



Centrum voor Archeologie,
Gemeente Amersfoort

Figuur 1/2 – Vanaf het begin van de productie van aardewerk gebruiken de kleibakkers verschillende keisoorten en gebruiken zij diverse productiemethoden. De RHX datering is intrinsiek onafhankelijk van materiaal en productiemethode dus calibratie is niet nodig. Links: productie van baksteen op Sri Lanka; rechts: een pottenbakker in Marokko met een primitieve oven.



Een nieuwe methode voor *dateren van producten uit gebakken klei* met rehydroxylatie kinetiek (RHX-datering)

Koolstof-14 (C-14) datering is sinds vele decennia de meest gebruikte methode om organisch materiaal te dateren. Voor keramische materialen is deze alleen geschikt als er organisch materiaal in of aan het voorwerp aanwezig is. Nu heeft een groep wetenschappers van de universiteiten van Manchester en Edinburgh met medewerking van het museum van Londen een nieuwe en betrekkelijk eenvoudige absolute methode ontwikkeld voor het accuraat dateren van gebakken aardewerk. De rehydroxylatiedatering (RHX) methode

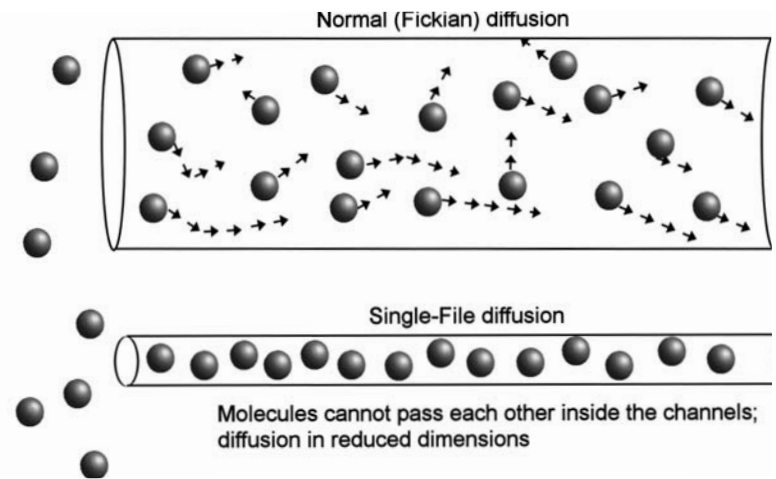
is voor de eerste keer aan de orde gesteld in een publicatie over uitzetting van keramische materialen door een reactie met water (Wilson e.a. 2003) en later gedetailleerd gepubliceerd in de Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, (Wilson e.a. 2009).

Producten die gefabriceerd zijn uit gebakken klei zoals aardewerk, baksteen, dakpannen en wandtegels zijn wellicht de meest voorkomende vondsten in de archeologische praktijk. Datering van

dit soort producten wordt gewoonlijk gedaan met dateringmethoden als stratificatie en typologische sequentie. Absolute datering is in principe mogelijk met luminescentie maar is vaak niet praktisch en ook kostbaar. Bovendien moet hierover vooraf, of uiterlijk tijdens de opgraving, beslist worden omdat het voor de methode noodzakelijk is dat de radioactiviteit van de omgeving van de vondst gemeten wordt om de radiodosis vast te stellen.

Absolute dateringsmethoden zijn gebaseerd op

RHX-datering is onafhankelijk van de hoeveelheid vocht in de atmosfeer en werkt zelfs bij volledige onderdompeling. In de figuur hiernaast is te zien dat, normaal gesproken, de watermoleculen in de "wachtrij" staan voor de Nano-poriën. Luchtvochtigheid kan enorm variëren. We zijn gewend te meten in relatieve vochtigheid [RH in procenten] en dat geeft vaak verbazende uitkomsten met betrekking tot de werkelijke vochtigheid. Je zou denken dat de lucht in Cairo in de woestijn droger is dan het natte Reykjavik. De RH in Cairo is bijvoorbeeld 46% en in Reykjavik 67%. De RH wordt echter gemeten ten opzichte van de maximale hoeveelheid water die de lucht kan opnemen, en die is afhankelijk van de temperatuur. Voor Cairo gaan we uit van gemiddeld 32°C, voor Reykjavik. 13°C. We kunnen berekenen dat de absolute hoeveelheid water, en daar gaat het om bij een chemische reactie, in absolute termen 14.2 gram water per kg. Lucht is in Cairo en 6.3 g/kg in Reykjavik. De "hete en droge" lucht in Cairo bevat dus meer dan tweemaal de hoeveelheid water dan de "koude en natte" lucht in Reykjavik.



