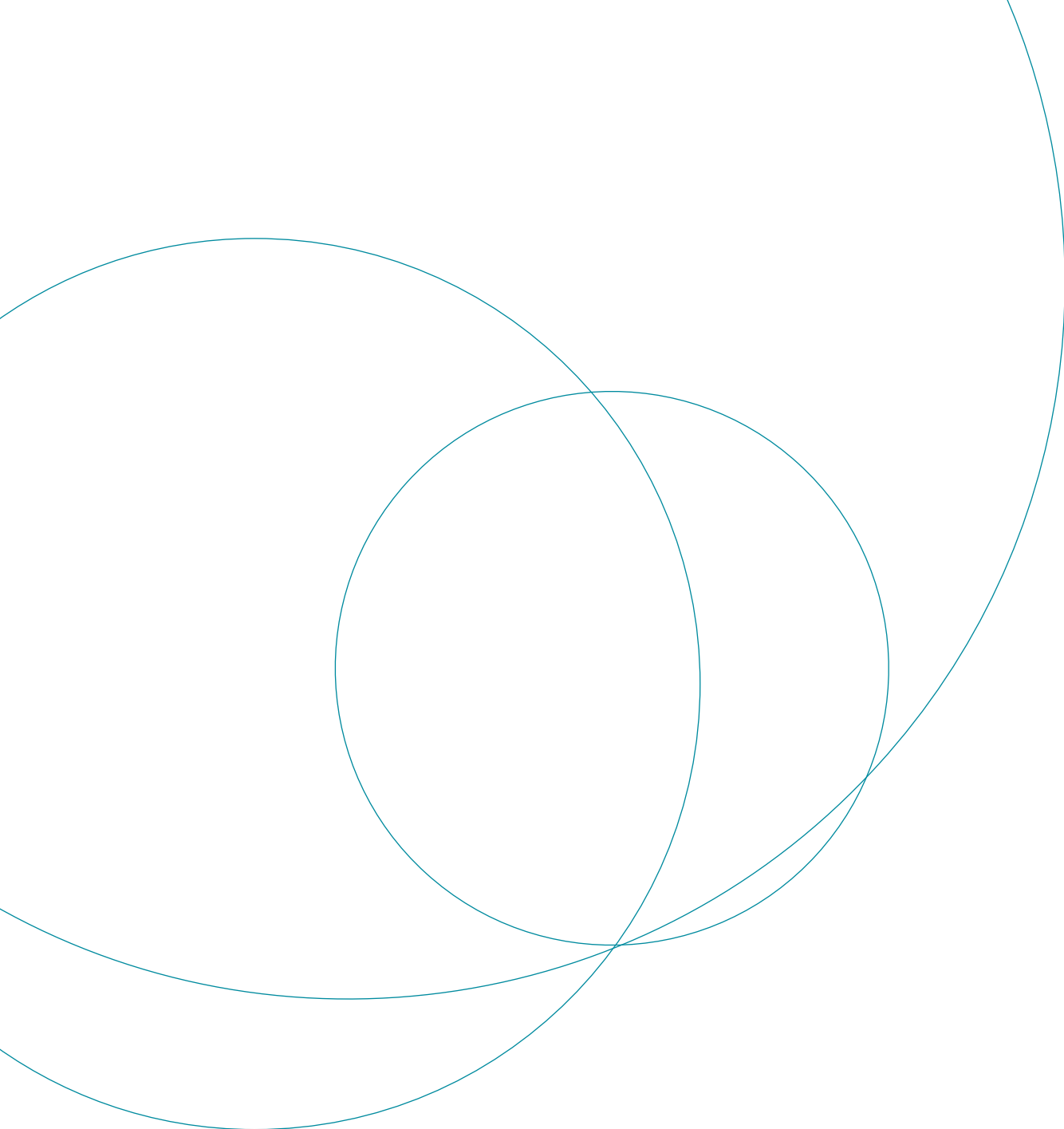




HANDLEIDING

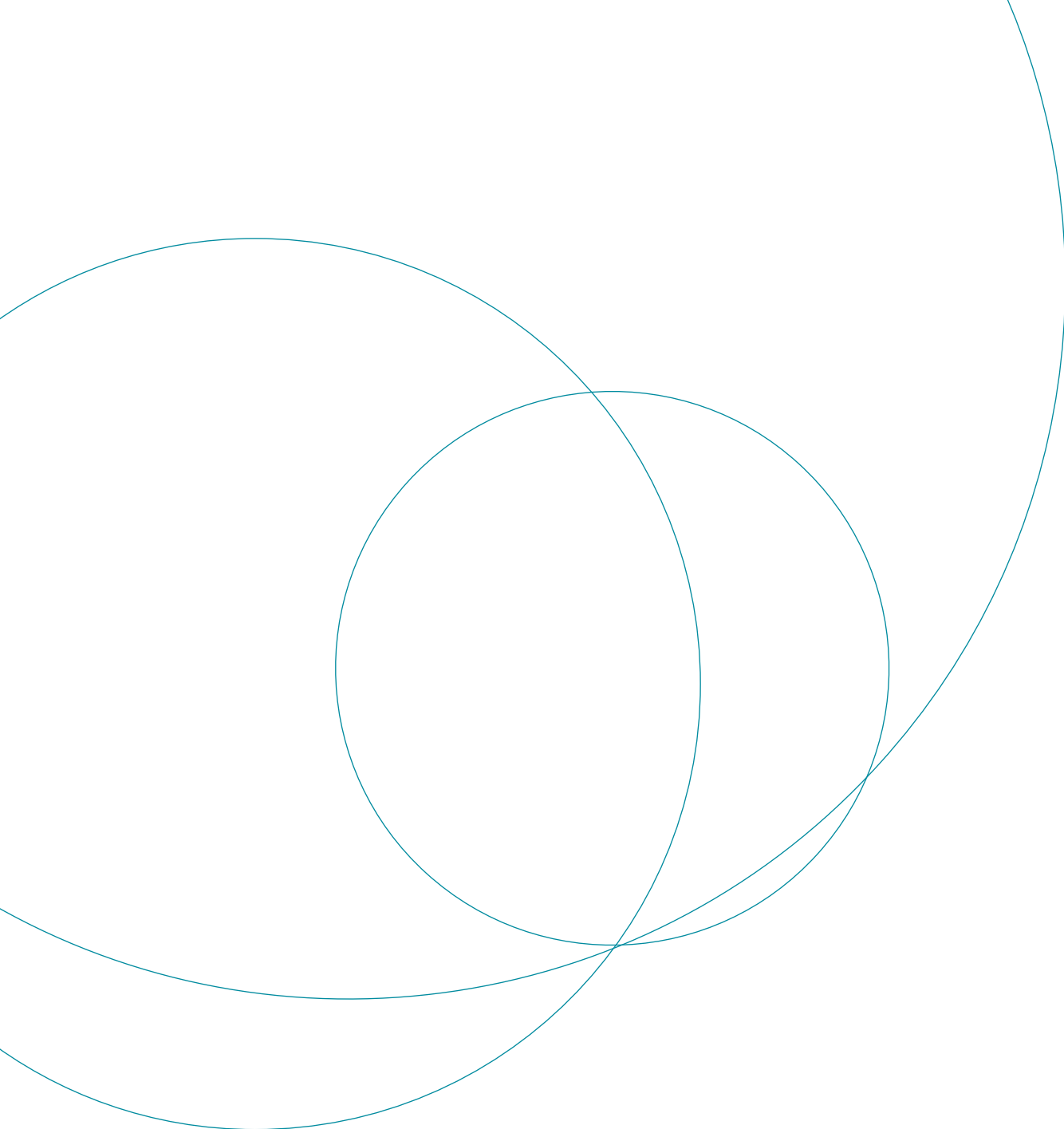
Luminescentiedateren in de archeologie



HANDLEIDING

Luminescentiedateren in de archeologie

1	Inleiding	7
	Een bijzondere eigenschap	7
	Een handleiding voor archeologen	7
2	Wat is luminescentie	9
2.1	Een interne klok	10
2.2	Het luminescentiesignaal	12
2.3	Leeftijdsbereik	12
3	De ouderdomsbepaling	15
3.1	De klok op nul	16
3.2	De ouderdom van het monster	17
3.3	Bepalen van de paleodosis	18
3.4	Bepalen van de stralingsbelasting per jaar (dosistempo)	20
3.5	Is de gemeten luminescentieleeftijd nauwkeurig en precies?	22
4	Dateren van sediment, cultuurlagen en spoorvullingen	27
4.1	Aan licht blootgestelde zandkorreltjes	28
4.2	Toepassingen	29
4.3	Dateren van sediment	29
4.4	Dateren van cultuurlagen, ophooglagen, wegen en paden	33
4.5	Dateren van spoorvullingen	43
4.6	Dateren van mortels/specie en pleistermortel	45
4.7	Waar en hoe neem je de monsters?	48
4.8	Praktische zaken	52
5	Dateren van keramiek en ander verhit materiaal	55
5.1	Artefactdateringen	56
5.2	Verbrand zand (ovenresten, haardkuilen, meilers)	64
5.3	Bemonstering van grond rondom het artefact	65
5.4	Praktische zaken	65
6	Analyse en interpretatie	67
6.1	Monstervoorbereiding in het lab	68
6.2	Metingen	70
6.3	Grafieken	72
6.4	Hoe interpreteer ik de resultaten?	73
6.5	Basisrapportage	77
7	Tijd, middelen en communicatie	79
7.1	Tijd en geld	80
7.2	Communicatie	80
7.3	Faciliteiten in Nederland	80
8	Bronnen en begrippen	81
	Meer lezen?	81
	Afkortingen	81
	Begrippen	82
	Bronnen	85
	Beeldverantwoording en colofon	92



Luminescentiedateren in het kort

Luminescentiedatering is een methode voor absolute ouderdomsbepaling. Met luminescentiedatering kan bepaald worden wanneer afzettingen, cultuurlagen, mortels en pleisters gevormd zijn, maar ook wanneer aardewerk of bouwkeramiek gebakken is of wanneer bijvoorbeeld vuursteen of de grond onder haardkuilen verhit is geraakt. De techniek kan worden toegepast waar andere dateringsbronnen, zoals radiokoolstof, jaarringen, dateerbaar vondstmateriaal of historische documentatie, ontbreken of onbetrouwbaar zijn. De methode is toepasbaar voor het ouderdomsbereik van enkele jaren tot meer dan 500.000 jaar. De bepaling van de ouderdom heeft een nauwkeurigheid van 3-10%.

Luminescentie?

Luminescentiedatering maakt gebruik van een miniem lichtsignaaltje (het luminescentiesignaal) dat door kwartskorrels of door veldspaatkorrels uitgezonden kan worden. Sedimentlagen en cultuurlagen in Nederland bestaan (grooten)deels uit kwarts- en veldspaatkorrels, maar ook in potten en bouwkeramiek zitten vaak zulke zandkorrels meegebakken. Het luminescentiesignaal bouwt zich in de loop van de tijd in het mineraal op door blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit. Het luminescentiesignaal verdwijnt uit het mineraal door blootstelling aan zonlicht of aan hitte. Een paar seconden fel zonlicht of intense verhitting is al genoeg om het signaal op nul te zetten (reset). Dat is de gebeurtenis die gedateerd kan worden. Door het luminescentiesignaal te meten en deze informatie te combineren met een bepaling van de blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit kan geschat worden hoe lang geleden het monster voor het laatst aan zonlicht of aan hitte is blootgesteld.

De meting

Omdat het luminescentiesignaal zeer gevoelig is voor licht, moeten sedimentmonsters uit bodemlagen, spoorvullingen en cultuurlagen in het donker genomen en behandeld worden. Voor artefactdateringen is dat geen vereiste. Voor het verzamelen van sediment wordt meestal een PVC buis gebruikt die in de profielwand wordt geslagen. In het dateringslaboratorium wordt bij dokaverlichting het monster uitgepakt. Het monster wordt vervolgens bewerkt om de kwarts- of veldspaatkorrels eruit te halen. Enkele tientallen korrels worden op een klein schijfje gelegd waarna het luminescentiesignaal van de korrels gemeten wordt in een speciaal daarvoor ontwikkeld apparaat. Deze meting wordt op een groot aantal submonstertjes herhaald. Hoe helderder het lichtsignaaltje is, hoe langer het monster begraven heeft gelegen.

Schatting van de ouderdom

Luminescentiedatering werkt alleen als het luminescentiesignaal van de korrels door zonlicht of door hitte op nul gezet is op het moment dat je wilt dateren. Deze aanname kan veilig worden gemaakt voor duinzand, waarvoor zeer betrouwbare dateringsresultaten zijn verkregen. Voor zandkorrels die in troebel water zijn getransporteerd of door bijvoorbeeld schopsteken zijn verplaatst, is deze aanname minder veilig te maken. Ook wanneer het materiaal onvoldoende verhit is geraakt zal het luminescentiesignaal van (een deel van) de korrels niet volledig op nul zijn gezet. Een onvolledige reset (nulstelling) leidt tot een overschatting van de ouderdom. Eén van de nieuwste ontwikkelingen binnen de methode is dat het luminescentiesignaal van individuele korrels kan worden gemeten. Door een groot aantal korrels afzonderlijk te analyseren, kan worden gezocht naar die korrels waarvan het signaal wél volledig is gereset. Deze korrels geven geen overschatting van de ouderdom en kunnen daarom betrouwbaar voor datering worden gebruikt.



1 Inleiding

Luminescentiedatering is een methode voor absolute ouderdomsbepaling. De techniek kan ingezet worden waar andere methoden, zoals artefactdatering, radio-koolstofdatering en jaarringdatering, niet bruikbaar of onbetrouwbaar zijn. Met luminescentiedatering kan bepaald worden wanneer afzettingen, cultuurlagen, mortels en pleisters gevormd zijn, wanneer aardewerk of bouwkeraamiek gebakken werd, of wanneer bijvoorbeeld vuursteen of de bodem onder haardkuilen verhit is geraakt. De methode is toepasbaar voor het ouderdomsbereik van enkele jaren tot meer dan een half miljoen jaar.

Een bijzondere eigenschap

Sommige mineralen, zoals kwarts en veldspaat, hebben een bijzondere eigenschap: ze kunnen een klein lichtsignaaltje uitzenden wanneer ze worden verhit of beschienen met licht. Dit verschijnsel heet luminescentie. In de jaren zestig van de vorige eeuw werd duidelijk dat er een verband bestaat tussen het uitgezonden lichtsignaaltje en de ouderdom van aardewerk: hoe ouder een potscherf was, hoe sterker het signaaltje.¹ Dit leidde tot de ontwikkeling van dateringsmethoden voor keramiek. Later bleek dat de techniek ook goed toepasbaar is op sedimenten, zoals zand en silt, en andere artefacten.² Tegenwoordig is het een betrouwbare en waardevolle aanvulling op andere archeologische dateringsmethoden.³ Luminescentiedatering heeft een aantal voordelen ten opzichte van de koolstof-14 methode of dendrochronologie: het meetbereik is groter. Waar koolstofdatering tot ongeveer 50.000 jaar teruggaat, kan luminescentiedatering ouderdommen tot wel 500.000 jaar terug in de tijd opleveren. Bovendien kan de techniek worden toegepast op niet-organische materialen, zoals zand en silt en op gebakken materialen waar luminescente mineralen in voorkomen. Voor de archeologie biedt luminescentiedatering daarom veel kansen. Ze maakt het mogelijk om sedimenten, sporen of cultuurlagen te dateren waarin organisch materiaal of goed dateerbare artefacten ontbreken, slecht bewaard zijn gebleven, of niet het te dateren moment bepalen. De techniek is ook geschikt om ouderdomsinformatie te verkrijgen over artefacten zoals aardewerk, bouwkeraamiek en verbrande (vuur)steen en om museumstukken te authentifieren.

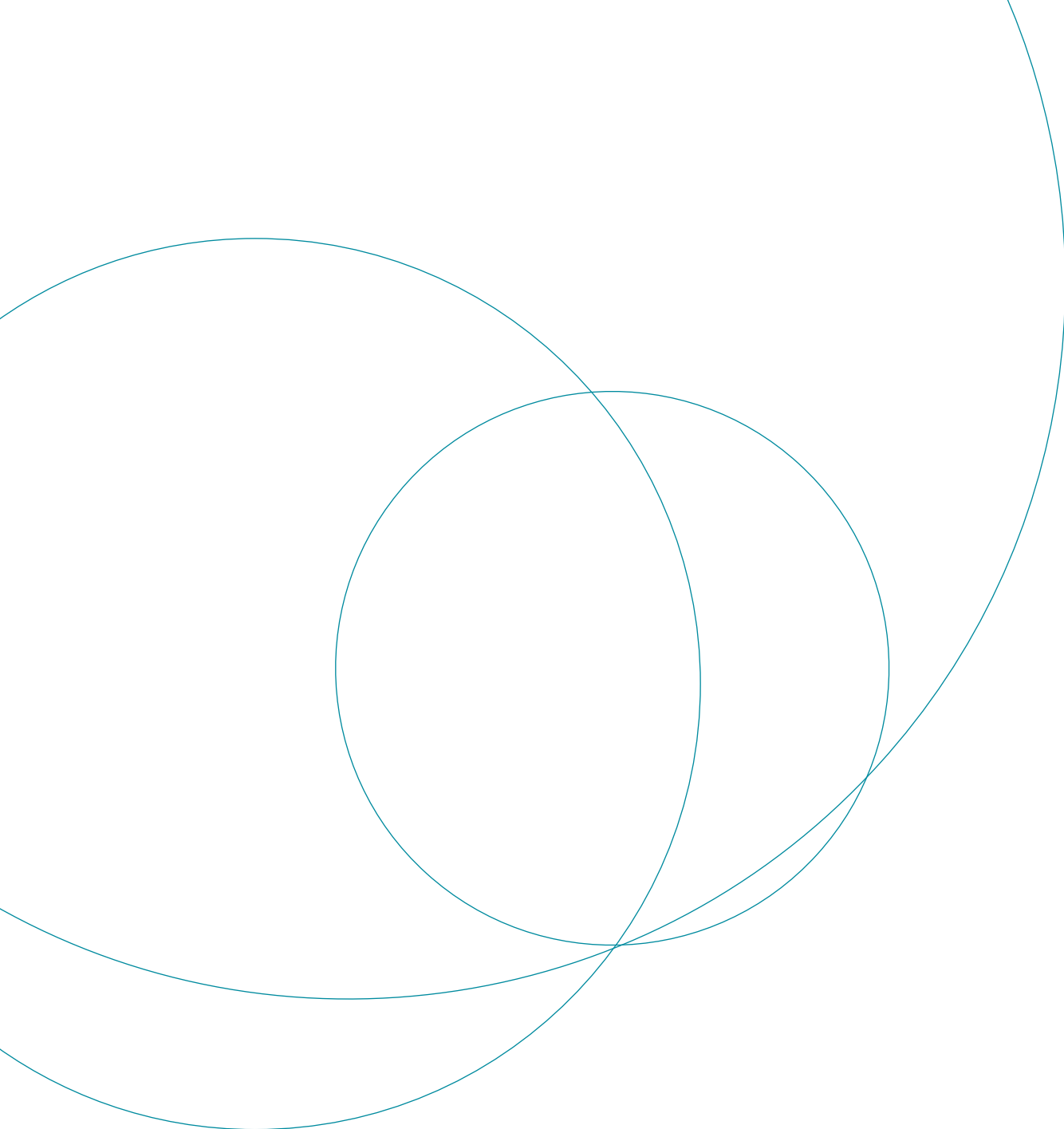
Een handleiding voor archeologen

Deze handleiding is bedoeld voor archeologen die hun kennis over luminescentiedatering willen verdiepen. Wat zijn de mogelijkheden en beperkingen van deze techniek? Wanneer is een luminescentiedatering zinvol? Welke materialen kunnen worden gedateerd en welke soorten vragen kunnen hiermee beantwoord worden? Wat zijn de mogelijke complicaties en verborgen valkuilen? Een goed begrip van de basisprincipes van luminescentiedateren is essentieel voor het formuleren van realistische onderzoeksvragen en het plannen van een effectieve bemonsteringsstrategie. Deze handleiding vervangt niet het contact met de specialist; een goed gebruik van luminescentiedatering in de archeologie vergt afstemming, overleg en samenwerking.

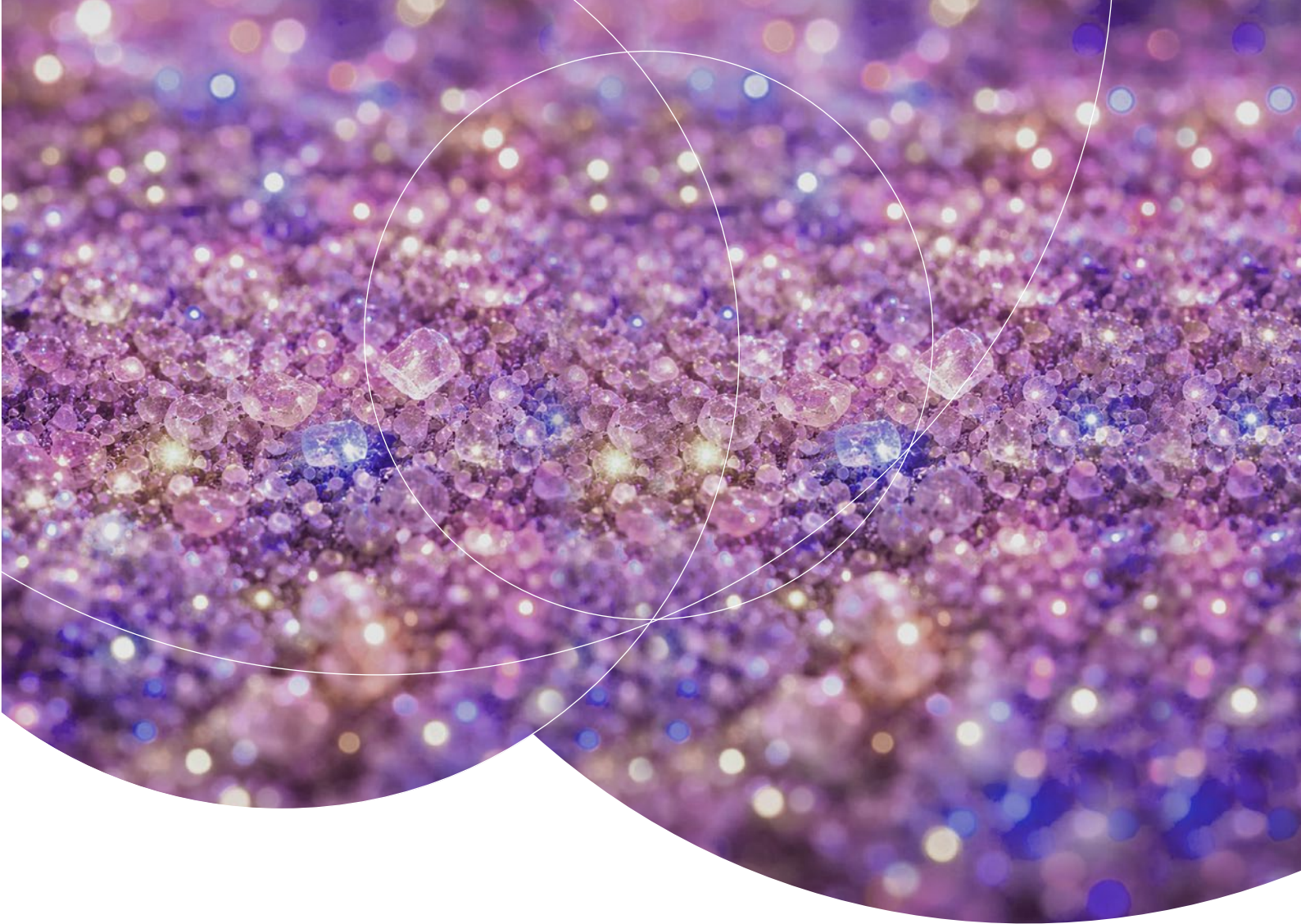
1 F. Daniels en collega's stelden in 1953 als eerste voor om het luminescentiesignaal in archeologisch aardewerk te gebruiken om te schatten wanneer het aardewerk voor het laatst werd verhit.

2 Huntley et al. 1985

3 Aitken 1985, 1998; Roberts 1997; Bøtter-Jensen et al. 2003; Feathers 2003



Kwartskorrels en veldspaten gedragen
zich in het donker als een oplaadbare
batterij. Door blootstelling aan licht of hitte
wordt opgeslagen luminescentie-energie
vrijgemaakt en gewist

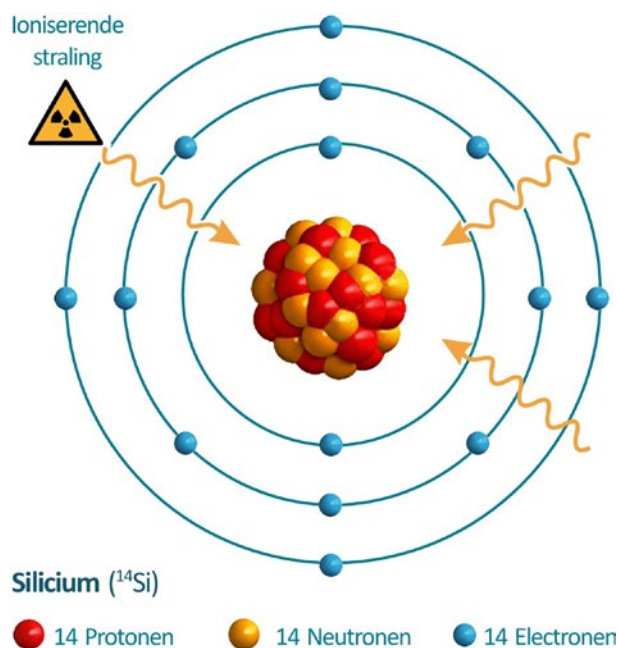


2 Wat is luminescentie

Luminescentiedatering maakt gebruik van een miniem lichtsignaaltje (het luminescentiesignaal) dat door kwartskorrels of door veldspaatkorrels uitgezonden kan worden. Het luminescentiesignaal bouwt in de loop van de tijd op door blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit. Het luminescentiesignaal van kwarts- of veldspaatkorrels verdwijnt door blootstelling aan zonlicht of aan hitte. Een paar seconden fel zonlicht of intense verhitting is al genoeg om het signaal op nul te zetten. Door het luminescentiesignaal te meten en deze informatie te combineren met een bepaling van de blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit kan geschat worden hoe lang geleden het monster voor het laatst aan zonlicht of aan hitte is blootgesteld.

2.1 Een interne klok

Elektronen in een atoom komen in een ‘wolk’ op verschillende afstanden of energieniveaus van hun atoomkern voor (afb. 2.1).⁴ De elektronen zelf zijn negatief geladen deeltjes. De atoomkern bestaat uit positief geladen deeltjes. Het gehele atoom is meestal elektrisch neutraal: er zijn evenveel negatief geladen deeltjes als positief geladen deeltjes. Alles wat massa heeft in de natuur wordt blootgesteld aan natuurlijke straling. De bodem, de lucht en de zee bevatten radioactieve stoffen, zoals uranium, thorium en kalium. Ook van de zon en van verder weg uit het heelal komt er straling op ons af (afb. 3.4).⁵ Door die straling kunnen elektronen vanuit hun neutrale toestand terecht komen in hogere energieniveaus (afb. 2.2).⁶ Normaal gesproken blijven elektronen niet lang in die verhoogde energietoestand. In het donker begraven mineralen zoals kwarts- en veldspaat zijn door foutjes in hun kristalstructuur echter in staat om die langzaam toenemende energie vast te houden en op te slaan: kwartskorrels en veldspaten gedragen zich in het donker als een oplaadbare batterij!⁷ Zolang het mineraal begraven blijft, gaat dit ‘opladen in het donker’ duizenden jaren lang door, totdat het signaal verzadigd raakt. De opgebouwde energievoorraad is daarmee een vrij nauwkeurige maat voor de tijdsduur waarin de zandkorrel geen daglicht heeft gezien (afb. 2.3).⁸



Afbeelding 2.1. Het atoommodel voor silicium (^{14}Si).

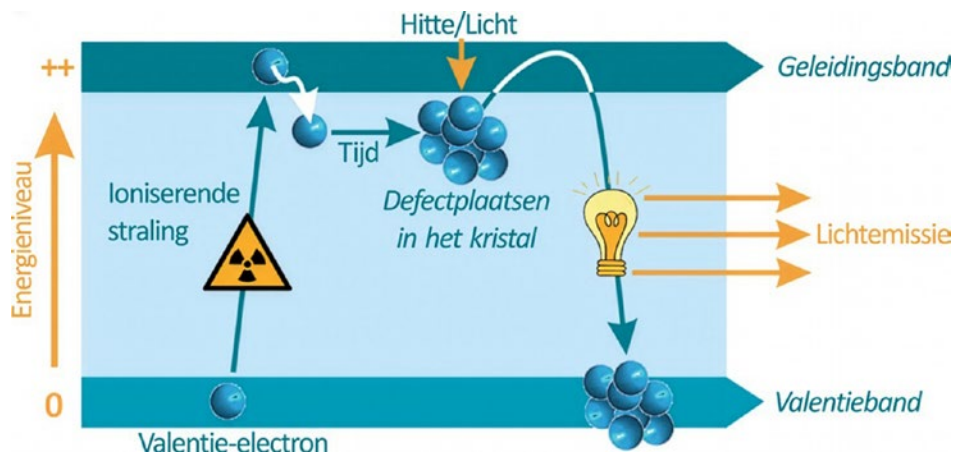
⁴ Die energieniveaus in een atoom worden de orbitalen genoemd.

⁵ De belangrijkste terrestrische radionucliden zijn kalium-40, uranium-238 en thorium-232 en al hun radioactieve vervalproducten. Door hun zeer lange halveringstijd worden ze nog steeds in grote hoeveelheden in de bodem aangetroffen: ^{40}K : 1,25 miljard jaar; ^{238}U : 4,5 miljard jaar; ^{232}Th : 14 miljard jaar (Oude Boerrigter et al. 1990; Smetsers & Bekhuis, 2021).

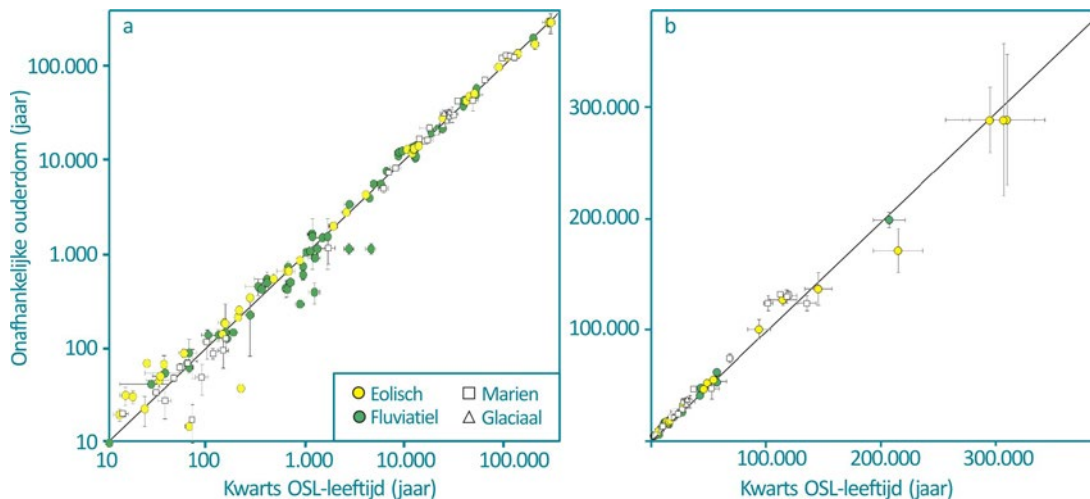
⁶ Elke schil rondom de atoomkern heeft een ander energieniveau: hoe verder van de kern, hoe hoger het energieniveau. Zogenaamde ioniserende straling heeft zoveel energie dat het atomen kan veranderen (<https://www.rivm.nl/straling-en-radioactiviteit/uitleg>)

⁷ De analogie met een oplaadbare batterij is afkomstig van Geoff Duller van Aberystwyth University (Duller 2008).

⁸ Murray & Olley 2002



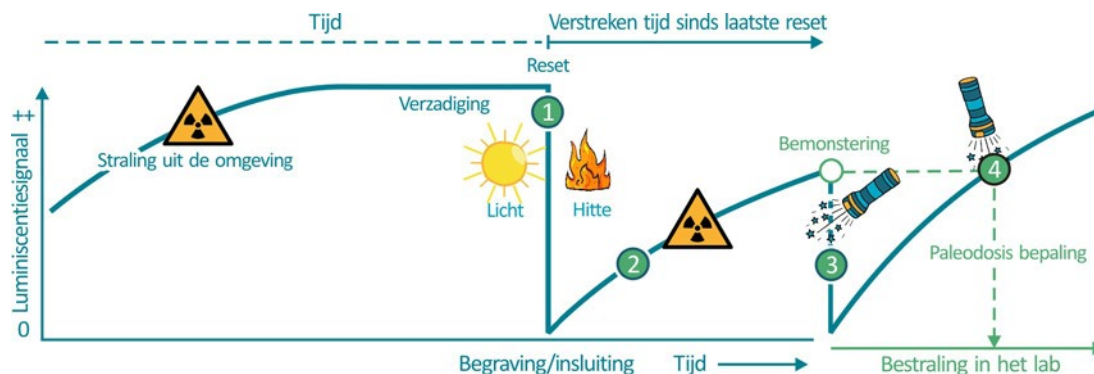
Afbeelding 2.2. Radioactieve straling duwt elektronen richting een hoger energieniveau, naar de geleidingsband. Vanuit deze instabiele toestand vallen elektronen terug naar een lager energieniveau, waarbij een klein deel van de elektronen ingevangen raakt in defectplaatsen in het kristal. In de loop van de tijd raken deze defectplaatsen steeds verder gevuld met elektronen. Door hitte of blootstelling aan licht komen deze elektronen vrij waarbij lichtdeeltjes (fotonen) kunnen worden uitgezonden. Dit is het luminescentiesignaal (naar: Aitken 1990; Preusser et al. 2008).



Afbeelding 2.3. (a) Vergelijking van kwarts luminescentiedateringen (OSL) met onafhankelijke ouderdomscontrole; (b) Als gevolg van de verzadiging van het luminescentiesignaal van kwarts zijn ouderdomsbepalingen boven de 150.000 jaar zeer onnauwkeurig (Murray & Olley 2002; Rittenour 2008, appendix tabel 1).

2.2 Het luminescentiesignaal

Wanneer in het donker begraven of ingesloten minerale korrels worden blootgesteld aan licht of hoge hitte, komen de opgesloten elektronen vrij en vallen zij terug naar een lager energie-niveau (afb. 2.4 en 3.1). De energie die daarbij vrijkomt, manifesteert zich bij kwarts- en veldspaatkorrels als een minuscuul lichtsignaaltje.⁹ Dit lichtsignaal wordt luminescentie genoemd. De intensiteit van het lichtsignaaltje is evenredig aan de hoeveelheid energie die eerder in het mineraal is opgeslagen, en daarmee gerelateerd aan de verstreken tijd. Hierdoor fungeert dit fenomeen als een natuurlijke stopwatch: het lichtsignaaltje geeft indirect de periode aan waarin de korrel geen daglicht heeft gezien of verhit is geweest. Dit lichtsignaaltje kan met specialistische apparatuur worden gemeten.



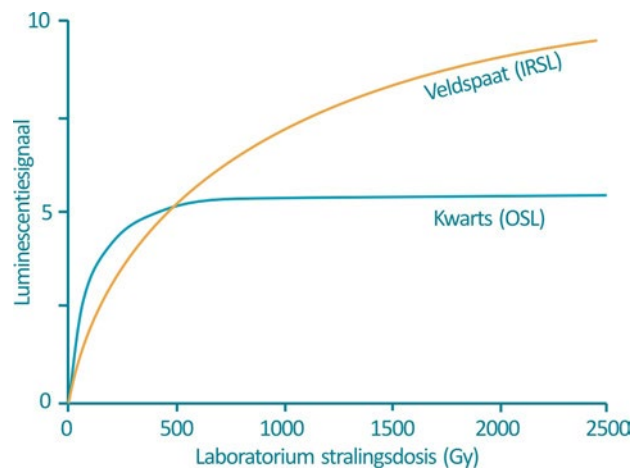
Afbeelding 2.4. De vier stappen van luminescentiedatering. (1) Het luminescentiesignaal wordt op nul gezet door verhitting of blootstelling aan zonlicht. (2) Het luminescentiesignaal bouwt opnieuw op onder invloed van radioactieve straling. In een meer radioactieve omgeving neemt het luminescentiesignaal sneller toe dan in een weinig radioactieve omgeving. (3) Na opgraving en preparatie van het monster wordt het natuurlijke luminescentiesignaal in het laboratorium gemeten door verhitting (TL) of bestraling met licht (OSL). (4) Vervolgens wordt bepaald hoeveel ioniserende straling er nodig is om een luminescentiesignaal te verkrijgen dat even helder is als het natuurlijke signaal. Deze hoeveelheid straling wordt aangeduid als de equivalente- of paleodosiswaarde.

