

Van toermalijntang tot polaroid: Over polarisatie en polarisatoren

door Diederik Visser
Universiteitsmuseum Utrecht

In tegenstelling tot disciplines als bijvoorbeeld de scheikunde, natuurkunde of biologie, waarin de microscoop reeds aan het eind van de 18e eeuw veelvuldig werd gebruikt, werd het instrument door geologen tot ver in de 19e eeuw afgedaan met het argument dat men niet naar bergen keek met een microscoop. Gelukkig is aan die conservatieve gedachtengang door de introductie van de polarisatiemicroscoop tijdens de laatste twintig jaar van de vorige eeuw zeer snel een einde gekomen.

In de moderne petrologie is het gebruik van de polarisatiemicroscoop, ondanks het toenemende "zappen" van mineralen met elektronenbundels (microsonde), niet meer weg te denken. De microscoop is namelijk van groot belang bij de identificatie van mineralen en bij het uiteenrafelen van texturen en relaties tussen mineralen onderling in de gesteenten.

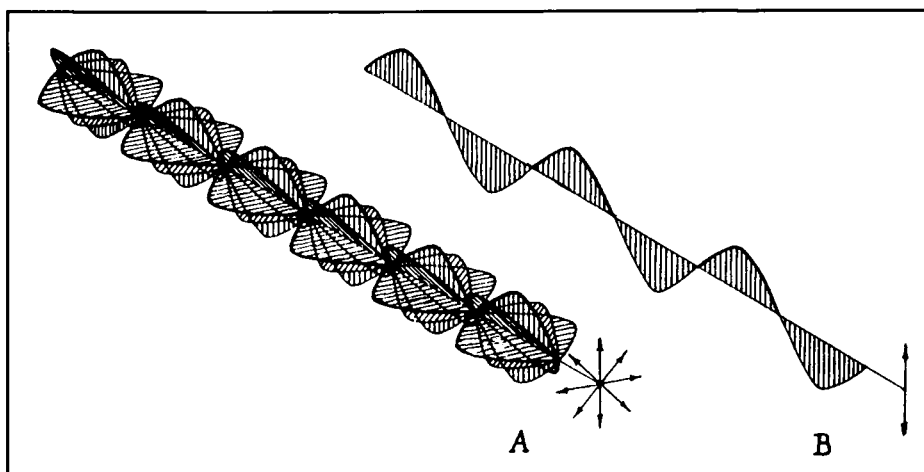
Een essentieel onderdeel in de polarisatiemicroscoop is natuurlijk het gedeelte dat het gepolariseerde licht genereert: de polarisator. In dit artikel wil ik een historisch overzicht geven van de meest gebruikte polarisatoren.

Gepolariseerd licht

Microscopen zijn over het algemeen bedoeld om dat deel van het elektromagnetische spectrum te bestuderen waarvoor het menselijk oog gevoelig is, namelijk in het gebied met een golflengte tussen ca. 400 en 700 nm (1 nanometer = 0,000001 mm = 10^{-9} m, ofwel een miljoenste millimeter). Binnen dit gebied, dat ook wel zichtbaar licht wordt genoemd, heeft elke golflengte zijn eigen kleur (zie tabel 1).

Tabel 1. Golflengten voor de verschillende kleuren van het zichtbare licht

rood	780 - 630 nm
oranje	630 - 600 nm
geel	600 - 570 nm
geelgroen	570 - 550 nm
groen	550 - 520 nm
blauwgroen	520 - 500 nm
blauw	500 - 450 nm
violet	450 - 380 nm



Afb. 1. A. normaal licht; B. gepolariseerd licht

We kunnen licht simpelweg beschouwen als een transversaal trillende golfbeweging (theorie van Young en Fresnel). Bij een transversale trilling (een lichtstraal) is de trillingsrichting niet beperkt tot één richting, maar kunnen trillingen optreden in alle mogelijke richtingen loodrecht op de richting waarin de lichtstraal zich voortplant (afb. 1a). Gepolariseerd licht is eigenlijk de meest simpele vorm waarin licht kan voorkomen. Het trilt namelijk maar in één richting loodrecht op de richting waarin de lichtstraal zich voortplant (afb. 1b). Het grote voordeel van die simpele vorm boven het normale licht is dat je er makkelijker mee kunt rekenen en allerlei experimenten met licht daardoor beter te begrijpen zijn. Men heeft zelfs ontdekt dat bijvoorbeeld bijen en mieren gepolariseerd licht gebruiken bij hun navigatie. In afb. 1b is de lichtstraal lineair verticaal gepolariseerd. Zoals we straks zullen zien produceren de meeste polarisatoren dit lineair gepolariseerde licht. Maar gepolariseerd licht kan ook andere vormen aannemen. Afb. 2 geeft een overzicht van de meest voorkomende patronen.

