

Er zijn verscheidene sierlijke vormen van dit scheidingsvlak tussen de kom en het bovenste lensgedeelte gefossiliseerd. Professor R. Levi-Setti, een natuurkundige van de Universiteit van Chicago, is in staat geweest om aan te tonen waarvoor deze dienden. Voorheen had hij onderzoek verricht aan de exo-kegels (dit zijn bepaalde brekende of dioptrische elementen) van de ogen van *Limulus*, of Molukkenkreeft, en had aangetoond dat de vormen hiervan ideaal waren om het licht optimaal op te vangen. Hij heeft nu ook duidelijk gemaakt, dat het principe van optimalisering ook van toepassing is bij schizochroale lenzen. Het scheidingsvlak tussen het bovenste gedeelte en de kom is bij verscheidene *Phacopina* een Cartesiaans oppervlak. Het werkt als het onderste deel van een samengestelde Descartes- of Huygenslens die randstraal-afwijkingen corrigeert. Terwijl deze corrigerende lenzen in de 17e eeuw voor het eerst door mensen werden ontworpen gebruikten trilobieten ze al 500 miljoen jaar eerder!

De binnen de lens gelegen kom is het element dat zo'n lens uiteindelijk corrigeert. In Chicago maakten we modellen van lenzen met een klein verschil in de brekingsindex tussen het bovenste lensgedeelte ($n = 1.66$) en de kom ($n = 1.63$). Deze brachten de lichtstralen naar een scherp brandpunt, zo perfect, dat je het zou moeten zien om het te geloven.

De lenzen van schizochroale ogen schijnen dus optimaal te zijn om randstraal-afwijkingen te corrigeren: ze konden een goed scherp beeld vormen. Er zijn aanwijzingen dat er behalve de kom nog bijkomstige corrigerende structuren aanwezig waren (afb. 5D).

Maar wat deden de trilobieten eigenlijk met het gevormde beeld? En waarom hadden ze trouwens zulke enorme lenzen? Het is mogelijk dat de *Phacopina* nachtdieren waren, die zich overdag in graafgangen in het sediment verstopten, net als de recente Molukkenkreeft *Limulus* dat doet.

De grote lenzen zouden dan 's nachts al het beschikbare licht hebben kunnen opvangen om zo de lichtontvangende organen zelfs bij heel weinig licht tot werking te brengen. Dit is echter maar een veronderstelling — we begrijpen deze uitzonderlijke ogen nog steeds niet helemaal. Ook de komende jaren zullen ze ons hoofdbrekens en frustraties blijven geven.

De functie van de ogen

Nu de laatste vraag waarmee we ons zullen bezighouden: waarvoor hadden de trilobieten hun ogen nodig? Sommige trilobieten waren suspensie-eters en filterden hun voedsel uit het zeewater; anderen waren sediment-eters; weer

anderen konden misschien wormen en andere kleine organismen vangen met hun stekelige poten en deze week maken alvorens ze op te nemen. Maar het lijkt onwaarschijnlijk dat ze hun ogen hoofdzakelijk gebruikten om actief op voedsel te jagen. Het is aannemelijk dat de voorname waarde van de ogen was, dat roofdieren vroeg en op afstand konden worden waargenomen. Er zijn goede redenen om dit te geloven. Na het Cambrium hadden veel trilobieten het vermogen om zich als een bal op te rollen, zoals pissebedden (afb. 1), waarbij de segmenten prachtig aangepast in elkaar grepen om kop en staart bij elkaar te houden. Het is opvallend, dat grote en goed ontwikkelde ogen bijna altijd worden aangetroffen bij trilobieten met de beste en vernuftigste oprolmechanismen. Omdat het huidskelet normaliter bedekt was met andere soorten zintuigen zal er een combinatie geweest zijn van gevoelszintuigen, chemische prikkels en gezichtsvermogen, waardoor het dier zich gemakkelijk ogenblikkelijk kon oprollen of een andere vluchtactie ondernemen om aan een roofdier te ontkomen. Maar hoeveel er ook over de bouw en de functie van trilobietenogen te leren overblijft — vooral over de schizochroale ogen — in ieder geval illustreren ze duidelijk dat trilobieten een buitengewoon hoge graad van biologische organisatie bezaten in een tijd, die onvoorstelbaar ver van ons verwijderd is.