2.3 Leeftijdsbereik

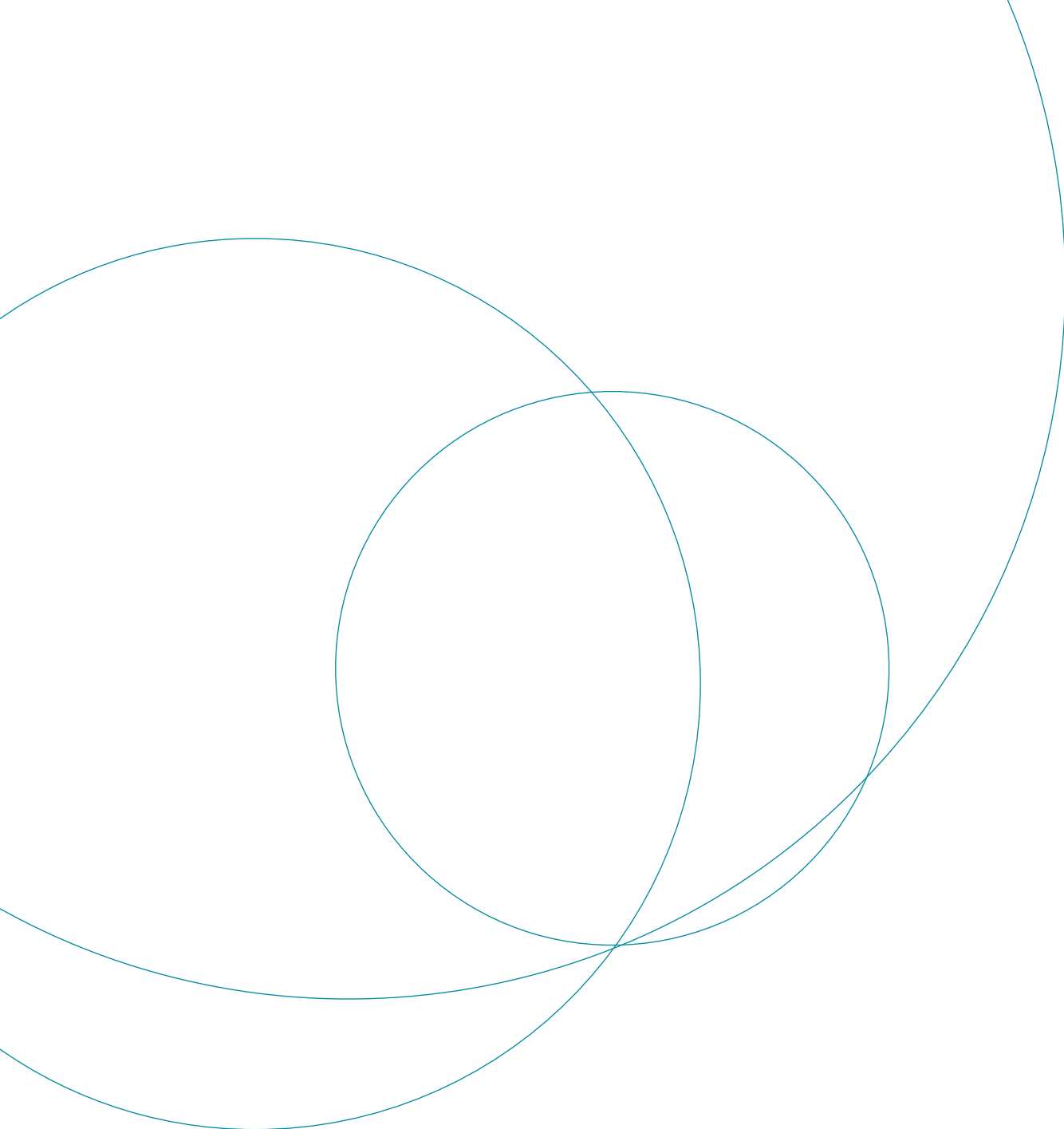
Luminescentiedatering heeft een breed leeftijdsbereik en bestrijkt de periode van enkele jaren tot een half miljoen jaar. Omdat kwarts- en veldspaatkorrels niet eindeloos opgeladen kunnen worden is het leeftijdsbereik gelimiteerd. Net als een batterij heeft de zandkorrel een bepaalde capaciteit en zal deze na verloop van tijd verzadigd raken. Wanneer een zandkorrel richting verzadiging gaat neemt de energievoorraad niet langer lineair toe met de ontvangen hoeveelheid straling (afb. 2.5). Uiteindelijk is de maximale capaciteit benut (100% opgeladen). Afhankelijk van het mineraal en de omgeving wordt dat verzadigingspunt na vele tienduizenden jaren bereikt: bij kwarts treedt verzadiging op na ongeveer 150 duizend jaar, bij veldspaat na ongeveer een half miljoen jaar.¹⁰

⁹ De luminescente kristallen zenden elektromagnetische straling uit in de vorm van fotonen (lichtdeeltjes)

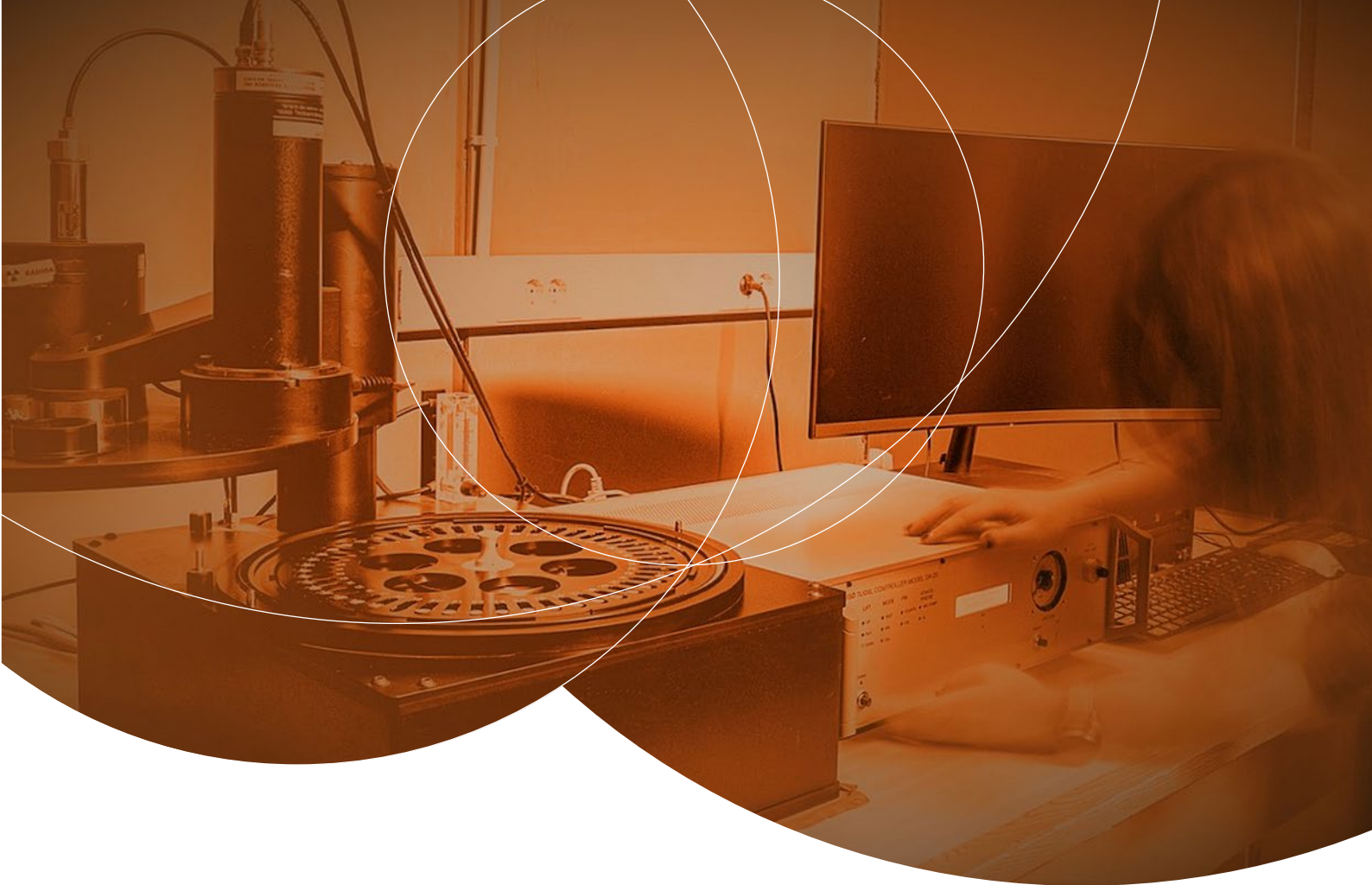
¹⁰ De kristalstructuur van veldspaat, een alumineumsilicaat met calcium, kalium of natrium, is complexer dan die van kwarts. Hierdoor komen ook meer foutjes, ofwel defecten, voor in veldspaat dan in kwarts. Omdat meer elektronen in de defecten in het kristalroosteringevangen kunnen raken, duurt het langer voordat een veldspaatkristal met deze 'overspannen' elektronen verzadigd is. Het uitgezonden signaal wijzigt hierdoor en zo kan verder teruggekeken worden in de geologische tijd (Kars 2014).



Afbeelding 2.5 Verzadiging van het luminescentiesignaal in kwarts (OSL) en veldspaat (IRSL). Verzadiging van het signaal beperkt het ouderdomsbereik van de dateringstechniek. Het luminescentiesignaal van kwarts verzadigt na ongeveer 150.000 jaar.



De opgebouwde hoeveelheid luminescentie-
energie van kwarts- of veldspaatkorrels kan
gebruikt worden om het moment van de
laatste blootstelling aan licht of intense hitte te
achterhalen



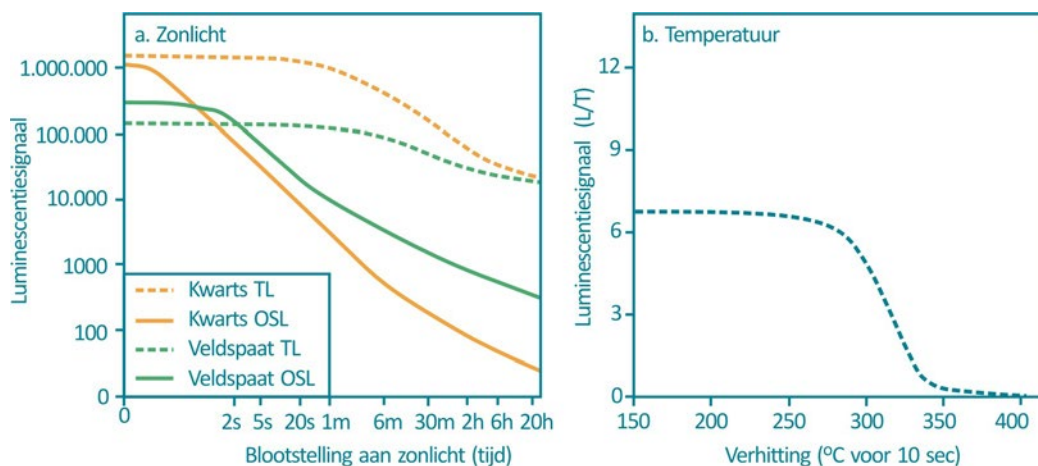
3 De ouderdomsbepaling

De opgebouwde hoeveelheid luminescentie-energie van kwarts- of veldspaatkorrels kan gebruikt worden om het moment van de laatste blootstelling aan licht of intense hitte te achterhalen. Want dat is de gebeurtenis die je gaat dateren. Van belang is dat de opgebouwde luminescentie-energie in de korreltjes zo goed als gewist werd vlak voordat ze in het donker ingesloten raakten. In andere woorden, de stopwatch moet bij de start ‘gereset’ worden voor een precieze datering.

3.1 De klok op nul

3.1.1 Blootstelling aan intens licht

Door blootstelling aan licht wordt opgeslagen luminescentie-energie vrijgemaakt en gewist. Daarmee wordt ook het luminescentiesignaal op nul gesteld. Blootstelling aan licht kan het gevolg zijn van menselijke handelingen, zoals het bij daglicht mengen van zand in bijvoorbeeld mortel of pleistermortel. Ook bij het ophogen van een structuur, zoals een grafheuvel, wal of dijk, kan tijdens het afgraven, verplaatsen en opwerpen van grond licht op de minerale korrels inwerken. Daarnaast kunnen natuurlijke processen ertoe leiden dat zandkorreltjes aan voldoende daglicht worden blootgesteld. Denk aan processen zoals verstuiving, afspoeling, riviertransport, graafwerk door dieren of door wortelwerking. Een blootstelling aan intens zonlicht gedurende enkele seconden is al genoeg om de gehele voorraad luminescentie-energie in kwartskorrels te laten verdwijnen (afb. 3.1a).¹¹ Bij veldspaten verloopt dat trager.



Afbeelding 3.1. (a) Het resetten van het luminescentiesignaal door blootstelling aan zonlicht. De grafiek laat zien dat het optisch gestimuleerde luminescentiesignaal (OSL) sneller wordt gereset dan het thermisch gestimuleerde luminescentiesignaal (TL) en dat kwartskorrels sneller worden gereset dan veldspaatkorrels (naar: Godfrey-Smith et al. 1988); (b) Het resetten van het OSL-signaal door blootstelling van kwartskorrels aan hitte (Timar Gabor et al. 2012)

3.1.2 Blootstelling aan intense hitte

Ook bij blootstelling aan hitte komt opgeslagen luminescentie-energie vrij in de vorm van licht. Als materiaal kort (10 seconden) wordt verhit tot 350-400 °C wordt het volledige luminescentiesignaal gewist (afb. 3.1b).¹² Dit gebeurt bijvoorbeeld bij het bakken van aardewerk en baksteen. Een langere blootstelling aan een iets lagere temperatuur (300 °C) heeft hetzelfde effect. Ook de korrels in de wanden en op de bodems van haard- en ovenkuilen kunnen door verhitting hun opgebouwde luminescentiesignaal verliezen. Wanneer vuursteen met vuur in aanraking komt, verliest het eveneens zijn opgebouwde luminescentiesignaal. Verbrande vuursteen en andere verhitte kiezelhoudende materialen kunnen daarom ook worden gebruikt voor luminescentiedateren.¹³

¹¹ Godfrey-Smith et al. 1988; Wallinga 2002

¹² Gabor et al. 2012

¹³ Vuursteen is een vorm van silica die lijkt op kwarts en heeft uitstekende luminescentie-eigenschappen: het geeft een helder luminescentiesignaal bij verhitting (thermoluminescentie) maar géén luminescentiesignaal bij stimulatie met licht (optisch gestimuleerde luminescentie).

3.2 De ouderdom van het monster

Het opgebouwde luminescentiesignaal in kwarts- of veldspaatkorrels kan gebruikt worden om de laatste blootstelling aan licht of aan intense hitte te bepalen. Hoe lang dat precies geleden is, kan worden bepaald door te rekenen met twee verschillende grootheden. De eerste is de opgebouwde 'lading' sinds de laatste blootstelling; dit wordt de paleodosiswaarde genoemd (zie 3.3). De tweede is de hoeveelheid natuurlijke straling die door de korreltjes van jaar tot jaar is geabsorbeerd. Deze jaarlijkse stralingsbelasting wordt het dosistempo genoemd (zie 3.4).

De tijd die verstreken is sinds de laatste blootstelling aan zonlicht of aan hitte, de luminescentieouderdom, kan met een simpele formule worden berekend:

Ouderdom (jaar) =

Paleodosis (opgebouwde lading, in Gray)

Dosistempo (jaarlijks ontvangen dosis straling, in Gray/jaar)

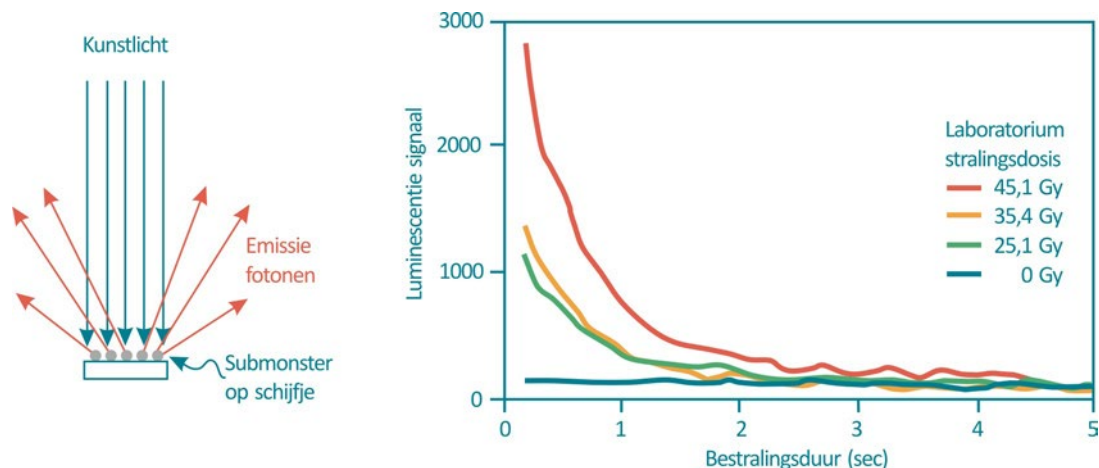
Hoewel deze formule eenvoudig is, kan de bepaling van de paleodosis en het dosistempo uitdagend zijn. Als één van deze twee grootheden niet juist is bepaald, ontstaat een fout in de ouderdom; de luminescentieleeftijd is dan niet gelijk aan de werkelijke (absolute) leeftijd.

De tijd die verstreken is sinds de laatste
blootstelling aan zonlicht of aan hitte kan met een
simpele formule worden berekend

3.3 Bepalen van de paleodosis

3.3.1 Meten van het luminescentiesignaal

In het laboratorium (een donkere kamer) worden de zandkorreltjes blootgesteld aan kunstlicht om de opgesloten elektronen (de luminescentie-energie) vrij te maken. Het luminescentiesignaal wordt in kwarskorrels opgewekt met blauw-groen licht en in veldspaatkorrels met infrarood licht.¹⁴ Voor het beschijnen van individuele korreltjes wordt een laser gebruikt.¹⁵ Wanneer de opgeslagen energie vrijkomt, lichten de korrels op en kan de sterkte/intensiteit van dit luminescentie-signaal worden gemeten (afb. 3.2a).¹⁶ Hiervoor wordt gebruik gemaakt van geavanceerde apparatuur.



Afbeelding 3.2. Een bundel fotonen (kunstlicht) wordt in het laboratorium op de korrels gericht die vervolgens reageren door fotonen van een andere golflengte uit te zenden. Hoe langer het monster begraven is geweest, hoe groter het aantal uitgezonden fotonen (naar: Huntley & Lian 1999). Rechts is de afname van de luminescentie-intensiteit te zien naarmate de lichtbestraling langer duurt, gegeven de verschillende stralingsdoses (He et al. 2010).

3.3.2 Elke zandkorrel is anders

Elke korrel zand is anders, laadt anders op en geeft een ander lichtsignaal af. Heel veel korreltjes geven zelfs géén luminescentiesignaal af. Metingen aan individuele kwarskorreltjes laten zien dat een luminescentiesignaal slechts bij een relatief klein deel van de korrels voorkomt. Doorgaans is 99% van de gemeten lichtemissie afkomstig van minder dan 5% van de korreltjes. Waarom is niet helemaal duidelijk.

Door deze natuurlijke variatie is de sterkte/intensiteit van het luminescentiesignaal niet direct te interpretern als een maat voor de ontvangen stralingsdosis. Om toch achter die hoeveelheid ontvangen straling te komen is een specifieke procedure ontwikkeld: de SAR-procedure.¹⁷ Die procedure bestaat uit twee stappen.

3.3.3 De SAR-procedure

Eerst wordt het natuurlijke luminescentiesignaal gemeten door een submonster

¹⁴ Deze techniek om luminescentie-energie vrij te maken wordt 'optische stimulatie' genoemd (Optically Stimulated Luminescence: OSL).

¹⁵ De laser kan op de individuele korrels worden gericht. Deze laser vervangt de blauwe LED's.

¹⁶ Voor kwars wordt normaal gesproken blauw of groen licht gebruikt om het luminescentiesignaal op te wekken en wordt de emissie van nabij-ultraviolet licht gemeten. Voor (kalium)veldspaat wordt normaal gesproken nabij-infraroodlicht gebruikt om het luminescentiesignaal op te wekken en worden de violet/blauw-emissies gemeten.

¹⁷ SAR: Single Aliquot Regenerative Dose.

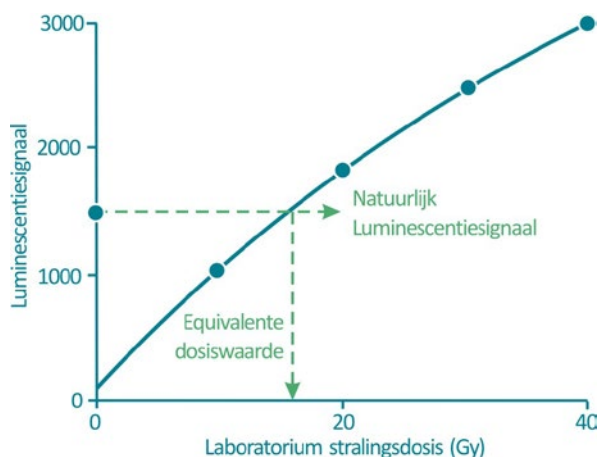
(één individueel korreltje of meerdere korreltjes tegelijk) te beschijnen met kunstmatig licht (3.3.1). Hierdoor geeft het korreltje (de korreltjes) zijn luminescentiesignaal af én ontladit volledig (afb. 3.2a).¹⁸ De intensiteit van het luminescentiesignaal wordt nauwkeurig gemeten.

Vervolgens wordt hetzelfde korreltje(s) stapsgewijs met een steeds hogere dosis kunstmatige straling beschinen en wordt na elke dosis opnieuw het luminescentiesignaal opgewekt en gemeten (afb. 3.2b).¹⁹ Het doel is om precies te bepalen hoeveel straling nodig is om een even helder signaal te wekken als de eerste keer (afb. 3.3).²⁰ Deze hoeveelheid kunstmatige straling wordt de equivalente dosiswaarde genoemd. De waarde wordt uitgedrukt in joules per kilogram, met als eenheid de Gray (Gy).

In essentie is deze tweestaps benadering een soort interne kalibratiemethode om de ‘oplaad-gevoeligheid’ van elk korreltje(s) te bepalen. Het begrijpen van de luminescentiegevoeligheid van de korreltjes is een cruciaal onderdeel van luminescentiedateren.

In de SAR-procedure zitten ook stappen ingebouwd om veranderingen in luminescentiegevoeligheid tijdens het meetproces te corrigeren, en om te checken of het luminescentiesignaal volledig op nul gesteld wordt tijdens elke nieuwe meting.

Alle equivalente dosiswaarden van de verschillende submonsters worden in een grafiek geplott en statistisch onderzocht. Uit de spreiding en na grondige statistische analyse wordt een collectieve waarde voor de dosiswaarde van het gehele monster afgeleid (zie 6.4).²¹ Die afgeleide waarde wordt de paleodosiswaarde genoemd, de beste inschatting van de daadwerkelijk ontvangen stralingsdosis sinds begraving (of verhitting). Hoewel equivalente dosis en palaeodosis soms wel inwisselbaar worden gebruikt, zijn deze waarden niet altijd gelijk aan elkaar.



Afbeelding 3.3. Om de equivalente dosiswaarde te bepalen wordt het initieel gemeten (natuurlijke) luminescentiesignaal (groene streepjes) vergeleken met de luminescentiesignalen die worden opgewekt door laboratoriumbestraling met verschillende stralingsdoses (blauwe stippen). De snijlijn van het natuurlijke signaal met de curve levert de schatting voor de equivalente dosiswaarde van het submonster op (groene pijl).

¹⁸ Voor de ‘single-grain’ methode zie Ballarini et al. 2007.

¹⁹ In jargon: het luminescentiesignaal wordt geregenereerd. De stralingsdosis wordt de regeneratieve dosis genoemd.

²⁰ Hier komt het acroniem SAR vandaan: Single Aliquot Regenerative-dose (Murray & Wintle 2000, 2003).

²¹ Afhankelijk van de statistische verdeling van alle meetwaarden (normaalverdeeld of scheefverdeeld of meertoppig verdeeld) en de begravingsswijze (duinzand, rivierzand, etc.) kiest het lab voor een (gewogen) gemiddelde, of soms juist voor de laagste uitkomsten. Zie ook Galbraith & Roberts 2012 voor een meer technische uitleg.

3.4 Bepalen van de stralingsbelasting per jaar (dosistempo)

3.4.1 Dosistempo

Om de paleodosis om te kunnen rekenen naar een ouderdom moet ook de hoeveelheid straling berekend worden die een zandkorrel van jaar tot jaar uit de omgeving heeft kunnen absorberen (3.2). Die natuurlijke straling komt van de radioactieve deeltjes die in een gebiedje van 20-30 cm rondom het monster voorkomen, en van kosmische straling (afb. 3.4). Die totale jaarlijkse stralingsbelasting wordt aangeduid als het dosistempo en uitgedrukt in Grays per jaar (Gy/jaar).

3.4.2 Bepalen van het dosistempo: de natuurlijke radioactiviteit

De jaarlijkse stralingsdosis kan bepaald worden door een gevoelige dosimeter voor lange tijd (enkele maanden) te begraven op de precieze plek waar het monster genomen is. Meestal is dat echter niet praktisch en wordt het dosistempo berekend uit gemeten concentraties radioactieve deeltjes in het monster zelf.

Een veelgebruikte methode voor bepaling van de natuurlijke radioactiviteit in een monster is gammaspectrometrie.²² De bijdrage van kosmische straling wordt berekend op basis van de locatie en begravingsdiepte. In principe verandert de concentratie radioactieve deeltjes tijdens de begravingsperiode niet; het dosistempo is dan ook constant over de hele begravingssduur.

3.4.3 Factoren die van invloed zijn op het dosistempo

Het opladen van een luminescent mineraal in de natuur wordt niet alleen bepaald door de radioactiviteit in de omgeving, maar hangt ook samen met andere factoren. De belangrijkste zijn: korrelgrootte, begravingsdiepte, watergehalte en de samenstelling en gelaagdheid van de bodem. Veldspaatkorrels zijn bovendien van zichzelf radioactief omdat ze kalium bevatten. Het dosistempo wordt dus zowel beïnvloed door interne mineralogische factoren als omgevingsfactoren (afb. 3.4). De meting van natuurlijke radioactiviteit kent een relatief kleine onzekerheid van 3%. De andere factoren kunnen tot een grotere onzekerheid in de dosistempobepaling leiden.

Begravingsdiepte/bijdrage kosmische straling

Een relatief klein deel van de ioniserende straling is afkomstig van de zon en van bronnen buiten het zonnestelsel (afb. 3.4). Hoe groter de diepte waarop het monster of artefact begraven heeft gelegen, hoe kleiner de invloed van kosmische straling op het dosistempo is geweest. Voor monsters of artefacten die lange tijd dicht onder het oppervlak begraven hebben gelegen, is die kosmische component wel relevant. Een schatting van de begravingssgeschiedenis is daarom belangrijk om het dosistempo goed te kunnen berekenen.

Invloed van water in de bodem

Water kan ioniserende straling goed absorberen. Hoe meer vocht in de bodem, hoe minder ioniserende straling de korrels bereikt, dus hoe lager het dosistempo. Als vuistregel kan gesteld worden dat als het monster één procent meer water bevat, het dosistempo in de korrels één procent lager is. Het gemiddeld watergehalte tijdens de periode van begraving moet daarom meegenomen worden in de berekening van het dosistempo. Om variaties in het watergehalte tijdens de begravingsperiode mee te wegen, wordt met een extra onzekerheidsmarge rekening gehouden.

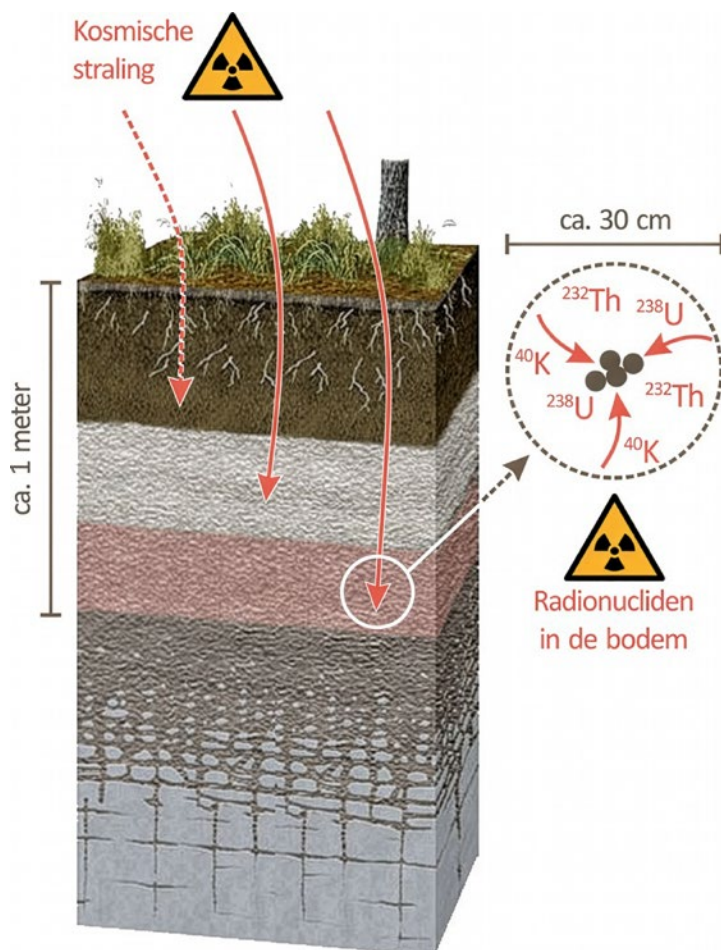
Met name rond de fluctuerende grondwaterspiegel kan in- of uitspoeling van radioactieve

²² Een gammaspectrometer meet de stralingsactiviteit van natuurlijke radionucliden van de uranium en thorium vervalreeksen en van kalium. Andere meetmethoden zijn (gecombineerde) alpha en beta tellingen, of chemische analyses.

elementen plaatsvinden. Dit kan een plaatselijke aanrijking of verarming met radioactieve deeltjes tot gevolg hebben. Hierdoor kan de natuurlijke achtergrondstraling lokaal hoger of lager zijn en zelfs veranderen tijdens de begravingsperiode. Als de activiteit van de verschillende radionucliden (U, K, Th) in een monster gelijk is, geeft dat aan dat er geen in- of uitspoeling van radioactief materiaal heeft plaatsgevonden.

Samenstelling en gelaagdheid van de bodem

Als de directe omgeving homogeen is, is de jaarlijkse stralingsbelasting overal gelijk en goed te bepalen. Dicht bij een overgang in grondsoorten (bijvoorbeeld van klei naar zand of veen) of in de buurt van in- of uitspoelingshorizonten moet rekening gehouden worden met de relatieve bijdrage van de verschillende grondsoorten en concentraties radioactieve elementen. Organisch materiaal heeft feitelijk hetzelfde absorberende effect als water, en vermindert de straling die de minerale korrels bereikt.²³ Klei kan als een spons veel water opnemen.²⁴ Ook kan het watergehalte van klei sterk fluctueren. Een dosistempobepaling is dan ook minder nauwkeurig voor kleiige afzettingen dan voor zandige afzettingen. Luminescentiedateringen van kleiige afzettingen zijn om die reden minder nauwkeurig.



Afbeelding 3.4. Bronnen van natuurlijke ioniserende straling. Alfa- en betastraling komt uit de directe omgeving van het monster (tot enkele millimeters), terwijl gammastraling een grotere dracht heeft.

²³ Organisch materiaal bevat vaak koolstofrijke verbindingen die stralingsenergie kunnen opnemen en omzetten in warmte. Klei bevat mineralen met hoge dichtheid en vaak ook metalen (zoals ijzer of alumineumverbindingen) die bijdragen aan de absorptie van stralingsenergie.

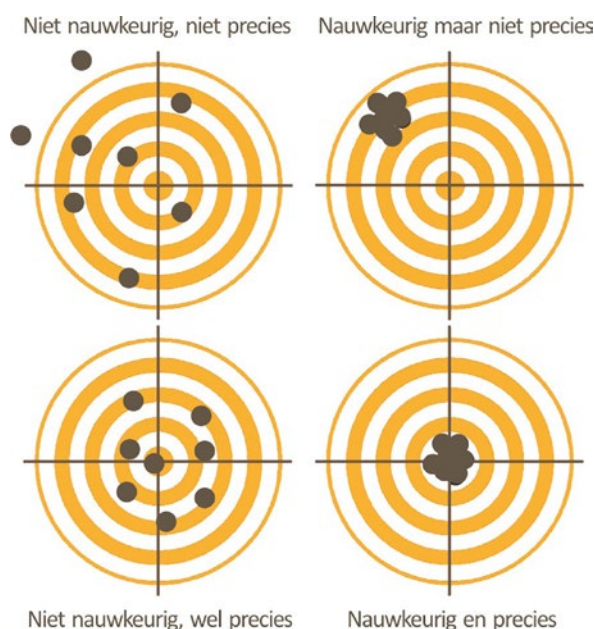
²⁴ Willemse/Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed 2021.

3.5 Is de gemeten luminescentieleeftijd nauwkeurig en precies?

3.5.1 Nauwkeurig én precies?

Dat de luminescentieleeftijd van zandkorrels met een bepaalde nauwkeurigheid kan worden bepaald, betekent niet automatisch dat deze leeftijd ook de absolute ouderdom precies benadert. Er bestaat namelijk een wezenlijk verschil tussen nauwkeurigheid en precisie (afb. 3.5). Ter illustratie: een modern horloge kan de tijd tot op éénhonderdste van een seconde aangeven, maar toch drie uur achterlopen. Zo'n horloge is dan zeer nauwkeurig, maar niet erg precies. Het verschil tussen nauwkeurig en precies speelt ook bij de vraag of een luminescentiedatering de werkelijke (absolute) ouderdom van een monster weergeeft.²⁵

Cruciaal is in ieder geval dat vrijwel alle opgeslagen luminescentie-energie uit zandkorreltjes is verdwenen vlak vóór begraving of insluiting. Dat laatste moment van volledige 'ontlading' is namelijk het tijdstip dat je wilt dateren (afb. 2.4).²⁶ Wanneer deze ontlading onvolledig is geweest (de stopwatch is niet goed 'gereset'), zal de berekende ouderdom te hoog uitvallen. Zowel de nauwkeurigheid als de precisie van de datering hangen dus niet alleen af van de meetmethode, maar ook van de context waaruit het monster is genomen. Belangrijk is ook dat het monster duidelijk geassocieerd is met de archeologische gebeurtenis die je wilt dateren.



Afbeelding 3.5. Visualisatie van de begrippen nauwkeurigheid en precisie, aan de hand van een schietschijf (naar: Haneca et al. 2019).

3.5.2 Nauwkeurig

De nauwkeurigheid waarmee de luminescentieleeftijd van een monster bepaald kan worden bedraagt onder de meest ideale omstandigheden 3% van de leeftijd. Dus als een monster 2500 jaar oud dateert, valt de werkelijke leeftijd tussen 2425 en 2575 jaar (2500 ± 75 jaar). Deze (on)nauwkeurigheid is een gevolg van onzekerheden in de calibratie van de meetapparatuur en van onzekerheden in de berekening van de jaarlijkse stralingsbelasting (dosistempo).²⁷ De gerapporteerde onzekerheidsmarge (± 75 jaar) betreft 68% van de standaardverdeling (1-sigma). Dat betekent dat er 68% kans is dat de werkelijke leeftijd

²⁵ De vraag in hoeverre een ouderdomsbepaling niet alleen nauwkeurig is maar ook precies speelt ook bij andere dateringmethoden in de archeologie.

²⁶ Dat een zandkorrel voldoende gebleekt of verhit is geraakt is één van de belangrijkste aannames om uitspraken te kunnen doen over hoe precies een luminescentiedatering de werkelijke leeftijd van een monster (object) benadert.

²⁷ Calibratie van bijvoorbeeld een beta-bestrallingsbron is mogelijk met een nauwkeurigheid van 3%. Dit is de maximaal haalbare nauwkeurigheid waarmee de hoeveelheid luminescentie-energie gemeten kan worden.

binnen het opgegeven bereik van 2425-2575 jaar geleden zal vallen, en 32% kans dat het (net) daarbuiten zit.

3.5.3 Precies

In de natuur verloopt de lichtblootstelling wat ingewikkeld. Zandkorrels bestaan in verschillende grootte en samenstelling en de verplaatsingswijze en lichtblootstelling van zand varieert van korrel tot korrel. De sterkte van het daglicht varieert met het tijdstip van de dag, het seizoen, het weer, de geografische locatie en andere lokale omstandigheden. Bovendien kunnen korrels in troebel of diep water vervoerd worden, of een (ijzer)huidje hebben, die het indringen van licht in het kristal afzwakt.

Windafzettingen hebben meestal veel zonlicht gezien voor begraving en zijn dan goed gebleekt (afb. 3.6a). In het vaak troebele of diepe water van een rivier of langs de kust wordt veel zonlicht weggefilterd en is die kans op voldoende lichtblootstelling veel kleiner (afb. 3.6b).²⁸ Transport over langere afstanden en/of gedurende langere tijd zal echter niet alleen de kans op voldoende lichtblootstelling vergroten maar ook de kans dat korrels dicht bij het wateroppervlak terecht komen. Uiteindelijk bepaalt de hoeveelheid lichtenergie die een zandkorrel heeft ontvangen de kans op een volledige reset van het luminescentieklokje. Daarbij geldt dat een langdurige blootstelling aan weinig licht net zo effectief kan zijn als heel veel licht in korte tijd.²⁹

Korreltjes in grondsporen, akkerlagen of ophoogpakketten kunnen wél of níet voldoende aan zonlicht zijn blootgesteld, afhankelijk van de vormingswijze van de spoorvulling, de akkerlaag of de ophoging (zie afb. 4.6). Korreltjes ingesloten in kluiten zijn doorgaans slecht gebleekt. Lokale verspoeling van (ouder) sediment is ook een probleem. Sediment in bijvoorbeeld crevassewaaiers of overslagdekken is vaak lokaal weggespoeld uit oudere lagen en door de korte transportafstand mogelijk slecht gebleekt. Het verplaatsen van goed gebleekte en slecht gebleekte zandkorreltjes in de bodem door gravende en woelende dieren (zoals mollen, wormen, konijnen, zwijnen) en door wortelwerking van planten vormt een ander probleem.³⁰ De volledigheid waarmee de luminescentieklok 'op nul' is gezet, kan dan ook van korrel tot korrel verschillend zijn en is afhankelijk van de omstandigheden.

Er zijn gelukkig verschillende methoden ontwikkeld om aan de hand van de luminescentiemetingen te bepalen of het luminescentiesignaal volledig op nul heeft gestaan in alle korrels. Deze methoden maken bijvoorbeeld gebruik van de spreiding van de equivalente dosiswaarden die zijn verkregen op kleine submonstertjes (zie 3.3.3 en 6.4). Idealiter bestaan deze submonsters uit individuele korrels (single-grain).³¹

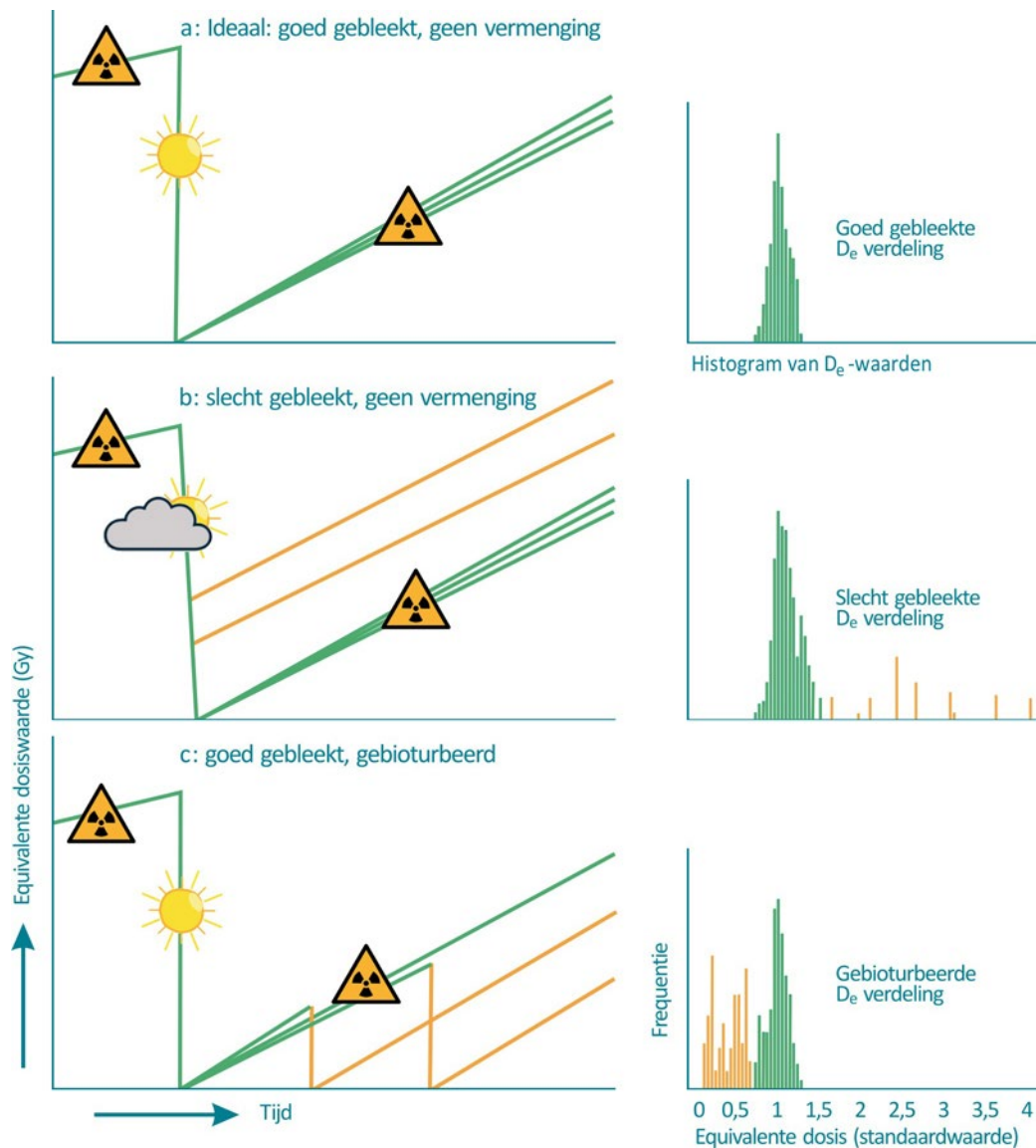
Voor aardewerk en andere verhitte artefacten is die reset bij voldoende hoge temperaturen meestal volledig – hier verwachten we dan ook geen verschillen tussen korrels.

