurve in een bepaalde tijdsperiode een stabiel en rechtlijnig verloop kennen (figuur 17a, nr. 1), een duidelijke ‘kronkel’ of ‘wiggles’ vertonen (figuur 17b en 17c, nr. 2) of een plateau bereiken (figuur 17c, nr. 3). Indien ‘wiggles’ en plateaus elkaar opvolgen kunnen we spreken van een turbulente periode (figuur 17d, nr. 4).



FIGU 17: De kalibratiecurve in verschillende periodes, a: een lineair, stabiel verloop in de late bronstijd, b: een duidelijke ‘wiggle’ in de 13de eeuw AD, c: het ‘Hallstatt-plateau’ in de ijzertijd en een ‘wiggle’ tussen 400 en 200 BC, d: een turbulent verloop van de kalibratiecurve tussen 3600 en 2500 BC (cijferaanwijzingen, zie tekst).

“Naar het Hallstatt-plateau wordt door archeologen ook wel verwezen als *the 1st millennium BC radiocarbon disaster*”

Dat de **vorm van de kalibratiecurve** voor een groot deel de precisie van de gekalibreerde radiokoolstofdatering bepaalt, wordt in wat volgt geïllustreerd met een aantal gesimuleerde voorbeelden. Indien een radiokoolstofdatering in een periode valt waarin de kalibratiecurve een mooi, quasi rechtlijnig verloop kent, zal het bereik van de gekalibreerde datering meestal een vrij beperkt tijdsinterval overspannen. In de kansverdeling van de kalenderjaren valt dan nog de vorm van een normaalverdeling te herkennen (simulatie 1 in figuur 18). Dit ligt helemaal anders wanneer de radiokoolstofdatering in een zone valt waarin de kalibratiecurve een plateau of een vlak verloop vertoont. Dit is bijvoorbeeld het geval in de ijzertijd waar de kalibratiecurve het zogenaamde **Hallstatt-plateau** bereikt. Een gekalibreerde radiokoolstofdatering valt dan enkel binnen een heel ruim tijdsinterval te situeren, van gemakkelijk 200 tot 300 jaar breed (simulatie 2 in figuur 18). Dit heeft tot gevolg dat materiaal uit de vroege ijzertijd moeilijk nauwkeurig te dateren valt met een radiokoolstofanalyse. Net vóór en aan het eind van deze periode, waar de kalibratiecurve weer een helling volgt, heeft een gekalibreerde radiokoolstofouderdom weer een prima, nauw dateringsinterval. Helemaal aan het begin van het Hallstatt-plateau heeft de kalibratiecurve een zodanig steil verloop dat na kalibratie het dateringsinterval zelfs nauwer is dan vóór kalibratie (simulatie 3 in figuur 18): een fenomeen dat zich op geen enkel ander tijdstip manifesteert!

“De vorm van de kalibratiecurve bepaalt voor een groot deel de precisie van de gekalibreerde radiokoolstof-datering.”

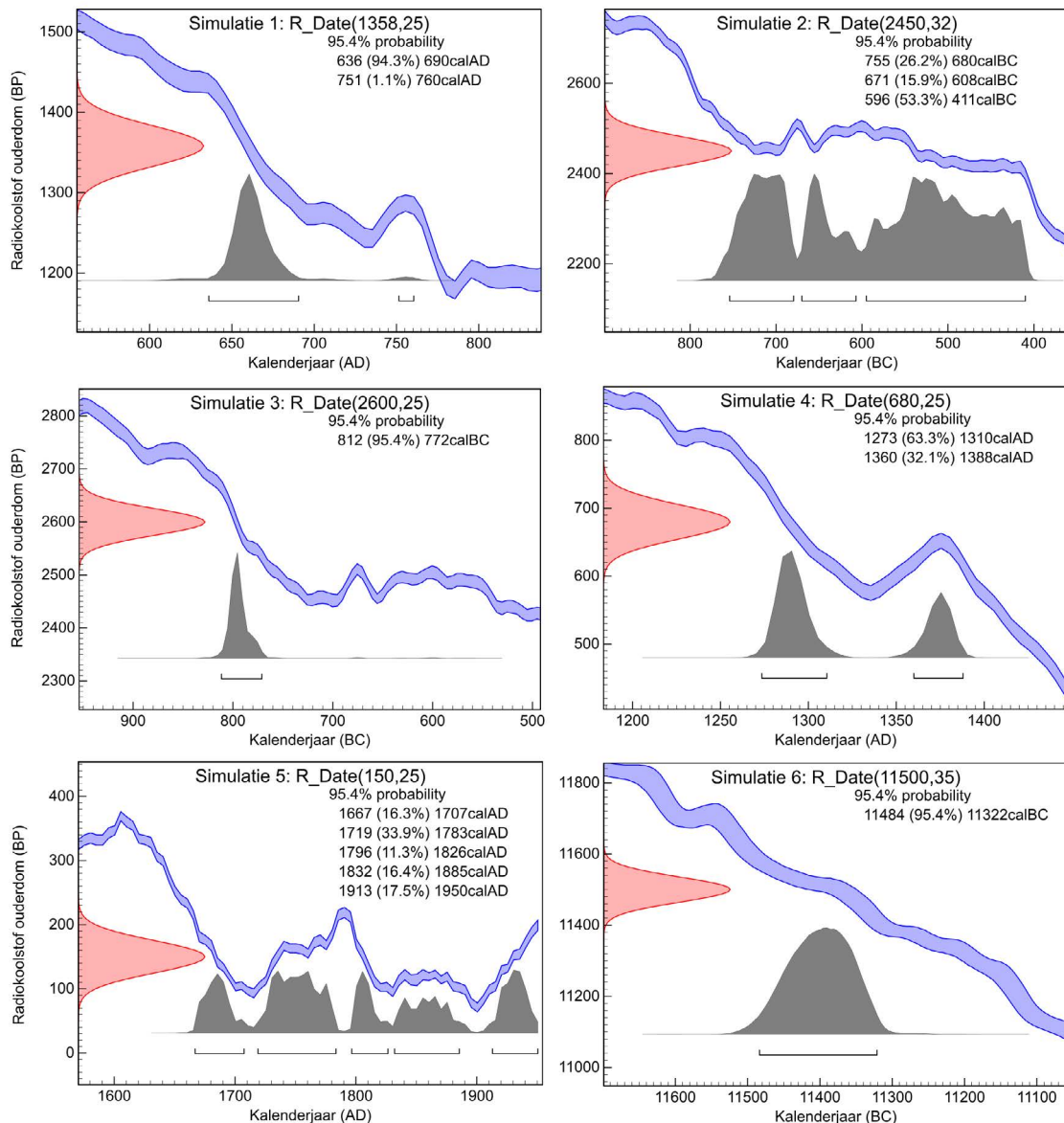


FIG 18: Invloed van de vorm van de kalibratiecurve op het resultaat van de kalibratie van radiokoolstof-ouderdomsbepalingen.

Een lokale schommeling in de kalibratiecurve, bijvoorbeeld de 'wiggles' in de 13de eeuw, zorgt ervoor dat na kalibratie de mogelijke datering niet langer in één, aaneengesloten interval valt. De werkelijke datering ligt ergens binnen twee kleinere intervallen, die onderling niet bij elkaar aansluiten. Daardoor is het in het bovenstaande voorbeeld (simulatie 4 in figuur 18) moeilijk vast te stellen of het hier om 13de- of 14de-eeuws materiaal gaat. Soms kan één van de pieken of intervallen uitgesloten worden op basis van een historische bron (die dan een *terminus* geeft voor de datering) of door andere dateringen in rekening te brengen, van vondsten die een stratigrafisch verband met het eerst gedateerde materiaal vertonen (zie verder, hoofdstuk 7).

Bij **bouwhistorisch onderzoek** is de resolutie van een radiokoolstofdatering vaak te groot om onderzoeksvragen te kunnen beantwoorden. Of een houten constructie dateert uit het midden dan wel het einde van de 13de eeuw is een vraag die met één radiokoolstofdatering niet eenduidig zal kunnen beantwoord worden. De gekalibreerde radiokoolstofdatering zal resulteren in een range aan mogelijke kalenderjaren voor de kapdatum van het hout die te situeren is in de tweede helft van de 13de eeuw. Daar kan gedeeltelijk aan tegemoet gekomen worden door meerdere radio-

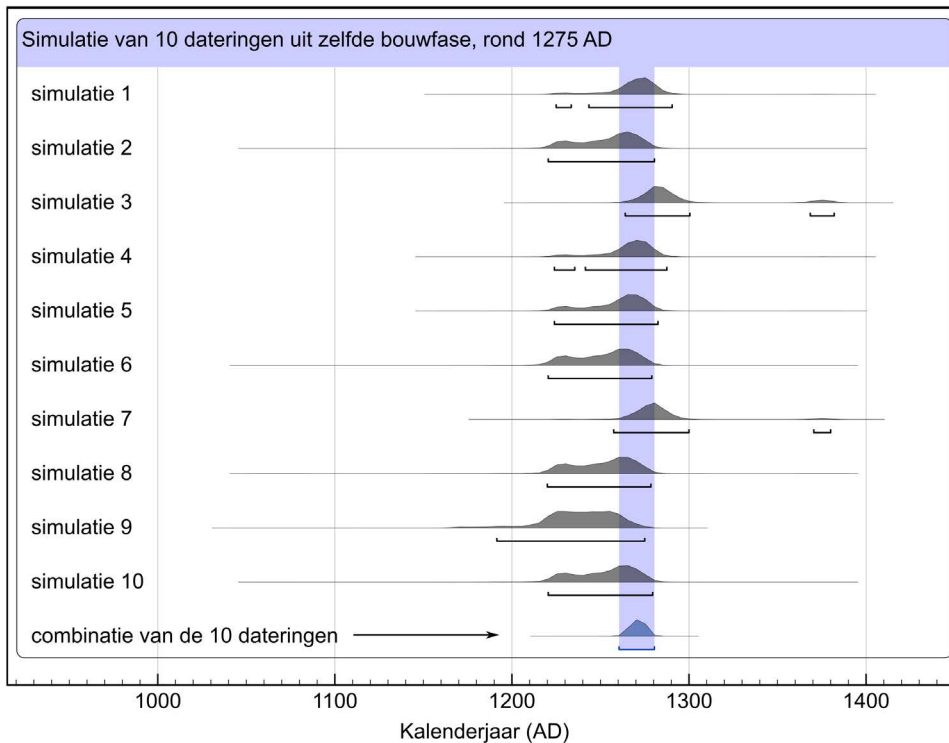


FIG 19: Gesimuleerde dateringen (met een precisie van ± 25 BP en een betrouwbaarheidsinterval van 95,4%) van tien stukken hout uit een grote constructie met een kapdatum in 1275. Door de radiokoolstofdateringen te combineren – in de veronderstelling dat ze een zelfde gebeurtenis dateren – wordt een beduidend nauwer dateringsinterval bekomen (blauwe zone).

koolstofdateringen te combineren (zie verder, hoofdstuk 7). De combinatie van meerdere dateringen op houtstalen uit dezelfde context - en met een veronderstelde zelfde kapdatum! - kan een datering opleveren die een enger tijdsinterval omvat dan de individuele metingen (figuur 19).

Voor het dateren van historische houtconstructies is *wiggle matching* ook een interessante techniek (zie 7.6). Het is eveneens een methode waarbij men op basis van het combineren van meerdere radiokoolstofanalyses de precisie van de datering probeert te verhogen.

Is het materiaal dat men wil dateren vermoedelijk **jonger dan 1650 AD**, dan zal een radiokoolstofdatering zelden meer informatie opleveren dan dat het inderdaad jonger dan dat jaartal is. Dit is te wijten aan de vorm van de kalibratiecurve: een vondst dateren die jonger is dan 1650 zal een gekalibreerde datering geven die zowat de hele 17de tot 20ste eeuw overspant, ongeacht of de vondst bijvoorbeeld uit de 18de of de 19de eeuw dateert (simulatie 5 in figuur 18).

In echt oud materiaal is het gehalte aan ^{14}C moeilijker te meten en stijgt de onzekerheid op de analyse (met een grotere standaardafwijking als gevolg). Maar ook de kalibratiecurve, die gebaseerd is op de analyses van oud materiaal, heeft last van hetzelfde fenomeen. Ook op de kalibratiecurve sluipt er in de oudere periodes, en zeker vanaf 12.000 BP, een steeds grotere foutenmarge. Dit alles zorgt ervoor dat we voor die oudere periodes een breed dateringsinterval mogen verwachten, dat makkelijk meerdere eeuwen overspant (simulatie 6 in figuur 18).

Zelden bekomt men na kalibratie een interval dat nauwer is dan 60 jaar, indien men een statistische zekerheid van 95,4% in rekening neemt. Bij het formuleren van de onderzoeksvragen en het opstellen van een dateringsstrategie moet daar rekening mee gehouden worden. Indien men bijvoorbeeld de bouwfasering van een gebouw wil achterhalen door de datering van houten structuren – en dendrochronologisch onderzoek hier geen uitweg in kan bieden – is ook de resolutie van radiokoolstofdateringen vermoedelijk te beperkt om een onderscheid te kunnen maken tussen bijvoorbeeld laat-14de- of vroeg-15de-eeuwse bouwfases.

De piekwaarde van het ^{14}C -gehalte in de atmosfeer van het noordelijk halfrond in 1963, en 1965 in het zuidelijk halfrond (de '**bomb peak**'), kan gebruikt worden om vervalsingen op te sporen. Deze extreem hoge waarden van het ^{14}C -gehalte zullen immers enkel op te meten zijn in organisch materiaal dat tijdens die periode groeide. Kort ervoor en erna lag het ^{14}C -gehalte beduidend lager. Zo werd een schilderij toegeschreven aan de Franse kunstschilder Fernand Léger (°1881 - †1955) door radiokoolstofanalyse 'ontmaskerd' als een latere vervalsing. De radiokoolstofanalyse van een stukje van het katoenen canvas had een veel te hoog ^{14}C -gehalte waardoor het katoen ten vroegste in 1959 kon geoogst zijn, zeker 4 jaar ná het overlijden van de schilder en beeldhouwer. De veronderstelde datering, rond 1400 AD, van een *stucco* (kalkpleister) uit Italië werd bijgesteld toen uit de radiokoolstofanalyse bleek dat het pleister werd aangemaakt met een deel Portland-cement (met een heel laag ^{14}C -gehalte) en dat de fractie kalk in de pleister dan weer een te hoog percentage aan moderne koolstof bevatte (Van Strydonck 2016). Deze stucco kan dus onmogelijk dateren uit de 14de of 15de eeuw.



HOOFDSTUK **5**

BEMONSTEREN

Eens een selectie is gemaakt van het te dateren materiaal – op basis van het type materiaal, de bewaringstoestand, de context en de onderzoeksvraag – moet een representatief staal genomen worden dat gebruikt kan worden voor de eigenlijke radiokoolstofdatering. In wat volgt worden praktische zaken overlopen zoals het vereiste volume of gewicht van de stalen, de noodzakelijke randinformatie en de belangrijkste aandachtspunten inzake contaminatie.

5.1 HOEVEEL MATERIAAL?

Hoeveel materiaal er nodig is om tot een datering te komen hangt af van het toestel waarmee gemeten wordt, de bewaringstoestand van het materiaal en het soort materiaal. Vandaag wordt het gehalte aan koolstofisotopen in regel gemeten via AMS, een techniek die een betrouwbare meting kan opleveren na analyse van slechts 1 milligram (mg of 0,001 gram) koolstof. Maar om tot die milligram zuivere koolstof te komen moet een grotere hoeveelheid van het te dateren materiaal – dat doorgaans niet enkel uit koolstof bestaat – ingezameld en behandeld worden. Het gewicht waarvan men moet starten is afhankelijk van het soort materiaal. Zo bestaat **houtskool** grotendeels uit koolstof, het is immers verkoold hout en andere componenten in het hout dan koolstof zijn door vergassing uitgedreven. Daarom volstaat een brokje van *ca.* 10 mg om voldoende materiaal over te houden voor de datering. Uit voorzorg wordt echter best dubbel zoveel ingezameld. Bij **droog hout**, in onverkoelde toestand, wordt nog iets meer ingezameld aangezien dit materiaal (relatief gezien) minder rijk is aan koolstof in vergelijking met houtskool. Voor gezond, droog hout wordt doorgaans aangeraden om minstens 50 mg in te zamelen. Het wordt moeilijker om dit in te schatten bij waterverzadigd of sterk gedegradeerd hout. Bij waterverzadigd hout bestaat een aanzienlijk deel van het staal uit water dat vastgehouden wordt door het hout. Louter afgaan op het gewicht van een waterverzadigd staal is daarom niet aangewezen. Het is aannemelijk dat water gemakkelijk 50 tot 90% van het totaalgewicht kan uitmaken. Om zeker te zijn dat er voldoende hout in het staal aanwezig is voor de verdere analyse wordt aangeraden om minstens 100 tot 150 mg waterverzadigd hout in te zamelen. Met ongeveer 1 cm³ waterverzadigd hout lukt het doorgaans om voldoende materiaal over te houden na voorbehandeling. Door het staal eerst grondig te laten drogen kan je een betere inschatting maken van de hoeveelheid hout die effectief aanwezig is in het staal. Maar water is niet het enige probleem. Bij langdurige bewaring in waterverzadigde bodemomstandigheden zal de celwand van de houtcellen geërodeerd worden door bacteriën. Een veel sneller proces van degradatie is aantasting door schimmels, wat een groot verlies aan volumegewicht met zich kan meebrengen. Een laag volumegewicht betekent eveneens dat er een groter volume aan te dateren materiaal nodig is. Bij sterk gedegradeerde stukken hout zal dus bij de staalname een groot volume noodzakelijk zijn.

De mogelijkheid om **botmateriaal** en ander eiwithoudend materiaal – zoals gewei, haar of hoorn – te dateren, hangt sterk samen met de bewaringstoestand van de organische component van de botten (grotendeels collageen of keratine). Die bewaringstoestand hangt voornamelijk af van de begravingomstandigheden (bodempH, temperatuur, vocht, enz.). Waren die ongunstig, dan kan de 'opbrengst' aan collageen tijdens de voorbehandeling van een stuk bot laag uitvallen en moet er tot 2 g materiaal bemonsterd worden. Indien een stuk bot minder dan 1% collageen oplevert, is de bewaring zodanig slecht dat het staal niet geschikt is voor een datering. De kans op contaminatie is dan te groot. Alhoewel het laboratorium testen uitvoert om de kwaliteit te bepalen is het interessant om reeds bij het selecteren van botmateriaal (figuur 20) volgende vuistregels te hanteren:

- Selecteer droge en gereinigde stukken (vrij van ander organisch en mineraal materiaal) waarvan de bewaringstoestand kan ingeschat worden.
- Poreus botmateriaal is minder geschikt aangezien het weinig collageen bevat en gevoelig is voor contaminatie. De uiteinden van lange beenderen of ribben bestaan doorgaans voor een groot deel uit dergelijk spongieus of poreus materiaal. Fragmenten uit de schacht van lange beenderen zijn meer geschikt.
- Harde botten, die moeilijk met de hand te breken zijn, hebben meestal een voldoende hoge concentratie aan collageen. Botten die zich relatief makkelijk met de hand laten breken kunnen voldoende collageen bevatten, maar dat is niet op voorhand te garanderen. Schilferend of poederig botmateriaal zal doorgaans niet geschikt zijn omdat het weinig tot geen collageen meer zal bevatten en dus ook een risico liep van blootstelling aan contaminatie. Slecht bewaard botmateriaal reageert immers sneller met humuszuren of andere stoffen in de bodem.



FIG 20: Selectie van archeologisch botmateriaal voor een ^{14}C -datering.

Natuurlijke sedimentaire afzettingen laten zich eveneens dateren door een selectie van geschikt materiaal uit bepaalde lagen of – indien geen gelaagdheid kan onderscheiden worden – doorheen een per hoogteniveau bemonsterd profiel. Aangezien de tafonomie van het organisch materiaal langsheen zo'n profiel vrij complex kan zijn, moet men zich bij selectie en staalname steeds afvragen of het organisch materiaal uit het sediment zich nog in situ bevindt. Het geselecteerde materiaal is in het ideale geval gelijktijdig met het sedimentatieproces gevormd. Plantenwortels die in diepere lagen binnendringen zijn alvast geen geschikt materiaal. 'Verdwaalde' stukjes houtskool zijn dat evenmin, gezien hun mogelijk lange residentietijd in de bodem. Onverkoelde zaden, vruchten, bladeren en kleine takjes vormen de meest geschikte materialen, indien ze niet intrusief zijn (zie 4.5).