Figuur 3 – Normale versus Single File Diffusie, de basis voor de $(\text{time})^{1/4}$ wet.

een natuurwetenschappelijk fenomeen dat een constant ritme in de tijd genereert. Zij kunnen gezien worden als een klok en een mechanisme om de klok te starten. Bij de C-14 datering bijvoorbeeld wordt de klok aangedreven door het radioactief verval van het ^{14}C isotoop. De klok wordt in gang gezet bij het afsterven van het levend organisme. De klok voor de RHX-datering is gebaseerd op de snelheid van een chemische reactie, en wel de reactie van vocht uit de omgeving met de mineralen van de klei. De klok wordt in gang gezet na de verhitting tijdens het bakproces.

Klei is een product dat gevormd wordt door materialen uit de aardkorst, die door verwerking tot zeer kleine deeltjes worden uitgesleten. Gebakken klei is een poreus product. Afhankelijk van de kleisoort en productiemethode zijn er meer of minder wijde poriën aanwezig, maar alle hebben ook zeer nauwe poriën met afmetingen in dezelfde orde van grootte als van watermoleculen. De mineralen bevatten water dat in twee vormen in de klei aanwezig is. Ten eerste is daar water,

door de chemicus voorgesteld door de formule H_2O , dat tot in de poriën van de klei doordringt. Dit water is vrij of slechts licht gebonden aan de klei. Een ander deel van het water is chemisch gebonden aan de klei in de vorm van de zogenaamde hydroxylgroep, voorgesteld door de formule $-\text{OH}$. Het proces waarbij de hydroxyl groep aan een ander product, bijvoorbeeld klei, wordt gebonden heet hydroxyleren.

Na het vormen van een voorwerp wordt de klei over het algemeen gedroogd bij gematigde temperatuur, vaak de omgevingstemperatuur. Tijdens dit proces verliest de klei een deel van het vrije en licht gebonden water. Vervolgens wordt het product in de oven geplaatst en verwarmd tot de uiteindelijke baktemperatuur. Tijdens dit proces verdamppt bij lagere temperatuur het eventuele restant van het vrije water en bij hogere temperatuur komt ook het gebonden water, de hydroxylgroep, vrij. De klei wordt aldus gedehydroxylerd.

Waar eerst de hydroxylgroep zat, is nu een vrije reactieve plek in het materiaal overgebleven. Als

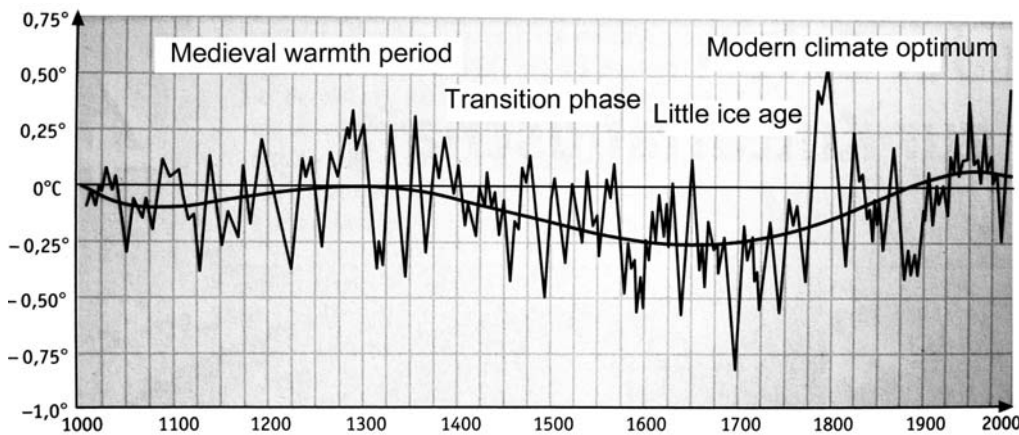
het product gereed is en eenmaal uit de oven wordt gehaald, zal de temperatuur gaan dalen en de klei neemt uit het vocht van de omringende lucht wederom water op. Eerst vult het vrije water de poriën en daarna nemen de hydroxylgroepen hun plaats weer in. Als na betrekkelijk korte tijd de poriën met water gevuld zijn, gaat alleen het hydroxylatieproces verder. De klei wordt dus gerehydroxylerd en komt in zijn oorspronkelijke chemische staat terug.

Het gevolg van deze recombinatie is dat het voorwerp zeer langzaam in afmeting en gewicht toeneemt. De toename van het gewicht is de primaire consequentie en het meest fundamentele gevolg van dit proces. De snelheid van de rehydroxylatie volgt de wetten van de reactiekinetiek en is daarom een interne klok die ons in staat stelt om de leeftijd van keramische producten vast te stellen. Wilson (2009) en Tosheva (2010) stellen na experimenten vast dat het opnieuw verhitten van keramisch materiaal bij temperaturen tussen 500 °C en de oorspronkelijke baktemperatuur het materiaal terugzet naar de oorspronkelijke staat, die van vlak na het bakken.

