

Aardwetenschappers houden zich met vele zaken bezig, zeker de aardwetenschappers van het Instituut voor Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit. Zoals bijvoorbeeld duidelijk wordt in de reclamespot: "Aardwetenschappen, niet zo droog als je denkt; 76.000.000.000 liter water onder het zand".

Uitdrukking van de wetenschappelijke bedrijvigheid, die zich binnen het Instituut afspeelt in een viertal vakgroepen, is niet alleen de jaarlijkse stroom van wetenschappelijke publikaties. Het zijn bijvoorbeeld ook de voordrachten ter gelegenheid van het 20-jarige jubileum van de Stichting GEA, waarmee velen uit het Instituut zich al jaren verbonden weten.

Met de in dit Gea-nummer verschijnende bijdragen wordt slechts een deel getoond van het totaal van de werkzaamheden op het Instituut. Deze zijn niet alleen tot onderzoek beperkt; het wetenschappelijk onderwijs maakt er een belangrijk onderdeel van uit. Onderwijs, dat opleidt in de geologie en fysische geografie en in milieuwetenschappen, en dat specialisaties kent in de hydro(geo)logie, de paleontologie, structurele geologie, Kwartairgeologie en laaglandgenese, in de mineralogie, petrologie en erts kunde, in meteorologie, stratigrafie, sedimentologie en mariene geologie. Een grote variatie aan mogelijkheden binnen een qua grootte nog steeds relatief beperkt Instituut, waar mensen elkaar kennen. In zoverre deze specialisaties niet terug te vinden zijn in de artikelen in dit Gea-nummer, blijft er nog terrein te over voor toekomstige uitingen van wetenschappelijke produktiviteit, waaruit duidelijk de fascinerende veelzijdigheid van de aardwetenschappen naar voren komt. Deze veelzijdigheid bevindt zich niet alleen binnen het gebied van de traditionele geologische disciplines als paleontologie of mineralogie, maar ook op de minder bekende gebieden van de milieuwetenschappen, mariene geologie, laaglandgenese of ook de hydrogeologie.

Namens het Instituut voor Aardwetenschappen van de VU: H.E. Rondeel

Fluïden in de aardkorst

door J.L.R. Touret

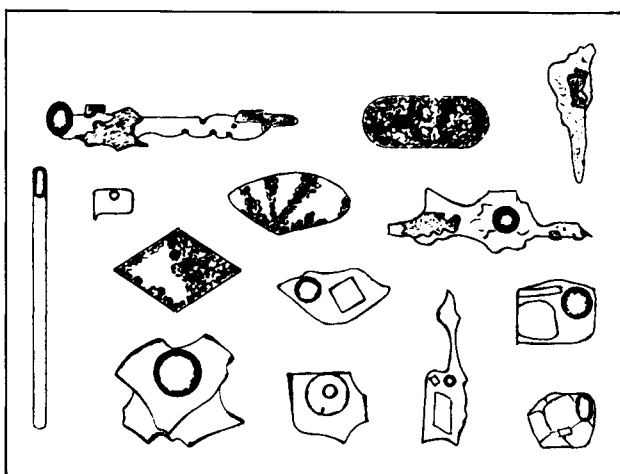
Vloeistoffen spelen een fundamentele rol in de meeste geologische processen: bij vorming, verandering en transport van magma's, bij metamorfe reacties, bij de vorming van pegmatieten en ertsaders, enzovoort. Aan het aardoppervlak kunnen gasvormige en vloeibare fasen eenvoudig onderscheiden worden, maar dieper in de aardkorst is dat ingewikkelder. In veel gevallen zijn druk en temperatuur daar hoger dan het kritische punt van een aantal stoffen, het punt waarbij het onderscheid tussen vloeistof en gas wegvalt; onder dergelijke omstandigheden komen die stoffen dan voor als superkritische *fluïde fasen*. Direct onderzoek van gassen, vloeistoffen en fluïden in de diepte is niet gemakkelijk: de mens had tot heden veel minder succes bij zijn onderzoek van het inwendige van de aarde dan bij dat van het uitwendige. Slechts één

diepteboring (op het schiereiland Kola in het noorden van de Sovjet-Unie) ging tot ongeveer 15 km, een andere staat thans op stapel in West-Duitsland (de "Kontinentale Tiefbohrung" in Beieren). Menselijke activiteiten beperken zich dus meestal tot de eerste kilometers in de aardkorst. Dit is weinig in vergelijking met de maximum diepte waarop vloeistoffen met zekerheid zijn aan te treffen: ten minste 100 km, mogelijk veel meer.

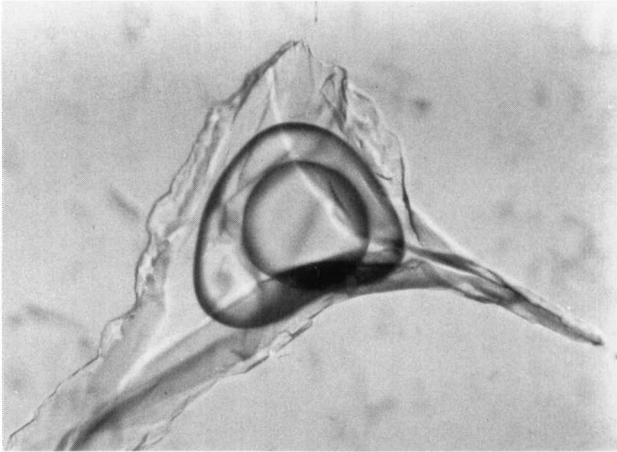
Om die reden berust de kennis van dieptevloeistoffen grotendeels op indirecte bronnen, zoals oppervlakteverschijnselen als vulkanen, of theoretische berekeningen die op experimenten of op thermodynamica gebaseerd zijn. Ook kenmerken van isotopen, bijvoorbeeld van zuurstof-18 en koolstof-13, vergroten het inzicht. Maar elk van deze methoden kent beperkingen: voor de vulkanische gassen is dit de wisselwerking tussen vloeistoffen en magma, voor de thermodynamische berekeningen is dit de ingewikkeldheid van natuurlijke systemen, en bij de interpretatie van isotopengegevens bestaan veel onzekerheden.