Polarisatie van het licht kan door verschillende oorzaken tot stand komen. De belangrijkste zijn:

- reflectie op een grensvlak tussen twee media van verschillende brekingsindex (b.v. glasplaten);
- dubbelbreking bij anisotrope media (b.v. calciet, Nicolse prisma);
- absorptie door anisotrope media (b.v. toermalijntang, herapathiet of polaroid).

Polarisatie door reflectie

Wanneer we in een rivier een mooie steen zien liggen en die met de hand proberen te pakken, wil het wel eens gebeuren dat we mistasten; de steen was op een andere plaats dan waar we dachten hem te zien. Of met andere woorden: de lichtstralen die ons oog vanuit een punt in het water bereiken, worden ergens van richting veranderd, ze worden gebroken. Waar zal die breking

Wet van Snellius

Voor diegenen die de wiskunde niet uit de weg willen gaan zal ik aan de hand van afb. 3 en wat simpele goniometrie de breking van het licht proberen uit te leggen. In afb. 3 zien we twee parallelle lichtstralen A en B, die onder een hoek i het grensvlak tussen twee stoffen raken en onder de hoek r gebroken worden. Hierbij heeft stof 1 een brekingsindex n_1 en stof 2 een brekingsindex n_2 . Op een gegeven ogenblik bereikt lichtstraal 1 het grensvlak bij O' , en is lichtstraal 2 bij punt a . Op een volgend tijdstip t is lichtstraal 1 gevorderd tot b terwijl lichtstraal 2 bij O is aangekomen. Aangezien snelheid hetzelfde is als afstand gedeeld door de tijd (vergelijk kilometer per uur of meter per seconde) kan je de snelheden (v) in stoffen 1 en 2 weergeven als:

$$V_1 = aO'/t \text{ en } V_2 = bO'/t.$$

De verhouding van de afstanden aO' en bO' is dus als die van de snelheden V_1 en V_2 . We kunnen dus schrijven:

$$V_1/V_2 = aO'/bO'.$$

In de goniometrie (hoekmeetkunde) is de sinus (afgekort \sin) van een hoek gedefinieerd als de verhouding van de

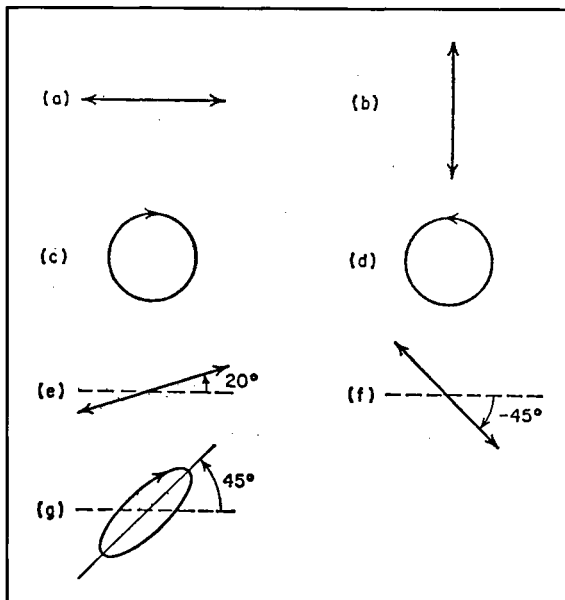
overstaande rechthoekszijde tot de schuine zijde. Passen we dit begrip toe op de hoeken i en r , die de invallende en de gebroken lichtstralen met het grensvlak maken, dan kunnen we schrijven:

$$\sin i = aO'/OO' \text{ en } \sin r = bO'/OO';$$

$$\sin i / \sin r \text{ is per definitie gelijk aan } (aO'/OO') / (bO'/OO') = aO'/bO' = \text{(zie hierboven)} V_1/V_2$$

Deze formule is beter bekend als de Brekingswet van Snellius. Door over te gaan op de brekingsindices, gedefinieerd als $n_1 = c/V_1$ en $n_2 = c/V_2$ komt er te staan: $\sin i / \sin r = n_2/n_1$. In de praktijk is de eerste stof meestal lucht ($n_1 = 1$) zodat we kunnen schrijven $n_2 = \sin i / \sin r$.