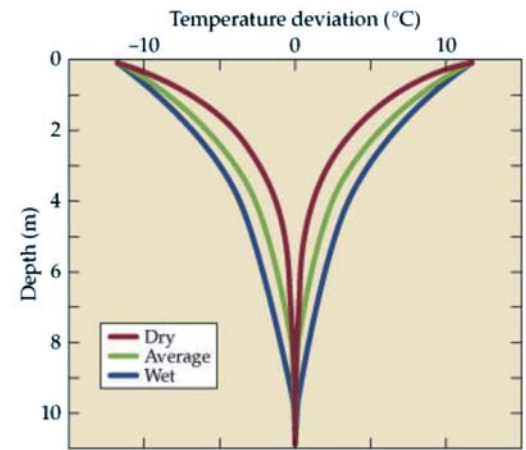
WAT IS HET DATERINGSBEREIK VAN DE RHX-methode

Een belangrijke vraag voor de archeoloog is natuurlijk hoe ver in de tijd we met de absolute RHX datering kunnen kijken. Uit de experimenten blijkt dat de RHX-datering in ieder geval over millennia geldig is; zie het resultaat van de hier besproken Romeinse tegula van c.a. 2000 jaar oud. Over een dergelijke periode is de massatoename door rehydroxylatie

in 'de orde van 1-2%. Dit is aanzienlijk minder dan het gewichtsverlies wegens dehydroxylatie tijdens het bakproces. De opnamecapaciteit van deze klei ten tijde van de analyse is in dit geval dus nog groot. Hierdoor is het naar verwachting mogelijk om materiaal te dateren van 10.000 jaar of ouder zonder dat er extra correcties nodig zijn. Met ander woorden: was het artefact 10000 jaar of ouder geweest, dan is correcte datering naar verwachting nog steeds mogelijk.



Figuur 4 – Temperatuur profiel voor centraal Europa (Glaser 2007).



Figuur 5 – Grondtemperatuur variatie volgens 'Earth Temperature and Site Geology'.

FYSISCH CHEMISCHE GRONDSLAG VAN DE ARCHEOLOGISCHE KLOK

De RHX klok

Voor een archeologische klok is een mechanisme nodig dat de klok laat lopen en een schakelaar die de klok aan zet, vergelijkbaar met een stopwatch. In het geval van RHX datering is de verhitting tijdens de productie de schakelaar. Deze schakelaar gaat aan als het gebakken materiaal uit de oven komt en afkoelt aan lucht met tenminste een kleine hoeveelheid vocht. Het klokmechanisme is gebaseerd op een fysisch-chemisch proces van reactiekinetiek. Dit betekent een reactie van water met het oppervlak van het kleimateriaal. Het water diffundeert tot in de allerkleinste poriën van het materiaal, alwaar een chemische reactie optreedt die er op neer komt dat de reactieve plaatsen, die tijdens de verhitting van de klei zijn ontstaan, worden opgevuld met -OH groepen die uit water afkomstig zijn. Water heeft de chemische formule H_2O , dat ook geschreven kan worden als H-OH. Voor de RHX Datering moeten we de reactiesnelheid van water met de klei leren kennen. Een manier om die in een wiskundige formule uit te drukken is:

$$\text{Formule 1: } r = dm/dt = k_{(T)}[A]^n$$

r is de reactiesnelheid; k is de reactieconstante bij temperatuur T ; dm is de toename van een oneindig kleine hoeveelheid massa in de oneindig kleine tijdsperiode dt ; $[A]$ is de concentratie van de reactant; n is een constante die van het reactiemechanisme afhankelijk is.

Vergelijking 1 is een klassieke vergelijking die een reactie van een homogeen systeem beschrijft, zoals binnen een gas of een vloeistof. In deze vergelijking zou $[A]$ voor de concentratie aan water staan, wat zou betekenen dat het RHX proces afhankelijk van de hoeveelheid beschikbaar water is, en dat is dan ook een veel gehoorde maar begrijpelijke vraag bij discussies over RHX datering. Hydroxylatie is echter een proces tussen een gas en een vaste stof. Volgens Wilson (2003; 2009) is de reactiesnelheid evenredig met de tijd tot de macht $(1/4)$ en kan beschreven worden door:

$$\text{Formule 2 } r = k_{(T)}t^{1/4}$$

r is de reactiesnelheid; k is de reactieconstante bij temperatuur T .

