

1794; together with Playfair's Biography of Hutton. (Facsimiles of the original editions) xxiii (iii), 203 pp. (Contrib. Hist. Geol. 5), Hafner Press, New York.

Wilson, L.G. (1972) — Charles Lyell. The years to 1841: The revolution in geology. xiii (i), 553 pp. Yale Univ. Press, New Haven and London. (Het eerste, en tot nu toe enige, deel van een nieuwe, uitvoerige biografie met gebruikmaking van veel nieuw materiaal.)

Woodward, H.B. (1908) — The history of the Geological Society of London. xix (i), 336 pp. Longmans, Green & Co., London.

Historische plaatsen in Groot-Brittannië

Salisbury Crags, Edinburgh

Langs Queen's Drive, aan de westkant van Holyrood Park: een dolerietische intrusieplaat van Carbonische ouderdom, door Hutton terecht als een magmatische intrusie geïnterpreteerd. Darwin bezocht deze ontsluiting met een excursie onder leiding van Jameson, en overtuigde zich met eigen ogen dat de Werneriaanse verklaring van Jameson (als een normale opeenvolging van aquatische formaties) onmogelijk juist kon zijn.

Siccar Point (Berwickshire)

Klassieke hoekdiscordantie van Upper Old Red Sandstone op steil staande Lower Old Red Sandstone en Siluur (gevolg van Middendevoonische bewegingen). De betekenis van het verschijnsel werd door Hutton goed begrepen. Volg van Edinburgh de A1 via Dunbar naar het zuiden, 1 km voorbij Cockburnspath linksaf, over de spoorweg en 600 m verder weggetje linksaf nemen, op volgende splitsing rechts naar oude groeve (parkeren), vandaar is de kust gemakkelijk bereikbaar.

Sligh Houses (ook wel Slighhouses) (Berwickshire)

Huttons boerderij, waar hij van 1754 tot 1768 woonde. Ga van

Siccar Point terug naar de A1, volg deze verder naar het zuiden, na ca. 5 km in Grantshouse rechtsaf (A6112), na ca. 1,5 km linksaf, op kruising met B6438 rechtdoor, minder dan 1 km verder Sligh Houses aan de rechter hand.

Churchill (Oxfordshire)

De geboorteplaats van William Smith; er staat sinds 1891 een gedenksteen voor hem.

Bath (Avon)

Er is een gedenkplaat aan het huis waar Smith van 1795 tot 1798 woonde (Broomfield Crescent, middelste huis).

Kinnordy House (Angus)

Lyell werd hier in 1797 geboren, en keerde er later herhaaldelijk terug, soms om er rustig te schrijven. Gewoond heeft hij er na zijn jeugd niet meer. (Het huis in Londen waar hij het grootste deel van zijn leven gewoond heeft, Hartley Street, bestaat niet meer.) Kinnordy House is nog altijd in handen van de Lyell-familie, en bewoond. Het ligt 1 km noordwest van Kirriemuir (8 km westnoordwest van Forfar. Men kan er van de weg af een blik op werpen. Het huis heeft door verbouwingen en toevoegingen veel van zijn achttiende eeuwse bekoring verloren.

Down House, Downe (Kent)

Darwin leefde en werkte hier van 1842 tot zijn dood in 1882. De benedenverdieping, die zo goed mogelijk is teruggebracht in de oorspronkelijke staat, kan bezocht worden. Ook door de omgeving zeer de moeite waard.

Downe ligt niet ver van Bromley, aan de zuidoostelijke rand van de Londense agglomeratie, aan de rand van de North Downs (noordflank van de Weald-anticlinale). Het is uit Londen (Victoria Station) per bus gemakkelijk bereikbaar.

Knockan Cliff (Sutherland)

Eén van de klassieke punten die in het geding waren tijdens de discussie over de structuur van de Schotse Hooglanden. Door de zorgen van de Nature Conservancy Council is een geologisch pad uitgezet, dat, voorzien van goede toelichting, een duidelijk beeld geeft van de moeilijkheden waar het om draaide.

Knockan ligt 2 km ten zuiden van Elphin (Sutherland), aan de A835 naar Ullapool (Ross & Cromarty).

