



AFBEELDING 1. | Vulkanische aslaagjes
in door landijs geplooid sediment op het
Deense eiland Mors. Foto: Ben Flokstra,
NGV Afdeling Utrecht/Gooi.

Tefrostratigrafie

WILLEM M.L. SCHUURMAN
VLINDREEF 17, 9403 JV ASSEN,
SCHUURMANWILLEM@HOTMAIL.COM

Onder “tefra” verstaat men alle door de lucht getransporteerde vulkanische producten: vulkanische as, lapilli, etc. Omdat tefra vaak over grote afstanden kan worden getransporteerd, en omdat het radioactieve elementen en herkenbare mineralen bevat, kan tefra in sedimentaire afzettingen gebruikt worden t.b.v. ouderdomsbepalingen. Vandaar de term “tefrostratigrafie”.



Een van de belangrijkste doelstellingen van stratigrafisch onderzoek is het vaststellen van de ouderdom van aardlagen. Er zijn twee duidelijk verschillende manieren om de ouderdom van een aardlaag te bepalen:

- **Relatieve ouderdom:** deze vertelt ons of een aardlaag ouder, jonger, dan wel even oud is als een andere laag. Er is een groot aantal methodes in omloop om de relatieve ouderdom te bepalen, waarvan biostratigrafie de meest bekende is. Deze methode maakt gebruik van fossiele overblijfselen van planten en dieren om de relatieve ouderdom van aardlagen en pakketten te bepalen en om ze onderling te correleren.
- **Absolute ouderdom:** willen we echter weten hoe oud een bepaalde gesteentelaag of -pakket in (miljoenen) jaren is, dan gebruiken we absolute ouderdombepalingstechnieken, waarvan de radioactieve methoden het meest gebruikt worden. Deze methodes zijn gebaseerd op het feit dat gesteenten bij hun ontstaan (bv. magma) radioactieve elementen bevatten die volgens een vaste halfwaardetijd vervallen tot een ander, stabiel, element. Als de halfwaardetijd bekend is (bv. de halfwaardetijd $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ is 700 miljoen jaar), kunnen we uit de verhouding $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ de ouderdom van het gesteente afleiden.

In dit artikel wil ik echter een wat minder bekende, maar toch interessante stratigrafische techniek bespreken die voor zowel absolute als relatieve ouderdomsbepalingen gebruikt kan worden: de *Tefrostratigrafie* (sommige auteurs gebruiken de term “tefrochronologie”, die strikt genomen niet dezelfde lading dekt als “tefrostratigrafie”, maar in dit artikel worden ze min of meer als synoniemen gebruikt).

Algemeen

Tefrostratigrafie is een techniek waarbij vulkanische as- (Afb. 2) en tuflagen (tuf is de versteende vorm van as), of hun verweerde equivalenten zoals “*Tonstein*” (verweerde vulkanische aslagen die grotendeels uit het kleimineraal kaoliniet bestaan) gebruikt worden om gesteenten te dateren. Afhankelijk van de vraagstelling en de kwaliteit van de as- of tuf laag, kunnen we absolute of relatieve ouderdomsbepalingen uitvoeren. Bovendien kunnen as- en tuflagen en hun

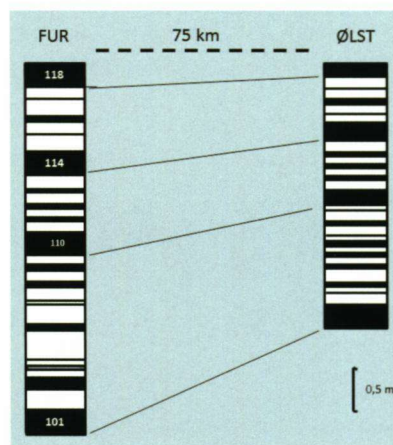


AFBEELDING 2. | Vulkanische as met karakteristieke vormen (Shetland Eilanden, Groot Britannië).

verweerde equivalenten gekoppeld worden aan bepaalde vulkanen of vulkaanprovincies en soms zelfs aan specifieke uitbarstingen van een vulkaan, door een gedetailleerde chemische analyse van de samenstelling van de as. Dit gegeven berust op het feit dat elke vulkaan en zelfs elke afzonderlijke uitbarsting zijn eigen karakteristieke chemische “*fingerprint*” heeft.

