







Stichting Geologische Activiteiten

gea september 2014, nummer 3

Inhoud:

De rijke en afwisselende geologie van Zuidoost-Spanje	63
Op jacht naar de Jedi-spinel	74
Speleogenese: het ontstaan van grotten. Deel III:	
Karstverschijnselen aan de oppervlakte	77
Iris-agaat: een iriserende variëteit	85
Stof zijt gij en als diamant zult gij wederkeren	86
Calciet als harnas	88
Het vurige karakter van vuuroopaal	89
Boekbesprekingen	76, 90
50e Geologisch Evenement Amsterdam	91

Bij de voorplaat:

Gezicht op Nijar, Andalusië, Zuid-Spanje

Foto: Anne Rutger Fortuin

Zie voor details het artikel 'De rijke en afwisselende geologie van Zuidoost-Spanje' in dit nummer

Bij de achterplaat:

Playa del Monsul,

Cabo de Gata, Zuid-Spanje

Foto: Anne Rutger Fortuin

Zie voor details het artikel 'De rijke en afwisselende geologie van Zuidoost-Spanje' in dit nummer

Copyright © 2014 Stichting Geologische Activiteiten.
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Vragen hiertoe te richten aan de redactie van Gea.

REDACTIE Gea:

Mw. drs. A. van Roekel: redactie.vanroekel@gea-geologie.nl, Langestraat 74-III, 1015 AM Amsterdam, tel. 020 - 620 61 23
Mw. J. Stemvers-van Bommel: redactie.stemvers@gea-geologie.nl, Rietspinner 15, 3831 DP Leusden, tel. 033 - 495 21 10
Voor de Gea-Bijlage: H.P. Zijlstra: redactie.bijlage@gea-geologie.nl, Ereprijs 100, 8935 JL Leeuwarden, tel. 058 - 288 37 61

LAY OUT, OPMAAK Gea:

Henk van de Wall Grafische Producties BV, tel. 023 - 80 80 244

ADVISEURS:

Dr. A.R. Fortuin; Dr. P.J. Hoedemaeker (ammonieten), Dr. J.W.M. Jagt (paleontologie), Dr. C. Maijer (petrologie); Prof. dr. H.N.A. Priem; Dr. J. Verhofstad; Drs. W.C.P. de Vries; Dr. J.C. Zwaan (Naturalis)

BESTUURSLEDEN STICHTING GEA:

J.H.P. Sanders, voorzitter: voorzitter.gea@gea-geologie.nl, Zichtveld 6, 3993 ST Houten, tel. 06 - 835 375 73
F. Tromp, penningmeester: penningmeester@gea-geologie.nl, Churchillplein 16, 1921 ET Akersloot, tel. 0251 - 31 39 76
Mw. J. Stemvers-van Bommel, redacteur: redactie.stemvers@gea-geologie.nl, Rietspinner 15, 3831 DP Leusden, tel. 033 - 495 21 10
H. van Dennebroek, project-coördinator Geol. Evenement A'dam: evenement.organisatie@gea-geologie.nl, De Maten 20, 1261 SB Bijvanck - Blaricum, tel. 035 - 525 82 04

ENKELE STAFLEDEN:

Mw. T. Hardeman, stafid kringzaken en 2de penningmeester: kringzaken@gea-geologie.nl, Vollenhoveschans 3, 1324 HS Almere, tel. 036 - 533 57 22
R. van der Brugge, administrateur Geol. Evenement A'dam: evenement.administratie@gea-geologie.nl, Hensbroekstraat 11, 1507 LH Zaandam, tel. 075 - 616 76 76
B. van Lubeck, stafid GEA-Boekenservice: gbs@gea-geologie.nl, Kadoelenstraat 18, 1443 KS Purmerend, tel. 0299 - 427511
Mw. T.C. Elsten-Zondag, stafid PR: publicrelations@gea-geologie.nl, Oude Turfvaartsestraat 21, 4707 RN Nispen, tel. 0165 - 36 56 56
Mw. A. van de Bilt, redacteur GEA-nieuwsbrief: nieuwsbrief@gea-geologie.nl

DONATEURSADMINISTRATIE:

Voor aanmeldingen, adreswijzigingen en inlichtingen over verzending van het tijdschrift Gea:
H. Boer, Kastanjestraat 28, 3203 AP Spijkenisse, tel. 0181 - 61 88 23; donateursadministratie@gea-geologie.nl

DONATIE GEA/ABONNEMENT:

€ 24,- per kalenderjaar; voor België: € 27,-; voor de rest van Europa € 35,-, voor de rest van de wereld € 37,-
Losse nummers € 6,-, tenzij anders vermeld.
Bestellingen van losse nummers bij de GEA-Boekenservice.