De te dateren stalen kunnen langsheen een profiel uit bulkstalen genomen worden. Indien een pollenbak doorheen het profiel werd geslagen, kan uit deze staalname ook materiaal geselecteerd worden voor een radiokoolstofdatering. Het grote voordeel is dan uiteraard dat de radiokoolstofdateringen rechtstreeks aan de resultaten van de pollenanalyses kunnen gekoppeld worden, wat bij paleo-ecologische studies en landschapsreconstructies uiteraard van het grootste belang is.

Het blijft natuurlijk opletten geblazen: sedimenten die voor paleo-ecologisch onderzoek worden bemonsterd zijn dikwijls aquatische afzettingen. Dat betekent dat er een grote kans bestaat dat een deel van het organisch materiaal bestaat uit de resten van waterplanten. Op dergelijk materiaal dateren is niet aangewezen aangezien hier mogelijk een groot reservoir effect is ingebouwd (zie 2.8). Uit een dergelijk profiel moet met de grootste zorg geschikt materiaal geselecteerd worden, zoals onverkoelde takjes of zaden en vruchten van landplanten. Bij hoogveen, waar het geaccumuleerde organisch materiaal vooral uit mos (en heide) bestaat, kan dan weer zonder probleem een klein staal genomen worden voor datering. Ook bij een aantal andere types veen (zoals zeggeveen, elzenbroek- of berkenbroekveen) bestaat het opgestapelde organisch materiaal grotendeels uit restanten van landplanten (bomen, struiken, grassen), waaruit zonder gevaar geschikt materiaal kan geselecteerd worden voor een radiokoolstofdatering. Het

aantal en de onderlinge afstand tussen de bemonsteringspunten langsheen een profiel hangt in grote mate af van de onderzoeksvraag (globale datering, landschapsreconstructie, ...) en de graad van detail die men wil verkrijgen (snelheid van aangroei veen, ouderdom van bepaalde laag, gewenste chronologische resolutie, ...).

Onderstaande tabel geeft een overzicht van het gewicht aan materiaal dat best wordt verzameld voor een radiokoolstofdatering. In geval van twijfel contacteer je best het labo waar de radiokoolstofanalyse zal uitgevoerd worden.

TABEL 1 / Optimaal gewicht van stalen voor radiokoolstofdatering via AMS.

MATERIAAL	OPTIMAAL GEWICHT VAN HET STAAL (G)	OPMERKING
Hout (droog en niet verkoold)	< 0,1 g	Bij voorkeur de buitenste ring van tak of stam. Indien dit niet mogelijk is, selecteer hout van kortlevende soorten.
Waterverzadigd hout	0,2 g tot 5 g	Meestal volstaat 1 cm ³ aan materiaal. Laat het staal drogen en weeg om zeker te zijn.
Houtskool en verkoolde plantenresten	< 0,1 g	één verkoold graan is meestal voldoende voor een datering.
Waterverzadigde plantenresten	0,2 g tot 5 g	Het benodigde volume van het staal is sterk afhankelijk van de verzadigingsgraad met water. Meestal volstaat één macro-botanische vondst, zoals een elzenprop of eikel.
Bot en gewei	>2 g	De compacte, niet poreuze delen van lange beenderen zijn meestal het meest geschikt.
Witverbrand bot	>2 g	
Residu op aardewerk (verkoolde etensresten, roet, ...)	ca. 0,1 g	1 cm ² zichtbaar residu is meestal voldoende.
Veen, organische sedimenten	< 1 g	1 cm ³ is meestal dateerbaar.
Ander materiaal	Neem contact op met het dateringslabo voor meer informatie	

Kalkmortels vormen een bijzondere bron van oude koolstof. Om tot een betrouwbare datering te komen is de staalname cruciaal en die moet met de grootste zorg worden uitgevoerd. Aan de oppervlakte van de mortel kan door verwerking ook recentere koolstof aanwezig zijn. Daarom moet een staal voor radiokoolstofdatering dieper in de mortellaag genomen worden. Indien de mortel kort na de bouwactiviteit niet volledig is uitgehard kan er nog Ca(OH)₂ aanwezig zijn in het metselwerk (wat kan opgespoord worden met een eenvoudige chemische test) en kan een radiokoolstofdatering geen bruikbaar resultaat opleveren (figuur 12). Overleg daarom met de specialisten uit het dateringslabo vooraleer tot een staalname van kalkmortel over te gaan.

5.2 DOCUMENTATIE

Aangezien een radiokoolstofdatering kan toegepast worden op organisch materiaal uit zowel archeologische, bouw-historische of kunsthistorische contexten, is het noodzakelijk de **vondstcontext** expliciet te vermelden bij het documenteren van de stalen. Dit is zeker ook van belang indien het materiaal afkomstig is uit veen, andere geologische lagen of bewaard en eventueel behandeld is als museumobject.

Daarnaast is het evident om aan het staal een **unieke identificatiecode** te geven die terug te koppelen is naar het onderzoeksproject en de persoon die het staal heeft genomen en ingediend.

C14 - Panel Home About Sign out Kristof.Haneca@vlaanderen.be

Sample identification

Archeology
 Art History
 Geology
 Other

Project Name: Site name or Author work of Art*:

Sample Identifier *:
MUST BE UNIQUE

Material *:

Possible contamination:
eg. sand, clay humics, preservatives, roots, carbonate, restorations, etc

Expected age *:
BP or calendar date (AD/BC/BP)

Sample description *:

Collector

Collector name *: First name Last name

Year of collection **:

Sample origin

Country *: Belgium

FIG 21: Voorbeeld van een online registratieformulier voor te analyseren stalen (<http://radiocarbon.kikirpa.be/>).

van de verwachte ouderdom heeft op zich geen invloed op de bekomen datering of het onafhankelijke karakter van de analyse. Een discrepantie tussen verwachte en bekomen datering kan de onderzoeker op het spoor brengen van residuele of intrusieve contaminatie van het onderzochte archeologische spoor, een foutieve interpretatie van de archeologische context of fouten bij de staalname (zie bv. Eryvnc 2003).

Alle dateringslaboratoria hebben (online) formulieren die door de aanvrager ingevuld dienen te worden (figuur 21). Het correct én volledig invullen van deze formulieren garandeert een correcte behandeling, kalibratie en accurate datering van het materiaal.

5.3 MOGELIJKE VERONTREINIGING

Indien een staal bronnen van oudere of jongere koolstof bevat, zal de uitgevoerde radiokoolstofdatering mogelijk sterk afwijken van de werkelijke ouderdom. Daarom moet men bij staalname en selectie van materiaal steeds rekening houden met mogelijke contaminatie en zo nodig ingrijpen om die te elimineren.

Zo is organisch materiaal in de bodem onderhevig aan degradatie. Het materiaal zal door aantasting van bodemorganismen en schimmels langzaam zijn structuur verliezen, in kleinere elementen uiteenvallen en zo op zich een voedingsbodem worden. Daardoor kan gedegradeerd organisch materiaal niet alleen doorweven worden met fijne (haar)wortels van levende planten (zie 4.5 en figuur 16) maar zal het ook chemische uiteenvallen ondergaan met stoffen in de bodem, zoals humuszuren. Daarin zit koolstof met een andere ouderdom dan het archeologisch materiaal. Om die redenen wordt botmateriaal met een laag collageen-gehalte niet voor datering gebruikt. Het is immers een indicatie voor een slechte fysische bewaringstoestand, organische degradatie en dus hoge kans op contaminatie. In het dateringslabo wordt de graad van degradatie van het botmateriaal nauwgezet geëvalueerd. Niet alleen de hoeveelheid resterend collageen wordt gemeten, maar ook de verhouding tussen koolstof en stikstof (de zogenaamde C:N ratio) geeft een beeld van de degradatie. Te sterk gedegradeerd materiaal zal niet weerhouden worden voor verder onderzoek.

Een andere mogelijke bron van contaminatie met oudere of jongere koolstof is de behandeling van het object waaruit het staal werd gehaald, met **producten voor conservatie** (PEG, hars), **onderhoud** (bijenwas voor houten meubelen of andere interieurelementen) of **behandeling** tegen aantasting door schimmels of insecten (fungiciden

Uitermate belangrijk is om bij het indienen van een te dateren staal duidelijk aan te geven welk **type materiaal** het betreft, eventueel gekoppeld met een beschrijving van de toestand van het materiaal. Zo kan een stuk hout nog intact en droog zijn (bv. een stukje bouwhout uit een interieur), of volledig waterverzadigd (bv. archeologisch hout), of verkoold (houtskool). Menselijk of dierlijk bot kan eveneens in verkoold toestand voorkomen (bv. bij crematieresten). Bij dierlijk bot is het steeds nodig de identificatie van de diersoort te vermelden. Als er bijvoorbeeld een visbot wordt gedateerd, krijgt het staal een andere voorbereiding, wordt bij de kalibratie een andere kalibratiecurve gebruikt en moet er rekening gehouden worden met een mogelijk reservoir-effect. Dit is in tegenstelling tot de datering van een zoogdierbot waar de terrestrische kalibratiecurve mag gebruikt worden en reservoir-effecten (via de voeding) misschien tot een minimum beperkt zijn.

Hoe tegenstrijdig het ook mag klinken, het op voorhand vermelden van de verwachte ouderdom van het staal is een vorm van kwaliteitsbewaking. Indien tijdens de voorbehandeling of meting fouten of onnauwkeurigheden in het proces zijn geslopen, en daardoor een te jonge of te oude datering wordt bekomen, kan dit vroegtijdig worden opgespoord indien er sterk wordt afgeweken van de verwachte ouderdom. Het vermelden

of insecticiden). Dergelijke producten zijn vaak gemaakt uit derivaten van aardolie. Ruwe aardolie ontstaat door het langzaam proces van ontbinding van organisch materiaal onder hoge druk en hitte, en dat kan miljoenen jaren in beslag nemen. De koolstof in aardolie is dan ook miljoenen jaren 'oud' waardoor er geen radioactieve isotopen meer aanwezig zijn. Aardolie is volgens de ^{14}C -methode dan ook oneindig oud. Indien een staal dat behandeld is met aardoliederivaten geen adequate voorbehandeling krijgt om deze stoffen voorafgaand aan de analyse te elimineren, zal het staal door de bijmenging van de ^{14}C -loze koolstof veel ouder dateren dan zijn werkelijke ouderdom. Indien daarentegen natuurlijke wassen of harsen worden gebruikt betreft het een toevoeging van 'recente' koolstof, wat zal leiden tot een te 'jonge' datering. Gelukkig kunnen de aanwezige 'ongewenste' stoffen meestal met een aangepaste chemische voorbehandeling geëlimineerd worden. Echt problematisch zijn de objecten die behandeld zijn met een chemische stof die sterk lijkt op het te dateren materiaal. Collageen extraheren uit een bot dat ooit met beenderlijm behandeld werd is zinloos want de contaminerende stof (de beenderlijm) heeft een sterk gelijkaardige chemische samenstelling als het te dateren materiaal (het bot) en kan er dus niet van gescheiden worden.

Het spreekt voor zich dat het melden van een mogelijke verontreiniging bij het aanbieden en registreren van het staal bij een dateringslabo uitermate belangrijk is. Zodoende kan een passend protocol worden opgesteld om alle mogelijke verontreinigingen uit het staal te halen.

5.4 CHEMISCHE VOORBEHANDELING EN TRANSFORMATIE

Vooraleer er een meting wordt uitgevoerd ondergaat het te dateren staal een chemische voorbehandeling om alle mogelijke contaminerende en dus ongewenste koolstof te verwijderen. Daarna wordt het overblijvend materiaal door verbranding omgezet tot CO_2 en vervolgens tot zuivere koolstof, meestal onder de vorm van grafiet.

Bij houtig materiaal omvat de chemische voorbehandeling meestal een herhaald blootstellen van het staal aan zuren en basen. Tijdens deze behandeling wordt neerslag van recente of fossiele kalk, van humuszuren uit de bodem en bestanddelen van het materiaal zelf (bv. harsen) opgelost en gescheiden van het te dateren materiaal. Hout ondergaat nog een extra procedure om uiteindelijk zuivere cellulose over te houden. Bij beenderen wordt enkel het botcollageen gebruikt voor het dateren en bij schelpen zal een behandeling met een licht zuur de buitenste laag weg-eroderen om enkel de binnenste kern van de schelp over te houden. Voor elk type materiaal, en afhankelijk van de toestand en tafonomie van het staal, kan een procedure van voorbehandeling opgesteld worden om contaminatie van oudere of jongere koolstof zo goed als mogelijk uit te sluiten.

Laat het duidelijk zijn dat de hele procedure, van voorbehandeling tot analyse van het ^{14}C -gehalte, een **onherroepelijk verlies van materiaal** met zich mee brengt. Indien veel materiaal werd aangeboden zal eerst een substaal genomen worden. Indien er geen ruime hoeveelheid van materiaal is, zal het volledige ingediende staal behandeld worden. Tijdens de voorbehandeling zal dit te dateren staal voor een deel worden opgelost en een onherstelbare degradatie ondergaan. Daarna wordt het resterende materiaal opgebrand tijdens de omzetting naar grafiet. Van het te dateren staal blijft na de analyses dus geen tastbaar materiaal over: het staal is dus niet te recupereren.



HOOFDSTUK **6**
**VAN RAPPORT TOT
INTERPRETATIE**

6.1 RAPPORTEREN

Voor de rapportage van radiokoolstofdateringen zijn internationale afspraken gemaakt, om de uitgevoerde dateringen onderling op een gestandaardiseerde manier te kunnen vergelijken (Stuiver & Polach 1977). **Conventionele radiokoolstofdateringen** worden volgens deze internationale conventie als volgt gerapporteerd:

lab ID + sample ID: ¹⁴C jaar ± standaardafwijking BP

met:

- **lab ID + sample ID:** dit unieke label maakt duidelijk in welk laboratorium de datering werd uitgevoerd (lab ID), gekoppeld aan een uniek referentienummer voor het onderzochte staal (sample ID).
- **¹⁴C jaar:** de radiokoolstofouderdom die bepaald werd door het laboratorium en gecorrigeerd is voor isotopenfractionatie (dit is dus de conventionele radiokoolstofouderdom).
- **standaardafwijking:** de standaardafwijking op de radiokoolstofouderdom.
- **BP:** 'before present', het aantal jaar voor het arbitrair gekozen referentiejaar 1950 AD, wat overeen komt met 0 BP.

Bijvoorbeeld: RICH-24731: 1487±28 BP.

Hier staat RICH voor 'Royal Institute for Cultural Heritage' (Brussel) en is 24731 de unieke code voor het onderzochte staal. Dit is de enige gestandaardiseerde manier om deze radiokoolstofanalyse, en de daaraan gekoppelde handelingen in het laboratorium, later nog op te zoeken. 1487 is de berekende radiokoolstofouderdom uitgedrukt in jaren BP. De onzekerheid op de radiokoolstofouderdom wordt uitgedrukt door de standaardafwijking van 28 jaar.

De **gekalibreerde radiokoolstofouderdom** wordt uitgedrukt als een interval van mogelijke kalenderjaren. De werkelijke ouderdom van het geanalyseerde staal wordt verondersteld zich binnen dat interval te bevinden, een statistische onzekerheid in acht genomen. Indien de onzekerheid laag wordt gehouden (95,4% probabiliteit) zal het interval van kalenderjaren breed zijn, indien de onzekerheid hoger mag zijn ('slechts' 68,2% probabiliteit) zal het interval smaller zijn (zie 4.6).

Een jaartal of interval uitgedrukt in *cal BC* of *cal AD* stemt overeen met het kalenderjaar volgens de Gregoriaanse kalender (met BC = *before Christ* en AD = *anno dominī*). De term *cal BP* staat voor het aantal kalenderjaren vóór 1950 (= het jaar 0 voor de rapportage van radiokoolstofdateringen).

Bijkomend is het wenselijk dat ook de **aard (grondstof) van het gedateerde materiaal, de soortdeterminatie** (zowel bij dier als bij plant), het **skeletelement** (bij mens en dier) en de **voorbehandeling** van het staal worden gerapporteerd. Ook het **archeologisch spoor** of andere **context** waaruit het staal werd genomen en de **tafonomie** van de vondst zullen van belang zijn voor de verdere interpretatie. Het moet ook duidelijk zijn of het staal bijvoorbeeld een mengstaal is uit een bulk van houtskool of het daarentegen te beschouwen is als representatief voor één individuele plant. Bij hout is het noodzakelijk om weten of er kernhout werd gedateerd (wat kan leiden tot een oud-houteffect) of spinthout of schors, of dat er hout van een dunne twijg werd geanalyseerd (kort levend stuk hout).

Daarnaast is het vermelden van de gebruikte **kalibratiecurve** en **-software** ook steeds noodzakelijk. Beide ondergaan regelmatig een update, wat een invloed kan hebben op de gekalibreerde datering.

Soms wordt foutief, want tegen alle internationale conventies uit de radiokoolstofwereld in, zowel de gemeten als de conventionele radiokoolstofouderdom gerapporteerd. De conventionele ¹⁴C-ouderdom wordt bekomen door rekening te houden met de isotopenfractionatie (zie paragraaf 2.7). Het is de conventionele ouderdom die moet gekalibreerd worden om het bereik aan mogelijke kalenderjaren te bekomen.

Indien slechts één radiokoolstofdatering wordt gerapporteerd, mag men ervan uit gaan dat dit de conventionele ouderdom is, zoals in onderstaand voorbeeld (figuur 22).

RADIOCARBON DATING REPORT

BROECHEM

RICH-23268 (08-BROE-2180) : 1434±31BP 68.2% probability 600AD (68.2%) 650AD 95.4% probability 570AD (95.4%) 660AD	RICH-23348 (08-BROE-1450) : 1851±31BP 68.2% probability 125AD (68.2%) 220AD 95.4% probability 80AD (95.4%) 240AD
RICH-23269 (09-BROE-2519) : 1433±30BP 68.2% probability 600AD (68.2%) 650AD 95.4% probability 570AD (95.4%) 660AD	RICH-23349 (02-BROE-1396) : 1478±31BP 68.2% probability 555AD (68.2%) 620AD 95.4% probability 530AD (95.4%) 650AD
RICH-23270 (10-BROE-2702) : 1456±30BP 68.2% probability 580AD (68.2%) 640AD 95.4% probability 550AD (95.4%) 650AD	RICH-23350 (02-BROE-1443) : 1558±31BP 68.2% probability 420AD (68.2%) 550AD 95.4% probability 410AD (95.4%) 570AD

FIG 22: Voorbeeld van een dateringsrapport. Hier worden enkel de conventionele radiokoolstofdatering en de gekalibreerde dateringen gerapporteerd.

Daarnaast kan een ¹⁴C-datering van een vondst op zich in de ene situatie te interpreteren zijn als een exacte datering (datering klein stukje houtskool als datering voor het branden van houtskool), of als een *terminus ante of post quem* voor een bepaalde gebeurtenis. Dat laatste is bijvoorbeeld het geval indien er een stuk hout werd gedateerd waar geen spint of schors aan vast hangt. De radiokoolstofdatering van het hout geeft dan enkel een benaderende datering voor de vroegst mogelijk kapdatum.

6.2 RESERVOIREFFECT?

Zoals reeds eerder aangehaald (zie 2.8) spelen zich in grote rivieren, meren, zeeën en oceanen processen af die kunnen zorgen voor een schijnbare 'veroudering' van de in het water opgeloste koolstof onder de vorm van CO₂ en carbonaten.

De **reservoirouderdom** verschilt van plaats tot plaats op de aarde. Voor de Noordzee rekent men met een reservoirouderdom van ongeveer 400 ± 40 jaar. Vissen die in de Noordzee leven, en daar ook koolstof opnemen via hun voedsel, zullen daardoor ook een te oude radiokoolstofdatering vertonen in vergelijking met landdieren die op hetzelfde moment leven. Maar ook dieren en mensen die hun voedsel uit de zee halen, zullen daardoor koolstof opnemen uit dit 'reservoir' en zo de radiokoolstofouderdom van hun weefsels beïnvloeden. Dat betekent dat een radiokoolstofanalyse van botmateriaal afkomstig van mensen die hoofdzakelijk zeevis aten, ouder zal dateren dan dat van hun burens die een voorkeur hadden voor runds- of varkensvlees. De grootte van de afwijking zal verschillen per zeebekken en van de vraag of het gedateerde materiaal afkomstig is van een persoon of dier dat een volledig of slechts gedeeltelijk marien dieet volgde.

In grote rivieren en meren kan nog om andere redenen een reservoir-effect ontstaan. Zowel de aard van de bron als het sediment van de rivierbedding kan hierin een rol spelen. Sommige rivieren, zoals de Rijn, worden gevoed door het water van **smeltende gletsjers**. Dit smeltwater kan koolstof bevatten dat tientallen, honderden jaren of zelfs langer in bevroren toestand bewaard is gebleven. De bijmenging van gesmolten gletsjerwater en de daarin opgeloste koolstof kan het rivierwater een schijnbare ouderdom meegeven. Opgeloste 'oude' koolstof kan ook in het water terechtkomen via bronwater dat afkomstig is uit **geologische lagen** waar het jarenlang is verrijkt met calciumcarbonaten of andere koolstofhoudende mineralen uit oude gesteenten. Worden deze stoffen gebruikt door weekdieren om hun schelpen mee op te bouwen, dan zullen zij voor een deel deze 'oude' bron van koolstof incorporeren, en ogenschijnlijk ouder dateren.

