

werd ametriën genoemd, een samentrekking van de woorden amethyst en citrien. Ametriën was al aan het eind van de jaren zeventig op de Amerikaanse markt verschenen en in Europa aan het begin van de jaren tachtig. Er was meteen nogal wat controverse rond deze aantrekkelijk gekleurde kwarts: men achtte het onmogelijk dat dit een natuurlijk mineraal was, en deze geruchten zijn ook nu nog erg sterk aanwezig, soms overigens terecht. Het is inderdaad mogelijk om zulk materiaal kunstmatig uit natuurlijke amethyst te produceren door gecombineerde behandelingen van bestraling en verhitting. In het begin was er ook nog eens onduidelijkheid over de juiste vindplaats. Eerst werd gezegd dat de ametriën uit Brazilië kwam, maar later bleek dat het materiaal uit Bolivia naar Brazilië gesmokkeld werd, en aldaar als van Brazilië oorsprong geregistreerd werd omdat de winning ervan in Bolivia toentertijd verboden was. Een artikel van Vasconcelos, Wenk en Rossman in *Gems & Gemology* van 1994 heeft een einde gemaakt aan alle speculaties en geeft juiste informatie over alle aspecten van het begeerenswaardige mineraal. De vindplaats is de Anahí mijn in de provincie Santa Cruz in het oosten van Bolivia, ongeveer 30 km ten westen van de grens met Brazilië. De kwartslichamen en -aders bevinden zich in dolomitische kalksteen en zijn gevormd uit warme gemineraliseerde oplossingen in spleten in de kalksteen. Van 1989 tot 1994 is meer dan 100 ton ametriën-houdende kwartskristallen gemijnd, maar het slijpbare materiaal vormt maar 40-80 kg per ton; het wordt op de markt gebracht als amethyst, citrien en ametriën. Er zijn ondertussen voldoende mineralogen en gemmologen met kennis van zaken ter plaatse geweest (trouwens ook nu nog bepaald geen plezierreis!) om met eigen ogen te kunnen vaststellen dat de fameuze ametriën inderdaad volledig natuurlijk is (Vasconcelos *et al.* namen niet minder dan 200 kristallen mee naar huis voor nader onderzoek, en lieten er voor 3000 karaat stenen uit slijpen!). De kleurzonering is vrijwel constant in alle kristallen: de sectoren van de grotere positieve rhomboëdervlakken zijn paars gekleurd, en de sectoren van de kleinere negatieve rhomboëdervlakken zijn oranjegeel gekleurd, een duidelijk diepere kleur dan in natuurlijke citrien. De paarse sectoren zijn altijd lamellair vertweelgd, maar de gele sectoren in het geheel niet, iets wat gemakkelijk vastgesteld kan worden in gepolariseerd licht. Met chemische analyses is vastgesteld dat de gele sectoren meer ijzer bevatten dan de paarse, in tegenstelling tot wat eerder beschreven is. Intense bestraling met gammastraling resulteerde niet in kleurverschillen, een indicatie dat het aluminiumgehalte laag is in beide sectoren, want bij hoge Al-gehalten ontstaat immers rookkwarts. Bij het verhitten van ametriën tot 200 °C gebeurt er niets, een duidelijke aanwijzing dat de gele sectoren niet uit "echte citrien" bestaan; bij 370 °C verdwijnt de paarse kleur bijna volledig, terwijl de gele sectoren nog altijd hun kleur behouden; bij 385 °C is ook de gele kleur een stuk minder, en bij 400 °C zijn de paarse sectoren geel geworden, en de gele sectoren bijna kleurloos. De kleur uit de eerst gele sectoren verdwijnt geheel tussen 450 en 500 °C. Dit

gedrag toont aan dat de oorspronkelijk paarse sectoren uit amethyst bestaan, en dat de oorspronkelijk gele sectoren geen "echt citrien" zijn, want dan zouden die gebieden al bij 200 °C kleurloos worden. Deze gele sectoren bestaan, gezien hun hoge ijzergehalten, zeer waarschijnlijk uit de "derde soort" van citrien (zie boven), kwarts waarvan de gele kleur ontstaat door absorptie van licht door ijzer-ionen op de structurele plaats van silicium, en die door bestraling niet van kleur verandert.

