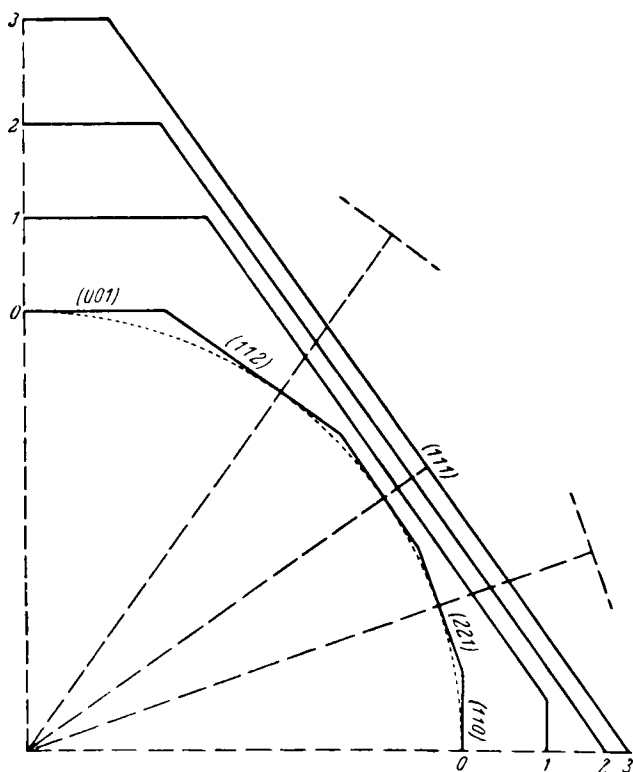


In dit artikel zal worden geprobeerd een idee te geven hoe kristallen groeien en welke factoren op dit groeien van invloed kunnen zijn.

Al zijn we op het ogenblik aardig ver in het weten hoe een kristal er aan de buitenkant behoort uit te zien, de werkelijkheid onttrekt zich meestal aan onze normen, zodat kristallen er altijd wat anders uitzien dan we zouden verwachten. Het is bijzonder moeilijk maar ook fascinerend om daar een verklaring voor te vinden.

Kristalvorm

Kristallen worden begrensd door bepaalde vlakken, die de kristalvorm bepalen. Bij sommige mineralen zijn de kristalvormen altijd dezelfde: keukenzout kristalliseert in kubusjes uit; aluin (kaliumaluminiumsulfaat plus wat water) in mooie, regelmatige achthoekjes (oktaëders).



Afb. 1. Doorsnede van een bol van aluin met opeenvolgende groeistadia. Het oktaëdervlak (111) groeit langzaam, het kubusvlak (001) groeit sneller, zodat uiteindelijk het kristal begrensd zal worden door het langzaamst groeiende vlak. Het kristal heeft dan de vorm van een oktaëder (regelmatig achthoek) waarvan we in de tekening maar één vlak zien. De andere vlakken (110), (221) en (112) groeien nog sneller en zijn al na korte tijd helemaal verdwenen. (Uit: C. W. Correns, Einführung in die Mineralogie)

Bij andere mineralen kunnen meer vormen voorkomen, maar overheerst één bepaalde configuratie: pyriet, bariet, kwarts. Een mineraal met zeer veel verschillende vormen is calciet: er zijn spitse, vlakke, bijna ronde vormen en er zijn er met weinig en met veel vlakjes. De vraag waar het om gaat is: waarom deze diversiteit, hoe zijn deze verschillen te verklaren en hoe moeten we het probleem benaderen.

Groeisnelheid

De oorzaak van de verschillende kristalvormen ligt in het feit, dat de vorm bepaald wordt door de snelheid waarmee de vlakken groeien. Deze groeisnelheid is vaak verschillend voor de diverse vlakken van een kristal. Dit is goed te zien op afb. 1, waar de doorsnee van een aluinkristal afgebeeld is. Dit kristal was bol geslepen en daarna in een oververzadigde oplossing gedompeld. Het ging groeien, er kwamen vlakjes aan, waarvan sommige langzaam, andere sneller groeiden. De snelgroeende vlakken blijken in een latere groeifase verdwenen te zijn. De vlakken die het langzaamst groeien bleven over, zodat uiteindelijk de oktaëdervorm resulteerde.

Als het vlak groot is, betekent dit, dat het langzaam is gegroeid. Vlakken die snel groeien verdwijnen — hardlopers zijn doodlopers.

De groeisnelheid van kristallen wordt bepaald door inwendige en uitwendige factoren. Onder de inwendige factoren valt de structuur van het mineraal; de uitwendige factoren zijn de invloeden die van de omgeving uitgaan. Dezelfde factoren spelen ook in de biologie een rol; een paardebloem, met zijn specifieke blad- en bloemvorm, zal in de bergen kleiner en mieziger zijn dan beneden in de vette kleigrond.