Het rehydroxylatieproces verloopt in twee fasen (Savage 2008 en figuur 8). De eerste fase verloopt snel waarbij de water moleculen door relatief wijde poriën diffunderen. Zij zullen momentaan met het oppervlak reageren, wat de snelle stijging van de curve verklaart. In de tweede fase treedt een ander diffusieproces op dat bekend staat als 'Single File Diffusion' of SFD. Hier komen de water moleculen de nano-poriën binnen, waarbij ze elkaar niet kunnen passeren. Zij moeten dus in de rij wachten voor een plekje op een vrije reactieve plaats.

Dit verklaart waarom het RHX proces onafhankelijk is van de water concentratie. Het maakt voor de reactiesnelheid niet uit, uit hoeveel moleculen in de wachtrij staan, zolang er maar een minimale hoeveelheid in voorraad is. En het proces is zeer langzaam, dus de voorraad, ofwel luchtvochtigheid, hoeft niet groot te zijn. Onder normale omstandigheden is er voldoende water in de lucht voor een complete hydroxylatie, zelfs in een droog klimaat. De $(\text{tijd})^{1/4}$ wet is als volgt te demonstreren: als de eerste gram gewichtstoename in 1 dag (maand, jaar) plaats vindt, dan wordt de 2e gram in 16 dagen (maanden, jaren) gevormd, de 3e gram in 81, de 4e in 256 enzovoorts.

Reactiesnelheden zijn afhankelijk van de temperatuur. De invloed daarvan is over het algemeen behoorlijk groot en kan betekenen dat de snelheid verdubbelt bij elke temperatuurverhoging van 10°C . De temperatuur afhankelijkheid is afhankelijk van het materiaal en wordt beschreven door de Arrhenius vergelijking, vergelijking 3.

$$\text{Formule 3 } k = Ae^{-E_a/RT}$$

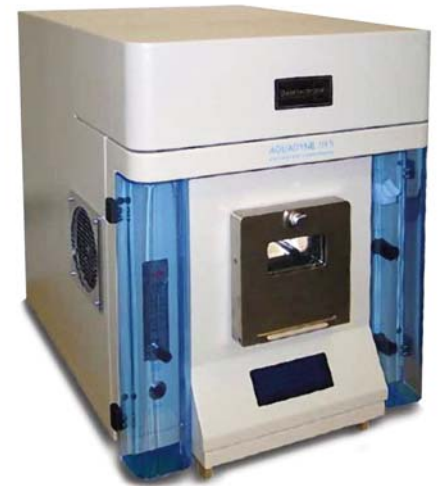
k is de reactieconstante; A is de pre-exponentiele factor; E_a is de activeringsenergie, de minimale energie die nodig is om een reactie te laten verlopen; R is de gasconstante, een natuurconstante; T is de absolute temperatuur, gelijk aan de temperatuur in graden Celsius plus 273.

De effecten van de veranderingen kunnen gemeten worden aan de hand van toename van lengte of gewicht. De meest praktische methode voor het dateren van archeologische artefacten is het meten van de toename van het gewicht. Sinds de begindagen van de productie van keramiek wordt een grote verscheidenheid aan kleisoorten gebruikt. Nu is in het algemeen de reactiesnelheid afhankelijk van de aard van de reactanten die aan de reactie deelnemen. Het RHX experiment verandert de samenstelling van het product echter niet en hoeft daarom ook niet aan de hand van een externe referentie gekalibreerd te worden. De methode is dan ook

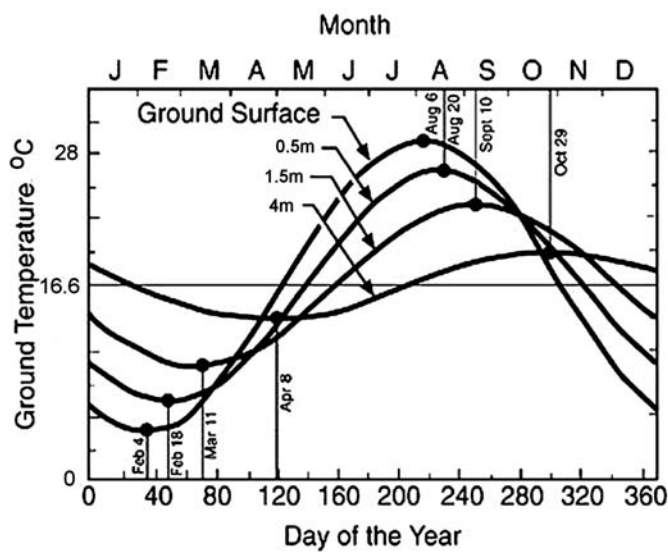
intrinsiek onafhankelijk van het type klei of de productiemethode. We zullen later zien dat ook de hoeveelheid vocht die het product gedurende zijn leven heeft ondergaan geen invloed heeft op de uitkomst van de analyse. Rehydroxylatie is een fysisch-chemisch proces en is daarom wel afhankelijk van de temperatuur en van het temperatuurverloop vanaf het productie tijdstip dat het tijdstip van analyse.