28 Dat komt doordat licht dat door water schijnt weinig UV- en blauw licht bevat, en die componenten zijn belangrijk voor bleking.

29 Bijvoorbeeld Rhodes 2011, Ch. 4.; de Boer et al. 2026

30 Vooral voor jonge monsters is het van groot belang dat de opgebouwde luminescentie-energie helemaal verdwenen is. Als dit niet het geval is zal de ouderdom al snel worden overschat.

31 Andere methoden vergelijken de resultaten tussen verschillende mineralen met verschillende lichtgevoeligheid, of maken gebruik van verschillende luminescentiesignalen bij verschillende golflengten kunstlicht.



Afbeelding 3.6. Drie voorbeelden van verschillende spreidingen van equivalente doses in een monster en hun oorzaken. (a) In het ideale geval wordt het luminescentiesignaal van alle korrels tijdens de laatste lichtblootstelling gereset. Alle korrels leveren vergelijkbare equivalente doses op waarbij kleine verschillen in dosistempo tussen individuele korrels kleine afwijkingen veroorzaken; (b) Wanneer de lichtblootstelling beperkter is geweest wordt het luminescentiesignaal van slechts een deel van de korrels gereset. De laagste equivalente doses (groen) zullen de werkelijke geaccumuleerde dosis vanaf het moment van begraving/insluiting weerspiegelen. Andere equivalente doses overschatten deze waarde (oranje); (c) Als een deel van de korrels ná begraving/insluiting opnieuw aan het oppervlak komt, worden deze individuele korrels opnieuw aan daglicht blootgesteld en wordt het luminescentiesignaal gereset. Het moment van afzetting en begraving komt overeen met de hoogste equivalente dosiswaarden (groen). De lagere equivalente dosiswaarden geven informatie prijs over latere bodemprocessen (oranje).

3.5.4 Andere factoren van invloed op nauwkeurigheid en precisie

Verzadiging van heel oud materiaal

Minerale deeltjes die verzadigd raken hebben zoveel straling geabsorbeerd dat vrijwel alle ruimte om luminescentie-energie op te slaan is bezet. De groeicurve van ladingopbouw begint af te vlakken en eindigt in een vlakke lijn (afb. 2.5). Wanneer dit gebeurt kunnen kleine meetfouten (y-as) leiden tot grote fouten in de bepaling van de equivalente dosis (x-as).³² Het gevolg is dat het gemeten luminescentiesignaal van heel oude zandkorreltjes niet betrouwbaar genoeg is om een nauwkeurige leeftijd te berekenen. Dat zo'n monster heel oud is kan wel bepaald worden, maar niet precies hoe oud.

Het is moeilijk om de fout in heel oude korreltjes te kwantificeren. Datering van materiaal wat in dit verzadigingsbereik valt (ruwweg meer dan 100.000 jaar) moet met de grootste voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Voor hele oude afzettingen of artefacten kan gebruik worden gemaakt van mineralen met een veel grotere verzadigingslimiet, zoals veldspaat, en door gebruikt te maken van infrarood licht om het luminescentiesignaal op te wekken.³³

Fading

Een nadeel van veldspaten is dat in de loop van de tijd een deel van de luminescentie-energie kan 'weglekken'. Dit wordt met de Engelse term fading aangeduid.³⁴ Bij kwarts speelt dit probleem niet.³⁵ Het weglekken van luminescentie-energie uit veldspaten zorgt ervoor dat de berekende leeftijd te jong uitvalt, minder betrouwbaar is en minder precies. Op basis van gemeten fading in labtesten is het mogelijk om het luminescentiesignaal te corrigeren en een meer betrouwbare ouderdom te berekenen.

Omdat fading voorkomt bij alle soorten veldspaten en omdat fading het opgebouwde luminescentiesignaal verandert, zijn manieren gezocht om dit dateringsprobleem op te lossen. De laatste jaren wordt veel gebruik gemaakt van een signaal dat in twee (of meer) stappen gemeten wordt. In een eerste meting met infrarood (IR) licht wordt het signaal dat gevoelig is voor fading uitgelezen. Vervolgens wordt een tweede (IR) meting bij verhoogde temperatuur gedaan. Dit wordt post-infrarood gestimuleerde luminescentie genoemd, kortweg pIRIR. Deze methode is veel minder gevoelig voor fading en geeft zo een meer betrouwbare uitkomst.³⁶ Nadeel van pIRIR luminescentiesignalen is dat dit signaal in veldspaatkorrels minder gevoelig is voor een reset door zonlicht, en dus minder snel gebleekt kan worden (afb. 3.1a). Op basis van de verwachte leeftijd en afzettingsmilieu moet de specialist een keuze maken tussen meer stabiele maar moeilijk bleekbare signalen en goed bleekbare signalen die minder stabiel zijn.

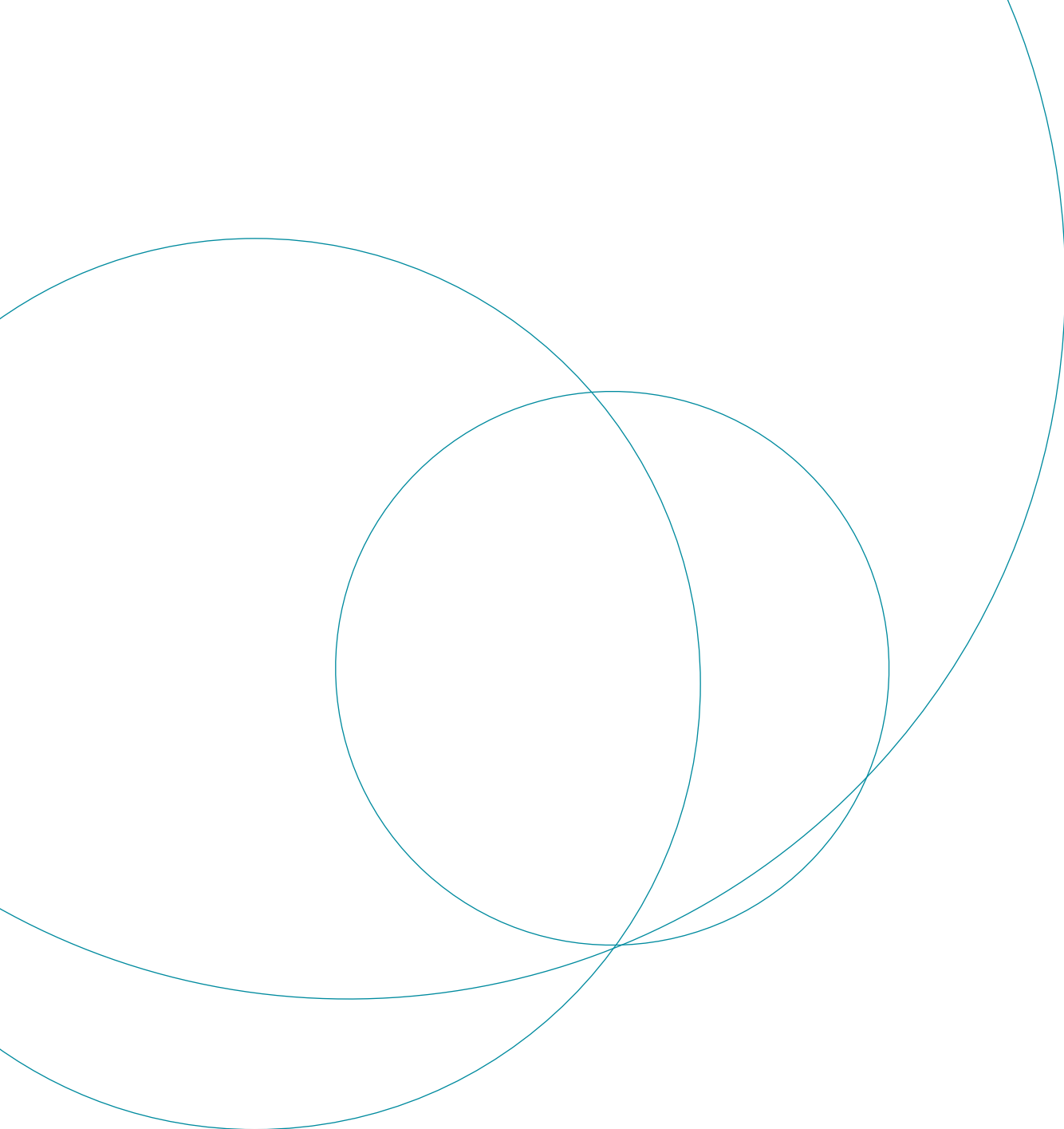
³² De relatie tussen het dosistempo en de groeicurve van de geabsorbeerde luminescentie-energie (technisch bekend als de dosisresponscurve), vlakkt af van lineair naar sublineair en uiteindelijk naar een verzadigingspunt (afb.2.5).

³³ Daarvoor zijn verschillende technieken en meetprotocollen ontwikkeld, zoals infrarood gestimuleerde luminescentie (IRSL) en post-infrarood gestimuleerde luminescentie (pIR-IRSL). Zie bijvoorbeeld IR-RF: Murari et al. 2021; VSL: Ankjaergaard et al. 2015; IRSL en post-IR IRSL: Ishi 2024; TT-OSL: Tamburini et al. 2022. Zie ook het proefschrift van Kars 2014.

³⁴ Riedesel 2025

³⁵ Het duurt veel langer voordat een veldspaatkristal verzadigd is. Zo kan verder teruggekeken worden in de tijd.

³⁶ Post-infrarood infrarood gestimuleerde luminescentie: Thomsen et al. 2008; Kars et al. 2012



Luminescentiedatering maakt het mogelijk om
zandkorreltjes in sedimentlagen,
spoorvullingen of cultuurlagen te dateren



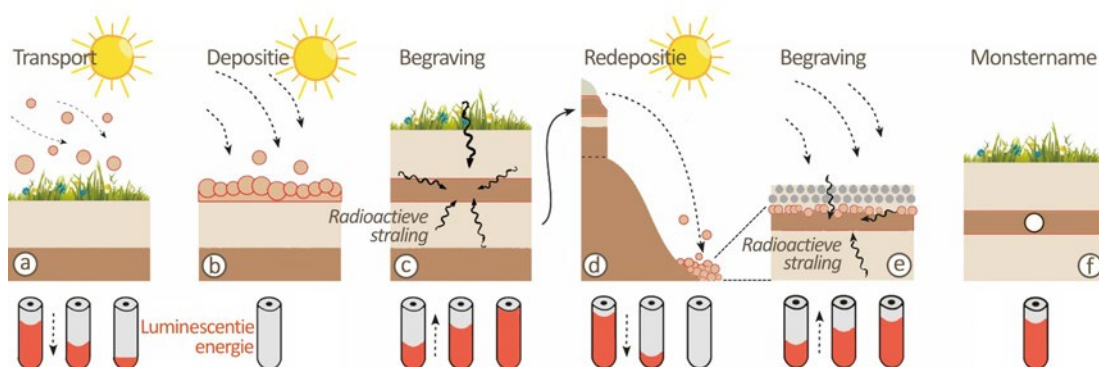
4 Dateren van sediment, cultuurlagen en spoorvullingen

Luminescentiedatering maakt het mogelijk om zandkorreltjes in sedimentlagen, spoorvullingen of cultuurlagen te dateren. Zeker wanneer organisch materiaal of goed dateerbare artefacten daarin ontbreken, kan de methode van grote waarde zijn. Om een gebeurtenis succesvol te dateren is het op de eerste plaats belangrijk dat het opgebouwde luminescentiesignaal in de korrels zo goed als gewist werd vlak voordat de korreltjes begraven raakten. Het luminescentiesignaal verdwijnt uit de zandkorrel door blootstelling aan zonlicht.

4.1 Aan licht blootgestelde zandkorreltjes

David Huntley publiceerde in 1985 samen met twee collega's de methode om zandkorrels te dateren op basis van de verstreken tijd sinds de laatste blootstelling aan licht.³⁷ In de twintig jaar die volgden werd de methode doorontwikkeld tot wat we nu optisch dateren noemen, voluit 'optisch gestimuleerde luminescentie' (OSL).³⁸ Een goed voorbeeld van een toepassing van de methode is het dateren van duinzand. Doordat de korrels in het duinzand langdurig aan licht zijn blootgesteld (op het strand en tijdens windtransport) voordat ze in het duin begraven zijn geraakt, is het luminescentiesignaal in alle korrels volledig gereset (afb. 4.2).³⁹ In de natuur verloopt de lichtblootstelling vaak wat ingewikkelder. In sommige typen afzetting zijn niet alle korrels aan genoeg licht blootgesteld om het luminescentiesignaal helemaal weg te vagen. Toch is de ervaring dat lichtblootstelling vaak voldoende is geweest om het signaal te resetten in het grootste deel van de korrels. Dit komt omdat het niet alleen de intensiteit van het licht is, maar de totale lichtblootstelling.⁴⁰ Hierdoor kan zelfs riviersediment goed gedateerd worden, mits het materiaal over lange afstand vervoerd werd.⁴¹ In de Nederlandse context is dit meestal het geval.

Aan licht blootgestelde sedimentdeeltjes komen ook voor in bewoningslagen of afvallagen, maar ook in lagen die het oudtijds bewoonde oppervlak afdekken, in de opvullingen van kuilen en greppels en in ophooglagen.



Afbeelding 4.1. Opbouw en afgifte van luminescentie-energie in sedimentdeeltjes. (a) Tijdens het transport van sediment komt de opgehoopte energie door lichtblootstelling vrij; (b) Voorafgaand aan begraving is alle luminescentie-energie verdwenen en is de "batterij" ontladen; (c) Ingesloten in het donker neemt de luminescentie-energie langzaam maar gelijkmatig toe onder invloed van radioactieve straling; (d en e) Dit proces van transport/ontladen en begraving/opladen kan zich in de natuur meerdere keren herhalen; (f) Wanneer een monster wordt verzameld, kan de opgeslagen energie sinds de laatste 'reset' in het lab worden gemeten. De emissie van luminescentie-energie door de sedimentdeeltjes wordt gebruikt om een luminescentieleeftijd te verkrijgen (naar: Riedesel 2018/Aberystwyth University).

³⁷ Huntley 1985; Huntley, Godfrey-Smith & Thewalt, 1985. Optical dating of Sediments. Nature 313.

³⁸ Zie ook Wintle 2008: Fifty years of luminescence dating, 290 e.v.

³⁹ Ballarini et al. 2003

⁴⁰ de Boer et al. 2026

⁴¹ Wallinga, 2002; Rittenour, 2008; Cunningham & Wallinga 2012; Gray et al. 2017. Transport over langere afstanden en/of gedurende langere tijd zal niet alleen de kans op voldoende lichtblootstelling vergroten maar ook de kans dat korrels dichter bij het wateroppervlak terecht komen, wat bijvoorbeeld de toename van goed gebleekte rivierzand in stroomafwaartse richting van rivieren verklaart. Ook zandkorrels op een zandbank of oever worden blootgesteld aan zonlicht.

4.2 Toepassingen

Om een gebeurtenis in het verleden, zoals bijvoorbeeld verstuing, het opwerpen van grond of het bewerken van een akker, succesvol te dateren is het op de eerste plaats belangrijk dat het opgebouwde luminescentiesignaal in de korrels zo goed als gewist werd vlak voordat de korreltjes begraven raakten. Met andere woorden, ze moeten volledig door zonlicht zijn ‘gebleekt’ (zie 3.5). Op de tweede plaats moet er een duidelijke en onmiskenbare associatie bestaan tussen de te dateren archeologische gebeurtenis en de kans op lichtblootstelling tijdens, direct voorafgaand of kort ná deze gebeurtenis. Belangrijk is natuurlijk ook om je af te vragen of de precisie van de luminescentieleeftijd naar verwachting voldoende is om de archeologische vraag te beantwoorden en of er andere dateringsbronnen (koolstof-14, goed dateerbare artefacten, jaarringonderzoek, schriftelijke bronnen) aanwezig zijn.

Ruwweg zijn er vijf dateringstoepassingen:⁴²

1. Ouderdomsbepaling van sedimentlagen, bijvoorbeeld afdekkende sedimentlagen voor het verkrijgen van een sluitdatering;
2. Ouderdomsbepaling van begraven oude oppervlakken zoals akkerlagen, betredingshorizonten, vloeroppervlakken en wegverhardingen;
3. Ouderdomsbepaling van zandkorrels in opgevulde sporen zoals kuilen en greppels;
4. Ouderdomsbepaling van zandkorrels in opgeworpen grond, zoals dijk- en terplagen, wallen en heuvels;
5. Ouderdomsbepaling van zandkorrels in mortels/specie, vleilagen of pleisterwerk;

Naast de dateringstoepassingen kunnen luminescentie-eigenschappen en spreiding/verdeling van equivalent dosiswaarden in een monster informatie verschaffen over de formatieprocessen (cultureel, natuurlijk) op de vindplaats.

4.3 Dateren van sediment

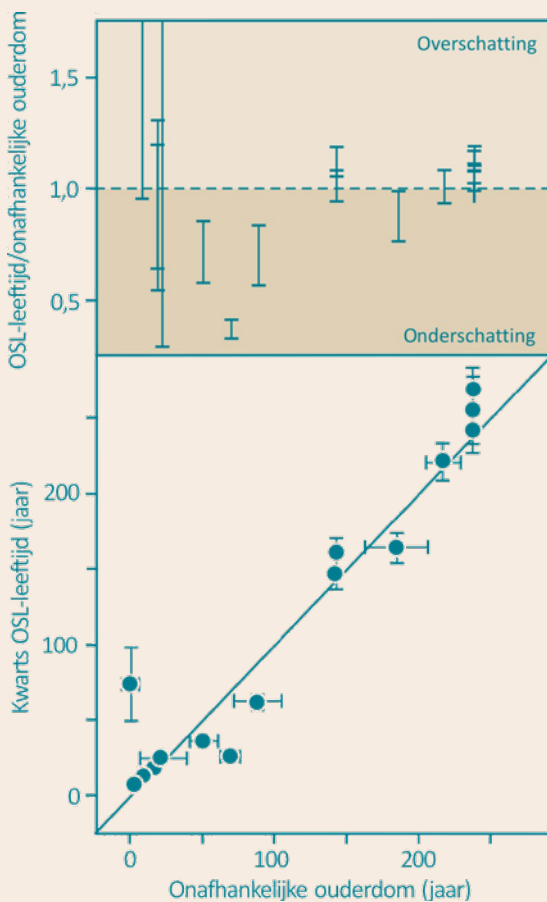
Door geologische processen gevormde sedimentlagen kunnen om verschillende redenen voor een archeoloog interessant zijn om te dateren. Op de eerste plaats wil je vaak weten hoe oud het oppervlak is waar de mensen op leefden. Op de tweede plaats wil je begrijpen wanneer de bedekking van de bewoningslaag of het spoor (of object) is ontstaan. Daarmee ontstaat inzicht in de vraag wanneer een bepaalde plek/object werd verlaten (de sluitdatering) en wat de conserveringsgeschiedenis is geweest. Een derde reden is het onderzoek naar de relatie mens-landschap, waarbij met name de wisselwerking tussen geologische processen en menselijke activiteiten centraal staat.

Zandkorrels moeten voldoende zijn blootgesteld aan daglicht om betrouwbaar te dateren. Sedimenten die door de wind zijn afgezet, zoals duinzand, stuifzand, dekzand of löss, zijn het meest geschikt. Voor riviersedimenten en hellingafzettingen hangt de lichtblootstelling (duur, intensiteit) sterk af van de specifieke situatie zoals transportafstand en hellingproces. Over het algemeen leidt een lange transportduur (grotere rivieren) en oppervlakkige hellingprocessen tot voldoende lichtblootstelling, terwijl in andere gevallen statistisch modelleren van equivalente dosiswaarden nodig is om uit de metingen een betrouwbare ouderdom af te kunnen leiden (zie 6.4).

42 Bijvoorbeeld Huang et al. 2025, Vletter & Spek 2021, Van Beek et al. 2025; Choi et al. 2024

De duinenrijen op Texel

Eén van de eerste onderzoeken in Nederland waar luminescentiedateren met succes werd toegepast, vond plaats op de zuidpunt van Texel (De Hors), waar de duinen in zuidwestelijke richting aangroeien. Duinzand is zeer geschikt voor luminescentiedatering omdat de opgestoven en weggestoven korrels vóór afzetting vaak aan ruim voldoende licht zijn blootgesteld. Het ontstaan van de duinenrijen van De Hors in de afgelopen 300 jaar was daarnaast nauwkeurig bekend uit oude kaarten. Een mooie testcase dus om te demonstreren dat luminescentie-ouderdommen nauwkeurig én precies kunnen zijn. Op de historische kaarten is te zien dat de zuidkant van het eiland in zeewaartse richting aangroeide, waarbij telkens nieuwe duinrijen ontstonden. Voor deze studie werd van elke duinenrij een zandmonster verzameld voor het bepalen van de luminescentie-ouderdom en vergeleken met de ouderdom zoals bekend van oude kaarten. De luminescentiedateringen bleken goed overeen te komen met de oude kaarten (afb. 4.2) en toonden aan dat een luminescentiedatering van sedimenten met een nauwkeurigheid van enkele decennia mogelijk is (Ballarini et al. 2003. *Optical dating of young coastal dunes on a decadal time scale*).



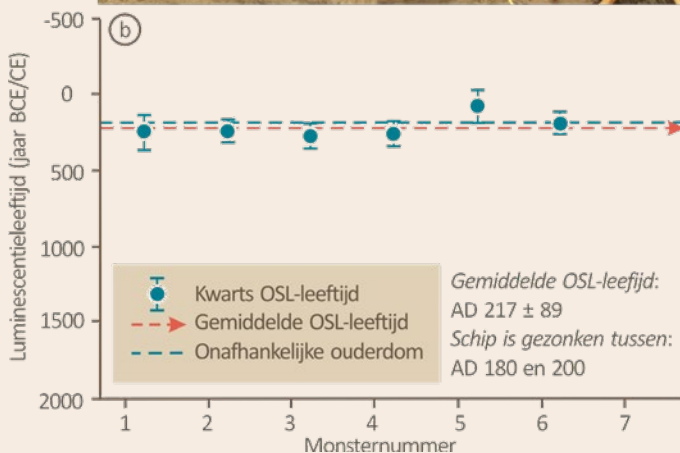
Afbeelding 4.2. Vergelijking tussen kwarts OSL-dateringen van duinzand en de ouderdom van de duinen zoals bekend van historische kaarten. In de bovenste grafiek wordt de verhouding tussen de bekende ouderdommen en de luminescentie-ouderdommen weergegeven. Bij waarde 1 zijn de leeftijden gelijk (Ballarini et al. 2003).

Het Romeinse rivierschip De Meern 1

In 2003 werd de goed geconserveerde Romeinse platbodem 'De Meern 1' bij Leidsche Rijn opgegraven. Jaarringonderzoek wees uit dat het schip rond 150 CE was gebouwd. Typologisch onderzoek van schoenen die in de inventaris van het schip werden gevonden wees uit dat het schip tussen 180 en 200 CE moet zijn vergaan. Voor het dateren van de zandige afzettingen direct onder het schip en in het schip werden verschillende luminescentiemonsters genomen. Voor elk monster werd een groot aantal individuele zandkorrels doorgemeten. De rivierzandafzettingen bleken gevormd te zijn rond 120 CE (± 93), wat binnen de onzekerheid overeenkomt met de veronderstelde datering van het vergaan van het schip. Een belangrijke conclusie van dit onderzoek is dat met de luminescentiemethode rivierbeddingzanden zodanig precies gedateerd kunnen worden dat ze aansluiten op andere (archeologische) dateringsbronnen (De Groot & Morel 2007. *Resultaten van het onderzoek naar de platbodem 'De Meern 1'*)



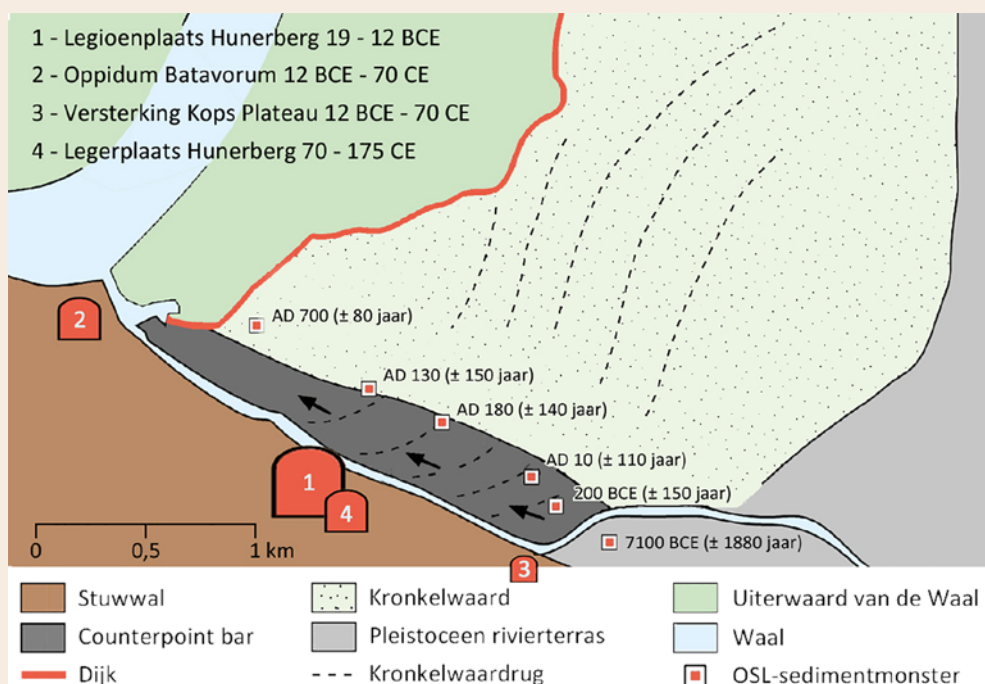
Afbeelding 4.3. (a) Bemonstering van sedimentlagen op en rond de Romeinse platbodem 'De Meern 1'. De resultaten van de kwarts OSL-datering van de zes monsters staan in (b) weergegeven. Vijf van de zes monsters leverden een datering op (rode stippellijn) die binnen 1-sigma overeenkomt met de leeftijd van het schip en het tijdstip van zinken die met andere methoden was vastgesteld (blauwe stippellijn).



Licht dringt maar enkele millimeters door in het sedimentoppervlak

Romeinse Waal onder het Kops plateau

In de riviervlakte van de Rijn direct onder het Kops Plateau en de Hunerberg te Nijmegen is onderzoek gedaan naar de ouderdom en dynamiek van een grote Rijnmeander uit de Romeinse tijd. Precies boven deze meanderbocht ligt op de stuwwal een reeks elkaar in de tijd opvolgende Romeinse nederzettingen en kampementen. Mogelijk zijn de locaties stroomafwaarts verplaatst vanwege de zich verplaatsende rivierbocht. Deze veronderstelling is getest door het dateren van de in het maaiveld zichtbare kronkelwaardafzettingen. De verkregen luminescentie-ouderdommen tussen 200 BCE (± 150 jaar) en 700 CE (± 80 jaar) laten zien dat de rivierbocht zich stroomafwaarts verlegde met bijna twee meter per jaar en in dezelfde richting bewoog als de nederzettingen en kampementen. Deze studie toont het potentieel aan van luminescentiedatering om inzicht te geven in de rivierdynamiek van het onbedijkte Nederlandse rivierenlandschap (Boterman et al. 2024. *Late-Holocene counterpoint deposition in the Lower Rhine river*).



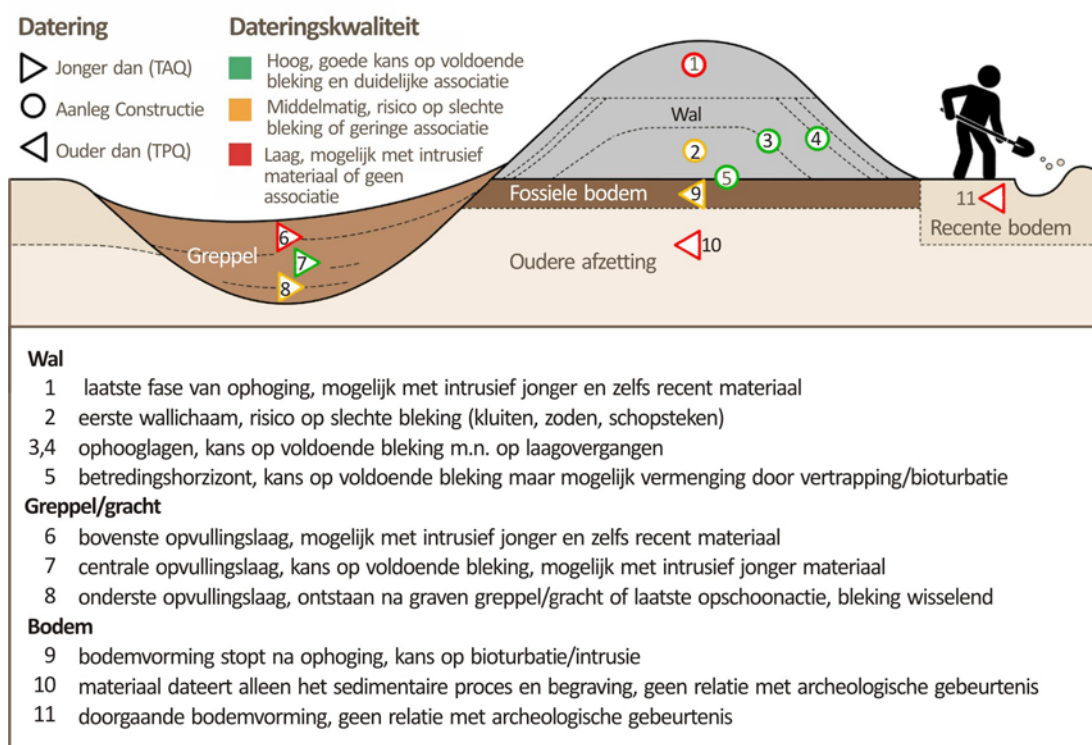
Afbeelding 4.4. De rivierafzettingen in de Rijnvlakte ter hoogte van Berg en Dal en Nijmegen en de locaties en luminescentieleeftijden (OSL) van het sediment (Boterman et al. 2024).

4.4 Dateren van cultuurlagen, ophooglagen, wegen en paden

In principe verloopt het bemonsteren van ophogingslagen, betredingshorizonten, vloerooppervlakken, brandlagen, akkerlagen en vondstlagen ('cultuurlagen') identiek aan het bemonsteren van sedimentlagen. Soms vereist het bemonsteren speciale aandacht en speciale monsterblikjes omdat de laagjes dun kunnen zijn.

Ook voor cultuurlagen geldt: zandkorrels moeten voldoende zijn blootgesteld aan daglicht om betrouwbaar te dateren. Bij cultuurlagen, spoorvullingen en ophogingslagen is vooral de wijze van omwerken, verplaatsen of opwerpen van de grond bepalend voor de kans op lichtblootstelling (afb. 4.5). Kluiten en zoden kunnen uitdagend zijn voor luminescentiedatering. Ook de herkomst van het materiaal is relevant; als oud sediment is gebruikt is meer lichtblootstelling nodig om het opgebouwde luminescentiesignaal te resetten. In veel gevallen is statistisch modelleren van equivalente dosiswaarden nodig om uit de metingen een betrouwbare ouderdom af te leiden (zie 6.4).

Archeologische vindplaatsen bestaan soms uit een complexe stratigrafie met veel verschillende contexten, wat soms het bepalen van het dosistempo bemoeilijkt.⁴³



Afbeelding 4.5. Wat zijn de beste locaties voor het luminescentiedateren van grachten/greppels, ophooglagen en bodems, en wat zijn de mogelijkheden en beperkingen? (naar: Van Beek et al. 2025).

4.4.1 Plaggendekken, akkerlagen en betredingshorizonten

In Noord-Europa komen in het landschap veel plaggendekken voor. Deze opbollende akkers bestaan uit een mengsel van dierlijke mest en minerale deeltjes van afgestoken zoden (plaggen). Eeuwenlang hebben boeren dit mengsel uitgereden en in dunne

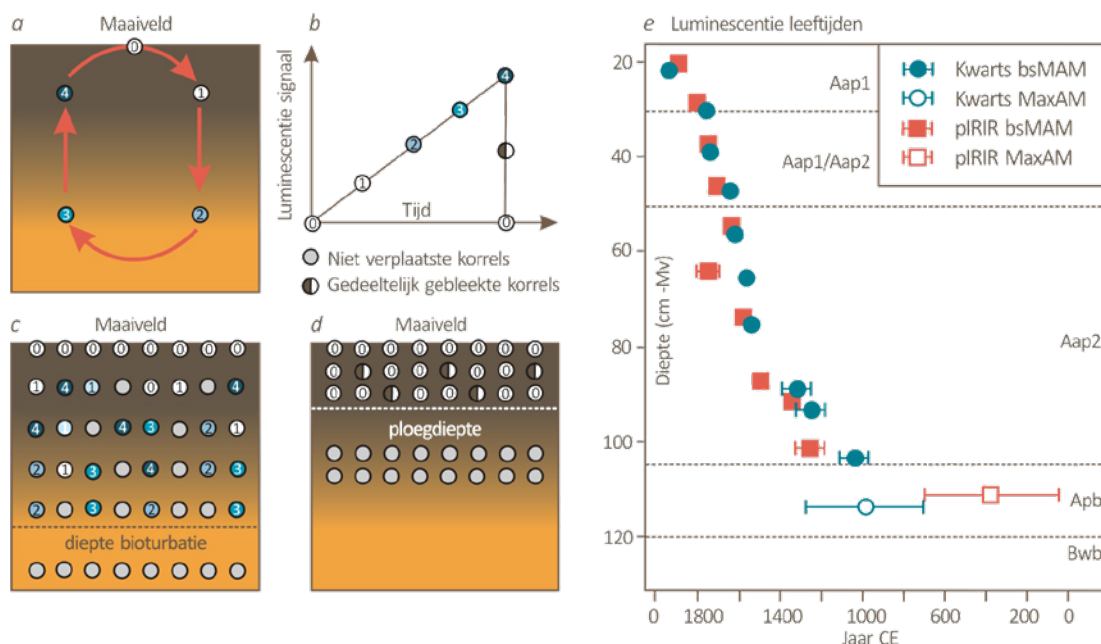
⁴³ In-situ metingen van radioactiviteit kunnen worden uitgevoerd met een draagbare dosimeter. Het in-situ meten van het dosistempo duurt heel erg lang: het dosistempo is extreem laag en daarom is een meettijd van dagen-maanden nodig. Uitzonderlijk zijn de gevallen waar materialen met verschillende radioactiviteit dicht bij elkaar voorkomen (bijvoorbeeld door bemonstering van een zandlaagje tussen klei-afzettingen). In die gevallen kan het nodig zijn om extra monsters te verzamelen voor de dosistempobepalingen.

laagjes over het land verspreid, om het akkerland op arme zandgronden vruchtbaarder te maken. Door dit langdurige gebruik zijn plaggendekken vaak vele decimeters dik geworden. Onder de plaggendekken, of bedekt door sedimentlagen, komen akkerlagen en betredingshorizonten voor. Een akkerlaag is de bovenste laag van de bodem (de bouwvoor) die is ontstaan door bodembewerking, zoals woelen en ploegen, om gewassen te kunnen verbouwen. Een betredingshorizont, ook wel een oud loopvlak genoemd, is een bodemlaag die is gevormd doordat mensen of dieren het oppervlak in het verleden intensief hebben belopen of gebruikt.

Plaggendekken zijn moeilijk te dateren met radiokoolstof. Dit komt doordat het organisch materiaal in de plaggelagen (zoals wortelresten) deels is meegekomen met de afgestoken zode en deels afkomstig is uit de mest. Daarnaast kunnen (oudere) archeologische vondsten uit de afgestoken zode samen met de mest op het land terecht zijn gekomen. In akkerlagen kan dateerbaar materiaal afkomstig zijn uit oudere sporen of lagen die door ploegen of spitten in de akkerlaag terecht zijn gekomen. In beide gevallen (door verplaatsing of door opspit) kan de ouderdom van de vondstlagen te oud worden ingeschat.

Op plaatsen die intensief zijn gebruikt of betreden, zoals rond huisplaatsen, bestaat archeologisch materiaal vaak uit zwerfafval dat toevallig in de bodem is terechtgekomen. Door vertrapping en vermenging raakt dit materiaal al dan niet gefragmenteerd gemengd met ouder materiaal. Ook dit kan leiden tot een overschatting van de ouderdom.

Met luminescentie kunnen de minerale bodemdeeltjes in de plaggelagen, akkerlagen of betredingshorizonten zélf worden gedateerd.⁴⁴ De lichtblootstelling aan het oppervlak vindt voornamelijk plaats tijdens het omkeren/omwoelen van de bodem.⁴⁵



Afbeelding 4.6. Wat zijn de verwachte luminescentiesignalen van korrels in de top van een bodem onder invloed van natuurlijke of menselijke bodemomwerking? (a) korrels worden door (intrusieve) bodemprocessen van het oppervlak naar de diepte en van de diepte naar het oppervlak gebracht; (b) In het donker neemt de luminescentie-energie in de korrels gelijkmatig toe ($1 > 4$) maar aan licht (of hitte) blootgesteld worden ze opnieuw 'ontladen' (waarde 0). Hoewel sommige korrels dan volledig ontladen, kunnen andere slechts gedeeltelijk zijn ontladen, afhankelijk van de blootstelling; (c) Luminescentie-energie van individuele korrels in een gebioturbeerde bodem; (d) Luminescentie-energie van individuele korrels in een akkerlaag; (e) In de grafiek worden de luminescentieleeftijden vergeleken van verschillende plaggelagen (Aap) en de begraven oude akkerlaag (Apb) van de Braakmankamp. De leeftijden zijn verkregen op basis van meerkorrelige kwartsmonsters (blauw) en individuele veldspaatkorrels (rood). Voor de leeftijdschattingen is gebruik gemaakt van een 'bootstrapped' minimum age model (BsMAM) en een maximum age model (MaxAM), zie 6.4 (naar: Choi et al. 2024).