Dat het verhaal eigenlijk nog complexer is, werd aangetoond in een studie van het **reservoir effect in de Schelde** (Ervynck *et al.* 2018). Daar werd de radiokoolstofouderdom van verschillende riviervissen (en leeftijdsklassen binnen elke soort) uit archeologische contexten vergeleken met de datering van contemporair zoogdierbot en cultureel materiaal uit dezelfde contexten. De afwijking tussen beide was minstens 100 radiokoolstofjaren, maar kon oplopen tot maar liefst 1845 (!) jaar. De Schelde en de organismen die erin leven dateren – uitgedrukt in radiokoolstofjaren – dus veel ouder dan langs de rivier, op het land levende contemporaine planten en dieren. Het potentieel reservoir effect blijkt niet alleen groot, maar tevens sterk variabel te zijn, afhankelijk o.a. van de soort vis, de grootte van de dieren en hun trofisch niveau. Zonder twijfel varieerde het reservoir effect ook nog eens doorheen de tijd maar dat is voor de Schelde nog niet in kaart gebracht. Hoe het ook zij, de hoop om de ‘correcte’ leeftijd van een stuk visbot uit een archeologische context te achterhalen met een radiokoolstofdatering lijkt hiermee op losse schroeven te staan. Datering op terrestrisch dierenbot of menselijke resten levert daarentegen wel meestal een correcte ouderdom op. Al kan de datering van menselijke resten ook beïnvloed worden door dit reservoir effect indien die persoon op een (relatief) strikt dieet leefde van riviervis uit de Schelde. Tot slot kunnen we nog opmerken dat voor de IJzer en Maas nog geen gelijkaardige gegevens voorhanden zijn.

“De Schelde en organismen die erin leven dateren – uitgedrukt in radiokoolstofjaren – veel ouder dan langs de rivier, op het land levende planten en dieren.”

Het reservoir effect brengt uiteraard dateringsproblemen met zich mee. Toch kan door de zorgvuldige meting en interpretatie van de isotopenverhoudingen een mogelijk reservoir effect opgespoord worden. Een te sterke afwijking van -25‰ voor $\delta^{13}\text{C}$, zowel in positieve als negatieve richting, duidt er op dat de ^{14}C -datering werd beïnvloed door een reservoir effect. Dan kan men overwegen om een correctiefactor toe te voegen aan de berekening van de conventionele radiokoolstofouderdom en/of gebruik te maken van een meer geschikte kalibratiecurve (bv. de mariene kalibratiecurve *Marine13*, Reimer *et al.* 2013). Indien mogelijk, kan men ook een ander en beter geschikt staal selecteren en dateren. Soms kan ook een (systematisch afwijkende) datering van geassocieerde archeologische of ecologische vondsten ten opzichte van het gedateerde botmateriaal een reservoir effect aan het licht brengen. Een tot de verbeelding sprekend voorbeeld werd ontdekt op de Iron Gate-steentijdsites, langs de Donau, op de grens tussen Servië en Roemenië. Daar werden benen pijlpunten (gemaakt uit bot van herten) in menselijk skeletmateriaal gevonden; de onderlinge associatie tussen de menselijke resten en de pijlpunten was overduidelijk. De datering van het menselijk botmateriaal bleek echter 440 radiokoolstofjaren ouder te zijn dan de benen pijlpunten (Cook *et al.* 2002). Enkel een dieet met veel riviervis, die het uitgesproken reservoir effect van de Donau in zich dragen, kan de schijnbare veroudering van deze menselijke skeletten verklaren.

6.3 OP DIEET?

Dieetreconstructies zijn enkel mogelijk indien naast de $\delta^{13}\text{C}$ -waarde ook de stikstofisotopen worden gemeten. Deze metingen, die een berekening van de $\delta^{15}\text{N}$ mogelijk maken, worden niet standaard en simultaan met de radiokoolstofanalyse uitgevoerd. Een dergelijke analyse dient dus apart te worden ingepland maar kan doorgaans via het radiokoolstoflaboratorium geregeld worden.

Een voorbeeld van hoe een dieetreconstructie kan bijdragen tot de kennis van de samenleving in het verleden, is het archeologisch en fysisch-anthropologisch onderzoek van menselijke resten afkomstig van de begraafplaats van het Karmelietenklooster aan de Hopmarkt in Aalst (Quintelier *et al.* 2014). Tijdens dit onderzoek was men in staat het dieet te reconstrueren van mensen uit verschillende lagen van de bevolking aan de hand van isotopenonderzoek op de gevonden beenderen. De monniken, hogere (adellijke?) klasse en gewone leken leefden weliswaar op hetzelfde moment, maar hun voeding bleek een verschillende samenstelling of bron te hebben. De $\delta^{13}\text{C}$ - en $\delta^{15}\text{N}$ -waarden in de beenderen van de monastieke populatie en welgestelde leken lagen beduidend hoger dan bij de ‘gewone’ leken. De

geestelijken konden duidelijk meer vis en vlees opnemen in hun dieet dan de gewone leken. Maar ook tussen mannen en vrouwen onderling zijn er verschillen op te merken. Vrouwen bleken een minder veelzijdig dieet te hebben (minder variatie in de $\delta^{13}\text{C}$ - en $\delta^{15}\text{N}$ -waarden) dan de mannelijke helft van de onderzochte populatie, die meer proteïnen uit vlees en vis haalde. Dat laatste valt af te leiden uit de hogere $\delta^{13}\text{C}$ - en $\delta^{15}\text{N}$ -waarden in botmateriaal van mannen in vergelijking met vrouwen. De hogere (adellijke?) klasse en de monniken kunnen op basis van hun dieet niet van elkaar onderscheiden worden. Enkel tussen deze groep en de minder welvarende leken is er een duidelijk verschil in voeding, wat erop wijst dat de voedselvoorziening sterk werd beïnvloed door de socio-economisch status.



HOOFDSTUK **7**

**BAYESIAANSE
ANALYSE**

7.1 MODELLERING

De kalibratie van één radiokoolstofdatering is een rechtlijnig proces: het levert een tijdsinterval op waarbinnen – met een bepaalde waarschijnlijkheid – de werkelijke ouderdom van het gedateerde materiaal te situeren is. Het wordt al gauw complexer indien van eenzelfde activiteit of fase meerdere dateringen beschikbaar zijn, of wanneer elkaar opvolgende gebeurtenissen zijn gedateerd (met één of meerdere dateringen). Weten we bovendien dat in het laatste geval bepaalde gedateerde stalen onderling ook stratigrafisch in verband staan, dan kan deze kennis aangewend worden om de dateringen te verfijnen. Dit vereist evenwel statistische modellering en complexe berekeningen. De uitwerking van dergelijke vraagstellingen is gebaseerd op een theorema geformuleerd door de 18de-eeuwse wiskundige Thomas Bayes, dat zich op verbluffend eenvoudige wijze laat formuleren (zie figuur 23). De daaruit afgeleide *Bayesiaanse statistiek* gaat er van uit dat we op basis van nieuw opgedane ervaringen of analyses (in dit geval radiokoolstofdateringen) onze bestaande kennis over het onderzochte erfgoed (gegevens uit het archeologisch of bouwhistorisch onderzoek) evalueren en zodoende tot nieuwe kennis komen (een meer verfijnde datering en/of fasering). Met deze nieuw verworven kennis kan daarna hetzelfde proces opnieuw doorlopen worden, om onze interpretaties verder te verfijnen.

$$\begin{array}{rcc}
 \frac{P(\text{data} \mid \text{parameters})}{P(\text{data})} & \times & P(\text{parameters}) = P(\text{parameters} \mid \text{data}) \\
 \mid & & \mid \\
 \textit{standardised likelihoods} & \times & \textit{prior beliefs} = \textit{posterior beliefs} \\
 \mid & & \mid \\
 \textit{"de (radiokoolstof-) dateringen"} & \times & \textit{"de archeologische kennis"} = \textit{"geactualiseerde kennis"}
 \end{array}$$

FIG 23: De stelling van Bayes, 'vertaald' naar het erfgoedonderzoek.

De eerste component van dit model (de *standardised likelihoods*) omvat de dateringen. Dit zijn de uitgevoerde radiokoolstofmetingen op stalen die relevant zijn voor de vraagstelling. Maar ook andere natuurwetenschappelijke dateringen (dendrochronologische data, luminiscentie- of archeomagnetische dateringen, ...), dateringen op basis van muntvondsten of historisch gedocumenteerde gebeurtenissen kunnen in overweging genomen worden. In de tweede component van het Bayesiaans model (de *prior beliefs*) wordt onze huidige kennis over de relevante archeologische of bouwkundig contexten formeel vastgelegd in eenvoudige wiskundige formuleringen. Zo kan vanuit stratigrafisch oogpunt soms een relatieve chronologie opgebouwd worden, als we er bijvoorbeeld vanuit kunnen gaan dat materiaal uit dieper gelegen archeologische lagen ouder is dan het materiaal uit bovenliggende lagen. Het onderste, gedateerde staal is dan 'ouder dan' het staal uit een bovenliggende laag. In andere gevallen kan soms geen chronologische openvolging vastgesteld worden, maar wel aangenomen worden dat verschillende stalen of vondsten tot eenzelfde organisme of individu, eenzelfde bouw- of bewoningsfase, of tot eenzelfde typologische groep behoren. Ook deze gerelateerdheid is een parameter die kan meegenomen worden in het Bayesiaanse model.

Binnen het archeologisch bodemonderzoek worden de onderlinge verbanden (jonger dan, ouder dan, gelijktijdig met, zelfde fase, ...) tussen sporen en eventuele vondstenconcentraties op een archeologische site visueel voorgesteld in een **Harris-matrix** (Harris 1989). Het is exact deze informatie die uiterst relevant is om samen met de uitgevoerde radiokoolstofdateringen te evalueren in een Bayesiaans model.

Uiteindelijk wordt het Bayesiaans model gevoed met de beschikbare relevante kennis en resulteert dit in een meer verfijnde interpretatie dan mogelijk was enkel op basis van de individuele componenten. De kalibratie van de individuele radiokoolstofdateringen wordt meer verfijnd door rekening te houden met hun onderlinge verbanden. Indien de in het model opgenomen kennis relevant is voor de gemodelleerde onderzoeksvraag, zal dit uiteindelijk resulteren in gekalibreerde dateringen met een nauwer interval.

7.2 GELIJKTIJDIGHEID

Indien er voor een zelfde object of gebeurtenis meerdere radiokoolstofdateringen beschikbaar zijn, kunnen deze gecombineerd worden. Op deze manier tracht men de nauwkeurigheid op de datering te verhogen door meerdere metingen aan elkaar te toetsen. Het kan bijvoorbeeld interessant zijn als uit één graf zowel de kledij (textielresten), een stuk botmateriaal van een individu, alsook een stuk spinhout uit één van de planken van de doodskist zijn gedateerd. Indien we aannemen dat de kist en de kledij kort voor het overlijden van die persoon gemaakt zijn, kan de combinatie van al deze dateringen de sterfdatum beter benaderen dan de individuele dateringen. Andere voorbeelden zijn het combineren van de dateringen op meerdere dierlijke botfragmenten uit eenzelfde afvalcontext, of het uitvoeren van meerdere dateringen op eenzelfde mensenskelet.

Indien de gedateerde stalen afkomstig zijn uit eenzelfde individueel organisme of object – m.a.w. afkomstig van hetzelfde skelet, houten voorwerp, ... – worden de radiokoolstofdateringen gecombineerd voorafgaand aan de kalibratie (functie `R_Combine()` in OxCal: zie BIJLAGE en figuur 24). Is er echter niet voldaan aan deze voorwaarde en kunnen we enkel veronderstellen dat de datering van meerdere objecten betrekking heeft op eenzelfde gebeurtenis of activiteit, dan worden de radiokoolstofdateringen pas gecombineerd na kalibratie (functie `Combine()` in OxCal: zie BIJLAGE). Bij het uitvoeren van degelijk combinaties wordt ook telkens een statistische test toegepast om na te gaan of de gecombineerde dateringen wel degelijk eenzelfde gebeurtenis kunnen vertegenwoordigen.

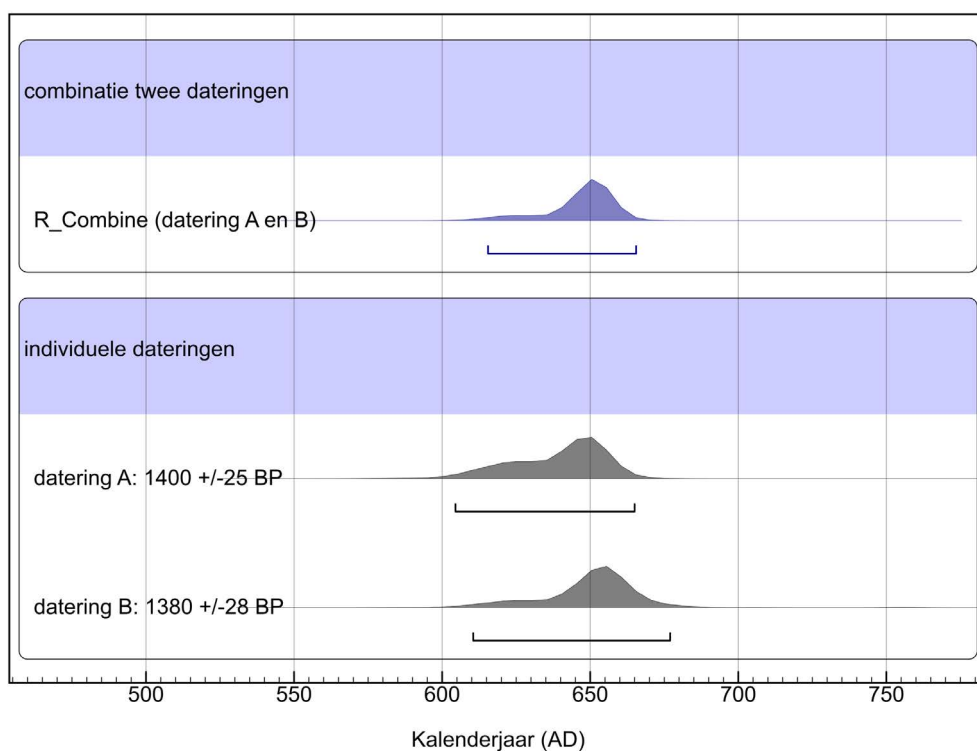


FIG 24: Fictief voorbeeld waarbij twee dateringen voorafgaand aan de kalibratie worden gecombineerd.

De vraagstelling kan natuurlijk ook omgedraaid worden: hoe waarschijnlijk is het dat twee dateringen niet eenzelfde gebeurtenis vertegenwoordigen? Om op die vraag te antwoorden kan er een waarschijnlijkheidsdistributie worden opgebouwd voor het veronderstelde chronologisch verschil. Dit geeft dan ook meteen een beeld van het mogelijke chronologische verschil in jaren tussen beide dateringen (functie `Difference()` in OxCal: zie BIJLAGE). Aangezien radiokoolstofdateringen dikwijls een grillig en breed tijdsinterval hebben na kalibratie, is het niet altijd eenvoudig om (on)gelijktijdigheid vast te stellen indien er slechts een (kleine) overlap is tussen twee dateringen (zie voorbeeld in figuur 25).

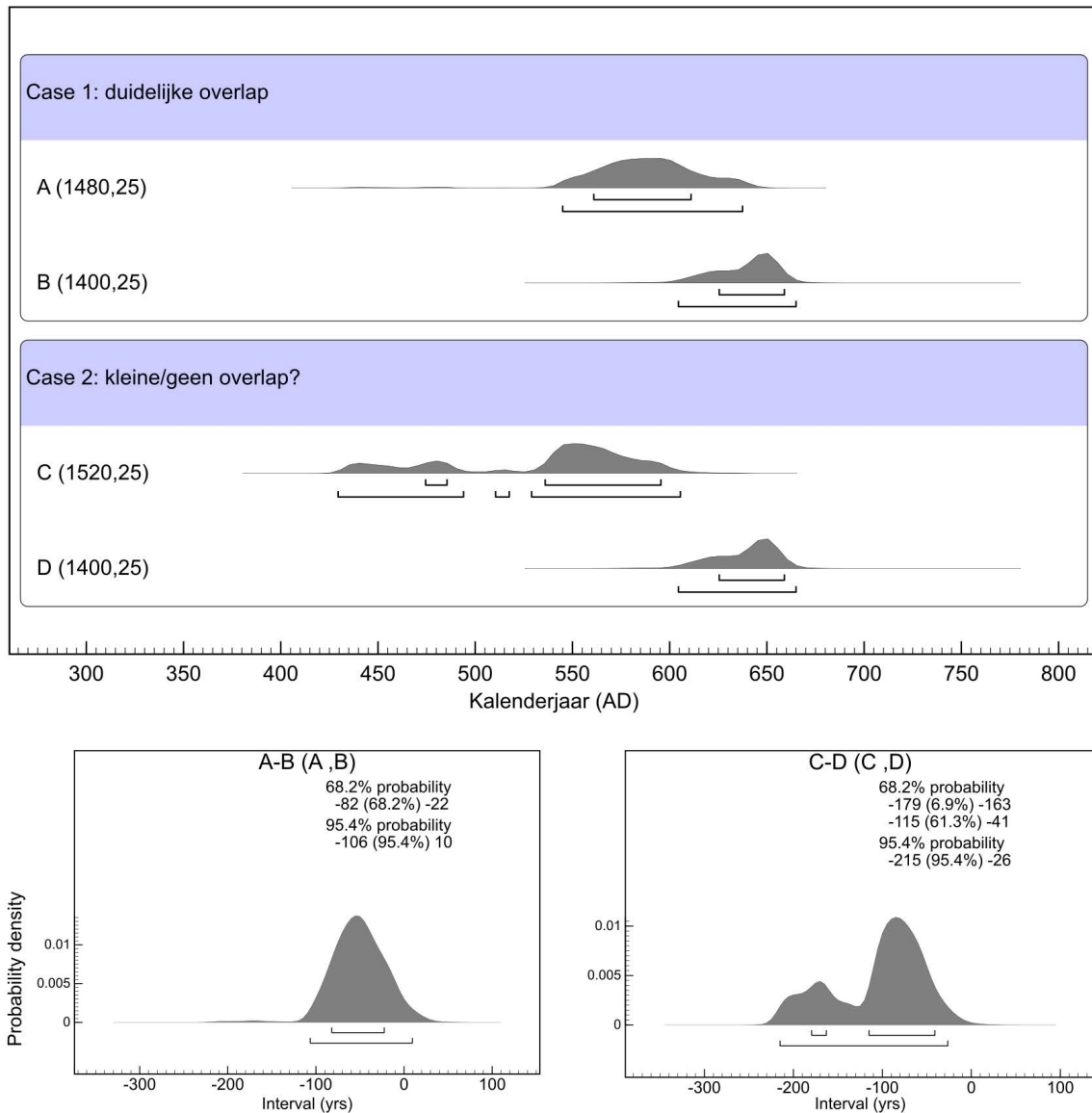


FIG 25: Waarschijnlijkheidsdistributie van het verschil tussen telkens twee radiokoolstofdateringen (A en B, C en D). Tussen de dateringen A en B is er statistisch gezien geen duidelijk verschil: ze kunnen ook overlappen (interval omvat 0 jaar, met 95,4% probabiliteit). Tussen datering C en D is er een chronologisch verschil: datering C is tussen de 26 en 215 jaar ouder dan D, met 95,4% probabiliteit.

7.3 SEQUENTIES EN FASERING

Indien de onderlinge samenhang en opeenvolging van radiokoolstofdateringen gekend is, kan deze informatie bijdragen tot een nauwere datering van gebeurtenissen. Door een model op te bouwen, en dit via Bayesiaanse analyse statistisch uit te werken, kunnen verschillende fases en gebeurtenissen nauwkeuriger in de tijd te situeren zijn. Op basis van de individuele dateringen is dergelijke verfijning niet mogelijk. De twee meest voorkomende begrippen die hier van belang zijn, zijn fases en sequenties:

- **Fase:** verzameling van gebeurtenissen die samen een coherente, contextuele groep vormen, zonder informatie over de interne chronologische ordening (bv. dateringen uit eenzelfde archeologische laag).
- **Sequentie:** verzameling van gebeurtenissen die samen een coherente, contextuele groep vormen waarbij de onderlinge chronologische volgorde gekend is (bv. dateringen uit een stratigrafische gelaagdheid).