Wat maakt vulkanische as nu zo interessant voor de stratigrafie?

Een belangrijk kenmerk van vulkanische as is het feit dat aslagen vaak over grote gebieden voorkomen (tot honderden kilometers van de vulkaan verwijderd) en, geologisch gezien, zeer snel afgezet worden (dagen, weken, maanden). Ook be-



AFBEELDING 3. | Correlatie van Vroeg-Eocene tuflagen in Denemarken (gegevens van Boggild, 1918 en Andersen, 1937). Zie ook Afb. 1 en 4.

perken aslagen zich niet tot een enkel afzettingsmilieu, maar worden aangetroffen in allerlei verschillende afzettingen (venen, rivierafzettingen, strand- en kustsedimenten, in ondiepe en diepe mariene sedimenten, etc.). De snelle afzetting, grote laterale verspreiding en het voorkomen in allerlei verschillende afzettingsmilieus maken as- en tuflagen tot een uniek middel om te correleren en de relatieve en/of absolute ouderdom van gesteentepakketten te bepalen.

Analysetechnieken

De as- en tuflagen, die het meest interessant zijn voor de stratigrafie zijn de dunne, zeer wijdverbreide aslaagjes die ontstaan bij zogenaamde plinische vulkanische uitbarstingen (genoemd naar Plinius de jongere die in AD 79 getuige was van de uitbarsting van de Vesuvius). Dit type uitbarsting wordt gekenmerkt door zware explosies die enorme hoeveelheden as hoog de atmosfeer in blazen, waarna deze as over een oppervlakte van duizenden km^2 in relatief korte tijd wordt afgezet. Voorbeelden van plinische uitbarstingen zijn die van de Laacher See en de Santoríni. (zie Walker, 1981; en diverse bijdragen in dit nummer).

Identificatie van vulkanische as of tuf

In sommige gevallen zijn aslagen duidelijk herkenbaar als een zwarte, grijze of witte band in het gesteente. Dit is vaak het geval als de hoeveelheid as zo groot is, dat er herkenbare laagjes gevormd worden. Verder weg van de vulkaan, of als de hoeveelheid as te

gering is om duidelijke laagjes te vormen, werkt deze methode niet, en moeten er andere technieken gebruikt worden:

- *Magnetische susceptibiliteit scanner*; met een dergelijke scanner wordt bv. een boorkern gescand op de aanwezigheid van vulkanische as. Deze methode werkt prima als er voldoende kenmerkende vulkanische mineralen in de as aanwezig zijn.
- *Micro- of Cryptotefra-analyse*; met deze methode is het mogelijk om zeer kleine hoeveelheden as te concentreren, om zodoende voldoende materiaal te krijgen voor een chemische analyse (zie voor een uitgebreide beschrijving van deze methode Turney, 1998).