⁴⁴ Bokhorst et al. 2005; van Mourik et al. 2011, 2012; Arnoldussen 2018

⁴⁵ Bokhorst, Duller & Van Mourik 2005; Wallinga 2005; Choi et al. 2024

Plaggendek Braakmankamp

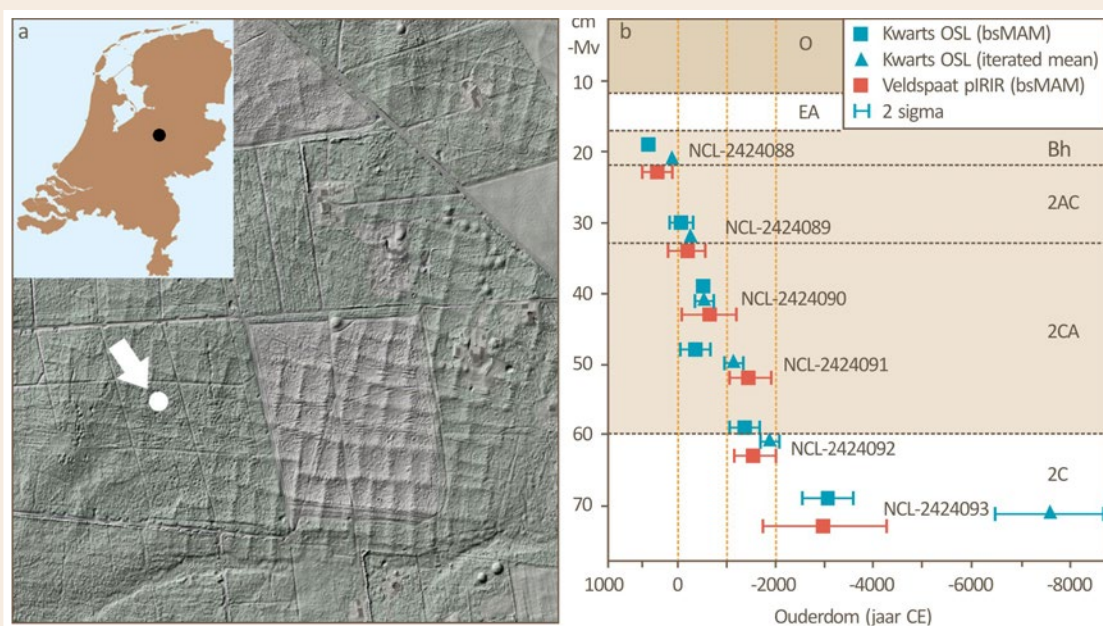
Voor het onderzoek op de Braakmankamp in Twente zijn verschillende single-grain technieken uitgeprobeerd om de ouderdom van de afgedekte akkerlaag en de plaggenlagen te achterhalen. Door in het bodemprofiel meerdere monsters boven elkaar te dateren kan in het ideale geval het begin van de ophoging, de snelheid van ophoging en de periode van gebruik worden bepaald. Zowel individuele kwartskorrels als veldspaatkorrels zijn onderzocht. Door individuele korrels te gebruiken is het effect van bodemvormende processen (zoals inspoeling en bioturbatie) op de spreiding van het luminescentiesignaal zichtbaar gemaakt.⁴⁶ Voor de kwartskorrels is zichtbaar licht gebruikt om het luminescentiesignaal op te wekken. Voor de veldspaatkorrels werd zowel alleen infraroodlicht gestimuleerde luminescentie (IRSL) als een thermische en infraroodlichtbestraling (post-infrarood gestimuleerde luminescentie: pIRIR) gebruikt. pIRIR op individuele korrels heeft als voordeel dat het complexe bodemvormingsprocessen zoals bioturbatie beter zichtbaar kan maken (afb. 4.6). Uit het onderzoek is gebleken dat de akkerlaag onder het plaggendek ontstond rond het jaar 1100-1200 CE. De geleidelijke ophoging met plaggenmest startte een eeuw later, rond 1300 CE. Vanaf die tijd groeide het plaggendek gestaag aan, met een gemiddelde snelheid van ruim een millimeter per jaar (Choi et al. 2024. *Luminescence dating approaches to reconstruct the formation of plaggic anthrosols*).

Als gewerkt wordt met kleine monsters is een aanvullend monster van tenminste 200 gram nodig voor de bepaling van het dosistempo

⁴⁶ Bijvoorbeeld Wallinga et al. 2019

Raatakkers in Nederland

Prehistorische raatakkervelden of Celtic fields zijn wijdverspreid in Noordwest-Europa. Algemeen wordt aangenomen dat dit landbouwsysteem is ontstaan tussen de latere midden bronstijd en de vroege ijzertijd. Bewijs hiervoor in de vorm van absolute dateringen is schaars wat ruimte biedt voor contrasterende interpretaties over de oorsprong van dit landgebruik, de gebruiksgeschiedenis en de achterliggende maatschappelijke transformaties. In 2024 is onderzoek gedaan naar optimale dateringsstrategieën voor het dateren van ophooglagen in raatakkerwallekes te Vaassen (Epe) en Zeijen (Tynaarlo). Gebruik is gemaakt van zowel multi-grain kwartsmetingen (OSL) als veldspaatmetingen aan individuele korreltjes (pIRIR). Zowel de kwarts- als de veldspaatdateringen leverden stratigrafische consistente en betrouwbare ouderdommen op voor een (geleidelijke) ophoging. De dateringsresultaten tonen aan dat de Celtic fieldwallekes van Vaassen en Zeijen in aanleg uit de tweede helft van de midden bronstijd dateren. Het opwerpen van wallekes ging door tot in de Romeinse tijd wat getuigt van een zeer lang gebruikt landbouwsysteem. Metingen aan individuele veldspaatkorreltjes leverde aanvullende informatie op over het proces van lichtblootstelling van de korreltjes (afb. 4.6), en de potentiële kansen en beperkingen voor dateringsonderzoek die hier onlosmakelijk mee verbonden zijn (Choi et al. 2026. *Dating Celtic fields*)



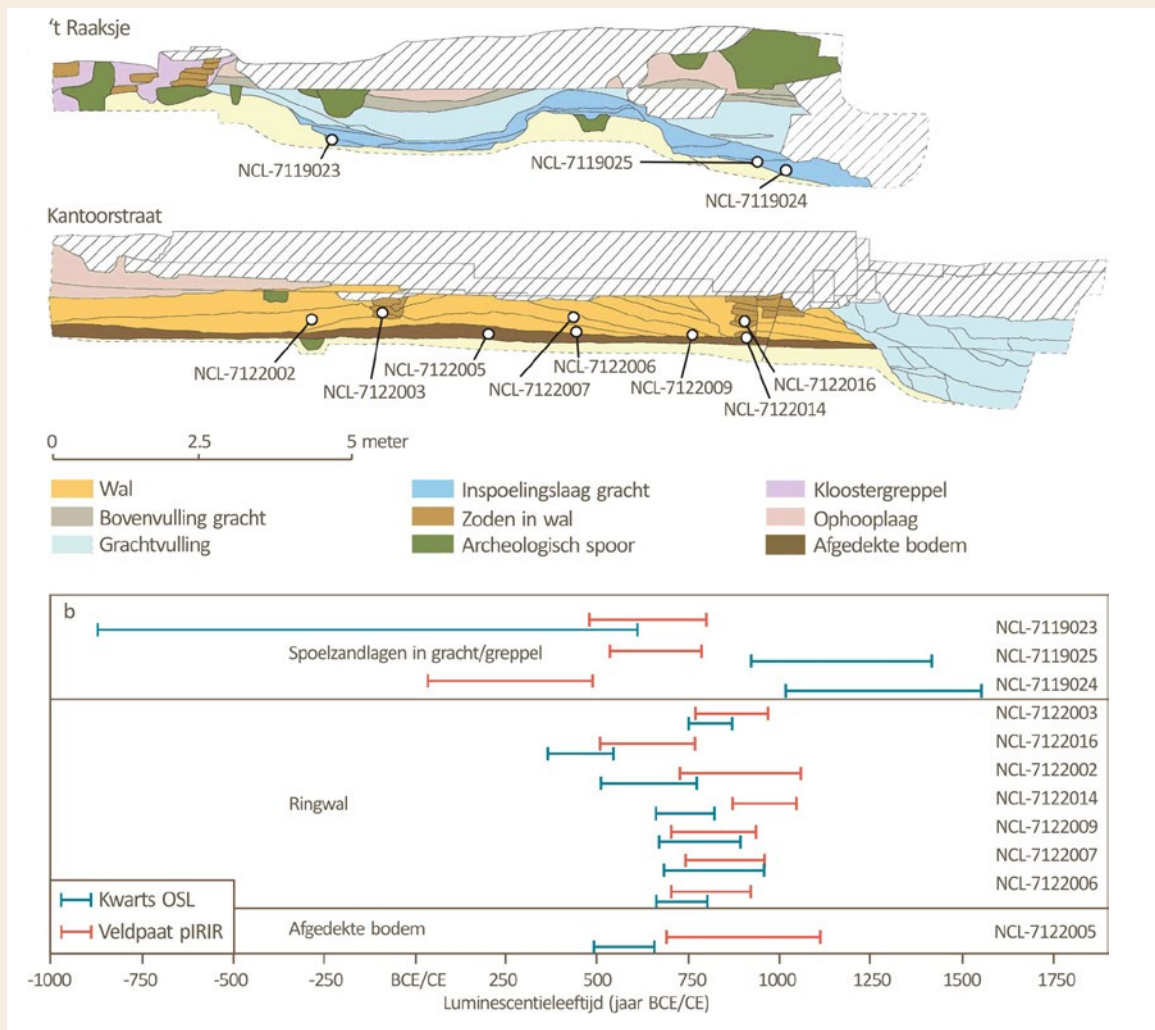
Afbeelding 4.7. (a) Digitaal hoogtemodel (AHN4) van een deel van het Celtic field van Vaassen (Epe) met de locatie van de proefput. Inzet: kaart van Nederland met de locatie Vaassen. (b) Vergelijking tussen de luminescentieleeftijden verkregen uit 'multi-grain' kwarts OSL en 'single-grain' veldspaat pIRIR. De lichtbruine vakjes geven de bodemhorizonten aan van de raatakkerwal (O t/m 2CA-horizonten). Kwarts OSL-ouderdommen zijn weergegeven op de werkelijke diepte onder het maaiveld. De andere ouderdommen zijn met een lichte verschuiving in diepte weergegeven voor de duidelijkheid (naar: Choi et al 2026).

4.2.2 Wallen, heuvels en dijken

Luminescentiemonsters uit de ophooglagen van wallen, heuvels en dijken maken een directe datering van het moment van constructie mogelijk. Andere dateringsbronnen ontbreken vaak of de resultaten zijn lastig te interpreteren. Er zijn lang niet altijd voldoende dateerbare vondsten aanwezig; organisch materiaal ontbreekt; de associatie tussen vondsten en ophogingspakketten is onduidelijk of historische bronnen geven geen uitsluitsel over de ouderdom. Luminescentiedatering kan dan een oplossing bieden, omdat hiermee de zandkorrels in de ophooglagen zelf kunnen worden gedateerd. De methode kan echter alleen succesvol worden toegepast als een deel van de zandkorrels vlak voor of tijdens de aanleg voldoende kans hebben gekregen voor lichtblootstelling. Kluiten en zoden kunnen uitdagend zijn voor luminescentiedatering. Soms komen in de ophoogpakketten dunne zandlaagjes voor die zijn ontstaan tijdens stortbuien of aan de buitenzijde van een dijk door hoogwater. Als een wal, heuvel of dijk meerfasig is kan gezocht worden naar (resten) van het oude oppervlak. Zonlicht dringt echter nauwelijks door in het bodemoppervlak. Het geschikte laagje zal zeer dun zijn en is vaak gebioturbeerd en daarom in het veld soms moeilijk aan te wijzen. Korrels op het grensoppervlak hebben een grotere kans gehad op (langdurige) lichtblootstelling waardoor bemonstering van het grensvlak met bijvoorbeeld een bak zinvol kan zijn (zie 4.7.4).

Ringwalburg Texel

Tussen 2017 en 2022 zijn monsters uit de wallen van de vroegmiddeleeuwse ringwalburg op Texel (Den Burg) gedateerd met zowel luminescentietechnieken, radiokoolstof als archeologische vondsten. De ringwal werd aangelegd door aan de buitenzijde de podzolbodem tot in het gele dekzand weg te steken om daarna de afgestoken zodes laagsgewijs op te werpen. Alleen korrels aan de buitenkant van de zode zijn dan aan licht blootgesteld. Andere delen van de wal bestonden uit gestort materiaal, waardoor de wijze van lichtblootstelling onduidelijk is. Om de opgeworpen grond toch te kunnen dateren zijn metingen gedaan aan kleine submonsters van kwarts en individuele veldspaatkorrels. Het doel van deze single-grain methode is om de jongste korrels te identificeren voor de datering. Ook zandkorrels uit het oude loopvlak onder de wal zijn bemonsterd. Van de acht monsters gaven zes monsters een betrouwbaar luminescentiesignaal. Daaruit blijkt dat de wal waarschijnlijk tussen 730 en 840 CE werd aangelegd (afb. 4.8). Uit vondstmateriaal in de buitenste gracht is afgeleid dat deze in de 8e of vroege 9e eeuw werd gegraven. De oudste fase van de ringwalburg bleek ouder dan eerder aangenomen (Van Beek et al. 2025. *Dating earthworks with luminescence: Insights from the medieval ringfort of Den Burg, Texel*).

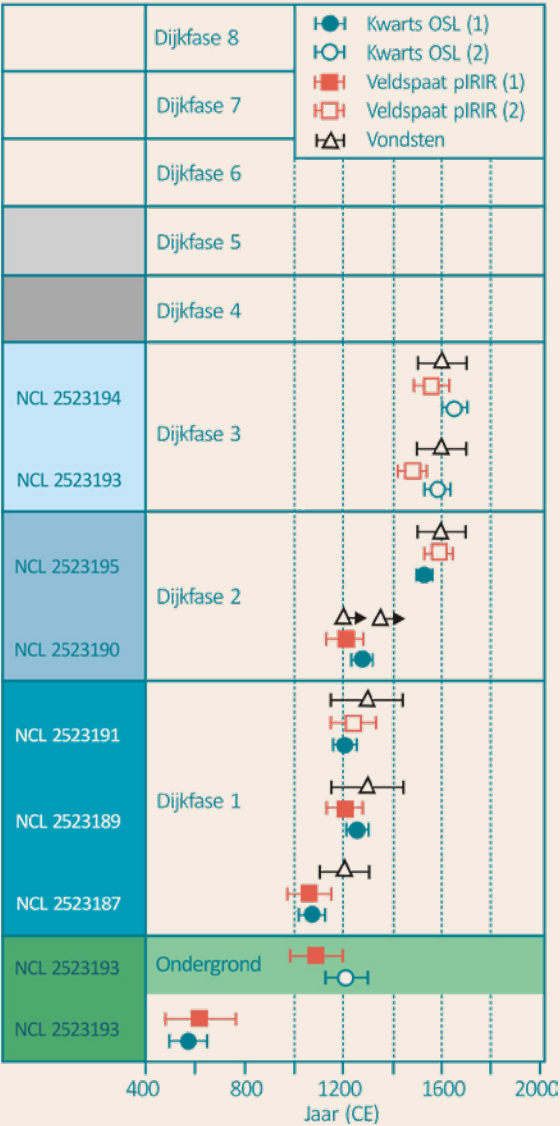


Afbeelding 4.8. Vereenvoudigd profiel en dateringsresultaten van de locaties 't Raaksje 1 en Kantoorstraat van de ringwalburg te Den Burg (Texel). Luminescentiedateringen zijn verkregen van monsters uit de grachtvulling (spoelzandlaagjes), uit op-hooglagen (ringwal) en uit het afgedekte bodemoppervlak (loopvlak). De luminescentieleeftijden geven de 1 sigma onzekerheid weer; kwartskorrels: blauw (OSL-methode); veldspaatkorrels: rood (pIRIR-methode) (naar: Van Beek et al. 2025).

De Waaldijk bij Wolferen

Dijken zijn een belangrijk en beroemd element van het Nederlandse cultuurlandschap. Het achterhalen van hun vroegste ouderdom en ontwikkeling blijkt vaak een uitdaging. Traditionele dateringsbronnen, zoals historische documenten, goed dateerbare artefacten of materiaal voor radiokoolstofdatering zijn vaak niet aanwezig. Omdat dijken bestaan uit opgebrachte grond is het in theorie mogelijk om de aanleg en uitbouwfasen met luminescentiemethoden te dateren. De Waaldijk bij Wolferen (Overbetuwe) is verlegd en tijdens het afgraven van de oude dijk is een doorsnede van het dijklichaam archeologisch onderzocht. Luminescentiemonsters van de opeenvolgende dijklagen zijn onderzocht en de resultaten zijn vergeleken met die van andere, meer ‘traditionele’ dateringsbronnen. Luminescentiedateringen op basis van kwarts OSL (kleine aliquots) en veldspaat pIRIR (individuele korrels) leverden ouderdommen op vergelijkbaar met het archeologisch vondstmateriaal. De reden dat de sedimentkorrels de verschillende dijkfasen dateren is waarschijnlijk omdat steeds verse en goed aan licht blootgestelde overstromingsafzettingen uit de uiterwaard werden gebruikt.⁴⁷ (Huang et al. 2026. Dating dikes with luminescence).

Waaldijk bij Wolferen



Afbeelding 4.9. Stratigrafie en dateringsresultaten voor ophooglagen van de Waaldijk bij Wolferen en het afgedekte bodemoppervlak. Luminescentieleeftijden geven de 1 sigma onzekerheid weer. Gevulde en lege symbolen staan respectievelijk voor goed gebleekte (1) en onvolledig gebleekte (2) zandkorrels (Huang et al. 2026).

47 Bijvoorbeeld Guyez et al. 2024

De Hunenborg te Volthe (Twente)

In 2016 is het terrein van de Hunenborg in het Voltherbroek (Twente) opnieuw onderzocht. Dankzij archeologisch onderzoek bestaat een redelijk goed beeld van de activiteiten op de burcht tussen ca. 1050/1075 en 1200 CE. Om de bouw van de burcht direct te dateren werd luminescentieonderzoek uitgevoerd. Op verschillende plekken — de hoofdburcht, voorburcht, wallichamen, de grachtvulling, een vermeende toegangsweg en een zichtbare landweer — werden monsters verzameld. Monsters werden vooral genomen van lagen waarvan aannemelijk was dat de zandkorrels volledig door zonlicht konden zijn gebleekt, zoals een zandlaag in de gracht van de voorburcht die waarschijnlijk tijdens een stortbui is afgezet. De eerste analyses met een multigrain-methode leverden te oude dateringen op. Veel zandkorrels in elk submonster waren onvoldoende gebleekt voor een betrouwbare berekening van de paleodosi. Ook een tweede analyse van submonsters met veel minder zandkorrels verbeterde dit niet. Daarom werd een single-grain analyse toegepast waarna met een Minimum Age Model werd geprobeerd om de jongste, en dus meest betrouwbare, korrels te identificeren. Dit gaf betere, maar nog steeds teleurstellende resultaten met schattingsfouten voor de paleodosiswaarde van gemiddeld $\pm 40\%$. Vooral de wallen lijken te bestaan uit snel opgeworpen kluiten grond met slechts gedeeltelijk gebleekte korrels. Alleen de zandlaag in de grachtvulling rondom het voorburchtterrein leverde een methodisch betrouwbare datering op in de 12e–13e eeuw CE. Die datering sluit goed aan bij een dendrochronologische datering rond 1155 van hout uit een dam in dezelfde gracht (Scholte Lubberink et al. 2018. *De Hunenborg te Volthe*).



Afbeelding 4.10. (a) Reliëfkaart van de hoofdburcht (AHN4) van de Hunenborg te Volthe (Dinkelland). (b) Profiel door een deel van de wal rond de hoofdburcht (profiel 103) (Scholte Lubberink et al. 2018).

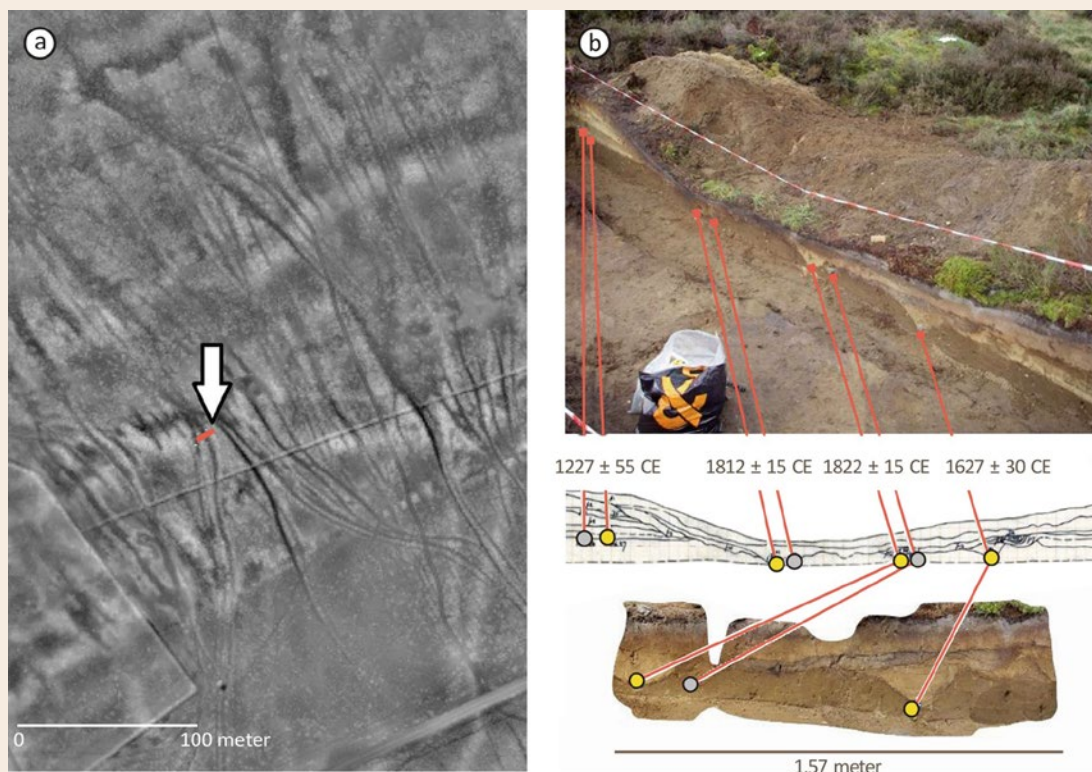
4.4.3 Wegen en paden

Op de zandgronden van Noordwest-Europa komen uitgebreide netwerken van onverharde historische wegen voor. Vaak zijn het de sporen van karren en wagens die nog eeuwen na het ontstaan in het maaiveld zichtbaar zijn gebleven. Omdat de routes soms uit mul zand bestonden en met regen veranderden in modderpoelen ontstonden met grote regelmaat nieuwe kar- of wagensporen naast de oude. En omdat de routes vaak over de ‘woeste gronden’ liepen was er nauwelijks een beperking aan de zijwaartse uitbreiding van de routes. In de loop der decennia en eeuwen resulteerde dit in brede bundels met wielsporen, die enkele meters tot soms meer dan 500 meter breed waren en over grote afstanden te vervolgen zijn. Precies wanneer en hoe lang de routes werden gebruikt is niet altijd duidelijk. Historisch-topografische kaarten die verder teruggaan dan enkele eeuwen zijn zeldzaam of weinig precies. Archeologische vondsten zijn in de regel schaars en de associatie niet altijd duidelijk. Organisch materiaal geschikt voor een directe datering is meestal afwezig. Luminescentiedateren van aan daglicht blootgesteld losgereden zand is dan vaak de enige techniek om een absolute ouderdomsbepaling mogelijk te maken.⁴⁸

48 Bijvoorbeeld Vletter & Schloen 2017; Van Lanen 2017

Middeleeuwse handelsroutes op de Veluwe

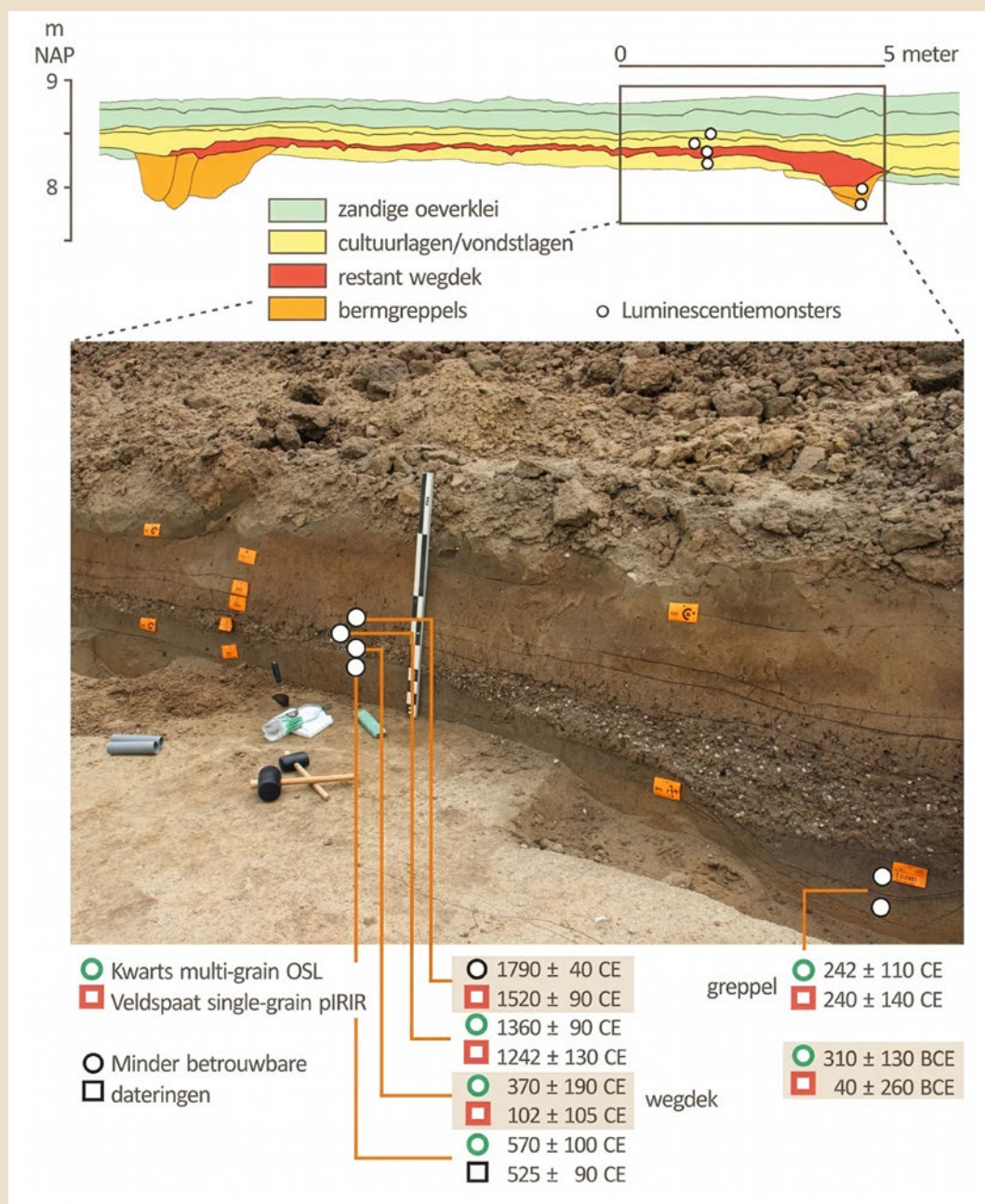
In 2014 zijn op de Veluwse stuwwal luminescentiemonsters van de historische Harderwijkerweg genomen. Het tracé van deze handelsroute is soms nog in het veld te zien, maar voornamelijk op reliëfkaarten zichtbaar. Voor het daterend onderzoek werd slechts één spoor uit een bundel van sporen opgegraven en gedateerd. Een nadeel van deze strategie is dat niet duidelijk wordt wat de datering vertelt over de andere sporen. Een tweede nadeel is dat de datering vooral de jongere gebruikperiode van de route weerspiegelt, aangezien eerdere sporen zijn uitgewist door jongere wielsporen en door erosie en bioturbatie. Een monster van duinzand direct naast het onderzochte wielspoor dateerde rond 1222 CE (± 55 jaar). Dit komt overeen met het begin van de handelsroute tussen Arnhem en Harderwijk halverwege de dertiende eeuw. Luminescentie-ouderdommen van het zand uit de wielsporen zelf dateerden jonger, tussen 1627 CE (± 30 jaar), 1812 CE (± 15 jaar) en 1822 CE (± 15 jaar). De route werd blijkbaar lang gebruikt tussen de zeventiende en negentiende eeuw. De archeologische en historische bronnen sluiten goed aan op de verkregen luminescentieleeftijden waarmee het een veelbelovende techniek lijkt voor onderzoek naar dit belangrijke fenomeen (Vletter & Spek 2021. *Archaeological features and absolute dating of historical road tracks in the North-western European Sand Belt*).



Afbeelding 4.11. (a) Reliëfkaart van de historische karresporen ten oosten van Oud-Reerst (Nationaal Park Hoge Veluwe) met de locatie van de proefsleuf (witte pijl). (b) Overzichtsfoto, profielfoto en profieltekening van de proefsleuf. De stippen geven de locaties van de OSL-monsters aan. De vier gele OSL-monsters zijn gedateerd, één van een stuifzandlaag en drie uit wielsporen (naar: Vletter en Spek 2021).

Romeinse weg bij Oosterhout

Dat luminescentiedateren van wegdekken niet altijd succesvol is, blijkt uit de poging om een Romeinse grindweg bij Oosterhout (Gld) te dateren. In het oostelijke rivierengebied zijn verschillende resten van Romeinse wegen aangetroffen. Die wegen zijn vaak niet opgehoogd, maar werden wel verhard. Zo'n weg is aangetroffen tussen het dorp Oosterhout en de Waaldijk. Het gaat om een weg van bijna acht meter breed met een 10 centimeter dikke laag grind als wegverharding. Aan beide zijden van de weg lag een berm-sloot. Uit de opvulling van de berm-sloten is afgeleid dat ze tenminste twee keer werden uitgegraven. Er zijn veel vondsten aangetroffen tijdens het opgraven van de weg, waaronder goed dateerbare militaria van rond 50 CE. Een zilveren mantelspeld uit dezelfde periode werd aangetroffen in de vulling van een naastgelegen gegraven kanaal. Op basis van de opbouw, breedte, militaria en de oriëntatie richting Nijmegen wordt verondersteld dat het om een militaire limesweg gaat, aangelegd in de tweede helft van de eerste eeuw. Om een absolute datering te krijgen zijn verschillende luminescentiemonsters genomen van het wegdek, wegoppervlak, greppelopvulling en bovenliggend sediment. De uitkomsten van zandkorrels afkomstig uit het wegdek waren meer gespreid dan verwacht, waarbij sommige monsters dateringen in de 6e eeuw gaven. Het is aannemelijk dat de Merovingische en Karolingische koningswegen teruggaan op Romeinse wegen. In dat geval kan de weg dus tot in de vroege middeleeuwen in gebruik zijn geweest (Norde et al. 2026. *De Romeinse weg bij Oosterhout*).



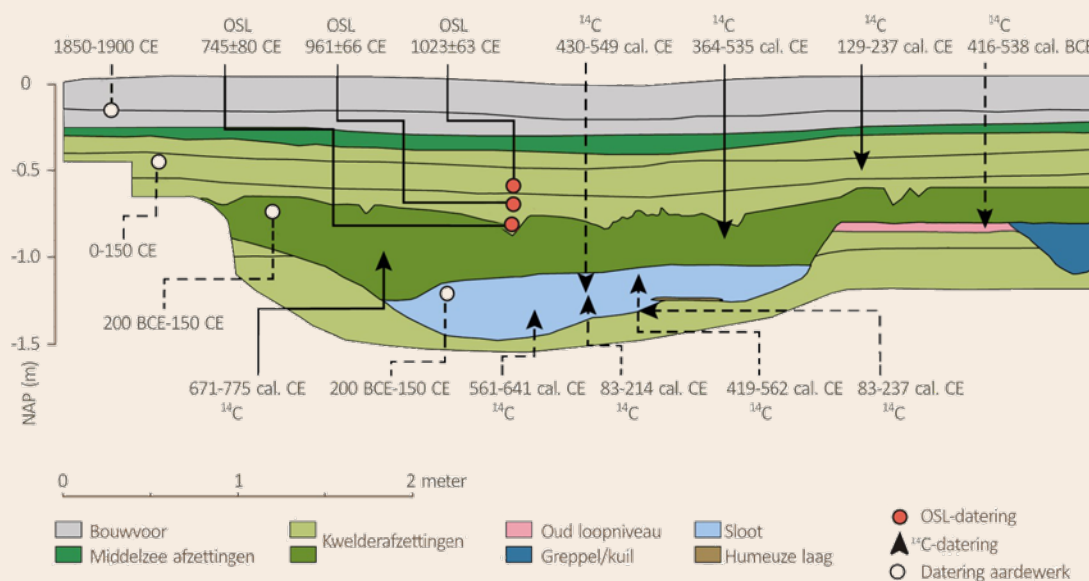
Afbeelding 4.12. Profiel van de Romeinse weg bij Oosterhout (foto: Eric Norde), met goed te herkennen wegdek van grind en greppelopvulling. In groen weergegeven de kwartsdateringen (multi-grain OSL) en in rood de veldspaatdateringen (single-grain pIRIR).

4.5 Dateren van spoorvullingen

Traditionele technieken voor het dateren van de vullingen van kuilen, greppels, sloten en grachten bestaan vaak uit een combinatie van stratigrafisch verzamelde en goed dateerbare artefacten (metalen objecten, keramiek), radiokoolstofmonsters en soms hout voor jaarring-onderzoek. Onder ideale omstandigheden, wanneer er een duidelijke en onmiskenbare associatie bestaat tussen artefact/radiokoolstofmateriaal of hout, volstaan deze technieken. Meestal leveren de ouderdommen alleen een indirecte datering van het spoor op (post quem datering). Luminescentiedateringen aan de minerale deeltjes bieden onder ideale omstandigheden de kans om de opvulling zelf te dateren. Een nadeel is dat de gracht- of greppelvulling secundair is, terwijl het de intentie is om de aanleg of het gebruik van de gracht of greppel te dateren. De opvulling kan zijn ontstaan door het intrappen of inzakken van de oever, door het inspoelen of inwaaien van zand of door golfslag. Soms is de gracht of greppel al dan niet opzettelijk opgevuld, bijvoorbeeld met afval, of met grond en kluiten. Een ander probleem is onderhoud. Greppels en grachten werden op diepte gehouden door baggeren waardoor opvulling pas na de gebruiksfase plaatsvindt.

Sloten uit de Romeinse tijd in de Lionserpolder

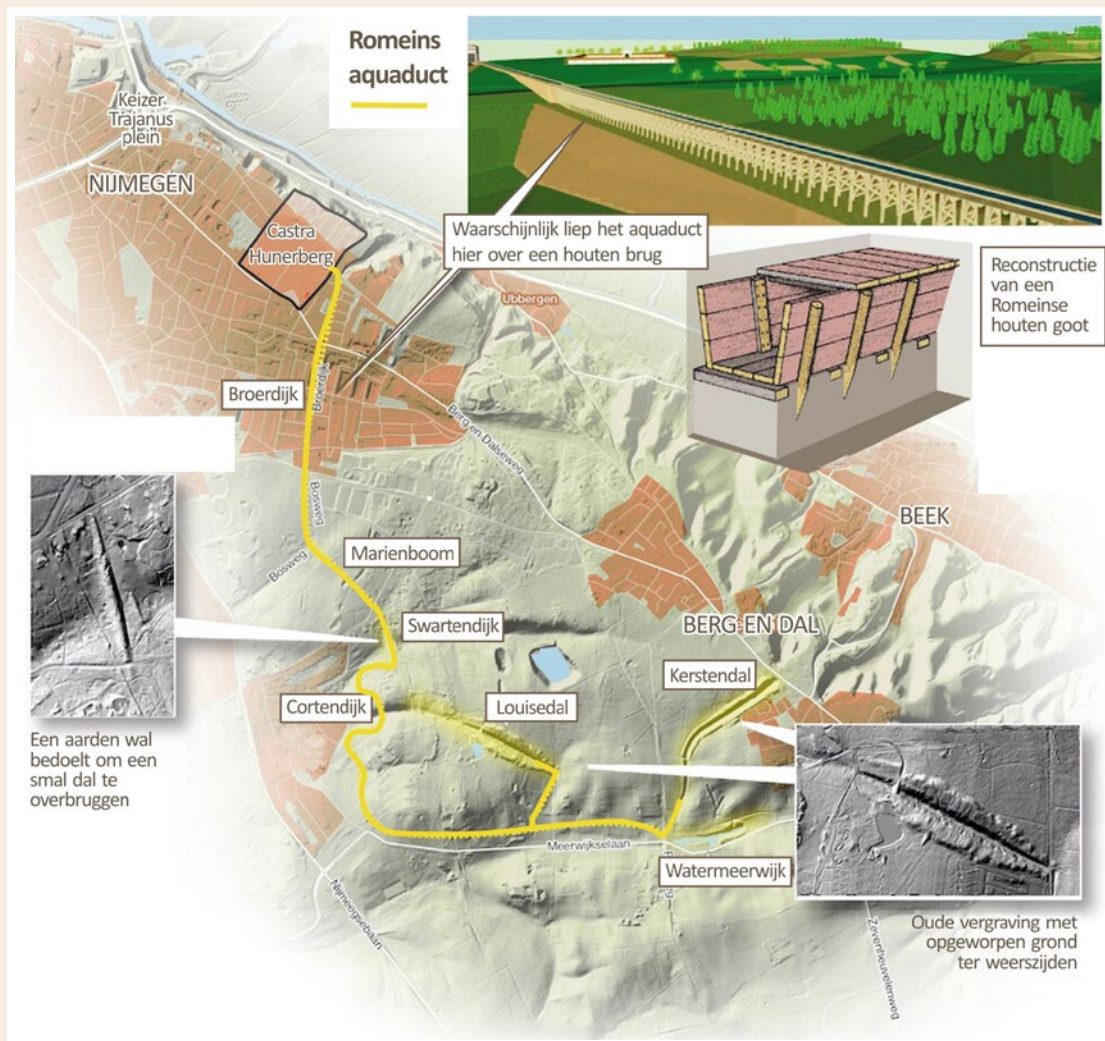
In het natuurgebied Lionserpolder (gemeente Leeuwarden) komt op een diepte van 0,5-1,5 m een uitgestrekt systeem van sloten voor. Op basis van de ouderdom van de afdekkende kleilagen werd vermoed dat ze ruim vóór 1100 CE waren gegraven. Mogelijk hoorden ze bij het nederzettingslandschap van Het Eiland, een overslibde nederzetting uit de late ijzertijd-Romeinse tijd. In 2021 werden handmatig proefsleuven gegraven haaks over twee sloten. Daarbij kwam onder andere handgevoemd terpaardewerk, bot en vuursteen aan het licht. Om een absolute datering van het slootsysteem mogelijk te maken, werden monsters verzameld voor radiokoolstofdatering en luminescentiedatering. De basis van de slootvulling dateerde tussen 80 en 240 cal CE (^{14}C). Het handgevoemd terpaardewerk dateerde (globaal) tussen 200 BCE en 150 CE. De sloten bleken in de vroeg-Romeinse tijd te zijn aangelegd en tot in de tweede of derde eeuw gebruikt. Luminescentiemonsters werden ingezet voor een sluitdatering van het slootsysteem. Hiervoor werden afdekkende lagen kwelderklai gedateerd die een betrouwbaar resultaat opleverden. De kwelderafzettingen ontstonden rond 670-820 CE wat aansluit bij een ^{14}C -datering rond 670-780 cal CE van kwelderafzettingen daaronder. De dateringsresultaten waren belangrijk om het slotensysteem als onderdeel van het archeologisch rijksmonument Lionserpolder te beschermen (Feiken & Van der Heiden 2024. *Oude koeien uit de sloot*).



Afbeelding 4.13. Overzicht van alle beschikbare dateringen uit slootprofiel 2 (oostprofiel) in de Lionserpolder. Voor de leesbaarheid zijn ook de dateringen uit het westprofiel in het oostprofiel geprojecteerd. Het gaat om de dateringen V58 (twee keer), V64 en V68. De stippellijnen hebben betrekking op monsters met een minder nauwkeurige plaatsbepaling. (naar: Feiken & Van der Heiden 2024).