Kristallen van Boliviaanse ametriën zijn tussen de 10 en 30 cm lang, en hebben een diameter van 4 tot 12 cm. Andere vindplaatsen van ametriën bevinden zich in India (Hyderabad) en in Brazilië, maar de vondsten aldaar zijn minimaal in vergelijking met die van de Anahí mijn.

Synthetische ametriën wordt geproduceerd door het bekende Tsjernogolovka Science Institute ten noordoosten van Moskou: de kristallen hebben een volkomen andere vorm dan kristallen van natuurlijk materiaal, maar in geslepen toestand ziet men dat uiteraard niet! Het andermaal citeren van Rykart lijkt overbodig te zijn!

## Literatuur

H.-J. Rösler (1979): *Lehrbuch der Mineralogie*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie, Leipzig.

Over kleur in het algemeen:

K. Nassau (1983): *The physics and chemistry of color; the fifteen causes of color*. John Wiley & Sons, New York etc., 454 pp.

Over de kleurvariëteiten van kwarts:

G.R. Rossman (1994): *Colored varieties of the silica minerals*. *Reviews in Mineralogy*, Vol. 29, pp. 433-467.

R. Rykart (1989): *Die Farbvarietäten*. In: "Quarz-Monographie: Die Eigenheiten von Bergkristall, Rauchquartz, Amethyst und anderen Varietäten", Ott Verlag, Thun, pp. 142-165.

Over de kleur van amethyst:

W. Lieber (1994): *Amethyst: Geschichte, Eigenschaften, Fundorte*. Christian Weise Verlag, München, 188 pp.

Over de kleur van citrien:

K. Schmetzer (1989): *Methods for the distinction of natural and synthetic citrine and prasiolite*. *Journal of Gemmology*, Vol. 21, pp. 368-391.

Over ametriën:

P.M. Vasconcelos, H.-R. Wenk, G.R. Rossman (1994): *The Anahí ametrine mine, Bolivia*. *Gems & Gemology*, Spring 1994, pp. 4-23.

Op internet, met talrijke kleurenfoto's van ametriën en de Anahí mijn: <http://minerals.gps.caltech.edu/ametrine/>

## GEOCOMpositie 4

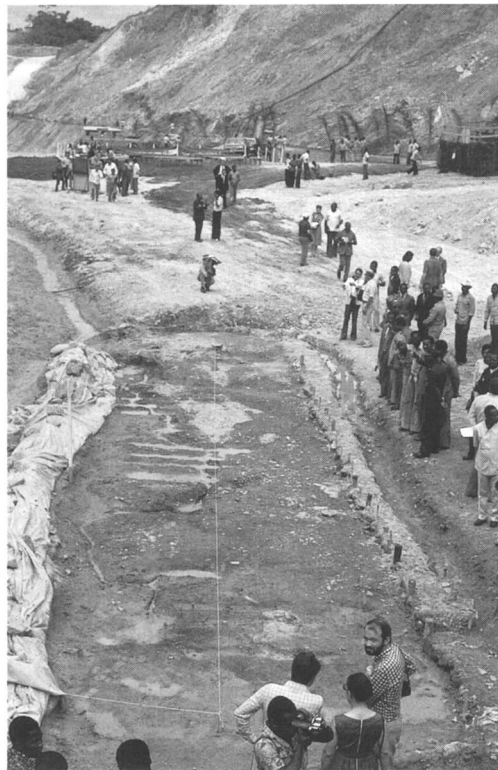
### Help via internet bij redding van bedreigd geologisch monument!

Iedere geoloog is zich bewust van het feit dat bij elk van zijn hamerslagen iets verdwijnt dat onvervangbaar is. Gelukkig is dat bijna nooit een probleem; net als in het dagelijks leven kunnen we immers niet alles bewaren. Maar ook net als in het dagelijks leven moeten we zuinig zijn met unieke geologische fenomenen. Dat wordt steeds meer erkend; in Nederland hebben we zelfs een aantal geologische reservaten.

