

Inhoud:

Het ontstaan van agaat.....	69	Herinneringen van een veldgeoloog: Ediacara (Zuid-Australië).....	91
Buitenaards bestaan?	79	Geologische ervaringen van een Gea-lezer: De gevlogen (oer-)vogel.....	93
De continentale diepteboring in Duitsland: een speldeprik in de aardkorst?.....	84	De GEA-Pionier, VI. Determinatie van sedimentaire gesteenten	94
De systematiek van mineralen: VIII, silicaten deel 2	89	Convolute gelaagdheid.....	96

Het ontstaan van agaat

vertaald uit het Duits door E.A.J. Burke

door Dipl.-Min. Michael Landmesser
Institut für Geowissenschaften (Mineralogie)
Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
D-6500 Mainz, Duitsland

1. Inleiding

Agaten behoren tot de merkwaardigste en verbazingwekkendste produkten van mineraalvorming. De verbazing over het natuurverschijnsel "agaat" berust in wezen op twee feiten.

Allereerst is er de ongelooflijke verscheidenheid aan gevormde structuren, waardoor elke afzonderlijke agaat als iets eigennoms overkomt, als een merkwaardigheid van de natuur. Bij het bekijken van een wat grotere verzameling agaten kan men de algemeen geldende wetten van de bouw van agaten niet herkennen, in ieder geval niet op het eerste gezicht. De verwarrend grote variatie in de morfologie van agaten, deze spreekwoordelijke individualiteit, verbaast niet alleen de leken, maar irriteert ook aanvankelijk de juist naar algemene wetten en ontstaanswijzen zoekende natuurwetenschappers.

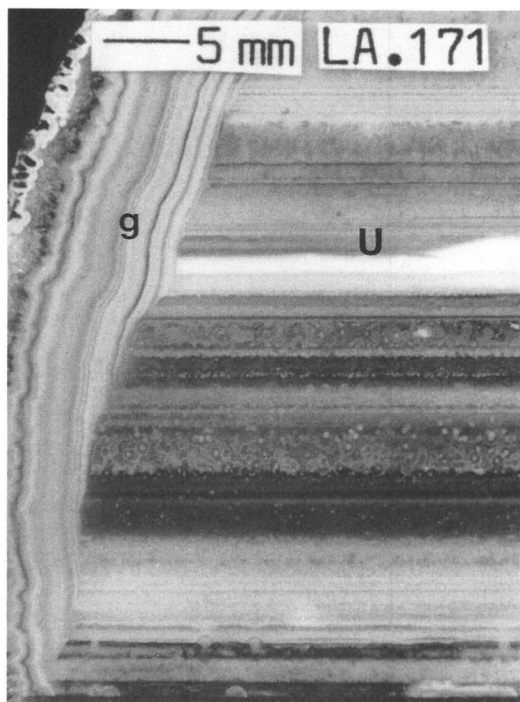
Maar er is nog een tweede, veel eenvoudiger moeilijkheid, die het onderzoek aan agaten altijd beziggehouden heeft. Hoe is het eigenlijk mogelijk dat SiO_2 zich binnen een groter gesteentelichaam verzameld heeft in dergelijke compacte vormen als agaten? Dat is het grote probleem van de SiO_2 -opeenhopping bij de vorming van agaat (zie bijv. Nacken, 1948).

Deze beide hoofdproblemen van het onderzoek aan agaten, de verklaring van de gevormde structuren en die van de SiO_2 -accumulatie, zijn gedurende de laatste 200 jaar

tot op heden de oorzaken geweest van steeds maar weer felle wetenschappelijke discussies. Zo vindt men bijvoorbeeld in de actuele literatuur zowel de mening dat agaten neergeslagen zijn binnen een nog niet volledig gestold magma (Moxon, 1991, p. 259), als de opvatting dat agaten bij ongeveer 50°C uit waterige oplossingen gevormd zijn (Fallick *et al.*, 1985, p. 672). Bovendien zijn dit slechts twee willekeurig gekozen standpunten uit een groot aantal wetenschappelijke meningen; een uitvoerig overzicht van de meest diverse oudere theorieën over agaat vindt men bij Landmesser (1984). Maar deze twee standpunten tonen reeds aan dat de kwestie van de agaatgenese één van die zeer zeldzaam geworden aardwetenschappelijke problemen is, waarbij ook nu nog zoiets bestaat als een controverse tussen Neptunisme en Plutonisme. Het is blijkbaar in het geheel niet eenvoudig om de agaten een algemeen aanvaarde plaats binnen ons huidige "petrologische wereldbeeld" te geven. Maar voor wij dit probleem meer in detail kunnen behandelen, moeten we eerst eens de twee belangrijkste agaatstructuren wat preciezer bekijken.

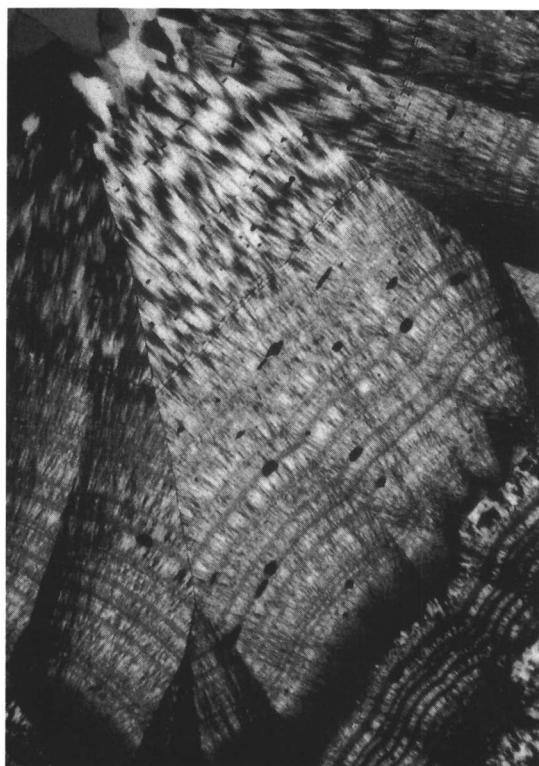
2. Gewone gebandheid en Uruguay-structuur

De meest opvallende morfologische eigenschap van de agaten is hun gebandheid. Sinds lange tijd worden daarin twee soorten van banden onderscheiden.



Afb. 1. Agaat met gewone banden (g) en met horizontale Uruguay-banden (U).

Van de eerste soort banden wordt meestal beweerd dat zij precies evenwijdig verlopen aan de omtrek van de agaatgeode, zoals op elkaar geplakte vellen behangselpapier. Dit type van banden wordt "gewone gebandheid" genoemd (in het Duits *gemeine Bänderung*, in het Engels *ordinary banding*), en wordt in afb. 1 met de letter "g" aangeduid. De genoemde "behangseltheorie" is echter niet juist, daar komen we nog op terug. Onder de polarisatiemicroscop (doorvallend licht, gekruiste nicols) ziet men in deze agaatzones een vezelige structuur, loodrecht op de gewone gebandheid



(afb. 2). Deze vezels bestaan evenwel niet uit naaldvormige kristallen, zoals in veel leerboeken ten onrechte beweerd wordt. Wat men onder de polarisatiemicroscop ziet, is in de eerste plaats een optisch effect, en verder niets. De eigenlijke oorzaak van deze polarisatie-optische vezeligheid kan niet alleen met behulp van een zichtbaar-licht-microscop opgelost worden. Daarom kunnen wij hier voorlopig alleen van "fenovezels" spreken (in het Duits *Phänofasern*), een vakterm die door Pense (1966, p. 10) ingevoerd is voor dit polarisatie-optisch verschijnsel. Bij chalcedoon in de eigenlijke zin zijn die fenovezels juist zo georiënteerd zoals men **niet** zou vermoeden. Van kwarts weet men dat de kristallen langgerekt-prismatisch groeien in de richting van de kristallografische *c*-as. Maar in chalcedoon staat de *c*-as van de cryptokristallijne kwartsdeeltjes ongeveer loodrecht op de lengterichting van de fenovezels. Dit feit, bekend als "de optisch negatieve aard van de lengterichting van de fenovezels", heeft de mineralogen sinds lange tijd verbaasd.

De tweede soort banden in agaten wordt (ongeacht de vindplaats!) "Uruguay-banden" genoemd (in het Duits *Uruguay-Bänderung*, in het Engels *Uruguay-banding*). Deze banden (in afb. 1 met de letter "U" aangeduid) bestaan uit ongeveer rechte, min of meer evenwijdige, horizontaal georiënteerde lagen in de agaat. Sinds lang worden agaten waarin dit type van banden voorkomt "Uruguay-agaten" of "agaten van het Uruguay-type" genoemd. Deze Uruguay-banden kan men ook onder de polarisatiemicroscop duidelijk van de gewone banden onderscheiden: afb. 3 toont Uruguay-lagen met een fijnkorrelige structuur. Overigens kunnen de Uruguay-lagen er onder de polarisatiemicroscop zeer verschillend uitzien, ook hierin kunnen fenovezels voorkomen. Maar dergelijke fenovezels in de Uruguay-banden staan - in tegenstelling tot de fenovezels in de gewone banden - in de regel **niet** loodrecht op de gebandheid.