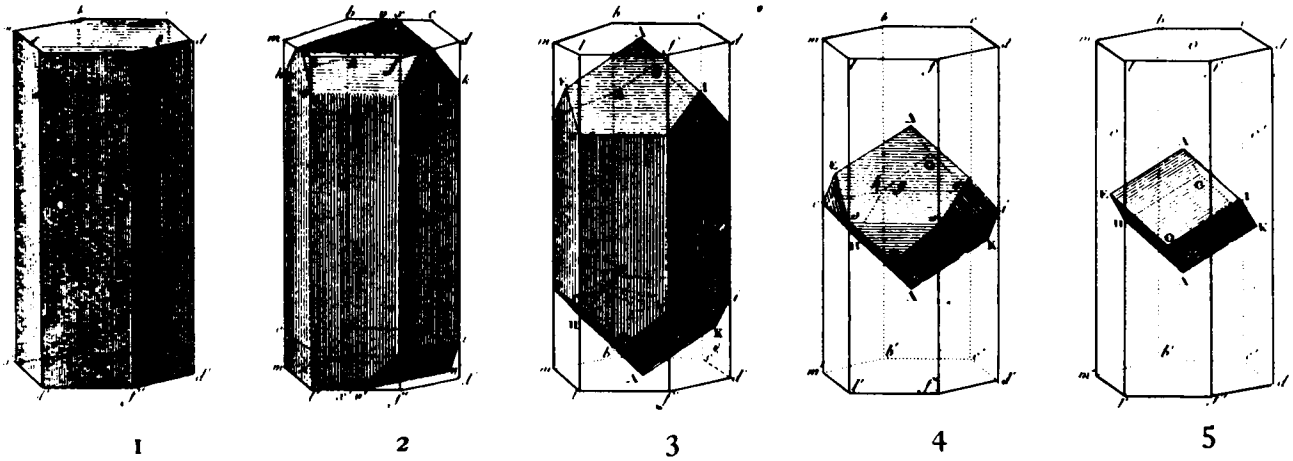
Inwendige factoren, de erfelijke eigenschappen, bepalen het **genotype** van plant en dier. Beïnvloeding door de omstandigheden en de omgeving doet het **fenotype** ontstaan. Door de Zwitserse mineraloog Paul Niggli werden de begrippen genotype en fenotype ook op de kristallografie toegepast.

Inwendige factoren

De belangrijkste inwendige factor is de kristalstructuur van een mineraal. Deze kristalstructuur is de periodieke herhaling van een motief. Dit motief is al op atomaire schaal aanwezig.

De eerste experimenten dienaangaande werden circa 1780 gedaan door René Just Haüy te Parijs. Van een groot calcietkristal, zuilvormig, met boven en onder twee platte vlakken, brak hij een stuk af, afb. 2. De breuk liep kennelijk volgens een nieuw vlak, een der ribben bleef afgekapt. Al probeerend vond Haüy, dat sommige ribben wel, andere niet afkapbaar waren, zowel aan boven- als onderzijde van zijn kristal. Wat hij na lang splijten overhield was een soort platgedrukte kubus, een rhomboëder, en wat hij ook deed, deze rhomboëdervorm bleef bestaan. Zelfs als hij tot moleculaire schaal zou blijven splijten, bleef zijn kristal een rhomboëder. Het calcietmolecuul zou dus deze vorm moeten hebben.

We weten nu, dat Haüy niet eens zo ver van de werkelijkheid af was: een verzameling van moleculen heeft ongeveer



Afb. 2. De originele gravure waarmee Hauy liet zien hoe hij aan zijn concept van het „molécule intégrante” kwam. Successievelijke splijting van het zuilvormige calciet kristal geeft als uiteindelijk resultaat de rhomboëder als splijt-vorm. Deze vorm zou het molécule intégrante van calciet ook moeten hebben.

deze vorm. Het kristal kunnen wij ons opgebouwd denken uit een aaneenschakeling van precies dezelfde soorten moleculen, waaruit de hele stof opgebouwd is. Hauy noemde dit de „molécule intégrante”.

Behalve dat de soorten moleculen alle gelijk zijn is ook de periodieke openvolging gelijk. Dit betekent, dat er een periodieke structuur in drie dimensies is.