RHX en temperatuur

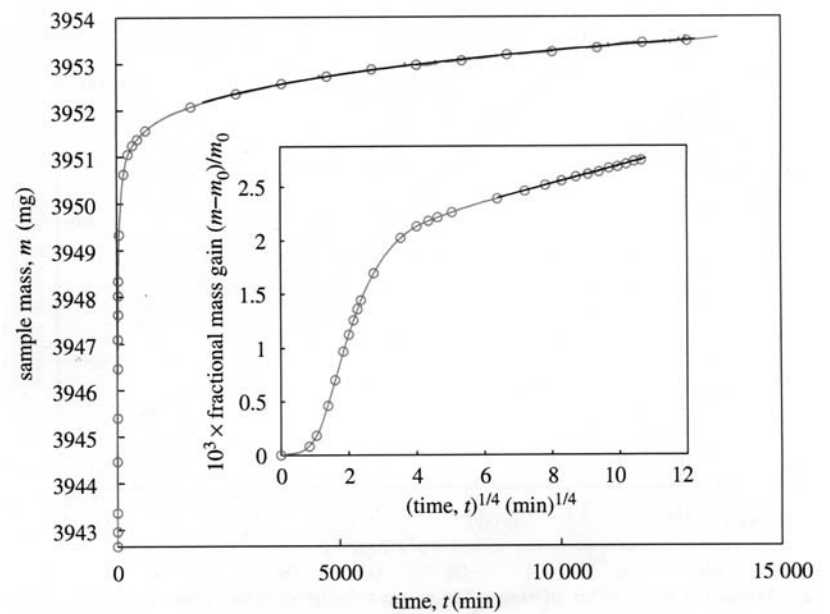
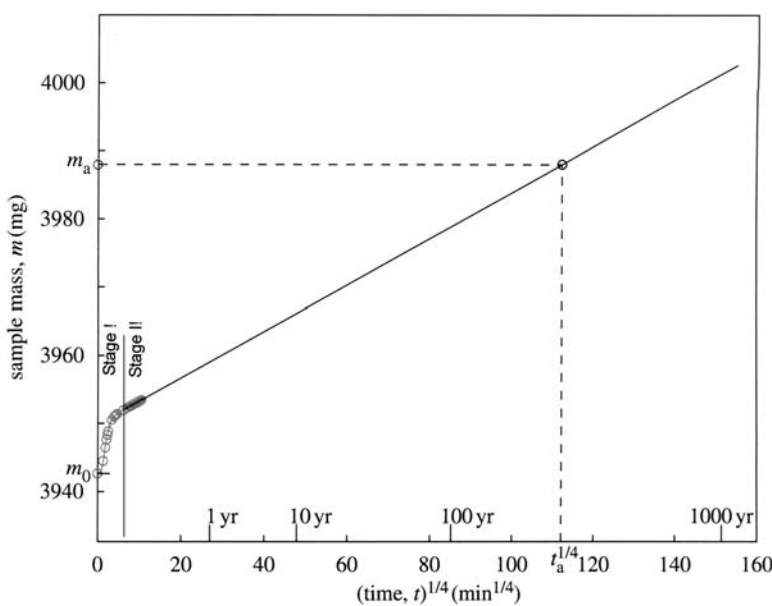
De RHX methode hoeft niet gecompenseerd of gekalibreerd te worden wegens veranderingen van materiaal of vochtgehalte van de omringende



Figuur 6 - Tijdsverschuiving versus diepte beneden maaiveld volgens 'Earth Temperature and Site Geology'.



Figuur 7 - Microbalans / Sorbtie Analyser.



Figuur 8 - Het RHX experiment (naar Wilson 2009). Links: meetpunten met dateringsextrapolatie. Rechts: detail van de meetpunten zoals die door de microbalans geproduceerd worden.

lucht. Anders is dat met betrekking tot de temperatuur (zie kader “De RHX klok” voor een uitgebreidere beschrijving). Het blijkt dat we de temperatuurgeschiedenis van het artefact gedurende de levensduur moeten kennen omdat dat invloed heeft op het resultaat van de datering. We spreken in dit verband van de Effective Lifetime Temperature (ELT). Dit is niet de gewone gemiddelde temperatuur over de leeftijd van het voorwerp maar het resultaat van een complexere berekening. Deze is nodig omdat er geen lineair verband is tussen de reactiesnelheid en de temperatuur. Kennis van de ELT is nodig voor het correct instellen van de temperatuur gedurende het RHX experiment. De informatie om het temperatuurverloop te leren kennen wordt verkregen

uit gegevens van meteorologische diensten en temperatuurstudies over het paleoklimaat die van toepassing zijn in het Holoceen. Vergeleken met eerdere interglacialen vertoont het huidige interglaciaal een opmerkelijk stabiel temperatuurverloop (Cronin2009; Davis 2003; figuur 4). Gedurende het Holoceen varieerde de temperatuur met slechts 0,5-10°C gedurende de laatste millennia. Dit is een gunstige situatie voor de RHX datering. Niettemin zijn de variaties te groot om te verwaarlozen. Over het algemeen worden de temperaturen vlak boven de grond in de literatuur gerapporteerd. In de archeologie hebben we echter te maken met temperaturen onder het maaiveld.