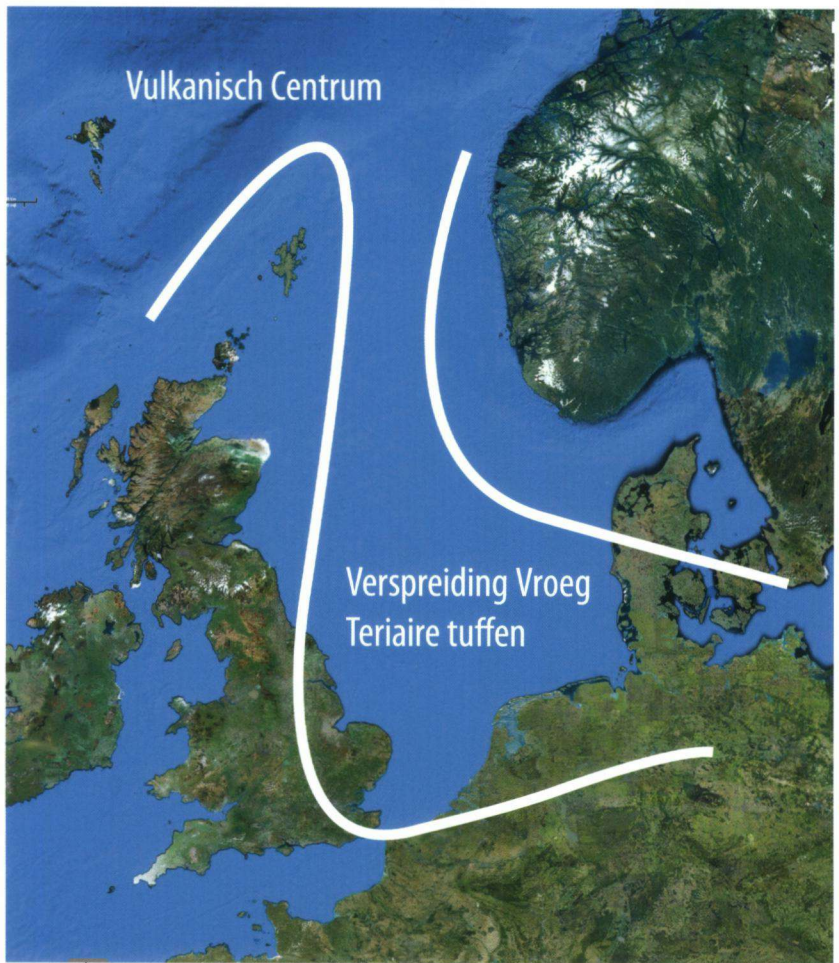
Analyseren

Afhankelijk van de vraagstelling en de kwaliteit van de as of tuf kunnen een aantal analysetechnieken worden gebruikt.

1. Relatieve ouderdomsbepaling & correlatie

Fysieke analyse; onder gunstige omstandigheden kan de waarneembare distributie van as- of tuflagen in een gesteentepakket gebruikt worden om lagen met elkaar te correleren. Een voorbeeld van deze techniek komt uit het Vroeg-Tertiair van Denemarken (Afb. 3). In dit voorbeeld zien we twee gesteentepakketten van enkele meters dikte met een groot aantal tuflaagjes (zwarte laagjes in Afb. 3). Gebaseerd op de verticale distributiepatronen en gecombineerd met de identificatie van een paar karakteristieke tuflagen (genummerde lagen) kan een redelijk betrouwbare correlatie gemaakt worden. Echter, deze methode heeft duidelijke beperkingen en is slechts zelden betrouwbaar op een regionale schaal.

Petrografische en mineralogische analyse; het succes van deze techniek is sterk afhankelijk van de kwaliteit van de as of tuf. Als het materiaal goed gepreserveerd is, kunnen kleur, vorm en refractie-index van de as (as is een soort glas) helpen bij de identificatie. Ook kan er gekeken worden naar de mineralogische samenstelling. Echter, grote bezwaren van deze laatste methode zijn: (1) sortering; de verspreiding van de mineralen in as is sterk afhankelijk van het soortelijk gewicht; mineralen met een grotere dicht-



AFBEELDING 4. | Verspreiding van vulkanische as in het Vroeg-Tertiair van het Noordzee-Bekken, en de locatie van het vulkanisch centrum (aangepast naar Morton & Knox, 1990).

heid worden eerder (= dichter bij de vulkaan) afgezet dan mineralen met een lagere dichtheid; en (2) resistentie; niet alle mineralen zijn even stabiel; zeker in oudere tuflagen moeten we rekening houden met het feit dat verwerking en diagenese de mineralogische samenstelling veranderd kunnen hebben, waardoor identificatie en correlatie sterk bemoeilijkt wordt.

Chemische analyse; bij de chemische analyse kunnen we kort gezegd twee methoden onderscheiden:

- *Bulk analyse*: bij deze techniek wordt de chemische samenstelling van de totale as of tuf bepaald (d.w.z. alle elementen worden geïdentificeerd). Deze techniek werkt redelijk goed in jonge, goed bewaarde as- of tuflagen, maar in oudere lagen kleven aan deze methode dezelfde bezwaren als aan de eerder genoemde petrografische en mineralogische technieken.
- *Analyse van geselecteerde mineralen*: in plaats van het totale as- of tuf-monster te analyseren wordt een bepaald mineraal geselecteerd voor analyse en in sommige gevallen zelfs een enkel fenocryst-kristal van dat mineraal. Het concept van "fingerprinting" van as- en tuflagen door een enkel fenocryst-kristal te analyseren berust op het gegeven dat subtiele verschillen in de mineralogische samenstelling van een enkel kristal van bv. zirkoon een vulkaanprovincie, een specifieke vulkaan of zelfs een vulkaanuitbarsting kan typeren.