In het buitenland is men bij de bescherming van unieke geologische objecten soms verder gevorderd dan in Nederland, soms bestaat er in het geheel geen bescherming. Dan blijkt economisch gewin (al dan niet begrijpelijk vanwege de economische omstandigheden) de doorslag te geven. Dat dreigt nu ook in Gabon (Afrika), waar een ongeveer tweemiljard jaar oud, zeer bijzonder geologisch fenomeen wordt bedreigd. Het gaat om een 'natuurlijke' kernreactor: een massa uraniumerts die ongeveer tweemiljard jaar geleden gedurende waarschijnlijk enkele honderdduizenden jaren heeft gefungeerd zoals ook de huidige kernreactoren dat doen: het leveren van energie door middel van een kernsplijtingsreactie die zichzelf in stand houdt, zonder tot een ongecontroleerde uitbarsting te komen (zoals dat in een atoombom het geval is).

Hoe weten we dat in dit oude ertslichaam zo lang geleden een min of meer gelijkmatig kernsplijtingsproces heeft plaatsgevonden? Dat werd ontdekt toen het erts ontgonnen werd om uranium

Een half afgegraven 'natuurlijke kernreactor' in een dagbouw mijn bij Oklo (Gabon). De donkere band in het midden representeert de uraniumrijke laag waarin versplijting is opgetreden. De lichte vlekken (gele uranylverbindingen) zijn secundaire uraniumafzettingen. Rechts een rij boorgaten, die zijn gemaakt om de reactor in de ondergrond te karteren.  
Foto Prof. dr. J.A. Goedkoop.



voor kernreactoren te winnen. Bijna ieder type kerncentrale heeft verrijkt uranium nodig. 'Verrijkt' wil zeggen dat de in uraniumerts voorkomende verhouding tussen de isotopen U-235 en U-238 is verhoogd. Natuurlijk uranium bevat - afgezien van bijzondere situaties zoals in Gabon - altijd zo'n 99,7% van het niet-splijtbare U-238 en ca. 0,3% van het splijtbare U-235. Het gehalte van U-235 wordt voor civiele kerncentrales gewoonlijk verhoogd tot 2-3%. Omdat deze isotoop ook een van de 'grondstoffen' is voor atoombommen, wordt er van al het gewonnen uranium een zorgvuldige boekhouding aangehouden. De verrassing was groot toen in ertsen die in mei 1972 uit Gabon werden ingevoerd bij controle te lage percentages U-235 werden aangetroffen. Naderhand werd dat ook gevonden voor enkele nieuwe ertsladingen, maar merkwaardig genoeg niet altijd. Nu is het scheiden van U-235 en U-238 een technisch zeer ingewikkelde zaak, zodat de vraag rees wie in Gabon de kennis (en het geld) had om het uranium deels te verrijken en het waardevolle U-235 te verduisteren. Er volgde een onderzoek dat niet onderdeed voor een spannende detective-serie. Maar er bleek geen boef te zijn: het erts van een aantal (kleine) locaties in Gabon bleek van nature een 'verkeerde' verhouding U-235/U-238 te hebben. Dat was vreemd, want bij het ontstaan van de aarde ontstonden van de diverse elementen hun isotopen overal in gelijke hoeveelheden. Het radioactieve uranium-235 heeft echter een veel kortere halfwaardetijd dan het (eveneens radioactieve) U-238. Dat verklaart de huidige verhouding. Bij het onderzoek bleek dat op een aantal plaatsen in de desbetreffende mijn (later ook op enkele andere plaatsen) erts voorkwam waarin kennelijk van nature al 'te weinig' U-235 voorkwam.