Belangrijk is te weten dat wanneer een lichtstraal van de ene stof naar een stof met een hogere brekingsindex gaat de straal gebroken wordt naar de normaal met het grensvlak toe (zie afb. 3). Omgekeerd zal een lichtstraal die van de ene stof naar een stof met lagere brekingsindex gaat van de normaal af gebroken worden. Bij reflectie is de hoek waaronder de lichtstraal invalt even groot als de hoek waaronder de lichtstraal weerkaatst wordt. Bij reflectie geldt natuurlijk dezelfde Wet van Snellius.



Afb. 2. Patronen van een lichtstraal die (a) lineair, horizontaal, (b) lineair verticaal, (c) rechtsdraaiend cirkelvormig, (d) linksdraaiend cirkelvormig, (e) lineair onder een hoek van 20° , (f) lineair onder een hoek van -45° , (g) rechtsdraaiend elliptisch onder een hoek van 45° gepolariseerd is.

plaats vinden? Het ligt voor de hand dat dit zal zijn aan het grensvlak tussen water en lucht. Tevens zie we behalve die steen op de bodem ook onszelf weerspiegeld in het wateroppervlak. Een lichtstraal die op een grensvlak tussen twee media valt wordt dus voor een gedeelte gereflecteerd en voor een gedeelte gebroken (gepolariseerd).

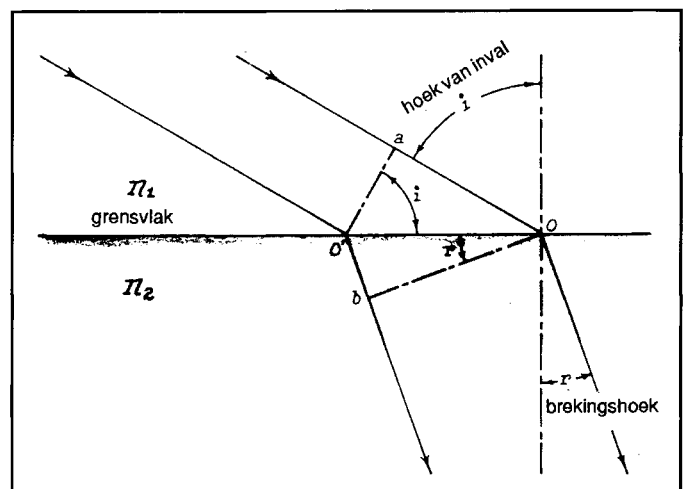
Afb. 3. Refractie van twee lichtstralen op een grensvlak tussen twee stoffen met een verschillende brekingsindex (n_1 en n_2). De hoek van inval en breking zijn gerelateerd aan elkaar door de Wet van Snellius: $\sin i / \sin r = n_2 / n_1$.

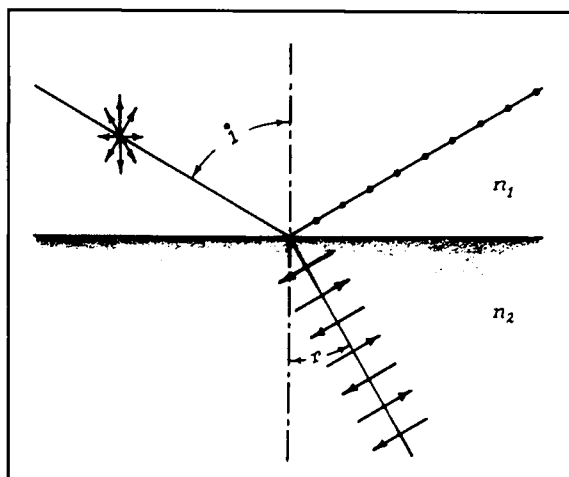
Hoe komt het nu dat een lichtstraal gebroken en gereflecteerd wordt op het grensvlak tussen twee stoffen? Heel simpel gezegd komt het doordat licht zich in de ene stof met een andere snelheid voortplant dan in de andere stof. De brekingsindex van een stof (n), gedefinieerd als de verhouding van de lichtsnelheid in vacuüm (c) tot de lichtsnelheid in de stof (v), is hiervoor een maat: $n = c/v$.