Temperatuur aan en onder het aardoppervlak

De temperatuur op het aardoppervlak en van de grond vlak daaronder hangt af van de natuurlijke reactie van de grond op invallende warmte van de zon en de bovenliggende grondtemperatuur. De warmte die geabsorbeerd wordt hangt af van het type grond, het watergehalte en de diepte tot de eventuele rotslaag. De temperatuur op enige diepte volgt de seizoenen, maar in mindere mate dan de bovenliggende lucht. Bovendien ijlt de temperatuur na, en wel meer naarmate de diepte groter is (figuur 5 en 6).

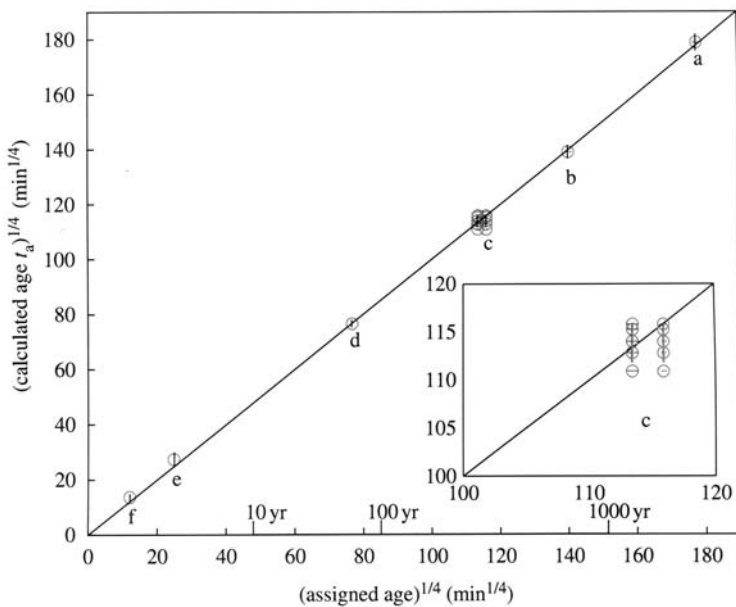
Het RHX experiment

Voor de datering is een monster nodig van enkele grammen, maximaal 5g. Het belangrijkste instrumentarium is een zeer gevoelige microbalans die in staat is om gewichtsverschillen van 0,1 microgram te wegen (0,000001g). De balans wordt op een constante temperatuur gehouden die overeenkomt met de effectieve temperatuur die het voorwerp sinds het bakken heeft ondergaan (de eerder besproken ELT). Bovendien wordt de luchtvochtigheid geregeld zodat er voldoende water is voor de RHX reactie. Hiervoor is slechts een lage relatieve luchtvochtigheid nodig.

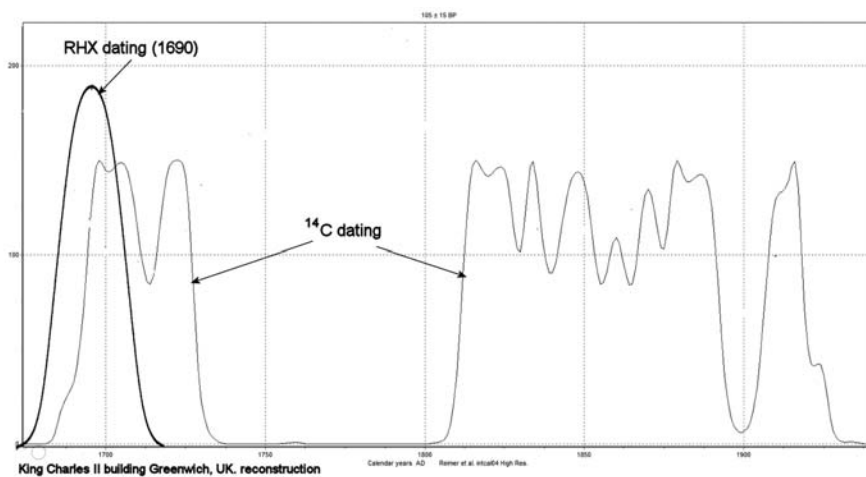
Om te beginnen wordt het monster op een temperatuur van 105 °C gehouden tot het vrije water geheel verdampt is en daarna gewogen in de microbalans. Dit geeft een gewicht van m_0 gram. In de volgende stap wordt het monster verhit op een temperatuur van 500°C tot alle gebonden water is afgedreven. Na wegen vinden we gewicht m_1 . Nu komt het gewichtsverlies ($m_1 - m_0$) overeen met de toename van het gewicht door hydroxylatie sinds het oorspronkelijke bakken van het monster. Als we dit gewichtsverlies delen door de reactiesnelheid, vinden we de leeftijd van het voorwerp. De reactiesnelheid wordt gemeten met de microbalans. Het monster wordt in de balans geplaatst en de gewichtstoename wordt met kleine intervallen gemeten. Het resultaat is te zien in figuur 8. In de eerste fase stijgt het gewicht snel. De poriën vullen zich met water dat zwak gebonden wordt aan het materiaal terwijl tegelijkertijd het chemische rehydroxylatieproces op gang komt. Na verloop van tijd zijn alle poriën gevuld en vindt alleen het hydroxylatieproces voortgang. De gewichtstoename volgt dan een rechte lijn, afgezet op een tijdas van $t^{1/4}$. De reactiesnelheid kan op dit traject worden gemeten en de leeftijd berekend.