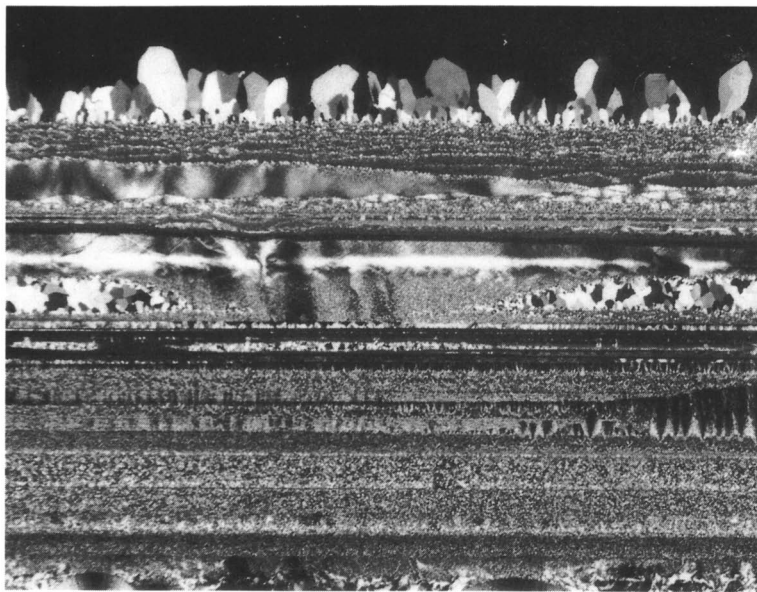
Naast deze beide soorten van agaatbanden zijn er nog een hele reeks andere agaatstructuren, waarop we hier echter niet verder kunnen ingaan.

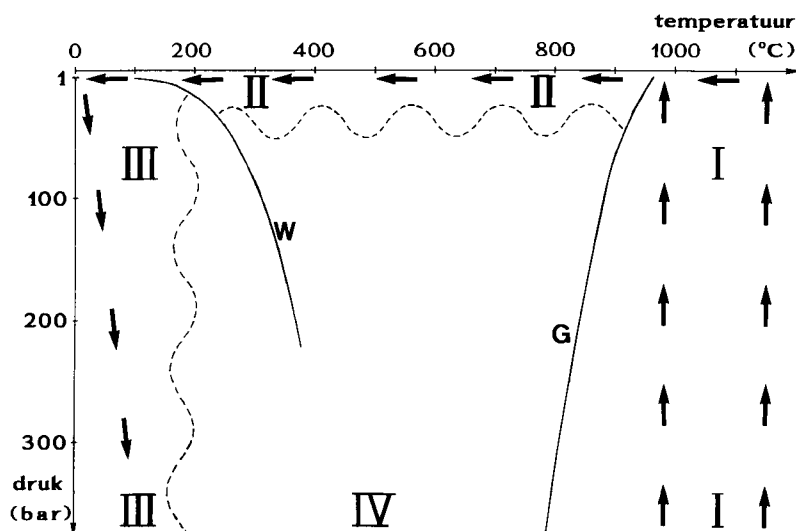
3. De fysisch-chemische omstandigheden bij de vorming van agaat

Voor de opheldering van het ontstaan van agaten is het allereerst zeer belangrijk om de grenzen te bepalen van het druk-temperatuur-gebied (P-T-gebied) waarin ze gevormd worden. Ontstaan

Afb. 2. Slijpplaatje van agaat onder de polarisatiemicroscop met gekruiste nicols: loodrecht op de gewone gebandheid zijn fenovezels zichtbaar.

Afb. 3. Uruguay-banden onder de polarisatiemicroscop (gebruikte nicols).





Afb. 4. Schema van de druk-temperatuur-gebieden van een aantal geologische processen. I = magmatisch gebied, II = (laat-)vulkanisch gebied, III = sedimentair-diagenetisch gebied, IV = gebied van de metamorfose, G = smeltcurve van graniet (bij surplus van H_2O), W = dampdrukcurve van water. De pijlen geven de P-T-omstandigheden aan, die in aanmerking komen voor een discussie over de vorming van agaat in vulkanische gesteenten. De twee evenwijdige rijen met pijlen in gebied I geven aan dat verschillende soorten magma bij verschillende temperaturen gevormd worden.

agaten in magmatische, in (laat-)vulkanische, of in sedimentair-diagenetische P-T-omstandigheden (afb. 4)? Basaltische en andesitische vulkanieten zijn de gesteenten waarin agaten, in de vorm van geoden, het meest voorkomen. Deze vulkanische gesteenten hebben tijdens hun vorming de drie genoemde P-T-gebieden na elkaar doorlopen (pijlen in afb. 4). De agaten in dergelijke vulkanieten kunnen derhalve alleen maar binnen die drie P-T-gebieden gevormd zijn. Het in afb. 4 eveneens aangegeven gebied (IV) van de metamorfose komt immers niet in aanmerking voor de in vulkanieten voorkomende agaten, omdat deze gesteenten in de regel dit gebied niet doorkruisen. Welk van de drie andere gebieden is dan beslissend voor het ontstaan van de agaten? Voor het beantwoorden van deze vraag kan men veel fysisch-chemische en petrologische overwegingen de revue laten passeren (zie bijv. Landmesser, 1986), maar hier zullen we ons tot een paar argumenten beperken.

Hoe kan men de vormingstemperatuur van agaat inperken op een manier die voor alle agaten geldig is? Dit probleem van de **algemene geldigheid** is in de tegenwoordige discussies over agaat buitengewoon omstreken, omdat sommige onderzoekers beweren dat er in de natuur meerdere, principieel verschillende mechanismen van agaatvorming zijn (bijv. Webster & Anderson, 1983, p. 225; Blankenburg, 1988, p. 146). Volgens deze auteurs zouden sommige agaten bij zeer hoge temperatuur ontstaan zijn, en andere agaten bij zeer lage temperatuur. Het is weliswaar in het geheel niet bewezen dat er werkelijk twee of meer mogelijkheden voor de vorming van agaat bestaan, maar zodra een dergelijke bewering ook maar als mogelijkheid geopperd wordt in de wetenschappelijke discussie, wordt het moeilijk **algemeen geldende** uitspraken te doen over de fysisch-chemische voorwaarden voor de vorming van agaten. Ziet men of mist men een of andere eigenschap aan agaat X, en besluit men op grond van dit gegeven bijv. tot een lage vormingstemperatuur, dan is daarmee immers de mogelijkheid niet afdoende weerlegd dat andere agaten Y van een ander voorkomen misschien door een totaal ander mechanisme (wellicht bij zeer hoge temperatuur) gevormd zijn. Dit is het van oudsher bekende wetenschapstheoretische "probleem van de inductie". Als wij ondanks deze discussieproblemen toch proberen tot **algemeen geldende** uitspraken te komen over de vormingstemperatuur van agaat, dan moet dat gebeuren op grond van die eigenschappen van agaat, waardoor agaten bij het ontbreken ervan eenvoudigweg geen agaat meer zijn: kortom, eigenschap-

pen die wezenlijk zijn voor de definitie van "agaat". Als men met die eigenschappen een omschrijving van de vormingstemperatuur van agaat zou kunnen bereiken, dan is die werkelijk **algemeen geldend**, dan zou de weg gevonden zijn om het probleem van de inductie te omzeilen.

Welnu, "agaat" wordt gewoonlijk gedefinieerd als "een geband aggregaat van chalcedoon", en "chalcedoon" is op zijn beurt gedefinieerd als "cryptokristallijne laag-kwarts". Zou het mogelijk zijn uit de eigenschap "cryptokristallijn" een geothermometrie voor de agaten af te leiden? Om die vraag te beantwoorden moeten we over meer gegevens beschikken omtrent de vergroeiingsvormen van de kristalletjes in chalcedoon, het "maaksel" of de "structuur" (in het Duits *Gefüge*, in het Engels *fabric*). Dat is slechts mogelijk met behulp van een elektronenmicroscop, want de kristallen in het **cryptokristallijne** materiaal blijven, zoals het woord zelf aangeeft, met een zichtbaar-licht-microscop voor ons **verborgen**. Om de elektronenmicroscopische structuren van de agaten te kunnen gebruiken bij het afleiden van hun ontstaan, moeten we eerst enige theoretische beschouwingen vooropstellen.

3.1. Maaksel-thermometrie van agaat

We kunnen beginnen met de triviale vaststelling, dat een substantie stabiel is naarmate zij een thermische belasting beter weerstaat en zij daarbij onveranderd blijft. Weliswaar heeft kwarts als "doorlopermineraal" een zeer groot P-T-stabiliteits-

veld, maar deze stabiliteit is in chalcedoon slechts betrekkelijk door zijn cryptokristallijne aard. Door de vele uiterst kleine kristalletjes in chalcedoon heeft agaat een relatief groot "intern oppervlak", of juist: een groot "intern grensvlak". Men vindt dat bijv. ook terug in de bekende porositeit van agaten, waardoor ze ook gekleurd kunnen worden. Door die grotere interne grensvlakken heeft chalcedoon in vergelijking met grote kwarskristallen een iets hogere energie-inhoud, want ieder grensvlak heeft een bepaalde "grensvlak-energie". Bij afgifte van deze grensvlak-energie worden de vele kleine kwartsdeeltjes in chalcedoon naar grotere kristallen omgezet, en wordt een meer stabiele toestand bereikt. In agaat is dus een drijfkracht aanwezig, waardoor de korrels in principe vanzelf grover kunnen worden. Gelijksortige kristallisatiegebeurtenissen kan men ook in het laboratorium waarnemen bij totaal verschillende chemische neerslag-reacties. Vaak vormt zich in een reageerbuis eerst een extreem fijnkorrelige neerslag, dus een groot aantal zeer kleine kristalletjes. Laat men de reageerbuis met oplossing en neerslag gedurende lange tijd staan, dan worden de korrels in het precipitaat geheel vanzelf grover, dit noemt men de "Ostwald-rijping". De allerkleinste kristalletjes in een aanvankelijk extreem fijnkorrelige neerslag zijn dus klaarblijkelijk duidelijk minder stabiel dan de eveneens kleine, maar relatief grotere kristalletjes die daar later uit gevormd worden. Deze verschillen in stabiliteit van deeltjes van verschillende grootte zijn direct te correleren met verschillen in oplosbaarheid van de kristalletjes. De stabiliteitsverhoudingen van kleine kristallen kunnen met behulp van hun oplosbaarheid aanschouwelijk voorgesteld worden: naarmate de kristallen groter worden, zijn ze stabiel en minder oplosbaar. Overeenkomstig lossen bij de Ostwald-rijping de kleinste kristallen op, terwijl de iets grotere in dezelfde oplossing groeien. Voor kristallen die in alle richtingen ongeveer dezelfde afmetingen hebben ("equidimensionale habitus") kan men bij benadering een deeltjes-straal r definiëren, en dan hun r -afhankelijke stabiliteit door een eenvoudige formule voorstellen via de omweg van hun oplosbaarheid L_r . Bij constante temperatuur geldt dat:

$$L_r = L_{\infty} \cdot e^{K/r} \quad (\text{Vergelijking van Gibbs-Thomson})$$

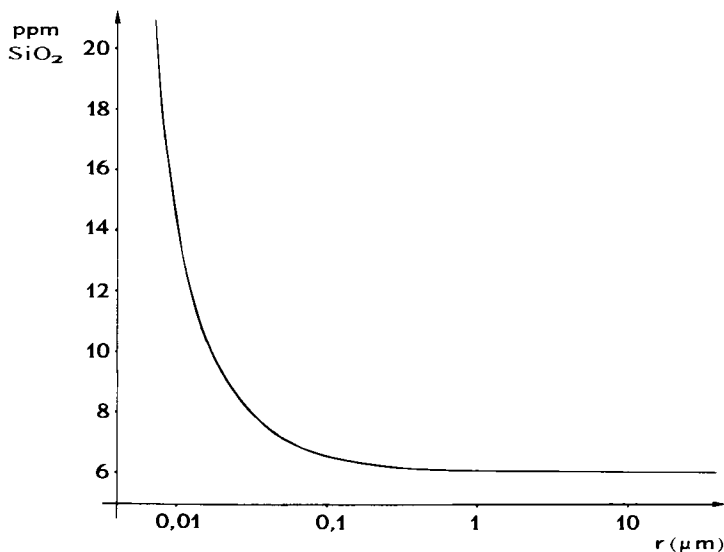
waarin:

K = een constante

r = deeltjes-straal

L_r = oplosbaarheid van een deeltje met straal r

L_{∞} = oplosbaarheid van een extreem groot kristal.



Afb. 5. De oplosbaarheid van kwarts in water bij 25°C, in functie van de straal r van de kwartskorrels. De curve is berekend met de vergelijking van Gibbs-Thomson, waarbij verondersteld is dat $L = 6$ ppm en dat de soortelijke grensvlak-energie 480 erg/cm^2 is. De **precieze** waarde daarvan is voor kwarts niet bekend (Parks, 1984), maar de min of meer willekeurige waarde van 480 erg/cm^2 heeft de juiste orde van grootte. Men zou net zo goed met 240 erg/cm^2 kunnen rekenen, dat zou niet tot een wezenlijk verschillende curve leiden.

Deze eenvoudige e -functie toont dat kristallen -theoretisch gezien- slechts bij oneindige grootte hun optimale stabiliteit (= kleinste oplosbaarheid) bereiken. Indien men deze e -functie tekent voor kwarts bij 25°C (afb. 5), dan ziet men tussen een korrel van $1 \mu\text{m}$ en een oneindig groot kristal nog slechts een klein verschil in oplosbaarheid, en dus in stabiliteit. In een reageerbuis kan daarom de Ostwald-rijping in experimenteel uitvoerbare tijdsruimten slechts tot een gemiddelde deeltjes-diameter van maximaal $1\text{--}2 \mu\text{m}$ plaatsvinden. Een verdergaande vergroting van de korrels is in het laboratorium in de regel niet waar te nemen, omdat de hiervoor beschikbare fysisch-chemische drijfkracht slechts klein is (Freundlich, 1922, p. 208-210; Meyer, 1977, p. 231). Die vergroting gebeurt weliswaar, maar het proces verloopt met toenemende korrelgrootte steeds langzamer. Voor een vergroting die duidelijk de $1\text{--}2 \mu\text{m}$ te boven gaat, moet men echt veel langer wachten dan in laboratoriumexperimenten mogelijk is. De natuur heeft daarentegen de zeer lange geologische tijd tot haar beschikking. De uiteindelijke korrelgrootte bij een natuurlijke rijping is essentieel afhankelijk van de **snelheid** van de rijping. Een van de belangrijkste factoren die deze snelheid bepalen, is de temperatuur. Het valt te verwachten dat een in de natuur rijpend aggregaat van kristallen bij hoge temperatuur een grotere korrelgrootte bereikt dan een vergelijkbaar aggregaat in dezelfde tijd bij lage temperatuur. **Dat is dan het aanknopingspunt voor het opstellen van een geothermometrie die op het maaksel gebaseerd is**, in het algemeen, maar in het bijzonder voor agaten. Uit het rijpingsstadium van een kristalaggregaat kan men gevolgtrekkingen afleiden over het temperatuurgebied waarin het gevormd is. Om een dergelijke "geothermometer" voor agaat op zijn minst grof te kunnen ijken, moeten we beschikken over kwantitatieve gegevens van het natuurlijke rijpingsgedrag van fijnkorrelige kwartsaggregaten. Het optimale modelsysteem daarvoor is een geologisch zeer uitgestrekt voorkomen van vuursteen, dat door een magmatische intrusie plaatselijk sterk verhit is. Het modelsysteem mag niet aan tektonische stress onderhevig geweest zijn, omdat een tektonische belasting de rekristallisatie zeer sterk beïnvloedt. In een natuurlijk systeem, dat aan al die voorwaarden voldoet, kan men dan het maaksel (de structuur) van de "gerijpte" vuursteen bepalen ten opzichte van de temperatuur die de vuursteen ondergaan heeft: die temperatuur moet immers vanuit het centrum van de intrusie naar buiten toe steeds lager geweest

zijn. Nu bestaan er inderdaad zulke gevallen, waarin de natuur tot op zekere hoogte zelf voor een antwoord gezorgd heeft op onze vraag naar bruikbare experimenten van lange duur.

3.1.1. Rijping van vuursteen in de contact-metamorfe aureool van "Beinn an Dubhaich" op het eiland Skye (Schotland)

Bij Beinn an Dubhaich op het eiland Skye komt een vuursteen bevattende dolomietlaag uit het Cambrium voor, waarin tijdens het Tertiair een granitisch lichaam geïntroduceerd is (Hoersch, 1981; Keller *et al.*, 1985). In de omgeving van de intrusie ontstond daardoor een zuiver thermische metamorfose zonder tektonische stress. Aan de buitenkant van de vuursteenknollen werden reactieranden gevormd met de klassieke metamorfe opeenvolging: talk --> tremoliet --> diopsied --> forsteriet; daarmee kan de temperatuur van de metamorfose in ieder geval grof bepaald worden. Tegelijkertijd werd de binnenkant van de vuursteenknollen gerekristalliseerd. Zo een rekristallisatie heeft twee typische kenmerken.

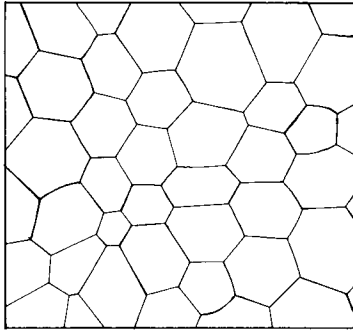
1. Er ontstaat een groeimaaksel, waarbij de kwarts kristallen door onderlinge concurrentie xenomorf (zonder kristalvlakken) met elkaar vergroeid zijn. In tweedimensionale doorsneden herkent men dergelijke aggregaten aan de typische "tripelpunten", plaatsen waar drie kristallen tegen elkaar aangroeien onder hoeken van ongeveer 120° (afb. 6). Dit maaksel geldt als zeer stabiel (Spry, 1976, p. 39 e.v.; Voll, 1961).

2. Bij stijgende temperatuur neemt de gemiddelde korrelgrootte binnen een tripelpunt-maaksel toe.

Tabel 1 geeft een overzicht van de fysisch-chemische omstandigheden en van de daardoor veroorzaakte veranderingen in het maaksel van de vuursteenknollen. De vermelde temperaturen zijn relatief ruwe schattingen bij een veronderstelde lithostatische druk (de druk van het bovenliggende gesteente) van 500 bar. Daarin zit een bepaalde onzekerheid, want van de werkelijke lithostatische druk kon slechts een variatie tussen 276 en 635 bar vastgesteld worden (Hoersch, 1981, p. 493). Een tweede onzekerheid berust

Tabel 1
Evolutie van het maaksel van contactmetamorf "gerijpte" vuursteenknollen op het eiland Skye (Schotland)

Stadium van de thermische metamorfose	Temperatuurgebied	Kwartsmaaksel
niet metamorf	$T < 200^\circ\text{C}$	hypidiomorfe tot xenomorfe cryptokristallijne kwarts; poreus maaksel; korreldiameter $\approx 0,2 - 1,0 \mu\text{m}$
talk-stadium	$T \approx 350\text{--}425^\circ\text{C}$	eerste rekristallisatie-effecten; slechts weinig korrelvergroting
tremoliet-stadium	$T \approx 425\text{--}440^\circ\text{C}$	duidelijk tripelpunt-maaksel; gemiddelde korreldiam. $\approx 1 \mu\text{m}$
diopsied-stadium	$T \approx 440\text{--}520^\circ\text{C}$	duidelijk tripelpuntmaaksel; gemiddelde korreldiam. $\approx 5 \mu\text{m}$
forsteriet-stadium	$T \approx 520\text{--}600^\circ\text{C}$	duidelijk tripelpuntmaaksel; gemiddelde korreldiam. $\approx 8 \mu\text{m}$
contact met de intrusie	$T \approx 600^\circ\text{C}$	
literatuurverwijzing	Hoersch (1981, p. 504)	Keller <i>et al.</i> (1985, afb. 3, 5, 7, 9, 11, pp. 1354-1358)



Afb. 6. Schematische voorstelling van een doorsnede door een typisch tripelpunt-maaksel.

op het feit dat de verhouding $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ in het gesteente tijdens de metamorfose niet precies bekend is. De geschatte temperaturen zijn namelijk afhankelijk van deze verhouding. Voor de probleemstelling bij de agaten zijn deze onzekerheden echter niet erg belangrijk. Voor de discussie over ons probleem voldoet een ander feit volkomen, en is het zelfs beslissend: in cryptokristallijne en poreuze kwartsaggregaten met een gemiddelde korrelgrootte van minder dan $1\ \mu\text{m}$ vindt al een duidelijk herkenbare rekristallisatie plaats bij een contactmetamorfe thermische belasting onder 500°C , en dat zelfs al relatief snel, want contact-metamorfe effecten zijn - geologisch gezien - slechts korte tijd actief. Bij een intrusie met een dikte van 1200 m (zoals bij Beinn an Dubhaich: Hoersch, 1981, p. 492) rekent men op een effectieve duur van de metamorfose van ongeveer 14.400 jaar: dit is de tijd dat de temperatuur ter plaatse maximaal was (Winkler, 1967, p. 81).