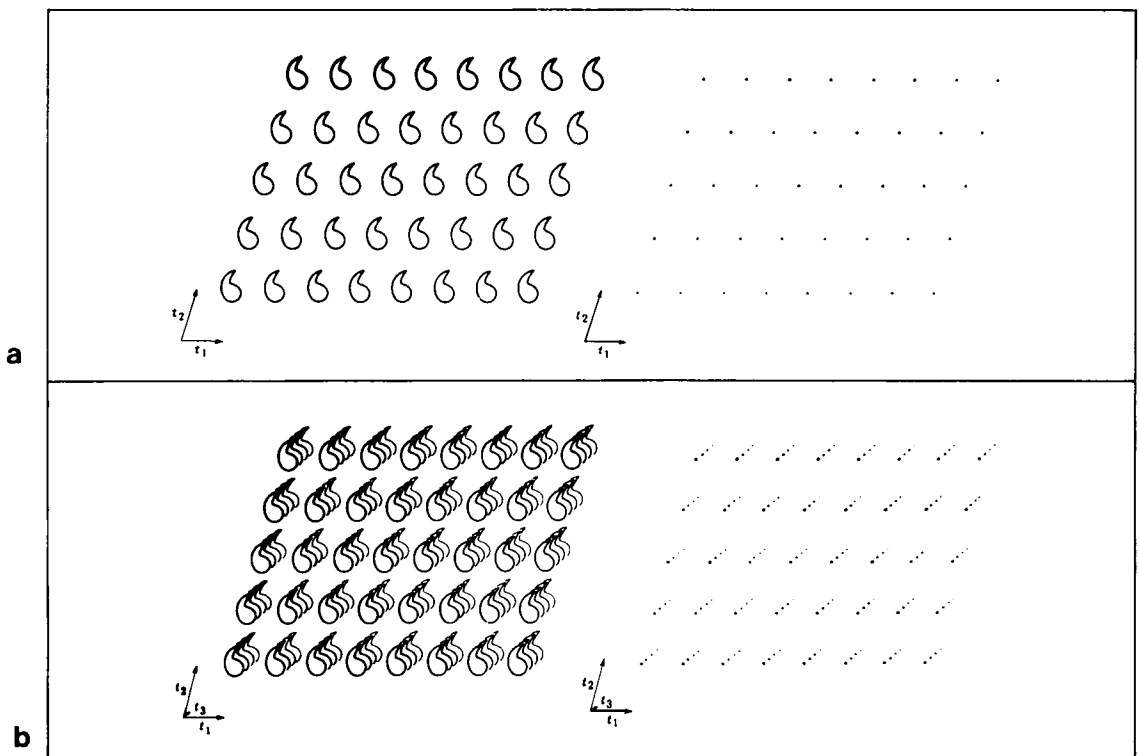
Deze periodieke structuur is de herhaling van een bepaald motief, bestaande uit een aantal atomen of moleculen.

Ook in de kunst komt vaak de herhaling van een bepaald motief voor, in één, twee of drie dimensies. Afb. 3 veranschouwt deze periodieke structuur. Het motief, een soort komma, wordt in (a) in twee richtingen herhaald. Stellen we het motief nu voor als een punt, dan krijgen we het

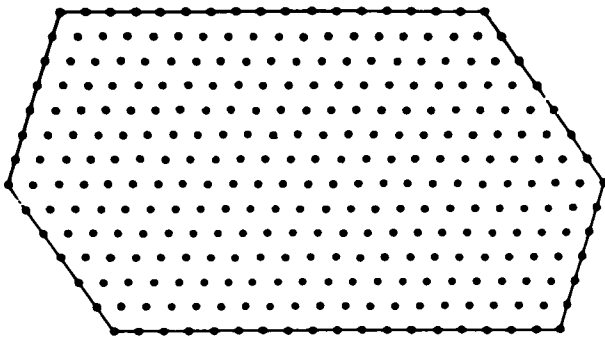
rechterdeel van fig. 3(a). Zo'n puntenverzameling noemt men een rooster. Hetzelfde laat fig. 3(b) zien maar dan in drie dimensies. In zo'n rooster kan men nu een cel denken, die er uitziet als een scheef blok (parallelepipedum) met als ribben de afstanden t_1 , t_2 en t_3 . De hele structuur kan dus opgevat worden als een aaneenschakeling van deze cellen. Afb. 4 laat in twee dimensies zien wat de begrenzing van zo'n kristal zou kunnen zijn. Het is begrensd door drie ribben, die evenwijdig lopen aan richtingen waarin de motiefjes dicht op elkaar zitten, waar dus de herhalingsperiode erg kort is.

Afb. 3. Een periodieke structuur in twee dimensies (a), verkregen door een motief te herhalen telkens na een afstand t_1 in de ene richting en een afstand (periode) t_2 in een andere richting. De rechter figuur laat het tweedimensionale rooster zien. In (b) is nog een derde periode t_3 toegevoegd.

(Uit: M.J. Buerger, Elementary Crystallography).



Afb. 4. Een tweedimensionaal kristalrooster begrensd door ribben evenwijdig aan de drie kortste perioden. (Uit: W. Kleber, Einführung in die Kristallographie).



Wanneer de moleculen enorm groot zijn, kunnen ze soms afzonderlijk zichtbaar gemaakt worden. Dit is het geval bij afb. 5 van een electronenmikroskopische opname van een tabaksmozaïekviruskristal. De bolvormige moleculen en hun periodiciteit zijn hier goed zichtbaar. Bij kristallen met moleculen van normale afmetingen zijn deze niet of nauwelijks te onderscheiden.

Groei van kristallen

Een plat vlak, dat plat blijft tijdens het groeien, zal in lagen worden uitgebouwd. Afb. 6 toont een kristal in twee dimensies, een laag op een kristalvlakje als het ware. De ruitjes zijn de motieven, de elementen. Het kristal is begrensd door bepaalde ribben. Waar in een der lijnen een element ontbreekt, zit een kink. Waar zal nu het volgende molecuul aangroeien? Mogelijk op plaats C, maar dan zit dit molecuul alleen van onderen gebonden. Komt het molecuul terecht op plaats A, dan is het behalve van onderen ook nog aan B gebonden.