Vloeibare insluitels

In de laatste jaren heeft een andere informatiebron steeds meer belang en belangstelling gekregen. Nu kunnen namelijk de vloeistoffen zèlf direct bestudeerd worden. Deze vloeistoffen bevinden zich in *insluitels* in de meeste gesteentevormende mineralen, vooral in kwarts. Die insluitels zijn weliswaar minuscuul (meestal slechts een paar micrometer), maar komen soms in enorme aantallen voor (tot enkele miljoenen per cm³ mineraal). In feite is het bestaan van vloeistofinsluitels al lang bekend. Toen aan het begin van de 19e eeuw de Engelse geoloog H.C. Sorby voor het eerst gesteenten met een microscoop bestudeerde, waren de eerste objecten die hij kon beschrijven en identificeren juist vloeibare (en gesmolten) insluitels. Na meer dan 20 jaar voorbereiding schreef hij een beroemd artikel (Sorby, 1858) dat



Afb. 1. Een gedeelte van een plaat van Sorby (1858); no. 49-56: fluïde insluitels in natuurlijke mineralen.



Afb. 2. Mengsel van water en koolzuur in een insluitel in beryl uit Brazilië. Van buiten naar binnen: vloeibaar H₂O, vloeibaar CO₂, en gasvormig CO₂. Grootte van het insluitel ca. 50 μm.

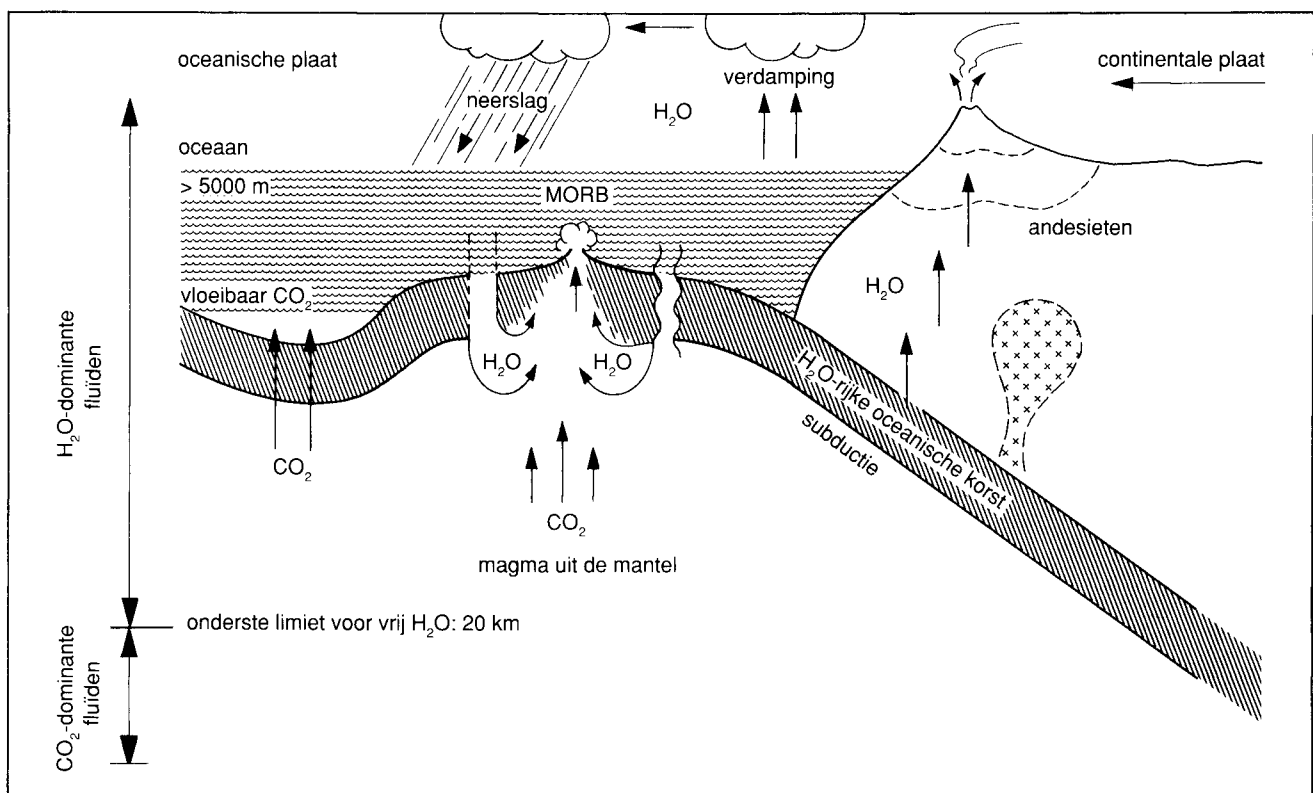
nog steeds een belangrijke referentie is (afb. 1). Er volgde een periode van intense belangstelling, die culmineerde in het grote tijdperk van de beschrijvende petrografie, met namen als Rosenbusch, Zirkel en voor wat Nederland betreft de Delftse hoogleraar Vogelsang, die na bijna een halve eeuw vruchteloos zoeken in 1869 CO₂ in insluitels kon karakteriseren. Later verdween dit soort onderzoek vrijwel geheel. Redenen te over: de geringe afmetingen en de complexiteit van de insluitels, gebrek aan behoorlijk inzicht in vloeibare systemen bij hoge temperatuur (T) en druk (P), analytische problemen, enzovoort. De belangrijkste reden is echter zeer triviaal: bij de gebruikelijke preparatietechnieken van gesteenten (dunne doorsneden, verpoedering voor chemische analyse) verdwijnen de meeste insluitels, in