De brekingsindex voor lucht is vrijwel gelijk aan die voor vacuüm, namelijk 1,000274 bij 15°C . De brekingsindex voor water is 1,3. Voor de meeste glassoorten en mineralen ligt deze tussen 1,4 en 1,8.

Diamant heeft een zeer hoge brekingsindex van 2,4, evenals bijvoorbeeld rutiel (2,6-2,9) of hematiet (2,7-3,2). Uitgaande van een lichtsnelheid in vacuüm van 300.000 km/sec, plant het licht in diamant zich dus voort met een snelheid van 125.000 km/sec, een slakkegangetje dus.

In 1808 ontdekte de Franse natuurkundige Etienne-Louis Malus dat wanneer je een bundel licht onder een hoek op een plaat glas laat vallen de gereflecteerde straal gedeeltelijk gepolariseerd wordt. Onder één bepaalde hoek, de zogenaamde polarisatiehoek, is de gereflecteerde straal zelfs geheel gepolariseerd. De gebroken straal wordt slechts gedeeltelijk gepolariseerd. David





Afb. 4. De Wet van Brewster: Complete polarisatie van een gereflecteerde lichtstraal treedt op als $i+r$ een hoek van 90° met elkaar maken.

Bij de polarisatiehoek p vervangen we $\sin i$ door $\sin p$. Omdat de hoeken van de gebroken straal (r) en de gereflecteerde straal (p) tezamen 90° bedragen kan je $\sin r$ schrijven als $\sin(90^\circ-p)$. Je krijgt dan

$$n_2 = \sin p / \sin(90^\circ-p) = \sin p / \cos p = \tan p$$

Voor glas bedraagt de brekingsindex ongeveer 1,5. De bijbehorende polarisatiehoek is dan $56^\circ 3'$ (afb. 5).

Glasplaat-polarisator

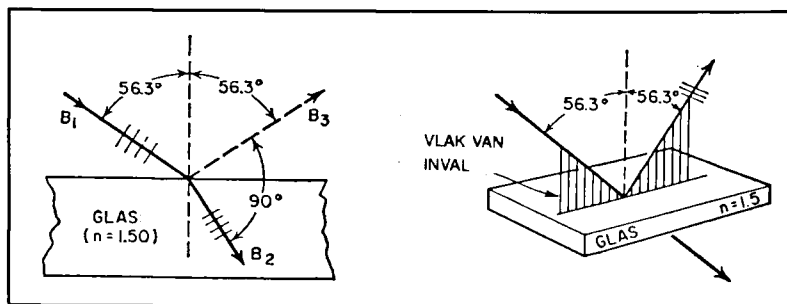
Afb. 6 laat een toepassing zien uit 1831 met een enkele glasplaat als polarisator én analysator. Een van de grootste nadelen van de glasplaat is dat slechts 1/14 deel van het licht dat er op valt gereflecteerd wordt. Gelukkig is er een gemakkelijke manier om de intensiteit van de bundel te verhogen. Je gebruikt hiervoor een stapel van 6 tot 8 glasplaten. Elke glasplaat geeft namelijk een gereflecteerde straal die tezamen met de andere gereflecteerde stralen een lichtbundel met een hogere intensiteit geeft. Bij nog dickere stapels verdwijnt dit effect weer door lichtabsorptie van het glas.

De stapel glasplaten kan ook gebruikt worden om de gebroken straal te versterken. De gebroken straal is echter maar gedeeltelijk gepolariseerd. Door nu een aantal glasplaten, meestal zo'n 5 tot 15 stuks, schuin ten opzichte van elkaar te plaatsen (afb. 7) is het mogelijk om een bundel licht te produceren die 80-99% gepolariseerd is.