Binnen een fase is de chronologische verhouding tussen de gedateerde monsters niet gekend. Bij een sequentie is de opeenvolging van de verschillende dateringen wel van belang. Beide groeperingen kunnen door elkaar gebruikt worden. Zo kunnen er binnen één sequentie meerdere fasen aanwezig zijn, waarbij de fasen onderling in stratigrafisch verband te brengen zijn, maar er binnen de verschillende fasen geen chronologische ordening van de dateringen kan opgesteld worden. Door voor een reeks van dateringen de informatie rond hun sequentie (voorafgaand) in het model in te brengen, kan het dateringsinterval op de individuele gekalibreerde dateringen nauwer berekend worden. In onderstaand voorbeeld worden vier gedateerde stalen uit boven elkaar liggende archeologische lagen in een sequentie gemodelleerd. Na modellering zijn de mogelijke kalenderjaren voor elke datering terug te brengen tot een enger interval, doordat rekening is gehouden met de onderlinge samenhang van de individuele dateringen (figuur 26).

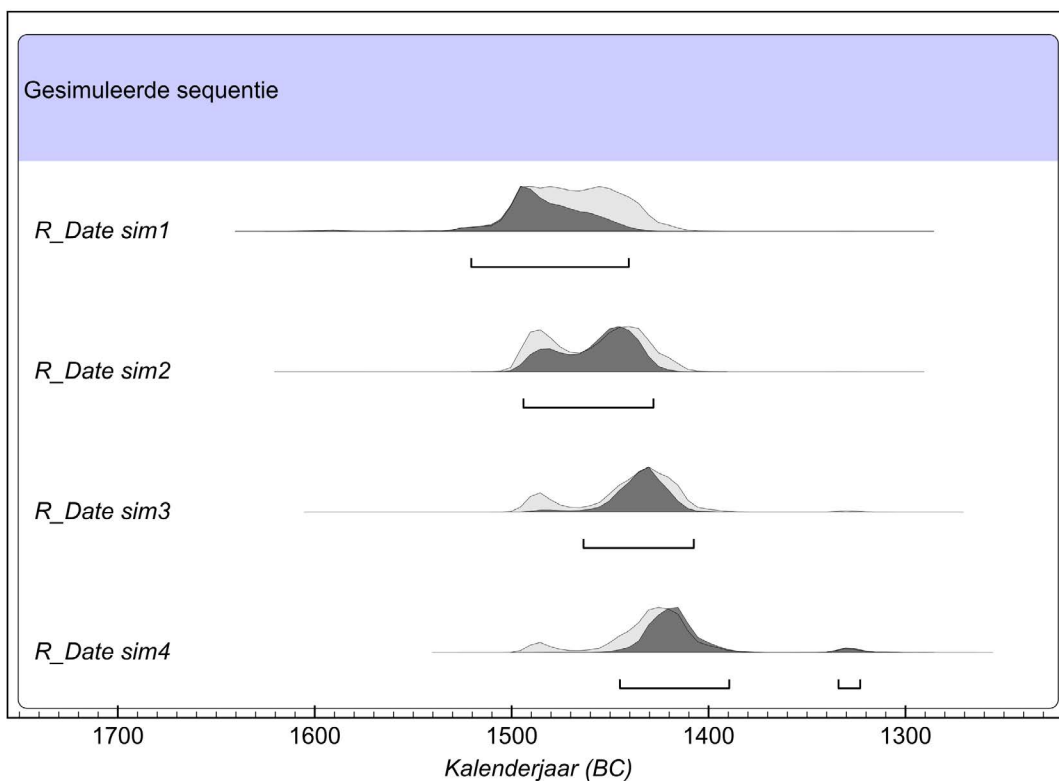


FIG 26: Een gemodelleerde sequentie van vier individuele dateringen die elkaar chronologisch opvolgen. De kalibratie van de individuele radiokoolstofdateringen (grijze verdeling) kan door rekening te houden met hun gekende chronologische volgorde, verfijnd worden (zwarte verdeling).

Naast het verfijnen van de dateringen, kan een Bayesiaanse analyse ook een antwoord bieden op vragen die niet rechtstreeks uit de individuele dateringen kunnen afgeleid worden: zoals de **duur van een bepaalde fase** of het geschatte **tijdstip van opgave** van een bepaalde site. Deze berekeningen resulteren in een waarschijnlijkheidsverdeling waaruit – met een vooropgestelde probabilliteit – de duur of datering van de gebeurtenis kan worden afgeleid.

De radiokoolstofdateringen die beschikbaar zijn voor één bepaalde sequentie of fase geven niet noodzakelijk een goede afbakening voor het begin en einde van die fase. Hoe minder gedateerde elementen uit het oudste deel van een bepaalde fase, of uit de vroegste fase van een sequentie, hoe minder waarschijnlijk het is dat de oudste datering effectief het oudste element is uit die fase, waardoor je minder zeker bent van de datering van de aanvang van die fase, en van de eventuele sequentie. Hetzelfde geldt – omgekeerd – voor het einde van een fase of een sequentie. OxCal tracht daaraan tegemoet te komen door, uitgaande van de veronderstelling dat de radiokoolstofdateringen uniform tussen begin en eindpunt verspreid liggen, een interval te berekenen waar binnen het werkelijke aanvangs- en eindpunt begrepen is. Dit moet in het model ingevoerd door grenzen – **boundaries** – te definiëren en zo de verschillende groepen duidelijk af te bakenen.

7.4 HISTORISCHE GEBEURTENISSEN EN GEKENDE IJKPUNTEN

Gekende historische gebeurtenissen, muntvondsten, of gedateerde documenten kunnen in bepaalde gevallen als ijkpunten gebruikt worden bij het dateren en interpreteren van archeologische vondsten of sporen of van bouwfases in historische gebouwen. De uitgevoerde radiokoolstofdateringen kunnen dan met zekerheid voor of na een bepaalde kalenderdatum gesitueerd worden. Aangezien gekalibreerde radiokoolstofdateringen vaak een ruim dateringsinterval opleveren, kan – indien dit interval een gekende historische datum omvat – deze een *terminus post of ante quem* voor een individuele radiokoolstofdatering vormen, of zelfs voor een sequentie van radiokoolstofdateringen.

Een dendrochronologische datering kan op een gelijkaardige manier gekoppeld worden aan gerelateerde radiokoolstofdateringen. Indien een kapdatum exact werd bepaald, kan deze dendrochronologische datering een *terminus* vormen voor de gebeurtenis die men wil dateren (bv. een bouwfase). Een dendrochronologische analyse resulteert soms ook in 'vroegst mogelijke kapdatum' of dateringsinterval waar binnen de werkelijke kapdatum zich situeert. Ook deze dateringsinformatie kan opgenomen worden in een Bayesiaans model.

7.5 GESOMMEERDE PROBABILITEITEN

Indien uit een bepaalde context, periode of regio een ruim aantal radiokoolstofdateringen van een zelfde cultureel of natuurlijk fenomeen beschikbaar zijn, kan de som van hun probabiliteiten (waarschijnlijkheidsfuncties) meer duidelijkheid bieden over de chronologische spreiding, en het voorkomen van hiaten of piekmomenten in dit fenomeen doorheen de tijd. De gekalibreerde, individuele radiokoolstofdateringen worden bij elkaar opgeteld door de probabiliteit geassocieerd met elke datering per afzonderlijk kalenderjaar te sommeren.

Uit kritische evaluaties van deze methode blijkt echter dat de gesommeerde probabiliteiten met de nodige voorzichtigheid moeten geïnterpreteerd worden (Contreras & Meadows 2014; Steele 2010; Williams 2012). De vorm van de kalibratiecurve heeft immers een duidelijke invloed op het eindresultaat en uit de analyses blijkt dat er heel veel radiokoolstofdateringen nodig zijn om tot een stabiel resultaat te komen. De uiteindelijke waarschijnlijkheden (*probability density*) mogen ook niet als absolute waarden geïnterpreteerd worden. Toch geven de gesommeerde probabiliteiten van een grote groep van radiokoolstofdateringen een visueel beeld van de evolutie van een bepaald fenomeen doorheen de tijd. Het voorkomen van hiaten kan op deze manier soms duidelijk gevisualiseerd worden (figuur 27).

Ook van objecten met gelijkaardige stilistische kenmerken – zoals bijvoorbeeld textiel – kan op deze manier de aanvangs- en bloeiperiode in beeld gebracht worden door de beschikbare radiokoolstofdateringen te sommeren en daaruit de meest waarschijnlijke chronologische afbakening af te leiden (De Moor *et al.* 2011).

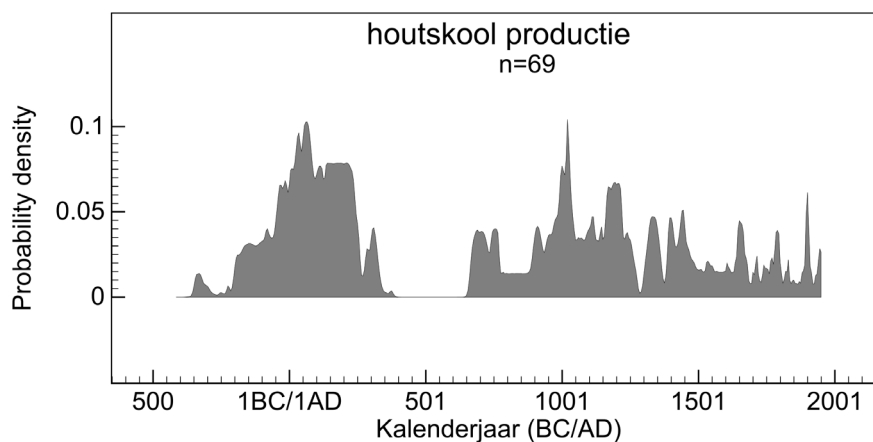


FIG 27: Voorbeeld van een probabiiteitssom van 69 radiokoolstofdateringen op stukjes houtschool uit houtschoolmeilers.

7.6 WIGGLE MATCHING

Voor het dateren van houten structuren wordt doorgaans eerst aan een dendrochronologisch onderzoek gedacht. Niet alle dendrochronologische analyses leveren echter een datering op. In sommige gevallen laten de opgemeten groeiringspatronen zich niet inpassen in een referentiekalender of worden de stukken hout niet voor datering weerhouden omdat ze te weinig groeiringen hebben (wat de uitkomst van elke analyse onzeker of zelfs onbetrouwbaar maakt). Dan vormt een radiokoolstofdatering van bijvoorbeeld de jongste groeiring het beste alternatief. Dit zal, na kalibratie, echter doorgaans een breed dateringsinterval opleveren. Indien er toch een preciezere datering gewenst is, kan *wiggle matching* overwogen worden. Dit is eigenlijk een bijzonder geval van Bayesiaanse modelering. De techniek levert een veel nauwkeuriger datering op dan een individuele ^{14}C -datering. Zeker voor het dateren van historische houtconstructies kan deze techniek dus van groot nut zijn.

Op een stuk hout worden dan, aan de hand van het groeiringspatroon, verschillende bemonsteringspunten vastgelegd, met een gekend interval (= aantal jaarringen) tussen de verschillende punten (figuur 28). Op elk van deze punten wordt een radiokoolstofanalyse uitgevoerd en de resultaten hiervan in een Bayesiaans model gebracht. De waarschijnlijkheidsdistributies van de individuele dateringen kunnen dan nauwer worden door de met absolute zekerheid gekende sequentie van oud naar jong en het exacte leeftijdsverschil tussen de dateringen in rekening te brengen.

Wiggle matching biedt ook een uitkomst om houtsoorten te dateren waarvoor geen dendrochronologische kalenders beschikbaar zijn of waarbij de groei en de anatomie de toepassing van de techniek niet toelaten. In principe heeft de houtsoort geen belang zolang er maar jaarringen kunnen onderscheiden worden.

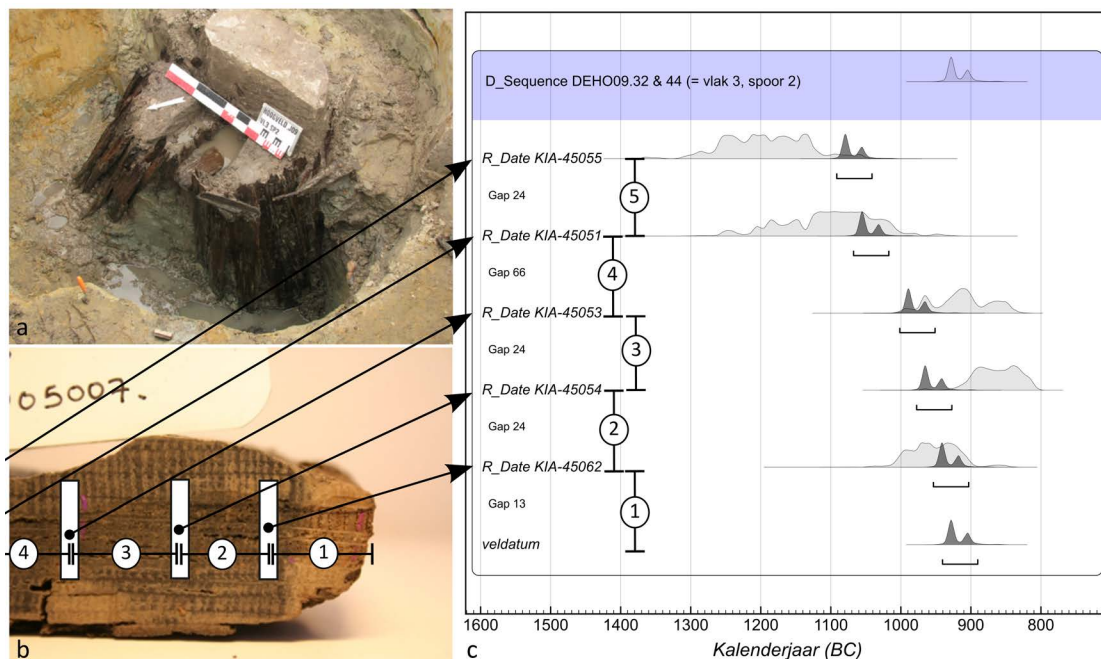


FIG 28: *Wiggle matching* uitgevoerd op een plank van een waterputbekisting uit de late bronstijd (a). Vijf stalen waarop een radiokoolstofdatering werd uitgevoerd (b) worden in een wiskundig model aan elkaar verbonden door de tussenafstand, uitgedrukt in aantal jaarringen, in het model op te nemen (c). Het opgebouwde model laat toe om de veldatum van dit stuk hout veel preciezer te bepalen dan op basis van de individuele radiokoolstofdateringen mogelijk is.

7.7 VALKUILEN

Elk opgebouwd Bayesiaans model kan en moet uiteraard ook statistisch worden gevalideerd. Dit gebeurt aan de hand van statistische testen (t -test, χ^2 -test) of door het berekenen van een *agreement index* (zie handleiding OxCal in BIJLAGE voor meer detail). Een model berekent namelijk steeds een resultaat, maar geeft zonder bijkomende validatie niet aan of dit ook betekenisvol is.

Tot slot moet zeker nog worden opgemerkt dat de Bayesiaanse modellering van radiokoolstofdateringen staat of valt met de kwaliteit en betrouwbaarheid van de veronderstelde *prior* kennis (figuur 23). Wordt verkeerdelijk de datering van intrusief materiaal mee opgenomen in het model, dan loopt de initiële interpretatie van een sequentie fout. Worden de dateringen beïnvloed door een reservoir- of oud-houteffect, dan zal de uitkomst van het model (de *posterior beliefs*) betekenisloos zijn. Een Bayesiaans model is maar zo sterk als de veronderstellingen waarmee het is opgebouwd. Tijdens het modelleren van radiokoolstofdateringen dringt zich steeds een kritische evaluatie op van de reeds opgedane, en als 'waarheid' veronderstelde kennis.

“Een Bayesiaans model is maar zo sterk als de veronderstellingen
waarmee het is opgebouwd.”



BRONNEN

- ALVES E.Q., MACARIO K., ASCOUGH P. & BRONK RAMSEY C. 2018: The worldwide marine radiocarbon reservoir effect: definitions, mechanisms, and prospects. *Reviews of Geophysics* 56.1, 278-305.
- AMUNDSON R., AUSTIN A.T., SCHUUR E.A.G., YOO K., MATZEK V., KENDALL C., UEBERSAX A., BRENNER D. & BAISDEN W.T. 2003: Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles* 17.1, 1-10.
- ARNOLD J.R. & LIBBY W.F. 1949: Age determinations by radiocarbon content: checks with samples of known age. *Science* 110, 678-680.
- ASHMORE P. 1999: Single Entity Dating, in: EVIN J. (ed.), *¹⁴C et archéologie: 3ème congrès international // ¹⁴C and archaeology: 3rd international symposium; Lyon, 6 - 10 avril 1998*. Mémoires de la Société Préhistorique Française, Société Préhistorique Française, Paris, 65-71.
- BECK L., CAFFY I., DELQUÉ-KOLIČ E., MOREAU C., DUMOULIN J.-P., PERRON M. GUICHARD H. & JEAMMET V. 2018: Absolute dating of lead carbonates in ancient cosmetics by radiocarbon. *Communications Chemistry* 1.34. [online: <https://doi.org/10.1038/s42004-018-0034-y>]
- BRONK RAMSEY C. 1995: Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal program. *Radiocarbon* 37, 425-430.
- BRONK RAMSEY C. 2001: Development of the radiocarbon program OxCal. *Radiocarbon* 43, 355-363.
- BRONK RAMSEY C. 2009: Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, 337-360.
- CONTRERAS D.A. & MEADOWS J. 2014: Summed radiocarbon calibrations as a population proxy: a critical evaluation using a realistic simulation approach. *Journal of Archaeological Science* 52, 591-608.
- COOK A.C., SOUTHON J.R. & WADSWORTH J. 2003: Using radiocarbon dating to establish the age of iron-based artifacts. *JOM* 55, 15-22.
- COOK G.T., BONSALL C., HEDGES R.E.M., MCSWEENEY K., BORONEANT V., BARTOSIEWICZ L. & PETTITT P.B. 2002: Problems of dating human bones from the Iron Gates. *Antiquity* 76, 77-85.
- DEBRUYNE S., ERVYNCK A. & HANECA K. 2013: *Waterputten als archeologische informatiebron*, Handleiding agentschap Onroerend Erfgoed 2. Agentschap Onroerend Erfgoed, Brussel. [online: <https://oar.onroerenderfgoed.be/uitgave/528>]
- DEFORCE K. 2009: De houtskoolresten, in: HILLEWAERT B. & HOLLEVOET Y. (red.), *Vondsten uit vuur: Romeins grafveld met nederzettingssporen aan de Hoge Dijken in Jabbeke*. Van de Wiele, Brugge, 38-41.
- DE MOOR A., VAN STRYDONCK M., BOUDIN M. & BÉNAZETH D. 2011: Radiocarbon dating of brocaded furnishing textiles and tunics from Katoen Natie and The Musée du Louvre, in: DE MOOR A. & FLUCK C. (eds.), *Dress Accessories of the 1st Millennium AD from Egypt*. Lannoo, Tielt, pp. 261-271.
- ERVYNCK A. 2003: De introductie van het konijn in de Lage Landen: een verkeerde datering voor vondsten uit een latrine bij de abtswoning van de Sint-Salvatorsabdij te Ename (stad Oudenaarde, prov. Oost-Vlaanderen). *Archeologie in Vlaanderen* VII, 111-114.
- ERVYNCK A., HILLEWAERT B., MAES A. & VAN STRYDONCK M. 2003: Tanning and horn-working at late- and post-medieval Brugge: the organic evidence, in: MURPHY P. & WILTSHIRE P. (eds.), *The environmental archaeology of industry*. Oxford, Oxbow Books, 60-70.
- ERVYNCK A., DEBRUYNE S. & RIBBENS R. 2015: *Assessment*. Een handleiding voor de archeoloog. Onroerend Erfgoed Handleidingen 9, Brussel. [online: <https://oar.onroerenderfgoed.be/uitgave/536>].
- ERVYNCK A., BOUDIN M. & VAN NEER W. 2018: Assessing the radiocarbon freshwater reservoir effect for a North-west-European river system (the Schelde basin, Belgium). *Radiocarbon* 60, 395-417.
- HANECA K. 2017: *Dendrochronologie en erfgoedonderzoek*. Onroerend Erfgoed Handleidingen 16, Brussel. [online: <https://oar.onroerenderfgoed.be/uitgave/251>]

