

Mineralen als getuige en medeplichtige

Parafrase van een lezing voor de NGV contactdag, Utrecht, 13 maart 1993

Mineralen zijn voor de amateur een geliefd verzamelobject. De professionele geoloog ziet ze bovendien als schakels in geologische processen. De lezing ging over dat laatste aspect.

Cyprus, kupros, koper: De naam van het eiland verraadt dat er al sinds de oudheid koper is gewonnen. De ertslichamen bestaan uit sulfides, vooral Pyriet (FeS_2), Chalkopyriet (CuFeS_2) en Sfaleriet (ZnS) en zijn enkele tientallen tot honderden meters lang, breed en hoog. Ze werden ontgonnen voor zowel koper als zink. Het nevangesteente bestaat uit bazaltische kussenlava's van Krijt-ouderdom, rond 100 miljoen jaar oud. Pas sinds het eind van de jaren '70 is er precies bekend hoe zulke ertsen ontstaan. Ze zijn een bijproduct van de vorming van oceaankorst op de oceanische ruggen. Dit is ontdekt door directe waarneming van de vorming van zulke afzettingen, met mini-duikboten waarmee Amerikaanse en Franse oceanografische instituten sinds de jaren '70 de oceaانبodem afspeuren. De bekendste 'high-tech' diepzeeduiker, de Amerikaanse 'Alvin', heeft ook de vondst van de wrakken van de Titanic en de Bismarck op zijn naam staan.

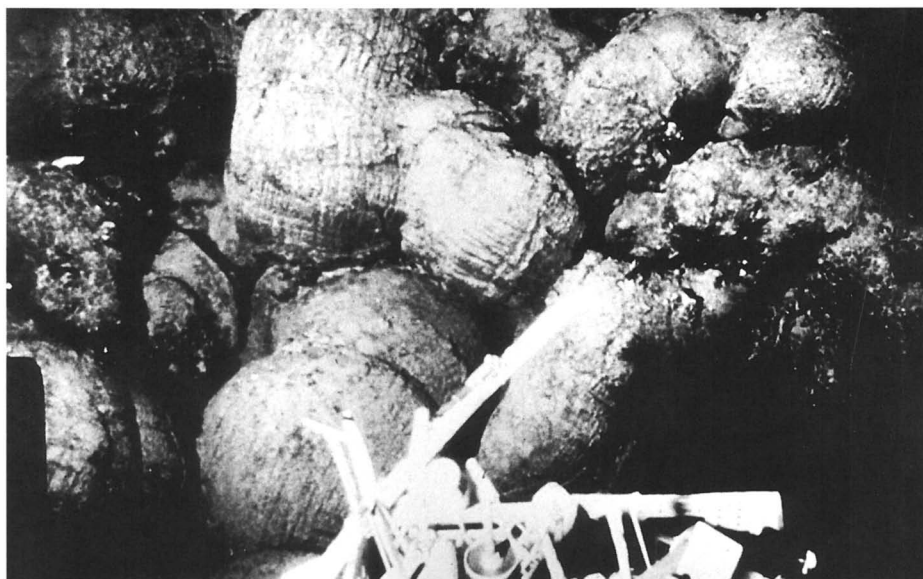
Continentverschuivingen, het meeste vulkanisme en bijna alle aardbevingen zijn directe gevolgen van de beweging van lithosfeerplaten. De bestudering van ertsafzettingen van het Cyprus-type en van hun moderne equivalenten op de mid-oceanische ruggen (MOR) heeft allerlei aspecten van het ontstaan en de levensloop van lithosfeerplaten aan het licht gebracht. Mid-oceanische ruggen, het 80.000 km lange systeem van onderzeese gebergten, zijn de kraamkamers van lithosfeerplaten. Onder de ruggen stijgt heet mantelgesteente, peridotiet, tot vlak onder de zeebodem op. Tussen 80 en 40 km diepte begint de peridotiet te smelten en levert uiteindelijk een laag bazaltmagma van circa 7 km dikte die bij de MOR stolt tot oceaankorst. De magmahaarden bevinden zich precies onder de plaatgrens, in het midden en op het hoogste punt van de MOR. Sinds het eind van de jaren '70 hebben 'Alvin' en zijn soortgenoten daar, op zo'n 3000 meter diepte, warme bronnen in de oceaانبodem ontdekt. De heetste, 'black smokers' genoemd, stoten water uit met een temperatuur tot 400 °C met een snelheid van enkele meters per