2. Absolute ouderdomsbepaling

Radiometrische analyse: terwijl de voorgaande technieken vooral gericht zijn op het bepalen van de relatieve ouderdom van as- en tuflagen en het correleren van de gesteentepakketten waarin ze voorkomen, zijn de radiometrische analyses



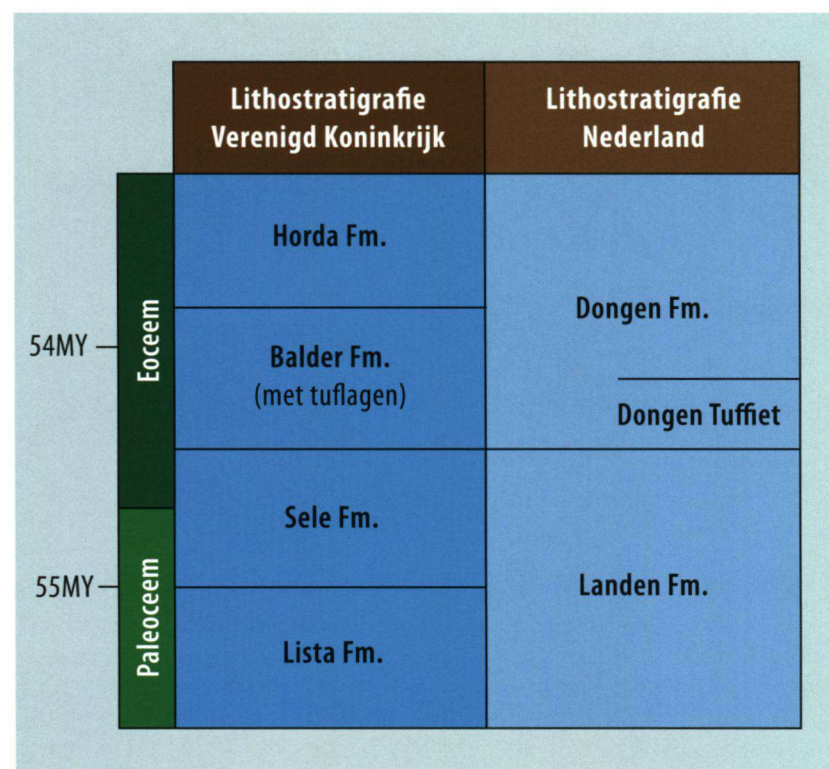
gericht op het bepalen van de absolute ouderdom. Radiometrische ouderdomsbepalingen zijn hoofdzakelijk gebaseerd op K-Ar, $40\text{Ar}/39\text{Ar}$, Rb-Sr en U-Pb analyses. Ook bij radiometrische ouderdomsbepalingen is het belangrijk om niet gecontamineerd en onveranderd materiaal te hebben. Om die reden is men ook hier grotendeels overgestapt van bulkanalyse van een as of tuf naar de analyse van een enkel fenocryst-kristal. De mineralen die heel vaak gebruikt worden zijn apatiet, zirkoon, hoornblende, biotiet en plagioklaas (zie voor meer informatie Knox, 1993).

Toepassingen

In het nu volgende hoofdstuk worden twee voorbeelden van tefrostratigrafie uitgewerkt, waarbij de nadruk ligt op tefrostratigrafie in pre-Kwartaire afzettingen. Voor tefrostratigrafie in Kwartaire afzettingen wordt de lezer verwezen naar het zeer interessante artikel van Hoek (2005).

1. Tefrostratigrafie in het Vroeg-Tertiair

In het Vroeg-Tertiair, en met name rond de Paleoceen/Eoceen-grens, is de aanwezigheid van vulkanische tuflagen in het Noordzee-Bekken en omliggende landen goed gedocumenteerd (Morton & Knox, 1990). De volle omvang van het voorkomen en de verspreiding van deze tuflagen kon pas goed ingeschat worden toen oliemaatschappijen, die in het Noordzee-Bekken talloze olie- en gasboringen hadden uitgevoerd, een groot gedeelte van hun stratigrafische informatie beschikbaar stelden. Informatie van het FaerØer gebied en van de Noordzee ter hoogte van Midden-Noorwegen geeft aan dat ook daar een groot aantal tuflagen aanwezig is in hetzelfde tijdsinterval (Afb. 4).