- HAJDAS I., LINDROOS A., HEINEMEIER J., RINGBOM Å., MARZAIOLI F., TERRASI F., PASSARIELLO I., CAPANO M., ARTIOLI G., ADDIS A., SECCO M., MICHALSKA D., CZERNIK J., GOSLAR T., HAYEN R., VAN STRYDONCK M., FONTAINE L., BOUDIN M., MASPERO F., PANZERI L., GALLI A., URBANOVÁ P. & GUIBERT P. 2017: Preparation and dating of mortar samples—mortar dating inter-comparison study (MODIS). *Radiocarbon* 59, 1-14.
- HARRIS E.C. 1989: *Principles of Archaeological Stratigraphy (2nd ed.)*. Academic Press, London.
- HEINEMEIER J., RINGBOM A., LINDROOS A. & SVEINBJORNSDOTTIR A.E. 2010: Successful AMS C-14 dating of non-hydraulic lime mortars from the medieval churches of the Åland Islands, Finland. *Radiocarbon* 52, 171-204.
- HUA Q., BARBETTI M. & RAKOWSKI A.Z. 2013: Atmospheric radiocarbon for the period 1950-2010. *Radiocarbon* 55, 2059-2072.
- MÜLDNER G.H. 2009: Investigating medieval diet and society by stable isotope analysis of human bone, in: GILCHRIST R. & REYNOLDS A. (eds.), *Reflections: 50 Years of Medieval Archaeology*. Maney, Leeds, 327-346.
- OLSEN J., HEINEMEIER J., HORNSTRUP K.M., BENNIKE P. & THRANE H. 2013: 'Old wood' effect in radiocarbon dating of prehistoric cremated bones? *Journal of Archaeological Science* 40, 30-34.
- QUINTELIER K., ERVYNCK A., MÜLDNER G., VAN NEER W., RICHARDS M.P. & FULLER B.T. 2013: Isotopic examination of links between diet, social differentiation, and DISH at the post-medieval Carmelite Friary of Aalst, Belgium. *American Journal of Physical Anthropology* 153.2, 203-213.
- REIMER P.J., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BLACKWELL P.G., RAMSEY C.B., BUCK C.E., CHENG H., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERSON T.P., HAFLIDASON H., HAJDAS I., HATTÉ C., HEATON T.J., HOFFMANN D.L., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KAISER K.F., KROMER B., MANNING S.W., NIU M., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SCOTT E.M., SOUTHON J.R., STAFF R.A., TURNEY C.S.M. & VAN DER PLICHT J. 2013: Intcal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869-1887.
- SNOECK C., BROCK F. & SCHULTING R.J. 2014: Carbon exchanges between bone apatite and fuels during cremation: impact on radiocarbon dates. *Radiocarbon* 56, 591-602.
- STEELE J. 2010: Radiocarbon dates as data: quantitative strategies for estimating colonization front speeds and event densities. *Journal of Archaeological Science* 37, 2017-2030.
- STUIVER M. & POLACH H.A. 1977: Reporting of C-14 Data - Discussion. *Radiocarbon* 19, 355-363.
- TAYLOR R.E. 1987: *Radiocarbon dating: an archaeological perspective*. Academic Press, Orlando.
- UBELAKER D.H., THOMAS C. & OLSON J.E. 2015: The impact of age at death on the lag time of radiocarbon values in human bone. *Forensic Science International* 251, 56-60.
- VAN BALEN K., VAN BOMMEL B., VAN HEES R., VAN HUNEN M., VAN RHIJN J. & VAN ROODEN M. 2003: *Kalkboek. Het gebruik van kalk als bindmiddel voor metsel- en voegmortels in verleden en heden*. Rijksdienst voor de Monumentenzorg, Zeist.
- VAN RIJN P. 2003: Het houtonderzoek, in: SIER M.M. (red.), *Ellewoutsdijk in de Romeinse tijd*. ADC rapport 200, 104-138.
- VAN STRYDONCK M. 2016: Radiocarbon dating. *Topics in Current Chemistry* 374, 347-364.
- VAN STRYDONCK M., CROMBÉ P. & MAES A., 2001: The site of Verrebroek 'dok' and its contribution to the absolute dating of the Mesolithic in the Low Countries. *Radiocarbon* 43, 997-1005.
- VAN STRYDONCK M., BOUDIN M. & DE MULDER G. 2010: The carbon origin of structural carbonate in bone apatite of cremated bones. *Radiocarbon* 52, 578-586.
- WILLIAMS A.N. 2012: The use of summed radiocarbon probability distributions in archaeology: a review of methods. *Journal of Archaeological Science* 39, 578-589.



BEGRIPPEN

AD: Afkorting van *anno domini* (Lat. "in het jaar van de Heer"). Het kalenderjaar geteld vanaf het geboortjaar van Christus, volgens de christelijke Gregoriaanse jaartelling.

Bast: Dit weefsel wordt door het cambium naar de buitenzijde van de boom aangemaakt. Het staat in voor transport van voedingsstoffen en andere assimilaten, die door fotosynthese in de bladeren worden aangemaakt, naar de overige delen van een boom. Aan de buitenzijde van de bast vormt zich een cambium dat kurkweefsel aanmaakt (= de schors).

BC: Afkorting van *before Christ* (Eng. "vóór Christus"). Het kalenderjaar geteld voorafgaand aan het geboortjaar van Christus, volgens de christelijke Gregoriaanse jaartelling.

BP: *before present*. Het jaar 1950 AD geldt voor ¹⁴C-dateringen als het jaar 0 (*the present*). Alle radiokoolstofdateringen worden uitgedrukt in het aantal jaar voor 1950.

Cal. BP: Gekalibreerde radiokoolstofdatering, uitgedrukt in het aantal kalenderjaren voor 1950 AD.

Cambium: Weefsellaag aan de buitenzijde van de stam of takken van struiken en bomen, waar nieuwe cellen worden aangemaakt. Dit (deel)weefsel zorgt voor de aanmaak van nieuw hout (xyleem) en bast (floëem).

Correlatiecoëfficiënt: Statistische maat die de samenhang/overeenkomst tussen twee variabelen uitdrukt. Ze varieert tussen 0 en 1. Een hoge correlatiecoëfficiënt geeft aan dat de waarden van de beide variabelen een zelfde (positieve correlatiecoëfficiënt) of een tegengesteld (negatieve correlatiecoëfficiënt) verband vertonen.

Dendrochronologie of jaarringonderzoek: De wetenschappelijke discipline waarbij de datering van groeiringen in hout centraal staat. De opeenvolgende groeiringen worden hierbij beschouwd als een kalender, waarbij men als het ware terug kan gaan in de tijd door de groeiringen van een boom één voor één te registreren.

Isotoop: Atomen van een zelfde chemisch element met een verschillende opbouw van de kern, meer bepaald variërende aantallen neutronen. De meeste chemische elementen hebben meerdere isotopen.

Kalibratiecurve: Visualisatie van de relatie tussen de gemeten radiokoolstofouderdom en de werkelijke ouderdom (uitgedrukt in kalenderjaren) van een geanalyseerd monster. De kalibratiecurve wijkt sterk af van een rechte lijn door de natuurlijke schommelingen in het ¹⁴C-gehalte van de atmosfeer. Een kalibratiecurve wordt opgesteld door het dateren van monsters met een exact gekende ouderdom (bv. dendrochronologisch gedateerde stukken hout, varven in meersedimenten of druipstenen).

Radiokoolstof (¹⁴C): Radioactieve isotoop van koolstof met 8 neutronen in de kern. De meest voorkomende vorm van koolstof (¹²C) is volkomen stabiel en heeft 12 kerndeeltjes (6 protonen + 6 neutronen).

Schors: het weefsel dat zich aan de buitenzijde van stam en wortels bevindt. Het bestaat grotendeels uit dode cellen (kurkweefsel) dat wordt aangemaakt vanuit een cambium, op de overgang tussen schors en bast.

Spinhout: Levend of fysiologisch actief deel van het hout. Het spinhout verzorgt de sapstroom in de stam en dient als opslagplaats voor voedingsstoffen. Het heeft exact dezelfde structuur als het kernhout, maar bij het spinhout zijn de transportkanalen (vaten) nog grotendeels vrij. Het bevindt zich tussen het kernhout en de bast van de boom. Het spinhout is bij eik, net zoals bij veel andere houtsoorten, gekenmerkt door een lichtere kleur dan het kernhout.


Standaardafwijking: (ook wel standaarddeviatie): De statistische maatstaf van de spreiding van een variabele rond zijn gemiddelde.

Terminus post quem: Vroegst mogelijke tijdstip (ondergrens) waarop een gebeurtenis kan hebben plaatsgevonden.

Terminus ante quem: Laatst mogelijke tijdstip (bovengrens) waarop een gebeurtenis kan hebben plaatsgevonden.

Trofisch niveau: De plaats van een organisme (plant, dier, eencellige, ...) in de globale voedselketen. Een trofisch niveau bestaat uit een groep organismen met eenzelfde type voeding.

Wiggle matching: Combinatie van meerdere radiokoolstofdateringen met een onderling gekende tussenafstand en schikking in de tijd om zo de precisie van de gekalibreerde radiokoolstofdateringen te verhogen.



**BIJLAGE:
HANDLEIDING
OXCAL**

1. INLEIDING

Van zodra je de resultaten van het radiokoolstoflabo in handen hebt, kan je er zelf mee aan de slag. De conventionele radiokoolstofdateringen kan je dan kalibreren (en – wat handig is – vroegere dateringen opnieuw kalibreren) en de resultaten op een voor jou logische, geordende en visueel aantrekkelijke manier voorstellen in een grafiek. Bijkomende inzichten uit het archeologisch onderzoek, de geregistreeerde stratigrafie of relevante historische bronnen laten bovendien toe de resultaten verder te verfijnen of te groeperen, en zogenaamde Bayesiaanse analyses uit te voeren (zie Handleiding, hoofdstuk 7). Deze aanpak vraagt enig inzicht in de materie, de context van het onderzochte staal en hulp van gespecialiseerde software die dergelijke berekeningen kan uitvoeren. De kalibratie van radiokoolstofmetingen vraagt immers complexe wiskundige bewerkingen. Het meest uitgebreide en tevens meest populaire softwarepakket dat hiervoor wordt gebruikt is OxCal, het kalibratieprogramma ontwikkeld door C. Bronk Ramsey van de *Oxford Radiocarbon Accelerator Unit* (Bronk Ramsey 1995, 2001, 2009). Het volledige softwarepakket is online vrij te gebruiken. Naast de mogelijkheid om radiokoolstofdateringen te kalibreren, laat het ook toe de dateringen met Bayesiaanse modellen te analyseren.

Er zijn uiteraard nog een aantal andere alternatieven, die eveneens vrij te downloaden zijn:

- CALIB, online en te downloaden pakket, ontwikkeld door M. Stuiver, P.J. Reimer, & R.W. Reimer: [<http://calib.org/calib/>]
- CalPal, de 'Cologne radiocarbon calibration & paleoclimate research package': [<http://www.calpal-online.de/>]
- BCal, een kalibratieprogramma van de University of Sheffield: [<http://bcal.shef.ac.uk/>]
- Bchron, een kalibratieprogramma als R-package: [<https://cran.r-project.org/web/packages/Bchron/vignettes/Bchron.html>]. 'R' is een statistische programmeertaal.

OxCal blinkt echter uit in veelzijdigheid. De analyses die het pakket kan uitvoeren kunnen grofweg onderverdeeld worden in twee groepen:

- Het kalibreren van radiokoolstofmetingen.
- Het analyseren van groepen van radiokoolstofanalyses, rekening houdend met hun onderlinge samenhang, op basis van chronologische of stratigrafische informatie.

Beide types van analyse worden in onderstaande handleiding behandeld en geïllustreerd met een aantal voorbeelden¹. Alle behandelde functies en uitgewerkte voorbeelden in deze handleiding voor OxCal zijn gebaseerd op versie 4.3 [build 114, 14/08/2018]. Een meer uitgebreide handleiding voor dit programma is te vinden via de online manual: http://c14.arch.ox.ac.uk/oxcalhelp/hlp_contents.html. Daarin worden ook meer geavanceerde toepassingen behandeld, die niet in deze handleiding zijn opgenomen.

Het programma OxCal is toegankelijk via de website <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/> en kan je kosteloos gebruiken. Wie deze link volgt, krijgt steeds toegang tot de meest stabiele en meest recente versie van het programma. Bij het eerste gebruik moet je een persoonlijke account aanmaken, waarmee je daarna kan inloggen (figuur B.1), nieuwe projecten aanmaken en je reeds eerder uitgevoerde en bewaarde analyses opnieuw oproepen.

FIG B.1: Inlogscherm voor OxCal op <https://c14.arch.ox.ac.uk/login>.

Je kan OxCal ook lokaal installeren op je PC/laptop. Volg hiervoor de instructies op <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html#program>. Regelmatig de software updaten naar de meest recente versie blijft dan wel nodig. De online versie is daarentegen steeds up-to-date.

2 KALIBREREN

De meest gebruikte analyse binnen OxCal is het kalibreren van radiokoolstofdateringen. Daarbij wordt een conventionele radiokoolstofdatering, gerapporteerd in jaren BP, omgerekend naar kalenderjaren (BC of AD).

2.1 KALIBRATIE VAN ÉÉN DATERING

Bij het opstarten van OxCal krijgen we het openingsscherm te zien dat meteen toelaat om een ^{14}C -datering te kalibreren (linksboven op figuur B.2).

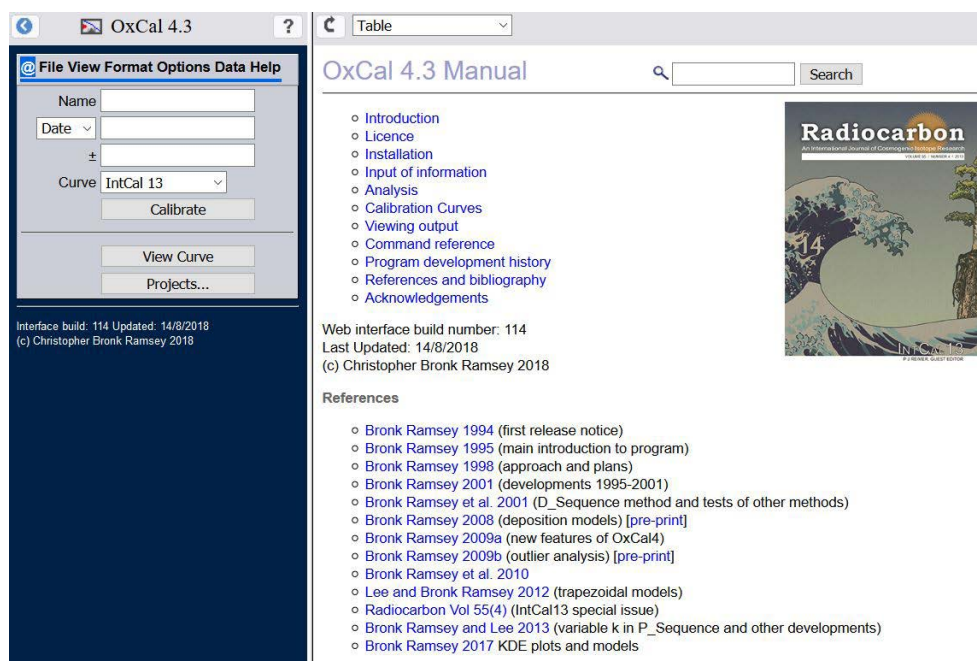


FIG B.2: Openingsscherm van OxCal. Linksboven kan je een individuele radiokoolstofdatering invoeren en kalibreren.

Volgende velden vragen om input:

- **Name:** in dit veld wordt bij voorkeur de unieke code van de radiokoolstofanalyse, inclusief de afkorting van het labo dat de analyse uitvoerde, ingevuld (bv. RICH-12345, Beta-98765, ...)
- **Date:** hier wordt de conventionele radiokoolstofdatering, in jaren BP ingevuld (bv. 1599)
- **±:** de standaardafwijking op de radiokoolstofdatering (bv. 29)
- **Curve:** hier selecteer je de naam van de kalibratiecurve die je wil gebruiken. Doorgaans is dit de meest recente kalibratiecurve, wat nu (dd. januari 2019) de **IntCal13**-kalibratiecurve is (Reimer *et al.* 2013). Voor de kalibratie van een radiokoolstofdatering uitgevoerd op materiaal uit een marien reservoir moet een andere curve gekozen worden. Ook de oudere kalibratiecurven worden mee geïnstalleerd en zijn te selecteren indien gewenst. Dit kan handig zijn bij de evaluatie van oudere, in het verleden gepubliceerde dateringen.

Door de knop [**Calibrate**] aan te klikken wordt de kalibratie uitgevoerd en het resultaat meteen in een grafiek voorgesteld (figuur B.3).

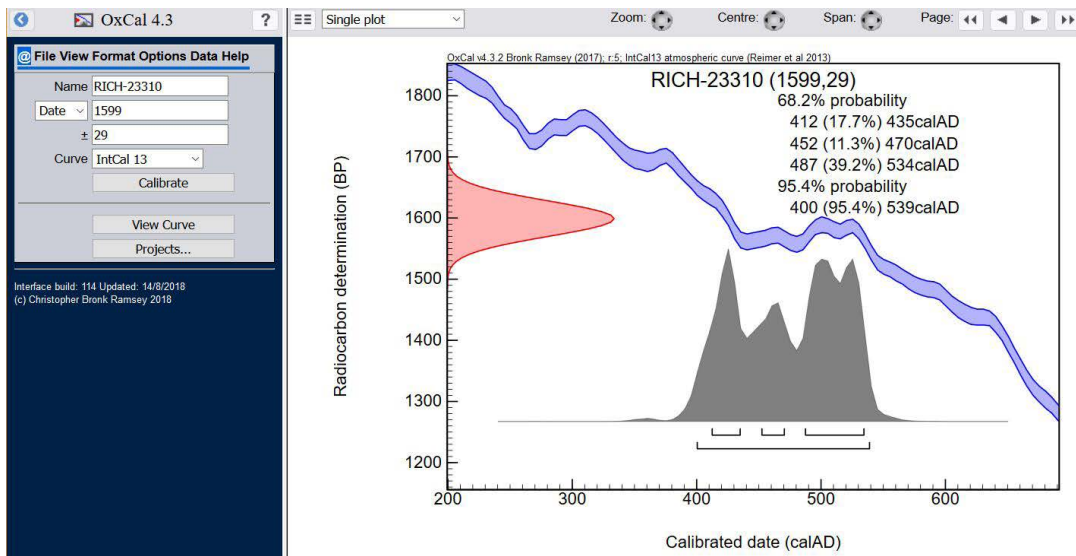


FIG B.3: Grafische voorstelling van een gekalibreerde radiokoolstofdatering.

De vormgeving van deze grafiek kan je daarna nog aanpassen in het menu **[Format]** (figuur B.4). Daar kan je op het tabblad **Show** kiezen welk betrouwbaarheidsinterval (68,2%, 95,4% en/of 99,7%) en wat voor variabelen (*mean* = gemiddelde, *sigma* = standaardafwijking, *median* = mediaan) je wil weergeven. Het bereik van de assen en de zoom-factor kan je eveneens aanpassen naar eigen voorkeur, via het tabblad **Adjust** of de pijltoetsen **[Zoom]**, **[Centre]** en **[Span]** in de werkbalk boven de grafiek.

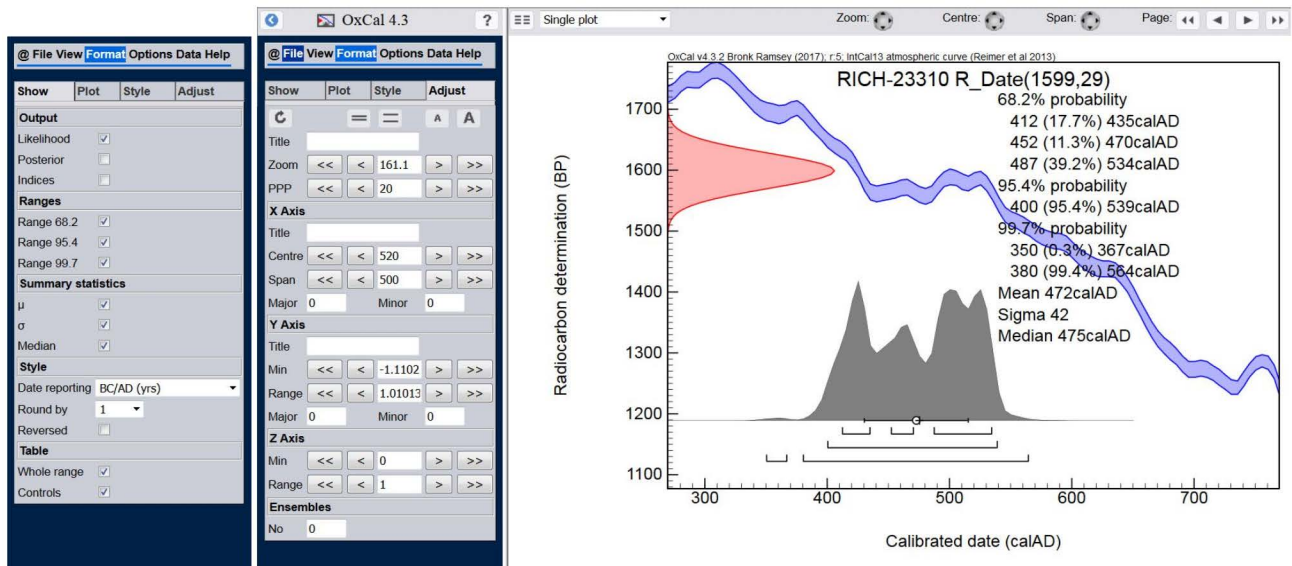


FIG B.4: De lay-out van de grafieken kan via het menu [Format] worden aangepast.