POLYMORFIE

E.A.J. Burke

Instituut voor Aardwetenschappen
Vrije Universiteit, Amsterdam

Inleiding

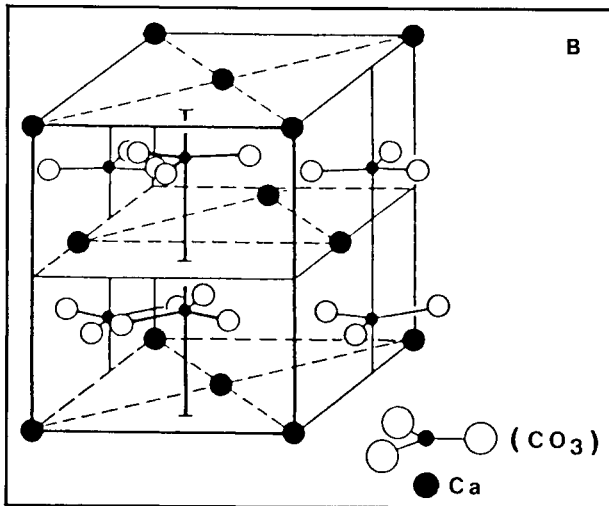
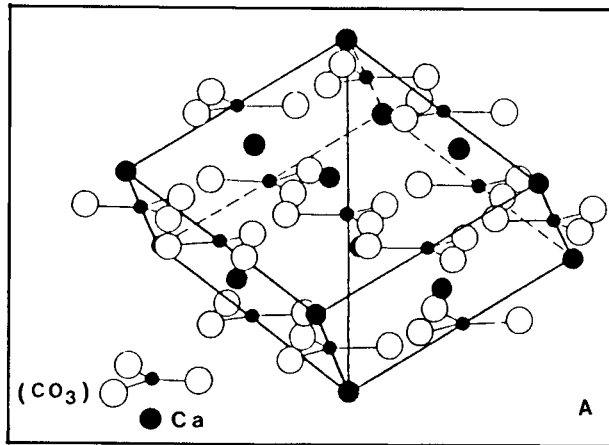
Mineralen zijn in de natuur gevormde chemische verbindingen met een kristallijne structuur: hun samenstellende atomen of ionen zijn in drie dimensies ordelijk gerangschikt. Sommige chemische verbindingen hebben de eigenschap dat zij hun atomen of ionen op meer dan één manier ordelijk kunnen rangschikken: deze verbindingen kunnen in verschillende structuren kristalliseren. Die eigenschap noemt men **polymorfie**, de letterlijke "vertaling" van deze term op basis van de samenstellende Griekse woorden is **veelvormigheid**. De verschillende structuren van één enkele chemische verbinding zijn de polymorfe modificaties, of kortweg de polymorfen. Calciet en aragoniet zijn polymorfe mineralen: zij hebben dezelfde chemische samenstelling (calcium-carbonaat, CaCO_3), maar verschillende kristalstructuren (Afb. 1). Dit verschil in inwendige bouw komt tot uiting in totaal verschillende kristalvormen voor de beide mineralen (Afb. 2). Deze veelvormigheid was in 1821 voor Mitscherlich de aanleiding tot het ontdekken van het verschijnsel.

Wurtziet en sfaleriet zijn eveneens polymorfe mineralen: beide hebben dezelfde chemische samenstelling (zink-sulfide, ZnS), maar zij hebben verschillende structuren en kristalvormen (Afb. 3). Pyriet en markasiet zijn de poly-

morfen van FeS_2 , ijzer-disulfide; de verbinding TiO_2 (titaan-dioxide) vormt drie polymorfe mineralen: rutiel, anatasa en brookiet; de drie kalium-veldspaten sanidien, orthoklaas en mikroklien zijn de drie polymorfen van KAlSi_3O_8 , kalium-aluminium-silicaat. Van SiO_2 , silicium-dioxide, kennen we zelfs 10 polymorfe modificaties, waarvan kwarts, tridymiet en cristobaliet de meest bekende zijn.

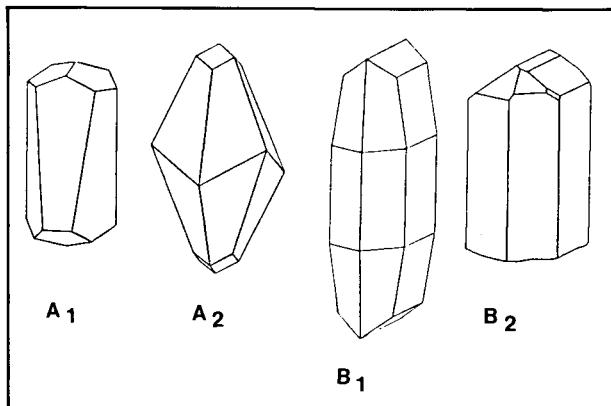
Omdat polymorfe mineralen verschillende structuren hebben, zijn hun fysische eigenschappen ook verschillend. Het meest extreme voorbeeld van die verschillen wordt gevormd door de twee polymorfen van het element koolstof, grafiet en diamant:

	GRAFJET	DIAMANT
kristalsysteem	hexagonaal	kubisch
splijting	1 richting	4 richtingen
Mohs hardheid	1-2	10
dichtheid (g/cm^3)	2,2	3,5
glans	metaalglans	diamantglans
kleur	zwart, opaak	kleurloos, doorzichtig.

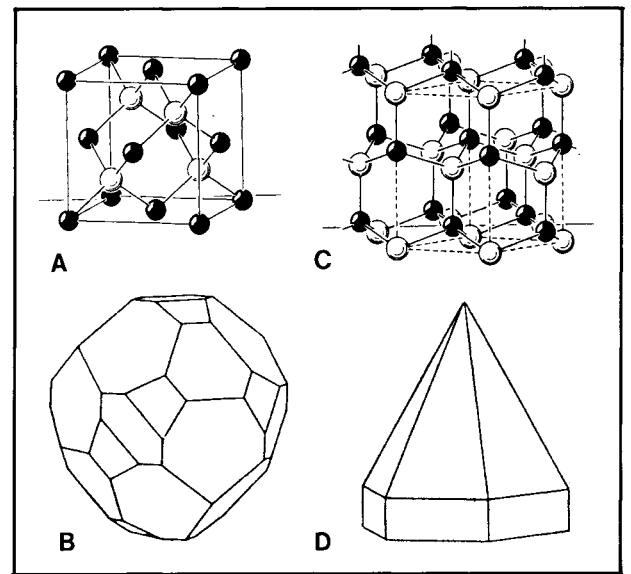


Afb. 1. Schematische weergave van de kristalstructuren van calciet (A) en van aragoniet (B). In de structuur van calciet zijn in drie dimensies beurtelings calcium-atomen en carbonaat-groepen gestapeld. In de structuur van aragoniet liggen de calcium-atomen en de carbonaat-groepen in afzonderlijke vlakken. In beide structuren zijn de atomen in werkelijkheid zo groot dat zij elkaar raken.