AFBEELDING 5. | Lithostratigrafie van de Paleoceen/Eoceen-grens in het Noordzee-Bekken – in het Verenigd Koninkrijk en Nederland.

Gebruikmakend van het Britse lithostratigrafische schema zien we dat de tuflagen zich concentreren in de Sele en de Balder Formaties; in de Sele Formatie relatief weinig lagen en de Balder een hoge concentratie van dikke en dunne tuflagen (variërend van <0,5 cm tot 18 cm dik). Vergelijken we de lithostratigrafische nomenclatuur van het Verenigd Koninkrijk met de Nederlandse, dan zien we dat de Dongen Tuffiet die in Nederland aangetroffen wordt in de Dongen Formatie, correleert met de Balder Formatie (Afb. 5). Twee belangrijke vragen duiken op:

1. Is deze wijdverbreide tuf afkomstig van een vulkanisch centrum of van meerdere centra die min of meer tegelijkertijd actief waren?
2. Waar ligt dit centrum of, in het geval er meerdere zijn, deze centra?

Om dat te achterhalen zijn in recente jaren een aantal boringen in het Noordzee-Bekken onderzocht en vergeleken met bestaande informatie uit landen rondom de Noordzee (Morton & Knox, 1990). Uit deze informatie kunnen we de volgende conclusies trekken:

1. Gebaseerd op gedetailleerde analyses, zoals de compositie van veldspaat fenocrysten en sporenelement-analyse, blijkt dat de tuffen uit het Vroeg-Eoceen in het Noordzee-Bekken en de omliggende landen afkomstig zijn van één bron. Niet iedereen is het met bovenstaande conclusies eens. Met name enkele Deense onderzoekers (Pedersen en medewerkers) zijn van mening dat er ook een belangrijk vulkanisch centrum in het Skagerrak gelegen heeft (zie ook de bijdrage van Jelle Talma in dit nummer).
2. Deze bron is zeer waarschijnlijk gerelateerd aan de opening van de Atlantische oceaan tussen Schotland-Noorwegen enerzijds en Groenland anderzijds (Afb. 4). Het vulkanisme dat gepaard ging met deze opening is gekenmerkt door zeer heftige erupties die enorme hoeveelheden as hoog de atmosfeer in geblazen hebben. Deze as heeft zich over een groot gebied verspreid (Afb. 4). De oorzaak voor deze hoge explosiviteit is niet helemaal duidelijk, maar moet gezocht worden in (a) water-magma interactie; (b) het type magma.

2. Tefrostratigrafie in het Carboon van het Saar-Nahe-gebied (Duitsland)

Het Saar-Nahe Bekken is een van de grootse intermontane bekkens in de Variscische gebergtektonen (waarvan bv. Eifel en Ardennen onderdelen zijn). Het bekken strekt zich uit van Bad Kreuznach in het noordoosten tot Saarbrücken in het zuidwesten (Afb. 6) en het is opgevuld met continentale en vulkanische afzettingen tot wel 6.500 m dik. De ouderdom van dit pakket ligt ruwweg tussen Laat-Namurien en Vroeg-Permien (326–275 miljoen jaar).



De stratigrafie van dit dikke pakket continentale afzettingen, dat een zeer variabele samenstelling heeft, is moeilijk in detail uit te werken, omdat enerzijds de architectuur van de laagpakketten zeer gecompliceerd is en anderzijds fossielen voor een betrouwbare identificatie en correlatie ontbreken. Als gevolg daarvan was men aanvankelijk vooral aangewezen op lithostratigrafische karakteristieken van de verschillende lagen voor correlaties in het Saar-Nahe Bekken en voor correlaties met afzettingen buiten het Bekken.