Literatuur

E.N.K. Clarkson (1979): *Invertebrate Paleontology and Evolution*. George Allen and Unwin.

E.N.K. Clarkson (1979): The visual system of trilobites. *Palaeontology*. 22. 1-22.

E.N.K. Clarkson & R. Levi-Setti (1975): Trilobite eyes and the optics of Des Cartes and Huygens. *Nature* 254. 663-667.
J. Miller & E.N.K. Clarkson (1980): The post ecdysial development of the cuticle and the eye of the Devonian Trilobite *Phacops rana milleri*. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B*. 288. 461-480.

Dr. E.N.K. Clarkson, auteur van "Invertebrate Palaeontology and Evolution" (1e druk 1979), verwerkte in dit boek de nieuwe gegevens die moderne onderzoeksmethoden hebben opgeleverd. Het valt op dat in dit werk de trilobieten uitgebreid zijn behandeld; vooral aan hun ogen werd veel aandacht besteed. Desgevraagd was Dr. Clarkson met grote welwillendheid bereid, voor *Gea* een artikel over zijn specialisme te schrijven. De vertaling is van drs. E.G. van Diggelen en J. Stemvers-van Bommel.

Red.

WULFENIETKRISTALLEN

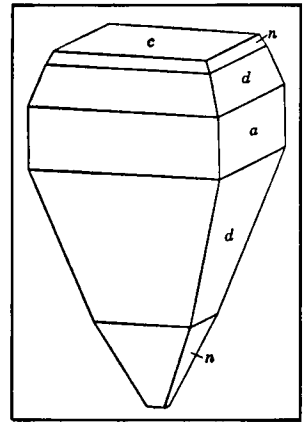
door drs. E.A.J. Burke
Instituut voor Aardwetenschappen
Vrije Universiteit, Amsterdam

Omwille van zijn felle opvallende kleuren (geel, oranje, rood) en zijn hoge glans is het mineraal wulfeniet, het loodmolybdaat $PbMoO_4$, een opvallende verschijning in veel verzamelingen. Bovendien komt het bijna nooit in massieve vorm voor; meestal ziet men wulfeniet in mooie kristallen, vaak als vierkante plaatjes (van uiterst dun tot bijna kubusvormig), soms als piramidale kristallen (zie voorplaat).

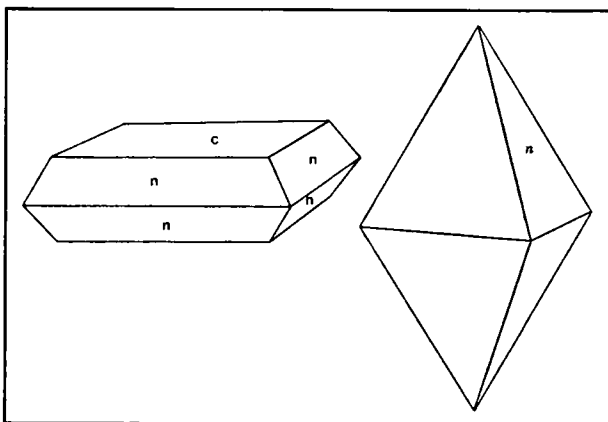
Geschiedenis en naamgeving

Het mineraal dat we tegenwoordig als wulfeniet kennen, is voor het eerst in 1772 beschreven door Von Born van de vindplaats Annaberg in Saksen (nu in de DDR); hij gaf het de Latijnse naam „*Plumbum spatiosum flavo-rubrum*”, wat te vertalen is als geelrode loodspaat. Een paar jaar later werd dit mineraal in grote hoeveelheden gevonden op een

paar plaatsen in Karinthië (Oostenrijk). Het mineraal werd er beschreven als „Kärnthnerischer Bleispath“ door Jacquin in 1781, en in 1785 door Freiherr Franz Xaver von Wulfen in een monografie: „Abhandlung vom Kärnthner Bleispath“. De bekende chemicus Klaproth analyseerde het mineraal rond 1790, en ontdekte dat het molybdeen bevatte: het was een loodmolybdaat, met als formule $PbMoO_4$. Werner had het mineraal in 1789 „Gelbbleierz“ genoemd, geel looderts, om het te onderscheiden van de al bekende „Grünbleierz“ (groen looderts, thans pyromorfiet en mimetiet) en „Weissbleierz“ (wit looderts, thans cerussiet). De huidige naam, wulfeniet, is in 1845 ingevoerd door Haidinger ter ere van de eerder genoemde Freiherr von Wulfen, die de meest uitvoerige beschrijving van het mineraal gemaakt had. Freiherr von Wulfen leefde van 1728 tot 1805. Hij was een jezuïtenpater en, tot zijn orde in Oostenrijk verboden werd, hoogleraar in Klagenfurt. Mineralogie was maar een van zijn nevenbezigheden, want het merendeel van zijn wetenschappelijk werk was gewijd aan de studie van de korstmossen.