Afb. 2. Trigonale kristallen van calciet (A) en orthorhombische kristallen van aragoniet (B). Vergelijk de kristalvormen met de structuren in Afb. 1.



De verschillende polymorfe modificaties van één enkele chemische verbinding worden gevormd onder verschillende omstandigheden van druk en/of temperatuur, of in verschillende chemische milieus. In de geologie is men bijzonder geïnteresseerd in de wijze van voorkomen van polymorfe mineralen. In een bepaald gesteente of erts vindt men namelijk gewoonlijk slechts één van een stel polymorfe mineralen. Als men weet onder welke omstandigheden die ene modificatie gevormd wordt, dan beschikt men over belangrijke informatie omtrent de vorming van dat gesteente of erts in of op de aardkorst. Zo kunnen polymorfe mineralen gebruikt worden als geothermometer of geobarometer: alleen al hun aanwezigheid in een gesteente of erts kan directe inlichtingen geven over de temperatuur en/of de druk die er was tijdens de vorming van het gesteente, of tijdens de latere geschiedenis van het gesteente.



Afb. 3. A. Schematische weergave van de kristalstructuur van sfaleriet. Zwart = zink, kleurloos = zwavel. B. Kristal van sfaleriet. C. Schematische weergave van de kristalstructuur van wurtziet. Zwart = zink, kleurloos = zwavel. D. Kristal van wurtziet

Oorzaak van polymorfie: stabiliteitsverschillen

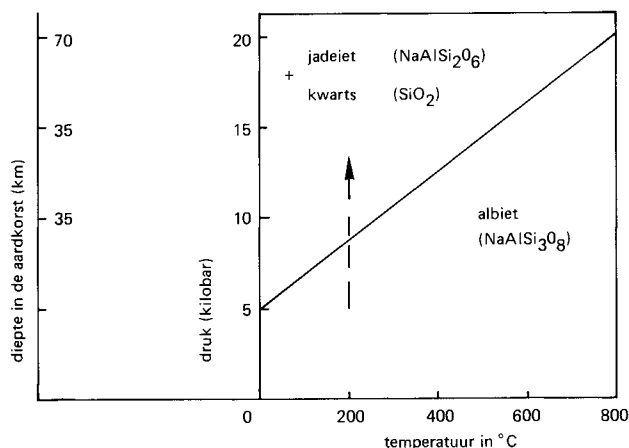
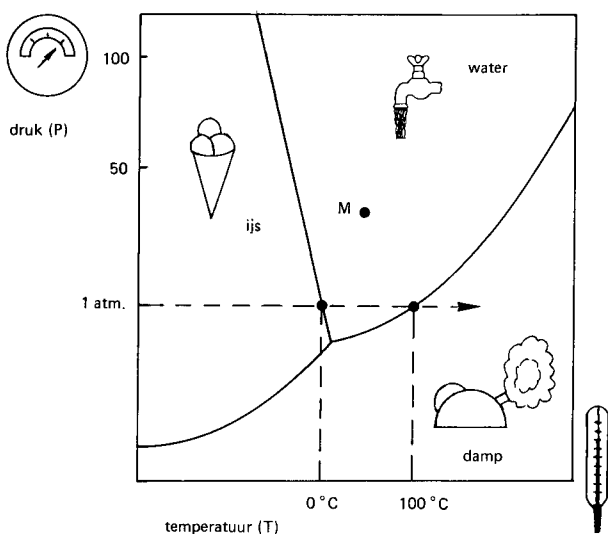
Iedere stof heeft een stabiliteitsveld: de grenzen waarbinnen die stof stabiel is, d.w.z. onbepaald kan blijven voortbestaan. De stabiliteit van een stof wordt vooral bepaald door druk, temperatuur en chemisch milieu. De invloed van die variabelen op de stabiliteit van een stof wordt bestudeerd door de chemische thermodynamica, en laten we hier maar buiten beschouwing; voor ons doel is het voldoende om te weten wat de stabiliteitsgrenzen van een bepaald mineraal zijn. Immers, een stof die onderworpen wordt aan omstandigheden **buiten** zijn stabiliteitsveld zal zich omzetten naar iets anders, dat bij die omstandigheden wél stabiel is.

Een paar stabiliteitsgrenzen van natuurlijke stoffen kennen we allen uit eigen ervaring. Bij normale luchtdruk, (1 atmosfeer, 1013 millibar) is de stof (en het mineraal) **ijs**

(H₂O in vaste toestand) stabiel bij een temperatuur van 0°C of lager. Stijgt de temperatuur boven 0°C, zelfs maar zeer weinig, dan is ijs niet meer stabiel: het zet zich om naar **water** (H₂O in vloeibare toestand), een stof die bij hogere temperaturen stabiel is. Ook water is niet bij elke temperatuur stabiel: bij 100°C zet water zich om in **waterdamp** (H₂O in gasvormige toestand), de stof die bij een druk van 1 atmosfeer stabiel is boven 100°C. Kort samengevat: bij gelijkblijvende druk (1 atmosfeer) is van de verbinding H₂O beneden 0°C ijs stabiel, tussen 0°C en 100°C is water stabiel, en boven 100°C is waterdamp stabiel.