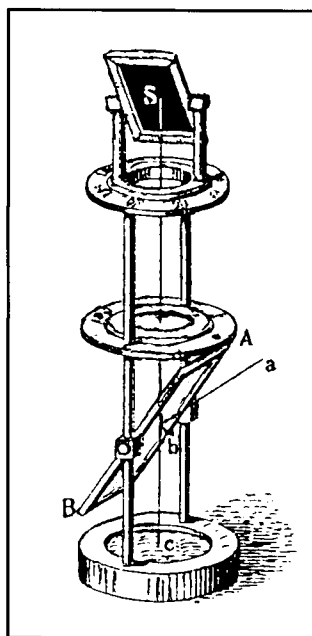
De ongewenste reflecties kunnen door een zwarte verflaag worden geabsorbeerd. Het is natuurlijk heel belangrijk om schone, stofvrije, goed gepolijste glasplaten te gebruiken. De opbrengst is ook afhankelijk van de manier waarop de glasplaten ten opzichte van elkaar zijn geplaatst (afb. 8). Worden de platen verder van elkaar geplaatst of onder een andere hoek, dan kunnen de reflecties beter worden weggevangen.

Brewster liet in 1812 zien dat de polarisatiehoek van de gereflecteerde straal een hoek van 90° maakt met die van de gebroken straal (afb. 4). Aan de hand van afb. 4, de Wet van Snellius en wederom wat goniometrie is te zien dat de polarisatiehoek (p) afhankelijk is van de brekingsindex van de stof. Als we ervan uitgaan dat de brekingsindex voor lucht (n_1) gelijk is aan 1 dan krijgen we:

$$\sin i / \sin r = n_2 / n_1 = n_2$$



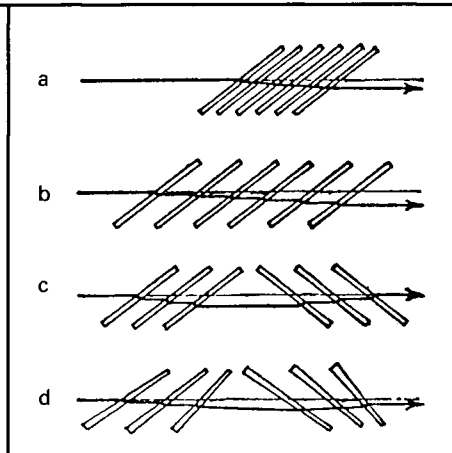
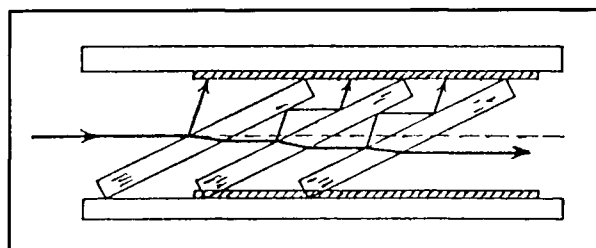
Afb. 5. Een gewone lichtstraal die onder een hoek van 56.3° op een plaat glas met een brekingsindex van 1,50 valt, zal compleet gepolariseerd gereflecteerd worden. De gereflecteerde straal is gedeeltelijk gepolariseerd.



Afb. 6. (Links) De orthoscoop van Nörremberg uit 1831. Lichtstraal a valt op de glasplaat AB , die gemonteerd is onder de polarisatiehoek van het glas, en wordt gereflecteerd naar spiegel c . Het gepolariseerde licht valt daarna door de glasplaat via de objecttafel op de spiegel S , die daarbij als analysator dient.

Afb. 7. (Rechtsboven) Een glasplaat-polarisator, bestaande uit een stapel van drie glasplaten. Het ongewenste gereflecteerde licht wordt uiteindelijk door een zwart geschilderde houder geabsorbeerd. De gereflecteerde en gedeeltelijk gepolariseerde straal wordt doorgelaten, waarbij deze iets ten opzichte van de invallende straal verschoven is.

Afb. 8. (Rechts) Diverse mogelijkheden voor een polarisator bestaande uit 6 glasplaten: a) als afb. 7, maar dan met 6 platen; b) door de grotere tussenruimte kan de ongewenste component van het licht beter geabsorbeerd worden (ventilatie); opstellingen c) en d) geven een nog betere ventilatie en zorgen ervoor dat de gereflecteerde lichtstraal niet meer verschuift ten opzichte van de invallende straal.