3.1.2. De rijping van vuursteen in de contact-metamorfe aureool van "Christmas Mountain" (Texas, U.S.A.)

In dit door Joesten (1983) beschreven voorbeeld intrudeerde een gabbro-smelt in een vuursteen bevattende kalksteen. Door de verhitting van het gesteente in de omgeving van de intrusie werden de korrels in de vuursteen meer of minder duidelijk vergroot, afhankelijk van de afstand van de intrusie en dus van de temperatuur. In de oorspronkelijke chalcedoon van de vuursteen hebben de

Tabel II

Evolutie van het maaksel in contactmetamorf "gerijpte" vuursteenknollen in de Christmas Mountains (Texas), samengesteld met gegevens van Joesten (1983, pp. 235, 240)

Afstand van de intrusie	Temperatuurgebieden (bij een druk van 325 bar en met 100 % CO_2 in de gesteenteporiën)	Korrel diameter van kwarts in de vuursteen
> 102 m	$T \leq 600^\circ\text{C}$	
101,7 m	↓ temperatuur neemt toe	$7,5 \pm 0,5\ \mu\text{m}$
96,5 m		$16\ \mu\text{m}$
49,4 m		$280 \pm 50\ \mu\text{m}$
25,6 - 23,5 m	$T \leq 940^\circ\text{C}$	
9,5 m	↓ temperatuur neemt toe	$560 \pm 120\ \mu\text{m}$
5,6 m		$620 \pm 110\ \mu\text{m}$
1,8 m		$1060 \pm 90\ \mu\text{m}$
0,0 m	$T \leq 1030^\circ\text{C}$	

kwartskristalletjes al een relatief grote diameter, namelijk $7,5 \pm 0,5\ \mu\text{m}$. In de richting van de intrusie wordt de diameter van de korrels gestaag groter, tot een afmeting van $1,06 \pm 0,09\ \text{mm}$. De cryptokristallijne aard verdwijnt dus! Details staan in Tabel 2. Bij dit natuurlijke proces van korrelvergroting zijn de invloedrijke factoren zowel de duur van de thermische belasting als de kinetische factoren temperatuur en samenstelling van de oplossing in de poriën. Voor een Ostwald-rijping in enge zin moet bijv. water als oplosmiddel in de poriënruimten aanwezig zijn, omdat dit type rijping een proces van oplossing en neerslag is (zie eerder). Joesten (1983, p. 241) acht het echter waarschijnlijk dat de poriën in de vuursteen van het net beschreven voorbeeld tijdens de rijping met zuiver CO_2 gevuld waren. Daarom vermoedt Joesten (1983, p. 237) dat de rekristallisatie geen echte Ostwald-rijping is, maar een rekristallisatie door diffusie in vaste toestand: diffusie van atomen over de "droge" kwarts-kwarts-korrelgrenzen heen. Joesten (1983, p. 247) schat de duur van de thermisch veroorzaakte korrelvergroting op ongeveer 1.000 jaar. Indien deze gegevens juist zijn, dan hebben ze de volgende betekenis voor ons agaat-probleem: zelfs een in vergelijking met agaatmateriaal (zie verder) relatief "grof"-korrelig (diameter $7,5 \pm 0,5\ \mu\text{m}$) kwartsaggregaat wordt al grover in de geologisch korte tijd van 1.000 jaar, als het aan een temperatuur van boven 700°C onderworpen wordt, zelfs als het kinetisch belangrijke oplosmiddel water slechts in geringe hoeveelheden in het gesteente aanwezig is of helemaal ontbreekt. Weliswaar kan Joesten (1983, p. 240 e.v.) de vroegere afwezigheid van water in de poriën niet met volledige zekerheid bewijzen, maar in ieder geval kan men vaststellen dat vuursteen haast onvermijdelijk zijn oorspronkelijk cryptokristallijne maaksel verliest als hij gedurende de geologisch korte tijd van ongeveer 1.000 jaar ook maar in de nabijheid van een basaltisch-gabbroïde magma verkeert.

3.1.3. Het maaksel van agaat onder de elektronenmicroscop

Om het natuurlijke rijpingsgedrag van de vuursteen-modelsystemen toe te kunnen passen op ons agaatprobleem, moeten wij het maaksel van agaat met de elektronenmicroscop onderzoeken. In chalcedoon in enge zin (= chalcedoon met een optisch negatieve lengterichting van de fenovezels) ziet men daarbij de volgende typische kenmerken van het maaksel.

-- Chalcedoon bestaat plaatselijk uit zeer kleine kwartskorreltjes met een equidimensionale habitus (afb. 7 en rechtsonder in afb. 8). Van dunne naaldvormige kristallen kan hier dus absoluut geen sprake zijn. De fenovezels bestaan integendeel uit vele deeltjes, waarvan de diameter meestal kleiner is dan $1\ \mu\text{m}$. In normale slijpplaatjes met een dikte van 20-35 μm gaat zichtbaar licht dus door veel van dergelijke deeltjes heen, en het beeld van de fenovezels (afb. 2) ontstaat door de som van de optische effecten van alle in het slijpplaatje boven elkaar liggende deeltjes.

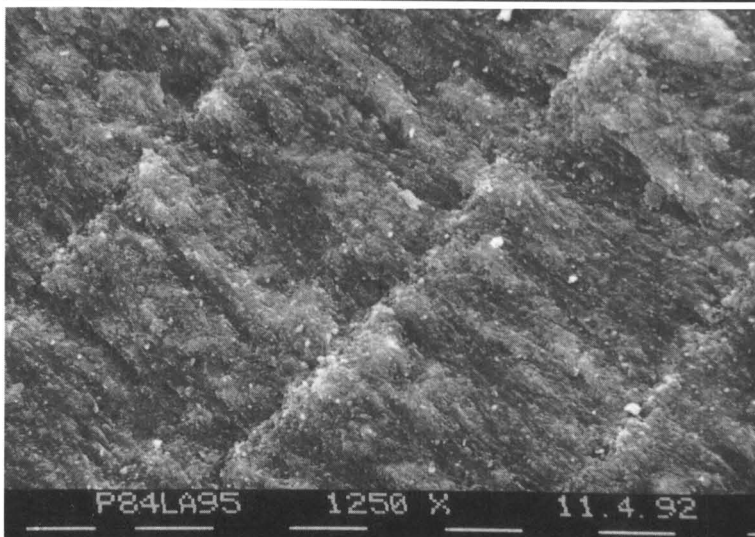
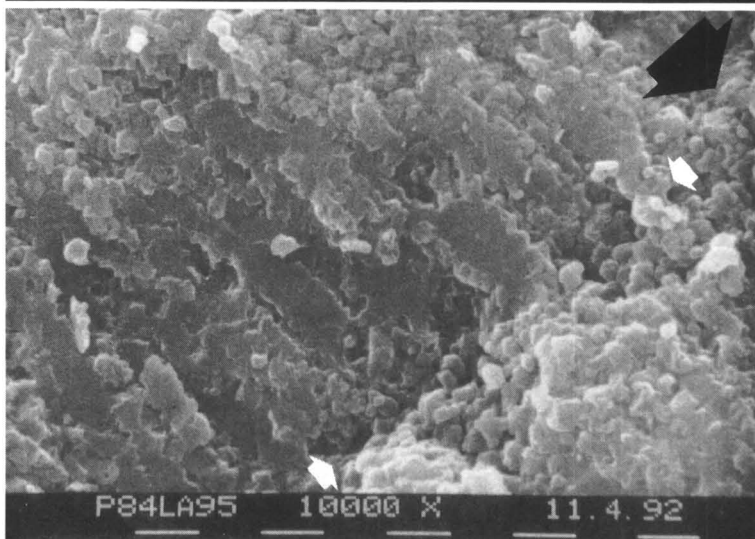
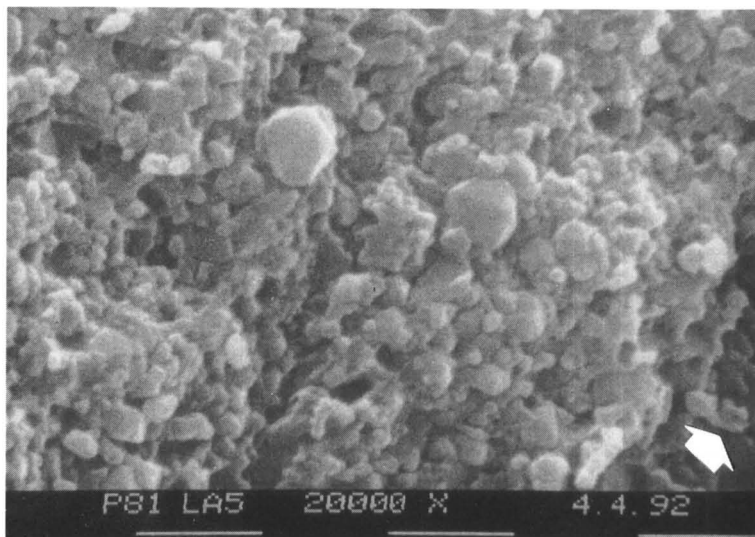
-- Op andere plaatsen heeft chalcedoon weliswaar langgerekte deeltjes in de richting van de fenovezels (midden en linkerkant van afb. 8), maar ook hier zijn die deeltjes niet echt naaldvormig, ze zijn meer zigzag begrensd. Ook deze deeltjes zijn vaak zeer klein (in afb. 8 is de gemiddelde afmeting ongeveer $1\ \mu\text{m}$), zodat de in een slijpplaatje zichtbare fenovezels alweer een som van optische effecten zijn.