Welke stof stabiel is bij welke omstandigheden wordt weergegeven in **fasendiagrammen**. In Afb. 4 is het fasendiagram van de verbinding H₂O getekend. Drie lijnen verdelen het vierkant in drie gebieden, de stabiliteitsvelden van de drie mogelijke fasen van H₂O: ijs, water en damp. Op de verticale as is de druk uitgezet (P, van het Engelse woord pressure), en op de horizontale as de temperatuur (T). In zo een fasendiagram, kan men voor ieder willekeurig punt twee zaken aflezen: 1) op de verticale en horizontale assen de waarden van druk en temperatuur voor dat punt; 2) de fase die bij deze omstandigheden van druk en temperatuur stabiel is. Zo geeft punt M in Afb. 4 dus weer dat de druk ca. 25 atmosfeer is en de temperatuur ca. 50°C, en dat het punt zich in het veld van vloeibaar H₂O bevindt: bij deze omstandigheden is water dus stabiel. De punten 1 atmosfeer en 0°C, en 1 atmosfeer en 100°C kent u al: zij vallen op de grenslijnen tussen twee gebieden, want het zijn omstandigheden waarbij een fase naar een andere omzet. Volgen we in Afb. 4 een horizontale lijn van links naar rechts ter hoogte van 1 atmosfeer, dan

Afb. 4. Fasendiagram van H₂O. Drie volle lijnen verdelen het vierkant in drie gebieden, de stabiliteitsvelden van ijs, water en damp voor verschillende combinaties van druk (P, verticale schaal) en temperatuur (T, horizontale schaal). Van ieder punt in het diagram kan men aflezen wat de omstandigheden zijn, en welke fase daarbij stabiel is: het punt M (P = 25 atm., T = 50°C) bevindt zich in het stabiele gebied van water. Onder normale luchtdruk (1 atm.) en bij stijgende temperatuur (horizontale streepjeslijn) zet ijs bij 0°C om in water, en water bij 100°C in damp. Terwille van de duidelijkheid zijn druk en temperatuur niet op juiste schaal weergegeven.

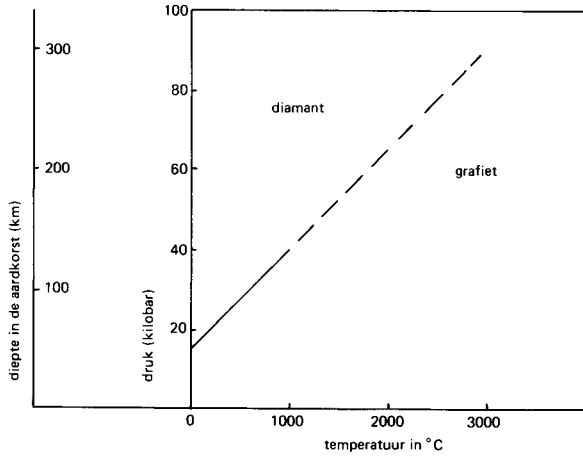


Afb. 5. Experimenteel bepaalde stabiliteitsvelden van albiet en jadeiet + kwarts. Bij een gelijkblijvende temperatuur van 200°C wordt bij toenemende druk (verticale streepjeslijn met pijl) de veldspaat albiet onstabiel bij een druk van ca. 9 kilobar; onder behoud van de totale chemische samenstelling zet albiet dan om naar een stabiel mengsel van twee mineralen: de pyroxeen jadeiet, en kwarts.

gaan we bij stijgende temperatuur achtereenvolgens door de velden van ijs, water en waterdamp; bij een luchtdruk van 1 atmosfeer is 0°C het smeltpunt van ijs of het vriespunt van water, en 100°C is het kookpunt van water of het condenspunt van waterdamp.

Bij de zeer overgrote meerderheid van mineralen, vooral de gesteentevormende, gebeuren de meeste omzettingen van de ene structuur naar de andere in vaste toestand: hun smeltemperatuur ligt veelal een eind boven de 1000°C. Als een mineraal aan omstandigheden onderworpen wordt buiten zijn stabiliteitsveld, kan het twee dingen doen: 1) indien mogelijk een meer stabiele kristalstructuur aannemen met behoud van zijn chemische samenstelling, met andere woorden: een polymorfe structuur vormen die bij de nieuwe druk en/of temperatuur stabiel is; 2) indien dit niet mogelijk is, moet het mineraal omzetten naar een mengsel van twee of meer mineralen die bij de nieuwe omstandigheden wel stabiel zijn. Dit laatste geval wordt geïllustreerd in Afb. 5. Voor het aangeven van de druk wordt daarin een andere eenheid gebruikt dan in Afb. 4. Deze eenheid, de kilobar, is meer geschikt voor de geologische omstandigheden van hoge druk; 1 atmosfeer is ongeveer 1 bar, en 1 kilobar = 1000 bar, dus ongeveer 1000 atmosfeer. (Officieel moet druk in pascal (Pa) uitgedrukt worden, waarbij 1 kilobar = 100 megapascal (MPa), maar geologen hebben altijd met kilobar gewerkt, en zullen dat nog wel een tijdje blijven doen!) In de aardkorst heersen enorme drukken door de grote massa van de bovenliggende gesteentepakketten; zo is er op een diepte van 10 km in de aardkorst een druk van ongeveer 2,5 tot 3 kilobar. Ter vertaling van de eigenlijk weinig zeggende drukken in kilobar is in Afb. 5 (en ook in de volgende afbeeldingen) een tweede verticale schaalverdeling aangebracht: de diepte in de aardkorst waarbij de overeenkomstige druk heerst.

