

De Cycladen, brandpunt van geologische processen

door prof.dr. R.D. (Olaf) Schuiling

Mineralen zijn vaak niet alleen mooi, ze vertellen ons ook veel over de geologische processen waardoor ze gevormd zijn. De Griekse Cycladen, een eilandengroep in de Egeïsche Zee, bieden een prachtige gelegenheid om dat te demonstreren. Ze zijn goed ontsloten en je komt er veel mooie mineralen tegen die je vertellen welke grote geologische processen daar een rol gespeeld hebben – en nog spelen.

In de jaren 1962 tot 1997 heb ik veel veldonderzoek gedaan op de Cycladen (afb. 1). Uit de meest interessante eilanden heb ik een selectie gemaakt die ik gebruikte als basis voor een excursie voor studenten en nog steeds gebruik voor de reis die ik voor de Stichting Georeizen begeleid. Aan de hand daarvan zal ik de belangrijkste processen van oud naar jong demonstreren, te beginnen dus met de onderschuiving van de Afrikaanse plaat onder de Euraziatische plaat en eindigend met de enorme eruptie van Santorini, rond 1500 voor Christus.



Afb. 1. De Cycladen in de Egeïsche Zee.

Syros

Toen in het Mesozoïcum de Afrikaanse plaat onder de Euraziatische plaat begon te schuiven, werd er vooral oude zeebodem onder de Europese plaat geschoven. Deze bestond uit kalken, kleien en vulkanische gesteenten. Onder een pakket gesteenten van 90 kilometer dik van de bovenliggende Europese plaat, ondergingen deze gesteenten een hoge-druk metamorfose bij een vrij lage temperatuur van zo'n 400 á 500°C (afb. 2).

Van deze metamorfe gesteenten vinden we prachtige ontsluitingen op Syros, gekarakteriseerd door paarsblauwe glaucofanen. Dit eiland is ook de type-lokaliteit van glaucofaan. Andere hoge-druk mineralen die er te vinden zijn, zijn jadeïet, lawsoniet en aragoniet. Ik heb eens een stuk jadeïet van



Afb. 2. Syros: een 'muts' van glaucofaan.

Syros meegenomen naar Mozambique, waar ik een lezing moest houden. Ik heb dat stuk toen overhandigd terwijl ik zei: "dit is een stuk Afrika dat onder Europa is geschoven, maar hier hebben jullie het weer terug. Wees niet bang, ik weet plaatsen op Syros waar jadeïet nog in overvloed te vinden is. Een ander gesteente dat karakteristiek is voor hoge-druk metamorfose is eclogiet, het hoge-druk equivalent van basalt. Rutielrijke eclogieten worden vaak als lenzen tussen de glaucofaanschisten gevonden.

Op een gegeven moment is de subductie in de buurt van Syros opgehouden. Ik denk dat het minder energie kostte om een nieuwe knik te maken in de korst ten zuiden van Kreta, dan bij Syros nog meer licht gesteenten tegen de zwaartekracht in de mantel in te duwen. De glaucofaangesteenten zijn daarna snel omhoog gekomen, maar ondergingen allerlei omzettingen op hun reis van 90 kilometer diepte terug naar het aardoppervlak.

Naxos

Alleen in een subductiezone kunnen gesteenten zo diep zinken, daarbuiten ondergaan zij op een diepte van enkele kilometers een 'gewoon' soort metamorfose (dat heet regionaal-metamorfose), waarbij de kleien in micaschisten, de basalten in amfibolieten, en de kalken in marmers veranderen (de Cycladen zijn beroemd om hun marmertypen, sommige geschikt voor prachtig beeldhouwwerk, andere voor monumentale gebouwen). Wij denken natuurlijk over marmers als een zeldzaam en duur soort natuursteen, maar in een gebied waar ze overvloedig aanwezig zijn, bouwen de boeren hun stallen van marmer, en hun huizen van baksteen! (afb. 3)

Op Naxos kunnen we de hele serie metamorfe gesteentes zien, omdat de gesteentes op hun kant gezet zijn rond een centrale gneisdome. De gewone metamorfe gesteentes hebben zo'n 25 miljoen jaar geleden hun temperatuurpiek bereikt. Behalve de genoemde gesteentetypes vinden we ook een paar ongewone. Zo zitten er kleine lenzen van metamorfe bauxieten in de marmers. Bij temperaturen boven de

420°C worden de bauxietmineralen omgezet in korund. In het gesteente zelf, waar de korund gemengd zit met ijzeroxides (magnetiet of hematiet), herken je het niet, maar vaak vind je prachtige blauwe aders van korund. Omdat korund het op een na hardste mineraal is, werd de metamorfe bauxiet (*smirgel* genoemd) vroeger gemijnd voor slijppoeder en schuurmiddel. Tegenwoordig wordt daar bijna alleen synthetische korund voor gebruikt.