-- De gewone gebandheid berust op een verandering in het elektronenmicroscopische maaksel van chalcedoon. In afb. 8 is zo'n grens tussen twee banden met twee kleine witte pijlen aangegeven; afb. 9 toont dezelfde plaats bij zwakkere vergroting.

Twee zaken zijn nu van belang voor onze maaksel-thermometrie:

1. er is geen duidelijk tripelpunt-maaksel aanwezig;
2. de samenstellende deeltjes zijn extreem klein, vaak minder dan $1\ \mu\text{m}$.

In de chalcedoon van de agaatzones met gewone gebandheid ontbreken dus de beide in paragraaf 3.1.1 genoemde herkenningkenmerken van kwarts die bij hoge temperatuur gerijpt is. Op grond van het cryptokristallijne maaksel van agaat en met behulp van het in de paragrafen 3.1.1 en 3.1.2 besproken rijpingsgedrag van fijnkorrelige kwartsaggregaten, kunnen nu de volgende conclusies getrokken worden.



Bijschriften bij de kleurenfoto's:

A. Agaten als opvullingen van holten in een sediment-gesteente (carneool van de "Violetthorizonte") van Buntsandstein-ouderdom, Schwarzwald. Diameter van de agaten: 1-2 mm.

B. Agaat in associatie met verkiezeld hout.

C. Agaat als spleetopvulling in granodioriet (steen-groeve Kuhn, Waldhambach, Pfalz).

D. Agaten in een basaltisch-andesitisch vulkanisch gesteente (steengroeve Kuhn, Waldhambach, Pfalz). Toevoewegen voor vrij vloeiende oplossingen zijn niet zichtbaar. De afzonderlijke agaten zijn zeer verschillend opgebouwd, en sommige hebben duidelijk zichtbare sferulieten. Diameter van de agaten: ongeveer 1,5 tot 10 mm.

Kleurenfoto's: M. Landmesser.

Met zekerheid kan gezegd worden dat agaten niet in het magmatische P-T-gebied gevormd worden, want daar zou een van hun essentiële eigenschappen, namelijk hun **cryptokristallijne maaksel**, in geologische korte tijd verwoest worden. Met dit argument van de maaksel-thermometrie worden vooral de hypothesen van Blankenburg (en zijn medewerkers) weerlegd. Zij hebben het denkbeeld ontwikkeld dat vuurstenen door subductie langzaam diep in de aardkorst geraken, en daar bij het smelten van gesteenten als xenolieten binnen het magma naar agaten omgezet worden (Blankenburg *et al.*, 1982, p. 215 e.v.). Daarbij zou het cryptokristallijne maaksel van de vuursteen "quasi-pseudomorph" behouden zijn gebleven (Lange *et al.*, 1984, p. 680 e.v.), alhoewel die gesteenten bij subductie en smelten **buitengewoon lange tijd** door de metamorfe en magmatische P-T-velden heengaan. Onze geologische voorbeelden (paragrafen 3.1.1 en 3.1.2) hebben echter aangetoond dat het niet mogelijk is om het maaksel onder dergelijke omstandigheden te behouden. Bij een temperatuur van 800°C en een druk van 4 kilobar kan het cryptokristallijne maaksel van agaten bij de aanwezigheid van water zelfs in een laboratorium zuiver isotherm (dus zonder gerichte druk) al in een **paar uur** vernietigd worden (Masuda & Fujimura, 1981, p. 110 en 119). Uit de cryptokristallijne aard van chalcedoon kan men dus besluiten, dat de vorming van agaat binnen een magma **totaal** onmogelijk is. Want cryptokristallijne kwartsaggregaten die bij geologische processen aan dergelijke hoge temperaturen blootgesteld worden, verliezen hun cryptokristallijne aard zeer snel. De idee van Blankenburg (1988, p. 145 e.v.), dat de vorming van agaat binnen een magma slechts één van de mechanismen voor het ontstaan van agaat in de natuur zou zijn, is daarmee ondubbelzinnig weerlegd.

Maar hoe zit het met de mogelijkheid dat agaat gevormd wordt in het (laat-)vulkanische P-T-gebied (II in afb. 4)?

3.2. (Laat-)vulkanische vorming van agaat?

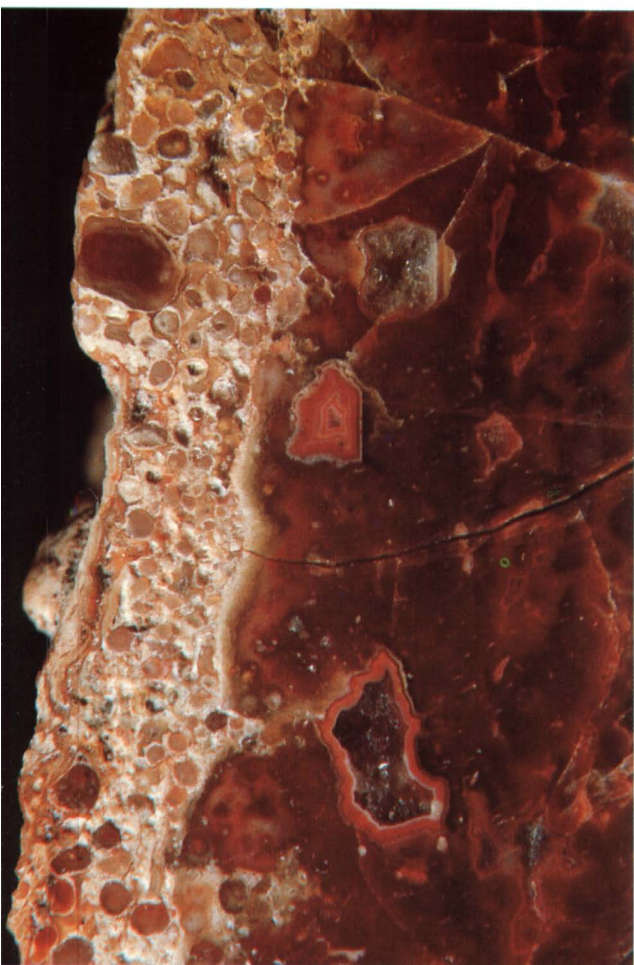
Theorieën die de vorming van agaat als een (laat-)vulkanisch verschijnsel voorstellen, moeten een gemeenschappelijk hoofdprobleem oplossen: hoe is in dit P-T-gebied een opeenhoping van SiO₂ mogelijk in holten

Afb. 7. Agaat (chalcedoon in enge zin) onder de raster-elektronenmicroscop. De pijl geeft de richting van de fenovezels aan. Schaallijn: 1 µm.

Afb. 8. Agaatzone met gewone gebandheid onder de raster-elektronenmicroscop. De kleine witte pijlen wijzen de grens tussen twee banden aan. De grote zwarte pijl geeft de richting van de fenovezels aan. Schaallijn: 1 µm.

Afb. 9. Zelfde agaatzone als in afb. 8, maar bij zwakkere vergroting. De gewone gebandheid is nu duidelijk zichtbaar. Schaallijn: 10 µm.