Wanneer een stof-uitkristalliseert, heerst er in de oplossing een bepaalde temperatuur. De moleculen zijn in beweging. C heeft grote kans om te verdwijnen, maar A heeft goede kansen om te blijven. Als er na A nog een molecuul neerstrijkt, zit A helemaal goed ingesloten en kan er niet meer uit. Als er tussen A en B een sterke binding bestaat, zal er in die richting een aaneenschakeling van vele moleculen plaatsvinden. Is er een sterke binding in twee richtingen, dan zal er groei in lagen zijn.

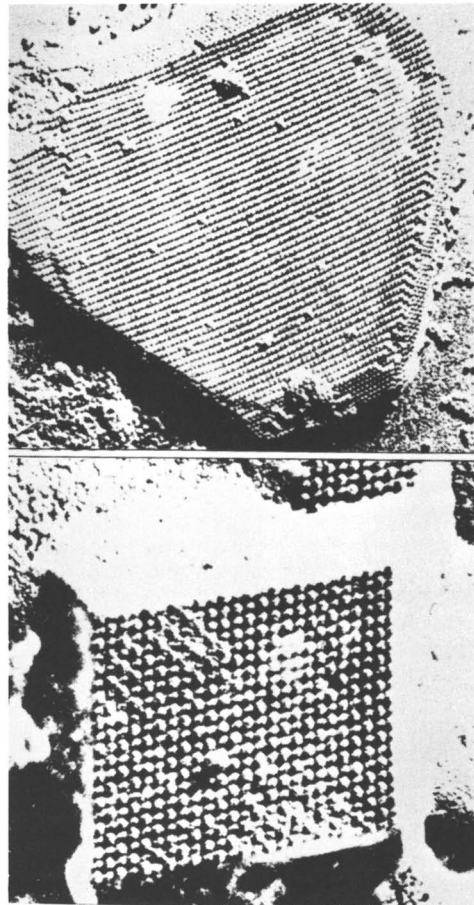
Er kunnen drie typen van vlakken geklassificeerd worden, met Engelse termen aangeduid als flat, stepped en kinked faces: Afb. 7. De flat faces — platte vlakken — lopen evenwijdig aan richtingen waarin ononderbroken ketens van bindingen in één bepaalde richting liggen, en wel in twee richtingen in een hele laag. Dit is namelijk noodzakelijk om een vlak te laten groeien in een opeenvolging van lagen.

Een stepped-face — getrappt vlak — loopt evenwijdig aan één richting met een sterke binding, terwijl een kinked face — vlak met kinken — helemaal niet evenwijdig aan een richting met sterke bindingen loopt.

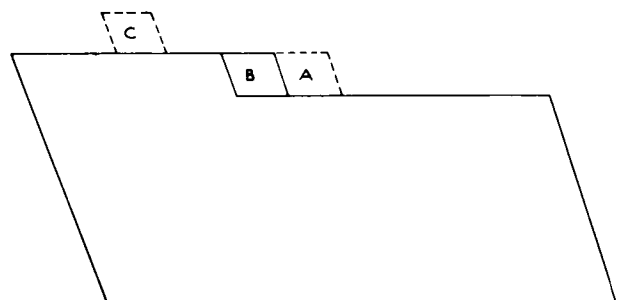
Stellen wij ons nu het motief als een kubusje voor, dan zien we in fig. 7 dat in een K-vlak elk kubusje aan drie andere gebonden is. Zo'n kubusje zit dus stevig vast en gaat moeilijk weer in oplossing. De groei gaat dus heel snel. Als er maar naar twee kanten sterke bindingen zijn, is de groei minder snel (S-vlak).

Bij een sterke binding naar één kant gaat de groei nog langzamer. In de praktijk houdt je alleen maar de zg. F-vlakken over.

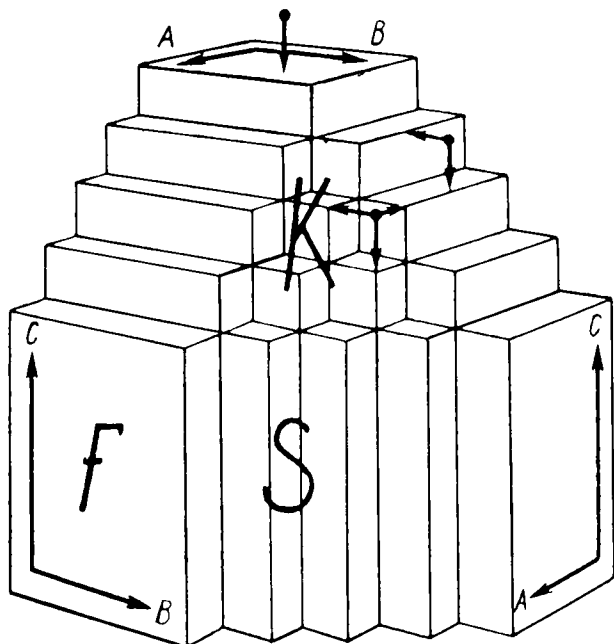
Afb. 5. Electronenmikroskopische opname van een kristal van het tabaksmozaïekvirus. De afzonderlijke moleculen zijn hier zichtbaar en ze zijn duidelijk in een rooster gerangschikt. (Uit: C. Bunn, Crystals).