ieder geval die welke met de petrografische microscoop bestudeerd kunnen worden. Deze situatie veranderde gelukkig drastisch in de jaren zestig van deze eeuw, vooral door de gelijktijdige ontwikkeling van een aantal van elkaar onafhankelijke technieken zoals niet-destructieve, fysische analytische methoden (elektronen-microsonde, elektronen-microscoop), experimenten bij hoge druk en temperatuur en modelstudies.

Nieuwe methoden als de microthermometrie (temperatuurbepaling onder de microscoop van fasenovergangen binnen insluitels) en de nog korter geleden ontwikkelde laser Raman microspectrometrie zijn onmisbaar voor de juiste karakterisering van de belangrijkste gassen - koolzuur (CO₂), methaan (CH₄), stikstof (N₂) - en voor de identificatie van sommige mineralen die in de insluitels zitten (dochtermineralen), zie Touret en Burke (1988). Samen met een snelle ontwikkeling van de theorie - met name de toestandsvergelijkingen van vloeibare systemen bij hoge druk en temperatuur - maken deze technieken het nu mogelijk om de meeste vloeibare insluitels kwantitatief te analyseren. Bovendien kan daarmee in relatief eenvoudige systemen (één of twee en bij uitzondering drie componenten) het molair volume, een maat voor de dichtheid van de ingesloten vloeistoffen en gassen, bepaald worden.

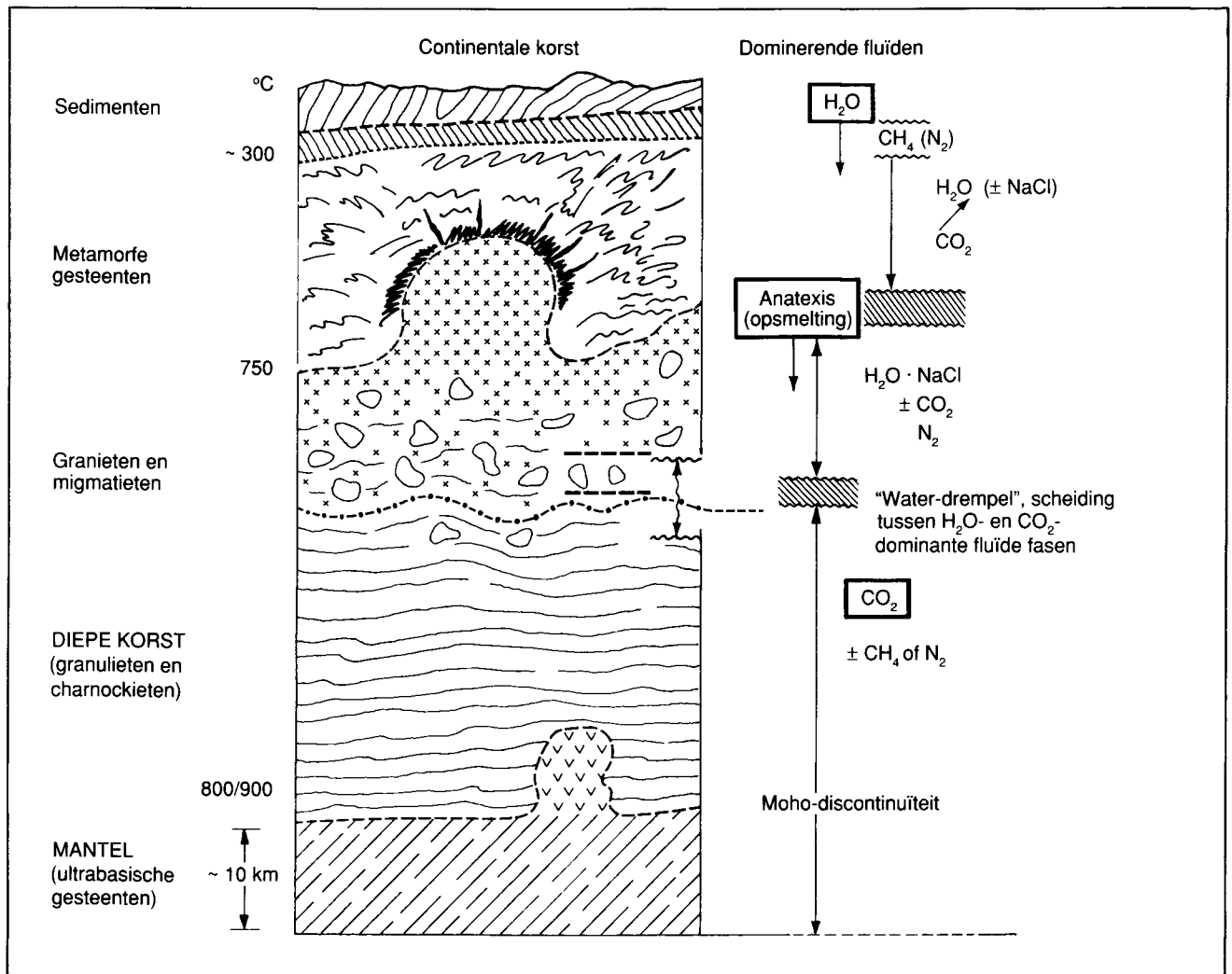
Voornaamste vloeibare systemen

Gelukkig, zo ingewikkeld als de bestudering van vloeibare insluitels kan zijn, zo gering is in de meeste gesteenten het aantal systemen (Roedder, 1984). In verreweg de meeste gevallen gaat het om water dat soms zuiver voorkomt, maar meestal met zouten in oplossing (dat wil zeggen natrium-, kalium- en/of calciumchloride bevattende pekkel). Daarna komen koolzuur (CO₂), koolwaterstoffen (minerale olie), methaan (CH₄), stikstof (N₂), zwavelwaterstof (H₂S), en slechts zeer zelden koolmonoxide (CO), zwaveldioxide (SO₂), zuurstof (O₂), waterstof (H₂), enz. Deze systemen kunnen enkelvoudig zijn, maar ook alle mogelijke