De meest informatieve en belangrijkste elementen van dergelijke grafieken worden in figuur B.5 aangeduid en hieronder kort toegelicht:

- 1: de kalibratiecurve.
- 2: het unieke label voor de radiokoolstofdatering, de datering in jaren BP en de standaardafwijking op deze ouderdomsbepaling.

- 3: op de staande as de normaalverdeling bepaald door de conventionele radiokoolstofdatering, in dit geval 1599 BP als gemiddelde en de daarbij horende standaardafwijking (hier 29 jaar).
- 4: de gekalibreerde ouderdom in kalenderjaren (AD/BC), met de overeenkomstige waarschijnlijkheidsgrenzen (hier zowel het 1 sigma = 68,2%, als 2-sigma = 95,4% betrouwbaarheidsinterval).
- 5: op de liggende as de gekalibreerde radiokoolstofdatering met bijhorende waarschijnlijkheidsverdeling.
- 6: op de liggende as het 1-sigma en 2-sigma betrouwbaarheidsinterval van de gekalibreerde datering.
- 7: de versie en bijhorende bibliografische referentie van de gebruikte software (OxCal 4.3), en de gebruikte kalibratiecurve (IntCal13).

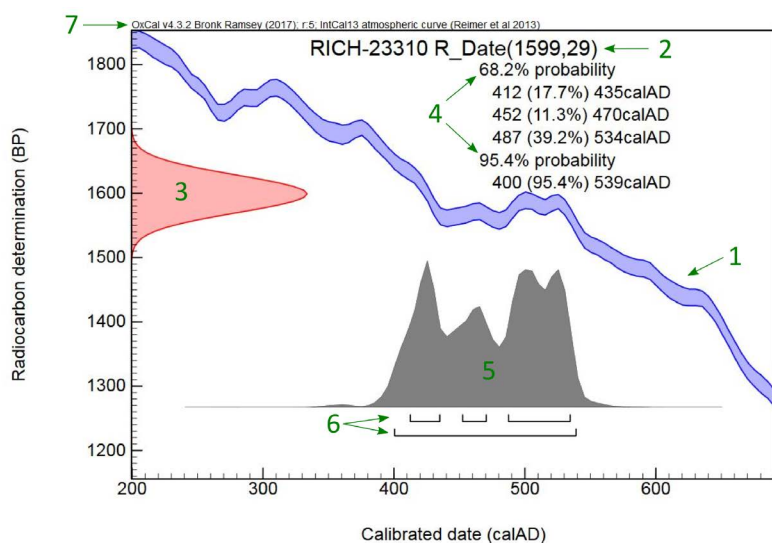


FIG B.5: Onderdelen van een grafiek met een gekalibreerde radiokoolstofdatering.

Onder het invulmenu van het openingsscherm (figuur B.2) zijn nog twee andere functies beschikbaar:

- Met **[View curve]** krijg je de kalibratiecurve te zien. Door de linker muisknop ingedrukt te houden terwijl je over de grafiek beweegt kan je de curve naar de gewenste tijdsperiode schuiven. Door tegelijkertijd de SHIFT-knop in te drukken, wordt het bereik aan kalenderjaren groter of kleiner naargelang je de muis naar links/rechts beweegt. Op die manier kan de kalibratiecurve verkend worden en kan een inschatting worden gemaakt van wat een datering voor een bepaalde tijdsperiode kan opleveren (aanwezigheid van plateau's, *wiggles*, steil verloop, turbulente periode).
- De knop **[Projects...]** laat toe om eerder uitgevoerde en bewaarde OxCal-projecten te selecteren en op te roepen. Je kan opgeslagen projecten en figuren ook terugvinden door **[File > Manager]** te selecteren.

2.2 KALIBRATIE MEERDERE DATERINGEN

Uiteraard kunnen ook meerdere dateringen tegelijkertijd worden gekalibreerd en samen weergegeven in een zogenaamde *multiplot*. Dit laat toe om de radiokoolstofdateringen te ordenen volgens een chronologisch kader of stratigrafisch verband. De invoer start met het aanmaken van een nieuw project via het menu **[File > new]**. Daarna start het eigenlijke ingeven van de radiokoolstofdateringen via het tabblad **[Insert]** (figuur B.6). Om een radiokoolstofdatering in te voegen, selecteer je in het keuzemenu links bovenaan **R_Date()**. Deze procedure herhaal je voor alle dateringen die je wil kalibreren en aan de grafiek toevoegen.

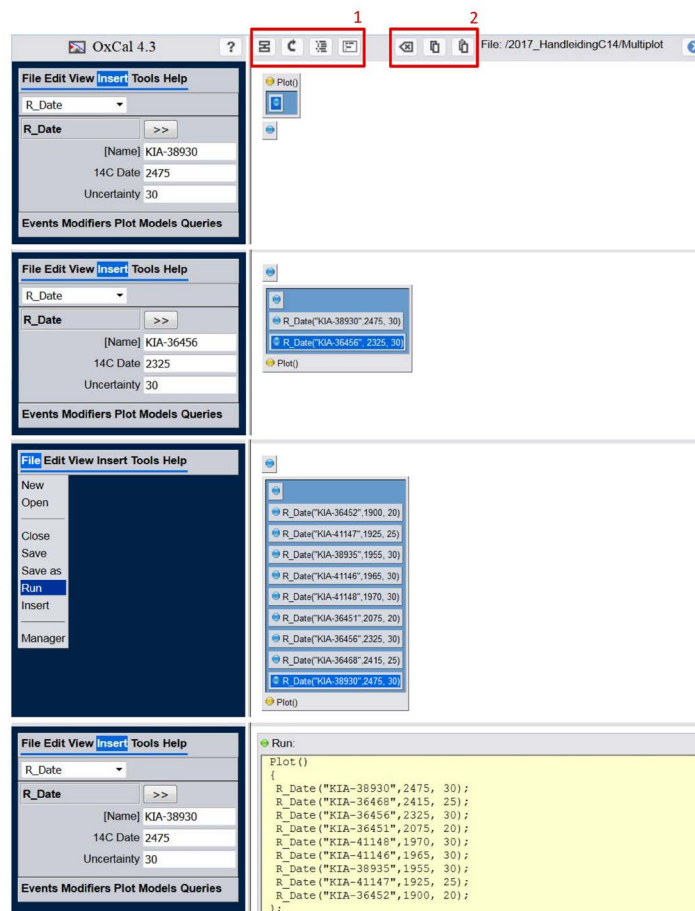


FIG B.6: Programmeercode om een multiplot op te bouwen.

Met de eerste vier knoppen in de werkbalk bovenaan (vak 1 in figuur B.6) krijg je telkens een andere weergave van dezelfde programmeercode. De eerste knop geeft het model schematisch weer (zoals tijdens de invoer), de tweede knop keert de volgorde van de ingevoerde radiokoolstofdateringen om, de derde knop laat de programmeercode zien als een lijst en de laatste knop toont deze programmeercode als tekst (figuur B.6, onderaan).

De opbouw van de programmeercode voor het kalibreren en weergeven van een radiokoolstofdatering neemt steeds volgende vorm aan:

```
Plot()
{
  R_Date("label", radiokoolstofouderdom in BP, standaardafwijking);
};
```

De functie **R_Date()** heeft dus drie argumenten (het label van de radiokoolstofdatering de radiokoolstofouderdom en de standaardafwijking), die onderling gescheiden worden door een komma. Een regel eindigt steeds op een puntkomma, en een functie waarbinnen andere functies worden opgeroepen begint met een { en eindigt met };. In deze weergave kan je zelf ook regels programmeercode toevoegen door deze in het geopende venster te typen. Met de knoppen rechts bovenaan (vak 2 in figuur B.6) kan je respectievelijk een blok programmeercode knippen, kopiëren en plakken.

Om OxCal de berekening te laten uitvoeren selecteer je in het menu **[File > Run]** of klik je rechts bovenaan op de blauwe pijltoets ➤. Nadat de berekeningen zijn uitgevoerd, krijg je eerst een tabel te zien. Door in het keuzeveld

links bovenaan [Multiple plot] te selecteren, worden alle gekalibreerde radiokoolstofdateringen voorgesteld in één grafiek (figuur B.7). Met de pijltoetsen [Zoom], [Centre] en [Span] kan je de assen van de figuur aanpassen. Selecteer je [Single plot] dan worden de individuele dateringen één voor één in een aparte grafiek voorgesteld. Met de pijltoetsen rechts bovenaan kan je dan door de volledige reeks van gekalibreerde dateringen bladeren.

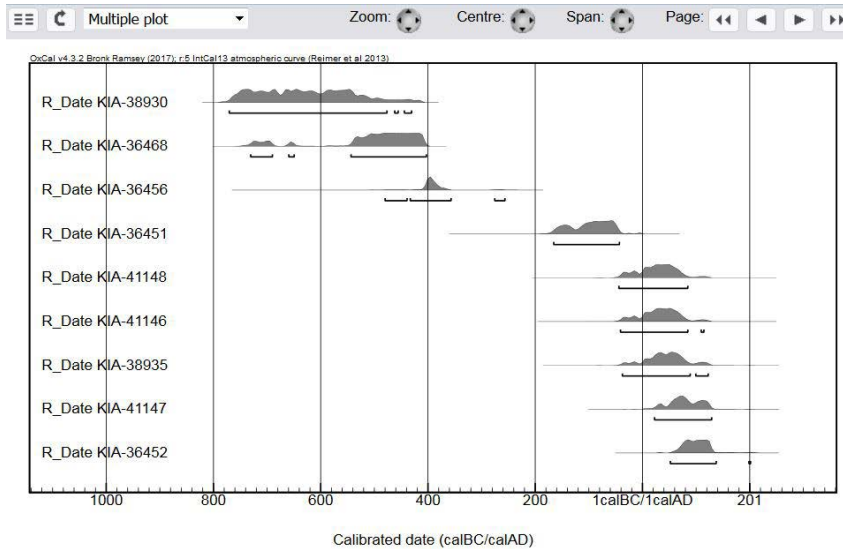


FIG B.7: Een multiplot met negen gekalibreerde radiokoolstofdateringen.

2.3 DATAINVOER VIA EXCEL

Indien een lange lijst met radiokoolstofdateringen moet gekalibreerd worden, kan het invoegen in OxCal relatief veel tijd in beslag nemen. Via een omweg kan je in Excel of een gelijkaardig programma met rekenbladen de radiokoolstofdateringen eerst *omvormen* in programmacode die leesbaar is door OxCal. Start vanuit een tabel waarin de eerste drie kolommen bestaan uit: de labocode (label), de radiokoolstofouderdom in BP en de standaardafwijking. In de kolommen ernaast voeg je stukken van de door OxCal gestandaardiseerde programmeercode toe (zie figuur B.8). Daarna breng je alle stukken tekst samen - met de Excel-functie TEKSTSAMENVOEGEN - in een formaat dat kan gekopieerd worden in OxCal.

Label (labnr)	BP	std.	R_Date
KIA-38944	4785	40	R_Date KIA-38944 4785 40
KIA-38930	2475	30	R_Date KIA-38930 2475 30
KIA-36468	2415	25	R_Date KIA-36468 2415 25
KIA-36456	2325	30	R_Date KIA-36456 2325 30
KIA-36451	2075	20	R_Date KIA-36451 2075 20
KIA-41148	1970	30	R_Date KIA-41148 1970 30
KIA-41146	1965	30	R_Date KIA-41146 1965 30
KIA-38935	1955	30	R_Date KIA-38935 1955 30
KIA-41147	1925	25	R_Date KIA-41147 1925 25
KIA-36452	1900	20	R_Date KIA-36452 1900 20
KIA-30628	1865	25	R_Date KIA-30628 1865 25
KIA-36457	1855	25	R_Date KIA-36457 1855 25
KIA-38929	1815	30	R_Date KIA-38929 1815 30
KIA-36453	1795	25	R_Date KIA-36453 1795 25

Resultaat formule = R_Date KIA-38944 4785 40

FIG B.8: OxCal-programmacode aanmaken in MS Excel voor meerdere radiokoolstofdateringen. Met de functie TEKSTSAMENVOEGEN (1) breng je de stukken tekst uit de verschillende kolommen (2) samen tot de programmacode uit OxCal (3).

Een nog eenvoudiger alternatief start met het openen van een nieuw project in OxCal. In het Excel bestand kopieer je ondertussen de drie kolommen met de labocode, radiokoolstofouderdom en de standaardafwijking. Via het tabblad [Tools > Import] krijg je een venster te zien met drie kolommen: *Name*, *14C Date* en *Uncertainty* (figuur B.9). In dit venster plak je de gegevens die je uit Excel hebt gekopieerd. Met de knop [>>] worden deze dateringen dan omgezet en overgebracht in het venster met de programmeercode.

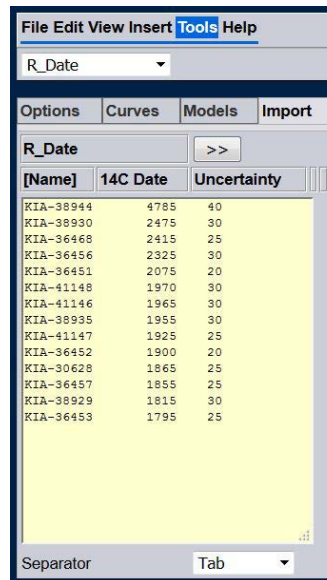


Fig B.9: Copy paste de gegevens van de radiokoolstofdateringen rechtstreeks in OxCal.

Welke methode er ook wordt gevolgd, door de aangemaakte programmeercode uit te voeren, bekomt men één grafiek met alle radiokoolstofdateringen samen.

2.4 GRAFIEKEN EN TABELLEN

Eens een kalibratie uitgevoerd, zijn de resultaten zowel beschikbaar als een grafische voorstelling als in tabelvorm. De grafiek met de kalibratie van individuele radiokoolstofdateringen krijgt men te zien na selectie van [Single plot] in het keuzemenu links bovenaan het scherm. Indien meerdere dateringen tegelijkertijd werden gekalibreerd, kunnen de individuele grafieken doorlopen worden met behulp van de pijlen rechts bovenaan het scherm. Alle gekalibreerde dateringen tegelijkertijd weergegeven kan door de optie [Multiple plot] te selecteren in het keuzemenu. In een multi-plot worden alle gekalibreerde dateringen onder elkaar weergegeven in de volgorde waarin ze werden ingevoerd. De grootte, het bereik en de periode die wordt overspannen in de grafiek kan je aanpassen in het menu [Format] en de tabbladen die in dit menu verschijnen, of met de knoppen bovenaan het venster. In het tabblad **Show** kan men ook aangeven welk waarschijnlijkheidsinterval (of meerdere) je wil weergegeven in de grafiek.

Opslaan van de grafieken verloopt via het menu [File > Save as]. Daarna krijgt je een venster te zien waarin men een mappenstructuur kan opbouwen en in de gewenste map de output onder de vorm van een grafiek opslaan. In de online versie van OxCal kan men de grafieken bewaren op de server, onder de ingelogde account. Bij het opnieuw inloggen kan je via [File > Manager] de resultaten opnieuw opvragen. Wil men een lokale kopie van de grafiek, dan selecteert men de knop [Download] rechts onderaan, nadat men het gewenste output formaat heeft gekozen: als .pdf (*portable document format*), .png (*portable network grafic*) of .svg (*scalable vector grafic*). De grafiek wordt daarna in het gewenste formaat gedownload.

De output in de vorm van tekst laat zich minder vlot exporteren. In het keuzemenu selecteert je eerst **[Table]**, waarna een tabel verschijnt met alle resultaten. Door in de tweede kolom te klikken, komt een venster tevoorschijn met bovenaan de gekalibreerde dateringen in tekstvorm, voor elk van de gevraagde betrouwbaarheidsintervallen (figuur B.10). Deze numerieke gegevens kan je als tekst kopiëren naar een eigen rapport of tabel. Met de pijltjes-toetsen bovenaan rechts doorloop je alle gekalibreerde radiokoolstofdateringen.

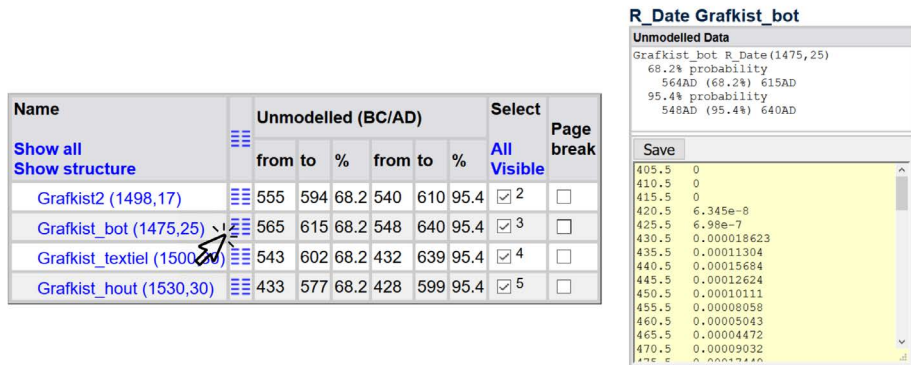


FIG B.10: Output in tekstvorm na kalibratie.

3 EEN DATERING SIMULEREN

In veel gevallen heeft men op voorhand wel een idee uit welke periode een object, constructie of gebeurtenis dateert. Indien een radiokoolstofdatering wordt overwogen, kan het nuttig zijn om voorafgaand aan de staalname en analyse de vorm van de kalibratiecurve binnen de geschatte periode te controleren. Indien er veel *wiggles* aanwezig zijn, zal een radiokoolstofdatering binnen die periode meerdere mogelijkheden of een breed interval aan kalenderjaren opleveren. Ook indien een plateau aanwezig is, zal het bereik aan mogelijke kalenderjaren breed uitvallen (zie Handleiding, 4.6). Zoals al eerder aangegeven, kan je de kalibratiecurve bekijken in OxCal door op de startpagina de knop **[View curve]** aan te klikken. Om dit nog wat verder te exploreren kan je binnen OxCal voor een welbepaalde kalenderdatum een mogelijke radiokoolstofdatering simuleren. Daarvoor moet je na het opstarten van een nieuw project **[File > new]** in het menu **[Insert]** de functie **R_Simulate()** selecteren in de keuzelijst en deze functie met de knop **[>>]** naar het venster met programmeercode overbrengen. Uiteraard kan je in deze weergave ook de programmeercode zelf intypen (figuur B.11). Als parameters voor deze functie moet je een naam geven aan de simulatie (tussen aanhalingstekens), het jaartal dat je wil simuleren (AD of BC met het jaar tussen haakjes) en de verwachte standaardafwijking op de radiokoolstofdatering.

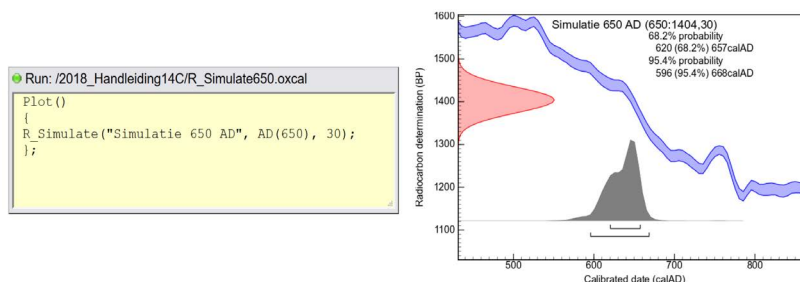


FIG B.11: Programmacode voor het simuleren van een datering op materiaal uit 650 AD.

Als resultaat krijg je een radiokoolstofdatering gesimuleerd (in dit voorbeeld 1404 ±30 BP) die kan overeenstemmen met een gebeurtenis op de ingevoerde kalenderdatum. Telkens deze analyse opnieuw wordt uitgevoerd, krijgen we een andere mogelijke radiokoolstofdatering gesimuleerd. Je kan voor één kalenderjaar dus best meerdere simulaties uitvoeren om zo een goed beeld te krijgen van de mogelijke resultaten.