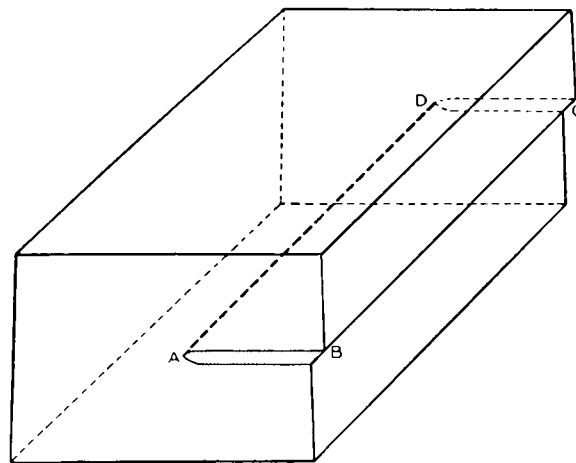
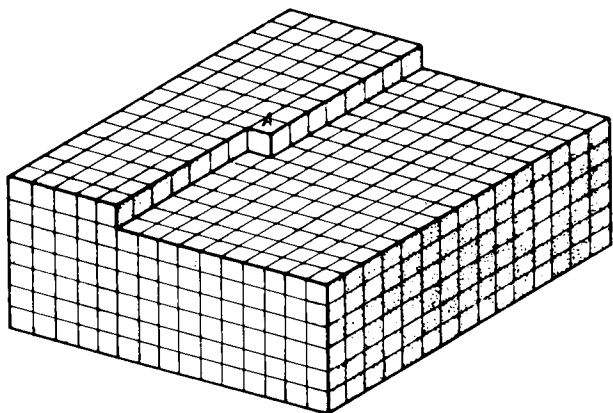
Afb. 6. Tweedimensionaal kristal begrensd door vier ribben. De bovenste ribbe vertoont bij B een kink, waar een molecuul A in past. Als er tussen A en B een sterke binding is, zal een molecuul bij voorkeur in A en niet in C worden aangehecht. De ribbe ontstaat dus doordat de moleculen in die richting door sterke bindingen aan elkaar gebonden zijn. Zouden die er niet zijn, dan zou in plaats van een rechte ribbe een zeer onregelmatige begrenzing optreden. Een groei in lagen is dus mogelijk als er in tenminste twee richtingen sterke bindingen zijn.



Afb. 7. Een driedimensionaal kristal waarin in de richtingen A, B en C de moleculen (motieven) met sterke bindingen aan elkaar gebonden zijn. Er zijn drie vlakken die laagsgewijs kunnen groeien, het bovenzvlak AB, het voorvlak BC en het zijvlak AC. Daar tussen in zijn vlakken, die niet in lagen kunnen groeien en op moleculaire schaal een getrappt oppervlak hebben. Ze zijn evenwijdig aan één bindingsrichting A, B of C. Een derde categorie vlakken is aan geen enkele van deze richtingen evenwijdig en groeit zeer snel. De drie soorten vlakken worden respectievelijk F, S en K vlakken genoemd.



Afb. 8. Oppervlakte van een ideaal kristal, waarvan de motieven als kubusjes worden voorgesteld. Op het bovenste kubusvlak groeit een laag, begrensd door een trapje of trede, waarin een kink zit. De groei vindt plaats in de kinks, totdat de hele rij vol is, waarna een nieuwe rij kristalliseert en zo vervolgens tot het hele vlak is bedekt met een nieuwe laag. (Uit: A. R. Verma, Crystal growth and dislocations).



Afb. 9. Een niet-ideaal kristal met een schroefdislocatie. Deze veroorzaakt op het vlak waar hij uittreedt een trede, die tijdens het gehele kristalgroei proces behouden blijft. (Uit: W. T. Read, Jr., Dislocations in crystals).

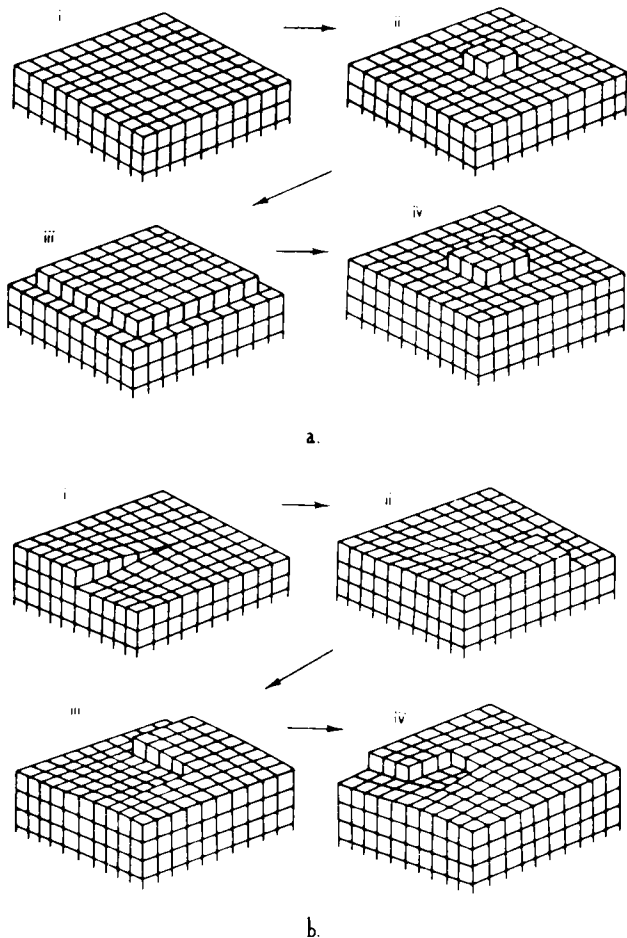
Om duidelijk te maken hoe dit alles er aan de oppervlakte uitziet dient afb. 8: een model van kubusjes, die op elkaar gestapeld zijn. Elk kubusje in het kristal is gebonden aan zes burens. Aan de oppervlakte, in een groeiende laag, zit een kink. Op deze plaats past een molecuul, dat dan gebonden is aan drie burens. Het volgende molecuul past hiernaast, enzovoort, tot de rij vol is. Dit wordt herhaald met de volgende rijen, tot het vlak is gevuld.