seconde. De 'zwarte rook' bestaat in hoofdzaak uit fijne vaste deeltjes van Pyrrhotien (Fe_9S_9) en Sfaleriet (ZnS), die bij het contact met het 1,5 °C koude oceanische bodemwater uit de *hydrothermale* vloeistof kristalliseren. De neerslagen van deze mineralen bouwen geleidelijk een ertslichaam op de oceaانبodem op. De uitstroombopeningen groeien uit tot 'schoorstenen' van 1 à 2 meter hoogte, waarin ook altijd het witte Anhydriet (CaSO_4) zit. Door menging met koud zeewater onder de oceaانبodem ontstaan er ook koelere bronnen met tragere stroomsnelheden, van de 'white smokers' ($T = 100\text{-}350$ °C, decimeters per seconde), waarin amorf SiO_2 en Bariet (BaSO_4) neerslaan. Zeer trage opwellingen hebben een temp. van 3-13 °C. Een groot deel van de metaalsulfides en -sulfaten slaat overigens al in barsten onder de zeebodem neer. Zo ontstaan dus de ertsen van het Cyprus-type. Naast ijzer en zink bevatten de mineralen koper, mangaan, barium, lood, antimoon, cadmium en zilver.

Hier rijzen nog een paar voor de hand liggende vragen, zoals: Waar komt het hete water vandaan, en waar de me-

talen en het zwavel? Hoe komt zo'n diepe zeebodem ooit boven water, zoals blijktbaar op Cyprus is gebeurd? Het water is natuurlijk geen probleem: Het is 'veranderd' oceaanwater, dat door de talloze breuken en spleten bij de MOR in de oceaankorst doordringt tot vlak bij de magmahaard. Daar wordt het verwarmd tot >400 °C en stijgt het recht boven de magmakamer door spleten in de korst op naar de oceaانبodem. Onderweg reageert het hete water met de bazaltische gesteenten van de oceaankorst. Bij die reactie komt een deel van de metalen uit de gesteenten vrij. Niet alleen de ertsmetalen, ook het Ca dat in de afzettingen als het sulfaat Anhydriet neerslaat. Calcium wordt in het reagerend zeewater opgelost en uitgewisseld voor het belangrijkste kation, Na^+ , dat dus geheel in de gesteenten verdwijnt. Alle zwavel in de sulfiden en sulfaten komt uit zeewater, immers het sulfaat-ion (SO_4^{2-}) is het op één na belangrijkste anion in zeewater.

Het is de vraag of dit soort afzettingen uit de huidige open oceanen ooit aan het aardoppervlak zullen worden blootgelegd als een toekomstig Cy-



Kussenlava's gefotografeerd op de Mid-Atlantische Rug door de bemande onderzeeër Alvin van het Woods Hole Oceanographic Institution. Kussenlava's ontstaan wanneer kleine stromen van bazaltlava onder water uitvloeien. Er ontstaat direct een gestolde korst waar de lava doorheen breekt tot worst- of kussenvormige uitstulpingen.

prus-type erts. Voor de moderne analogen van Cyprus en vergelijkbare restanten van voormalige oceaانبodems, komen we eerder terecht bij de kleine oceaانبekkens 'achter', d.w.z. landwaarts van vulkanische eilandbogen als Japan, de Marianen en de Filippijnen. Plaattektoniek is in staat gebleken dergelijke kleine oceaانبekkens tussen continent en eilandboog te dichten, door de eilandboog tegen de continentrand te drukken, en passant scherven van de tussenliggende oceaankorst meenemend.

De reacties tussen verwarmd oceaanwater en de vaste oceaankorst laten die laatste dus niet ongemoeid. Het verwijderen van de ertsmetalen gaat bovendien samen met *hydratie* van de korst, waarbij zeewater als $(OH)^-$ groep in nieuwe, metamorfe mineralen wordt ingebouwd. De belangrijkste zijn *kleimineralen* en, bij 300 °C en hoger, de *bladsplijters* Chloriet, gevormd in de bazaltische korst, en Serpentin, een omzettingproduct van Olivijn in de top van de mantel. Intensieve hydratie kan metamorfe gesteenten vormen met >10 gewichtsprocent H_2O , de *serpentinieten* en de chlorietrijke *groenstenen*. Bij de inbouw van $(OH)^-$ blijft een 'kaal' H^+ -ion in het water achter, dat daardoor flink zuur wordt; black smokers hebben gemiddeld een pH van 3,5; het record staat op pH = 2,5. Normaal oceaanwater is zwak basisch! Het hydratieproces bij de MOR heeft grote gevolgen, zoals hieronder zal blijken.