4 DATERINGEN COMBINEREN

Indien er voor eenzelfde gebeurtenis meerdere radiokoolstofdateringen beschikbaar zijn, kunnen deze voorafgaand aan de kalibratie samengevoegd worden. Op deze manier tracht men de nauwkeurigheid op de datering van deze gebeurtenis te verhogen door meerdere informatiebronnen te combineren. Het kan bijvoorbeeld interessant zijn als uit één graf zowel de kledij (textielresten), een stuk botmateriaal van een individu, alsook een stuk spinhout uit één van de planken van de doodskist zijn gedateerd. Indien we aannemen dat de kist en de kledij kort voor het overlijden van die persoon gemaakt zijn, kan de combinatie van al deze dateringen de sterfdatum beter benaderen dan de individuele dateringen. Andere voorbeelden zijn het combineren van de dateringen op meerdere dierlijke botfragmenten uit eenzelfde afvalcontext, of het uitvoeren van meerdere dateringen op eenzelfde mensenskelet. Het combineren van dateringen kan voor of na de eigenlijke kalibratie.

4.1 R_COMBINE

Meerdere radiokoolstofdateringen van stalen die dezelfde gebeurtenis of object dateren en die opgebouwd zijn met koolstof uit eenzelfde reservoir, kunnen beschouwd worden als herhaalde metingen. Deze herhaalde metingen kunnen dan gecombineerd worden. Dit zal een meer robuust dateringsresultaat opleveren: het zijn immers dateringen van eenzelfde gebeurtenis. De datering van meerdere beenderen van eenzelfde skelet vallen bijvoorbeeld onder deze categorie. Ze dateren alle het overlijden van dezelfde persoon en het koolstofreservoir (de voeding) is ook identiek. In dit geval kunnen de radiokoolstofdateringen samen gevoegd worden voorafgaand aan de eigenlijke kalibratie, door gebruik te maken van de functie **R_Combine()**.

Dit voer je uit door, na het opstarten van een nieuw project [**File > new**], in het menu [**Insert**] **R_Combine()** te selecteren in de bovenste keuzelijst, en dit via de knop [**>>**] naar het venster met de programmacode over te brengen. Daarna selecteer je **R_Date()** en vul je alle parameters in (*Name*, *14C Date* en *Uncertainty*) voor de eerste radiokoolstofdatering. Met de knop [**>>**] wordt deze datering toegevoegd aan het rechter venster. Deze stappen worden herhaald met alle te combineren dateringen. Na het uitvoeren van dit model, via het menu [**File > Run**], en de daarbij horende kalibratie zal de gecombineerde datering meestal een nauwer resultaat geven in vergelijking met de individuele dateringen.

Tijdens het combineren van de radiokoolstofdateringen voert OxCal ook een statistische test uit om na te gaan of de individuele dateringen weldegelijk een benadering van dezelfde gebeurtenis kunnen zijn. Dit is een **χ^2 -test** (Chi-kwadraat-test) waarvan het resultaat in de grafiek wordt weergegeven. In deze test wordt een *T*-waarde berekend, die kleiner moet zijn dan de kritische *z*-waarde voor het beoogde betrouwbaarheidsinterval en het aantal dateringen die gecombineerd worden. Indien de *T*-waarde toch groter is dan deze kritische waarde (weergegeven tussen haakjes in de grafiek), mogen de radiokoolstofdateringen niet worden samen gevoegd en moeten ze afzonderlijk gerapporteerd worden. Indien de *T*-waarde lager ligt dan deze drempelwaarde, kunnen we met 95% zekerheid stellen dat de individuele dateringen inderdaad eenzelfde gebeurtenis kunnen vertegenwoordigen.

4.2 COMBINE

Indien meerdere radiokoolstofanalyses een zelfde gebeurtenis dateren, maar de geanalyseerde stalen niet hetzelfde koolstofreservoir hebben aangesproken, kunnen deze pas na kalibratie samengevoegd worden. De overeenkomst tussen de dateringen kan nu niet met een χ^2 -test worden getoetst, maar wordt aan de hand van een *Agreement index* geëvalueerd. Deze index *A* geeft weer of de gecombineerde radiokoolstofdateringen daadwerkelijk eenzelfde gebeurtenis dateren. De A_{comb} moet groter zijn dan de kritische A_n -waarde en best rond de 100% liggen. In onderstaand voorbeeld (figuur B.12) worden drie dateringen op materiaal uit een zelfde grafkist gecombineerd. De A_{comb} (113,6%) ligt in dit geval hoger dan de drempelwaarde ($A_n = 40,8\%$). De drie dateringen kunnen dus inderdaad een zelfde gebeurtenis dateren. De combinatie van deze dateringen geeft een nauwer dateringsinterval dan de individuele radiokoolstofdateringen (Grafkist2: 544 AD (95,4%) 600 AD).

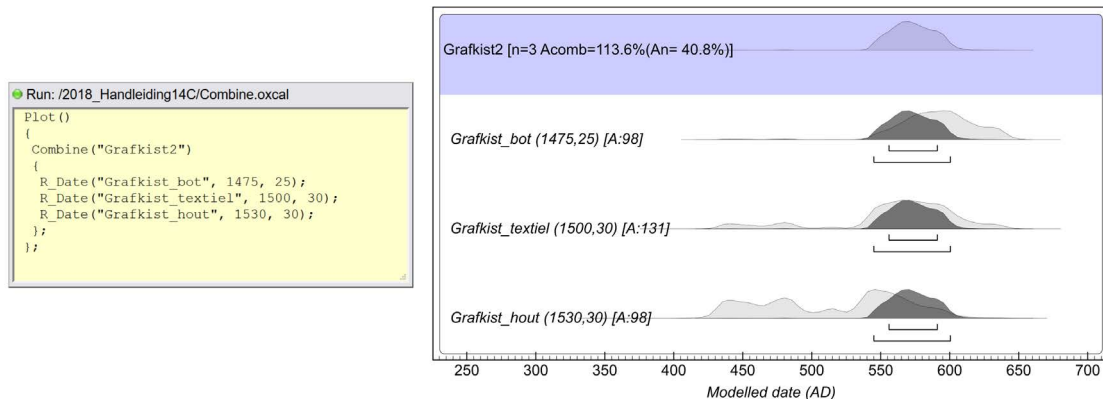


FIG B.12: Combineren van drie dateringen na kalibratie.

Om volledig correct te zijn, moet er op gewezen worden dat er bij de interpretatie van gecombineerde dateringen nooit 100% zekerheid is dat de dateringen echt gelijktijdig zijn, of zelfs als één gebeurtenis kunnen bestempeld worden. Zelfs bij een gunstige waarde voor de *Agreement index* is er geen statistische grond om te besluiten dat ze volledig gelijktijdig zijn. In het voorbeeld van de begraving zijn het scheren van de wol voor de productie van een stuk textiel, het overlijden van de persoon en het kappen van een boom voor het hout van de kist drie aparte gebeurtenissen, die niet op hetzelfde moment doorgingen maar wel in de tijd dichtbij elkaar kunnen liggen. Bij het uitvoeren van meerdere dateringen op één skelet gaat het natuurlijk wel om één gebeurtenis. Bij het dateren van meerdere skeletten uit één grafkamer liggen alle mogelijkheden open.

4.3 DIFFERENCE

Het combineren van dateringen wordt niet alleen gebruikt om een verfijnde datering te bekomen bij vermoeden van quasi gelijktijdigheid, maar deze procedure kan ook helpen bewijzen dat bepaalde vondsten helemaal niet uit dezelfde periode dateren. Zo kan bijvoorbeeld residueel en intrusief materiaal als dusdanig herkend worden. Indien er een sterk vermoeden is dat twee dateringen niet een zelfde gebeurtenis dateren – de χ^2 -test of *Agreement index* valt boven of onder de kritische drempelwaarde – kan bovendien becijferd worden hoe ver beide gebeurtenissen mogelijk uit elkaar liggen. In OxCal voert de functie **Difference()** daarvoor de nodige bewerkingen uit.

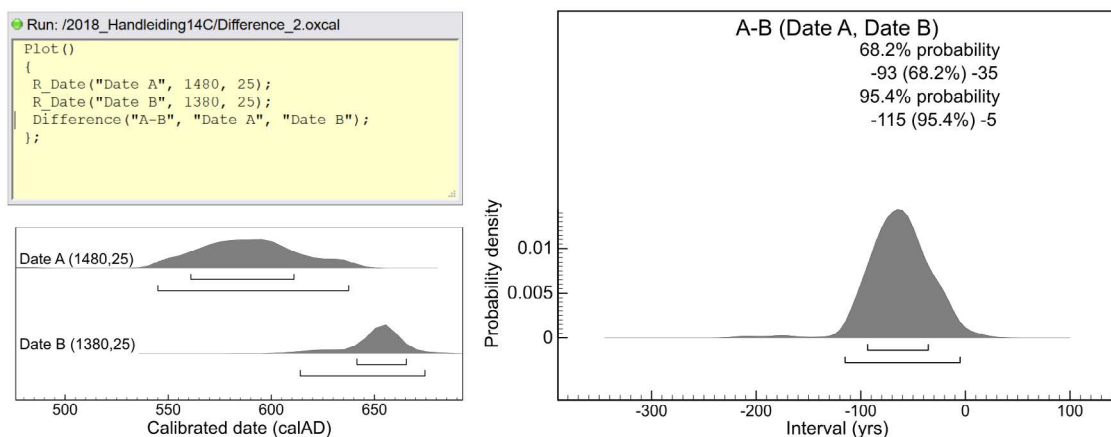


FIG B.13: Opbouwen van een waarschijnlijkheidsverdeling voor het verschil tussen twee radiokoolstofdateringen. We kunnen met 95,4% zekerheid stellen dat er minstens 5 tot maximaal 115 kalenderjaren tussen beide gedateerde gebeurtenissen ligt. Deze radiokoolstofdateringen kunnen niet een zelfde gebeurtenis dateren.

Bij de opbouw van het model dat het verschil tussen twee dateringen berekent, gebruikt je het label of de naam die je aan de individuele dateringen hebt gegeven. In de functie `Difference()` specificeer je dan met welke twee dateringen je wil werken:

`Difference (“verschil”, “eerste datering”, “tweede datering”)`

De grafiek die hiermee wordt opgebouwd laat de waarschijnlijkheidsverdeling zien van het mogelijke tijdsinterval tussen de twee dateringen. Indien een verschil (*Interval*) van 0 jaar binnen het 95,4% interval ligt, dan zijn we niet zeker dat er werkelijk een verschil zit tussen de dateringen. In het voorbeeld in figuur B.13 ligt 0 buiten het 95,4% betrouwbaarheidsinterval, waarvan boven- en ondergrens aangeven dat datering A minstens 5 en maximaal 115 kalenderjaren ouder is dan datering B.

5 DENSITEITSPLOT

Indien uit een bepaalde context, periode of regio veel radiokoolstofdateringen van een zelfde cultureel of natuurlijk fenomeen beschikbaar zijn, kan de som van hun probabiliteiten (waarschijnlijkheidsverdeling) een duidelijker beeld geven van de chronologische spreiding en van het voorkomen van hiaten in dit fenomeen doorheen de tijd. In OxCal kan de som van meerdere radiokoolstofdateringen berekend worden met de functie `Sum()`. Een dergelijk model bouw je op via het menu `[Insert]` waarna je in het keuzemenu deze functie selecteert en overbrengt naar het venster met de programmacode. Daarna voeg je de individuele radiokoolstofdateringen toe met de functie `R_Date()`.

In onderstaand voorbeeld – met dateringen van stukjes houtskool uit verschillende houtskoolmeilers – wordt duidelijk dat er in een dataset met 69 radiokoolstofdateringen uit eenzelfde regio en periode een duidelijk hiaat aanwezig is in houtskoolproductie tussen *ca.* 400 en 650 AD (figuur B.14).

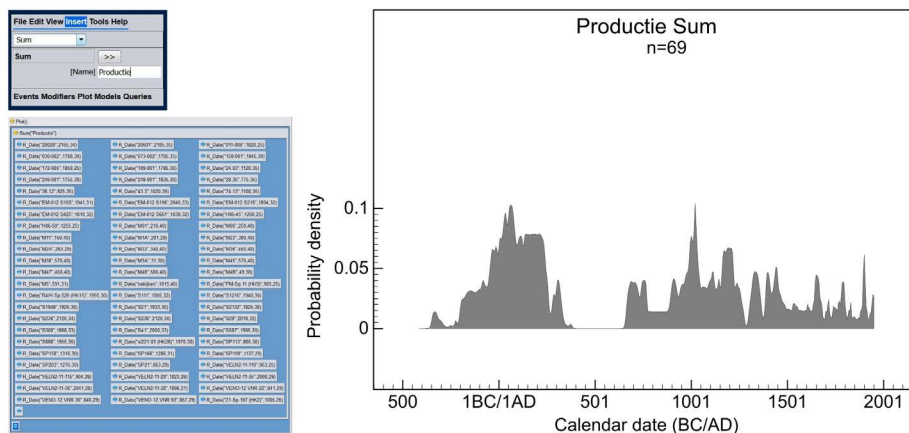


FIG B.14: De probabiliteitsom van 69 individuele radiokoolstofdateringen.

Uit kritische evaluaties van deze methode blijkt echter dat de gesommeerde probabiliteiten met de nodige voorzichtigheid moeten geïnterpreteerd worden (Contreras & Meadows 2014; Steele 2010; Williams 2012). De vorm van de kalibratiecurve heeft immers een duidelijke invloed op het eindresultaat en uit de analyses blijkt dat er heel veel radiokoolstofdateringen nodig zijn om tot een stabiel resultaat te komen. De uiteindelijke waarschijnlijkheden (*probability density*) mogen ook niet als absolute waarden geïnterpreteerd worden.

6 FASERING EN CHRONOLOGIE

Het in kaart brengen van de onderlinge samenhang en opeenvolging van individuele radiokoolstofdateringen, kan tot een meer gedetailleerde interpretatie en nauwere datering van gebeurtenissen leiden. Bij archeologisch onderzoek wordt deze informatie uit de stratigrafie van de onderzochte site afgeleid. Deze stratigrafie kan schematisch in beeld gebracht worden door een matrix op te bouwen – de zogenaamde Harris-matrix (Harris 1989) – waardoor bij een

uitgekiende selectie van stalen ook het onderlinge verband tussen de individuele radiokoolstofdateringen formeel wordt vastgelegd. Ook tijdens het onderzoek van bouwkundig erfgoed kan het herkennen van verschillende bouwfasen, en het in rekening brengen van historische bronnen zoals een gearhiveerd contract, de uitgevoerde radiokoolstofdateringen verder verfijnen. Stratigrafische en chronologische verbanden kunnen mee opgenomen worden in een Bayesiaans model (zie Handleiding, hoofdstuk 7), waar deze informatie ook een mathematische betekenis krijgt en de radiokoolstofdateringen binnen dit kader inpast. In wat volgt wordt de opbouw van een Bayesiaans model in OxCal geïllustreerd met een aantal voorbeelden.

6.1 MODELPOUW

De twee meest voorkomende begrippen die van belang zijn bij de opbouw van een Bayesiaans model dat stratigrafie en/of chronologische fasering in rekening brengt, zijn fasen en sequenties. De definities uit de Handleiding (zie 7.3) worden hier hernomen:

- **Fase:** verzameling van gebeurtenissen die samen een coherente, contextuele groep vormen, zonder informatie over de interne chronologische ordening (bv. dateringen uit een zelfde archeologische laag).
- **Sequentie:** verzameling van gebeurtenissen die samen een coherente, contextuele groep vormen waarbij de onderlinge chronologische volgorde gekend is (bv. dateringen uit een stratigrafische gelaagdheid).

In OxCal kunnen beide begrippen gebruikt worden, en onderling gecombineerd, via de functies **Sequence()** en **Phase()**. Binnen een fase worden alle radiokoolstofdateringen opgenomen, met de functie `R_Date()`, die tot eenzelfde archeologische laag, periode of gebeurtenis behoren. Binnen een fase is er geen chronologische volgorde van de gedateerde stalen. Bij een sequentie is de opeenvolging van de verschillende dateringen wel gekend, en worden ze gerangschikt van **oud (bovenaan) naar jong (onderaan)**. Deze volgorde volgt bijvoorbeeld uit de stratigrafische ligging van de gedateerde stalen, waarbij de oudere stalen steeds onder lagen van jonger materiaal werden aangetroffen.

Beide groeperingen kunnen door elkaar worden gebruikt. Zo kunnen er binnen één sequentie meerdere fasen aanwezig zijn, waarbij de fasen onderling in stratigrafisch verband te brengen zijn, maar er binnen de verschillende fasen geen chronologische ordening kan vooropgesteld worden. Door deze informatie (voorafgaand) in het model in te brengen, kan het dateringsinterval op de individuele gekalibreerde dateringen nauwer berekend worden. In onderstaand voorbeeld worden vier gedateerde stalen uit boven elkaar liggende archeologische lagen in een sequentie gemodelleerd (figuur B.15). Na modellering zijn de originele gekalibreerde dateringen (in grijs) terug te brengen tot een nauwere waarschijnlijkheidsverdeling (donker grijs) – en dus enger tijdsinterval – doordat rekening is gehouden met de onderlinge samenhang van de individuele dateringen.

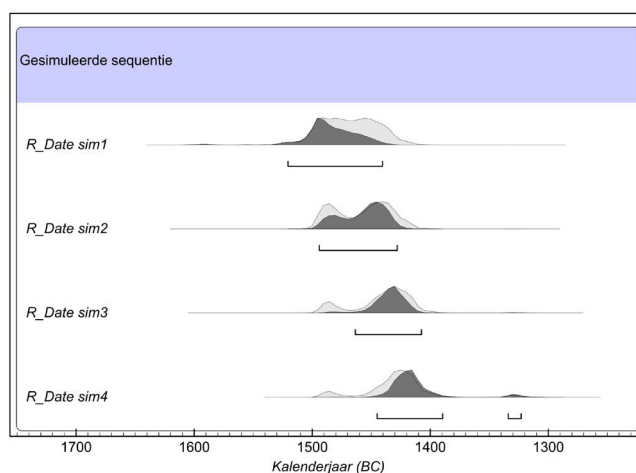


FIG B.15: Bayesiaans model met vier radiokoolstofdateringen die chronologisch kunnen geordend worden op basis van de stratigrafie.

De radiokoolstofdateringen die beschikbaar zijn voor één bepaalde sequentie of fase geven niet noodzakelijk een goede afbakening voor het begin en einde van die fase. Hoe minder gedateerde elementen uit een bepaalde fase, of uit de vroegste fase van een sequentie, hoe minder waarschijnlijk het is dat de oudste datering effectief het oudste element is uit die fase, waardoor je minder zeker bent van de datering van de aanvang van die fase, en van de eventuele sequentie. Hetzelfde geldt – omgekeerd – voor het eind van een fase of een sequentie. OxCal tracht daaraan tegemoet te komen door van de veronderstelling uit te gaan dat de gedateerde stalen een gelijke (uniforme) kans hebben om uit het begin, midden of einde van de fase te dateren. Een uniforme kansverdeling betekent dat de gedateerde materialen beschouwd worden als een willekeurige staalname uit de fase die men wil dateren: ze hebben elk dus evenveel kans op voorkomen op elk mogelijk tijdstip binnen de afgebakende fase. Dit kan in het model ingevoerd door grenzen – *boundaries* – te definiëren en zo verschillende groepen af te bakenen. De *boundaries* zullen er rekening mee houden dat de gedateerde stalen waarschijnlijk slechts in beperkte mate de volledige fase overspannen. Hoe groter de steekproef uit één fase, m.a.w. hoe groter het aantal gedateerde stalen, hoe scherper en met meer zekerheid de grenzen van die fase kunnen afgebakend worden.

In het geval dat verschillende fasen elkaar mooi opvolgen, kan er één sequentie gedefinieerd worden waarbinnen de opeenvolgende fasen worden opgenomen (figuur B.16). De *boundaries* geven dan aan waar de overgang tussen het einde van de ene en het begin van de daaropvolgende fase te situeren is. Na kalibratie bekomt men zo een nauwere datering voor de individuele dateringen. Deze gemodelleerde kalibratie van de radiokoolstofouderdom wordt steeds in donkere tinten weergegeven, terwijl de oorspronkelijke waarschijnlijkheidsverdeling in lichte grijstinten is aangeduid.