In meer recente jaren heeft men zich gerealiseerd dat de aanwezigheid van een groot aantal tuf- en "Tonstein"-lagen een ideaal middel vormt om de correlaties en ouderdomsbepalingen van de verschillende lagen aanzienlijk te verbeteren. Als voorbeeld wordt hier een aantal tuffen uit de Jeckenbach- en Odernheim-units van de Glan Groep besproken (Afb. 7). Voor meer details wordt verwezen naar Königer et al., 2002. De Jeckenbach- en Odernheim-units, die samen de Meissenheim Formatie vormen, worden gekenmerkt door lateraal variabele fluviale-lacustrine afzettingen met een complexe faciesopbouw. De totale dikte varieert tussen 260 en 370 m. In dit interval worden meer dan 40 tuflagen gevonden waarvan er zeven een regionale verspreiding hebben (vervolgbaar over minstens 50 km in een NO-ZW richting). De tuflagen kunnen tot wel 75 cm dik zijn.

Identificatie en samenstelling: Op basis van algemeen voorkomen zoals hardheid, kleur en korrelgrootte-sortering zijn de tuflagen duidelijk te onderscheiden van de achtergrondzanden en -kleien waarin ze afgezet zijn. Na afzetting zijn de aslagen chemisch sterk veranderd onder invloed van klimaat, druk en temperatuur, maar ze bevatten nog steeds een flinke hoeveelheid herkenbare magmatische componenten zoals:

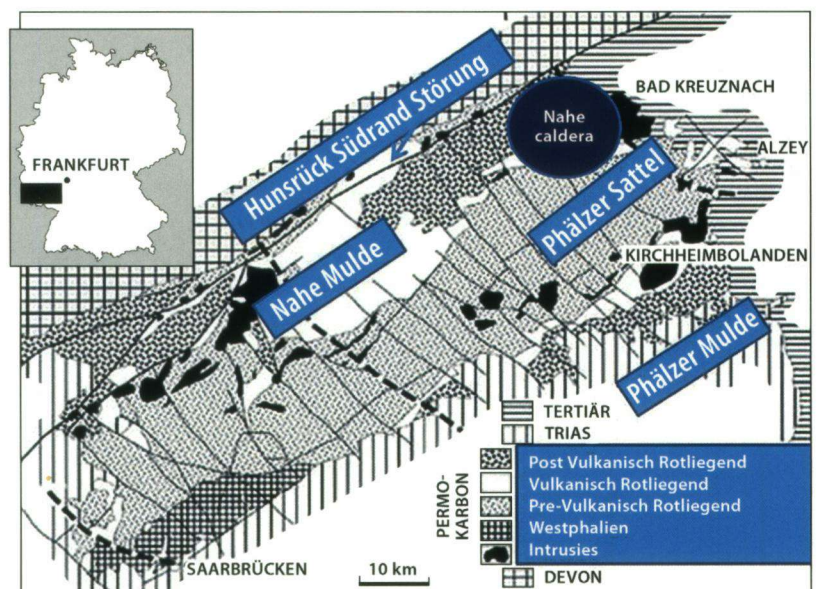
- Glasscherven, tot 200 µm in diameter;
- Vulkanische kwartssplinters, tot 650 µm lang;
- Muscoviet fenocrysten;
- Zware mineralen zoals zirkoon, apatiet, monaziet, rutiel, toermalijn, en granaat.

Twee vragen willen we graag beantwoorden: Hoe oud zijn deze tuflagen? En waar is de vulkanische bron?

Absolute ouderdom: Van twee van de zeven regionale tuflagen hebben Königer et al. (2002) de absolute ouderdom bepaald:

- **Pappelberg Tuf;** van deze tuflaag zijn zirkoonkristallen (doorsnede 80-120 µm) geselecteerd voor een U/Pb SHRIMP ouderdomsbepaling. Zeventien metingen werden uitgevoerd en de spreiding in ouderdom van elk van deze 17 metingen is klein (met uitzondering van één meting die als onbetrouwbaar ter zijde is geschoven). Uit de metingen blijkt dat de Pappelberg Tuf een ouderdom heeft van $297 \pm 3,2$ miljoen jaar.
- **Humberg Tuf;** ook van deze tuflaag zijn zirkoonkristallen (doorsnede 70-120 µm) geselecteerd voor een U/Pb SHRIMP ouderdomsbepaling. De spreiding in ouderdom van ook weer 17 metingen is op het eerste gezicht heel groot; zes metingen geven een ouderdom die veel te hoog is (763-580 miljoen jaar), terwijl drie metingen een ouderdom geven die veel te laag is (± 260 miljoen jaar). Van de overblijvende zeven metingen kan een gemiddelde ouderdom voor de Humberg Tuf berekend worden van 306 ± 6 miljoen jaar (zie voor een gedetailleerde discussie Königer et al., 2002).