De gehydrateerde oceaankorst en de top van de onderliggende mantel vormen samen een lithosfeerplaat die van de MOR afglijdt en vroeg of laat in een subductiezone verdwijnt. Tijdens subductie nemen druk en temperatuur toe, waardoor de waterhoudende mineralen onstabiel worden. Ze ondergaan opnieuw een metamorfe reactie, waarbij de $(OH)^-$ -groepen als water vrijkomen. Boven de gesubduceerde plaat ligt een wig van het mantelgesteente peridotiet, dat in dit relatief koele milieu in vaste toestand verkeert. De toevoeging van vrij water uit de plaat veroorzaakt echter een smeltpuntsverlaging van vele honderden graden, voldoende om de peridotiet gedeeltelijk te laten smelten tot bazaltmagma. Bij eruptie vormen deze magma's de vulkanische eilandbogen. Zonder water, dus zonder vroegere hydratie van de MOR, zou er geen of veel minder subductie-vulkanisme zijn. Bij subductiezones onder continentranden reageren de bazalten met de SiO_2 -rijkere continentkorst en vormen zich vulkanen van de intermediaire gesteenten *andesiet* en *daciet* (bijv. Andes, Java). Andesietvulkanen bo-

ven subductiezones zijn notoir explosief, denk aan Krakatau, Mount St. Helens en Pinatubo. Dat is te danken aan de relatief hoge viscositeit van andesieten en dacieten, maar ook aan hun watergehalte, een late echo van het proces van de chloritisatie en serpentinisatie van de oceanische plaat door de hydrothermale systemen op de mid-oceanische rug!

Mineralen zijn in belangrijke mate medeplichtig aan de voortstuwing van de lithosfeerplaten. Onderduikende oceanische platen bestaan voor >90% uit peridotiet, net als de omringende mantel. Het gesteente peridotiet bestaat voor ruim 60% uit het Mg-Fe-silikaatmineraal Olivijn en daarnaast in hoofdzaak uit mineralen van de Pyroxeen-groep. Met de diepte nemen temperatuur en druk in de mantel toe. Op een diepte van 400 km leidt dit tot metamorfe rekristallisaties, waarbij Olivijn verandert in een mineraal met de kristalstructuur van een *Spinel*. Deze reactie is een aanpassing aan de steeds toenemende druk. Olivijn-spinelstructuur heeft een dichtere atomaire stapeling en daardoor een hogere soortelijke massa. Het hele gesteente wordt hiermee 10% zwaarder. Seismologen die de aarde 'doorlichten' met trillingen van aardbevingen en van ondergrondse kernproeven, vinden overal in de mantel op 400 km diepte een discontinuïteit in de voortplantingssnelheid van de trillingen, die aan deze metamorfe reactie wordt toegeschreven. In de peridotiet van de onderduikende plaat verloopt deze reactie al op ca. 300 km diepte, omdat de plaat dankzij het slechte warmtegeleidingsvermogen van gesteenten tot op grote diepte relatief koel blijft, en omdat de reactie bij lagere temperaturen tevens bij lagere drukken verloopt. Dientengevolge steekt de zware spinel-peridotiet in de plaat zo'n 100 km boven die van de omringende, warmere mantel uit. De werking van de zwaartekracht op deze zware massa trekt de plaat de mantel in, door wat in vakjargon de '*slab-pull force*' heet. Ook de oceaankorst levert een bijdrage aan de slab-pull force. Al op enkele tientallen kilometers diepte metamorfoserende de bazaltische gesteenten tot eclogiet, d.m.v. de reactie:



Plagioklaas is een Ca-Na-Al-silikaat van de veldspaatgroep. De Na-component van de Plagioklaas wordt bij de reactie als Jadeiet-component in het mengkristal Pyroxeen₂ ingebouwd (Jadeiet is een pyroxeen met de formule $NaAlSi_3O_8$). Het Ca uit de Plagioklaas gaat in de Granaat zitten. Eclo-

giet heeft een 20% hogere soortelijke massa dan het bazaltisch uitgangsgesteente.