Laten we terugkeren naar Afb. 5. De veldspaat albiet, NaAlSi₃O₈ (een natrium-aluminium-silicaat), is alleen bij relatief lage druk stabiel in de aardkorst. Bij hogere druk is er geen polymorfe structuur van de verbinding NaAlSi₃O₈, en dus moet albiet omzetten naar een mengsel van minera-

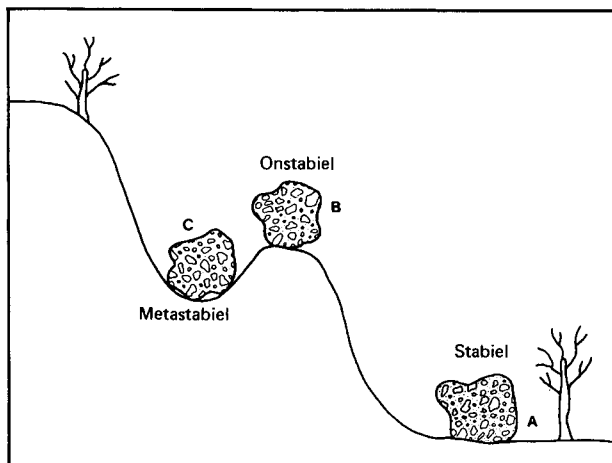


Afb. 6. Stabiliteitsvelden van de twee polymorfen van het element koolstof: grafiet en diamant; berekend tot ongeveer 1000°C, daarboven geëxtrapoleerd (streepjeslijn).

len: de pyroxeen jadeiet, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ (een ander natrium-aluminium-silicaat), en kwarts, SiO_2 . In Afb. 5 kan men zien dat deze omzetting bij een temperatuur van 200°C zal plaatsvinden bij een druk van ongeveer 9 kilobar, wat overeenkomt met een diepte in de aardkorst van ongeveer 30 km. Als een gesteente met albiet erin door geologische processen op een diepte van 30 km in de aardkorst terecht komt, zal albiet door de hoge druk omzetten in jadeiet en kwarts. Men kan het proces als een chemische reactie opschrijven: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \rightleftharpoons \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2$.

Als er onder de veranderde omstandigheden wel een polymorfe structuur bestaat van het onstabiel geworden mineraal, verlopen de zaken nog eenvoudiger. Afb. 6 is het fasendiagram van het element koolstof: er zijn maar twee fasen mogelijk, grafiet en diamant. In het diagram kan men zien dat diamant slechts bij hogere drukken stabiel is.

Afb. 7. Rotsblok a is stabiel: het heeft de bodem van de vallei bereikt, en kan niet meer verder rollen. Rotsblok b is onstabiel: het geringste stootje zal het blok naar beneden doen rollen. Rotsblok c is metastabiel: net als blok b zou het onder de invloed van de zwaartekracht de helling moeten afrollen, maar een drempel verhindert dat proces. Blok c zal schijnbaar stabiel blijven liggen tot de drempel verdwijnt.



Dat is eigenlijk niet zo'n wonder; in de tabel met de vergelijking van de fysische eigenschappen van die twee mineralen hebben we gezien, dat de dichtheid van diamant ($3,5 \text{ g/cm}^3$) veel hoger is dan die van grafiet ($2,2 \text{ g/cm}^3$). Eenzelfde aantal koolstof-atomen neemt bij diamant dus veel minder ruimte in dan in de structuur van grafiet; bij omzetting van grafiet naar diamant neemt het volume af met 36%! De minimale druk die nodig is voor het vormen van diamant is ongeveer 15 kilobar, wat overeenkomt met een diepte in de aardkorst van ongeveer 50 km.

Metastabiliteit

Onder de voor ons gewone omstandigheden van druk en temperatuur (1 atmosfeer, ca. 20°C) is volgens Afb. 6 grafiet eigenlijk de stabiele polymorf van het element koolstof. Toch maakt diamant onder die omstandigheden bepaald niet de indruk erg onstabiel te zijn, noch vertoont diamant een duidelijke neiging om naar grafiet om te zetten (gelukkig maar!). Dat komt omdat het omzettingstempo van diamant naar grafiet uiterst traag is.