Wat is de betekenis van deze resultaten? Königer et al., 2002 beargumenteren dat de metingen aan de zirkoonkristallen uit de Pappelberg Tuf betrouwbaar zijn, en inderdaad een goede graadmeter zijn voor de ouderdom van deze tuflaag. Echter, de absolute ouderdommetingen aan de zirkoonkristallen uit de Humberg Tuf



AFBEELDING 6. | Het Saar-Nahe Bekken in Duitsland (aangepast naar Königer et al., 2002).

zijn minder betrouwbaar en worden beïnvloed door bijmenging van getransporteerde oudere kristallen en door zirkoonkristallen die iets van hun lood verloren hebben, waardoor een te lage ouderdom gemeten wordt. Hun interpretatie is dat het ouderdomverschil tussen de Pappelberg en Humberg tuffen minimaal is en dat de tuflagen in de Meissenheim Formatie (Afb. 7) een ouderdom hebben van ongeveer 297 miljoen jaar.

Deze interpretatie heeft interessante consequenties voor de stratigrafische positie van de Meissenheim Formatie. Tot nu toe werd de Glan Groep waartoe de Meissenheim Formatie behoort (Afb. 7), beschouwd als Onder-Rotliegend, en dus Perm in ouderdom. De resultaten van Königer et al., 2002 laten zien dat die interpretatie herzien moet worden. De Carboon/Perm-grens wordt door veel stratigrafen rond de 296 miljoen jaar gelegd (Hoffmann et al., 1989) of zelfs jonger, bij 290 miljoen jaar (Harland et al., 1990). Dit zou betekenen dat de Glan Groep (Afb. 7) grotendeels tot het jongste Carboon gerekend moeten worden; een interessante conclusie voor de stratigrafische interpretatie van het Carboon/Perm-complex in het Saar-Nahe Bekken.



Vulkanische oorsprong: De tweede vraag die we graag willen beantwoorden is die betreffende de bron van deze vulkanische assen. Twee aspecten van de Meissenheim tuflagen helpen ons een antwoord op deze vraag te vinden:

- **Korrelgrootte-distributie;** uit korrelgrootte-distributies blijkt dat de korrelgrootte van bv. zirkonen, apatiet en kwartssplinters afneemt van zuid naar noord in het Saar-Nahe Bekken. Dit wijst op een noordelijke transportrichting van de vulkanische assen en dus op een bron ten zuiden van het Bekken.
- **Grootte van de askristallen;** uit vergelijkingen met regionale aslagen van bv. Mount St.Helen in de USA kan worden geconcludeerd dat as met glasscherven tot 200 µm in diameter en kwartssplinters tot 650 µm lang, zoals aangetroffen in de tuflagen van de Meissenheim Formatie, maximaal 300 km afgelegd heeft, waarschijnlijk minder (König et al., 2002).

Gebaseerd op deze informatie en ondanks het feit dat ook in het Saar-Nahe Bekken uitgebreide vulkanische activiteiten in het Carboon/Perm vastgesteld zijn (de vorming van de zogenaamde Nahe-Caldera; Krupp, 1984) concluderen König et al. dat de vulkanische oorsprong van de aslagen in het Saar-Nahe Bekken een paar honderd kilometer verder naar het zuiden gezocht moet worden. De meest in aanmerking komende gebieden zijn vulkanische centra in het Zwarte Woud en in de Vogezen, ongeveer 150 km ten zuiden van het Saar-Nahe Bekken.

Slotopmerking

Uit de voorafgaande voorbeelden blijkt heel duidelijk dat tefrostratigrafie een interessant en belangrijk stratigrafisch werktuig kan zijn om gesteentepakketten te correleren en de stratigrafie van een bekken te ontrafelen. Het is echter lang niet altijd eenvoudig om aslagen (of hun versteende en verweerde equivalenten, tufsteen en "Tonstein") te identificeren en te analyseren, vooral in oudere, pre-Kwartaire afzettingen. Korrelgrootte-sortering en chemische veranderingen, om twee aspecten te noemen, kunnen het materiaal dusdanig beïnvloeden dat

stratigrafische interpretaties niet of nauwelijks mogelijk zijn. Desalniettemin hoort tefrostratigrafie in de "toolbox" van elke stratigraaf.