'Continentale platen' hebben geen oceaankorst maar continentkorst, die niet alleen dikker is dan de oceaankorst, gemiddeld 35 km, maar vooral ook soortelijk aanzienlijk lichter. De relatief lichte continentkorst werkt als een kurk die de plaat op de zwaardere onderliggende mantel laat drijven. Daardoor zijn continentale platen niet of nauwelijks in staat om te subduceren, en daarom is de oudste bewaarde continentkorst bijna 4 miljard jaar oud, terwijl de oudste oceaankorst nog geen 200 miljoen jaar haalt! Ondanks zijn afkeer van subductie probeert de continentkorst het keer op keer. In vele gebergten die door botsing van continentale platen zijn ontstaan, getuigen mineraalgezelschappen dat gesteenten die nu aan het aardoppervlak liggen, tijdens de botsing tot dieptes van 30-40 km moeten zijn gesubduceerd, alvorens door hun drijfvermogen naar het oppervlak terug te keren. Er is inmiddels een staalkaart aan mogelijke reacties tussen mineralen bekend, door laboratoriumproeven die de drukken en temperaturen op verschillende dieptes simuleren. Eenmaal bekend, kunnen deze reacties als *geologische thermometers en barometers* gebruikt worden. Typische botsings-gebergten als de Alpen en de Betische Cordillieren van Zuid Spanje vertellen met hun metamorfe mineralen steeds hetzelfde verhaal: vroeg in hun geschiedenis zijn relatief koude gesteenten van nabij het aardoppervlak gesubduceerd tot enkele tientallen km's diepte; daarna warmen ze geleidelijk op, waarna we eerst de druk en daarna de temperatuur weer zien afnemen wanneer de gesteenten weer langzaam omhoog komen. Vinden we in metamorfe gesteenten een dergelijk '*druk-temperatuur-tijd pad*' terug, dan hebben we een betrouwbare aanwijzing gevonden voor een 'fossiel' subductieproces. Tot onze niet geringe verbazing vinden we de laatste jaren sporen van continent-subductie tot veel grotere dieptes, tot ca. 130 km, getuige het optreden van Coesiet, een hoge druk polymorf van Kwarts (SiO_2), in onder meer de West Alpen, Noorwegen en in een 1000 km lange gebergtegordel in China. Voordien was Coesiet slechts bekend uit grote meteorietkraters. Het is overigens nog niet helemaal duidelijk hoe Coesiet de terugkeer naar het aardoppervlak overleeft zonder weer geheel in Kwarts om te zetten.

Een even eenvoudige barometer is de reactie tussen de twee koolstof-poly-

morfen Grafiet en Diamant. Diamant is pas stabiel op dieptes > 200 km, diep in de mantel dus. Natuurlijke diamanten overleven de condities van het aardoppervlak alleen omdat zijn vanuit die diepte met grote snelheid omhoog gebracht door de zeldzame en explosief erupterende kimberliet-magma's. Daarbij koelen ze zo snel af dat de reactie naar Grafiet voorkomen wordt. Kort geleden zijn in peridotietmassieven in Marokko (Beni Boussera) en Zuid Spanje (Ronda) 10 karaats, d.w.z. 2 gram zware, gave doch geheel *gegratiseerde diamanten* gevonden. Sommige van deze gesteenten bevatten tot 25 gewichtsprocent koolstof! Hoogst waarschijnlijk gaat het

om oorspronkelijk organisch en anorganisch (carbonaat-)koolstof dat met de oceanische korst is gesubduceerd onder Marokko en Spanje, voorafgaand aan de botsing tussen Afrika en Spanje, 85 miljoen jaar geleden. Bij smeltprocessen langs de subductiezone moet koolstof met silikaatmagma's in de bovenliggende mantelwag zijn geïnjecteerd. Na de climax van de botsing is dat mantelgesteente langzaam opgestegen. Thermo-barometrie aan gesteenten van de Betische Cordillera heeft uitgewezen dat dit gebergte 20 miljoen jaar geleden een relatief late verwarming tot 550 °C heeft ondergaan, veroorzaakt door het opstijgen van de warme mantel. In

de laatste twintig miljoen jaar is de top van deze opgestegen mantelmassa door erosie blootgelegd. Omdat de diamant hier allesbehalve explosief naar het oppervlak is gebracht, is hij geheel in grafiet omgezet.