Afb. 3. Regiem van vloeistoffen in oceanische lithosfeer en in actieve continentranden. "Diep CO₂" wordt systematisch verdund door waterrijke vloeistoffen (zeewater), die het gehele systeem domineren, en komt slechts uitzonderlijk voor bij diep onderzees vulkanisme

(diepte > 5 km). Vloeibaar CO₂ kan voorkomen in diepe slenken. MORB = mid-oceanische-rugbasalten: vorming van de oceanische korst. In subductiezones ontstaan waterrijke magma's: andesieten.



mengsels komen voor. Bijzonder spectaculair zijn de mengsels van water met koolzuur ($\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$). Aangezien beide vloeistoffen bij kamertemperatuur niet met elkaar mengbaar zijn, vormt het koolzuur twee concentrische bellen (van respectievelijk vloeistof en gas) in het water (afb. 2).

Elk systeem kan een grote variatie in molair volume hebben, het volume dat ingenomen wordt door één mol (een bepaald aantal moleculen) van een bepaalde verbinding; hoe kleiner het volume, des te groter de dichtheid. De grote variatie in molair volume wordt met microthermometrie afgeleid van grote verschillen in de homogenisatie-temperatuur van stoffen: de temperatuur waarbij vloeistof overgaat naar gas, of omgekeerd. Bij koolzuur kan die temperatuur variëren van $+31\text{ }^\circ\text{C}$ (kritische temperatuur bij een kritische dichtheid van ongeveer $0,4\text{ g/cm}^3$, molair volume = $110\text{ cm}^3/\text{mol}$) tot lager dan $-60\text{ }^\circ\text{C}$ voor koolzuur van extreem hoge dichtheid ($d > 1,17\text{ g/cm}^3$, molair volume = $37\text{ cm}^3/\text{mol}$). Verschillende insluitels, die tegelijkertijd gevormd zijn, kunnen een grote verscheidenheid in onmengbaarheid vertonen (magma/vloeistof, vloeistof/vloeistof, kortom verschillende "kook"-verschijnselen). Deze verschillende soorten insluitels binnen één gesteente dienen als sporen voor het waarnemen van feiten met bijzonder belangrijke geologische gevolgen (zoals gesteente-fractuur, hernieuwd afzetten, enz.) die anders totaal onopgemerkt zouden zijn gebleven.

Verdeling van vloeistoffen in oceanische en in continentale omgeving

Ondanks de grote complexiteit die men kan aantreffen binnen één bepaald stuk gesteente, leveren talrijke studies over de hele

Afb. 4. Model voor de spreiding van vloeistoffen in de continentale lithosfeer. In de diepe korst en in de bovenmantel is CO_2 de dominerende vloeistof fase (Touret, 1987). Zie als voorbeeld van anatexis: afb. 5.

aarde tesamen een tamelijk constant en samenhangend beeld, met in eerste instantie een duidelijk verschil tussen oceanen en continenten (afb. 3 en 4).

Zoals te verwachten is, wordt de oceanische korst overheerst door water (afb. 3). In mid-oceanische ruggen vindt wisselwerking plaats tussen de uit de aardmantel afkomstige basalten (MORB) en zeewater, dat enige kilometers diep kan infiltreren en dan na verhitting door magma naar de oceaانبodem kan terugkeren, bv. in de vorm van "black smokers". Dit proces kan leiden tot een geweldige verandering van de hele oceanische korst. Andere vloeistoffen in deze gesteenten, met name koolzuur (CO_2), worden door het circulerende water te zeer verdund om aangetoond te kunnen worden, behalve in sommige diepgelegen intrusiegesteenten (dieper dan 5 km), waar het zeewater niet bij kan komen. Vanwege de bekende dichtheidsomkering tussen koolzuur en water (de dichtheid van CO_2 is bij een bepaalde druk, afhankelijk van de temperatuur, groter of kleiner dan 1 g/cm^3) kan CO_2 accumuleren op de bodem van diepe slenken in de oceaan, tenminste als de temperatuur boven $40 - 50\text{ }^\circ\text{C}$ blijft. Bij lagere temperatuur keert de dichtheid om en wordt CO_2 in de oceaan verdund.

Hetzelfde beeld van overheersing door water vindt men in de metamorfe oceanische korst van subductiezones; dit leidt tot waterhoudende magma's (andesieten), die kenmerkend zijn voor gebieden waar oceanen en continenten daadwerkelijk op elkaar botsen.



Afb. 5. Migmatieten in de Bamble streek, Zuid-Noorwegen: de lichtere gedeelten met granietische samenstelling zijn opgesmolten geweest en daarna gerekristalliseerd; donkere gedeelten met meer basische samenstelling zijn niet gesmolten.