LITERATUUR

Hoek, W., 2005.

Tefrochronologie. Grondboor & Hamer, jrg. 58, nr 3: pp. 68-72.

Knox, R.B.O'B., 1993.

Tephra layers as precise chronostratigraphical markers. In: Hailwood, E.A. en Kidd, R.B. (eds), High Resolution Stratigraphy. Geological Society Special Publication, nr. 70: pp. 169-186.

Königer, S., Lorenz, V., Stollhofen, H. & Armstrong, R.A., 2002.

Origin, age and stratigraphic significance of distal fallout ash tuffs from the Carboniferous-Permian continental Saar-Nahe Basin (SW Germany). Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundschau), 9: pp. 341-356.

Krupp, R., 1984.

The Nahe Caldera - A resurgent caldera in the Permocarboniferous Saar Nahe Basin, SW-Germany. Geologische Rundschau, 73(3): pp. 981-1005

Morton, A.C. & Knox, R.B.O'B., 1990.

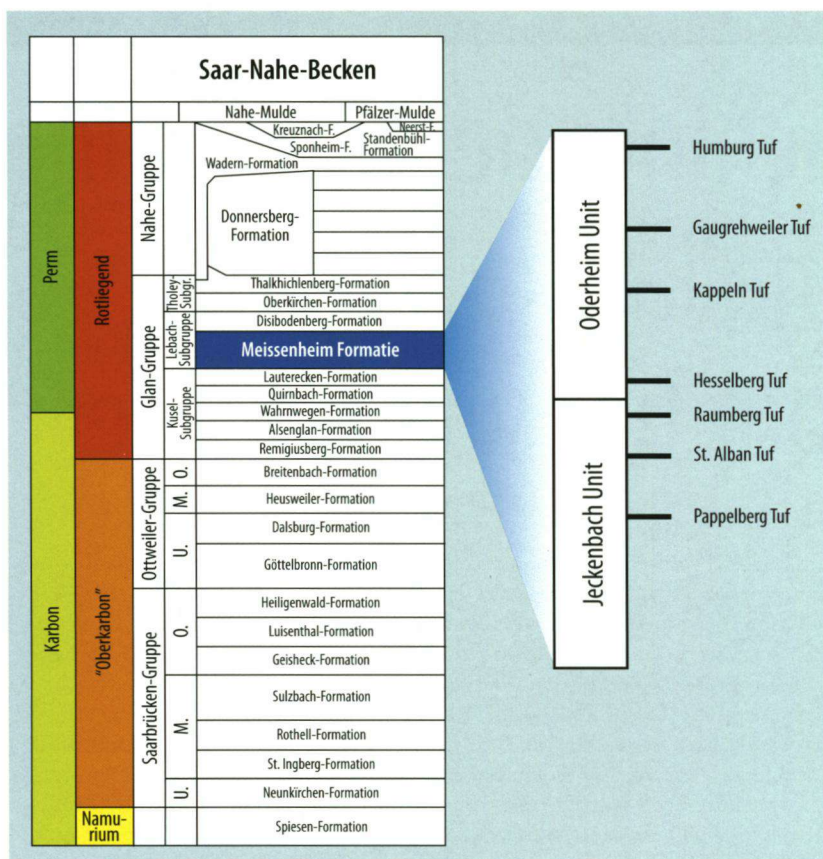
Geochemistry of Late Palaeocene and early Eocene tephra from the North Sea Basin. Journal of the Geological Society, London, vol. 147: pp. 425-437.

Walker, G.P.L., 1981.

Generation and dispersal of fine ash and dust by volcanic eruption. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 11: pp. 81-92.

Turney, C.S.M., 1998.

Extraction of rhyolitic ash from minerogenic lake sediments. Journal of Lacolmology, 19: pp. 199-206.



AFBEELDING 7. | Lithostratigrafie van het Carboon/Perm in het Saar-Nahe Bekken, met de regionale tuflagen in de Jeckenbach- en Odenheim-units (aangepast naar König et al., 2002).