Dit merkwaardige gegeven kon beter worden begrepen toen nader onderzoek uitwees dat juist op de plaatsen met een 'tekort' aan U-235 ongewone isotopen voorkomen, die alleen konden worden verklaard als splijtingsproducten (of de vervalproducten daarvan) die uit uraniumatomen waren ontstaan bij kernsplijting. De conclusie moest daarom wel zijn dat er in het verleden uraniumerts had gefungeerd als een natuurlijke kernreactor. Een nauwgezet onderzoek wees vervolgens uit dat de reactoren (in de loop der tijd werden er 14 in Gabon aangetroffen) enkele honderdduizenden jaren moeten hebben 'gedraaid', met eenzelfde vermogen als een elektrisch kacheltje. Nu, zo'n tweemiljard jaar later, zal niet opnieuw zo'n natuurlijke kernreactor in werking treden. Tweemiljard jaar geleden, toen het verval van het uranium nog niet zo ver was voortgeschreden, bedroeg het gehalte aan U-235 namelijk zo'n 2-3%, precies optimaal voor kernsplijting en net zoveel als nu via verrijking wordt verkregen. Bovendien drong in die periode water in de uraniumertsen binnen; dat water zorgde voor de noodzakelijke vertraging van bij splijting vrijkomende neutronen (wanneer ze niet worden vertraagd is de kans dat ze een nieuwe splijting veroorzaken extreem klein).

Een aantal van de ertslichamen met een natuurlijke reactor is lange tijd gespaard gebleven voor ontginning. Ze vormden geologisch/fysische monumenten, die ook van groot belang waren voor het onderzoek naar de eventuele verplaatsing van de gevormde splijtingsproducten (te vergelijken met het 'kernsplijtingsafval' van kernreactoren) door het gesteente. Hoewel er inmiddels zo'n lange periode is verstreken, en het desbetreffende gesteentepakket (zandsteen) relatief permeabel is, zijn overigens geen splijtingsproducten aangetroffen die meer dan enkele meters van hun plaats van vorming zijn 'weggewandeld'.

Door de noodzaak van een economische exploitatie zijn echter in de loop der tijd steeds meer van de gevonden natuurlijke reactoren gesneeuvel. Er is er in Gabon nu nog slechts één over (bij Bangombé, 30 km van Oklo af), en ook die wordt nu bedreigd. De

exploitant wil voor het behoud ervan een vergoeding van de gedeerde inkomsten voor het erts (ca. fl. 7 miljoen). Ondanks inspanningen van veel wetenschappers lijkt dat geld niet op tafel te komen. Gezien het belang van dit monument, roepen de 'actievoerders' alle mede-wetenschappers op om steun te betuigen. Dat kan, net als het aanvragen van nadere informatie, via internet bij [gauthier@illite.u-strasbg.fr](mailto:gauthier@illite.u-strasbg.fr).

## Literatuur

- Blanc, P.-L., Bruno, J., Gauthier-Lafaye, F., Griffault, L., Ledoux, E., Louvat, D., Michaud, V., Montoto, M., Oversby, V., Perez del Villar, L. & Smellie, J., 1997. The last natural fission reactor. *Nature* 387, p. 337.
- Boelrijk, N.A.I.M. (1979). Kernreactoren, een natuurlijk geologisch fenomeen. *Gea* 12 (1979), nr. 2.
- Cowan, G.A., 1976. A natural fission reactor. *Scientific American* 235, p. 36-47.
- Goedkoop, J.A., 1975. Een symposium aan de evenaar. *Atoomenergie en haar toepassingen* 17, p. 260-272.
- Goedkoop, J.A., 1976. Het Oklo-fenomeen. *Natuur en Techniek* 44, p. 102-119.
- International Atomic Energy Agency, 1975. Le phénomène d'Oklo. *C.R. Colloque (Libreville)*.
- Kaiser, J., 1997. Natural fission reactor threatened by mining. *Science* 276, p. 1019.
- Loon, A.J. van, 1982. De natuurlijke kernreactoren bij Oklo (Gabon). In: C.D. Andriess & A. Heertje: *Kernenergie in beweging*. Keesing Boeken (Amsterdam), p. 358-361.

A.J. van Loon

## Rectificatie

In het artikel "De vele onbekende kanten van KLEI", deel I, in het juninummer van dit jaar, zijn op pag. 64 helaas de afbeeldingen 5 en 6 verwisseld.

Het is duidelijk, dat de eenheid bestaande uit twee lagen: octaederlaag en tetraederlaag (kaoliniet), is weergegeven in de **onderste** van de twee figuren.