Afb. 11. Toermalijntang, aangekocht in 1880 door de Utrechtse hoogleraar C.E.A. Wichmann (1851-1927) voor het toenmalig Mineralogisch-Geologisch Instituut der Rijks-Universiteit te Utrecht. Deze simpele uitvoering met toermalijnkristallen gezet in kurk werd waarschijnlijk tijdens het veldwerk gebruikt. Toermalijntang uit de instrumentcollectie van het Universiteitsmuseum Utrecht. Foto: dhr. J.P. Stolp, Universiteitsmuseum.

diegenen die graag de formule willen weten: $4C_{20}H_{24}Cl_2N_2O_2 \cdot 3H_2SO_4 \cdot 2HI \cdot I_4$). Net als toermalijn polariseert deze stof het licht door middel van sterke absorptie volgens één kristallografische richting. De kristallen werden in die dagen dan ook kunstmatige toermalijnen genoemd. De stof werd niet lang daarna vernoemd naar zijn ontdekker. Ondanks de zeer goede polarisatie-eigenschappen was herapathiet helaas niet geschikt om als polarisator in een microscoop gebruikt te worden. De grootste kristallen die men synthetisch kon maken waren slechts enkele millimeters groot en tevens zeer dun en breekbaar. Desondanks vormde herapathiet 75 jaar later de basis voor de grootste doorbraak op het gebied van polarisatoren: het **polaroid-filter**.

Polaroid

In 1928 kreeg de toen 19-jarige Harvard-student Edwin H. Land het idee om miljoenen microscopisch kleine kristallen optisch dezelfde oriëntatie te geven. De gedachte erachter was, dat als de kristallen maar klein genoeg waren ze zich als één groot, dun kristal zouden gedragen. Een gedachte die juist bleek te zijn. Na enkele jaren experimenteren lukte het hem met microscopisch kleine herapathiet-kristallen. Dit gebeurde door een mengsel van fijn gemalen herapathiet-kristallen en een stroperig plastic (cellulose-acetaat) door een dunne spleet te persen. Na uitharding van het plastic kreeg je een mooie, dunne en doorzichtige plaat. Land noemde zijn uitvinding het **Polaroid J-Sheet**.

Het *J-sheet* zorgde voor een grote sensatie in de wetenschappelijke wereld en werd al gauw op grote schaal gebruikt. Het grote voordeel ervan was, dat je nu polarisatoren op elk gewenst formaat en met eenzelfde kwaliteit kon maken en niet meer afhankelijk was van wat de natuur te bieden had. Tevens waren de productiekosten zeer laag in vergelijking met de fabricage van bijvoorbeeld een Nicols prisma. In 1939 bijvoorbeeld laat de Zeiss-catalogus zien, dat een Nicols prisma bijna 4x duurder was dan een polaroid filter. Het *J-sheet* werd niet alleen ter vervanging

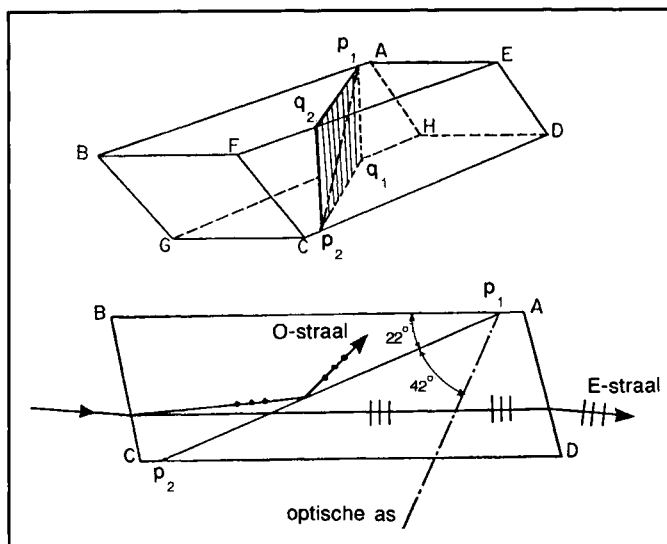
Het Nicolse prisma, ook eenvoudig *nicol* genoemd, bestaat uit een langwerpige rhomboëder (afb. 12) van optisch doorzichtig calciet met een breedte van ongeveer 1 cm en een lengte van 2-3 cm. De rhomboëder wordt doorgezaagd zoals aangegeven in afb. 12. Vervolgens worden de zaagvlakken bijgeslepen en worden de twee stukken op elkaar gekit met een laag canadabalsem met een brekingsindex van 1,537. Deze brekingsindex ligt tussen die van de gewone of ordinaire straal ($n = 1,658$) en die van de buitengewone of extra-ordinaire straal ($n = 1,486$). Vervolgens wordt de buitenkant van het prisma, op de twee uiteinden na, beschilderd met een dofzwarte, licht-absorberende verf. De truc van Nicol bestond eruit dat de ordinaire straal onder zodanige hoek op het kit valt dat er totale reflectie optreedt. De weggereflecteerde straal valt op de zwart gemaakte zijkant en is dan verdwenen. De extra-ordinaire straal heeft een zodanige brekingsindex dat hij gewoon door de kitlaag heen gaat. Zo breed als het kristal het toelaat is hierdoor een enkele bundel lineair gepolariseerd licht verkregen.