Afb. 2. „Asymmetrisch“ wulfenietkristal; vormen: pedion $c\{001\}$, piramiden $n\{011\}$ en $d\{021\}$, prisma $a\{010\}$. (Naar Palache, Berman en Frondel)

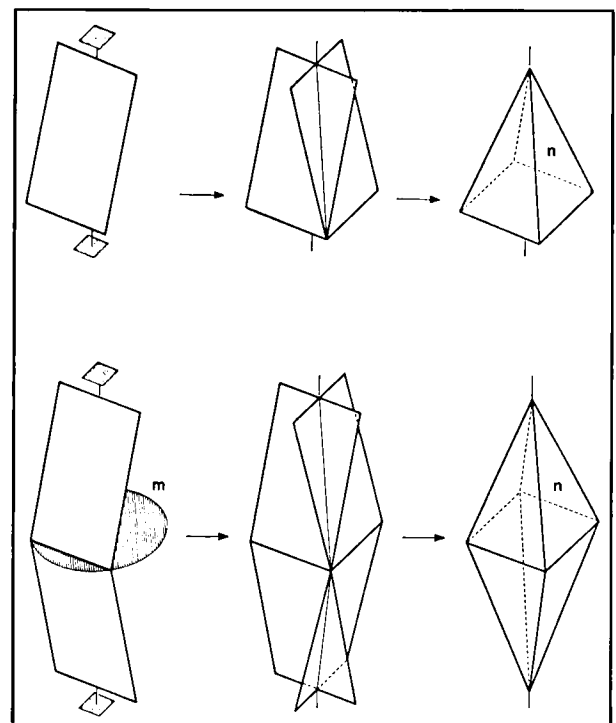


Afb. 1. De meest voorkomende vormen van wulfeniet: tabulair (links) en piramidaal (rechts); kristalvormen: pedion $c\{001\}$ en piramide $n\{011\}$. (Naar A. Blount en W. Shulman (links) en Palache, Berman en Frondel (rechts))

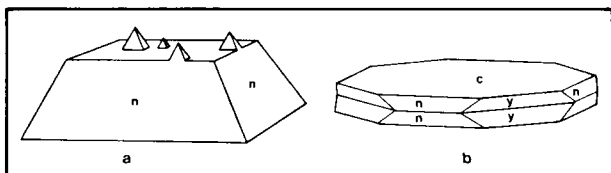
Symmetrie

Alhoewel wulfeniet bijna altijd in goed ontwikkelde, soms tot 10 cm grote kristallen voorkomt, heeft men pas in 1955 de juiste symmetrie van deze kristallen vastgesteld. Wat was er aan de hand? De overgrote meerderheid van de wulfenietkristallen hebben de vormen zoals afgebeeld in afb. 1: vierkante plaatjes, al dan niet met wigvormige zijkanen, of vierkante dipiramiden, en combinaties daarvan. Slechts af en toe vond men kristallen zoals afgebeeld in afb. 2, niet zo mooi symmetrisch als die in afb. 1. Wat is het verschil? De verticale as (de richting loodrecht op de plaatjes, of de lengterichting van de piramiden) heeft in beide gevallen een viertallige (tetragonale) symmetrie; de kristallen in afb. 1 hebben bovendien een spiegelvlak (symmetrievlak) loodrecht op die as: onder- en bovenkant van die kristallen zijn precies gelijk, elkaars spiegelbeeld. Dat symmetrievlak ontbreekt in het kristal van afb. 2. Dat zou betekenen dat de kristallen van afb. 1 zouden behoren tot de kristallografische klasse $4/m$ (viertallige as met loodrecht daarop een spiegelvlak m , van het Engelse "mirror"), en het kristal van afb. 2 tot de klasse 4 (alleen een viertallige as). Het verschil in symmetrie van beide klassen wordt nog eens verduidelijkt in afb. 3: uitgaande van een schuin vlak in de klasse 4 krijgt