Romeins aquaduct bij Groesbeek

Dat luminescentiedateren van greppels niet altijd succesvol is, blijkt uit de poging om het vermoede aquaduct van de Romeinse legioensvesting van Nijmegen te dateren. Het bepalen van de ouderdom van de structuur was niet mogelijk met radiokoolstof omdat er geen organisch materiaal bewaard is gebleven. Om toch de ouderdom te achterhalen, werden verschillende luminescentiemonsters uit de opvullingslagen van het vermoede waterkanaal in het Louisedal onderzocht. Mogelijk bestonden de opvullagen uit afgespoeld zand afkomstig van de omliggende wallen. De monsters lieten een teleurstellend hoge ouderdom zien van meer dan honderdduizend jaar met een zeer grote spreiding tussen submonsters. Dit duidt op een zeer geringe blootstelling aan zonlicht voordat de korrels werden afgezet en begraven. Ook verdiepend onderzoek aan individuele korrels mocht niet baten. De spreiding in uitkomsten was gigantisch. Kennelijk werden de zandkorrels tijdens het opwerpen en oppervlakkig afspoelen van de wallen niet of nauwelijks aan licht blootgesteld. In elk geval was de lichtblootstelling onvoldoende om het luminescentiesignaal in de stuwwalzanden van zeer hoge ouderdom voldoende te resetten. Dit onderzoek werd overigens meer dan 20 jaar geleden uitgevoerd; mogelijk dat datering wel mogelijk is met nieuwe technieken en inzichten in geschikte monsterlocaties. (Schut 2005. *De aardwerken van Groesbeek: een aquaduct voor de Romeinse legioensvesting van Nijmegen?*).



Afbeelding 4.14. De vermoede ligging van het Romeinse aquaduct dat de grote legioensvesting op de Hunerberg van water moest voorzien (infographic: M. Kus-ter; tekening brug: H. Horstink; reconstructie goot: E. Hübner).

4.6 Dateren van mortels/specie en pleistermortel

De afgelopen 25 jaar is aanzienlijke vooruitgang geboekt op het gebied van luminescentiedateren van mortels, specie en pleistermortels.⁴⁹ Deze dateringsmethode maakt gebruik van de kwarts- of veldspaatkorrels die in de mortel zijn verwerkt. De techniek kan in principe voor allerlei soorten specie en pleistermaterialen gebruikt worden, zolang er maar kwarts- of veldspaatkorrels in verwerkt zijn.⁵⁰ Een tweede vereiste is dat de kwarts- of veldspaatkorrels een bruikbaar luminescentiesignaal hebben ‘vastgelegd’ (zie het voorbeeld van de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk) en ten derde moet tenminste een deel van de korrels aan voldoende licht zijn blootgesteld. Het is daarom van belang hoe de silt- en zandkorrels in de mortels zijn verwerkt, en hoe de mortel/specie is aangemaakt en aangebracht op het muurwerk.⁵¹ Die laatste gebeurtenis komt overeen met de constructie van het bouwwerk. Om een deel van de problemen van ‘ongebleekte’ korrels te ondervangen wordt meestal een single-grain-analyse op het materiaal uitgevoerd.⁵²

Een voordeel van morteldateringen is dat de mortel samen met ander constructiemateriaal (zoals bakstenen) gedateerd kan worden, waarmee het probleem van hergebruikte bouwmaterialen in jongere constructies kan worden ondervangen. Mortels kunnen niet hergebruikt worden. Daarom zijn morteldateringen geschikter en veel representatiever voor de chronologie van gebouwen vergeleken met baksteendateringen of de ouderdom van houten constructiedelen. Een probleem kan zijn dat de mortel/pleister secundair verhit is geraakt bij brand, waarbij de korrels door sterke verhitting opnieuw zijn ‘gereset’ (zie 5.1).

49 Urbanová et al. 2020

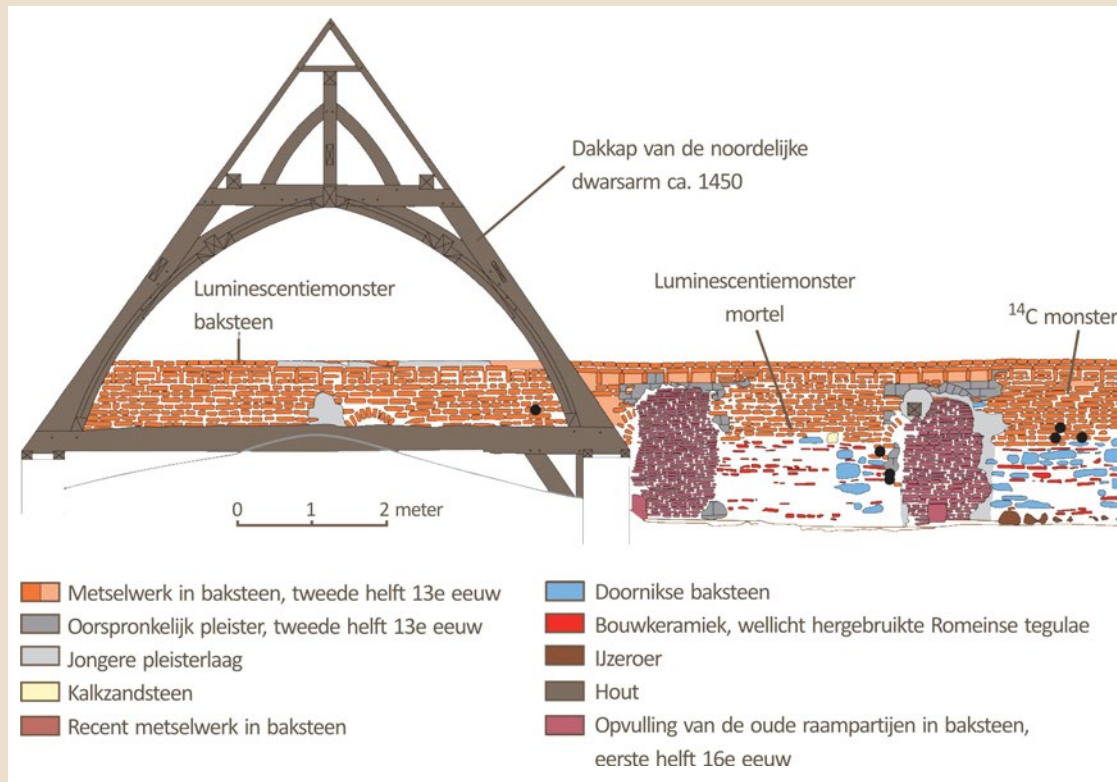
50 Bijvoorbeeld Sanjuro et al. 2020

51 Urbanová et al. 2024

52 Duller et al. 2000; Duller 2003

Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk

Vroeger werden bakstenen uit oude gebouwen hergebruikt in nieuwe gebouwen. Dit bemoeilijkt de datering van gebouwen op basis van bakstentypen. Dit is de reden geweest om onderzoek te doen naar de luminescentieouderdom van (kalk)mortel in het metselwerk van de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk in Belsele (België). Losse bakstenen en stukjes mortel werden uit het voegwerk verwijderd en in het lab zijn de kwartskorrels uit de baksteen en mortel gehaald en gedateerd. Het luminescentiesignaal van de kwartskorrels uit de mortels bleek echter te zwak om boven het achtergrondsignaal van de meetapparatuur uit te komen. Ook de thermoluminescentie werd bepaald, maar ook die was te zwak. De luminescente eigenschappen van de mortelmonsters bleken dus ongeschikt om tot een datering te komen. Als verklaring is geopperd dat de geringe luminescentiegevoeligheid van de kwarts een gevolg is van de mineralogische eigenschappen - en dus van de geologische oorsprong - van de gebruikte kwarts (Debonne et al. 2015. *Wase baksteen gedateerd*).

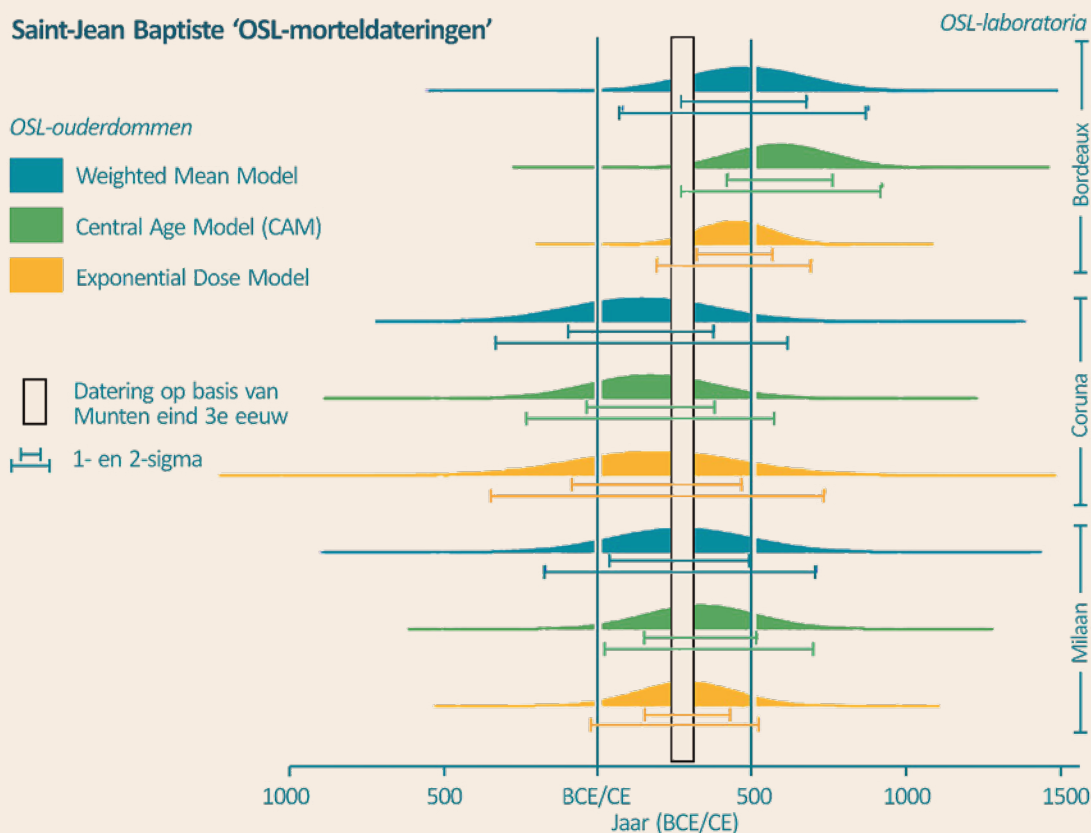


Afbeelding 4.15. De noordelijke langsmuur van het middenschip van de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk in Belsele (Sint-Niklaas) met de locatie voor de ^{14}C -monsters en de OSL-monsters van mortel en baksteen (naar: Debonne et al. 2015).

MODIS - Mortar Dating Intercomparison Study

In 2018 is een vergelijkingsexperiment voor het dateren van mortels uitgevoerd. Drie onderzoeksgroepen gespecialiseerd in luminescentiedatering namen hieraan deel: het Instituut voor Geologie van de Universiteit van Coruña (Spanje), het LAMBDA-lab van de Universiteit van Milaan en het Archéosciences lab van de Universiteit van Bordeaux-Montaigne. Van drie archeologische vindplaatsen werden mortelmonsters verzameld en verdeeld over de deelnemende dateringslabs. Van de betreffende vindplaatsen was - op basis van dateerbaar vondstmateriaal - de datering van de bouwphase goed bekend. De luminescentieleeftijden bleken consistent met de verwachte ouderdommen, ondanks de (bekende) problemen van slechte bleiking en verschillen in dosistempo. Het experiment wees uit dat een multigrain aanpak als eerste stap gebruikt kan worden om de verdeling van equivalente dosiswaarden te bepalen. Als deze normaal of lognormaal verdeeld zijn, is het waarschijnlijk dat de zandkorrels tegelijkertijd volledig op nul zijn gezet. Als de verdeling wijst op onvolledige bleiking, leveren een Minimum Age Model (selectie jongste korrels) en een Exponential Exposure Dose (EED) van individuele korrels (single-grain) leeftijden op die het meest consistent zijn met de verwachte leeftijden (Urbanová et al. 2024. OSL mortar dating inter-comparison study)

Saint-Jean Baptiste 'OSL-morteldateringen'



Afbeelding 4.16. Absolute ouderdomsbepalingen door drie deelnemende laboratoria van een identiek mortelmonster afkomstig uit het muurwerk van de kapel van Saint-Jean Baptiste de la Cité (Périgueux). Een onafhankelijke muntdatering plaats de bouwphase van de vroegchristelijke kapel in de derde eeuw (grijsbruine balk). De schattingen voor de ouderdom van de mortel zijn verkregen met behulp van verschillende statistische modellen en OSL-protocollen (naar: Urbanová et al. 2024).

4.7 Waar en hoe neem je de monsters?

4.7.1 Mineraal en korrelgrootte

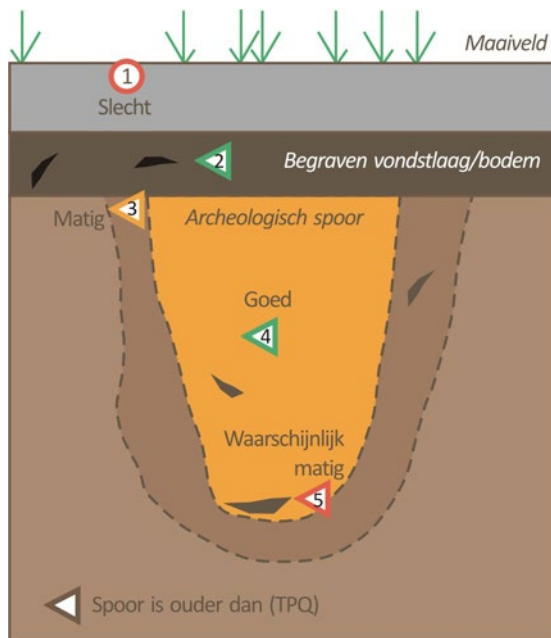
Een luminescentieanalyse wordt in de praktijk alleen uitgevoerd op kwarts- of veldspaatkorrels. Dit zijn de twee meest voorkomende mineralen in zand en silt in Nederland en dus altijd beschikbaar. De luminescentiegevoeligheid van kwarts is zeer variabel. Voor veel Nederlands sediment geldt dat slechts 1-5% van de korrels een bruikbaar signaal geeft. In andere gebieden is dit percentage veel hoger (bijvoorbeeld Australië) of geven kwartskorrels überhaupt geen bruikbaar signaal (bijvoorbeeld Nieuw-Zeeland). De luminescentiegevoeligheid van veldspaat is wat minder variabel, maar is in sommige gebieden minder geschikt door een sterke mate van 'fading' (3.5.4).

Voor het dateren van kwarts- of veldspaat zijn korrels in de fracties silt tot en met matig grof zand nodig (7 tot 300 μm). Meestal wordt de korrelgrootte van 212-250 μm gebruikt voor luminescentiemetingen, maar ook fijnere of grovere zandfracties (63-212 μm ; 250-425 μm) of de siltfractie (4-11 μm) kunnen gebruikt worden. De mediane korrelgrootte van het monster mag ook buiten dit bereik vallen, maar er moet voldoende van de dateerbare fractie in het sediment (of artefact) aanwezig zijn.

4.7.2 Monsterlocatie

Voor het bemonsteren van sediment- of cultuurlagen in een profielwand is het belangrijk om de optimale locatie te selecteren (zie ook afb. 4.5). De beste positie bevindt zich doorgaans in het midden van de laag of vulling, waar de grond rondom het monster homogeen is (afb. 4.17). Wanneer de bodem sterk gelaagd is, of wanneer de gewenste monsterlocatie dicht bij de overgang naar een pakket met andere lithologische samenstelling ligt, wordt het lastig om de jaarlijkse stralingsbelasting nauwkeurig te bepalen. In zulke situaties moet een extra monster voor achtergrondstraling van dit tweede pakket genomen worden, en kan het dosistempo berekend worden uit de relatieve bijdragen van beide pakketten. Een alternatieve oplossing is het meten van het dosistempo direct in het veld, bijvoorbeeld met een draagbare gammaspectrometer of dosimeter. Meestal is dat niet praktisch uitvoerbaar (3.4.2). Hoewel bemonstering van een homogeen pakket de voorkeur heeft met betrekking tot de bepaling van het dosistempo, kunnen er andere redenen zijn om toch juist de overgang tussen twee pakketten te bemonsteren. Voornaamste reden hiervoor is de verwachte lichtblootstelling van de korrels, waarbij korrels op het grensoppervlak een grotere kans hebben gehad op (langdurige) lichtblootstelling. Dit speelt bijvoorbeeld in situaties waar een oud oppervlak is afgedekt door opgebracht materiaal, of waar plaggen zijn gebruikt in een wal of heuvel (afb. 4.5).

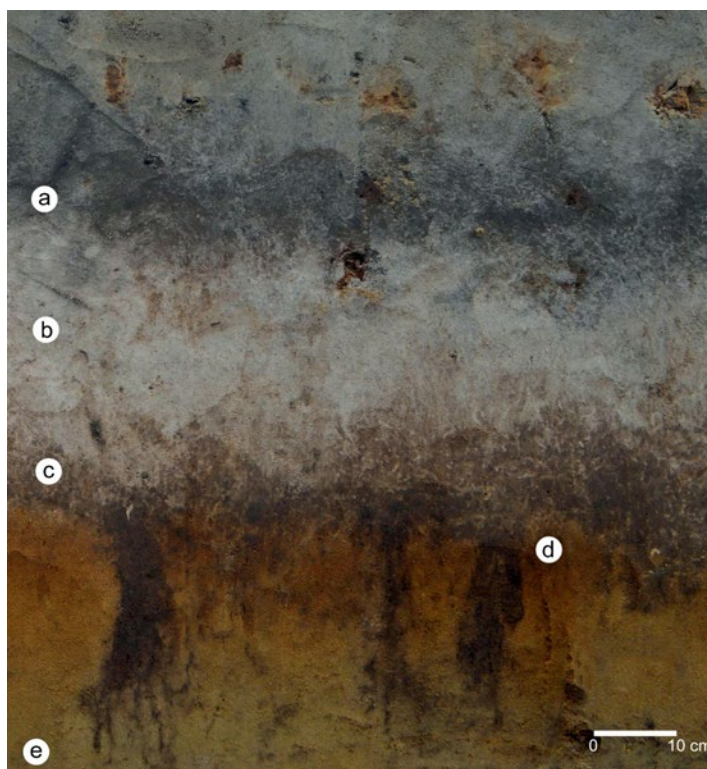
Datering van een enkel monster is in bijna alle situaties af te raden omdat het weinig toegevoegde waarde heeft. Een resultaat op één monster bevestigt hooguit wat al bekend werd verondersteld, terwijl een afwijkend resultaat vaak verworpen wordt omdat het maar op een enkele meting is gebaseerd. De combinatie van meerdere monsters levert meer en meer betrouwbare informatie op. Deze monsters kunnen genomen worden van hetzelfde niveau / pakket, waarbij eenzelfde ouderdom wordt verwacht. Of de monsters kunnen van meerdere stratigrafische niveaus worden genomen, waarmee ook informatie over de snelheid van accumulatie wordt verkregen. Datering van meerdere monsters (met OSL en/of in combinatie met andere methoden zoals pIRIR) maakt het mogelijk de interne consistentie van de resultaten te beoordelen.



Afbeelding 4.17. Het kiezen van de optimale locatie voor een luminescentiemonster is belangrijk. De beste positie voor een spoordatering (post quem datering van een ingegraven spoor of fossiele bodemlaag) is het midden van de primaire vulling/laag. De overweging daarbij is dat korrels in de nabijheid van de (vaak diffuse) grens deels veel ouder kunnen zijn door intrusie (o.a. bioturbatie) vanuit de omringende bodem. De wijze waarop de vulling/laag is ontstaan speelt vooral een rol bij de interpretatie van de ouderdomsbepaling.

4.7.3 Screenen op verstoringen

De monsterlocatie moet worden gescreend op tekenen van verstoring (afb. 4.18). Processen zoals bioturbatie (door wortels of graafactiviteiten van dieren en insecten), bodemvorming (uit- en inspoeling van minerale deeltjes), uitdroging en vorstinwerking kunnen er voor zorgen dat korrels van verschillende leeftijd verplaatst worden in het profiel.⁵³ Ook menselijk handelen zoals ompspitten, omploegen, opvullen of opwerpen leidt tot vermenging en verplaatsing van korrels van verschillende leeftijd. Er moet in archeologische contexten altijd rekening worden gehouden met (enige mate van) postdepositionele verplaatsing. In sommige gevallen is het dateren van dit proces juist de doelstelling, bijvoorbeeld bij datering van een plaggendeek.⁵⁴



Afbeelding 4.18. De monsterlocatie moet worden gescreend op tekenen van verstoring. (a) humeuze sterk gebioturbeerde (wortelwerking/graafgangen) en soms moerige Ahb horizont; (b) sterk ontijzerde en gebioturbeerde Ae- en E-horizont; (c) sterk gebioturbeerde basis van de E-horizont met ingespoelde organische resten; (d) ijzer-inspoelingshorizont (B2f) met duidelijke sporen van doorworteling; (e) deels onverstoorde BC-horizont (afgedekte venbodem Wijchen-Woeziksestraat).

⁵³ Bateman et al. 2003; Rink et al. 2013

⁵⁴ Bokhorst et al. 2005; Choi et al. 2024; Van Mourik et al. 2011

4.7.4 Bemonstering

Buizen of pollenbakken

Tijdens het bemonsteren van sedimentlagen is het belangrijk om het sediment niet bloot te stellen aan daglicht. Een gebruikelijke methode is het voorzichtig horizontaal induwen of inslaan van een ondoorzichtige PVC-buis. Meestal worden gladde stevige PVC-buizen (circa Ø 40-60 mm en tenminste 20 cm lang en met een wanddikte van 3 mm) gebruikt die aan één uiteinde zijn voorzien van een scherpe rand (4.8). Het gebruik van een EPS prop die in het geslepen uiteinde van de buis wordt gestoken, voorkomt dat losser sediment (met name zand) tijdens het inslaan door elkaar wordt geschud en dat aan licht blootgestelde korrels vermengd raken met het monster. Ook pollenbakken kunnen worden gebruikt, mits groot en diep genoeg. Monsterbuizen met een kleinere diameter of hele smalle kleine pollenbakjes van voldoende diepte (10 cm) kunnen worden gebruikt voor dunnere lagen maar dit moet vóór monsternamen met de luminescentiespecialist worden besproken. In de meeste gevallen is het materiaal in een buis voldoende voor zowel de dosistempobepaling (aan licht blootgesteld materiaal uit uiteinden buis) als de luminescentiemeting (materiaal uit midden van de buis). Als gewerkt wordt met kleine monsters is een aanvullend monster van tenminste 200 gram nodig voor de bepaling van het dosistempo. Ook als de korrelgrootte van het sediment sterk afwijkt van de korrelgrootte die voor de luminescentie-analyse gebruikt wordt is het aan te raden zo'n extra monster te nemen. Dit extra monster hoeft niet afgeschermd te worden van daglicht. Voordat de buis of het bakje in de wand van de sectie wordt geduwd of geslagen, moet een paar millimeter sediment van het oppervlak worden verwijderd en opgeschoond. Weliswaar wordt de voor- en achterkant van het sediment in de monsterbuizen of de pollenbak vlak na het uitgraven voor korte tijd aan licht blootgesteld, maar dat is niet erg omdat dit materiaal in het doka lab wordt verwijderd; licht dringt maar enkele millimeters door in het sedimentoppervlak.

Na het plaatsen van de monsterbuis/bak wordt de monsterlocatie genummerd en gedocumenteerd (foto, overzichtsfoto, profielschets). Het heeft de voorkeur om de monsterlocatie (het profiel) ook voorafgaand aan het plaatsen van de buis of bak te fotograferen, eventueel aangevuld met details zoals graafgangen/wortelgangen etc. De monsterbuis of de monsterbak kan met een troffel, (guts)mes of schep worden uitgegraven. Beide zijden van de buis, of het sedimentoppervlak van de bak, wordt afgedicht met eindkappen en/of ducttape om blootstelling aan licht te voorkomen en vochtdicht te verpakken. Voor de zekerheid kunnen de monsterbuizen verpakt worden in zwarte wikkelfolie of alumineum folie.

Grondkolom

In sommige gevallen kan de te bemonsteren laag te hard zijn om een buis of bakje in te slaan. In dat geval kan een samenhangend blok uit de laag worden gesneden of gezaagd. Het is verstandig dat onderzoekers vooraf contact hierover opnemen met het samenwerkende laboratorium om de haalbaarheid van deze gespecialiseerde monsternamen te bespreken. Het buitenoppervlak van het blok, dat tijdens het uitgraven aan daglicht wordt blootgesteld, moet in het laboratorium worden verwijderd. Het blok moet dus groot genoeg zijn - tenminste ongeveer 100 mm in elke richting - om dit mogelijk te maken. Het blokje wordt daarna stevig verpakt en met ducttape afgeplakt. De buitenzijde is toch al aan licht blootgesteld, dus lichtdichte wikkelfolie is niet noodzakelijk tenzij er een risico is dat het materiaal scheurt of breekt.

Mortel- of pleistermonster

Een mortel- of pleistermonster dient tenminste 10 mm dik en 30 mm breed te zijn en goed lichtdicht in zwart wikkelfolie te worden verzameld. Eventueel kan 'in het donker' worden bemonsterd, bijvoorbeeld onder een zwarte lichtdichte doek en (speciaal) doka roodlicht.

Boorkernen

In sommige gevallen is het graven van een profielsleuf of put niet mogelijk of is de monstername onveilig. Dan kan het bemonsteren van lagen onder het grondoppervlak met behulp van (steek)boringen (zoals vibracores) een uitkomst bieden.⁵⁵ De boorbuis moet dan wel voorzien zijn van een lichtdichte binnenbuis. De procedure voor documentatie en verpakking is dan hetzelfde als voor de andere monsters. In een donkere kamer wordt de binnenbuis over de lengte opengezaagd, opengelegd, gedocumenteerd en bemonsterd. Ook kunnen OSL-monsters genomen worden met handmatige boringen, door een monsterbuis met een speciale adaptor onder een grondboor of 'Van der Staay-boor' te bevestigen.⁵⁶

Blootstelling aan röntgenstralen

Blootstelling aan röntgenstralen moet worden voorkomen. XRF-kernscanners of draagbare XRF-apparaten zullen de opgeslagen luminescentie-energie vergroten en het monster ouder doen lijken dan het in werkelijkheid is. Mocht bijvoorbeeld XRF gewenst zijn, dan kan dat pas nadat het kerndeel voor luminescentieonderzoek is bemonsterd. Als het gebruik van dergelijke apparaten (mogelijk) al eerder heeft plaatsgevonden, moet dit met het laboratorium worden besproken. Röntgensystemen die worden gebruikt voor veiligheidscontroles (vliegvelden/douane) of voor postbezorging leveren slechts een kleine extra lading op. Het leeftijdseffect is naar alle waarschijnlijkheid verwaarloosbaar, maar mogelijk van invloed op zeer jonge monsters.

Datering van een enkel monster is in bijna alle situaties af te raden omdat het weinig toegevoegde waarde heeft. Een resultaat op een monster bevestigt hooguit wat al bekend werd verondersteld, terwijl een afwijkend resultaat vaak verworpen wordt omdat het maar op een enkele meting is gebaseerd

⁵⁵ Nelson, Rittenour & Cornachione 2019; Wallinga & Van der Staay 1999

⁵⁶ Wallinga & Van der Staay 1999

4.8 Praktische zaken

4.8.1 Hoe verpak je monsters in het veld?

- Plaats direct na het uitgraven de eindkapjes op de buizen of dek de pollenbak af met wikkelfolie en plak de monsters vocht dicht af met ducttape;
- Controleer bij het uitgraven of de buis goed vol zit; eventueel kan een paar cm opgevuld worden met materiaal uit de te bemonsteren laag of met plastic/EPS;
- Controleer of het monster geheel in het gewenste spoor is geslagen;
- Schrijf het monsternummer met een markeerstift direct op de monsterbuis/-bak of plak een monsterkaartje / label met de juiste monsterbenaming en spoorgegevens op het ingepakte monster (zie onder 'Documentatie');
- Verpak monsters van een site gezamenlijk in zwarte wikkelfolie en voeg een label met opgravingsgegevens bij.

4.8.2 Documentatie

- Bij alle monsters hoort een monsterkaartje (of vondstkaartje) met een uniek monster- of vondstnummer, en een spoor- en vullingnummer;
- Van alle monsters worden metagegevens geregistreerd, bij voorkeur in de (veld) database. Een eigen notitie (dagaantekeningen) kan later helpend zijn;
- Metagegevens betreffen:
 - a. Monsternummer;
 - b. Eventuele gerelateerde monsternummers wanneer bijvoorbeeld extra monsters voor het bepalen van het dosistempo en het watergehalte zijn verzameld (5.3);
 - c. Veldcoördinaat (XYZ veld-GPS);
 - d. Maaiveldhoogte;
 - e. Begraafdiepte (ten opzichte van het maaiveld);
 - f. Spoor- en vullingnummer;
 - g. Contextgegevens (textuurkenmerken, laagkenmerken);
 - h. Een (detail) profielfoto of profielschets met (ook) het monsternummer in beeld. Foto's worden genomen vóór de bemonstering en erna (dus met de monsterbuisen in het profiel, in het geval van sedimentmonsters);
 - i. Informatie over grondwaterpeil, aanwijzingen voor variatie in grondwater in het verleden, en relevante informatie over vochtgehalte tijdens bemonstering (bijvoorbeeld bemalen put, extreem nat / droog door seizoen of weer).
 - j. Een ruim genomen overzichtsfoto of -schets van de profielwand;
 - k. Datum monstername;
 - l. Projectcode en locatienaam;
 - m. Naam van diegene die het monster in het veld verzameld heeft.

Veelgemaakte fouten bij de bemonstering en documentatie

1. Belangrijke metagegevens zijn niet of nauwelijks gedocumenteerd: contextgegevens ontbreken (textuur, stratigrafie, begraafdiepte, coördinaat); administratieve gegevens zijn onvolledig (monsternummers kloppen niet, geen spoor- en vullinggegevens); een profielfoto of profielschets ontbreekt;
2. Er is sprake van een onbetrouwbare associatie met een spoor of laag (zoals: 'monster uit een kuil' of 'monster uit een laag');
3. Er is sprake van een onduidelijke stratigrafische relatie ('monster uit laag bij spoor'). Fouten tijdens het bemonsteren kunnen de leeftijdsbepaling bemoeilijken en zorgen voor extra werk, hogere kosten en tijdverlies;
4. Monsters zijn genomen uit sedimentlagen waarin te weinig van de dateerbare zandfracties aanwezig zijn;

5. Monsters zijn genomen vlakbij een lithologische overgang, zonder referentiemonster van aanpalende laag;
6. Sediment in het monster is aan licht blootgesteld of door elkaar geschud tijdens transport en verzending;
7. Sediment in het monster is aan röntgenstraling blootgesteld tijdens verzending;



Afbeelding 4.19. Benodigheden in het veld

4.8.3 Benodigheden in het veld

Voor het verzamelen van monsters in het veld neem je de volgende materialen en gereedschappen mee (afb. 4.19):

- a. Bemonsteringsbuizen (PVC, diameter ca. 50 mm, lengte tenminste 20 cm en 3 mm dik) die aan één uiteinde zijn geslepen. Alleen bij hele stevige/harde grondsoorten kan ook een metalen buis worden gebruikt, maar voor de laboratoria zijn die lastig te openen;
- b. Op maat gemaakte rondjes van isolatieplaat (EPS) (of ander materiaal) die als 'zuigertje' in de geslepen kant van de monsterbuis wordt aangebracht. Deze 'zuiger' voorkomt dat losgepakt sediment (m.n. zand) tijdens het inslaan van de buis door elkaar wordt geschud en aan licht blootgesteld materiaal vermengd raakt. De zuiger wordt tijdens bemonstering door de buis naar buiten geduwd, en kan in de buis blijven zitten. Het (verkorte) monsternummer kan hierop geschreven worden voor de foto's;
- c. Mokerhamer voor het inslaan van de monsterbuis. Een (moker)hamer met een nylon kop of een hardrubberen kop heeft de voorkeur omdat deze de buis minder beschadigen. Lichte hamers worden niet aanbevolen;
- d. Inslaghulpstuk. Om de buis of bak niet te beschadigen is het handig om een nylon of houten hulpstuk of plank op de buiskop te kunnen houden bij het inslaan. Dit is met name nodig bij hard of geconsolideerd sediment;
- e. Eindkappen voor de monsterbuis. Als er geen eindkappen zijn kun je ook ducttape gebruiken;
- f. Ducttape om de eindkappen van de monsterbuizen af te dichten;
- g. Eventueel kan een RVS-pollenbak van tenminste 5 cm breed en 7 cm diep worden gebruikt voor monsternamen, mits het bemonsterde materiaal niet scheurt tijdens

- monsternamen of opslag;
- h. Meetlint of duimstok om de diepte van het monster ten opzichte van het maaiveld te bepalen;
 - i. Troffel (of gutsmes of kleine schep) voor het opschonen van het profiel en om de monsterbuis of het monsterblik (pollenbak) na documentatie te kunnen verwijderen;
 - j. Monsterkaartjes voor registratie en documentatie. Om te voorkomen dat monsterkaartjes afslijten tijdens transport en verzending is het handig om ze in een klein ziplockzakje te stoppen voordat je ze op de monsterbuis plakt;
 - k. Aangeven op de monsterbuis wat de binnen- en buitenzijde is. Als de binnenzijde aangescherpt is en het 'zuigertje' achterblijft aan de buitenzijde is dat duidelijk genoeg.
 - l. Zwarte (lichtdichte) wikkelfolie voor het inwikkelen van monsters (buizen/pollenbak);
 - m. Stevige plastic gripzakjes, minimaal 10x15 cm (ziplock/hersluitbaar) voor het nemen van extra monsters voor de laboratoriumbepaling van de achtergrond-radioactiviteit (dosistempobepaling);
 - n. Theedoek of andere doek om de monsterbuis enigszins schoon te maken na monstername;
 - o. Markeer(stiften) voor het beschrijven en etiketteren van monsters;
 - p. Notitieboekje om de stratigrafische context, GPS-locatie, maaiveldhoogte en monsterdiepte te documenteren;
 - q. Fototoestel om detailfotos van de te bemonsteren laag/artefact(en) te maken en voor de overzichtsfoto's van het profiel/coupure/stratigrafische relaties.

4.8.4 Verzenden van monsters

- Verpak de monsters stevig en zodanig dat ze niet kunnen bewegen of beschadigen, bij voorkeur in een hard doosje;
- Voeg een korte aanbiedingsbrief toe met contactgegevens en een overzicht van de relevante metagegevens van de monsters. Vaak heeft het dateringslab een eigen monsterformulier/inschrijfstaat;
- Idealiter worden de monsters persoonlijk overgedragen aan het lab, opdat ook de achtergrond, bemonstering en doelstellingen kunnen worden besproken;
- Als dat niet mogelijk is, verstuur dan de doos per post of koerier naar het adres van het dateringslaboratorium, bij voorkeur met een Track & Trace-code. Vermeld dat het pakket lichtgevoelig materiaal bevat en niet geopend mag worden;
- Informeer het laboratorium dat de monsters zijn verzonden en vraag om een ontvangstbevestiging zodra ze zijn aangekomen.



5 Dateren van keramiek en ander verhit materiaal

Het luminescentiesignaal van kwarts- en veldspaatkorrels kan gebruikt worden om te schatten wanneer (bouw)keramiek en ander materiaal voor het laatst werd verhit. Luminescentie-ouderdommen van goed verhit keramiek komen goed overeen met typologische ouderdommen, radiokoolstof-ouderdommen of historisch bekende ouderdommen. De dateringstechniek werkt ook voor andere sterk verhitte materiaalsoorten.⁵⁷ Bekende toepassingen zijn het dateren van baksteen, dakpannen, tegels, verbrande steen en vuursteen, ovenresten, slakken, verbrand zand onder haarden, haardkuilen en houtskoolmeilers enz.

⁵⁷ Bijvoorbeeld Bailiff 2007; Wintle 2008; Richter et al. 2017; Schmidt & Kreutzer 2013; Wang et al. 2022; Karimi Moayed 2023; Karimi Moayed et al. 2023

5.1 Artefactdateringen

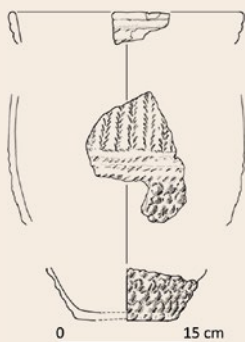
5.1.1 Aardewerk

Aardewerk bestaat over het algemeen uit een mengsel van klei en grofkorrelige minerale deeltjes die worden gebruikt om de klei te mageren.⁵⁸ De korrels moeten voldoende zijn blootgesteld aan hitte om betrouwbaar te kunnen dateren.⁵⁹ Op voorwaarde dat de pot tijdens de fabricage met een voldoende hoge temperatuur is gebakken, kunnen luminescentiemetingen worden uitgevoerd op de ingekapselde silt- of zanddeeltjes. Alleen wanneer een materiaal kort is verhit bij 350 - 400°C of meer, of enkele uren tot 300°C, wordt het volledige luminescentiesignaal gewist (afb. 3.1b). Keramiek dat te kort of bij lagere temperaturen wordt gebakken kan problematische ouderdommen opleveren.⁶⁰ Luminescentiedateren kan een uitkomst bieden wanneer bijvoorbeeld zandgemagerde scherven te weinig typologisch diagnostische kenmerken hebben. Sommige aardewerkvormen zijn gemagerd met organische resten, potgruis of steengruis die geen meetbare luminescentiesignalen geven.⁶¹ Omdat het grootste deel van de ioniserende straling afkomstig is van buiten het artefact, is voor de bepaling van het dosistempo ook een omgevingsmonster nodig (enkele honderden grammen volstaat).

De meeste laboratoria geven de voorkeur aan tenminste 10 mm dikke en 30 mm brede scherven. De buitenste circa 2-3 mm van de scherf wordt in het laboratorium verwijderd, zodat de luminescentiemeting volledig afkomstig is van de binnenzijde van het monster. Omdat het oppervlak in het laboratorium wordt verwijderd, hoeft de scherf bij monsternamen en transport niet tegen licht te worden beschermd. Het aardewerk kan op de normale manier worden gewassen en schoongemaakt voordat het wordt ingezonden. Over het algemeen leiden dikkere scherven tot een grotere precisie. Idealiter zouden meerdere scherven uit elke context moeten worden verzameld.

De Trechterbeker van Well Aijen

Op een rivierterras van de Maas werden in een overstromingsafzetting fragmenten van een trechterbeker-achtige pot gevonden. Typologisch kon het artefact in het laat-neolithicum worden geplaatst maar de nabijgelegen nederzettingsresten dateerden in de ijzertijd en Romeinse tijd. De gevonden scherven zijn gebruikt om te kijken of er een directe luminescentiedatering van prehistorisch aardewerk kan worden verkregen. Luminescentiemonsters werden verzameld uit zowel de overstromingsafzettingen waarin de fragmenten gevonden werden als van een scherf zelf. Van de scherf werd buitenste 1-2 mm in het laboratorium afgekrabd omdat deze tijdens het veldwerk en in opslag aan licht is blootgesteld. Het binnenste deel werd daarna voorzichtig vermalen met een vijzel en stamper. De overstromingsafzetting kon worden gedateerd rond 2700 BCE (± 450 jaar). De trechterbekerscherv kon worden gedateerd rond 2900 BCE (± 400 jaar). Ondanks de toentertijd grote onzekerheidsmarges bevestigde het onderzoek dat ook Nederlands prehistorisch aardewerk met behulp van luminescentie gedateerd kan worden (*Bloo et al. 2008. Dating a pot beaker*).



Afbeelding 5.1. De halspotbeker van Well-Aijen (uit: Bloo et al. 2008).

58 Het waren F. Daniels en collega's die in 1953 als eerste voorstelden om het luminescentiesignaal van ingesloten kwarts- en veldspaatkorrels te gebruiken om te schatten wanneer aardewerk voor het laatst werd verhit.