Geheel anders is de situatie in continentale omgeving (afb. 4; Touret, 1987). Weliswaar is water weer de dominante vloeistof bij de vorming van afzettingsgesteenten aan het aardoppervlak, maar zodra metamorfose plaats vindt (ruwweg boven 250 °C), ziet men andere vloeistoffen in de gesteenten. Eerst treden dan zware koolwaterstoffen op (minerale olie), vervolgens methaan (CH₄) en tenslotte - mits zuurstof aanwezig is - variabele hoeveelheden koolzuur (CO₂), gewoonlijk gemengd met water (homogene CO₂-H₂O-mengsels).

Bij een temperatuur van ongeveer 700 - 800 °C zal een gedeelte van de meeste afzettingsgesteenten smelten: granietische smeltproducten gaan zich afscheiden van de meer basische bestanddelen, die moeilijker smelten; dit proces leidt tot typische gesteenten, die men migmatieten noemt (afb. 5). Deze gesteenten nemen bij voorkeur water op zodat andere vloeistoffen, met name CO₂, dominant worden.

Een belangrijk en onverwacht resultaat van de bestudering van vloeibare insluitsels in diepe gesteenten was, dat deze CO₂-gedomineerde omgeving zich ver onder de migmatieten uitstrekt: tot in de hoog-metamorfe gesteenten (granulieten) van de diepe korst, en zelfs tot in de bovenmantel (afb. 4).

Gesteenten uit de bovenmantel die snel naar het aardoppervlak getransporteerd zijn, zoals de ultrabasische xenolieten in alkalische basalten, bevatten CO₂-insluitsels met hoge dichtheid. Dit duidt erop, dat vrij koolzuur mogelijk voorkomt tot een diepte van 100 of 120 km.

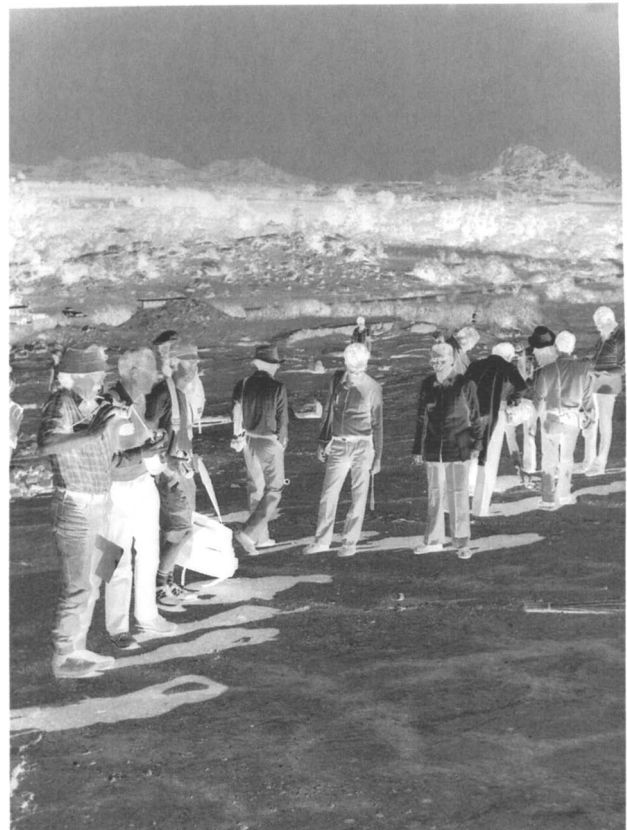
De algemene overvloed aan CO₂ is vandaag de dag een van de meest besproken problemen van de petrologie van stollingsgesteenten; een aantal argumenten doet vermoeden dat deze overvloed heel belangrijk is.

Een van de sterkste argumenten voor die belangrijke rol van CO₂ wordt geleverd door de spectaculaire fenomenen bij de vorming van charnockiet-aders in Zuid-India. Charnockieten zijn granieten die orthorhombische pyroxeen bevatten; het zijn magmatische gesteenten die alleen in de diepe aardkorst gevormd kunnen worden. In het veld ziet men (afb. 6), dat charnockiet gevormd wordt uit een gneiscomplex (oude metamorfe sedimentaire gesteenten) langs een netwerk van aders die overeenkomen met oude breuken in het gesteente. De charnockiet-aders bevatten nog een grote hoeveelheid CO₂ in de vorm van fluïde insluitsels in verschillende mineralen: in kwarts en veldspaat, maar vooral in granaat. Op enige afstand (een paar km) van de plaats met de charnockiet-aders in gneis komen massieve charnockiet-lichamen voor, zoals in Doddabetta (Touret en Hansteen, 1988), waarin granaatkristallen tot 10-15 volume-% aan fluïde insluitsels van CO₂ kunnen bevatten (afb. 7). Het gaat om CO₂ van zeer hoge dichtheid, meer dan 1 g/cm³, met homogenisatie-temperaturen tussen -40 en -50 °C. Met een dichtheid van ongeveer 4 g/cm³ voor granaat komt men zo tot een gehalte van 3 - 5 gewichts-% CO₂ in dit mineraal!

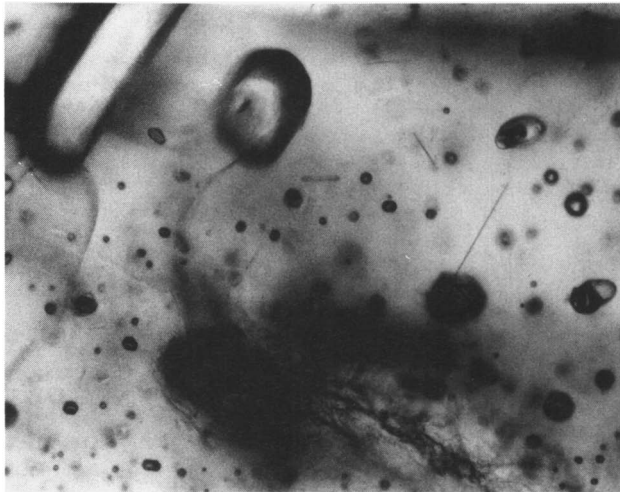
De charnockiet-aders zijn op grote diepte (tenminste 15-25 km) ontstaan, toen grote hoeveelheden CO₂, waarschijnlijk afkomstig van de massieve charnockieten, langs oude breuken en barsten van de gneis heen spoelden. Dit proces heeft zich voorgedaan bij hoge temperatuur (tenminste 800 °C) tijdens de metamorfe fase die gepaard gaat met de intrusie van magmatische gesteenten op grote diepte.