Deze groeitheorie werd aanvaard tot ongeveer 1950. Omstreeks deze tijd ging men eens nader uitrekenen, hoe groot de oververzadiging wel zou moeten zijn, om het proces volgens deze theorie te doen verlopen. Men kwam tot de conclusie, dat de oververzadiging ongeveer 25-50% zou moeten zijn. Maar in de praktijk kan een kristal al gemakkelijk groeien als de oververzadiging 1% of lager is. De vraag waarom theorie en praktijk niet overeenstemden hield velen bezig. Immers, als een plat vlak helemaal gevuld is, moet er opnieuw begonnen worden met een nieuw vlak. Dit vereist een nieuwe, tweedimensionale kristallisatiekiem, die moeite zal hebben zich zonder de nodige „burens“ te handhaven. Het door mensen uitgedachte groeiproces is kennelijk niet nodig en in werkelijkheid zal het anders toegaan. Het was F. C. Frank uit Bristol, die een nieuwe gedachtegang ontwierp. Hij redeneerde aldus. Een gewoon, normaal kristal is niet ideaal, er zitten fouten in. Een soort afwijking, een dislocatie, kan helpen om de kristalgroei te verklaren. Wanneer we een kristal aan één kant in een bankschroef zouden zetten en de bovenkant van het kristal naar achteren zouden duwen en de onderkant naar voren, dan kan het gebeuren dat in het kristal een afschuiving, een slip, gaat optreden. Omdat het kristal vast zit, ontstaat er binnenin een onregelmatigheid, een schroefdislocatie, zie afb. 9. Er wordt als het ware een plateau gevormd met een trapje, waaraan de moleculen zich gemakkelijk kunnen hechten. Dit trapje wordt door het aangroeien van moleculen krom, uiteindelijk ontstaat er een spiraal: een groeispiraal (zie afb. 10). Het kristal kan zo continu doorgroeien langs een groei-front. Is de groei bij het beginpunt aangekomen, dan is het kristal een trede hoger geworden. Het is één periode verschoven, één moleculaire afstand, ofwel circa $1/10.000.000$ cm. Bij uitzondering is zo'n groei-front ge-



René-Just Haüy, bezig met het meten van een calciet-rhomboëder met behulp van een contactgoniometer.

Afb. 10. Boven: vier stadia in de groei van een ideaal kristal. Na completering van een laag is een nieuwe tweedimensionale kiem nodig, omdat er geen trede met een kink meer is. Onder: vier stadia in de groei van een reëel kristal met een schroefdislocatie, waardoor er altijd een trede is. In de loop van het groeiproces krijgt deze trede de vorm van een spiraal.



makkelijk waar te nemen, zoals bij grof carborundum-poeder. Bij een vergroting van ongeveer 100 x is het groeifront van de carborundumkristallen al te zien.

Uiteraard beperken schroefdislocaties zich niet tot kristallen die in een bankschroef zitten vastgeklemd. Zij treden op, waar een gedeelte van het kristal verschuift ten opzichte van een ander deel. Dat kan op verschillende manieren gebeuren. Een mechanische oorzaak is het botsen van een kristal dat in een oplossing zweeft. Bij een plotselinge temperatuurval kan een deel van het kristal inkrimpen, maar het moet toch blijven passen op een ander, niet of minder gekrompen deel. Of er is een sluitsel tijdens de groei in het kristal terechtgekomen. Het bouwsel past niet meer, er komen spanningen en de dislocatie krijgt een kans.

We kunnen ons afvragen wat er gebeurt bij kristallen waar geen of heel weinig schroefdislocaties inzitten. Laten we een kristal als voorbeeld nemen, waar de schroefdislocatie alleen in verticale richting loopt.

Een horizontaal vlakje groeit netjes, maar de verticale vlakken groeien niet, zodat het kristal heel langgerekt wordt. Er zijn zeer lange, draadvormige kristallen bekend, zg. whiskers, die zeer elastisch zijn en waarin zelfs een knoop gelegd kan worden. Onder de microscoop tussen gekruiste nicols bezien vertonen ze uitdoving waar ze evenwijdig aan de trillingsrichtingen van de polarisatie-

filters liggen, een bewijs, dat deze delen tot één kristal behoren.