59 Wintle 2008; Wang et al. 2022

60 Feathers 2003; Nelson et al. 2015.

61 Zie bijvoorbeeld Ten Anscher 2012, 41-275 (hoofdstuk 4 t/m 11)

5.1.2 Bouwkeramiek

Ook gebakken bakstenen, dakpannen en tegels zijn geschikt materiaal voor luminescentie-dateren.⁶² Net als bij aardewerk kunnen de ingekapselde silt- en zanddeeltjes gebruikt worden. Om de gewonnen klei homogeen te maken, werd de klei vaak eerst gekneed of gemalen. Om te voorkomen dat de baksteenvormsels tijdens het stoken niet kapot sprongen, werd de klei daarna gemengd met andere materialen. Vaak werd gebruik gemaakt van zand, of van kapot gestampde of gemalen potscherven of steen. Soms werd botgruis of geplukte en fijngemaakte plantenresten gebruikt. Daarna werd de klei in een vorm gebracht en in de open lucht te drogen gelegd. Na het drogen werden de vormsels in een oven bij hoge temperaturen gebakken.⁶³

Net als bij aardewerk is de te dateren gebeurtenis de laatste blootstelling van ingesloten kwarts- of veldspaatkorrels aan intense hitte. Voor bakstenen, dakpannen of tegels die speciaal in opdracht voor een gebouw werden geproduceerd, zal de tijd tussen productie en gebruik relatief kort zijn geweest. In dat geval dateren de gebakken stenen de constructie. Een probleem is het hergebruik van bouwmaterialen, waarbij oude gebakken stenen werden gerecycled in een nieuw gebouw. Een ander probleem is secundaire verhitting, bijvoorbeeld door een grote brand. Ook bij zo'n gebeurtenis kunnen de luminescentiesignalen in de zandkorrels opnieuw 'op nul' zijn gezet.

Baksteenmonsters kunnen in-situ uit muurwerk worden geboord met behulp van een kernboor (diamantboor, afb. 5.2). Vaak wordt een kernboor gebruikt met een diameter van 50 mm waarbij de steen bemonsterd wordt tot een diepte van 100 mm. Voorkom dat het monster te heet wordt tijdens het boren omdat de hoge temperatuur het luminescentiesignaal kan schaden. Voor losse fragmenten bouwkeramiek geldt dezelfde (laboratorium) procedure als voor scherven. Bij voorkeur wordt een baksteen samen met een aangekoekte dikke laag mortel verzameld (zie 4.6). Omdat het soms onmogelijk is om een stuk muur intact mee te nemen kan een monster genomen worden onder een grote zwarte doek, om blootstelling aan licht tijdens de bemonstering tegen te gaan.

Monsters voor een dosistempobepaling of bepaling van het watergehalte moeten los worden verzameld (zie 5.5). De radioactiviteit van het artefact wordt gemeten aan het artefact zelf.



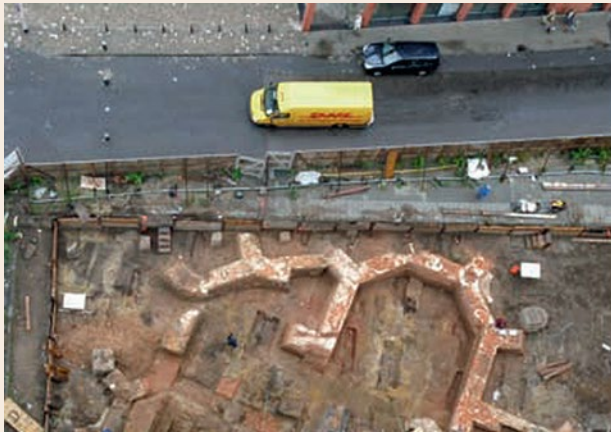
Afbeelding 5.2. Baksteenmonsters kunnen in-situ uit muurwerk worden geboord met behulp van een kernboor (Duller 2008).

⁶² Bailiff 2007; Gurling 2009; Bailiff et al. 2010.

⁶³ Een gangbare bouwwijze in delen van het Romeinse rijk was het gebruik van zongedroogde kleistenen met daaroverheen een pleisterlaag.

Catharinakerk in Eindhoven

In 2002 zijn de fundamenteën van de middeleeuwse Catharinakerk in Eindhoven blootgelegd. Op vijf plekken werden de fundamenteën bemonsterd voor luminescentiedatering. De vraag: in welke fasen is de kerk gebouwd en herbouwd? Meerdere bakstenen met de mortel ertussen werden verzameld. De reden om zowel de steen als de mortel te bemonsteren is dat oude bakstenen soms worden hergebruikt, waardoor een ouderdomsbepaling op alleen de baksteen te oud uitvalt. De stenen van de kerk bleken gebakken tussen 1393 CE (± 43 jaar) en 1508 CE (± 36 jaar) wat goed aansluit bij de historische bronnen. Zo werd de kerk verheven tot kapittelkerk in 1399 CE door de bisschop van Luik en werd de door Gelderse troepen deels verwoeste kerk tussen 1486 CE en 1515 CE herbouwd. Een luminescentiedatering van mortel en een vlijlaag van zand was minder succesvol. De blootstelling aan zonlicht tijdens fabricage en verwerking van de mortel lijkt te kort te zijn geweest om het luminescentiesignaal in de kwartskorrels goed op nul te zetten. Dit bleek uit de grote spreiding van de equivalente dosiswaarden. Het onderzoek aan de Catharinakerk in Eindhoven was de eerste keer dat luminescentiedatering succesvol werd toegepast voor het bepalen van bouwfasen in Nederland (Wallinga et al. 2009. *Baksteen schijnt licht op bouwhistorie Catharinakerk*).



Afbeelding 5.3. (a) Bovenaanzicht van de opgraving bij de Catharinakerk in Eindhoven. (b) Het losmaken van baksteen en mortel voor luminescentiedatering uit de gemetselde fundering (foto: L. Mulkens).

Het luminescentiesignaal van kwarts- en veldspaatkorrels kan gebruikt worden om te schatten wanneer (bouw)keramiek en ander materiaal voor het laatst werd verhit

Binnenhof Den Haag

Op het terrein van het Binnenhof zijn in 2025 een aantal van de oudste bouwsporen gevonden. De archeologen van de gemeente Den Haag vonden deze resten bij het onderzoek voor de Binnenhofrenovatie. Uit de fundamenteën en bodemvondsten blijkt dat het Binnenhof al in de 13e eeuw een gigantisch complex was met een woonkwartier (Rolgebouw), een zaalgebouw (Ridderzaal) en een lagere aanbouw (Lairesse-vleugel). Uit alle bouwdelen zijn luminescentiemonsters met een diamantboor uit de muren geboord. De baksteendatering uit het Rolgebouw was betrouwbaar en kwam uit rond 1541 CE (± 45 jaar). Mogelijk werd een monster genomen van een latere reparatie. In de Ridderzaal werd eveneens een betrouwbare baksteendatering gedaan van rond 1352 CE (± 65 jaar). De baksteendatering van de Lairesse-vleugel was onbetrouwbaar. Waarschijnlijk zijn de keldermuren van het Rolgebouw en de Lairesse-vleugel permanent vochtig geweest in vergelijking met het drogere inwendige deel van de westgevel van de Ridderzaal. Het vocht in de muren is mogelijk van invloed geweest op het luminescentiesignaal (*Archeologie Den Haag 2025. Binnenhof was in de 13e eeuw al een bijzonder complex*).



Afbeelding 5.4. Bij archeologisch onderzoek in het kader van de renovatie van het Binnenhof in Den Haag zijn in 2025 muurresten uit de dertiende eeuw blootgelegd. Ministers krijgen tussen de opgravingen uitleg van archeoloog A. Pavlovic (foto: Bart Maat/Rijksvastgoedbedrijf).

5.1.3 Verbrande vuursteen

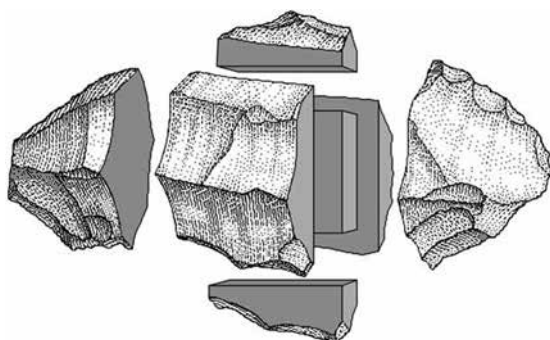
Vuursteen is een vorm van silica die lijkt op kwarts en uitstekende luminescentie-eigenschappen heeft. Het geeft echter alleen een helder luminescentiesignaal af bij verhitting (thermoluminescentie) maar geen luminescentiesignaal bij stimulatie met licht (optisch gestimuleerde luminescentie).

Vuursteen is tot nog toe alleen dateerbaar gebleken wanneer het gehele stuk voldoende verhit is geweest tot boven 300–400°C.⁶⁴ Dit kan gebeurd zijn toen stukken per ongeluk in een vuur terecht kwamen of omdat vuursteen opzettelijk werd verhit.⁶⁵ Het is dan ook niet de productie of het gebruik van het artifact wat wordt gedateerd, maar het moment waarop het verbrand is. Verbrande vuursteen met tekenen van oververhitting, zoals gefragmenteerde stukken, schelpvormige breuken, craquelering en een witte patina zullen de beste ‘stukken’ zijn om te dateren. Maar zelfs als het steenoppervlak is blootgesteld aan hoge temperaturen, kan de binnenkant onvoldoende zijn verhit. Het is in het veld niet altijd mogelijk om vast te stellen of vuurstenen voldoende zijn verbrand. Het is raadzaam om bij het bemonsteren zoveel mogelijk vuurstenen te verzamelen.

Net als bij aardewerk en bouwkeramiek wordt de buitenste 2-3 mm van het stuk in het laboratorium verwijderd om een meting aan de binnenzijde mogelijk te maken. Het stuk verbrande vuursteen moet dus groot genoeg zijn, wat helaas vrij zeldzaam is.

Door vuur gebarsten of door vuur gemodificeerde kiezelhoudende steen is in principe ook te dateren, maar dan alleen die stukken die duidelijk aan hele hoge temperaturen zijn blootgesteld.

Ouderdomsbepaling van verhitte steensoorten (zoals vuursteen) wordt in Nederland niet vaak toegepast.



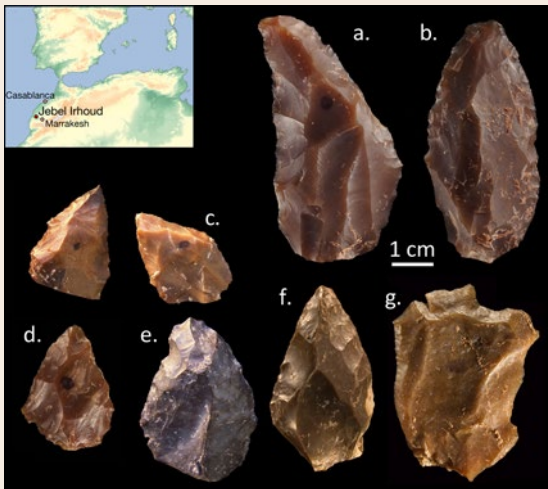
Afbeelding 5.5. De buitenste 2-3 mm van verbrande vuursteenartefacten moet in het laboratorium worden verwijderd. Met een een diamantzaag kan de binnenste kern worden bemonsterd en vervolgens fijngemalen om het luminescentiesignaal te meten (tekening N. Debenham/ Quaternary TL Survey UK).

⁶⁴ Valladas 1992; Richter & Krbetschek 2006; Richter et al. 2017. Voor pogingen om een luminescentiesignaal in onverbrande vuursteen met zichtbaar licht op te wekken: zie Ageby et al. 2024. Zie ook Richter 2007 en Wintle 2014.

⁶⁵ Bijvoorbeeld Peeters 2000

Het middenpaleolithische vuursteen van Jebel Irhoud (Marokko)

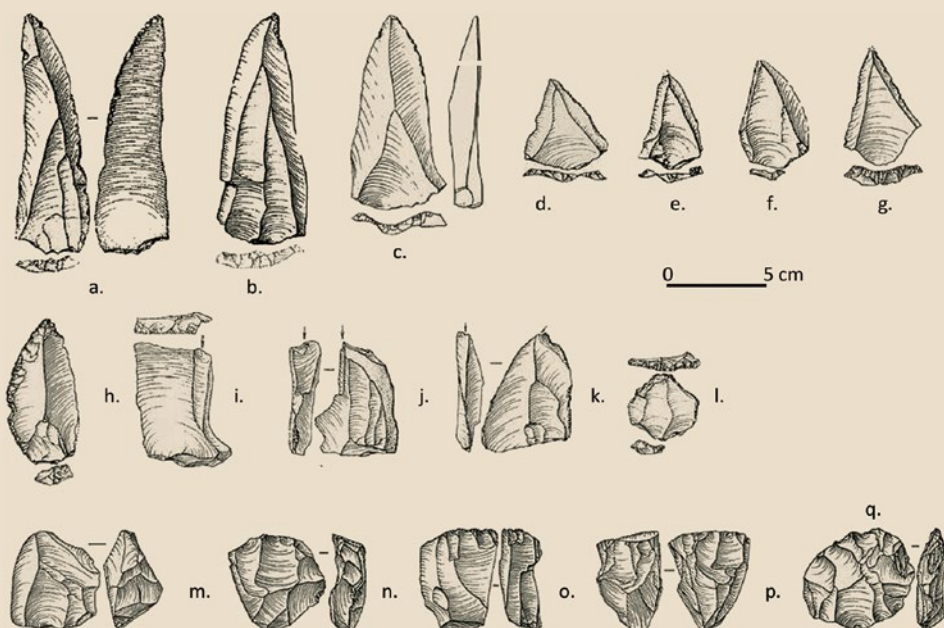
Het vroegste fossiel van *Homo sapiens* komt uit Oost-Afrika en is ongeveer 195 duizend jaar oud. De oudste vuursteenasssemblages uit dit midden paleolithicum komen uit Oost- en Zuid-Afrika en zijn veel ouder. In 2017 rapporteerde Daniel Richter samen met collega's de luminescentieleeftijden van verbrande vuursteenartefacten van de vindplaats Jebel Irhoud (Marokko). Het bijzondere aan deze vindplaats is dat de middenpaleolithische artefacten samen gevonden werden met botresten van *Homo sapiens*. De botresten vielen buiten het ^{14}C -bereik maar de verbrande vuursteen maakte een luminescentiedatering wél mogelijk. In totaal werden 14 betrouwbare luminescentieouderdommen van verbrand vuursteen verkregen. Deze varieerden van 240 ka (± 35 ka) boven in de stratigrafie tot 378 ka (± 30 ka) onderin. Een tand uit de onderkaak van een menselijke schedel werd met elektronspinresonantie gedateerd op 286 ka (± 32 ka). Een gewogen gemiddelde plaatst de artefacten en menselijke resten rond 315 ka (± 34 ka). De gemiddelde leeftijd rond 315 ka (± 34 ka) is overeenkomstig met de biostratigrafische ouderdom van aangetroffen dierresten. Het waren in 2017 de oudste direct gedateerde menselijke resten van *Homo sapiens* (Richter et al. 2017. *The age of the hominin fossils from Jebel Irhoud*).



Afbeelding 5.6. Vuursteenartefacten van de middenpaleolithische vindplaats Jebel Irhoud (Marokko). (a en b) convergente schrabbers; (c) Déjeté schrabber; (d en e) convergente schrabbers; (f) unifaciale spits; (g) Levallois-afslag (naar: Richter et al. 2017)

Het vuursteen van Rosh Ein Mor

De middenpaleolitische vindplaats Rosh Ein Mor (Nahal Zin kloof, Israël) bestaat uit een 80 cm dikke laag vuursteenartefacten. De laag lijkt te zijn ontstaan door het geleidelijk afstuiven van bodemdeeltjes waardoor er een dik concentraat aan artefacten overbleef. Om de ouderdom van het pakket te dateren zijn luminescentiemetingen gedaan aan vijf sterk verbrande stukken.⁶⁶ De ouderdommen liepen sterk uiteen, variërend van 13.000 tot 53.000 jaar oud en zonder relatie tussen leeftijd en verticale of horizontale verspreiding. Als mogelijke oorzaak voor de tegenvallende resultaten is geopperd dat de stukken elk op een andere manier en op een heel ander moment verhit zijn geraakt. De artefacten die (ooit) dicht aan of op het toenmalige oppervlak lagen kunnen meer dan eens verhit zijn geraakt, wat tot herhaalde volledige of gedeeltelijke nulstelling van het luminescentiesignaal kan hebben geleid. De luminescentieleeftijden zijn niet gebruikt voor een ouderdomsbepaling (*Richter 2007. Advantages and limitations of thermoluminescence dating of heated flint*).



Afbeelding 5.7. Vroeg-Levantijnse artefacten van de middenpaleolitische vindplaats Rosh Ein Mor. (a-g) Levallois-spitsen; (h) zijschrabber; (i-k) stekers; (l) eindschrabber; (m-q) Levallois kernstukken (uit: Crew 1976).

⁶⁶ Rink et al. 2003

5.1.4 Authenticatie en datering van kunstvoorwerpen

Soms bestaat er twijfel of een oud keramisch kunstvoorwerp wel 'echt' is. Luminescentielaboratoria werken daarom af en toe samen met musea, particulieren of kunsthandelaren om deze kunstobjecten te dateren. Voor een authenticiteitstoetsing volstaat vaak alleen de meting van de paleodosis om vast te stellen dat het om authentiek aardewerk gaat en niet om een moderne replica. De vraag is dan niet hoe oud het aardewerk is maar of het oud is (of een moderne namaak). Als toch een ouderdomsbepaling gewenst is moet de radioactiviteit van het voorwerp gemeten worden, en moet het laboratorium op basis van de herkomst, geografische locatie en context een schatting maken van de bijdrage van radioactiviteit uit de omgeving (dosistempo). De precisie van de datering zal laag zijn.

Voor bemonstering van keramische kunstvoorwerpen (bijv. terracotta, porselein) wordt meestal een klein gaatje geboord in het voorwerp om materiaal te monstern op een onopvallende plek. Omdat maar zeer weinig materiaal beschikbaar is moeten afwijkende methoden gebruikt worden voor dosistempo bepaling. In sommige gevallen wordt het dosistempo geschat, waardoor alleen een ruwe datering (of authenticiteitsbepaling) wordt verkregen.

Het verhaal van de Schaal

In de NPO podcast 'het Verhaal van de Schaal' gaat Simon Heijmans op zoek naar antwoorden op een raadsel rond een schaal van Chinees porselein. Is de schaal, zoals verzamelaar Ton denkt, gemaakt in de Ming-dynastie en daarmee een wereldontdekking? Of is er iets anders aan de hand? In de podcast wordt uitgebreid gesproken over authenticiteitsbepaling met luminescentietechnieken: (*Simon Heijmans, 2024. Podcast: het verhaal van de schaal*).

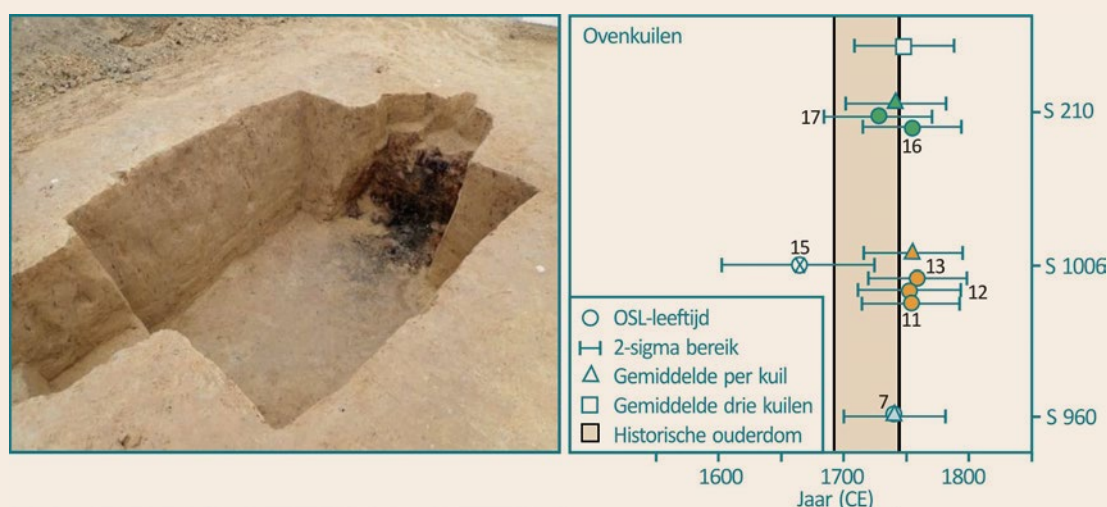
Omdat een groot deel van de ioniserende straling afkomstig is van buiten het artefact, is voor de bepaling van het dosistempo ook een omgevingsmonster nodig

5.2 Verbrand zand (ovenresten, haardkuilen, meilers)

Luminescentiedateren kan ook gebruikt worden om verbrande zand- en veldspaatkorrels te dateren die verband houden met houtskoolverbranding, koken en/of verwarmen en ander functioneel gebruik van (kuil)haarden.⁶⁷ Soms vertoont de grond direct onder de vuurhaard sporen van (intense) verhitting. Soms komen verhitte sedimentdeeltjes in de haarden zelf voor.⁶⁸ De warmte die tijdens de productie van houtskool wordt opgewekt is bijvoorbeeld voldoende om het luminescentiesignaal van kwarts onder de ovens tot op een diepte van ongeveer 5 cm te resetten.⁶⁹ Daarmee kunnen houtskoolmeilers maar ook kookhaardjes gedateerd worden.

Militaire kookkuilen te Ninove

In Ninove (Oost-Vlaanderen) zijn tijdens opgravingen een groot aantal oppervlakkige haarden en haardkuilen gevonden. Deze werden geïnterpreteerd als overblijfselen van kookhaardjes van een militair kampement. Op basis van historische informatie en dateerbare vondsten werden de haarden namelijk toegeschreven aan mogelijke militaire activiteiten in de jaren 1692-1693, 1745 en/of 1831-1838. Om te bepalen welke van de militaire gebeurtenissen op deze locatie hadden plaatsgevonden werden zes monsters van verhitte sedimentdeeltjes uit drie haarden verzameld en gedateerd. De gemiddelde luminescentieleeftijd kwam uit op 1748 CE (± 39 jaar). Die geschatte ouderdom valt samen met historisch en archeologisch bewijs voor de aanwezigheid van een groot leger in het gebied in 1745 (Karimi Moayed et al. 2023. *Dating (early) modern hearths on a decadal to multi-annual timescale*).



Afbeelding 5.8. (a) Kookhaard I-1006. (b) Vergelijking tussen OSL-leeftijden (2-sigma) en historische leeftijdsinformatie van een voormalig militair kampement. De verticale lichtbruine band geeft de mogelijke dateringen weer van historisch bekende militaire activiteiten tussen 1692-1693 en in 1745 (naar: Karimi-Moayed 2023).

⁶⁷ Zie bijvoorbeeld Karimi Moayed 2023 en de referenties hierin.

⁶⁸ Hirsch et al. 2018

⁶⁹ Armitage en King 2013; Yu et al. 2016; Hirsch et al. 2018; Karimi Moayed et al. 2023

5.3 Bemonstering van grond rondom het artefact

Voor een luminescentiedatering van los verzamelde artefacten (keramiek, steen) zijn ook grondmonsters van het sediment rondom het artefact nodig. Dat monster wordt gebruikt om de jaarlijkse stralingsdosis waaraan het artefact is blootgesteld te bepalen (het dosistempo). Ook voor de bepaling van het watergehalte is een grondmonster nodig (par. 3.4). Idealiter wordt datering van het artefact gecombineerd met datering van het omliggende sediment.

5.3.1 Dosistempo monsters

Een dosistempomonster moet verzameld worden van de grond binnen een straal van ongeveer 15 cm rond het artefact. Het monster hoeft niet in het donker verzameld en bewaard te worden. Voor de meeste analysetechnieken is 500 gram grond (ongeveer 0,3 liter/300 ccm) voldoende.

Een afwisseling van klei-, zand- en veenlagen kan resulteren in een niet-uniforme stralingsbelasting en onnauwkeurigheden in de bepaling van het dosistempo. Daarom moeten grondmonsters uit de verschillende textuurlagen direct rondom het artefact worden verzameld. Ook wanneer artefacten in een spoorvulling dicht op de grens met de ongestoorde bodem worden gevonden, kunnen grondmonsters van zowel de spoorvulling als van de omringende grond (binnen 30 cm) nodig zijn, vooral waar grote textuurverschillen bestaan. Net als bij datering van sediment wordt van dit monster zowel de radionucliden activiteitsconcentratie gemeten als het vochtgehalte. Het moet daarom luchtdicht verpakt worden.

Een alternatief is in-situ meting van de achtergrondstraling met behulp van bijvoorbeeld een draagbare gammaspectrometer of een dosimeter. Vanwege de lange meettijd is dit meestal niet praktisch uitvoerbaar (zie 3.4.2).

5.4 Praktische zaken

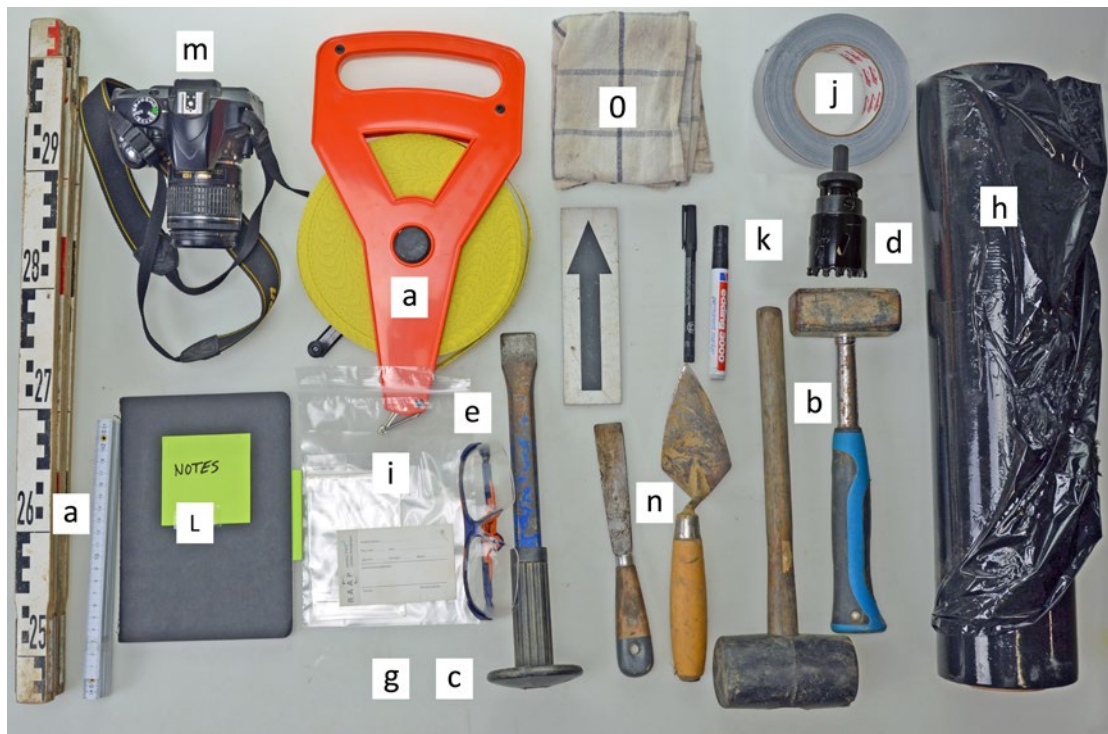
5.4.1 Hoe verpak je monsters in het veld?

1. Omdat het oppervlak van artefacten (keramiek, bouwkeramiek, vuursteen) in het laboratorium wordt verwijderd, hoeven deze artefacten, mits dik genoeg, niet direct tegen licht te worden beschermd. Ze kunnen op de normale manier in vondstzakjes worden verzameld en gedocumenteerd. Inwikkelen in zwarte wikkelfolie kan nooit kwaad en het artefact kan beter niet gewassen en schoongemaakt worden;
2. De extra monsters om in het lab de natuurlijke achtergrondstraling (dosistempo) en het watergehalte te kunnen meten mogen ook aan zonlicht worden blootgesteld, maar moeten wel luchtdicht verpakt in stevige monsterbuisjes of -zakjes. Zorg ervoor dat duidelijk is bij welk artefact (of artefacten) deze extra grondmonsters horen.

Veelgemaakte fouten bij de bemonstering

3. Essentiële extra monsters voor een dosistempobepaling of een watergehaltebepaling ontbreken (zie 5.3);
4. De monsterlocatie wordt slecht gedocumenteerd (geen foto's/profiel schetsen etc.);
5. Pleisterwerk of mortels (4.6) worden aan teveel licht blootgesteld tijdens het bemonsteren. Een oplossing is om 'in het donker' te bemonsteren, bijvoorbeeld door te werken onder een grote zwarte lichtdichte doek en bij (speciaal) roodlicht.⁷⁰

⁷⁰ Zie bijvoorbeeld Wallinga et al. 2009



Afbeelding 5.9. Benodigheden in het veld.

5.4.2 Benodigheden in het veld

Voor het verzamelen neem je de volgende materialen en gereedschappen mee (afb. 5.9):

- a Meetlint of duimstok om de diepte van het monster ten opzichte van het maaiveld te bepalen;
- b Mokerhamer voor het eventueel wegbeitelen of losbeitelen van muurwerk. Lichte hamers worden niet aanbevolen;
- c Platte steenbeitel voor het afbikken van baksteen en mortel;
- d Voor muurwerk: een elektrische boormachine met een kernboor (diamantboor, afb. 5.2). Vaak wordt een kernboor gebruikt met een diameter van 50 mm waarbij de steen bemonsterd wordt tot een diepte van 100 mm. Voorkom dat het monster te heet wordt tijdens het boren, omdat dit het luminescentiesignaal kan schaden.;
- e Veiligheidsbril ter bescherming tegen wegspringende steen- of staalsplinters;
- f Eventueel een grote zwarte lichtdichte doek en een roodlichtbron;
- g Monsterkaartjes voor registratie en documentatie. Om te voorkomen dat monsterkaartjes afslijten tijdens transport en verzending is het handig om ze in een klein ziplock-zakje te stoppen voordat je ze op de monsterbuis plakt;
- h Zwarte (lichtdichte) wikkelfolie voor het inwikkelen van monsters;
- i Stevige plastic gripzakjes, minimaal 10x15 cm (ziplock/hersluitbaar) voor het nemen van extra monsters voor de laboratoriumbepaling van de achtergrond-radioactiviteit (dosistempobepaling) en het watergehalte. Het zakje moet goed afgesloten worden om vochtverlies te voorkomen. Stop het monster daarom nogmaals in een tweede zakje;
- j Ducttape om de monsterzakjes af te dichten;
- k Markeer(stiften) voor het beschrijven en etiketteren van monsters;
- l Notitieboekje om de stratigrafische context, GPS-locatie, maaiveldhoogte en monsterdiepte te documenteren;
- m Fototoestel om detailfotos van de te bemonsteren laag/artefact(en) te maken en voor de overzichtsfoto's van het profiel/coupure/stratigrafische relaties.



Afbeelding 6.1. Luminescentiemetingen aan zandkorrels vinden plaats in een donkere kamer onder gecontroleerde lichtomstandigheden (foto: Guy Ackermans).

6 Analyse en interpretatie

Analyse van luminescentiemonsters vindt plaats in een donkere kamer onder gecontroleerde lichtomstandigheden. Na een intensieve voorbehandeling worden een paar honderd zandkorrels op een schijfje gelegd en wordt het luminescentie-sigitaal gemeten in een speciaal daarvoor ontwikkeld apparaat. Deze meting wordt op een groot aantal submonstertjes herhaald. In sommige gevallen worden individuele korreltjes gemeten. Statistische analyse van alle meetuitkomsten bepaalt de paleodosis. Samen met de dosistempobepaling kan daarna de ouderdom worden geschat.



foto: Guy Ackermans

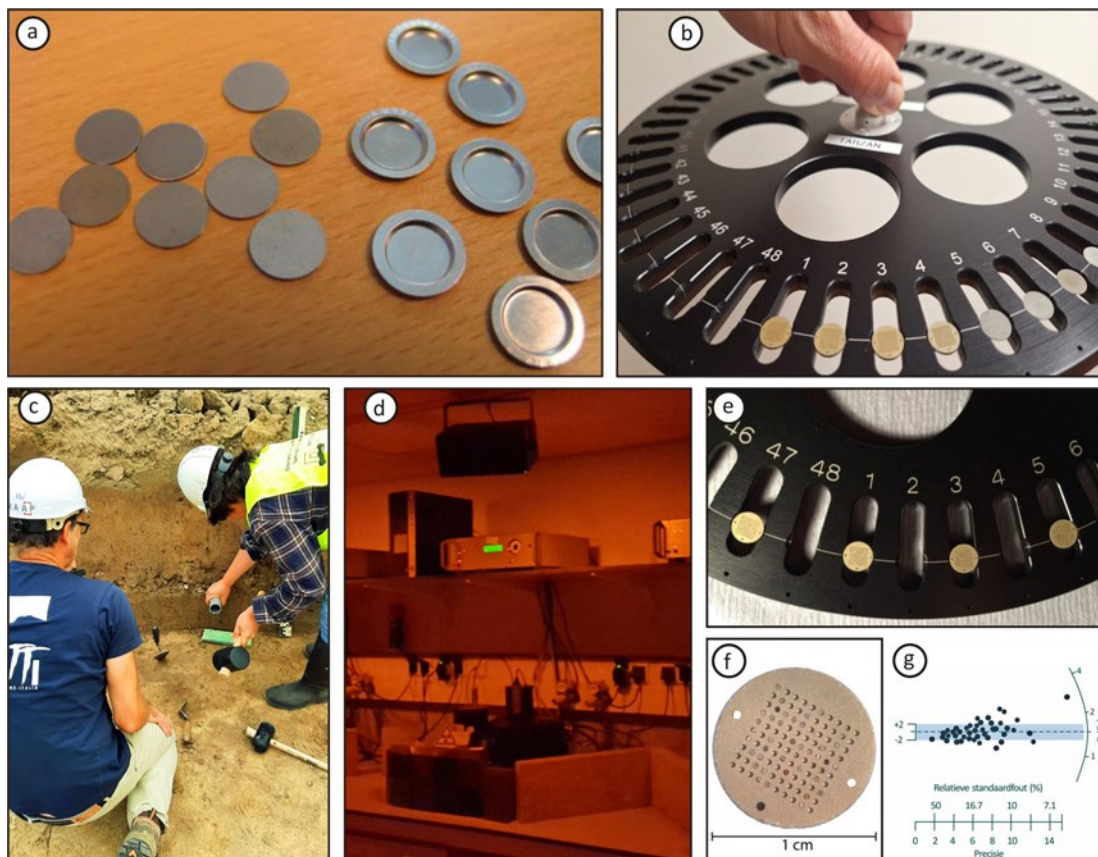
6.1 Monstervoorbereiding in het lab

Voorbereiding van monsters vindt plaats in een donkere kamer onder gecontroleerde lichtomstandigheden (afb. 6.1). Monsterbuizen worden geopend, en materiaal van de buitenzijde wordt verzameld voor bepaling van het watergehalte en dosistempo. Materiaal uit het midden van de buis wordt gebruikt voor meting van het luminescentiesignaal. Bij artefacten zoals potscherven, bouwkeramiek, pleister en mortels of verbrande (vuur)steen wordt de buitenlaag verwijderd. Het binnenste van het artefact heeft geen licht gezien, en is daarom geschikt voor analyse.

Voor het bepalen van het dosistempo (de natuurlijke achtergrondstraling) wordt het monster eerst gedroogd en verast om het watergehalte en het organische stofgehalte te bepalen. Het watergehalte van het monster wordt bepaald door het monster enkele uren te drogen in een oven bij 105 °C en het gewichtsverlies te meten. Voor het vaststellen van het organische stofgehalte wordt hetzelfde monster verast bij 500 °C volgens de gloeiverliesmethode.

Voor dosistempometingen met gamma-spectrometrie wordt ongeveer 150 g materiaal met was vermengd en tot een schijf geperst. Deze schijf past precies in de gammaspectrometer. De was zorgt er bovendien voor dat radon in het monster blijft opgesloten. Voor kleinere monsters wordt gecombineerde alpha en beta counting gebruikt. Hiervoor is maar ongeveer 5 g materiaal nodig. Voor nog kleinere monsters wordt neutronen activerings analyse gebruikt. Sommige labs gebruiken ook andere analytische methoden (ICP-MS, XRF).

Voor het meten van het natuurlijke luminescentiesignaal en het vaststellen van de equivalente dosis (3.3) worden de zandkorrels gezeefd op korrelgrootte en vervolgens chemisch gezuiverd (met zoutzuur (HCL) en waterstofperoxide (H₂O₂)) om kalk en organische stof te



Afbeelding 6.2. De diskjes met zandkorrels (a) worden op een ronde carroussel geplaatst (b) die in het meetinstrument (afb. 6.1) rond kan draaien; (c) bemonstering van een wegdek met een lichtdichte pvc buis (foto: R. van Beek); (d) Risø-reader in de donkere kamer; (e) carroussel met plaats voor 48 diskjes ofwel 'aliquots'; (f) close-up van een 'single-grain' diskje voor 100 korreltjes; (g) radiale grafiek met meetresultaten van de equivalente dosiswaarden.

verwijderen. Om kaliumveldspaat te isoleren is een dichtheidsscheiding nodig; het veldspaat is net wat lichter dan kwarts en gaat drijven in zware vloeistof van de juiste dichtheid. Een zuiver kwarts monster wordt verkregen door chemische behandeling in waterstofluoride (HF), waardoor alle andere mineralen oplossen en kwarts geëetst wordt.

Het gezeefde en gezuiverde materiaal wordt verdeeld in een tiental kleine submonsters (aliquots), bestaande uit enkele tientallen korrels die bij elkaar op een plat diskje van 1 cm doorsnede worden geplaatst (afb. 6.2a). Voor fijner materiaal of bij lage luminescentiegevoeligheid kunnen submonsters ook uit meer korrels bestaan (tot vele duizenden voor silt). Voor korrel-voor-korrel meting wordt een diskje gebruikt met 100 kleine gaatjes, die elk plaats bieden aan een enkele zandkorrel (afb. 6.2f). De diskjes worden op een ronde carroussel met 48 posities geplaatst die in het meetinstrument rond kan draaien (zie afb. 6.2b).

Voor zandmonsters wordt vaak gebruik gemaakt van kleine submonstertjes van gezuiverde en gezeefde kwarts- of veldspaatkorrels, terwijl datering van zeer fijn zand en silt of keramiek gebruik maakt van kwarts of polyminerale fracties.⁷¹ Zuiver kwarts in de siltfractie is te verkrijgen met hexafluorkieselzuur (H_2SiF_6), maar zuiver veldspaat verkrijgen is moeilijk omdat dichtheidsscheiding van silt niet mogelijk is.

⁷¹ Omdat het fysiek scheiden van kwarts en veldspaat in fijn silt moeilijk is, wordt een polyminerale datering gedaan met infraroodlichtstimulatie (IRSL) van veldspaat. IRSL wordt vooral toegepast voor keramiekdateringen omdat het dosistempo moeilijk vast te stellen is en omdat het grootste deel van de straling (soms) uit het artefact zelf komt.

6.2 Metingen

6.2.1 Bepalen van het dosistempo

Voor de bepaling van het dosistempo worden met een gammaspectrometer de activiteitenconcentraties van Kalium-40 en diverse nucliden uit de uranium- en thoriumreeksen gemeten.⁷² Omdat kosmische straling eveneens bijdraagt aan het totale dosistempo, worden de meetresultaten gecombineerd met informatie over de begravingsdiepte van het monster. Bij de berekening van het dosistempo wordt ook rekening gehouden met de korrelgroottefractie die voor de luminescentiemetingen wordt gebruikt.