De koolstofparadox en diep CO₂

Alle afzettingsgesteenten (sedimenten) zijn zonder uitzondering langs een korte of lange weg van omzetting en verwerking afkomstig van magmatische gesteenten. Dit proces is al aan de gang



Afb. 6. Grote belangstelling voor het resultaat van de percolatie van enorme hoeveelheden CO₂ langs een oud stelsel van breuken en scheuren: donkere aders van charnockiet zijn gevormd in lichter gekleurde gneis. Deelnemers aan een internationaal charnockiet-symposium in Zuid-India in 1988.



Afb. 7. Grote aantallen fluïde insluitsels met CO_2 van hoge dichtheid in granaat in een massieve charnockiet, Doddabetta in de Nilgiri Hills bij Ooty in Zuid-India. Afmeting van kleinste insluitsels ongeveer $5 \mu\text{m}$.

sinds het ontstaan van de aarde. Het oudste gesteente dat we kennen op aarde, de 4 miljard jaar oude Acasta-gneis van NW-Canada, is van origine een sedimentgesteente, dat is ontstaan door afbraak van een zonder twijfel magmatische aardkorst, waarvan nu echter niets meer overgebleven is.

Bij vergelijking van het CO_2 -gehalte in magmatische en in sedimentaire gesteenten komt men tot een vreemde vaststelling, die soms de *koolstof-paradox* genoemd wordt: sedimentgesteenten bevatten gemiddeld veel meer CO_2 dan de magmatische gesteenten. De bekende sedimenten kalksteen en marmer (carbonaatgesteenten) bevatten natuurlijk zeer veel CO_2 , tot tientallen procenten, maar alle sedimenten samen bevatten gemiddeld nog 3 - 5 gewichts-% CO_2 . Magmatische carbonaatgesteenten (carbonatiëten) zijn daarentegen uiterst zeldzaam, en het gemiddelde CO_2 -gehalte van magmatische gesteenten is slechts 0,01 tot 0,1 gewichts-%. Bovendien is het duidelijk, dat het aandeel van de carbonaatgesteenten in de sedimenten toeneemt naarmate de geologische tijd voortschrijdt. In de Alpen bestaan de jonge sedimenten van het Tertiair ofwel uit kalksteen of uit kalkhoudende zandsteen, zowel de gesteenten die vóór de gebergtevorming (flysch) als erna (molasse) gevormd zijn. De oude afzettingen van het Precambrium en van het Paleozoïcum bestaan echter voor-

namelijk uit grauwacke en uit zandsteen of kwartsiet (bv. de bekende gebande ijzerkwartsieten), die arm zijn aan carbonaatmineralen.

We moeten dus vaststellen, dat er in de loop van de geologische tijd een regelmatige toevoer van CO_2 geweest moet zijn, die geleidelijk in de sedimentgesteenten is opgenomen door middel van een uitwisselingsproces, hetzij in water maar vooral in de lucht (atmosfeer). Die gesteenten kunnen daarna weliswaar op grote diepte in de aardkorst terecht komen en tijdens metamorfose hun CO_2 -gehalte weer afstaan, maar de totale CO_2 -balans in sedimenten is negatief. Een regelmatige toevoer van nieuw CO_2 vanuit de diepte, *juveniel* CO_2 , is dus een absolute noodzaak om het toenemende carbonaatgehalte van sedimenten te kunnen verklaren (afb. 8).