We zagen, dat een kristalstructuur is opgebouwd op periodieke wijze, door herhaling van een motief. In de praktijk kan een kristalvlak alleen maar groeien, als er een schroefdislocatie loodrecht op het vlak staat, waardoor je een groeispiraal krijgt. Als dit voor alle vlakken geldt en er zijn voldoende dislocaties aanwezig, dan hangt het van de kristalstructuur af, hoe zo'n kristal er gaat uitzien.

De noodzakelijke voorwaarde voor een rechte begrenzing van een kristal is immers, dat er in die richting een ononderbroken keten van een sterke binding is. Dat betekent, dat bij een kristalstructuur waarin in één richting sterke bindingen zijn, er een vezelstructuur verschijnt, bijvoorbeeld asbest. Zijn er sterke bindingen in twee richtingen die in een plat vlak liggen, dan ontstaat er een plaatvormige structuur: glimmers, grafiet. Bij grafiet zijn de koolstof-atomen aan elkaar gebonden in een zeshoek. Binnenin die zeshoek bestaan sterke bindingen, die in één vlak liggen. In richtingen buiten het vlak is de binding zwak, wat de bladvormige structuur verklaart.

Keukenzout heeft een sterke binding tussen natrium- en chlooratomen. Deze vormen een kubusvlak in drie richtingen, daarom is keukenzout kubusvormig.

Goudatomen hebben bindingen in diverse richtingen, deze liggen in de vlakken van oktaëder en kubus. Wanneer goudkristallen groeien, zijn ze dan ook begrensd door oktaëder- en kubusvlakjes.

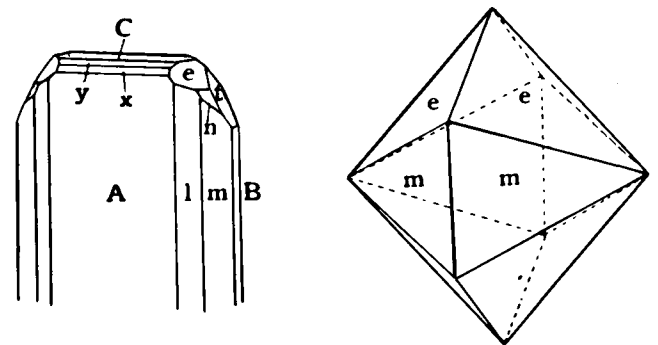
De koolstofatomen van diamant zijn gerangschikt in lagen; zo'n laag bestaat uit twee laagjes vlak op elkaar. De volgende laag staat daar een eind vanaf. De lagen vormen oktaëdervlakken, het zijn goede splijtvlakken.

De meeste diamanten worden gekloofd op de oktaëdervlakjes. Het is te begrijpen, dat een diamant ook volgens deze vlakken gegroeid is.

Uitwendige factoren

Tot de uitwendige factoren — door omgeving en omstandigheden bepaald — behoort in de eerste plaats oververzadiging.

Bij grote oververzadiging is het mogelijk, dat er andere vlakjes tevoorschijn komen dan bij kleine. Kaliumchloride bijvoorbeeld kristalliseert normaliter uit in kubusjes. Maak je een onderverzadigde oplossing van 50-60° C in een reageerbuisje en laat je het water snel verdampen door er een glazen staafje in te dompelen, dan er uit te halen en snel heen en weer te bewegen, dan krijg je een sterke oververzadiging. De KCl die uitkristalliseert doet dat niet in kubusjes maar in oktaëders.



Afb. 11. Kristallen van brookiet: een platte zeer algemeen voorkomende vorm en een pyramidaal-prismatische vorm, die alleen in bepaalde gesteenten voorkomt, o.a. in Arkansas. (Uit: H. A. Miers, Mineralogy).

Onzuiverheden vormen een andere uitwendige faktor. Onzuiverheid is alles, wat niet tot het kristal behoort. Keukenzout kristalliseert normaliter in kubusvorm uit. Voeg je aan de oplossing een toenemende hoeveelheid roodbloedloozout (kaliumferricyanide) toe, dan komt er in de kristalvorm van de NaCl verandering. Bij geringe toevoeging is er nog de kubusvorm, bij grotere veranderen de kubusvlakken, er komen andere vlakken voor in de plaats: oktaëdervlakken. Uiteindelijk ontstaat een oktaëdervorm. Ook de graad van oververzadiging is hier van belang. Is deze groter, dan gaat de verandering van vorm gemakkelijker. Dus: er is verandering van vorm als de oververzadiging groter wordt en naarmate de hoeveelheid onzuiverheid toeneemt. Het gaat hier om heel kleine hoeveelheden. Een hoeveelheid in de grootte-orde van 10^{-6} (één miljoenste deel) heeft al invloed.

Brookiet, titaandioxyde, kristalliseert in twee vormen uit. De platte vorm is verreweg het meest algemeen (afb. 11).

De pyramidaal-prismatische vorm komt maar op drie plaatsen voor, de bekendste is in Arkansas. De platte kristalvorm komt steeds voor in gesteenten met veel kwarts, de brookiet in Arkansas is te vinden in gesteenten zonder kwarts (nefeliensyeniet).