men een tetragonale piramide, en vanaf hetzelfde vlak ontstaat in de klasse $4/m$ een tetragonale dipiramide! Nu is het onmogelijk dat één mineraal tot twee verschillende kristallografische klassen behoort (met uitzondering van polytypen, maar dat is weer een heel ander verhaal). Men moest dus in het geval van wulfeniet nagaan of de viertallige as polair of niet-polair is, met andere woorden: is wulfeniet centrosymmetrisch of niet? Bij een niet-polaire as zijn de tegenovergestelde uiteinden gelijkwaardig: de kristallen hebben dan een symmetriecentrum (zoals in afb. 1). Kristallen met een polaire as hebben aan de tegenovergestelde uiteinden van die as dikwijls verschillende vlakken: zij hebben geen symmetriecentrum (zoals in afb. 2). Een van



Afb. 3. Symmetrie van de kristalklassen 4 (boven) en $4/m$ (onder). De 4 -tallige verticale as herhaalt een schuin vlak tot een piramide; in combinatie met het symmetrievlak m ontstaat vanaf hetzelfde vlak een dipiramide. (Naar Nickel)

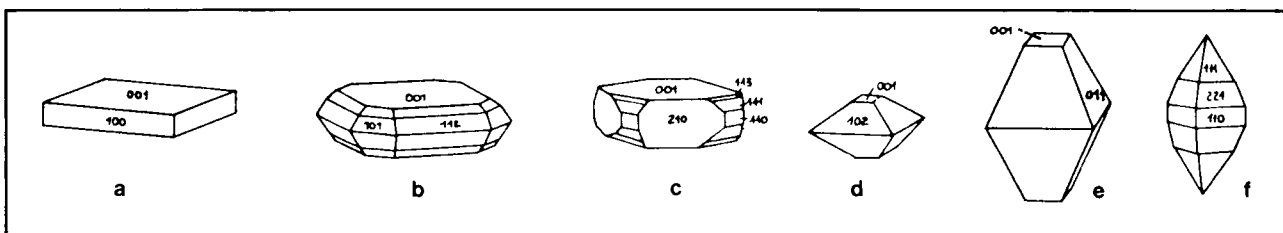


Afb. 4. De kristaltypen waaraan Hurlbut in 1955 de juiste symmetrie van wulfeniet bepaalde: a. piramidale kristal; b. tweelingkristal met inspringende hoeken. Kristalvormen: pedion $c\{001\}$, piramiden $n\{011\}$ en $y\{113\}$. (a. naar Blount en Shulman; b. naar Hurlbut)

de gebreken van röntgenstralendiffractie is dat met deze methode niet vastgesteld kan worden of kristallen polaire assen hebben. Kristallen met polaire assen zijn echter piëzoelektrisch; kwarts is daarvan het bekendste voorbeeld. Wulfenietkristallen werden dus onderzocht op piëzoelektrischeit. Een aantal auteurs beweerde dat wulfeniet niet piëzoelektrisch is, maar anderen bewezen het tegendeel. Het probleem van de symmetrie van wulfeniet werd uiteindelijk pas in 1955 opgelost door Hurlbut. Hij was in het bezit gekomen van een fraaie collectie diep oranjegele wulfenietkristallen van de Helena-mijn in Schwarzenbach (het tegenwoordige Crna) in Noord-Joegoslavië. De kristallen, tot 2-3 cm groot, waren van twee verschillende typen: afgeknotte piramidale kristallen (afb. 4a) en tabulaire kristallen (afb. 4b). Beide typen wijzen op de symmetrieklasse 4: het kristal in afb. 4a is duidelijk polair, en het was piëzoelektrisch; het kristal in afb. 4b is een tweeling: onder- en bovenkant zijn van elkaar gescheiden door inspringende hoeken. Het "kristal" in afb. 4b was echter niet piëzoelektrisch, maar dat zijn centrosymmetrische tweelingen uiteraard nooit! Hurlbut heeft toen één individu van de tweeling weggeslepen, en de overblijvende helft was wel piëzoelektrisch. Het bewijs was eindelijk geleverd: wulfeniet behoort tot de klasse 4, en niet tot de klasse 4/m (zoals ten onrechte, meer dan 20 jaar later, nog in de "Encyclopedia of Minerals" staat).