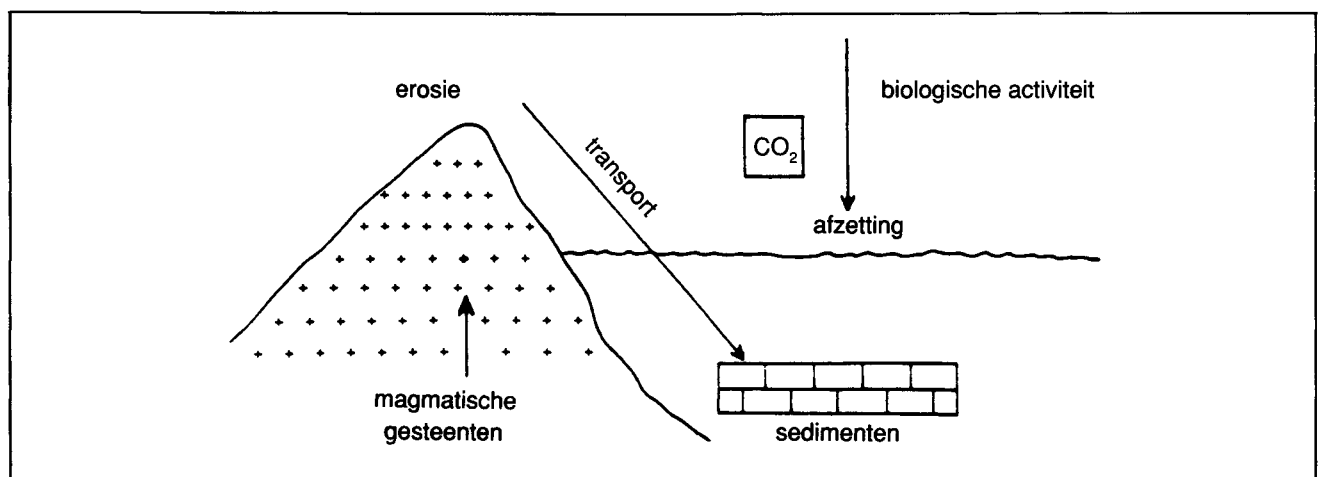
Een ander argument voor deze regelmatige toevoer van CO_2 vanuit de diepte wordt geleverd door een eenvoudige vaststelling. Indien men uit alle carbonaatgesteenten die nu aan het oppervlak van de aarde voorkomen het daarin aanwezige CO_2 zou vrijmaken, dan zou een CO_2 -druk ontstaan in de orde van grootte van 50 tot 80 atmosfeer. We zijn dan wel een heel eind verder dan de thans aan de atmosfeer toegevoegde fracties van een procent CO_2 , die vrijkomen bij de verbranding van fossiele brandstoffen (steenkool, olie, aardgas). Toch zijn die kleine hoeveelheden zeer belangrijk omdat zij mogelijkerwijze klimaatsveranderingen teweeg kunnen brengen (het bekende "broeikas-effect"). Indien alle koolstof in sedimenten alleen maar steeds opnieuw verwerkt zou worden, dan moet men aannemen dat bij het ontstaan van de aarde alle CO_2 in de atmosfeer was opgenomen. Dit is misschien wel het geval op de planeet Venus, waar de dampkring inderdaad de juiste eigenschappen heeft: een druk van tientallen atmosfeer van praktisch zuiver CO_2 .

Op aarde heeft een dergelijke atmosfeer echter nooit bestaan: een zo hoge CO_2 -druk zou zich in heel andere verweringsverschijnselen uiten dan die we nu kennen, en hun eventuele bestaan zou sporen nagelaten hebben in de gesteenten die erdoor gevormd zijn. Maar de oudste sedimenten van het Precambrium hebben een volkomen normale samenstelling, die weergeeft dat het CO_2 -gehalte in de atmosfeer toentertijd van dezelfde orde van grootte was als tegenwoordig. In de loop der tijden zijn er zeker perioden geweest, bv. in het Krijt, waarin het CO_2 -gehalte tot 10 - 25 maal hoger was dan nu, maar nooit meer.

We moeten dus besluiten dat de bovenmantel, diep in de aarde, geleidelijk CO_2 afgeeft naar het oppervlak toe, maar dit koolzuur wordt daar zeer snel gebruikt voor de vorming van carbonaten in de sedimenten.

Met welk mechanisme wordt deze continue stroom van diep CO_2 vanuit de mantel naar het oppervlak getransporteerd?

Een wel zeer voor de hand liggende bron van diep CO_2 zijn de



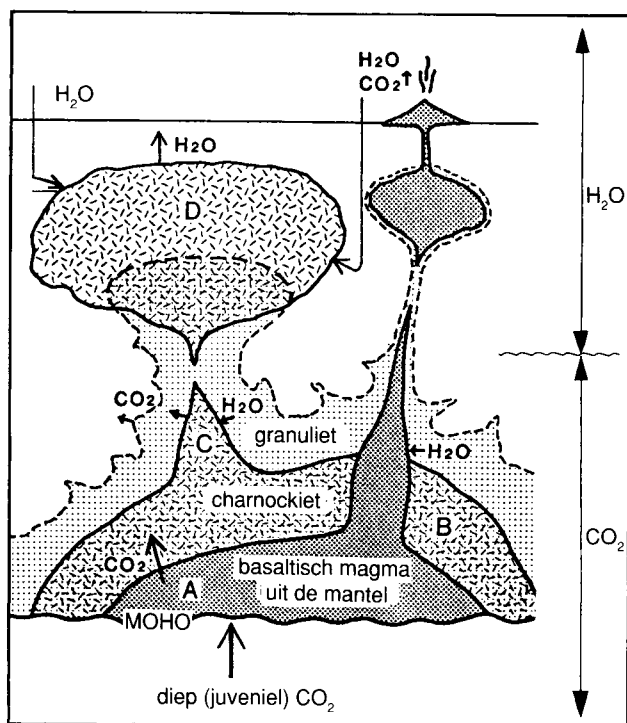
Afb. 8. De "koolstof-paradox". Sedimentgesteenten bevatten 50 - 100 keer meer CO_2 dan de magmatische gesteenten waaruit ze gevormd zijn. Vernietiging van alle thans aan het aardoppervlak voorkomende carbonaat zou leiden tot een CO_2 -druk van

50 - 80 atmosfeer. De combinatie van dit gegeven met het feit dat de hoeveelheid carbonaat in de tijd geleidelijk is toegenomen, maakt een regelmatige toevoer naar de atmosfeer noodzakelijk van "juveniel" CO_2 uit de bovenmantel.