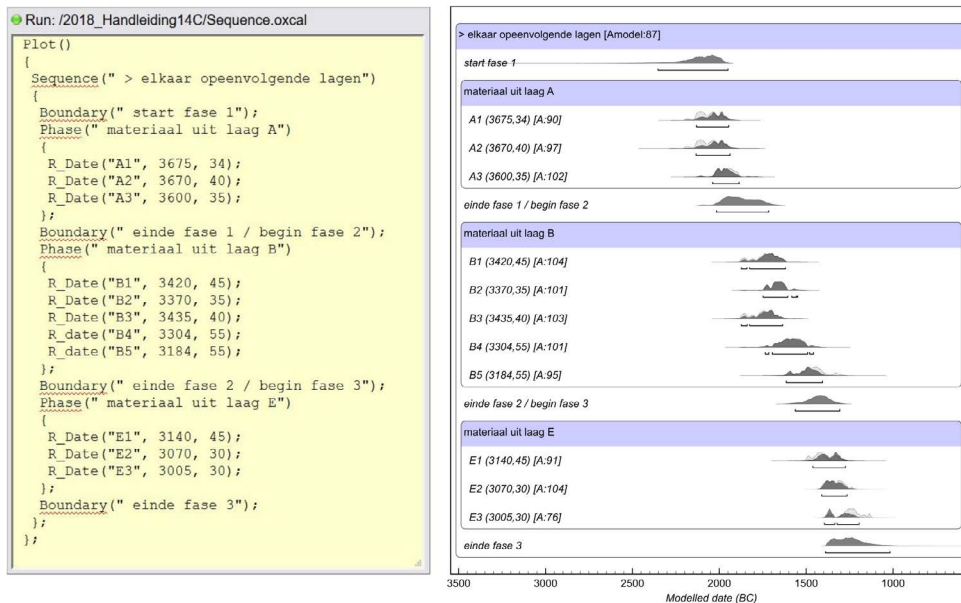


FIG B.16: Modellering van radiokoolstofdateringen uit drie elkaar opvolgende fasen, gedateerd met materiaal uit drie lagen in een verticale stratigrafie.

Is er daarentegen een overlap mogelijk tussen de verschillende fasen (volgende fase vangt aan voor het einde van een voorafgaande fase), dan worden verschillende fasen gedefinieerd binnen één globale fase. De *boundaries* bepalen dan simpelweg voor elke groep apart het begin en het einde. Het einde van een bepaalde fase kan dan een grote overlap vertonen met de ingeschatte aanvang van een andere fase (figuur B.17).

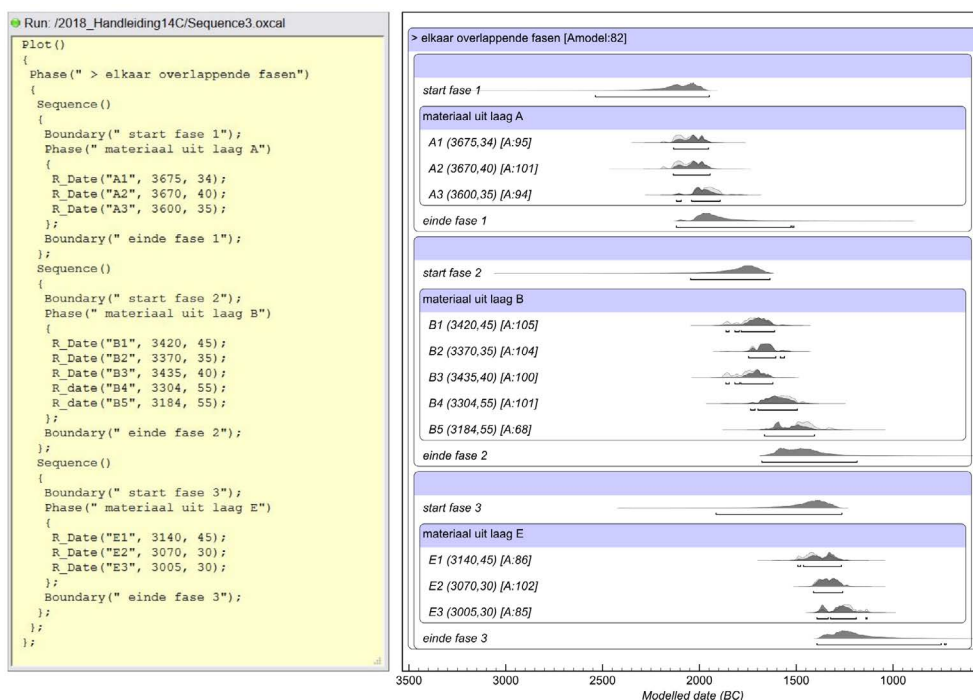


FIG B.17: Modelling van radiokoolstofdateringen uit drie elkaar mogelijk overlappende fasen, gedateerd met materiaal uit drie lagen die onderling geen duidelijk stratigrafisch verband hebben.

Uit bovenstaande voorbeelden blijkt eveneens dat indien er maar een beperkt aantal dateringen beschikbaar is binnen één fase het eveneens moeilijker wordt (er is een grotere onzekerheid) om het begin en eindpunt van een fase af te bakenen. Dat uit zich in het grotere betrouwbaarheidsinterval op de *boundaries* (begin en einde).

6.2 HISTORISCHE DATUM OF GEBEURTENIS

Naast de `R_Date()` functie, om radiokoolstofdateringen te kalibreren, kan OxCal ook andere vormen van dateringsinformatie verwerken. Een historische datum of dendrochronologische datering kan eveneens ingevoerd worden, samen met de radiokoolstofdateringen. Ook de onzekerheid, uitgedrukt in kalenderjaren, op een historische gebeurtenis of de spreiding op een dendrochronologische datering kunnen mee in rekening gebracht worden. Volgende functies komen hiervoor in aanmerking:

- **C_Date("Label", kalenderjaar, onzekerheid):** definieert een kalenderjaar. Het kalenderjaar wordt als AD(1302) of BC(1000) ingevuld, de (mogelijke) onzekerheid op deze datum wordt uitgedrukt in kalenderjaren. Deze kan ook 0 zijn in geval het een historische datum betreft.
- **Date("Label", U(begin, einde)):** uniforme verdeling tussen een bepaalde begin- en einddatum, bijvoorbeeld 1300 tot en met 1400 voor de 14de eeuw AD. De parameters voor boven- en ondergrens worden als kalenderjaren AD (jaar) of BC (jaar) ingevuld.
- **Before("Label", expressie):** definieert een *terminus ante quem*.
- **After("Label", expressie):** definieert een *terminus post quem*.

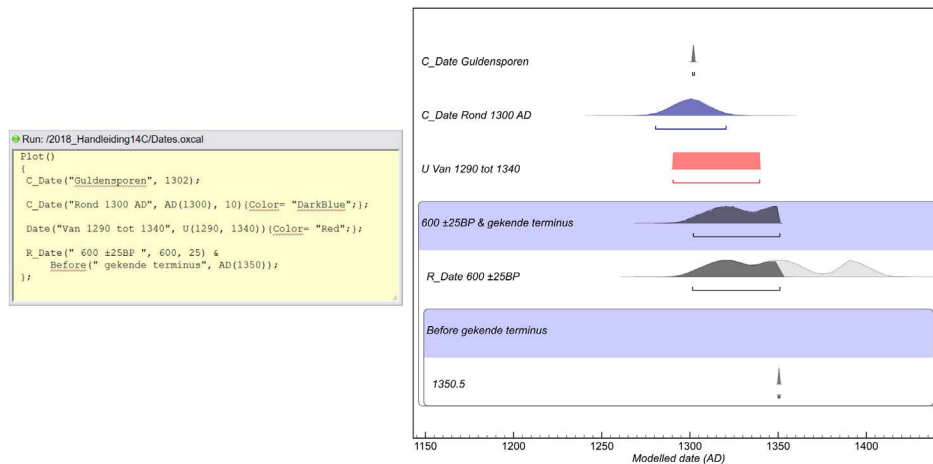


FIG B.18: OxCal functies om een gekende datering in te voegen of te combineren.

Met **C_Date()** kan een kalenderjaar ingevoerd worden. Indien er enige onzekerheid met deze datum geassocieerd is, kan deze mee opgenomen worden. Er wordt dan een normaalverdeling geplott met het kalenderjaar als gemiddelde en de onzekerheid op deze datum als standaardafwijking.

De functie **Date()** laat toe om een bepaalde tijdsrange of periode af te bakenen. De kansverdeling binnen dit interval wordt doorgaans als uniform gedefinieerd, waardoor alle kalenderjaren binnen het gedefinieerde interval evenveel kans op voorkomen hebben.

Indien een historische datum is gekend waarna een bepaalde gebeurtenis onmogelijk kan vallen, dan kan dit in rekening worden gebracht bij de kalibratie van een radiokoolstofdatering die geassocieerd is met die gebeurtenis. Door gebruik te maken van het commando **Before()** en dit met het symbool **&** te koppelen aan een radiokoolstofdatering. Na het berekenen van dit model zal het bereik (en kansverdeling) van mogelijke kalenderjaren worden beperkt tot deze grenswaarde (figuur B.18). Een *terminus ante quem* kan op vergelijkbare wijze worden ingevoerd met de syntax **After()**.

Een combinatie van bovenstaande functies kan nu aangewend worden om een reëel vraagstuk te modelleren, zoals te zien in figuur B.19.

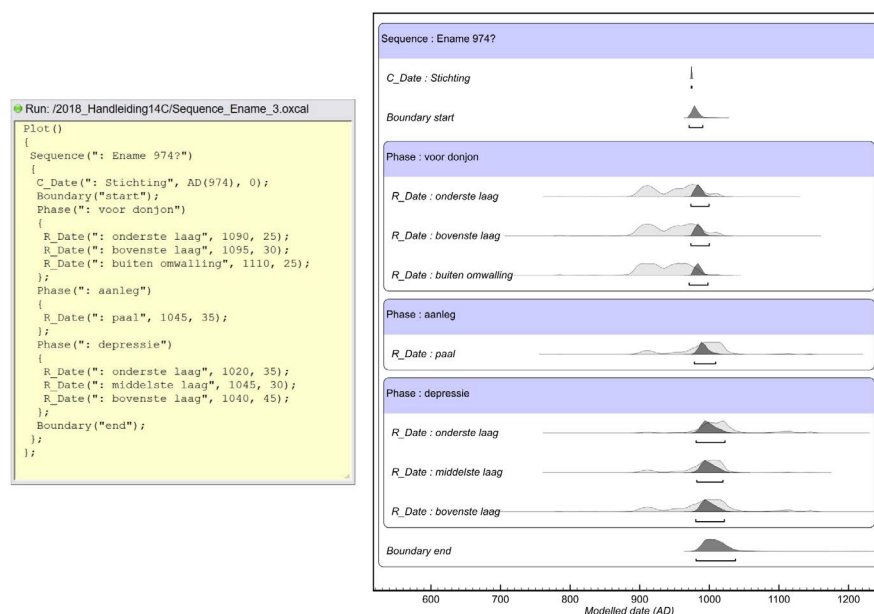


FIG B.19: Een Bayesiaans model voor radiokoolstofdateringen in stratigrafisch verband, rekening houdend met een historische bron.

Na het berekenen van dit model [**File > Run**], krijgen we een grafisch overzicht van het resultaat in een *multiplot*. Door de opgelegde voorwaarden – historische bron als oudst mogelijke datering en afbakening van verschillende elkaar opvolgende fasen – worden de mogelijke gekalibreerde dateringen voor de individuele radiokoolstofdateringen sterk ingeperkt.

6.3 HOE LANG?

De opbouw van een Bayesiaans model en het gebruik van *boundaries* laat toe om ook gebeurtenissen te dateren die niet rechtstreeks aan één staal of radiokoolstofdatering te koppelen zijn. Door het indelen in fasen en sequenties kunnen we namelijk ook berekenen hoe lang een bepaalde fase heeft geduurd, wanneer die op z'n einde liep of welke periode nu precies door de radiokoolstofdateringen wordt overspannen. De twee functies die daarvoor kunnen aangesproken worden in OxCal zijn **Interval()** en **Span()**. Elk van deze functies berekent een waarschijnlijkheidsverdeling voor de duur van de periode (figuur B.20).

De functie **Span()** berekent de periode die door alle dateringen binnen een fase of sequentie wordt overspannen. Er wordt hierbij enkel rekening gehouden met de individuele radiokoolstofdateringen. De *boundaries* van de fase of sequentie worden hierbij niet in rekening gebracht. Dat is echter wel zo bij de functie **Interval()** die de waarschijnlijkheidsverdeling voor de lengte van het interval tussen het begin en einde van een fase berekent. Deze functie houdt er dus rekening mee dat de aanvang en het einde van een fase niet noodzakelijk gedateerd wordt door één van de geanalyseerde stalen.

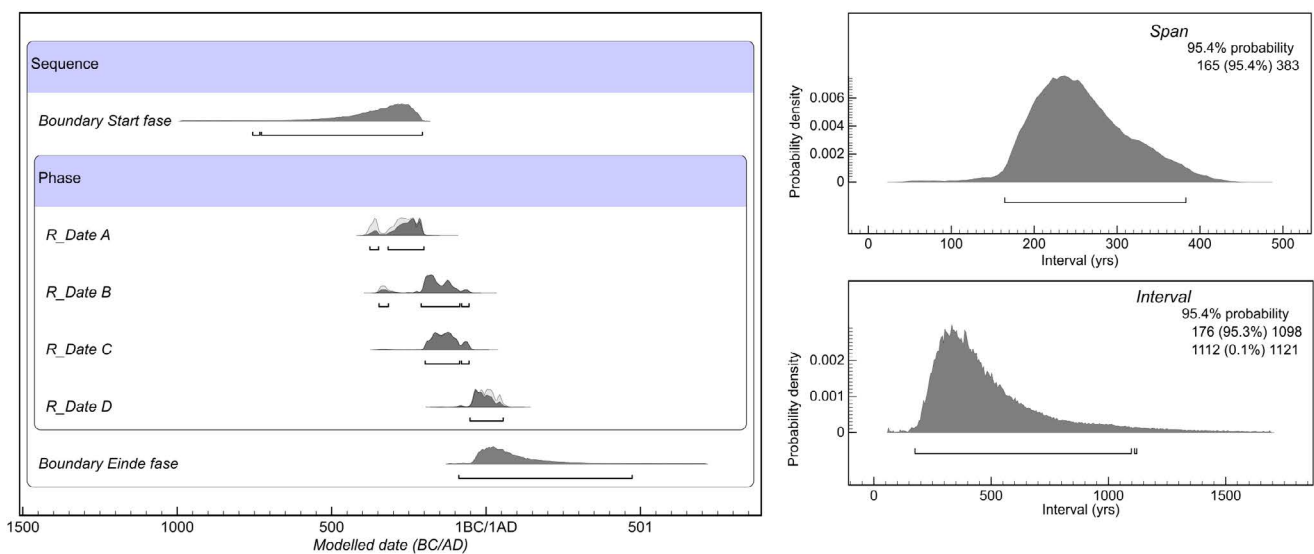


FIG B.20: Berekening van de periode die wordt overspannen door de radiokoolstofdateringen (Span) en de geschatte duur van de fase (Interval).

6.4 KWALITEITSCONTROLE EN EVALUATIE

OxCal enkel de kalibraties en berekeningen laten uitvoeren is niet voldoende; een kritische evaluatie van de resultaten en het opgebouwde model blijven noodzakelijk. Door in het keuzemenu links bovenaan [**Table**] te selecteren krijg je in een tabel meer details over de kwaliteit van het opgebouwde model en de gemodelleerde dateringen (figuur B.21). Dit wordt uitgedrukt in een *Agreement index [A]*. Deze index dient hoger te zijn dan 60%, zowel bij de individuele dateringen als bij het globale model (A_{model}), en moet idealiter rond de 100% liggen. Indien de *Agreement* voor het volledige model te laag uitvalt, krijg je een melding die er als volgt uitziet:

Warning! Poor agreement -A=58.1%(A'c=60.0%)

Voor het model in figuur B.19 is de *A*-index 133,1% voor het globale model (rode kader bovenaan figuur B.21), wat betekent dat de opgebouwde sequentie stand houdt. Enkel bij de datering van het staal dat buiten de omwalling werd gevonden worden vraagtekens geplaatst aangezien deze datering niet zo goed in het hier gedefinieerde model past (kolom *A* in figuur B.21). De *A*-index is voor deze datering dan ook lager dan 60%. Indien er afwijkende dateringen in het model voorkomen, is het altijd aangeraden het eens te herberekenen zonder deze *outliers*. Hun aanwezigheid beïnvloedt immers de aanpassingen op de probabiliteitsverdelingen van de 'passende' dateringen.

Name	Unmodelled (BC/AD)			Modelled (BC/AD)			Indices				Select	Page break	
	from	to	%	from	to	%	A _{comb}	A	L	P			C
Show all							A _{model} =133.1				All		
Show structure							A _{overall} =129.8				Visible		
Warning! Duplicate names - : onderste laag													
Warning! Duplicate names - : bovenste laag													
▼ Sequence : Ename 974?												<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/>
C_Date : Stichting	974	975	95.4	974	975	95.4	100				<input checked="" type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/>	
Boundary start				971	990	95.4					<input checked="" type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/>	
▼ Phase : voor donjon												<input checked="" type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/>
R_Date : onderste laag	893	1013	95.4	973	999	95.4	115				<input checked="" type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/>	
R_Date : bovenste laag	890	1013	95.4	973	1000	95.4	103.2				<input checked="" type="checkbox"/> 7	<input type="checkbox"/>	
R_Date : buiten omwalling	886	990	95.4	971	998	95.4	56.7				<input checked="" type="checkbox"/> 8	<input type="checkbox"/>	
→ Warning! Poor agreement - A = 56.7% (A'c = 60.0%)													
▼ Phase : aanleg												<input checked="" type="checkbox"/> 9	<input type="checkbox"/>
R_Date : paal	895	1035	95.4	978	1009	95.4	129.5				<input checked="" type="checkbox"/> 10	<input type="checkbox"/>	
▼ Phase : depressie												<input checked="" type="checkbox"/> 11	<input type="checkbox"/>
R_Date : onderste laag	901	1151	95.5	981	1022	95.4	124				<input checked="" type="checkbox"/> 12	<input type="checkbox"/>	
R_Date : middelste laag	900	1030	95.4	982	1019	95.4	126.8				<input checked="" type="checkbox"/> 13	<input type="checkbox"/>	
R_Date : bovenste laag	891	1148	95.4	980	1021	95.4	152.5				<input checked="" type="checkbox"/> 14	<input type="checkbox"/>	
Boundary end				981	1037	95.4					<input checked="" type="checkbox"/> 15	<input type="checkbox"/>	

FIG B.21: Output met de evaluatie van het opgebouwde Bayesiaanse model, in tabelvorm.

Door in de keuzelijst [**single plot**] te kiezen kan je de individuele dateringen, en hun gemodelleerde kansverdeling, bekijken. Voor de gedateerde funderingspaal is het gekalibreerde dateringsinterval (95,4% betrouwbaarheid) volgens dit model te situeren tussen 978 en 1009 AD (figuur B.22). Deze bouwfase laat zich – mede op historische grond – vermoedelijk rond het jaar 1000 AD situeren.

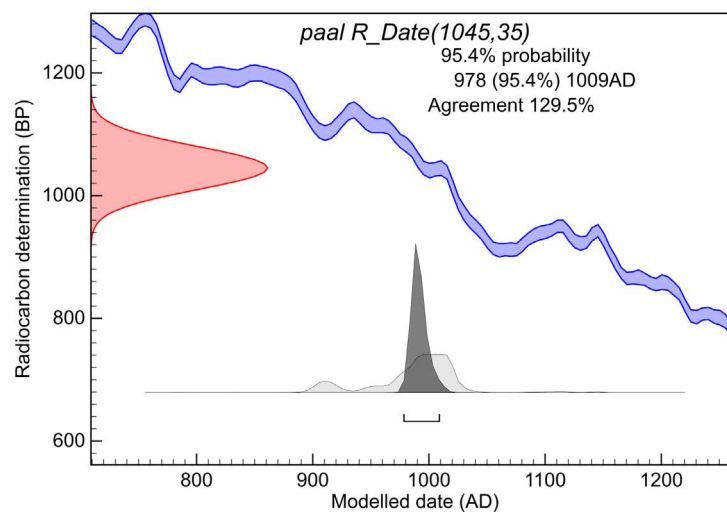


FIG B.22: Gemodelleerde datering van een individueel element uit het opgebouwde Bayesiaans model.

De mogelijkheid tot modelleren leidt tot de conclusie dat, indien een aantal dateringen wordt uitgevoerd om een beeld te krijgen van de chronologische spreiding van vondsten uit een ensemble, het een voordeel kan zijn om vondsten te nemen die onderling een duidelijk stratigrafisch verband hebben.

Eindnoot

¹ Deze handleiding is gebaseerd op de handleiding van OxCal die samen met het programma wordt verdeeld, en geïnspireerd door de praktische handleiding geschreven door J. Kneisel (2014): [https://www.academia.edu/6031140/%C3%9Cbungsbl%C3%A4tter_im_Umgang_mit_dem_Kalibrationsprogramm_OXCAL_4.2_2014_Kiel]

Agentschap
Onroerend Erfgoed

Havenlaan 88 bus 5
1000 Brussel
www.onroenderfgoed.be