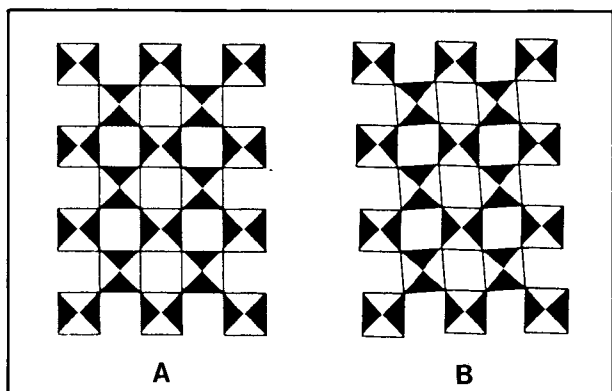
De verandering van het ene polymorfe mineraal naar een ander noemt men een inversie of een transformatie, in gewoon Nederlands: een **omzetting**. Sommige omzettingen gebeuren zeer snel, bv. de verandering van ijs naar water, of omgekeerd. Heel wat polymorfe modificaties hebben echter een zeer langzame omzettingssnelheid, zo traag dat zij ook nog buiten hun stabiliteitsveld schijnbaar stabiel kunnen voorkomen. Een typisch voorbeeld is diamant, dat eigenlijk slechts bij zeer hoge drukken stabiel is, maar toch aan het aardoppervlak blijft bestaan. Men zegt van dergelijke stoffen dat zij **metastabiel** kunnen zijn. Dit begrip is in Afb. 7 beeldend weergegeven. Mineralen kunnen metastabiel zijn omdat zij niet voldoende energie hebben om een bepaalde drempel te overschrijden: hun omzetting naar de stabiele fase laat op zich wachten, desnoods erg lang. Gelukkig zijn er zeer veel mineralen metastabiel onder onze omstandigheden: de mineralogie zou tamelijk eentonig zijn als er aan het aardoppervlak alleen maar stabiele mineralen zouden voorkomen. Belangrijker is uiteraard dat het voorkomen van metastabiele mineralen ons iets kan vertellen over de vormingsgeschiedenis van gesteenten en ertsen.

Polymorfe omzettingen

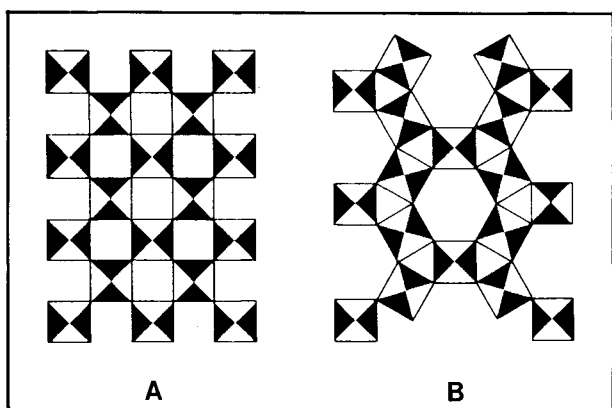
Er zijn twee typen van polymorfe transformaties, van omzettingen van de ene kristalstructuur naar een andere zonder wijziging in de chemische samenstelling (Afb. 8 en Afb. 9).

Er zijn omzettingen waarbij slechts een geringe **verplaatsing** nodig en voldoende is om uit de ene structuur de andere structuur te laten ontstaan (Afb. 8, van A naar B, en omgekeerd): er worden geen bindingen doorbroken, de atomen verplaatsen zich bijna niet. Deze omzettingen hebben slechts weinig energie nodig, en zij vinden plaats bij een strikt bepaalde temperatuur en druk; bovendien gebeuren zij altijd onmiddellijk in die omstandigheden, en zijn zij omkeerbaar. Het is duidelijk dat bij polymorfen die via een dergelijke omzetting gevormd worden metastabiliteit niet mogelijk is, want de omzetting vindt altijd plaats, en zij is bovendien razendsnel.

Daarnaast is er een ander type van transformatie waarbij een volledige **verbouwing** een voorwaarde is om van de ene structuur naar de andere te kunnen gaan (Afb. 9, van A naar B, en omgekeerd): de oude bindingen tussen de atomen moeten eerst doorbroken kunnen worden, voor-



Afb. 8. Polymorfe omzetting door verplaatsing. De twee kristalstructuren A en B bestaan uit dezelfde bouwelementen. De omzetting van A naar B, of omgekeerd, gebeurt door slechts een geringe verplaatsing van die elementen, er worden geen bindingen doorbroken. Daardoor is dit type omzetting zeer snel, en gebeurt deze altijd onmiddellijk bij het overschrijden van de stabiliteitsgrenzen. (Naar Berry, Mason & Dietrich (1983): Mineralogy; uitg. Freeman & Comp.)



Afb. 9. Polymorfe omzetting door verbouwing. De twee kristalstructuren A en B bestaan uit dezelfde bouwelementen. Maar de omzetting van A naar B, of omgekeerd, kan slechts gebeuren nadat de oude bindingen doorbroken zijn. Pas daarna kan een reorganisatie van die bouwelementen in een nieuwe structuur plaatsvinden. Als er niet voldoende energie aanwezig is om de drempel van het doorbreken van de bindingen te laten gebeuren, zal de oude structuur metastabiel blijven bestaan. (Naar Berry, Mason & Dietrich, 1983)

dat de atomen op volledig andere plaatsen in een nieuwe structuur georganiseerd kunnen worden. Het doorbreken van de bindingen vormt daarin een grote drempel: als daarvoor niet voldoende energie aanwezig is, dan blijft bij gebrek aan beter de oude structuur gewoon verder bestaan buiten zijn stabiliteitsveld. De omzettingssnelheid is dan zo traag dat het mineraal metastabiel kan zijn.