Vervolg op pagina 76

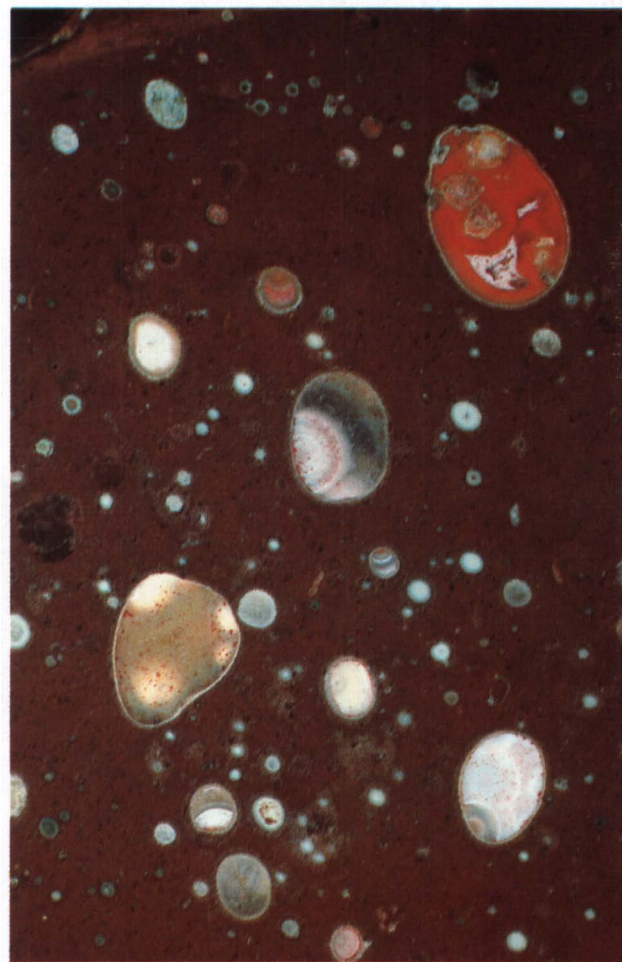


B

A

D

C

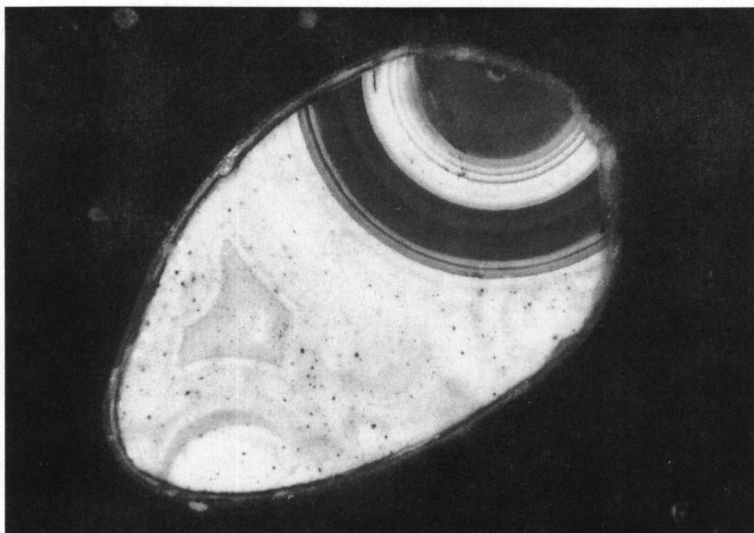


(bijv. gasbellen) in de vulkanische gesteenten? Daarvoor komt een SiO_2 -accumulatie in aanmerking met behulp van waterige oplossingen, die als transportmiddel voor SiO_2 moeten dienen. Omdat in het (laat-)vulkanische gebied het onderscheid tussen vloeibaar en gasvormig water natuurkundig niet precies te definiëren is, kan men er beter de meer algemene term "fluïd" gebruiken, die de beide toestanden omvat. Beslissend voor het agaatprobleem is dan de vraag: hoe goed is SiO_2 oplosbaar in de waterige fluïds van het (laat-)vulkanische P-T-gebied, en welke hoeveelheden fluïd bevinden zich eigenlijk in de vulkanische gasbellen? Want de processen die voor de vorming van agaat zo belangrijk zijn - mobilisatie en accumulatie van SiO_2 - kunnen in het (laat-)vulkanische gebied slechts plaatsvinden als er voldoende waterige fluïd als transportmiddel aanwezig is, en als daarin ook grote hoeveelheden SiO_2 oplosbaar zijn. Bij het verifiëren van deze beide beslissende punten komt men tot een ondubbelzinnig resultaat: bij de lage druk die in het (laat-)vulkanische gebied in de holten in de gesteenten heerst, is SiO_2 buitengewoon slecht oplosbaar in waterige fluïds, namelijk slechts enige ppm tot enige honderdsten ppm (Tabel 3). Bovendien is er ook nog eens weinig oplosmiddel (waterige fluïd) aanwezig: in een vulkanische "gas"-bel met een volume van 1 liter bevindt zich slechts 170 mg water, in afgekoelde toestand slechts een paar druppels (bijzonderheden voor deze berekening bij Landmesser, 1986; 1988).

Samengevat:

- SiO_2 is in het (laat-)vulkanische P-T-gebied (bij temperaturen **boven** de dampdrukcurve van water!) bijna niet oplosbaar;
- er is slechts weinig water aanwezig; de waterige fluïd is buitengewoon "dun".

Bij de vorming van agaat kan SiO_2 -transport door (laat-)vulkanische waterige fluïds dus nauwelijks een rol spelen. Daarmee valt het (laat-)vulkanische P-T-gebied **totaal** weg bij het ontstaan van agaat. De algemene geldigheid van deze uitspraak berust op het feit dat zij afgeleid is van algemeen geldende fysisch-chemische wetten en feiten (gaswetten, SiO_2 -oplosbaarheid). Iedere denkbare hypothese voor de vorming van agaat in het (laat-)vulkanische P-T-gebied moet zich aan deze wetmatigheden en feiten onderwerpen, en gaat er dus aan ten onder. De fysisch-chemische voorwaarden voor effectief SiO_2 -transport naar de holten in de gesteenten bestaan eenvoudigweg niet in het (laat-)vulkanische P-T-gebied. Daarmee is ook de mogelijkheid weerlegd dat er naast andere vormingsmechanismen ook een (laat-)vulkanische wijze is waarbij agaat kan ontstaan. Het heeft geen zin om verder te zoeken naar een (laat-)vulkanische verklaring voor agaten. Agaten kunnen **uitsluitend** ontstaan zijn als secundaire holte-opvullingen in het sedimentair-diagenetische P-T-gebied. En zowaar, in recente vulkanische gesteenten zijn alle gasbellen inderdaad leeg (Lorenz, 1972, p. 369).



Tabel III

Oplosbaarheid van amorf SiO_2 in waterdamp; 1 at = 0,981 bar (naar Heitmann, 1965)

P [at]	T [°C]	SiO_2 -oplosbaarheid [ppm]
0,5	98	0,015
0,5	200	0,026
0,5	440	0,190
1	120	0,020
1	292	0,071
1	587	0,855
3	147	0,041
3	330	0,170
3	580	1,56
6	203	0,085
6	400	0,62
6	600	3,22

3.3. De vorming van agaat in het sedimentair-diagenetische P-T-gebied

Er zijn veel voorbeelden aan te dragen waarbij men het ontstaan van agaat bij lage temperatuur "direct kan zien". Kleurenfoto A toont een zuiver sedimentair-diagenetisch produkt: zeer kleine agaten, gedeeltelijk van het Uruguay-type, zijn gevormd als opvullingen van holten in carneool van Buntsandstein-ouderdom (zie ook Obenauer, 1974, 1979; Landmesser, 1984). Deze carneool-lagen zijn fossiele landoppervlakken (Ortlam, 1966, 1970), zij zijn tijdens hun geologische geschiedenis nooit buiten het sedimentair-diagenetische P-T-gebied geweest. Ook agaten die met verkiezeld hout zijn geassocieerd (Kleurenfoto B), zijn zonder twijfel bij lage temperatuur gevormd. Omdat de vorming van agaat - zoals eerder gezegd - **niet direct** met (laat-)vulkanische processen verbonden is, komen agaten als **secundaire holteopvullingen** in de meest diverse gesteenten voor, ook in metamorfe gesteenten (bijv. Niedermayr, 1990, p. 33 e.v.) en in magmatische gesteenten. Kleurenfoto C toont een met agaat gevulde spleet in een granodioriet.

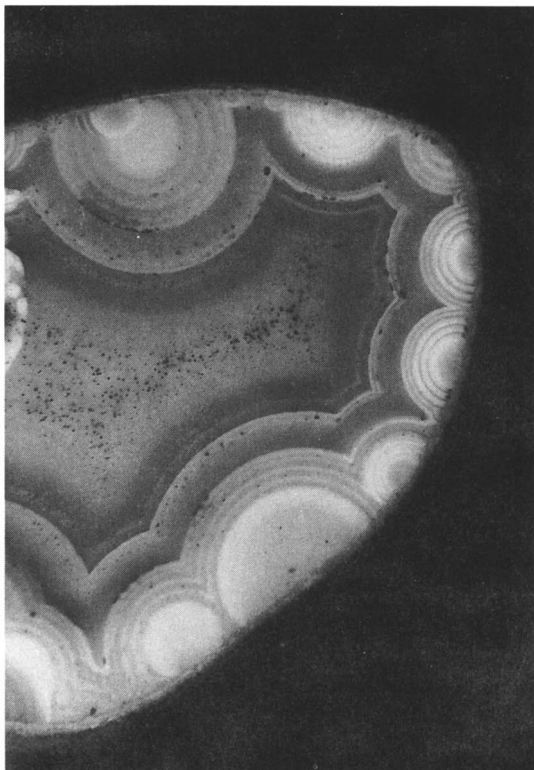
4. Enige belangrijke aspecten van agaatvorming

Men heeft lang geloofd, dat de oplossingen waaruit SiO_2 bij de vorming van agaat werd afgezet steeds maar weer een holte in een gesteente kwamen binnenvloeien, daar hun SiO_2 tegen de wanden als opeenvolgende "lagen behangselpapier" lieten neerslaan, en tenslotte de holte weer verlieten. Maar de idee van een behangsel-

achtige opbouw van de agaatbanden is niet juist. De gewone agaatbanden volgen geenszins slaafs de vorm van de holte. Tegen de holtewanden worden integendeel morfologisch zelfstandige halfbolvormige SiO_2 -aggregaten gevormd: **gebande sferulieten**. Deze sferulitische opbouw is bijzonder duidelijk als in een holte slechts weinig sferulieten gevormd zijn (afb. 10). Gelijktijdig bij elkaar in de buurt gegroeide sferulieten hebben dezelfde interne opeenvolging van banden. Bij het samengroeien van de sferulieten ontstaat een **gemeenschappelijke** gebandheid (afb. 11). De indruk van een behangselachtige holtebekleding wordt pas gewekt als er veel sferulieten dicht bij elkaar liggen. Zie afb. 12.

Maar niet alleen de "behangseltheorie" is niet juist, ook de idee van in- en uitvloeiende oplossingen is niet te verdedigen. In veel gevallen zijn er namelijk helemaal geen open toevoerwegen naar de agaatgeoden, waar de oplossingen vrij doorheen zouden kunnen vloeien.

Afb. 10. Agaat met een vrijstaande sferuliet.
Vindplaats: steengroeve Kuhn, Waldhambach, Pfalz.



Afb. 11. Agaat met duidelijk zichtbare sferulieten. Vindplaats: steengroeve Kuhn, Waldhambach, Pfalz.