Het grote voordeel van het Nicolse prisma lag in een efficiënter gebruik van het licht en in een veel helderder, scherper en kleurloos beeld. Een Nicols prisma met mooie, heldere calcietkristallen geeft een bundel gepolariseerd licht met een intensiteit van ongeveer 40% van het invallende ongepolariseerde licht (theoretisch 50%). Natuurlijk zijn er in de loop van de 19e eeuw nog diverse verbeteringen en andere varianten op het basisprincipe van Nicol aangebracht. Afb. 13 laat de belangrijkste en meest gebruikte types zien.

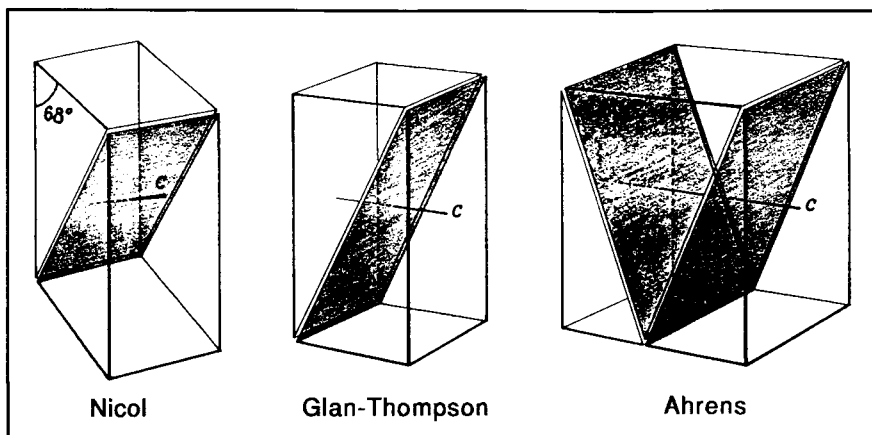
Twee jaar na zijn uitvinding publiceerde William Nicol een tweede artikel, waarin hij beschreef hoe men slijpplaten van mineralen en fossiel hout ten behoeve van microscopisch onderzoek moest maken. Hoewel Nicol met deze twee artikelen feitelijk de basis voor de moderne petrografie legde, duurde het echter tot na zijn dood voordat zijn ideeën aansloegen bij andere (geologische) wetenschapsbeoefenaars. Verantwoordelijk hiervoor was de Engelse student Henry Clifton Sorby (1826-1908) die, geïnspireerd geraakt door Nicols verzameling instrumenten en slijpplaten, de microscoop ging gebruiken om stenen te bestuderen. Sorby's volumineuze publicaties in 1851 en 1858 maakten in Engeland echter weinig indruk. Bekende onderzoekers in Duitsland (Zirkel en Rosenbusch) en Frankrijk (Michel-Lévy) echter zagen gelukkig wél het belang in van Sorby's werk, zodat na enkele tientallen jaren de petrografie een geaccepteerde en bloeiende tak binnen de natuurwetenschappen vertegenwoordigde.

Herapathiet

In 1852 beschreef de medicus William Bird Herapath de kleine kristallen van de organische stof iodocinchonidine-sulfaat (voor



Afb. 12. Het Nicolse prisma. Een rhomboëder van calciet wordt doorgezaagd zoals aangegeven op de bovenste figuur en vervolgens met canadabalsem weer aaneelkaar gekit. De lange kristalvlakken worden bedekt met een zwarte, lichtabsorberende verf.



Afb. 13. Naast het Nicolse prisma werden voornamelijk de verbeterde ontwerpen van Glan-Thompson en Ahrens in polarisatiemicroscopen gebruikt.

van de oudere typen polarisatoren in optische instrumenten gebruikt. Voor het eerst komt namelijk het grote publiek in aanraking met producten waarin polarisatoren verwerkt zijn. De bekendste uitvindingen die Land al in de jaren '30 en '40 op de markt bracht zijn polaroid zonnebrillen, autoruiten met een polaroid film, filters voor fototoestellen en natuurlijk de 3-D Motion-Picture polaroid film.