BETALINGEN:

IBAN-nummer NL96 INGB 0002 0692 42 t.n.v. Penningmeester Stichting Geologische Activiteiten, Churchillplein 16, 1921 ET Akersloot. BIC code INGBNL2A.

GEA-BOEKENSERVICE (voor reeds verschenen Gea-nummers):

B. van Lubeck, Kadoelenstraat 18, 1443 KS Purmerend.
IBAN-nummer NL96 INGB 0003 4119 16 t.n.v. Stichting GEA afd. Boekenservice, BIC code INGBNL2A.

INTERNET:

Stichting GEA: www.gea-geologie.nl;
Webmaster: Martijn van den Ende, webmaster@gea-geologie.nl

De rijke en afwisselende geologie van Zuidoost-Spanje

door Anne Rutger Fortuin

em. docent Faculteit voor Aard- en Levenswetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam

e-mail: a.r.fortuin@vu.nl

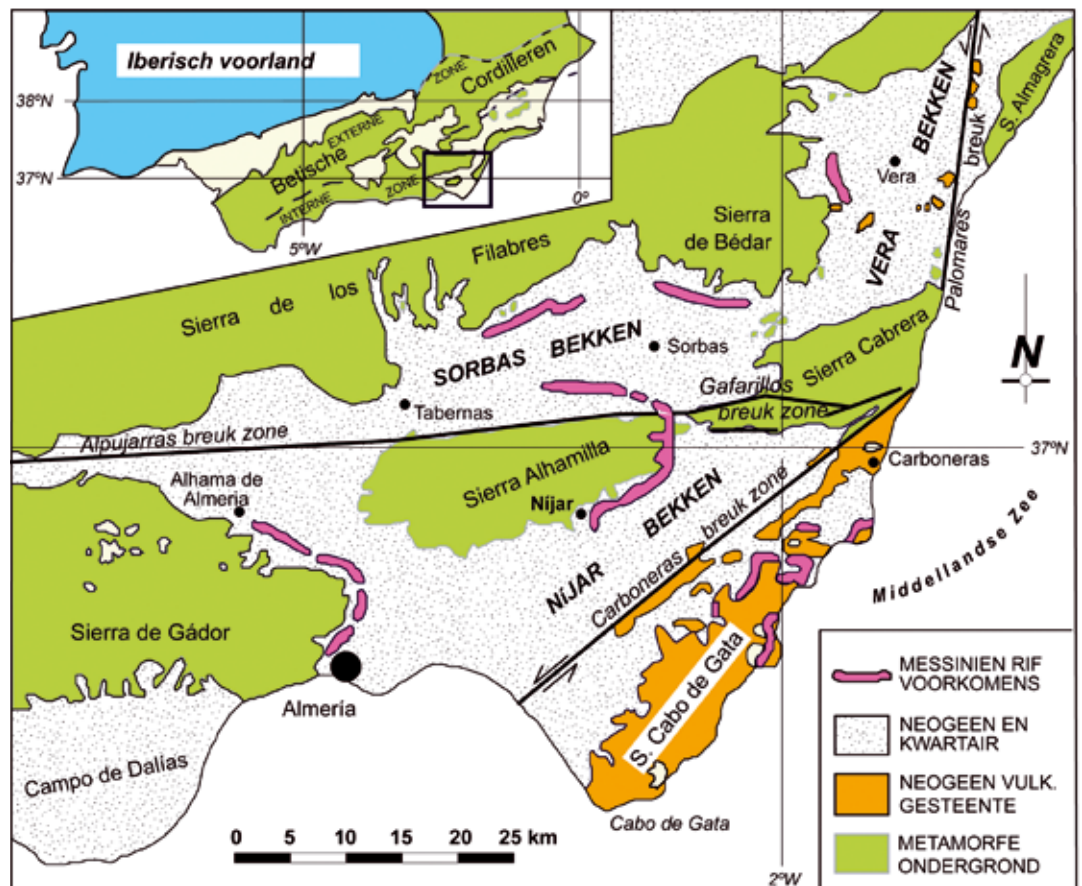
In een ver verleden brak het Iberisch korstfragment van Gondwanaland af en raakte zo als microcontinent Iberië op drift. Inmiddels ligt het alweer vele miljoenen jaren als deel van de Euraziatische plaat ingeklemd tussen een noordwaarts bewegend Afrika en een behoorlijk stabiel West-Europa. De Pyreneeën in het noorden en de Andalusische sierra's, oftewel de Betische Cordillieren in het zuiden van Iberië, zijn het directe gevolg van deze bewegingen.