Afhankelijk van de geologische en archeologische context wordt verder rekening gehouden met een geleidelijke begraving tot de huidige diepte onder het oppervlak. Daarnaast is het watergehalte en organisch stofgehalte van invloed. In veel gevallen wordt een extra onzekerheidsmarge toegepast om variaties in het watergehalte tijdens de begravingsperiode mee te wegen.

Op basis van al deze gegevens kan uiteindelijk de jaarlijkse stralingsdosis worden berekend.⁷³

6.2.2 Metingen aan het luminescentiesignaal

Voorbereidende tests

Eerst wordt een aantal tests uitgevoerd op een serie monsters van een locatie om de meest geschikte instellingen voor de meting voor die monsters te bepalen. Een luminescentiemeting wordt voorafgegaan door een voorverhitting (preheat) van de korrels. Deze voorverhitting is nodig om de ongewenste bijdrage van luminescentie-energie uit ondiepe energieniveaus te elimineren. Tegelijkertijd kan deze verhitting zorgen voor verandering van de luminescentiegevoeligheid en een overdracht van lading van traps die niet gevoelig zijn voor licht, naar lichtgevoelige traps.

Afhankelijk van het type en de verwachte ouderdom van het monster worden tests uitgevoerd om te bepalen welke voorverhitting passend is. Met een 'preheat test' kan gekeken worden of de equivalente dosiswaarde niet gevoelig is voor de precieze temperatuur die gekozen wordt. Met een thermal transfer test kan gekeken worden tot welke temperatuur de overdracht van lading beperkt is. Voor hele oude monsters wordt gekeken naar het verzadigingsniveau van het luminescentiesignaal. Als het kwarts OSL signaal verzadigd is kan uitgeweken worden naar veldspaat pIRIR datering.

Tenslotte wordt getest of bij de gekozen instellingen een gegeven dosis correct bepaald kan worden. Hiertoe wordt het natuurlijk signaal eerst op nul gesteld door blootstelling aan licht. Vervolgens wordt een aantal submonsters bestraald met een gecalibreerde (bèta)stralingsbron. Na deze gegeven dosis wordt het luminescentiesignaal opnieuw gemeten. Bij de juiste gekozen instellingen zal de gemeten dosis overeen moeten komen met de gegeven dosis. Dit wordt de 'dose recovery test' genoemd (afb. 6.3).

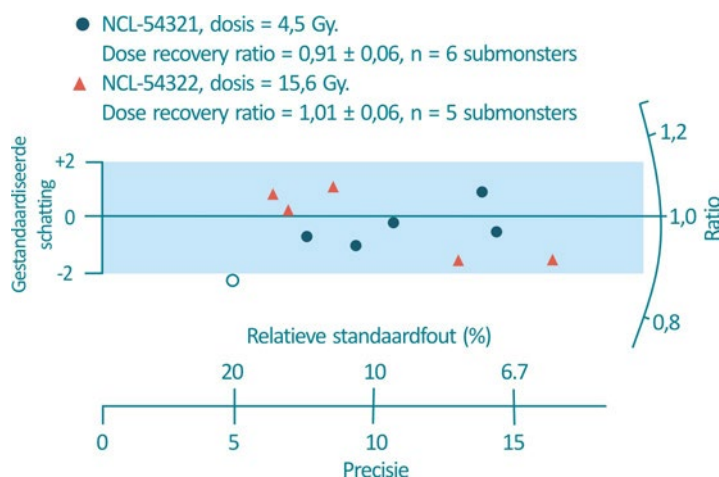
Op basis van de voorbereidende test wordt een (SAR) meetprocedure gekozen. De procedurerestappen en de gekozen parameterwaarden (duur, temperatuur, golflengte licht) worden in veel rapporten weergegeven in een stappenschema (tabel 6.1).

⁷² Bij het NCL worden dosistempo's bepaald met behulp van gammaspectroscopie of gecombineerde alfa-bètatelling. De gammaspectrometer en μ -dose teller zijn ondergebracht in het Wageningen Food Safety instituut op de Wageningen campus.

⁷³ Vaak wordt een interne dosis alfa-straling van $0,010 \pm 0,005$ Gy/ka gebruikt in de berekening van het dosistempo (Vandenbergh et al. 2008). De bijdrage van kosmische straling wordt bepaald volgens Prescott en Hutton (1994). Het effect van korrelgrootte en vochtvasthoudend vermogen wordt berekend volgens Cunningham et al. (2022).

Tabel 6.1. Voorbeeld van een SAR-procedure voor kwarts.

Stap	Uitleg
0. Bestraling (in natuurlijke omgeving tijdens begraving of beta-straling in het lab)	
1. 10 sec voorverwarmen tot 220 °C (preheat)	Het monster wordt verwarmd om thermisch onstabiele lading te elimineren
2. 20 sec beschijnen met blauw licht op 125 °C	Het monster wordt bestraald met licht van een bepaalde golflengte en het vrijkomende luminescentiesignaal wordt gemeten
3. Testdosis (Beta-straling)	Een relatief kleine stralingsdosis wordt aan het monster toegediend. De testdosis is in elke meetcyclus hetzelfde
4. Korte verwarmingsstap van 200 °C (cut heat)	Het monster wordt verwarmd om thermisch onstabiele lading te elimineren
5. 20 sec beschijnen met blauw licht op 125 °C	Het luminescentiesignaal opgewekt door de testdosis wordt gemeten. Doordat steeds dezelfde testdosis wordt gebruikt kan deze meting gebruikt worden om gevoeligheidsverandering te monitoren en te corrigeren
6. 40 sec 'bleken' met blauw licht op 230 °C	Het monster wordt bestraald met een lichtbron op hoge temperatuur om resterende lading te elimineren
Herhaal stap 0-6 met verschillende stralingsdosis	Bepalen luminescentieresponse om signaal te vertalen naar ontvangen stralingsdosis.
Extra: herhaal stap 1-6 met infrarood licht op 30 °C direct voor stap 2	Deze extra stap is soms nodig om te controleren of het kwartsmonster vrij is van veldspaatverontreiniging



Afbeelding 6.3. Resultaten van een 'Dose Recovery Test'. Punten binnen de blauwe band komen binnen de meetonzekerheid (2-sigma) overeen met de verwachte dosis.

6.2.3 Bepalen van de paleodosi

De SAR-meetprocedure wordt uitgelegd in zie 3.3. In het kort: eerst wordt van een submonster het natuurlijke luminescentiesignaal opgewekt en gemeten. Daarna wordt bepaald hoeveel kunstmatige straling nodig is om in hetzelfde submonstertje een even helder luminescentiesignaal op te wekken.⁷⁴ In de procedure wordt na elke meting de luminescentierespons op een relatief kleine stralingsdosis gemeten om eventuele gevoeligheidsveranderingen te corrigeren. De benodigde hoeveelheid kunstmatige straling om (na correctie) een signaal op te wekken dat gelijk staat aan het natuurlijk signaal is de equivalente dosis. Deze bepalingen worden uitgevoerd op een groot aantal submonsters. Hoeveel submonsters gemeten moet worden hangt af van de spreiding in resultaten. Op basis van de spreiding van alle equivalente dosiswaarden wordt de paleodosi berekend.

6.2.4 Single grain of multigrain?

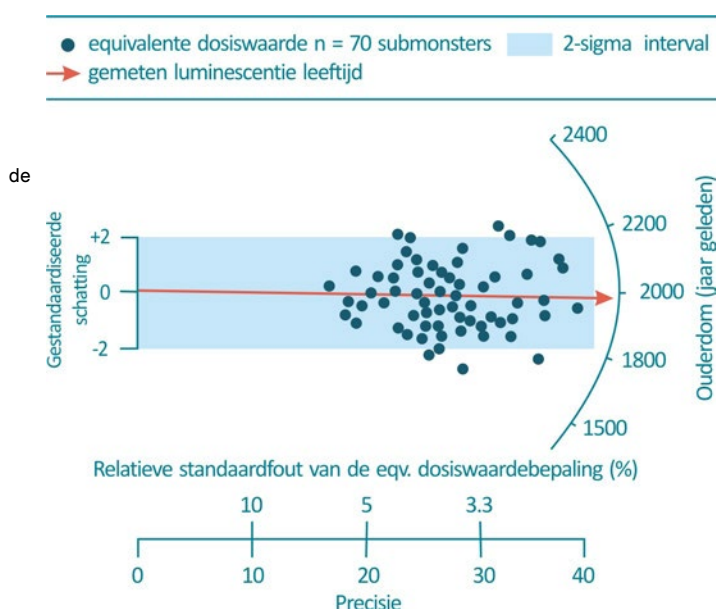
Luminescentiemetingen aan individuele korrels gezuiverd kwarts of veldspaat hebben als groot voordeel dat een onvolledige blootstelling aan licht of vermenging na afzetting (bioturbatie, hersedimentatie, omwerking van grond) kan worden opgespoord. Bovendien kunnen individuele korrels uitgekozen worden die het meest geschikt zijn voor datering op basis van signaalgevoeligheid en de intensiteit, stabiliteit en reproduceerbaarheid van het luminescentiesignaal.⁷⁵

Een datering van fijnkorrelig sediment (silt, uiterst fijn zand) is alleen nuttig wanneer grove korrels ontbreken of de fijne fractie beter aan licht is blootgesteld.

6.3 Grafieken

6.3.1 Radiale grafiek

De equivalente dosiswaarden kunnen op verschillende manieren grafisch worden weergegeven. Vaak wordt de radiale grafiek gebruikt (afb. 6.4), omdat deze zowel de gemeten equivalente dosiswaarde als de nauwkeurigheid van deze meting toont.⁷⁶ Alle waarden die met elkaar overeenkomen liggen op één lijn. Met een iets bredere balk kan getoond worden welke waarden binnen de eigen onzekerheid (2-sigma) met elkaar overeenkomen.



Afbeelding 6.4. Radiale grafiek met een unimodale spreiding van equivalente dosiswaarden, in dit voorbeeld omgerekend naar luminescentieleeftijden. Punten binnen de blauwe band komen binnen de meetonzekerheid (2-sigma) overeen met luminescentieleeftijd die op basis van alle metingen is berekend.

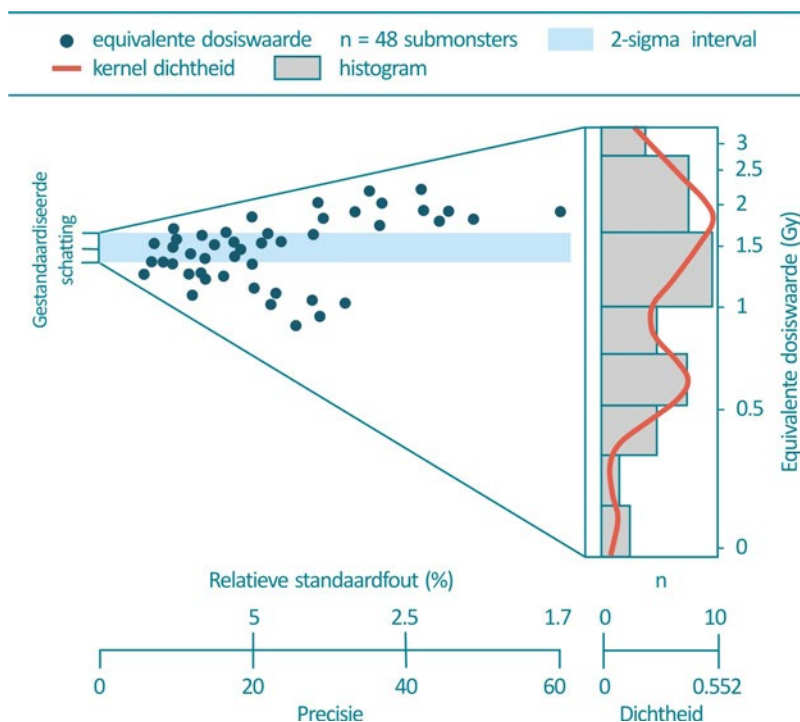
⁷⁴ De SAR-procedure controleert en corrigeert veranderingen in de luminescentiegevoeligheid tijdens de meting. Het meest lichtgevoelige OSL-signaal van kwartskorrels wordt bepaald en geselecteerd (cf. Cunningham & Wallinga 2010).

⁷⁵ Bijvoorbeeld: Choi et al. 2024

⁷⁶ Naar de verzinner ook wel de Galbraith-grafiek genoemd (Galbraith 1988). Zie voor een uitleg over de radiale grafiek bijvoorbeeld Vermeesch (2009) en Galbraith & Roberts (2012).

6.3.2 Abanico grafiek

Het nadeel van de radiale grafiek is dat met name de frequentieverdeling van de verschillende luminescentieleeftijden moeilijk is af te lezen. Daarvoor is een histogram een geschiktere vorm, maar die grafiekvorm geeft geen inzicht in de onzekerheden op de individuele metingen. De zogenaamde Abanico-grafiek is een goed alternatief. De Abanico-grafiek combineert de radiale grafiek met een histogram en/of een dichtheidsverdeling. Een voorbeeld van dit type grafiek wordt in afbeelding 6.5 weergegeven voor een dosiswaardeverdeling met lage precisie (<5) en een klein cluster van punten onder het gemiddelde.



Afbeelding 6.5. Abanico grafiek met een bimodale spreiding van equivalente dosiswaarden.

6.4 Hoe interpreteer ik de resultaten?

6.4.1 Hoe moet je een radiale grafiek lezen?

Een radiale grafiek stelt onderzoekers in staat om de grootte van elke dosiswaarde af te lezen, evenals de fout en precisie ervan en – belangrijk – de spreiding (afb. 6.4). Op de linker verticale as wordt de onzekerheidsmarge weergegeven; de breedte van de horizontale balk door het midden is het 95% betrouwbaarheidsinterval (2-sigma) van de gemiddelde waarde van alle gestandaardiseerde dosiswaarden. De onderste horizontale schaal geeft een maat voor de relatieve onzekerheid van elke individuele equivalente dosiswaarde. De meetprecisie (inverse van de onzekerheid) kan worden afgelezen van de onderste schaal. De absolute dosiswaarden kunnen worden afgelezen van de verticale radiale as aan de rechterkant. De schaal van de radiale as is meestal logaritmisch.

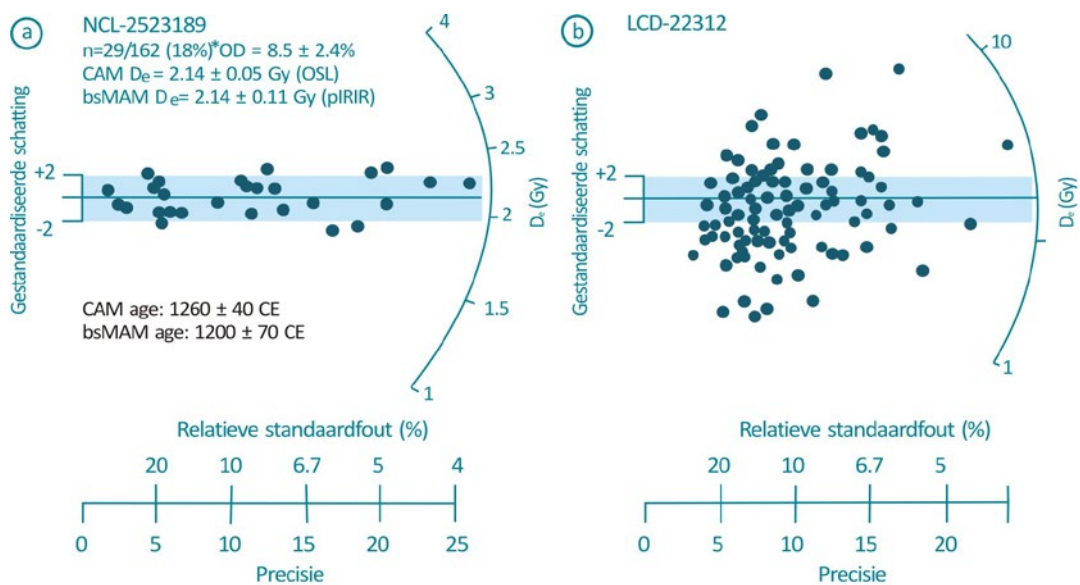
Hoewel de radiale grafiek en abanico plot meestal gebruikt worden om de spreiding in equivalent dose te tonen, kan ook de luminescentieleeftijd op een zelfde manier geplott worden, zoals in afbeelding 6.4. Daarbij wordt de individuele dosiswaarde gedeeld door het dosistempo van het monster (zie 3.2). De onzekerheden in het dosistempo worden daarbij buiten beschouwing gelaten in de weergave van de data (maar uiteraard wel in berekening van resultaten).

6.4.2 Wat kun je leren van de spreiding van equivalente dosiswaarden?

Uit de spreiding van de equivalente dosiswaarden (of luminescentieleeftijden) in de radiale grafiek of in het histogram kan veel informatie worden gehaald (zie ook afbeelding 3.6):

- Of alle korrels voorafgaand aan de meest recente begraving of insluiting voldoende zijn blootgesteld aan zonlicht of hitte;
- Of er vermenging heeft plaatsgevonden van materiaal uit twee of meer grondlagen van verschillende ouderdom.

Wanneer (bijna) alle dosiswaarden binnen een smalle 2-sigma-band vallen, geeft dat aan dat deze waarden binnen de eigen onzekerheid met elkaar overeenkomen (afb. 6.6). Ofwel, de onzekerheid in de individuele punten verklaart de spreiding in de equivalente dosiswaarden volledig. Zo'n uitkomst is alleen te verwachten wanneer alle korrels eenzelfde luminescentieleeftijd hebben. Het luminescentiesignaal lijkt voor alle korrels op hetzelfde moment op nul te zijn gesteld door licht (afb. 3.6a) of door hitte. Een homogene smalle spreiding is te verwachten bij bijvoorbeeld duinzand of bij sterk verhit aardewerk. Een eenvoudig gemiddelde, of gewogen gemiddelde, geeft dan een betrouwbare inschatting van de paleodosis (6.4.3).



Afbeelding 6.6.(a) Unimodale spreiding van equivalente dosiswaarden binnen het 2-sigma bereik. Voor de leeftijds-schatting is een Central Age Model (CAM) gebruikt (Waldijk bij Wolferen); (b) Multimodale spreiding van equivalente dosiswaarden.

Wanneer er enkele uitschieters aanwezig zijn, kan ervoor worden gekozen deze stapsgewijs uit het rekenkundige model te verwijderen (zie 6.4.3). Dergelijke uitschieters kunnen verklaard worden doordat een klein deel van de korrels onvoldoende aan licht is blootgesteld om het luminescentiesignaal geheel op nul te stellen (afb. 3.6b), of doordat een klein deel van de korrels pas (lang) na afzetting en begraving in de bodem is gekomen (bijv. door bioturbatie; afb. 3.6c). Een grotere spreiding in equivalente dosiswaarden duidt er op dat lichtblootstelling van veel korrels onvoldoende was voor het op nul stellen van het luminescentiesignaal (afb. 6.7), of dat postdepositionele menging heeft plaatsgevonden.

6.4.3 Schatting van de paleodosis: ouderdomsmodellen

Bij het bepalen van de paleodosis van een monster wordt gekeken naar de spreiding van alle equivalente dosiswaarden uit hetzelfde monster. Het doel is om een precieze schatting van de absolute ouderdom te maken. Dit proces is te vergelijken met het archeologisch dateren van een verzameling goed dateerbare artefacten. Soms komen in een kuil een groot aantal Romeinse scherven voor samen met twee goed dateerbare laatmiddeleeuwse munten. Het is aan specialisten om te beoordelen of

deze munten een intrusie van materiaal van veel jongere datum vertegenwoordigen, of dat juist de munten zélf het spoor dateren. Context en stratigrafie zijn dan bepalend om de juistheid van de verschillende aannames te onderbouwen.

Het schatten van de 'ware' ouderdom van een monster op basis van equivalente dosiswaarden volgt een vergelijkbaar spoor.

Als de equivalente dosiswaarden veel spreiding laat zien en het afzettingsmilieu tot een slechte bleking kan leiden (bijv. relatief jonge afzettingen uit troebel water), dan bieden de jongste uitkomsten de beste dateringen (afb. 3.6b). Slechte bleking kan immers wel leiden tot overschatting, maar niet tot onderschatting van de leeftijd. Als er een duidelijke ondergrens in de spreidingen te zien is, kunnen de jongste uitkomsten een goede inschatting geven van de paleodosis.

Wanneer de spreiding in de equivalent dosiswaarden groot is, hangt de interpretatie van de uitkomsten sterk af van de vraag die beantwoord moet worden. Als het moment van omploegen van het sediment bepaald moet worden, of wanneer sprake is van een sterk gebioturbeerde (fossiele) bodem, dan zijn de jongste uitkomsten het meest passend (afb. 3.6c). Maar als de ouderdom van de oorspronkelijk afzetting bepaald moet worden, dan zijn jonge uitbijters juist verstorend en kan gekozen worden voor de oudste uitkomsten.

Rekenkundige modellen

Omdat de metingen altijd meeton nauwkeurigheden bevatten wordt de meest waarschijnlijke ouderdom meestal rekenkundig bepaald.⁷⁷ Laboratoria gebruiken daarvoor verschillende statistische rekenmodellen. Een Central Age Model (CAM) wordt toegepast wanneer de spreiding van de dosiswaarden rond één gemiddelde ligt, zoals vaak het geval is bij goed gebleekt duinzand (afb. 6.6).⁷⁸ Het Minimum Age Model (MAM) berekent het jongste deel van de verdeling (afb. 6.8a). Een Finite Mixture Model (FMM) wordt toegepast op mengsels van korrels afkomstig van twee of meer sedimentaire eenheden van verschillende ouderdom (afb. 6.8b). Dit model is niet geschikt als er sprake is van slechte bleking, en is alleen betekenisvol als de metingen op individuele korrels zijn gedaan. Het Maximum Age Model (MaxAM) berekent het oudste deel van de verdeling.

6.4.4 Hoe robuust is het gebruikte ouderdomsmodel?

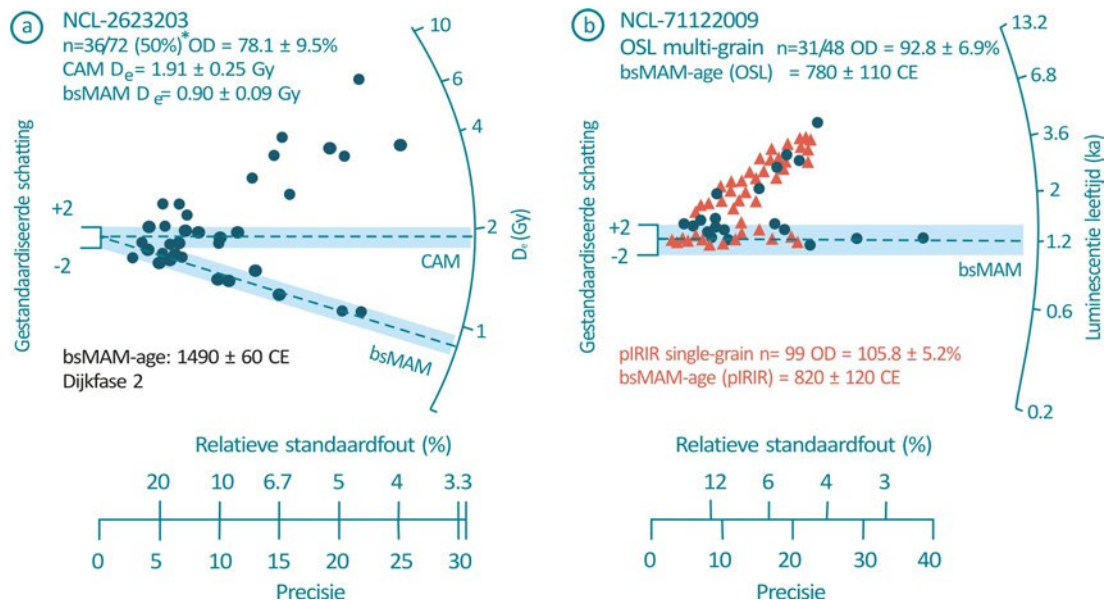
Bootstrapping

Een Minimum Age Model kan gevoelig zijn voor de uitbijters van jonge leeftijden, bijvoorbeeld wanneer sprake lijkt te zijn van intrusie (door bijvoorbeeld bioturbatie) van korrels uit jongere afzettingen. De gevoeligheid van het model voor deze uitbijters kan berekend worden door modelberekeningen te doen op basis van steeds andere (random samengestelde) subsets en dan naar de verschillende uitkomsten te kijken. Dit proces, bootstrapping genoemd, wordt gebruikt om een meer betrouwbaar ouderdomsresultaat en realistische schatting van de onzekerheid te krijgen die de uitbijters opleveren. Een berekening met behulp van een Minimum Age Model en bootstrapping wordt dan vaak aangeduid als bsMAM (afb. 6.8, 6.9; tabel 6.2).⁷⁹

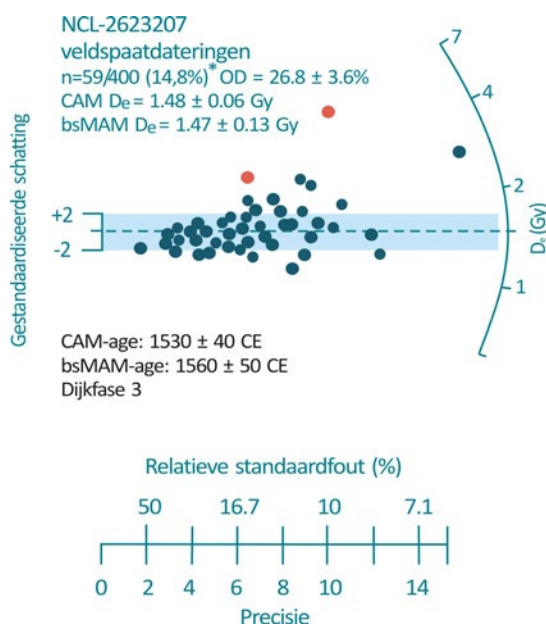
⁷⁷ Galbraith & Roberts 2012; Mahan et al. 2022.

⁷⁸ Galbraith et al. 1999. Zie ook Cunningham & Wallinga 2012.

⁷⁹ Minimum Age Model (MAM): Galbraith et al. 1999; bootstrapped Minimum Age Model (bsMAM): Cunningham & Wallinga 2012.



Afbeelding 6.7. (a) Central Age Model (CAM) voor kwarts OSL-dateringen van een dijklaag (Scheldedijk, Bornem); (b) Finite Mixture Model (FMM) voor een kwarts- (OSL) en veldspaatdatering (pIRIR) van een monster uit de wal van de ringwalburg van Den Burg (Texel). De sterk bimodale verdeling en de ouderdomsschatting wijst op de aanwezigheid van (ongebleekte) dekzandkorrels in de ophooglagen. Voor de ouderdomsbepaling rond 800 CE is een (bootstrapped) Minimum Age Model gebruikt.



Afbeelding 6.8. Unimodale spreiding van equivalente dosiswaarden (D_e) voor veldspaatkorrels met uitbijters. Rode cirkels zijn D_e -waarden die meer dan vier standaarddeviaties ($> 4\text{-sigma}$) van het steekproefgemiddelde afwijken. Deze afwijkende waarden zijn door middel van 'bootstrapping' uit de dataset voor het 'Minimum Age Model' verwijderd (Scheldedijk bij Bornem).

Iteratief

Soms zijn in de spreiding van equivalente dosiswaarden uitbijters zichtbaar die (ver) buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de verdeling vallen. Om te voorkomen dat deze uitbijters de eindresultaten te zeer beïnvloeden, kan een iteratief proces van uitsluiting worden toegepast (tabel 6.2). Hierbij worden stapsgewijs telkens equivalente dosiswaarde uit de berekening verwijderd die meer dan twee standaarddeviaties van het gemiddelde verwijderd zijn, waarna het gemiddelde en de standaarddeviatie op basis van de overgebleven rest opnieuw wordt berekend. Dit wordt herhaald totdat er geen waarden meer buiten twee standaarddeviaties vallen, waardoor een geschoonde dataset ontstaat en een betrouwbaardere paleodosis kan worden bepaald.

Overdispersie

Wanneer de spreiding van de equivalente dosiswaarden groter is dan verwacht op basis van een rekenkundig model dan wordt dat 'overdispersie' genoemd. Zo betekent een overdispersie van 37% dat de werkelijke spreiding van de meetwaarden 37% groter is dan wat het gekozen rekenkundig model voorspelt (Tabel 6.2). In de labresultaten wordt vaak een maat gegeven voor de overdispersie op basis van het Central Age Model. Enige overdispersie is normaal in luminescentiedata. Dit kan verklaard worden doordat individuele korrels elk een beetje anders reageren op de stralingsdosis (dosistempo), en dus bij een identieke begravingsleeftijd daadwerkelijk verschillende equivalente dosis hebben. Ook verschillen in luminescentie-eigenschappen tussen korrels kunnen leiden tot overdispersie.

Rekenkundige modellen zoals het Minimum Age Model hebben informatie nodig over de verwachte overdispersie. Dit kan ingeschat worden op basis van goed-gebleekte monsters uit dezelfde omgeving, of anders op basis van ervaring met soortgelijke monsters uit een andere context.

6.5 Basisrapportage

6.5.1 Hoofddeel

Het dateringsrapport bevat idealiter details over de gebruikte methoden, testuitslagen en de verkregen resultaten (zie 6.2). Alleen een opgave van leeftijden, of alleen de samenvattende waarden van equivalente dosiswaarden en dosistempo's zijn onvoldoende informatief om te kunnen beoordelen of de verkregen ouderdomsbepalingen nauwkeurig en precies zijn (zie 3.5) en dus bruikbaar zijn om de onderzoeksvragen te beantwoorden.⁸⁰

Het rapport bevat in het hoofddeel doorgaans contextuele informatie (locatie, stratigrafie, aard en context van de monsters) en een overzicht van de meta-gegevens van de ingediende monsters. Vaak gebeurt dit in tabelvorm:

- Labnummer
- Lengtegraad
- Breedtegraad
- Afzettingmilieu/context
- Lithologie/materiaalsoort
- Verzamelwijze
- Diepte (m -Mv)
- Verwachte ouderdom (ka)

In de resultatensectie worden kort de methoden en de resultaten behandeld:

- De bepaling en resulterende waarden voor het dosistempo;
- De bepaling van de equivalente dosiswaarden en de berekende/gemodelleerde resulterende waarde voor de paleodosis;
- De datering van het monster.

De belangrijkste resultaten worden in tabelvorm gepresenteerd (Tabel 6.2).

De opgegeven onzekerheid van de ouderdomsbepaling ($\pm$) representeert het 1-sigma betrouwbaarheidsinterval (68%). In die onzekerheid zijn alle systematische en toevallige onzekerheden in de bepalingen van het dosistempo en de paleodosis doorberekend. Als al deze onzekerheden goed zijn berekend of ingeschat, betekent het dat de werkelijke begravingsleeftijd met een waarschijnlijkheid van 68% overeenkomst met het gegeven interval.

⁸⁰ Specificaties voor de rapportage van luminescentiedateringen worden gegeven in Mahan et al. 2023

Tabel 6.2. Voorbeeld van een resultatentabel.

Labnr	Diepte m -mv	Paleodosis Gy	Dosistempo Gy/ka	Ouderdom Ka	Ouderdom BCE	Robuust?	Opmerkingen
L-104	1.51	3.36 ± 0.13	1.54 ± 0.05	2.18 ± 0.11	-155 ± 105	Likely OK	bsMAM, sigmab 15 ± 3%, CAM OD 36%
L-105	1.66	3.55 ± 0.40	1.42 ± 0.05	2.50 ± 0.29	-478 ± 293	Likely OK	bsMAM, sigmab 15 ± 3%, CAM OD 72%
L-106	1.31	3.58 ± 0.14	1.58 ± 0.05	2.26 ± 0.11	-238 ± 115	Questionable	Iterated mean, CAM OD 50%

MAM	Minimum age model
CAM	Central age model
bs	Bootstrapped
OD	Overdispersie
sigmb	Gebruikte maat voor de verwachte overdispersie
±	1 sigma waarschijnlijkheidsinterval (68%)

De betrouwbaarheidsindicatie (Robuust? ‘likely ok’) in tabel 6.2 is gebaseerd op de spreiding van de equivalente dosiswaarden in combinatie met de (geteste) luminescentie-eigenschappen van het materiaal en moeilijk kwantificeerbare onzekerheden in het dosistempo. Feitelijk is dit een expertinschatting of alle mogelijke fouten goed zijn meegenomen in de berekende onzekerheid.

6.5.2 Bijlagedeel: testresultaten, meetprocedure en grafieken

In het bijlagedeel van het rapport worden beknopt de resultaten van de belangrijkste tests weergegeven: de Preheat test of Thermal transfer test en de Dose Recovery test (zie 6.2.2). Testresultaten en testconclusies worden vaak in grafiekvorm weergegeven (afb. 6.3) en soms ook in een tabel en in een procedureschema (tabel 6.1).

Voor elk van de monsters worden de equivalente dosiswaarden van de submonstertjes grafisch weergegeven. Meestal is dit in een radiale grafiek waarin de spreiding in luminescentieleeftijd verkregen op submonsters wordt weergegeven. Deze leeftijd voor elk submonstertje is berekend door de equivalente dosiswaarden te delen door de jaarlijkse stralingsbelasting (dosistempo).



7 Tijd, middelen en communicatie

Het verzamelen van luminescentiemonsters kost relatief weinig tijd. Het opwerken van monsters, het meten van alle relevante luminescentie-eigenschappen en de interpretatie van de meetuitkomsten zijn echter arbeidsintensief. Het vereist gespecialiseerde expertise en apparatuur.

7.1 Tijd en geld

Het kan enkele maanden of langer duren voordat de resultaten worden gerapporteerd, afhankelijk van de capaciteit en werkvoorraad van het laboratorium. Om budgettaire en planningsproblemen te vermijden is het raadzaam om voorafgaand aan de bemonstering contact met het luminescentielab op te nemen. In onderling overleg kunnen de ideale bemonsteringsstrategie, kansen en beperkingen bepaald worden en kan de geschatte doorlooptijd worden besproken.

Prijzen zijn afhankelijk van het aantal tegelijkertijd ingezonden monsters, de wijze van samenwerken, de overheadkosten van het laboratorium, het type analyse dat wordt aangevraagd, de inspanningen van het lab om tot een betrouwbaar resultaat te komen en de (gewenste) gedetailleerdheid van de rapportage. Prijzen variëren ruwweg tussen € 700 en € 2000 per monster (2026). De tarieven dekken ook de kosten voor personeel, onderzoeksinfrastructuur en verbruiksartikelen.

7.2 Communicatie

De meeste laboratoria werken graag samen gedurende het hele proces. Vooral in de interpretatieve fase van de resultaten, en dan met name de interpretatie van de zeggingskracht van de luminescentiemetingen, is een goede samenwerking noodzakelijk. In voorkomende gevallen dragen de laboratoria bij aan wetenschappelijke of publiekspublicaties die gebaseerd zijn op de luminescentiedateringen.

7.3 Faciliteiten in Nederland

In Nederland is er één expertise- en onderzoeksfaciliteit voor luminescentiedateren: het Nederlands Centrum voor Luminescentiedatering (NCL).⁸¹ Het NCL is een samenwerking tussen universiteiten en onderzoekscentra in Nederland en is onderdeel van de Wageningen Universiteit (WUR). NCL-partners zijn de Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE), TNO – Geological Survey of the Netherlands, Deltares, Wageningen Environmental Research, Universiteit Leiden, Universiteit van Amsterdam en Universiteit Utrecht.

Het NCL beschikt over een van de best uitgeruste luminescentiedateringsfaciliteiten van Europa. Voor luminescentiemetingen zijn vijf Risø TL/OSL-readers beschikbaar. Met twee van deze apparaten kunnen luminescentiesignalen korrel voor korrel worden uitgelezen. Voor dosistempobepaling wordt gebruik gemaakt van gamma-spectrometrie of een combinatie van alpha en beta counting als weinig monstermateriaal beschikbaar is. Voor zeer kleine monsters, bijvoorbeeld van kunstvoorwerpen, wordt neutronen activiteitsanalyse gebruikt in samenwerking met de TU Delft.

Het NCL biedt een volledige service die advies omvat over dateringsstrategie en bemonstering, monstervoorbereiding, het bepalen van de meest geschikte luminescentiedateringsprocedures, meting, analyse en rapportage. Voor grotere projecten bestaat soms de mogelijkheid om deel te nemen aan het veldwerk en om ter plaatse de meest geschikte monsters te verzamelen.

Het NCL beheert een online database bij met informatie over alle door het NCL verwerkte monsters: LumiD (www.lumid.nl). De database is online doorzoekbaar en bevat ook gepubliceerde gegevens over monsters uit Nederland die zijn gedateerd door andere laboratoria. LumiD is gekoppeld aan Google Earth wat het zoeken naar monsters op een specifieke locatie of in een grotere regio vergemakkelijkt.

⁸¹ www.ncl-geochron.nl/en/nclgeochron.htm

8 Bronnen en begrippen

Meer lezen?

Bailiff, I., S. Blain, P. Graves, T. Gurling, & S. Semple, 2010. Uses and recycling of brick in medieval and Tudor English buildings: insights from the application of luminescence dating and new avenues for further research. *The Archaeological Journal* 167, 165-196.

Duller, G.A.T. 2008. Luminescence dating. Guidelines on using luminescence dating in archaeology. English Heritage, Swindon (UK), 44 pp.

Preusser, F., D. Degering, M. Fuchs, A. Hilgers, A. Kadereit, N. Klasen, M. Krbetschek, D. Richter & J.Q.G. Spencer, 2008. Luminescence dating: basics, methods and applications. *Quaternary Science Journal* 57 (1/2), 95-149.

Rhodes, E.J. 2011. Optically Stimulated Luminescence dating of sediments over the past 200,000 years. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39, 461-488.

Wallinga, J., F. Davids & J.W.A. Dijkmans, 2007. Luminescence dating of Netherlands' sediments. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw* 86, 179-196.

Wallinga, J., J. Sevink, J.M. van Mourik & T. Reimann, 2019. Luminescence dating of soil archives. Ch. 4 in: J.M. van Mourik & J.J.M. van der Meer (eds), *Reading the soil archives. Developments in Quaternary Science* 18, 115-162.

Wintle, A.G., 2008. Fifty years of luminescence dating. *Archaeometry* 50 (2), 276-312.

Afkortingen

a	annum, één jaar
bsMAM	bootstrapped minimum age model (Cunningham & Wallinga 2012)
BCE	Before common era: neutrale aanduiding voor het aantal jaar voorafgaand aan het begin van de de gangbare jaartelling
C	Koolstof
CE	Common era: neutrale aanduiding voor de gangbare jaartelling
Gy	Gray
ICP-MS	Inductief gekoppelde plasmamassaspectrometrie, een techniek die wordt gebruikt om de chemische samenstelling van materialen te analyseren
IR	InfraRood
IRSL	infrared stimulated luminescence / infrarood gestimuleerde luminescentie (veldspaat)
K	kalium
ka	kilo-annum, een tijdsperiode van duizend jaar
LED	light emitting diode / lichtdiode
Ma	mega-annum, een tijdsperiode van 1 miljoen jaar
MeV	mega-elektronvolt. 1 MeV = 1.000.000 eV (zie eV)
NAA	neutronenactiveringsanalyse, een techniek die wordt gebruikt om de chemische samenstelling van materialen te analyseren
nm	nanometer (1 miljoen nm = 1 mm)

OD	overdispersie. Maat voor spreiding in dataset die niet uit meetonzekerheden op individuele punten verklaard kan worden.
OSL	optically stimulated luminescence
pIR-IR	post-infrarood infrarood gestimuleerde luminescentie. Het stabielere deel van het infrarode luminescentiesignaal (IRSL) van veldspaat kan worden gemeten door in het lab eerst het onstabiele deel van het signaal uit te putten met een IRSL meting. Daarna wordt het stabiele signaal gemeten met een tweede IRSL meting bij verhoogde temperatuur.
ppm	parts per million (10.000 ppm = 1%)
Ra	radium
Rn	radon
SI	Système International, een internationaal erkende reeks eenheden die worden gebruikt om lengte, tijd, energie en andere maateenheden te definiëren
Th	thorium
TL	thermoluminescentie
TT-OSL	thermally transferred optically stimulated luminescence (Tamburini et al. 2022)
U	uranium
VSL	violet stimulated luminescence (Ankjaergaard ea 2015)
XRF	röntgenfluorescentie, een techniek die wordt gebruikt om de chemische samenstelling van materialen te analyseren
µm	micrometer (1.000 µm = 1 mm)

Begrippen

Aliquot (NL: portie) een klein deel van het totale monster: een submonster. Deze kan bestaan uit een individuele korrel (single grain), of tientallen (small-aliquot) tot honderden zandkorreltjes tegelijkertijd (large-aliquot). Voor silt bestaat een aliquot uit vele duizenden korrels.