Adres van de auteur:
F.F. Beunk,
Instituut voor Aardwetenschappen
VU, Amsterdam



De ovale kwartzandsteen uit de es van 't Ronde bij Elsloo

P. Houtsma

Tijdens een archeologische opgraving bij 't Ronde is een ovale kwartzandsteen aangetroffen. Om er achter te komen waarvoor deze diende, is de steen onderzocht door enkele deskundigen, waaronder de zwerfsteenonderzoeker A.P.Schuddebeurs. Het artikel bevat een beschrijving van de vondsten en hun interpretatie, mede aan de hand van de bevindingen van Schuddebeurs. Als eerbewijs aan zijn overleden vriend Schuddebeurs doet de auteur diens uitstekende en uitvoerige beschrijving van de kwartzandsteen hierbij vergezeld gaan.

Inleiding

In het voorjaar van 1966 is op een hoge zandrug bij 't Ronde (gemeente Ooststellingwerf) een schrabber van vuursteen gevonden door J.K.Boscher, veldassistent bij het Fries Museum. Zo te zien dateert de schrabber uit het Jong-Paleolithicum, dat ongeveer samenvalt met de tweede helft van het Weichselglaciaal van ongeveer 35000 tot 10.000 jaar BP (voor heden). De betrekkelijk unieke vondst is aanleiding geweest tot verder veldonderzoek door Boschker en de provinciaal archeoloog van Friesland G.Elzinga. In een proefgaatje van 50 x 50 cm hebben zij een 6 cm lang bipolair kernstuk aan het licht gebracht, dat leidde tot een "diepgaander" onderzoek, uitgevoerd door vrijwilligers onder auspiciën van het Fries Museum en het Archeologisch Centrum, voorheen het Biologisch-Archeologisch Instituut (B.A.I.), van de Rijksuniversiteit Groningen. Hierbij is over de vindplaats een kruisprofiel van één meter breed en tien meter lang gegraven tot een diepte van ongeveer één meter. Daarbij zijn aardewerkscherven

en paleo- en mesolithische artefacten te voorschijn gekomen. Vervolgens is van 12 t/m 29 april 1966 ter plaatse onderzoek verricht door een grotere groep, waarbij ook een werkkeet, centrifugaal pomp en zeefbak ter beschikking stonden. Alle afgegraven grond, in totaal 96 kubieke meter, is door de zeef met een draadrooster van 0,4 x 0,4 cm gespoeld. De vondsten, die in situ zijn aangetroffen zijn ingetekend op schaal 1:10. Van de opgraving zijn profieltekeningen, lakprofielen, foto's en dia's gemaakt. Aan het ook aangetroffen houtskool is een C14 bepaling uitgevoerd door het C14 laboratorium in Groningen.

De vindplaats bevindt zich op een lokatie met de volgende coördinaten X 210.73/Y 552.73

In bijlagen 1 en 2 vindt men de verslagen van de deskundigen Schuddebeurs en Newell omtrent de opgegraven ovale kwartzandsteen (Plaat I, bovenaan). Bijlage 3 bevat een verklarende lijst van enkele gebruikte archeologische en geologische termen.

Beschrijving en interpretatie van de vondsten

De vondsten kunnen als volgt worden gerubriceerd:

- A. Mesolithisch materiaal
- B. Jongpaleolithisch materiaal
- C. De ovale kwartzandsteen
- D. Middeleeuws aardewerk

Het Mesolithisch materiaal

Zoals hiervoor is aangegeven zijn ook artefacten opgegraven, en wel in de zwarte esgrond, uit het Mesolithicum, dat is de overgangstijd van rondtrekkende jagers naar gevestigde landbouwers tussen ongeveer 10.000 - 6000 BP. Onder de verzamelde artefacten bevinden zich zeven microlieten, n.l. drie steilgeretoucheerde klingetjes (z.g. mesjes met afgedrukte rug, die dienden als onderdeel van samengestelde jacht- en viswerktuigen) en vier schrabbertjes. De afbeeldingen ervan, getekend door Pieter Dijkstra uit Veldhoven zijn weergegeven op Plaat I, beneden. In het profiel zijn bovendien vijf haardjes met houtskool aangetroffen. De houtskool is volgens Prof.Dr.W.van Zeist, die zo bereidwillig