Zo staan bijv. de holten in kleurenfoto D niet in contact met spleten of grote barsten in het gesteente. Daarom moet aangenomen worden dat het belangrijkste transport van SiO_2 in het gesteente plaatsvindt door diffusie in fijnverdeelde poriënoplossingen. In het sedimentair-diagenetische P-T-gebied bevinden dergelijke oplossingen zich in alle mogelijke poriën in het agaat bevattende gesteente: zeer kleine scheurtjes, korrelgrenzen tussen mineralen en andere kleine holten. In zo'n netwerk van poriënvloeistoffen kan **echt** opgelost SiO_2 (hoofdzakelijk moleculen met de formule $\text{Si}(\text{OH})_4$) diffunderen naar de grotere gesteenteholten, die eveneens volledig gevuld zijn met waterige oplossingen. Colloïdaal opgelost SiO_2 kan daarentegen praktisch niet diffunderen, en speelt derhalve bij het **transport** van SiO_2 naar de holten geen rol. Maar in een met oplossing gevulde holte kunnen de $\text{Si}(\text{OH})_4$ -moleculen zich mettertijd wel tot grotere, **colloïdale**, deeltjes aaneensluiten. De Uruguay-banden zijn daar een gevolg van. De invloed van de zwaartekracht bij de vorming van de Uruguay-banden is onmiskenbaar, maar SiO_2 -deeltjes kunnen slechts gravitatief uit een oplossing afgezet worden als zij een bepaalde minimumafmeting hebben. Voor de meeste stoffen, zo ook voor kwartsdeeltjes, ligt die ondergrens voor sedimentatie tussen 0,1 en

1 μm , dat is juist ongeveer de bovengrens van colloïdale deeltjes (Zsigmondy, 1912, p. 17-19). Alhoewel SiO_2 alleen in de vorm van afzonderlijke $\text{Si}(\text{OH})_4$ -moleculen (= kiezelzuur) naar de holte gediffundeerd kan zijn, moet het daar dan dikwijls grotere deeltjes gevormd hebben. Die deeltjes zweven eerst in de oplossing (**colloïdale** deeltjes), maar zakken naar de bodem als zij te groot worden, of als zij met elkaar aggregaten vormen. Iets dergelijks is klaarblijkelijk met de Uruguay-afzettingen gebeurd. Het SiO_2 van de Uruguay-banden moet dus een colloïdaal stadium meegemaakt hebben.

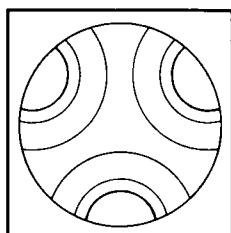
Ook bij het ontstaan van agaatzones met gewone gebandheid spelen colloïdale effecten een rol. Daarin komen immers vrij vaak typische deformatieverschijnselen voor (afb. 13 en 14), die alleen verklaard kunnen worden als men uitgaat van oorspronkelijk vervormbare, gel-achtige colloïdale afzettingen van SiO_2 tegen de holtewanden. Tegen de wanden van de volledig met een oplossing gevulde holte zijn dus eerst SiO_2 -afzettingen gevormd met veel sferulieten, die aanvankelijk in veel gevallen nog vervormd konden worden. Pas later is uit deze afzettingen de eigenlijke harde chalcadoon gevormd. Uiteraard bevatten die in het begin gevormde colloïdale afzettingen veel minder SiO_2 dan de chalcadoon in de uiteindelijke agaat. Daarom moet men uitgaan van verdere diffusie van $\text{Si}(\text{OH})_4$ tijdens het ontstaan van de agaat. Details over de drijfkracht en de mechanismen van deze SiO_2 -accumulatie in agaat kan men vinden bij Landmesser (1988).

Tijdens zijn ontstaan is agaat dus een gesteenteholte die volledig gevuld is met een waterige oplossing, waarin zich echt opgelost kiezelzuur (dus $\text{Si}(\text{OH})_4$ -moleculen) bevinden, maar ook grotere, colloïdale SiO_2 -deeltjes. Bij de groei van macroscopische kwarts-kristallen in de agaatgeode wordt $\text{Si}(\text{OH})_4$ opgebruikt. Uruguay-banden ontstaan daarentegen als te groot geworden SiO_2 -deeltjes in de oplossing naar de bodem zakken. Beide processen kunnen in dergelijke met oplossingen gevulde holten beslist tegelijkertijd plaatsvinden. Bij het ontstaan van de agaat van afb. 15 konden slechts weinig kwarts-kristallen van beneden naar boven groeien, omdat de meeste in het begin aanwezige kristalkiemen bedekt werden met naar beneden zakkende deeltjes. Aan de zijkanen van de holte kon de kwarts echter relatief ongestoord de oplossing in groeien.

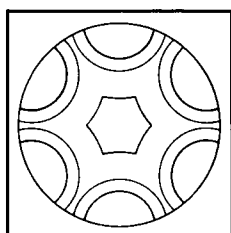
Het valt te verwachten dat de verscheidenheid van agaatstructuren met moderne colloïdaal-chemische modellen verklaard zal kunnen worden.

Dankbetuigingen

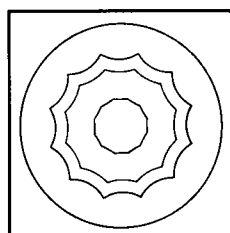
Ik dank zeer hartelijk Prof. Dr. J. Pense voor een kritische controle van het manuscript. Ik dank de heer A. Becker voor de zorgvuldig gemaakte slijpplaatjes.



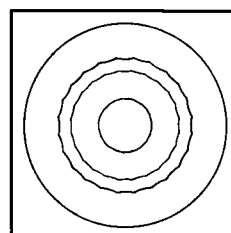
1



2



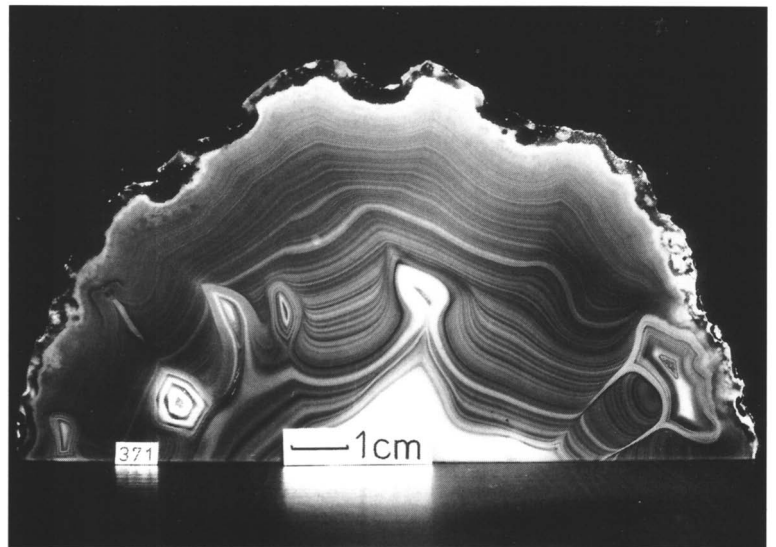
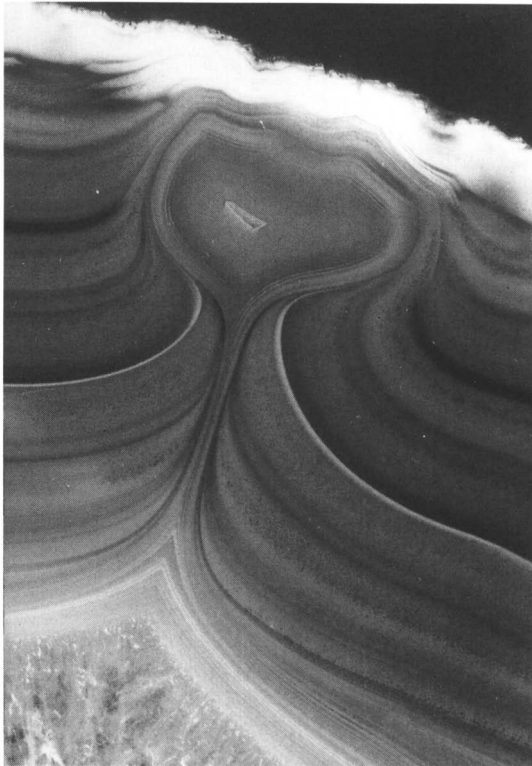
3



4

Afb. 12. Tekening van het beginsel van sferulietgroei bij agaten. De grote cirkel stelt telkens de gesteenteholte voor. Als aan de wanden van deze holte slechts enkele sferulieten gevormd worden (nr. 1), dan is de sferuliet-structuur macroscopisch heel duidelijk te herkennen: de banden volgen de vormen van de holte **niet**! Bij de reeks tekeningen 1 --> 2 --> 3 --> 4 werd het aantal sferulieten telkens verdubbeld, en de afstand tussen de sferulieten dus

gehalveerd. Daardoor wordt de bandering van de holtelvorm in de reeks 1 - 4 steeds gelijkmatiger. Omdat bij de meeste agaten zeer veel sferuliet-centra zeer dicht bij elkaar staan, is het principe van de sferulietvormige opbouw van agaten **macroscopisch** vaak moeilijk of helemaal niet te zien. Daarom is de (verkeerde!) mening ontstaan, dat de agaatbanden de holtelvormen precies natekenen. Dat zou wel het geval zijn bij een sferulietafstand = nul.



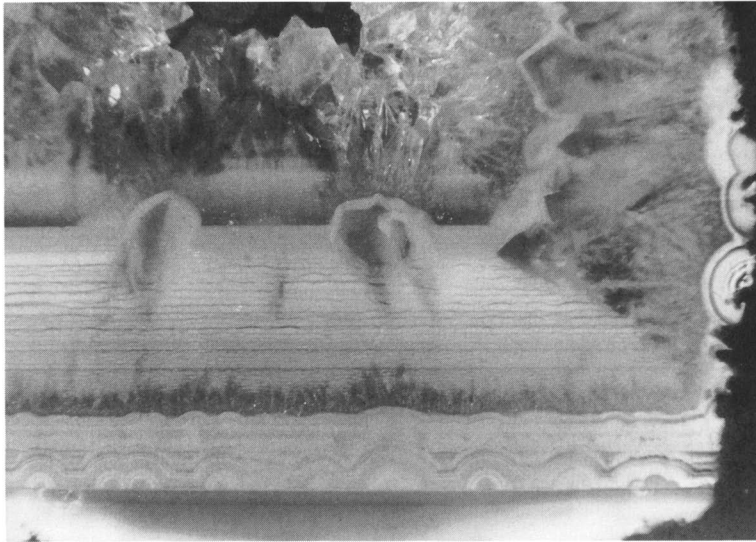
Afb. 13. (Links) Agaat met duidelijke vervormingen binnen de gewone gebandheid. Beeldhoogte circa 3 cm.