In de gneisdome heeft de metamorfose een temperatuur van ruim 700°C bereikt. De oorspronkelijk kleiige gesteentes zijn omgezet in migmatiet, een menggesteente met opgesmolten granietpartijen en slierten niet-opgesmolten biotiet. De gneisdome bereikte zijn maximale temperatuur ongeveer 16 miljoen jaar geleden, dus na de hoofdfase van de regionale metamorfose. Bij de afkoeling van deze granietgneis bleef er een restsmeelt over waarin allerlei zeldzame elementen geconcentreerd werden. Deze vinden we als pegmatietgangen met grote toermalijnkristallen en beryl terug rond de gneiskoepel.

Ook vinden we hele zones met duniet of peridotiet, die vroeger, voor de metamorfose, serpentinieten zijn geweest aan de basis van dekbladen. Dit zou inhouden dat het metamorfe pakket hier bestaat uit een opeenstapeling van dekbladen. Toen de temperatuur omhoog ging als gevolg van de domevorming, werden de serpentinieten weer teruggevormd tot



Afb. 3. Marmergroeve op Naxos.

olivijngesteentes, wat ze natuurlijk vroeger ook waren. Deze gesteenten zijn dus oorspronkelijk gevormd in de mantel, tijdens het omhoogkomen in de korst door circulerend water omgezet in serpentinieten en tijdens de periode van de domevorming weer 'terug' omgezet in olivijngesteenten. Op de plekken waar pegmatietaders in zo'n olivijngesteente ingedrongen zijn, vinden we reactiezones van monominerale phlogopiet, actinoliet en anthophylliet. In de pegmatiet zelf, die zijn siliciumoxide kwijt is geraakt door reactie met olivijn, blijven soms robijntjes of stersaffieren over.

We vinden op Naxos een serie verschillende gesteenten, die tussen de 400° en ruim 700°C gemetamorfoseerd zijn. Omdat we weten welke mineralen bij welke temperaturen gevormd worden, kunnen we reconstrueren wat het toenmalige temperatuurverloop is geweest.

De geschiedenis van Naxos is daarmee nog niet afgelopen. Rond 11 miljoen jaar geleden is er een groot granietlichaam ingedrongen. Aan de rand van deze graniet, waar ook de stad Naxos zelf op gebouwd is, vinden we een contactmetamorphe zone waar de temperatuur opnieuw opliep tot 700°C. De druk was wel veel lager, omdat erosie ondertussen al veel van het bovenliggende gesteente had verwijderd.

U kent waarschijnlijk wel de mineralen kyaniet, sillimaniet en



Afb. 4. Kyaniet.

andalusiet, allemaal met dezelfde formule Al_2SiO_5 . Die vinden we alle drie op Naxos. Aan hun verspreiding is te zien hoe de temperatuur- en drukverdeling is geweest bij de metamorfose en tijdens de granietintrusie. Kyaniet wordt gevormd bij hoge druk en lage temperatuur, sillimaniet bij lage tot hoge druk en hoge temperatuur, en andalusiet wordt gevormd bij lage druk en matige tot vrij hoge temperatuur. (afb. 4)

En nog is de geschiedenis van Naxos niet afgelopen. Kort nadat de graniet was ingedrongen en afgekoeld, is er een dekblad over Naxos geschoven. Dat is schoksgewijs gegaan. De plotselinge verschuivingen gingen gepaard met aardbevingen, waarbij de breukzones door de wrijvingswarmte opsmolten. Deze fossiele aardbevingen zijn in het veld terug te vinden als 'pseudotachylieten'.

Aan het strand vinden we accumulaties van zware mineralen en als je even een magneet door het zand trekt, krijg je een hele sliert magnetietkorrels achter je aan.

Serifos

De granietintrusie van Naxos was al een eerste aankondiging dat de gesteentes boven de subductiezone begonnen op te smelten. Maar het mooiste voorbeeld daarvan ligt op Serifos. Hier is 8 miljoen jaar geleden een graniet hoog ingedrongen in de korst. Daardoor ontstond een groot temperatuurverschil tussen de hete graniet en het vrij koude nevengeesteente, wat de drijvende kracht was voor de circulatie van vloeistoffen, die door barsten in de graniet stroomden en daar allerlei mineralen oplosten. Deze barsten zijn duidelijk te herkennen als een netwerk van gebleekte zones in de graniet, waaruit alle ijzer-, magnesium- en calciummineralen verdwenen zijn. Als deze elementen opgelost in de hete vloeistof uit de gra-



Afb. 5. Groene hedenbergiet op Serifos.

niet de kou instromen, dan slaan er allerlei mineralen neer. Hierdoor zijn er prachtige, vaak monominerale zones ontstaan. Zo kun je op een klif tientallen meters lopen over enorme groene ballen die helemaal uit radiaal gerangschikte pyroxeenkristallen bestaan van soms meer dan een halve meter lengte.