Dat wulfeniet niet-centrosymmetrisch is, heeft wel ingrijpende gevolgen voor de interpretatie van de "kristallen" in afb. 1: bijna alle "kristallen" van wulfeniet zijn in werkelijkheid dus tweelingen! Het tweelingsvlak is het vlak loodrecht op de verticale viertallige as, het horizontale vlak waarlangs de "kristallen" in twee gelijke delen gesplitst kunnen worden: dat is het vlak evenwijdig aan c , met de Millerindices (001). De verwarring rond de symmetrie van wulfeniet heeft zo lang kunnen duren omdat niet-vertweelde kristallen (afb. 2, afb. 4a) zeldzaam zijn, en omdat tweelingkristallen met inspringende hoeken (afb. 4b) zo mogelijk nog zeldzamer zijn!

Afb. 5. Een aantal verschillende habitusvormen van wulfeniet; alle kristallen zijn tweelingen! (Naar W. Lieber)



Morfologie

In afb. 5 staan een aantal karakteristieke habitusvormen van wulfeniet afgebeeld. De meest dominante kristalvormen (en dus vlakken) zijn $c\{001\}$ en $n\{011\}$, zie ook afb. 1, 2 en 4. Het kristal op de voorplaat is, gezien het voorgaande, dus een tweelingkristal: er lijkt een horizontaal symmetrievlak aanwezig te zijn, dat in werkelijkheid het tweelingsvlak is. De tweeling op de voorplaat is er een van kristallen als afgebeeld in afb. 4a, maar zonder horizontaal c -vlak: het is een tweeling van piramidale kristallen, met als enige vorm $n\{011\}$. De "rafelige" top kan verschillende oorzaken hebben; de meest voor de hand liggende is dat de kristalgroei voortijdig gestopt is wegens het gebrek aan materiaal.

Van veel mineralen is bekend dat de habitus (het uiterlijk voorkomen wat betreft vlakken en hun relatieve ontwikkeling) afhankelijk is van de geologische vormingsomstandigheden. Williams heeft in 1966 de resultaten gepubliceerd van een onderzoek naar het verband tussen de habitus van wulfenietkristallen en hun ontstaansomstandigheden. Wulfeniet wordt gevormd in de verweringszone van ertslichamen die lood en molybdeen bevatten. In die verweringszone heersen normale atmosferische omstandigheden van druk en temperatuur; dat vergemakkelijkt het onderzoek. Op grond van het gezamenlijk voorkomen van wulfeniet met diverse andere verweringsmineralen stelde Williams vast dat de habitus van wulfeniet afhankelijk is van de pH (de zuurtegraad) en de Eh (de mate van oxidatie) tijdens de vorming. Bij relatief lage pH (zure omstandigheden) en lage Eh (matig oxiderend) worden wulfenietkristallen gevormd met een tabulaire habitus en wigvormige zijkanten (afb. 5b); deze kristallen zijn vaak vergezeld van cerussiet.

Bij hogere pH (dus minder zuur!) en lage Eh ontstaan de bekende lamellaire, soms extreem dunne wulfenietkristallen, vaak met verticale zijvlakjes (afb. 5a en 5c); in deze omstandigheden is wulfeniet geassocieerd met mimetiet en hemimorfiet. Bij hogere pH en eveneens hoge Eh (sterk oxiderende omstandigheden) krijgen de wulfenietkristallen een steeds sterker wordende piramidale habitus (afb. 5d, 5e, 5f), terwijl plattneriet het vergezellende mineraal is. Het tweelingkristal op de voorplaat heeft een piramidale habitus, en zou volgens Williams dus gevormd zijn bij hoge pH en hoge Eh.

Overigens, Williams gebruikte in zijn onderzoek 64 handstukken met wulfenietkristallen, afkomstig van zoveel mogelijk verschillende vindplaatsen. Slechts één (!) van deze handstukken had niet-vertweelde kristallen.

Literatuur

Hurlbut, C.S. Jr. (1955): Wulfenite symmetry as shown on crystals from Jugoslavia. *The American Mineralogist*, Vol. 40, pp. 857-860.

Williams, S.A. (1966): The significance of habit and morphology of wulfenite. *The American Mineralogist*, Vol. 51, pp. 1212-1217.