Afb. 14. (Boven) Agaat met zeer veel vervormings-"kanalen". Collectie Theis (Reichweiler).

Voor de accurate vertaling in het Nederlands tenslotte wil ik Drs. E.A.J. Burke graag heel hartelijk bedanken.
Dit artikel staat in verband met mijn aanstaande proefschrift.

Literatuurverwijzingen

- Blankenburg, H.J. (1988): Achat: Eigenschaften, Genese, Verwendung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 203 p.
- Blankenburg, H.-J., Pilot, J. & Werner, C.-D. (1982): Erste Ergebnisse der Sauerstoffisotopenuntersuchungen an Vulkanitachaten und ihre genetische Interpretation. *Chemie der Erde* **41**, 213-217.
- Fallick, A.E., Jocelyn, J., Donnelly, T., Guy, M. & Behan, C. (1985): Origin of agates in volcanic rocks from Scotland. *Nature* **313**, 672-674.
- Freundlich, H. (1922): Kapillarchemie, 2. Auflage. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1181 p.
- Heitmann, H.-G. (1965): Die Löslichkeit von Kieselsäure in Wasser und Wasserdampf. *Glastechnische Berichte* **38**, 41-54.
- Hoersch, A.L. (1981): Progressive metamorphism of the chert-bearing Durness limestone in the Beinn an Dubhaich aureole, Isle of Skye, Scotland: a reexamination. *American Mineralogist* **66**, 491-506.
- Joesten, R. (1983): Grain growth and grain-boundary diffusion in quartz from the Christmas Mountains (Texas) contact aureole. *American Journal of Science* **283-A**, 233-254.
- Keller, W.D., Stone, C.G. & Hoersch, A.L. (1985): Textures of Paleozoic chert and novaculite in the Ouachita Mountains of Arkansas and Oklahoma and their geological significance. *Geological Society of America Bulletin* **96**, 1353-1363.
- Krämer, H. (1955): Die Theorien der Achatbildung. *Aufschluss* **6**, 197-200.
- Landmesser, M. (1984): Das Problem der Achatgenese. *Mitteilungen der Pollichia* **72**, 5-137.
- Landmesser, M. (1986): Zur Eingrenzung der P-T-Bedingungen der Achatgenese. *Chemie der Erde* **45**, 273-293.
- Landmesser, M. (1988): Transport- und Akkumulationsmechanismen des SiO₂ in petrologischen Systemen: Achate. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft* **36**, 101-119.
- Lange, P., Blankenburg, H.-J. & Schrön, W. (1984): Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Vulkanitachaten. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* **12**, 669-683.
- Lorenz, V. (1972): Sekundäre Rottfärbung im Rotliegenden der Saar-Nahe-Senke/SW-Deutschland. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte, Jahrgang 1972*, 356-370.
- Masuda, T. & Fujimura, A. (1981): Microstructural development of fine-grained quartz aggregates by syntectonic recrystallization. *Tectonophysics* **72**, 105-128.
- Meyer, K. (1977): Physikalisch-chemische Kristallographie, 2. Auflage. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 368 p.
- Moxon, T.J. (1991): On the origin of agate with particular reference to fortification agate found in the Midland Valley, Scotland. *Chemie der Erde* **51**, 251-260.
- Nacken, R. (1948): Über die Nachbildung von Chalcedon-Mandeln. *Natur und Volk* **78**, 2-8.
- Niedermayr, G. (1990): Eine bemerkenswerte Zeolith-Paragenese aus einem Serpentin-Steinbruch bei Pingendorf in Niederösterreich. *Mineralien-Welt* **1** (2), 31-34.
- Obenauer, K. (1974): Über Achate vom Uruguay-Typ im Oberen Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. *Aufschluss* **25**, 110-116.
- Obenauer, K. (1979): Über den Aufbau des Buntsandstein-Carneols und seiner Achatdrusen. *Aufschluss* **30**, 113-119.
- Ortlam, D. (1966): Fossile Böden und ihre Verwendung zur Gliederung des höheren Buntsandsteins im nördlichen Schwarzwald und südlichen Odenwald. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge* **48**, 69-78.
- Ortlam, D. (1970): Die Randfazies des germanischen Buntsandsteins im südlichen Schwarzwald. *Geologisches Jahrbuch* **89**, 135-168.
- Parks, G.A. (1984): Surface and interfacial free energies of quartz. *Journal of Geophysical Research* **89** (No. B6), 3997-4008.
- Pense, J. (1966): Zur sublichtmikroskopischen Morphologie des kryptokristallinen Siliciumdioxids. *Habilitationsschrift, Univ. Mainz*.
- Spry, A. (1976): *Metamorphic textures*. Pergamon Press, Oxford.
- Touret, J.L.R. (1991): De lithofysen van de Esterel. *Gea* **24**, 110-120.
- Voll, G. (1961): Zur Frage des Stofftransports auf den Korngrenzen metamorpher Gesteine. *Geologische Rundschau* **51**, 395-405.
- Webster, R. & Anderson, B.W. (1983): *Gems*, 4th ed., Butterworths, London etc., 1006 p.
- Winkler, H.G.F. (1967): *Die Genese der metamorphen Gesteine*, 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin etc., 237 p.
- Zsigmondy, R. (1912): *Kolloidchemie*. Verlag Otto Spamer, Leipzig.



Afb. 15. Agaats, waarin de groei van kwarts belemmerd werd door het neerslaan van Uruguay-banden. Slechts weinig van de van beneden naar boven groeiende kwarts kristallen hebben dit "overleefd". Agaatzones met gewone gebandheid bestaan ook hier uit duidelijke sferulieten.

Kurzfassung "Zur Frage der Achatentstehung"

In der sehr kontroversen petrologischen Diskussion um die Entstehung der Achate wird in jüngster Zeit (z.B. von Blankenburg 1988, p. 146) die bereits von Krämer (1955, pp. 199 f.) geäußerte Vorstellung wieder vertreten, daß Achate nach mehreren grundverschiedenen Mechanismen bei völlig unterschiedlichen P-T-Bedingungen entstehen können. Hierdurch wird das wissenschaftstheoretische Problem der Induktion in der aktuellen Achat-

Diskussion besonders brisant. Wirklich **allgemeingültige** Aussagen zum P-T-Bereich der Achatgenese sind auf zweierlei Weise möglich.

1. Man kann Eigenschaften, die bereits in der Definition von "Achat" stecken, petrogenetisch auswerten. Hierzu ist die Eigenschaft "kryptokristallin" geeignet: Grundzüge einer Gefüge-Thermometrie der Achate werden vorgestellt, wobei das thermische Reifungsverhalten von kontaktmetamorph belasteten Cherts (Keller *et al.* 1985, Joesten 1983) zur physikalisch-chemischen Orientierung dient. Kryptokristalline Quarz-Aggregate verlieren ihren kryptokristallinen Charakter, wenn sie für längere Zeit den P-T-Bedingungen des magmatischen oder hochmetamorphen Bereichs ausgesetzt werden. Es gibt daher **ganz allgemein** keine Möglichkeit für eine intramagmatische Entstehung der kryptokristallinen Achatsubstanz. Die Abbildungen 7, 8 und 9 zeigen typische Beispiele der elektronenmikroskopischen Morphologie kryptokristalliner Achatzonen (Chalcedon im engeren Sinne).

2. Es läßt sich zeigen, daß der vulkanisch-spätvulkanische P-T-Bereich (T oberhalb der Dampfdruckkurve des Wassers!) ganz allgemein für die Achatgenese entfällt, weil hier die physikalisch-chemischen Bedingungen für einen effektiven SiO_2 -Transport und damit für die SiO_2 -Akkumulation im Achat generell fehlen (vgl. Landmesser 1988).

Achate entstehen im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich. Einige Aspekte des Achatbildungsprozesses werden dargestellt.

Buitenaards Bestaan ?

door Prof. Dr. Harry N.A. Priem
Rijksuniversiteit Utrecht en
Artis Geologisch Museum te Amsterdam

Toen Christiaan Huygens in de heldere nacht van 28 november 1659 met een eenvoudige telescoop de planeet Mars observeerde, slaagde hij er als eerste in om enkele oppervlakedetails in kaart te brengen waarvan we nu weten dat zij corresponderen met reële landschapskenmerken. Het opvallendste detail was een donker, driehoekig gebied dat ruim drie eeuwen later, ten tijde van de planetaire exploratie in het ruimtevaarttijdperk, de naam *Syrtis Major Planum* heeft gekregen — een enorm plateau (441.000 km²) van basaltische lava's. Bij zijn verdere observaties constateerde Huygens dat sommige donkere vlekken op het Marsoppervlak zich in de loop van de seizoenen uitbreiden en weer kleiner worden. In zijn monumentale, in 1698 verschenen werk

Cosmotheoros (wereldbeschouwer) speculeert hij, dat deze seizoengebonden veranderingen zouden kunnen wijzen op het bestaan van vegetatie op Mars, en dat er mogelijk zelfs Marsbewoners zijn. Tegenwoordig weten we echter, dank zij de observaties door onbemande ruimtesondes in de jaren '70, dat de door Huygens en latere waarnemers geconstateerde oppervlakteveranderingen het gevolg zijn van enorme verplaatsingen van fijn sediment door zware, seizoengebonden stormen.

Vóór Huygens hadden anderen al gespeeld met het idee dat de Aarde niet de enige bewoonde planeet is. Toen Galileo Galilei aan het eind van de 16de eeuw als eerste de hemel ging bestuderen door een verrekijker (waarvan de uitvinding wordt toegeschreven aan de Middelburgse brillenslijper Hans Lippershey) en daarmee