Ook de ijzerertsen op het eiland zijn gevormd door deze vloeistoffen. Vlakbij de graniet zijn het magnetietvoorkomens, wat verder weg is hematiet gevormd. Ook zeldzame mineralen als ilvaïet komen in mooie kristallen voor. (afb. 5)

Milos, jonger en hoger

Was Serifos nog een graniet die op een paar kilometer diepte was ingedrongen, op Milos bereikten de smelten het oppervlak en beginnen we aan de vulkanische fase, die zo'n 3½ miljoen jaar geleden begon. Milos is vrijwel helemaal vulkanisch. Veel vulkanische gesteenten zijn omgezet door hete vloeistoffen die er doorheen gestroomd zijn, waardoor er grote voorkomens van kaolien en bentoniet gevormd zijn, die actief gemijnd worden. Ook een paar voorkomens van perliet worden vierentwintig uur van de dag en zeven dagen van de week geëxploiteerd. Perliet is een vulkanisch gesteente dat bij verhitting tot wel twintig keer opzwellt en dat als lichtgewicht constructiemateriaal gebruikt wordt. Tot in de 20e eeuw werd ook zwavel gewonnen, dat in massieve partijen in het gesteente zit. Wij zijn er van overtuigd dat deze zwavel als een aparte smelt in het gesteente gezeten heeft en dus heel anders is dan de zwavelkristallen in de fumarolen, die uit een hete damp neerslaan.

De ondergrond van Milos is heet, de temperatuur stijgt vaak meer dan tienmaal zo snel als in normale gebieden. Je hoeft soms maar even in het zand te graven, en dan voel je het meteen warmer worden. Dit komt omdat er over een groot gebied ook nu nog hete gassen opstijgen. Er is zelfs een restaurant waar het eten klaar gemaakt wordt in een kist die in het hete zand is ingegraven. Daar in de buurt vinden we ook spectaculaire fumarolen. Uit de zwaveldampen slaan fijne, naaldvormige zwavelkristallen neer. Soms, als het dekgesteente niet doorlatend is, kunnen die gassen niet weg. Ze hopen zich dan op in de ondergrond en komen er plotseling met een grote klap uit. Het landschap van Milos is doorzeefd met zulke explosiegaten, vaak met een diameter van meerdere honderden meters.

Een karakteristiek vulkanisch gesteente op Milos is obsidiaan. Dat werd in het Neolithicum bewerkt tot pijlen, speerpunten en krabbers, en de obsidiaan werd ook toen al, 7000



Afb. 6. Milos: bentonietmijn.

jaar geleden, geëxporteerd naar de andere eilanden. En ten slotte: op Milos werd de Venus van Milo gevonden, vlakbij een fraai bewaard amfitheater. (afb. 8)

Santorini

Het klapstuk in meerdere betekenissen. Santorini was belangrijk in het Minoïsche rijk (3000 tot 1400 voor Christus) dat op Kreta gevestigd was. Als je nu Santorini binnenvaart, dan kijk je tegen een steile wand van vulkanische gesteenten aan, die een bijna gesloten cirkel vormt. Dit is de binnenwand van een caldera.

Ongeveer 1500 voor Christus heeft hier de grootste eruptie plaatsgevonden uit de menselijke geschiedenis, naar schatting vier maal zo groot als de uitbarsting van de Krakatau. Een grote magmakamer werd leeggeblazen en is daarna ingestort. Dit heeft een enorme tsunami veroorzaakt, die op Anaphi, een eiland op 25 kilometer van Santorini, nog 230 meter hoog was! De eruptie legde een 20 meter dik dek van witte puimsteen over het hele eiland; de vulkanische as ligt natuurlijk ook op de zeebodem. Onder die laag heeft men de resten van de Minoïsche stad Akrotiri uitgegraven. Puimsteenstukken vind je op de stranden van alle andere eilanden terug, een soort zee-post met de groeten uit Santorini.



Afb. 7. Santorini: de calderawand met daar bovenop de stad Fira.

Middenin de caldera liggen een paar kleine, kale, zwarte eilandjes. Dat zijn kleine vulkaantjes die na de grote eruptie gevormd zijn, en waarvan de laatste eruptie uit 1950 dateert. In de krater worden zwavelkristallen gevormd uit de hete gassen.

Het is verleidelijk om de eruptie van Santorini te koppelen aan het Bijbelse verhaal van de plagen van Egypte en de uittocht van de Joden. Er staat meestal een straffe noordenwind op de Cycladen, die dus de vulkaanas rechtstreeks naar Egypte zal hebben geblazen. Het is niet moeilijk om de gevolgen van een dikke laag as in het water te vertalen naar de plagen die opgetreden zijn. Als de Joden dan wegtrekken door de Schelfzee, dan wijkt het water eerst (een verschijnsel dat we maar al te goed kennen na de tsunami van december 2004), waarna de vloedgolf het achtervolgende Egyptische leger verzwelgt. En ook de tekst "de Heer ging hen voor, gehuld in een rookkolom des daags en een vuurzuil des nachts", is dat niet een treffende beschrijving van een eruptie die tot hoog in de stratosfeer reikt? (afb. 7)

Indien u graag de geologie van de Cycladen met eigen ogen zou willen bekijken, dan kan dat. In september zal ik een 14-daagse reis naar de Cycladen begeleiden. Meer informatie vindt u op www.georeizen.nl.