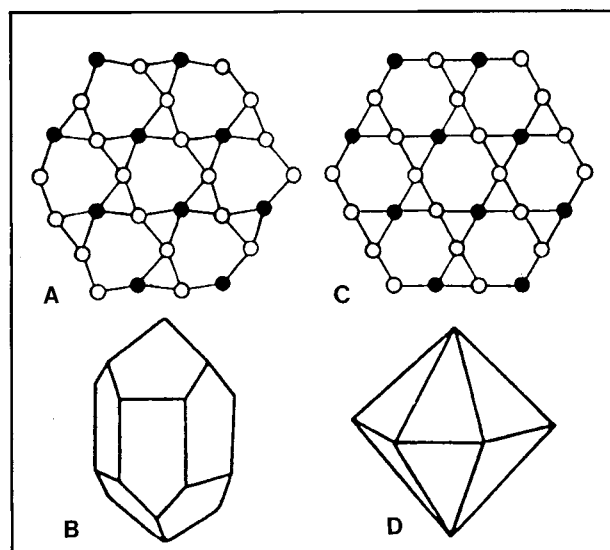
SiO₂

Beide typen van polymorfe omzettingen komen voor bij verschillende modificaties van de verbinding SiO₂. Bij

normale druk (ongeveer 1 bar) is laag-kwarts stabiel tot slechts 573°C; bij een hogere temperatuur is het mineraal hoog-kwarts stabiel. De omzetting van laag-kwarts naar hoog-kwarts, en omgekeerd, is een omzetting met slechts een geringe verplaatsing van atomen zonder doorbreken van bindingen: de omzetting gebeurt altijd en onmiddellijk, en wel bij exact 573°C. Hoog-kwarts kan dus niet metastabiel voorkomen: alle kwarts die wij zien heeft de inwendige structuur van laag-kwarts. De structuren van hoog- en van laag-kwarts verschillen niet zoveel van elkaar (Afb. 10); hoog-kwarts heeft een zeshoekige (hexagonale) symmetrie, en laag-kwarts heeft door kleine verplaatsingen van de atomen een driehoekige (trigonale) symmetrie. Dit verschil in symmetrie in de inwendige bouw vindt men ook terug in de symmetrie van de uitwendige kristalvormen (Afb. 10). Als SiO₂ boven 573°C kristalliseert, neemt het bij vrije groei wel de kristalvorm aan van hoog-kwarts, heel vaak een zeshoekige dubbele piramide (hexagonale dipiramide); bij daling van de temperatuur (afkoeling van gesteente) zet bij 573°C de inwendige structuur zich onmiddellijk om naar laag-kwarts, maar de uitwendige vorm blijft wel behouden: die kan niet meer veranderen omdat het proces zich in vaste toestand afspeelt. De kristalvorm is dan een getuige van de hoge temperatuur die eens geërft moet hebben: men weet dan dat de oorspronkelijke vormingstemperatuur minimaal 573°C geweest moet zijn, anders zouden er geen kristallen van hoog-kwarts gevormd kunnen zijn.

Hoog-kwarts is bij een druk van 1 bar stabiel van 573°C tot 870°C; bij een temperatuur hoger dan 870°C is de SiO₂-modificatie tridymiet stabiel. De omzetting van tridymiet uit hoog-kwarts is van het type waarbij de atomen volledig opnieuw georganiseerd worden in een

Afb. 10. Laag-kwarts en hoog-kwarts. De structuren van laag-kwarts (A) en hoog-kwarts (C) kunnen in elkaar omzetten, bij 573°C en 1 atmosfeer, via een geringe verplaatsing van de bouwelementen: er moeten geen bindingen doorbroken worden. De symmetrie van hoog-kwarts is regelmatig dan die van laag-kwarts: hoog-kwarts heeft een zeshoekige symmetrie, laag-kwarts daarentegen een driehoekige. De kristalvormen van beide mineralen zijn dan ook verschillend: laag-kwarts vormt meestal prisma's met aan elk van de uiteinden 3 vlakken van de rhomboëder-vorm (B), terwijl hoog-kwarts zeshoekige dubbele piramiden vormt (D).



andere structuur. In de richting van hoog-kwarts naar tridymiet toe, dus bij stijgende temperatuur, gaat dat wel, want er wordt energie toegevoerd, voldoende om de oude bindingen van de hoog-kwarts structuur te doorbreken. Omgekeerd, van tridymiet naar hoog-kwarts, dus bij dalende temperatuur, gaat de omzetting meestal niet door, zeker als de afkoeling relatief snel gebeurt. In lava's waarin een zeer hoge temperatuur heerst, kunnen zich tridymiet-kristallen vormen; door het uitvloeien aan het aardoppervlak koelt het gesteente zeer snel af, en blijven de tridymiet-kristallen daardoor metastabiel bestaan. Ook de omzetting van tridymiet naar **crystaliet**, en omgekeerd, bij 1470°C is een omzetting van het verbouwings-type. Kristallen van de twee hoog-temperatuur modificaties van SiO₂, tridymiet en crystaliet, kan men bv. in de Eifel in lava's aantreffen (Afb. 11).