Becquerel Eenheid van activiteit. Eén becquerel (1 Bq) is gelijk aan het verval van één atoom per seconde.

Bleking (Eng: bleaching) Term voor de nulstelling of het resetten van het opgebouwde luminescentiesignaal in individuele zandkorrels door blootstelling aan (zon)licht.

Coarse-grain dating maakt gebruik van fijne tot middelgrote kwarts of veldspaatkorrels met een diameter van 60-250 µm. De meest gebruikte korrelgrootte is 212-250 µm.

Dose recovery test bepaald of een in het lab gegeven dosis juist gemeten kan worden.

Dose recovery ratio Ratio tussen de gemeten en gegeven stralingsdosis in een dose recovery test. De ratio moet dicht bij 1 liggen.

Dosimetrie is de meting, berekening en beoordeling van de hoeveelheid geabsorbeerde ioniserende straling door minerale deeltjes.

Dosisresponscurve is de grafiek die op de verticale as de intensiteit van het afgegeven luminescentiesignaal (na normalisatie) en op de horizontale as de ontvangen stralingsdosis weergeeft. Dit is een exponentieel verzadigende curve, die in het lage bereik vrijwel lineair loopt maar bij hoge dosis afvlakt.

Dosistempo (Engels: 'dose rate') is de hoeveelheid straling (dosis) die per tijdseenheid door een mineraal deeltje wordt geabsorbeerd. Dit wordt ook wel de stralingsbelasting genoemd. Meestal wordt het dosistempo uitgedrukt in Gray per duizend jaar (Gy/ka)

Energieniveaus Elke schil rondom de atoomkern heeft een ander energieniveau: hoe verder van de kern, hoe hoger het energieniveau.

Equivalente dosis De hoeveelheid kunstmatige straling (stralingsdosis) die nodig is om een luminescentiesignaal in het korreltje te produceren (regenereren) dat qua sterkte/intensiteit gelijk is (equivalent) aan het gemeten natuurlijke luminescentiesignaal. De equivalente dosis (De) wordt uitgedrukt in Gray (Gy), waarbij $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$.

Anomalous Fading beschrijft het fenomeen dat ingevangen elektronen in veldspaat kunnen ontsnappen zonder stimulatie ('tunnelen'). Dit fenomeen kan leiden tot onderschatting van de begravingsleeftijd, tenzij het wordt ontweken (pIR-IRSL) of een correctie wordt doorgevoerd.

Fine-grain dating maakt gebruik van kleine slibkorrels met een diameter van $4\text{--}11 \mu\text{m}$. Kan uitgevoerd worden op polyminerale (kwarts en veldspaat) monsters of op kwarts.

Gray (Gy) De Gray is de SI-eenheid van de hoeveelheid geabsorbeerde ioniserende straling. Een Gray is gelijk aan de absorptie van een joule stralingsenergie door een kilogram materie ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$).

Heterogeneous bleaching beschrijft dat niet alle korrels voldoende licht hebben gezien om het luminescentiesignaal geheel op nul te stellen. Dit leidt tot overdispersie in de equivalent dose verdeling

Ionisatie is het proces waarbij een atoom of kristal uit ongeladen toestand een elektron kwijtraakt of er een bijkrijgt, waardoor het verandert in een geladen deeltje, ook wel ion genoemd. Ionisatie is geen spontaan proces: er is stralingsenergie voor nodig, die ook wel excitatie-energie wordt genoemd.

Ioniserende straling is straling die voldoende energetisch is om een elektron uit de buitenste schil van een atoom weg te slaan. Hierdoor krijgt het atoom in totaal een positieve lading in plaats van een neutrale lading, het atoom wordt geïoniseerd, en wordt een ion.

Luminescentieleeftijd Tijd sinds de laatste blootstelling van een monster aan licht of hoge hitte. Berekend door de equivalente dosiswaarde De (Gy) te delen door de paleodosis $\dot{D}$ (Gy/ka). Uitgedrukt in a (annum) of ka (1000 jaar). De leeftijd wordt uitgedrukt ten opzichte van de datum van monsterafname, niet yr BP. Before Present (BP) is gedefinieerd als 1950 en wordt alleen gebruikt voor radiokoolstofdatering. Luminescentieleeftijden en gecalibreerde ^{14}C -dateringen kunnen pas gecombineerd worden als dezelfde referentie wordt gebruikt (bijv. kalenderjaren: BCE/CE).

Luminescentie Het (licht)signaal dat ontstaat door het vrijkomen van een foton nadat een elektron recombineert met een gat. De intensiteit is recht evenredig met het aantal ingesloten elektronen.

Multi-grain dating Meerdere gezuiverde korrels worden gemeten met behulp van kleine of grote aliquots. Per aliquot worden individuele equivalente dosiswaarden verkregen.

OSL Optisch gestimuleerde luminescentie (blauwe of groene stimulatie), gebruikt voor het dateren van kwarts.

Overdispersie Maat voor het aantal uitschieters in de spreiding in datasets die niet uit meetonzekerheden van individuele punten verklaard kan worden. Een grote overdispersie kan duiden op slechte bleiking of postdepositionele menging.

Paleodosis Dit is de beste schatting van de werkelijke begravingsdosis van een monster. De paleodosis wordt verkregen door (statistische) interpretatie van de equivalent dose verdeling. De paleodosis wordt uitgedrukt in Grays (Gy), waarbij $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$.

Partial bleaching Onvolledig resetten van een eerder luminescentiesignaal

vanwege onvoldoende lichtblootstelling of blootstelling aan hitte.

Post-depositie Stratigrafische verplaatsing van korrels in de bodem door verstoring na afzetting (bijv. bodemprocessen, bioturbatie, en cryoturbatie door vorst(in)werking).

Post-IR IRSL Infrarood gestimuleerde luminescentie (IRSL) van veldspaat bij een verhoogde temperatuur na infrarood (IR) stimulatie, ook wel aangeduid als pIRIR..

Preheat test wordt uitgevoerd om een passende thermische voorbehandeling voorafgaand aan de luminescentiemeting te bepalen.

Kosmische straling Hoogenergetische straling (protonen en andere geladen deeltjes) van buiten de aarde die voor het grootste deel door de atmosfeer worden tegengehouden.

Regeneratieve dosis is een stralingsdosis gegeven in het lab om een luminescentiesignaal in het korreltje te produceren (regenereren). Door de luminescentierespons te meten voor meerdere regeneratieve doses wordt een dose response curve gegenereerd.

SAR-protocol (SAR: Single Aliquot regenerative dose). Procedure ontwikkeld door Murray en Wintle (2000). Eerst wordt het natuurlijke luminescentiesignaal gemeten en vervolgens vergeleken met opnieuw opgewekte luminescentiesignalen in hetzelfde korreltje (monstertje) om te bepalen welke stralingsdosis nodig is om een even helder signaal te induceren. Luminescentiegevoeligheid wordt tijdens dit proces gemonitord en gecorrigeerd.

Sensitivity Luminescentie-intensiteit per massa-eenheid per stralingsdosis, die vaak verband houdt met de brongeologie en sedimentgeschiedenis.

Sigma Statistische maat die aangeeft hoeveel de waarden in een dataset gemiddeld afwijken van het gemiddelde. Veel gebruikt is het 1-sigma interval waarbinnen 68% van de waarden vallen en het 2-sigma interval waarbinnen 95% van de waarden vallen.

Silicium dioxide (SiO_2) is de meest voorkomende verbinding in de aardkorst. Meestal is het aanwezig als gewoon zand, maar het kan ook de vorm aannemen van kwarts, rotskristal, amethyst, agaat, flint, jasper en opaal.

Single-aliquot dating Methoden waarbij voor elk gemeten aliquot een equivalente dosiswaarde wordt berekend.

Single-grain dating Een laser wordt gebruikt om één korrel tegelijk te beschijnen om een equivalente dosiswaarde per individuele korrel te berekenen. Vaak uitgevoerd op fijnkorrelig zand met een diameter van 150-250 μm .

Statistische modelleren wordt gebruikt om representatieve equivalente dosiswaarden(n) te berekenen van een goed gebleekte, gedeeltelijk gebleekte of multimodale populatie van individuele enkelkorrelige of kleine aliquots equivalente dosiswaarden. Veelgebruikte modellen zijn onder meer het minimumleeftijdmodel (MAM), het centrale leeftijdsmodel (CAM), het 'finite mixture' model (FMM) (Galbraith & Roberts, 2012) en het gemiddelde dosismodel (Guerin et al., 2017). Grafische weergaven van gegevens en modellen: Radiale plot, abanico-plot, kerneldichtheidsplot, histogram en kansdichtheidsfunctie.

Terrestrische straling Straling afkomstig van natuurlijke radioactieve stoffen in de bodem.

Thermal transfer beschrijft het fenomeen dat door verhitting van mineralen ingevangen elektronen kan verplaatsen van een niet-lichtgevoelige val naar een lichtgevoelige val.

TL Thermoluminescentie, dateringsmethode die hitte gebruikt als stimulatiebron om elektronen uit hun verhoogde energiebanen vrij te maken.

Vervalreeks Opeenvolgende vervalreacties van radioactieve isotopen tot een stabiel element.

Bronnen

- Ageby, L., J. Shanmugavel, M. Jain, A.S. Murray & E.F. Rades, 2024. Towards the optically stimulated luminescence dating of unheated flint. *Quaternary Geochronology* 79, 101471. doi: 10.1016/j.quageo.2023.101471.
- Aitken, M. J., D.W. Zimmerman & S.J. Fleming, 1968. Thermoluminescent dating of ancient pottery. *Nature* 219, 442–445. doi:10.1038/219442a0
- Aitken, M. J., M.S. Tite & J. Reid, 1964. Thermoluminescent dating of ancient ceramics. *Nature* 202, 1032–1033. doi:10.1038/2021032b0
- Aitken, M.J., 1989. Luminescence dating: a guide for non-specialists. *Archaeometry* 31 (2), 147-159. doi: 10.1111/j.1475-4754.1989.tb01010.x
- Aitken, M.J., 1998. An introduction to optical dating: The dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence: Oxford, University Press, 267 pp.
- Ankjaergaard, C., Guralnik, B., Porat, N., Heimann, A., Jain, M., & Wallinga, J., 2015. Violet stimulated luminescence: geo- or thermochronometer? *Radiation Measurements*, 81, 78-84. doi: 10.1016/j.radmeas.2015.01.011
- Anscher, T.J. ten, 2012. Leven met de Vecht: Schokland-P14 en de Noordoostpolder in het neolithicum en de bronstijd. PhD-thesis Universiteit van Amsterdam, 706 pp.
- Armitage, S.J. & G.E. King, 2013. Optically stimulated luminescence dating of hearths from the Fazzan Basin, Libya: a tool for determining the timing and pattern of Holocene occupation of the Sahara. *Quaternary Geochronology* 15, 88-97. doi: 10.1016/j.quageo.2012.10.002.
- Arnoldussen, S., 2018. The fields that outlived the Celts: The usehistories of later prehistoric field systems (Celtic fields or raatakkers) in the Netherlands. *Proceedings of the Prehistoric Society* 84, 303–327. doi: 10.1017/ppr.2018.5, 2018.
- Bailiff, I., S. Blain, P. Graves, T. Gurling, & S. Semple, 2010. Uses and recycling of brick in medieval and Tudor English buildings: insights from the application of luminescence dating and new avenues for further research. *The Archaeological Journal* 167, 165-196. doi: 10.1080/00665983.2010.11020796.
- Bailiff, I.K., 2007. Methodological developments in the luminescence dating of brick from English latemedieval and post-medieval buildings. *Archaeometry* 49, 827-851. doi: 10.1111/j.1475-4754.2007.00338.x
- Bailiff, I.K., 2007. Methodological developments in the luminescence dating of brick from English late-medieval and post-medieval buildings. *Archaeometry* 49, 827–851. doi:10.1111/j.1475-4754.2007.00338.x
- Bailiff, I.K., S. Blain, P. Graves, T. Gurling & S. Semple, 2010. Uses and recycling of brick in medieval and Tudor English buildings: insights from the application of luminescence dating and new avenues for further research. *The Archaeological Journal* 167, 165-196. doi: 10.1080/00665983.2010.11020796.
- Ballarini, M., J. Wallinga, A.G. Wintle & A.J.J. Bos, 2007. A modified SAR protocol for optical dating of individual grains from young quartz samples. *Radiation measurements* 42 (3), 360-369. doi: 10.1016/j.radmeas.2006.12.016
- Ballarini, M., J. Wallinga, A.S. Murray, S. van Heteren, A.P. Oost, A.J.J. Bos & C.W.E. van Eijk, 2003. Optical dating of young coastal dunes on a decadal time scale. *Quaternary Science Reviews* 22, 1011–1017. doi:10.1016/S0277-3791(03)00043-X

- Barnett, S.M., 2000. Luminescence dating of pottery from later prehistoric Britain. *Archaeometry* 42 (2), 431-457. doi: 10.1111/j.1475-4754.2000.tb00892.x
- Bateman, M.D., Ch.D. Frederick, M.K. Jaiswal & A.K. Singhvi, 2003. Investigations into the potential effects of pedoturbation on luminescence dating. *Quaternary Science Reviews* 22, 1169-1176.
- Beek, R. van, L. Chamberlain, K. de Nooijer, S. Gerritsen, M. Bartels & J. J Wallinga, 2025. Dating earthworks with luminescence: Insights from the medieval ringfort of Den Burg, Texel (the Netherlands). *Quaternary Geochronology* 88, 101669. doi: 10.1016/j.quageo.2025.101669.
- Bloo, S.B.C., F.S. Zuidhoff, J. Wallinga & C.A. Johns, 2008. Dating a pot beaker and the surrounding landscape using OSL dating. *British Archaeological Reports S1861/Prehistoric Ceramics Research Group Occasional Paper* 6, 117-123.
- Boer A., N. Panno, S.G. Pearson, T.J. Kooistra, B. Prooijen & J. Wallinga, 2026. Resetting of quartz and feldspar luminescence signals under water. *Scientific Reports*. doi: 10.1038/s41598-026-44245-6
- Bokhorst, M.P., G.A.T. Duller & J.M. Van Mourik, 2005. Optical dating of a Fimic Anthrosol in the southern Netherlands. *Journal of Archaeological Sciences*, 32, 547-553. doi: 10.1016/j.jas.2003.11.011, 2005.
- Boterman, L., J.H.J. Candel, B. Makaske & J. Wallinga, 2024. Late-Holocene counterpoint deposition in the Lower Rhine River. *Sedimentology* 71, 1457-1476.
- Bøtter-Jensen, L., S.W.S. McKeever & A.G. Wintle, 2003. *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry*. Elsevier, Amsterdam, 356 pp. doi: 10.1016/B978-0-444-50684-9.50096-9
- Busschers, F.S., H.J.T. Weerts, J. Wallinga, et al. 2005. Sedimentary architecture and optical dating of Middle and Late Pleistocene Rhine-Meuse deposits. Fluvial response to climate change, sea-level fluctuation and glaciation. *Netherlands Journal of Geosciences* 84 (1), 25-41. doi: 10.1017/S0016774600022885
- Choi, J., R. van Beek, E.L. Chamberlain, T. Reimann, H. Smeenge, A. van Oorschot & J. Wallinga, 2024. Luminescence dating approaches to reconstruct the formation of plaggic anthrosols. *Soil* 10, 567-586. doi: 10.5194/soil-10-567-2024
- Choi, J., R. van Beek, E.L. Chamberlain & J. Wallinga, 2026. Dating Celtic fields with luminescence. *Journal of Archaeological Science* 189, e106536. doi: 10.1016/j.jas.2026.106536
- Crew, H.L., 1976. The Mousterian site of Rosh Ein Mor. In: A.E. Marks (ed.), *prehistory and paleoenvironments in the Central Negev, Israel, vol. I, The Avdat/Aqev Area, Part 1*. Southern Methodist University Press, Dallas, 75-111.
- Cunningham, A.C. & J. Wallinga, 2012. Realizing the potential of fluvial archives using robust OSL chronologies. *Quaternary Geochronology* 12, 98-106.
- Cunningham, A.C., J.P. Buylaert & A.S. Murray, 2022. Attenuation of beta radiation in granular matrices: implications for trapped-charge dating. *Geochronology* 4(2), 517-531.
- Cunningham, A.C. & J. Wallinga, 2010. Selection of integration time intervals for quartz OSL decay curves. *Quaternary Geochronology* 5 (6), 657-666. doi: 10.1016/j.quageo.2010.08.004
- Debonne, V., I.K. Bailiff, S. Blain, S. Ech-Chakrouni, J. Hus, M. van Strydonck & K. Haneca, 2015. Wase baksteen gedateerd. *Natuurwetenschappelijk dateringsonderzoek in de Sint-Andreas- en Sint-Gislenuskerk in Belsele (Sint-Niklaas)*. *Relicta* 12, 181-218. doi: 10.55465/RSNL6589

- Dietze, M, S. Kreutzer, Ch. Burow, M.C. Fuchs, M. Fischer & Ch. Schmidt, 2016. The abanico plot: Visualising chronometric data with individual standard errors. *Quaternary Geochronology* 31, 12-18. doi: 10.1016/j.quageo.2015.09.003
- Duller, G.A.T. & H.M. Roberts, 2018. Seeing snails in a new Light. *Elements* 14 (1), 39–43. doi: 10.2138/gselements.14.1.39
- Duller, G.A.T., 2008. Luminescence dating. Guidelines on using luminescence dating in archaeology. English Heritage, Swindon (UK), 44 pp.
- Duller, G.A.T., 2003. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements. *Radiation Measurements* 37 (2), 161-165.
- Duller, G.A.T., L. Bøtter-Jensen & A.S. Murray, 2000. Optical dating of single sand-sized grains of quartz: sources of variability. *Radiation Measurements* 32, 453–457.
- Feathers, J.K., 2003. Use of luminescence dating in archaeology. *Measurement Science and Technology* 14, 1493.
- Feiken, H. & M.van der Heiden (red), 2024. Oude koeien uit de sloot. Proefputtenonderzoek in 2021 in de Lionserpolder (gemeente Leeuwarden). Rapportage Archeologische Monumentenzorg 285. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort, 232 pp.
- Galbraith, R. F., 1990. The radial plot: graphical assessment of spread in ages. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 17 (3), 207-214.
- Galbraith, R.F. & R.G. Roberts, 2012. Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. *Quaternary Geochronology* 11, 1-27. doi:10.1016/j.quageo.2012.04.020
- Galbraith, R.F., 1988. Graphical display of estimates having differing standard errors. *Technometrics* 30(3), 271–281. doi: 10.1080/00401706.1988.10488400
- Galbraith, R.F., R.G. Roberts, G.M. Laslett, H. Yoshida & J.M. Olley, 1999. Optical dating of single grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia. Part I: experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41 (2), 339-364. doi: 10.1111/j.1475-4754.1999.tb00987.x
- Gautier, A., 2001. Luminescence dating of archaeometallurgical slag: use of the SAR technique for determination of the burial dose. *Quaternary Science Reviews* 20, 973–980. doi:10.1016/S0277-3791(00)00010-X
- Godfrey-Smith, D. I., Huntley, D. J. & Chen, W. H. 1988. Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts. *Quaternary Science Reviews* 7, 373–380.
- Goedicke, C., K. Slusallek & M. Kubelik, 1981. Thermoluminescence dating in architectural history: Venetian villas. *Journal of the society of Architectural Historians* XL, 203-217.
- Gray, H. J., S.A. Mahan, T. Rittenour & M.S. Nelson, 2015. Guide to luminescence dating techniques and their application for paleoseismic research, in: proceedings of the Basin and Range Province seismic hazards summit III, Salt Lake city, january 2015. Invited paper, 19 pp. Utah Geological Survey and Western States Seismic Policy Council.
- Gray, H., G. Tucker, G., S. Mahan, C. McGuire, & E. Rhodes, 2017. On extracting sediment transport information from measurements of luminescence in river sediment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122, 654-677
- Groot. T. de & J-M.A.W. Morel (red), 2007. Een Romeinse Rijnaak, gevonden in Utrecht-De Meern: resultaten van het onderzoek naar de platbodem 'De Meern 1'. Rapportage Archeologische Monumentenzorg 144. Rijksdienst voor Archeologie, Cultuurlandschap en Monumenten, Amersfoort, 470 pp.

- Gurling, T., 2009. Luminescence dating of Medieval and Early Modern brickwork. Academisch proefschrift, Durham University, Durham.
- Guyez, A., S. Bonnet, S. Carretier, C. Wilkinson, T. Reimann, K. Norton & J. Wallinga, 2024. Using single-grain feldspar luminescence signal and modelling to study landscapes erosion rates and sediment transport, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-15791, doi: 10.5194/egusphere-egu24-15791
- He, Z., J. Zhou, Z. Lai, L. Yang, J. Liang, H. Long & X. Ou, 2010. Quartz OSL dating of sand dunes of Late Pleistocene in the Mu Us Desert in northern China. *Quaternary Geochronology* 5 (2-3), 102-106. Doi: 10.1016/j.quageo.2009.02.011
- Heijmans, S., 2025. Podcast: het verhaal van de schaal. NTR 26 mei 2025. <https://npo.nl/luister/podcasts/1294-het-verhaal-van-de-schaal/124931>
- Hirsch, F., A. Schneider, A. Bauriegel, A. Raab & T. Raab, 2018. Formation, classification, and properties of soils at two relict charcoal hearth sites in Brandenburg, Germany. *Frontiers in Environmental Science* 6, article 94. doi: 10.3389/fenvs.2018.00094
- Huang, C., J. Zhang, L. Wang, H. Zhao & S-H. Li, 2022. Equivalent dose estimation of calcite using isothermal thermoluminescence signals, *Quaternary Geochronology* 70, 101310, doi: 10.1016/j.quageo.2022.101310
- Huang, Ch., R. van Beek, E.L. Chamberlain, J. Moree, F. Cruz, P. Laloo, E. & J. Wallinga, 2026. Dating dikes with luminescence. *Journal of Archaeological Science* 187, 106500. doi: [org/10.1016/j.jas.2026.106500](https://doi.org/10.1016/j.jas.2026.106500)
- Huntley, D.J., 1985. On the zeroing of the thermoluminescence of sediments. *Physics and Chemistry of Minerals* 12, 122–127.
- Huntley, D.J., D.I. Godfrey-Smith & M.L.W. Thewalt, 1985. Optical dating of sediments, *Nature* 313, 105–107. doi: 10.1038/313105a0
- Ishii, Y., 2024. IRSL and post-IR IRSL dating of multi-grains, single grains, and cobble surfaces to constrain fluvial responses to climate changes during the last glacial period in the Tokachi Plain, northern Japan. *Quaternary Geochronology* 79, 101486. doi: 10.1016/j.quageo.2023.101486
- Karimi Moayed, N., D.A.G. Vandenberghe, A. Verbrugge, S. Ech-Chakrouni, W. de Clercq & J. de Grave, 2023. Dating (early) modern hearths on a decadal to multi-annual timescale using OSL signals from heated sedimentary quartz. *Journal of Archaeological Science* 159, 105858. doi: 10.1016/j.jas.2023.105858
- Karimi Moayed, N., D.A.G. Vandenberghe & K. Deforce et al., 2020. Bypassing the Suess-Effect: Age determination of charcoal kiln remains using OSL dating. *Journal of Archaeological Science* 120 (August): 105176. doi: 10.1016/j.jas.2020.105176
- Karimi-Moayed, N., 2023. Testing the potential of OSL dating for application to heated anthropogenic sediments (hearth and charcoal kiln remains). PhD- thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 204 pp.
- Kars, R.H., F.S. Busschers & J. Wallinga, 2012. Validating post-IR IRSL dating on K-feldspars through comparison with quartz OSL ages. *Quaternary Geochronology* 12, 74-86. doi: 10.1016/j.quageo.2012.05.001
- Kars, R.H., 2014. Luminescence at the end of the tunnelling. Investigating charge transfer mechanisms and luminescence dating methods for feldspar minerals. PhD thesis, Technische Universiteit Delft.
- Lanen, R. J. van, 2017. Changing ways. Patterns of connectivity, habitation and persistence in Northwest European lowlands during the first millennium AD. PhD thesis, Universiteit Utrecht.

- Liritzis, I., Jin, Z., Fan, A., Sideris, A., and Drivaliari, A., 2016. Late helladic and later reuse phases of kastroli settlement (Greece): Preliminary dating results. doi:10.5281/ZENODO.163775
- Mahan, S.A., T.M. Rittenour, M.S. Nelson et al., 2022. Guide for Interpreting and Reporting Luminescence Dating Results. GSA Bulletin, ahead of print, September 29. doi: 10.1130/B36404.1
- Mourik, J.M. van, A.C. Seijmonsbergen, R. Slotboom & J. Wallinga, 2012. Impact of human land use on soils and landforms in cultural landscapes on aeolian sandy substrates (Maashorst, SE-Netherlands). *Quaternary International* 265, 74–89. doi: 10.1016/j.quaint.2011.06.053
- Mourik, J.M. van, R.T. Slotboom & J. Wallinga, 2011. Chronology of plaggic deposits; palynology, radiocarbon and optically stimulated luminescence dating of the Posteles (NE-Netherlands). *CATENA* 84, 54–60. doi: 10.1016/j.catena.2010.09.006
- Murari, K., S. Kreutzer, G. King, M. Frouin, S. Tsukamoto, C. Schmidt, T. Lauer, N. Klasen, D. Richter, J. Friedrich, N. Mercier & M. Fuchs, 2021. Infrared radiofluorescence (IR-RF) dating: a review. *Quaternary Geochronology* 64, 101155. doi: 10.1016/j.quageo.2021.101155
- Murray, A.S., & J.M. Olley, 2002. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review. *Geochronometria* 21, 1-16.
- Murray, A.S. & A.G. Wintle, 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability. *Radiation Measurements* 37 (4–5), 377–381. doi: 10.1016/S1350-4487(03)00053-2
- Murray, A.S. & A.G. Wintle, 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.
- Nelson, M.S., H. J. Gray, J.A. Johnson, T.M. Rittenour, J.K. Feathers & S.A. Mahan, 2015. User guide for luminescence sampling in archaeological and geological contexts. *Advances in Archaeological Practice* 3 (2), 166–177. doi: 10.7183/2326-3768.3.2.166
- Nelson, M., T. Rittenour & H. Cornachione, 2019. Sampling methods for luminescence dating of subsurface deposits from cores. *Methods and Protocols* 2 (4), 88. doi: 10.3390/mps2040088
- Oude Boerrigter, P., N. Winder & F. de Walle, 1990. Radioactieve straling uit de Nederlandse bodem. Technische commissie bodembescherming, TNO-SCMO, Delft, 62 pp.
- Peeters, H., 2000. Een verhitte discussie over vuursteen, of een discussie over verhitte vuursteen? Enkele opmerkingen over de intentionele en accidentele verhitting van vuursteen. *Archeologie* 10 (2000/2001), 169-176.
- Prescott, J. R. & J.T. Hutton, 1994. Cosmic-ray contributions to dose-rates for luminescence and ESR dating - Large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements* 23 (2-3), 497-500.
- Preusser, F., D. Degering, M. Fuchs, A. Hilgers, A. Kadereit, N. Klasen, M. Krbetschek, D. Richter & J.Q.G. Spencer, 2008. Luminescence dating: basics, methods and applications. *Quaternary Science Journal* 57 (1/2), 95-149. doi: 10.3285/eg.57.1-2.5
- Richter, D. & M.R. Krbetschek, 2006. A new thermoluminescence dating technique for heated flint. *Archaeometry* 48, 695–705
- Richter, D., 2007. Advantages and limitations of thermoluminescence dating of heated flint from paleolithic sites. *Geoarchaeology* 22 (6), 671–683. doi: 10.1002/gea.20180
- Richter, D., Grün, R., Joannes-Boyau, R., Steele, T. E., Amani, F., Rué, M., et al., 2017. The age of the hominin fossils from jebel irhoud, Morocco, and the origins of the middle stone age. *Nature* 546, 293–296. doi:10.1038/nature22335

- Riediesel, S., 2018. How glowing sediment can help to decipher the Earth's past climate. Blog EGU Blogs (blogs.egu.eu/divisions/cl/2018/09/03/how-glowing-sediment-can-help-to-decipher-the-earths-past-climate, september 3, 2018).
- Rink, W.J., D. Richter, H.P. Schwarz, A.E. Marks, K. Monigal & D. Kaufman, 2003. Age of the Middle Palaeolithic site of Rosh Ein Mor, Central Negev, Israel: Implications for the age range of the Early Levantine Mousterian of the Levantine corridor. *Journal of Archaeological Science* 30, 195–204.
- Rink, W.J., J.S. Dunbar, W.R. Tschinkel, Ch. Kwapich, A. Repp, W. Stanton & D.K. Thulman, 2013. Subterranean transport and deposition of quartz by ants in sandy sites relevant to age overestimation in optical luminescence dating. *Journal of Archaeological Science* 40, 2217–2226.
- Rittenour, T.M., 2008. Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, palaeoseismic and archaeological research. *Boreas* 37, 613–635.
- Rittenour, T.M., 2018. Dates and rates of earth- surface processes revealed using luminescence dating. *Elements* 14 (1), 21–26.
- Roberts, R.G., 1997. Luminescence dating in archaeology: from origins to optical. *Radiation Measurements* 27 (5–6), 819–892. doi: 10.1016/S1350-4487(97)00221-7
- Roekel, A. van, 2014. Overspannen elektron vertelt het verhaal van een zandkorrel. Nemo Kennislink (<https://www.nemokennislink.nl/publicaties/overspannen-elektron-vertelt-het-verhaal-van-een-zandkorrel>, geraadpleegd juni 2025).
- Sanjurjo-S.J., R. Blanco-Rotea, M.V. García Quintela & C.L. Burbidge., 2020. OSL dating of earthen mortars from a medieval building in north-western Spain: Crypt of Basilica da Ascensão (Allariz, Ourense). *Radiocarbon* 62, 679–692.
- Schmidt, C. & S. Kreutzer, 2013. Optically stimulated luminescence of amorphous/ microcrystalline SiO₂ (silex): basic investigations and potential in archeological dosimetry. *Quaternary Geochronology* 15, 1–10.
- Scholtte Lubberink, H.B.G., H. Smeenge & D. Spiekhout, 2018. 'Een soodanigh heerensaal...dat nu oock gantschelijck verwildert en verdestrueert is'. De Hunenborg te Volthe; gemeente Dinkelland; nieuw archeologisch onderzoek. RAAP-rapport 3377. RAAP archeologisch adviesbureau, Weesp
- Schut, P.A.C., 2005. De aardwerken van Groesbeek: een aquaduct voor de Romeinse legioensvesting van Nijmegen? Rapportage Archeologische Monumentenzorg 119. Rijksdienst voor het Oudheidkundig Bodemonderzoek, Amersfoort.
- Smetsters, R.C.G.M. & P.D.B.M. Bekhuis, 2021. Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland. RIVM-rapport 2021-0032. doi: 10.21945/RIVM-2021-0032
- Timar-Gabor, A., S. Vasiliniuc, D. Vandenberghe, C. Cosma & A.G. Wintle, 2012. Investigations on the reliability of SAR-OSL equivalent doses obtained for quartz samples displaying dose response curves with more than one component. *Radiation Measurements*. 47. 740–745. doi:10.1016/j.radmeas.2011.12.001
- Tolksdorf, J.F. & K. Kaiser. 2012. Holocene aeolian dynamics in the European sandbelt as indicated by geochronological data. *Boreas* 41: 408–421
- Truelsen, J.L. & J. Wallinga, 2003. Zeroing of the OSL signal as a function of grain size: investigating bleaching and thermal transfer for a young fluvial sample. *Geochronometria* 22, 1–8.
- Urbanová, P., E. Boaretto & G. Artioli, 2020. The state-of-the-art of dating techniques applied to ancient mortars and binders: a review. *Radiocarbon* 62(3), 503–525.
- Urbanová, P., L. Panzeri, J. Sanjurjo-Sánchez, M. Martini, F. Maspero, P. Guibert & A. Galli, 2024. Optically stimulated luminescence (OSL) mortar dating Inter-comparison study. The second

- round of MODIS: Mortar Dating Inter-comparison Study. *Radiocarbon*, Vol 66, Nr 6, 2024, p 1788–1800. DOI:10.1017/RDC.2023.124
- Valladas, H., 1992. Thermoluminescence dating of flint. *Quaternary Science Reviews* 11, 1-5.
- Vandenbergh, D., F. De Corte, J.-P. Buylaert & J. Kučera, 2008. On the internal radioactivity in quartz. *Radiation Measurements* 43 (2), 771-775.
- Vermeesch, P., 2009. RadialPlotter: a Java application for fission track, luminescence and other radial plots, *Radiation Measurements*, 44 (4), pp. 409-410. doi: 10.1016/j.radmeas.2009.05.003
- Vletter, W. & S. Schloen, 2017. Creating a chronological model for historical roads and paths extracted from airborne laser scanning data, in: M. Forte & S. Campana (eds), *Digital Methods and Remotes Sensing in Archaeology. Archaeology in the age of sensing*, (Cham, Switzerland), 405–435.
- Vletter, W. & T. Spek, 2021. Archaeological features and absolute dating of historical road tracks in the North-western European Sand Belt. An interdisciplinary case study of a late medieval and early modern trade route at the Hoge Veluwe National Park (Central Netherlands). *Landscape History* 42(2), 5-21.
- Vries, D.J. de, 2000. Vergelijkend natuurwetenschappelijk dateringsonderzoek. *Bulletin KNOB*, 99(3), 74–84.
- Wallinga, J. & A.C. Cunningham, 2015. Luminescence dating, uncertainties and age range. *Encyclopedia of scientific dating methods*, 440-445.
- Wallinga, J. & J. van der Staay, 1999. Sampling in waterlogged sands with a simple hand-operated corer. *Ancient TL* 17(2), 59-61. doi: 10.26034/la.atl.1999.309
- Wallinga, J. 2002. Optically stimulated luminescence dating of fluvial deposits: a review. *Boreas* 31, 303–322.
- Wallinga, J. 2005. NOaA hoofdstuk 5. Luminescentiedatering. *Nationale Onderzoeksagenda Archeologie 1.0*. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. www.cultureelerfgoed.nl/publicaties/publicaties/2006/01/01/nationale-onderzoeksagenda-archeologie-1.0.
- Wallinga, J., C.A. Johns, J. Nollen & N. Arts, 2009. Baksteen schijnt licht op bouwhistorie Catharinakerk. *Vakblad keramiek, glas en minerale materialen (KGK-magazine)* 30 (1), 14-16.
- Wallinga, J., F. Davids & J. Dijkmans, 2007. Luminescence dating of Netherlands' sediments. *Netherlands Journal of Geosciences--Geologie en Mijnbouw* 86 (3), 179-196.
- Wallinga, J., J. Sevink, J. van Mourik & T. Reimann, 2019. Luminescence dating of soil archives, in: J. van Mourik & J. van der Meer (eds), 'reading the soil archives: unraveling the geoecological code of palaeosols and sediment cores'. *Developments in quaternary science*, Elsevier, Amsterdam, 115–162. doi: 10.1016/B978-0-444-64108-3.00004-5
- Wang, Ch-X, X. Ji, Y. Wu, Z. Ji, Y. Zhang, M. Chen, N. Wang & A. Fan, 2022. Quartz OSL and TL dating of pottery, burnt clay, and sediment from Beicun archaeological site, China. *Quaternary Geochronology* 70, 101281. doi: 10.1016/j.quageo.2022.101281
- Willemse, N.W., 2021. *Hydrologie en archeologie. Basiskennis over bodemwater en bodemar-chief*. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, Amersfoort, 24 pp.
- Wintle, A. G. & Murray, A.S., 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. *Radiation Measurements* 41 (4), 369–391. doi:10.1016/j.radmeas.2005.11.001
- Wintle, A.G., 1973. Anomalous fading of thermo-luminescence in mineral samples. *Nature* 245, 143-144. doi: 10.1038/245143a0

- Wintle, A.G. 2008. Fifty years of luminescence dating. *Archaeometry* 50, 276–312. doi: 10.1111/j.1475-4754.2008.00392.x
- Wintle, A.G., 1997. Luminescence dating: laboratory procedures and protocols. *Radiation Measurements* 27 (5/6): 769–817.
- Wintle, A.G., 2014. Luminescence dating methods. 14.2 in: *Treatise on Geochemistry* 14, 17-35. doi.org: 10.1016/B978-0-08-095975-7.01203-1
- Yu, L., P. An, & Z. Lai, 2016. Different implications of osl and radiocarbon ages in archaeological sites in the Qaidam Basin, Qinghai-Tibetan Plateau. *Geochronometria* 43, 188–200. doi: 10.1515/geochr-2015-0048
- Zander, A., D. Strebler, E. Classen, J. Rethemeyer & H. Brückner, 2019. Roman traces in Germania Magna: New thermoluminescence and pIRIR 290 data from a lime kiln at Bergisch Gladbach, Germany. *Archaeometry* 61, 506–518. doi:10.1111/arcm.12435

Beeldverantwoording

Foto's en illustraties: RAAP archeologisch adviesbureau en Nederlands Centrum voor Luminescentiedatering, tenzij anders vermeld. Foto's pag. 8: CC BY-SA, foto: S. Sepp; pag. 11: creator: N. Willemse; pag. 17: CC BY-SA, foto: Institute Nanoscience; pag. 15: Risø National Laboratory; pag. 29: NCL-project 7623; pag. 57: O. Odé; pag. 69: G. Ackermans; pag. 70 : G. Ackermans; pag. 81: O. Odé

Colofon

TITEL

Handleiding luminescentiedateren in de archeologie

AUTEURS

Nico W. Willemse, Fennie Berghuis (RAAP), Jakob Wallinga & Roy van Beek (WUR)

JAAR VAN UITGAVE

2026

ISBN

978-90-5372-119-3

OMSLAG

OSL monstername in een profielput

VORMGEVING

NWO/O. Odé en N.W. Willemse (RAAP)

INSPIRATIE

'Guidelines on using luminescence dating in archaeology' (Duller 2008); 'User guide for luminescence sampling in archaeological and geological contexts' (Nelson et al. 2015); 'Nationale Onderzoeksagenda Archeologie: Luminescentiedatering' (Wallinga 2005).

EARTHWORK

Deze handleiding is onderdeel het EARTHWORK project binnen het programma 'Archeologie telt'. Dit thematische programma van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA) is gericht op onderzoek waarbij innovatieve methoden en technieken worden ingezet voor vragen die in de archeologie centraal staan en dat bijdraagt aan het ontwikkelen van een kennisketenbrede duurzame onderzoeksinfrastructuur.

© Nederlands Centrum voor Luminescentiedatering (NCL)