Resultaten van RHX datering

Om het succes van de dateringsmethode te demonstreren vergelijken we de meetresultaten met



Figuur 9 – RHX resultaten, werkelijke waarden versus RHX meetresultaten (Wilson e.a. 2009).



Figuur 10 – Simulatie van RHX datering van baksteen vergeleken met een ^{14}C datering van organisch materiaal, aangenomen van dezelfde leeftijd.

de leeftijd van objecten waarvan de datering bekend is. De resultaten zijn te zien in figuur 9. Op de horizontale as de bekende datering, op de verticale as het resultaat van de RHX datering. Als de datering correct is, liggen de punten op de diagonale getekende lijn. De grafiek toont een zeer goede overeenkomst tussen de werkelijke- en de RHX-datering. De monsters zijn deels speciaal voor het experiment gefabriceerd, voor het overige artefacten uit opgravingen.

Het oudste monster a is een Romeins opus spicatum straatsteen, gedateerd op AD 50-160. Monster b is een vloertegel uit Westminster en is gedateerd op AD 1250-1300.

Monster d is een baksteen, afkomstig van een opgraving van de middeleeuwse priorij van de Witte Broeders in Canterbury in het Verenigd Koninkrijk. Het monster is gedateerd als afkomstig uit 1943. Op het eerste gezicht is dit een verbazingwekkend resultaat, maar nader onderzoek wees uit dat de locatie tijdens de oorlogsjaren mei en juni van 1942 zwaar is gebombardeerd. Het gevolg hiervan is dat de RHX-klok wederom op nul is gesteld zoals dat tijdens de productie in de Middeleeuwen ook gebeurde.

Monster e is een recente baksteen, gedateerd 268 dagen na de productie.

Monster f is dezelfde tegel als monster b nadat die opnieuw is verhit om te klok te resetten. Monster c is een baksteen uit het paleis van koning Charles II in Greenwich. De baksteen is met RHX geanalyseerd en geeft een leeftijd van 318 jaar met een precisie van ± 22 jaar. Na aftrekken van de analysedatum levert dit een datering op van AD 1691 ± 22 . Het paleis is gebouwd van 1664-1669 en heeft een reconstructie ondergaan in de negentiger jaren van dezelfde eeuw. Dezelfde dataset is in beide perioden geplot (zie inzet). Hieruit blijkt dat de baksteen afkomstig is uit de reconstructie. Het is interessant om eens na te gaan wat het dateringresultaat geweest zou zijn als er een C14 datering was uitgevoerd met een organisch monster van dezelfde leeftijd als de baksteen. Figuur 10 laat zien wat daarvan het resultaat geweest zou zijn. Het illustreert de potentiële nauwkeurigheid van de RHX datering.

Samenvatting en toekomstperspectief

De resultaten die tot op heden gepubliceerd zijn laten zien dat de RHX een veel belovende methode is voor het dateren van een grote variëteit aan aardewerk van gebakken klei, de meest voorkomende vondstsoort in de archeologie, en een welkome aanvulling van de gereedschapskist van de archeoloog. Het is een methode die de kennis en ervaring van een laborant vereist, maar is vergeleken met andere methoden eenvoudig. Door de methode nog efficiënter te maken zal het ook

goedkoper worden. Naar verwachting zullen de kosten, als de methode is uitgewerkt tot een routine analyse, relatief matig zijn.