vulkanische gassen, die voor een gedeelte direct van de bovenmantel komen (afb. 9). Maar voor het CO₂-probleem op wereldschaal kunnen zij nooit een bevredigende oplossing geweest zijn, en wel om de volgende redenen. De verhouding van de isotopen van een aantal vulkanische gassen, zowel van koolstof (C-13) maar vooral van edelgassen als helium en neon, toont aan dat zij grotendeels opnieuw verwerkt koolstof bevatten, vooral in de vulkanen die in verband staan met subductiezones (afb. 3). Dit zijn de plaatsen waar op aarde de meeste vulkanen voorkomen: de gassen van deze vulkanen zijn afkomstig van de opsmelting van eerder gevormde gesteenten. Bovendien heeft men nooit enig verband kunnen leggen tussen grote vulkanische activiteit en verhoogde vorming van carbonaten in sedimenten. Het einde van de Krijt-periode wordt bv. gekenmerkt door een grote hoeveelheid carbonaatgesteenten, en wel over de hele wereld; het CO₂-gehalte van de atmosfeer was toen beduidend hoger dan nu. Sommigen hebben getracht om dit hoge CO₂-gehalte te verklaren door grote granietische intrusies (bv. in de USA), maar vooral door de uitvloeiing van enorme hoeveelheden plateau-basalten in Deccan (India). Maar de bewijzen daarvoor zijn miniem: granieten bevatten in het algemeen slechts weinig CO₂, en de Deccan-basalten doen rustige erupties vermoeden van zeer vloeibare lavastromen, die slechts weinig gas bevatten. Bovendien komen in de weinige gasholten in deze basalten meestal mineralen voor als zeolieten (bv. in de bekende vindplaatsen rond Poona in India), die aanduiden dat de gassen vooral uit waterdamp bestonden, en niet uit CO₂!

Een model voor diep CO₂: periodieke mantelontgassing

Om alle net geschetste redenen en problemen verdedig ik een model van CO₂-opslag in de continentale onderkorst (afb. 9). In de loop van de geologische geschiedenis zijn grote hoeveelheden CO₂ beschikbaar gekomen door ontgassing in de bovenmantel. Dit CO₂ infiltreert niet direct naar de continentale korst, maar wordt getransporteerd door intrusies van mantelbasalten diep in de aardkorst. Deze basalten geven CO₂-rijke vloeistoffen af en veroor-



Afb. 9. Model voor de tijdelijke opslag van CO₂ in de onderste continentale korst tijdens episoden van granulietvorming (Frost en anderen, 1987).

zaken charnockietvorming in de omgevende gesteenten, en vervolgens granulietmetamorfose daaromheen: CO₂ wordt telkens een stap verplaatst (zie ook Frost en anderen, 1987). Deze granulietvormende gebeurtenissen zijn zeer belangrijk: zij geven weer wanneer grote hoeveelheden CO₂ uit de mantel vrijgemaakt werden. De ouderdom van granuliet-episoden is bekend, bijvoorbeeld 2,7, 1,8, en 1 miljard jaar geleden. CO₂ wordt dus alleen tijdelijk opgeslagen in de diepe korst, namelijk tijdens omstandigheden waarbij hoge temperatuur heerst. De basaltintrusies zijn ook verantwoordelijk voor de verdikking van de korst. Doordat deze dikke korst een nieuw isostatisch evenwicht zocht en dus omhoog kwam, ging CO₂ migreren naar het oppervlak en werd het opgenomen in de totale geochemische cyclus. Precieze mechanismen zijn niet bekend, maar deformatie (breuk- en scheurzones) en continentaal vulkanisme spelen zeker een belangrijke rol. Uiteindelijk zal diep CO₂ de atmosfeer bereiken, maar misschien pas na miljoenen jaren van transport in de onderkorst.

De grootte van de CO₂-fluctuaties in de atmosfeer is niet precies bekend, maar deze fluctuaties kunnen zeer belangrijk geweest zijn, zeker 10 - 25 maal de huidige waarden. Het druk besproken, door de mens veroorzaakte "broeikaseffect" is veel kleiner dan die cijfers en moet dus beoordeeld worden binnen de totale evolutie van CO₂ in ruimte en tijd, gedurende de meer dan 4 miljard jaar van de aardgeschiedenis.

Literatuur

- Frost, B.R., Frost, C.D. and Touret, J.L.R. (1987) Magmas as a source of heat and fluids in granulite metamorphism. In: D. Bridgwater (ed.) Fluid movements - Element transport and the composition of the deep crust, Kluwer Academic Publications, pp.1-18.
- Roedder, E. (1984) Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol. 12, 644 pp.
- Sorby, H.C. (1858) On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. Geol. Soc. London Quart. J., 14, Pt. 1, pp. 453-500.
- Touret, J.L.R. (1987) Fluid distribution in the continental lithosphere. In: A. Kröner (ed.) Proterozoic Lithospheric evolution, Geodynamics Series, Vol. 17, pp. 27-34.
- Touret, J.L.R. en Burke, E.A.J. (1988) Fluide fasen in mineralen. Gea, Vol. 21, nr. 3, pp. 61-70.
- Touret, J.L.R. and Hansteen, Th.H. (1988) Geothermobarometry and fluid inclusions in a rock from the Doddabetta charnockite complex, Southwest India. Rendiconti Soc. Italiana Mineral. Petrol., Vol. 43, pp. 65-82.

*

De vormgeving en de Nederlandse tekst van dit artikel zijn tot stand gekomen met belangrijke bijdragen van E.A.J. Burke (Vrije Universiteit, Amsterdam).

*

Uit de mantel afkomstig basaltisch magma (A) levert voor een klein gedeelte direct CO₂ aan het aardoppervlak door vulkanisme. De meerderheid van het magma blijft echter in de onderkorst, neemt water op uit de omringende gesteenten en levert CO₂-rijke vloeistoffen af. Warmte en vloeistoffen veroorzaken charnockietvorming (B), meer zure magma's in C) en daaromheen granuliet-metamorfose. Beide processen onttrekken water uit omringende gesteenten en geven CO₂ af. Zure magma's vormen batholieten (D), waarin waterhoudende granieten domineren. Bij de afkoeling en het omhoogkomen van de aardkorst zullen de granulieten hun CO₂-gehalte vrijgeven aan de totale geochemische cyclus: diep CO₂ is dan vanuit de mantel naar het aardoppervlak getransporteerd.