In 1938 en 1939 werd het populaire *polaroid J-sheet* vervangen door de optisch veel betere *H- en K-sheets*. De fabricage van het H-sheet begint met een plaat, bestaande uit een plastic genaamd *polyvinyl-alcohol*. Polyvinyl-alcohol zelf bestaat uit lange organische ketens (polymeren). De plaat wordt verwarmd en gelijktijdig vele malen uitgerekt. Door de uitrekking komen de lange polymeren parallel aan elkaar te liggen. Tevens wordt de plaat bij

en hoge luchtvochtigheid dan het H-sheet, ontstaat niet door toevoeging van jodine maar juist door onttrekking van waterstof- en zuurstofatomen, zodat een nieuwe polymeer ontstaat, genaamd *polyvinyleen*. Verbeterde varianten van beide sheets worden nu nog steeds standaard gebruikt.

Nog even dit

Vandaag de dag is vrijwel iedere polarisatiemicroscopie uitgerust met een polarisator en analysator die bestaan uit een polaroid-plaat. Toch worden in de petrografie de oude termen *nicols* en *gekruste nicols* nog steeds routinematig gebruikt. Een weliswaar onbedoeld maar terecht eerbetoon aan de grondlegger van de moderne petrografie....

Boekbespreking

De Geschiedenis van het Leven, deel 6 a: Perm - Invertebraten, door J.F. Geys; uitg. Belgische Vereniging voor Paleontologie vzw, no. 16, 1996; formaat 14,8 x 21 cm, 284 pag., met 468 pentekeningen; prijs f 29,-
Wijze van bestellen: Via de GEA-Boekenservice, zie de bijlage.

Met de regelmaat van een geologische klok verschijnt om het jaar een deel uit de onvolprezen serie "De Geschiedenis van het Leven". Wel wordt de stof steeds uitgebreider, zodat de perioden vanaf het Carboon twee volumes nodig hebben. Dat zou je van het Perm niet direct verwachten. Deze laatste periode van het Paleozoïcum, die "maar" 41 miljoen jaar duurde, heeft in West-Europa niet al te veel voorkomen en mariene, fossielrijke afzettingen zijn hier nog veel minder.

Wat was het belang van het Perm? Is de grens tussen Carboon en Perm vaak moeilijk te traceren, aan het eind van de periode vond de grootste massa-extinctie plaats die de geschiedenis van het leven heeft meegemaakt. Dit grote uitsterven is waarschijnlijk een geleidelijk gebeuren geweest. Met recht is het Perm het afscheid van het "oude leven", maar de nieuwe tendenzen kondigden zich al aan.

Een fijne indeling voor het Perm was mogelijk met behulp van Fusulinen (grote foraminiferen) en conodonten (kleine, tandvormige skeletdelen van het typische "conodontendier"). Rusland en Noord-Amerika leverden de secties voor de Perm-stratigrafie. De wereld van de ten tonele gevoerde Invertebraten bestaat uit koralen, bryozoën, brachiopoden, mollusken, geleedpotigen, stekelhuidigen en kleinere groepen, zoals foraminiferen. De nadruk valt in het boek op de mollusken en de geleedpotigen, en

bij de laatste op de landbewoners: de insecten; deze vullen met 32 pagina's een ruim bemeten hoofdstuk.

Het Europese Perm ligt vooral in Rusland, maar ook in Frankrijk, Tsjechië, Engeland en Duitsland komt Perm aan de oppervlakte voor. Vele van de in het boek afgebeelde fossielen stammen uit de USA, Australië, Brazilië, Pakistan, China, Timor, waarmee het buiten-Europese belang van het Perm wordt geïllustreerd. De hoeveelheid bijeengebrachte gegevens voor dit Perm-deel is weer overstelpend, veel details die je elders niet gauw vindt staan hier bij elkaar. Desondanks is de leesbaarheid gebleven. Het verschijnen van het Invertebraten-deel van het Perm is opnieuw een aanwinst voor de Nederlandstalige paleontologische literatuur. Met gepast ongeduld wachten we op de afronding van het Perm in de volgende uitgave, waarmee de schrijver zeker al bezig is. Wat een immense taak heeft hij zich gesteld!

J.S.-v.B.