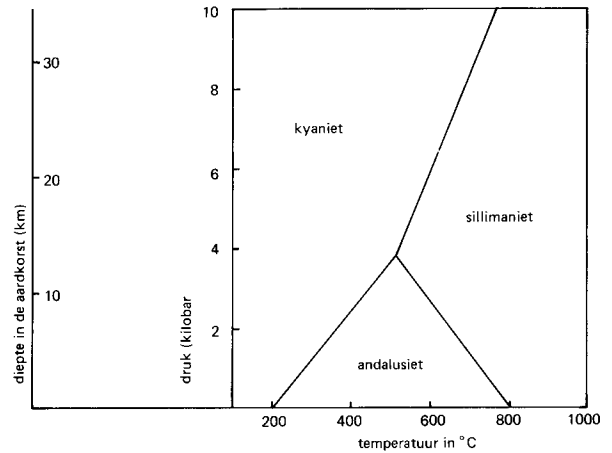
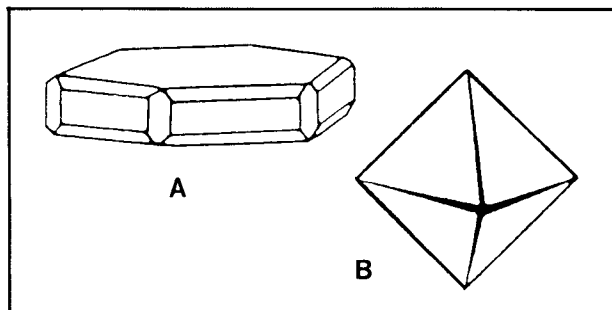
Andalusiet, sillimaniet, kyaniet

Deze drie polymorfe mineralen vormen een klassiek voorbeeld van het gebruik van index-mineralen in de petrologie van metamorfe gesteenten. Een index-mineraal (of gidsmineraal) geeft alleen al door zijn aanwezigheid in een gesteente informatie over druk, temperatuur en/of chemische concentratie van bepaalde elementen tijdens zijn vorming.

De drie mineralen van de verbinding Al₂SiO₅ (een aluminium-silicaat) komen voor in schisten, gesteenten die ontstaan zijn door de metamorfose (omvorming bij hogere druk en/of temperatuur) van aluminium-rijke sedimenten als klei.

Het fasendiagram van Al₂SiO₅ (Afb. 12) is redelijk goed bekend. Dergelijke diagrammen worden experimenteel in het laboratorium bepaald: door uitgangsmateriaal met de samenstelling Al₂SiO₅ aan verschillende combinaties van druk en temperatuur te onderwerpen bepaalt men de grenzen van de stabiliteitsgebieden van de drie polymorfe mineralen. Omdat andalusiet, sillimaniet en kyaniet belangrijke mineralen zijn in de petrologie, hebben veel onderzoekers de diverse stabiliteitsgebieden bepaald. Daarbij kwamen nogal wat uiteenlopende resultaten tot stand; in de loop der jaren bleek dat relatief kleine onzuiverheden in het systeem van grote invloed zijn bij de bepaling van druk- en temperaturomstandigheden voor de drie polymorfen. Het fasendiagram in Afb. 12 is nu

Afb. 11. Kristallen van tridymiet (A) en van crystaliet (B), de twee hoog-temperatuur modificaties van SiO₂. Tridymiet vormt dunne hexagonale plaatvormige kristallen, en crystaliet vormt oktaëdrische kristallen. De structuren van beide mineralen zijn totaal verschillend van die van laag- en hoog-kwarts.



Afb. 12. Stabiliteitsvelden van de mineralen andalusiet, sillimaniet en kyaniet, de drie polymorfen van Al₂SiO₅. Andalusiet is stabiel bij relatief lage druk en temperatuur; sillimaniet is stabiel bij hoge druk en hoge temperatuur; kyaniet is de fase die stabiel is bij relatief lage temperatuur, maar bij hoge druk.

algemeen aanvaard als het meest waarschijnlijke; het is in 1971 opgesteld door Holdaway.

De drie mineralen zijn tamelijk makkelijk te herkennen in handstukken van schisten, vooral als die niet al te fijnkorrelig zijn. **Andalusiet** vormt prismatische kristallen met een ongeveer vierkante doorsnede; de kleur is meestal roze tot roodbruin; in de variëteit chistoliet komen kruisvormig ingesloten koolstofdeeltjes voor. **Sillimaniet** vormt langgerekte vezelige kristallen, meestal in radiaalstralige aggregaten; hun kleur is meestal wit of lichtgrijs. **Kyaniet** vormt vaak opvallend blauw gekleurde breedstengelige prisma's met een zeer duidelijke splijting. De aanwezigheid van deze mineralen in een gesteente geeft aan de hand van Afb. 12 onmiddellijk informatie over de vormingsomstandigheden.

Andalusiet komt meestal voor in contact-metamorfe gesteenten, bv. in metamorfe aureolen rond een granietische intrusie: daar heersen relatief lage druk en temperatuur. De minimale temperatuur voor de vorming van sillimaniet in Al-rijke gesteenten is volgens Afb. 12 ongeveer 500°C: het is de polymorfe die in hoog-metamorfe gesteenten voorkomt (hoge P en hoge T). Kyaniet is de modificatie van Al₂SiO₅ die bij zeer hoge drukken stabiel is, maar bij lagere temperaturen dan voor sillimaniet. Alle omzettingen van de Al₂SiO₅-polymorfen zijn van het verbouwings-type, zodat we de drie mineralen als metastabiele fasen kunnen zien in metamorfe gesteenten aan het aardoppervlak; hun voorkomen is een vingerwijzing, een index, naar vroegere omstandigheden van druk en temperatuur in de aardkorst.