De theoretische vorm van brookiet is die van Arkansas (genotype). Waarom komt nu overal elders de platte vorm voor? De hypothese is, dat die platte vorm (fenotype) veroorzaakt wordt door een bijna overal – behalve in Arkansas – voorkomende onzuiverheid. Die onzuiverheid zou dan kwarts zijn.

Bij nog grotere oververzadiging komen er storingen in de kristalgroei, er verschijnen uitstulpingen. Hoe groter de groeisnelheid is, hoe meer. Er komen dan vertakte kristallen: dendrietten. We kennen deze vormen allemaal van sneeuw kristallen. Deze groeien zo snel, dat niet het complete zeskantige zuiltje, met een vlakje boven en onder, wordt gevormd, maar een dendrietachtig kristal. Dit is een storing, die vaak optreedt.

Kristalgroei in de petrologie

door Dr. C. Maijer

De gesteenten die we nu zien zijn meestal al lang of zelfs zeer lang geleden gekristalliseerd; de kristalgroei heeft dus al eerder of zelfs veel eerder plaats gevonden, zonder dat iemand het heeft zien gebeuren.

Toch is er in veel gevallen nog wel iets te vertellen over de groei van de kristallen in de diverse gesteenten, door de reconstructie van een gefixeerd groeipatroon, zoals dat vooral zichtbaar wordt onder de polarisatiemicroscopie bij het bekijken van slijpplaatjes (dunne doorsneden). Het genoemde onderwerp is ook dan nog zo uitgebreid, dat ik me zal moeten beperken tot enkele voorbeelden, en wel in eerste instantie tot stollingsgesteenten, d.w.z. gesteenten waarvan de kristallen zijn gevormd door kristallisatie uit een smelt, een silicaatsmelt (hierbij laten we dus vooral de metamorfe gesteenten buiten beschouwing, waar kristallisatie op een heel andere manier plaats vindt, nl. in een vaste omgeving, kristalgroei kan daar slechts plaats vinden in plaats van en ten koste van andere, oudere nabij liggende mineralen).

Het uitgangsmateriaal van een stollingsgesteente is dus een silicaatsmelt. Kristallisatie, dus kristalgroei, gaat optreden als de (externe) omstandigheden zodanig veranderen dat het systeem vanuit het stabiliteitsveld van de vloeibare, gesmolten fase in die van de vaste fase overgaat, als bv. de temperatuur T zodanig daalt dat het materiaal beneden de stollingstemperatuur geraakt.

De meeste gesteenten zijn echter complexe systemen, waarvan ook het kristallisatieverloop een ingewikkeld proces vormt, vooral ook omdat de aanwezigheid van het ene mineraal invloed heeft op het kristallisatieverloop (bv. stollingstemperatuur en kristallisatievolgorde) van een ander mineraal, en omgekeerd.

Als voorbeeld kan dienen de eutectische kristallisatie van twee niet mengbare mineralen, bv. diopsied ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) en anorthiet ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$); zuivere diopsied kristalliseert

bij ca. 1390°C , zuivere anorthiet bij ca. 1550°C ; toevoeging van anorthiet aan diopsied verlaagt nu de stollingstemperatuur van diopsied; omgekeerd verlaagt ook de toevoeging van enige diopsied aan anorthiet de kristallisationstemperatuur van anorthiet; hoe meer er wordt toegevoegd, hoe lager de kristallisationstemperaturen (vgl. de vriespuntsverlaging als bv. bij de toevoeging van zout aan water optreedt), tot bij een bepaalde minimum temperatuur, de zg. eutectische temperatuur (1270°C), diopsied en anorthiet samen en tegelijk en in een vaste onderlinge verhouding (42% anorthiet en 58% diopsied) uitkristalliseren (zie fig. 1).

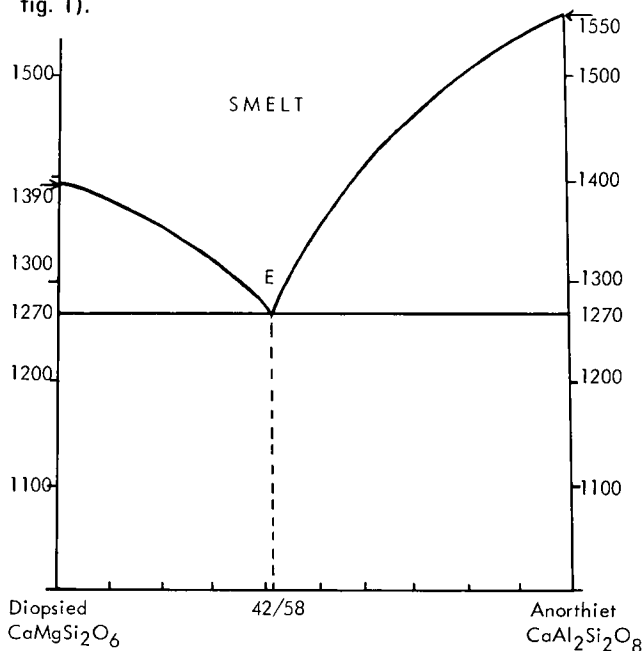


Fig. 1: Temperatuur-samenstellingsdiagram van het binaire systeem diopsied-anorthiet. E = eutecticum