RHX datering heeft het potentieel om uit te groeien tot de leidende techniek om keramiek op absolute wijze te dateren. De methode is onafhankelijk van de gebruikte kleisoort, productiemethode, of vochtcondities gedurende de levensduur van het voorwerp. De methode is echter wel afhankelijk van de temperatuur historie vanaf de productie tot het tijdstip van analyse. Onzekerheid over het temperatuurbereik veroorzaakt ook onzekerheid over de absolute datering. De voor de archeoloog evenzeer belangrijke relatieve datering zal minder last hebben van dit effect.

RHX is waarschijnlijk een nauwkeuriger techniek dan de andere beschikbare dateringsmethoden als typologie of luminescentie.

Hoewel RHX toepasbaar is op een grote verscheidenheid aan producten van gebakken klei, is het moeilijk om materialen te dateren die bij zeer hoge temperatuur zijn gebakken. De oorzaak is dat bij hoge temperaturen het sinteren van het materiaal zo sterk is toegenomen dat de poriën zijn dichtgeklonterd. Er zijn zo weinig poriën over dat er weinig actief oppervlak over is dat beschikbaar is voor de rehydroxylatie reactie. De gewichtstoename wordt dan zo klein dat het zelfs met de gevoeligste balans niet met voldoende nauwkeurigheid te wegen is. Voor deze toepassing is het wachten dus op een balans met nog hogere resolutie.

Het is niet aannemelijk dat de RHX methode de tot nu toe meest gebruikelijke datering methode, de typologische sequentie, zal verdringen. Typologie is immers snel en goedkoop en RHX analyse op grote schaal zou een kostbare en tijdrovende zaak worden. Wel is RHX datering zeer geschikt om typologische sequenties te verifiëren met een absolute datering methode. Verrassende uitkomsten zijn niet uitgesloten. RHX kan mogelijk behulpzaam zijn bij het opzetten van geheel nieuwe typologische sequenties, bijvoorbeeld voor prehistorisch aardewerk.

Er is nog een mogelijk interessante spin-off van de RHX datering te bedenken op het terrein van klimaatstudies. De methode is namelijk ook om te draaien (reverse RHX). Als de datering absoluut bekend is, kan de RHX methode informatie opleveren over de temperatuurhistorie van de verblijfplaats van het voorwerp.

Een groep wetenschappers van de universiteiten van Manchester, Edinburgh en Bradford zijn op dit ogenblik doende met een project om de methode verder te ontwikkelen. Dit werk wordt gesponsord door de Natural Environmental

Research Council (NERC) in het kader van hun programma op het terrein van archeologie op basis van natuurwetenschappen.

Dankwoord

Ik dank Dr Moira Wilson van de Universiteit van Manchester en Prof Dr Christopher Hall van de Universiteit van Edinburgh voor hun ondersteuning en hun toestemming om deels ongepubliceerde gegevens te gebruiken.

Literatuur

- Atkins 2010: *Physical Chemistry. 9th Edition*, Peter Atkins, Julio de Paula. Oxford University Press 2010.
- Cronin 2009: *Paleoclimates*, Thomas M. Cronin. Columbia University Press 2009.
- Davis 2003: *The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data*. B.A.S. Davis, S.Brewer, A.C. Stevenson, J. Guiot, Data Contributors. *Quaternary Science Reviews* 22 (2003) 1701-1716.
- Glaser 2007: *Geographie Deutschlands*.
- Rüdiger Glaser, Hans Gebhardt, Winfried Schenk. *Wissenschaftlicher Buchergesellschaft*, Darmstadt 2007.
- Mann 2008: Mann M E, Zhang Z, Hughes M K, Bradley R S, Miller S K, Rutherford S and Fenbiao Ni. 2008 *Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 13252–13257.
- Savage 2008: *Moisture expansion and mass gain in fired clay ceramics: a two-stage (time)^{1/4} process*.
- S.D.Savage, M.A.Wilson, M.A.Carter, W.D.Hoff, C.Hall and B.McKay. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 055402 (4pp)
- Wilson 2003: *Kinetic Moisture Expansion in Fired Clay Ceramics: A (Time)^{1/4} Law*;
- Moira A. Wilson, William D. Hoff, Christopher Hall, Bernhard Mckay and Anna Hiley. *Phys. Rev. Lett.*, 90, 125503 (2003).
- Wilson 2009: *Dating fired-clay ceramics using long-term power law rehydroxylation kinetics*.
- Moira A. Wilson, Margaret A. Carter, Christopher Hall, William D. Hoff, Ceren Ince, Shaun D. Savage, Bernhard Mckay and Ian M. Betts. *Proc.R.Soc.A* 2009 465, 2407-2415.

Online naslag

- Earth Temperature and Site Geology: www.geo4va.vt.edu/A1/A1.htm
- Engineering toolbox: www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html. ■