Spanje is al een prettig land om je vakantie door te brengen, maar zowel beroeps- als amateurgeologen komen er extra graag vanwege de veelzijdige geologie. In deze bijdrage wil ik enkele geologische aspecten van Zuidoost-Spanje aanstippen, want het kan niet meer dan een oppervlakkige behandeling zijn van het moois daar. Zuidoost-Spanje bereizen betekent ervaren dat er snelle afwisselingen zijn tussen jonge sedimentaire bekken en de hoog oprijzende belendende sierra's ('sierra' is Spaans voor zowel zaag als bergrug) (afb. 1). De sierra's van de Betische Cordillieren omvatten de geologisch gezien opgeheven en metamorfe diepere korstdelen, plus een langzaam bekender wordend geopark met een vulkanische geschiedenis in het meest zuidoostelijke puntje. De opkomst van dit geopark, het 'Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar' (onderdeel van het Europese Geopark Netwerk, onder auspiciën van UNESCO), is er mede de oorzaak van dat er een rijk geïllustreerde gids op

Afb. 1. Geologisch overzichtskaartje van de Neogene bekken van Zuidoost-Spanje en hun omgeving. De inzet linksboven geeft de ligging van de hele Betische Cordillieren met hun indeling in externe en interne zone.

internet te vinden is over dit gebied en de aangrenzende streken (Villalobos Megia, 2007). Diverse Spaanse collega's hebben daaraan bijgedragen en zelfs buiten het park zijn er hier en daar borden geplaatst met goede geologische informatie. Daarnaast is er een degelijke Engelse excursiegids (Mather et al., 2001), die de hele regio beslaat en nog steeds verkrijgbaar is.

Zelf heb ik als voormalig docent en onderzoeker aan de Vrije Universiteit (VU) ook de nodige kennis en ervaring op kunnen doen in deze gebieden en dan met name in de Neogene bekken. Amsterdamse geologen van de Universiteit van Amsterdam (UvA) hebben in de Betische Cordillieren (afb. 1) een lange traditie van onderzoek gehad en pas na de samenvoeging van de geologische faculteiten van UvA en VU in 1984 werd dit ook een VU-aangelegenheid. Inmiddels is het gebied geliefd bij veel



Spaanse en buitenlandse onderzoekers en hun studenten. Het is er nog geen dringen bij de ontsluitingen, gelukkig, maar laten we maar gauw kijken. Overigens kan dat ook letterlijk onder leiding gebeuren, want ondergetekende heeft in 2013 onder auspiciën van de Stichting Georeizen een achtdaagse excursie naar deze regio opgezet en begeleid en een herhaling is in 2015 voorzien.

Tot in het vroege Pliocen waren de drie bekkens die we hier bespreken grotendeels marien. Pas ruwweg vanaf het begin van het Pliocen hebben verticale bewegingen deze bekkens aan het Spaanse vasteland toegevoegd, terwijl het vulkanische Cabo de Gata-massief vanuit de Alboran Zee naar het noordoosten geschoven kwam dankzij de aanwezigheid van de Carboneras-breukzone (afb. 1). Deze horizontaal verschuivende breuk scheidt dit massief van het aangrenzende Nijar Bekken. De hele streek ligt in de regenschaduw van de Sierra Nevada, het hoogste gebergte van de Betische Cordilleren, waarvan in het voorjaar de besneeuwde toppen van de Mulhacen (3394 m) vanuit de bekkens bij helder weer goed te zien zijn. In deze droogste streek van Spanje - en mede dankzij het milde Mediterrane klimaat - kun je desgewenst in alle jaargetijden rond-scharrelen. Door de relatief schaarse begroeiing is de mate van ontsluiting van het gesteente bovendien gunstig. Deze bijdrage is overigens geen excursiegids en niet alle afgebeelde locaties zijn in de overzichtskaartjes terug te vinden. Via kaartjes in de genoemde excursiegidsen kunnen liefhebbers deze plaatsnamen en wegen makkelijk opsporen.

Ontstaan van de Betische Cordilleren

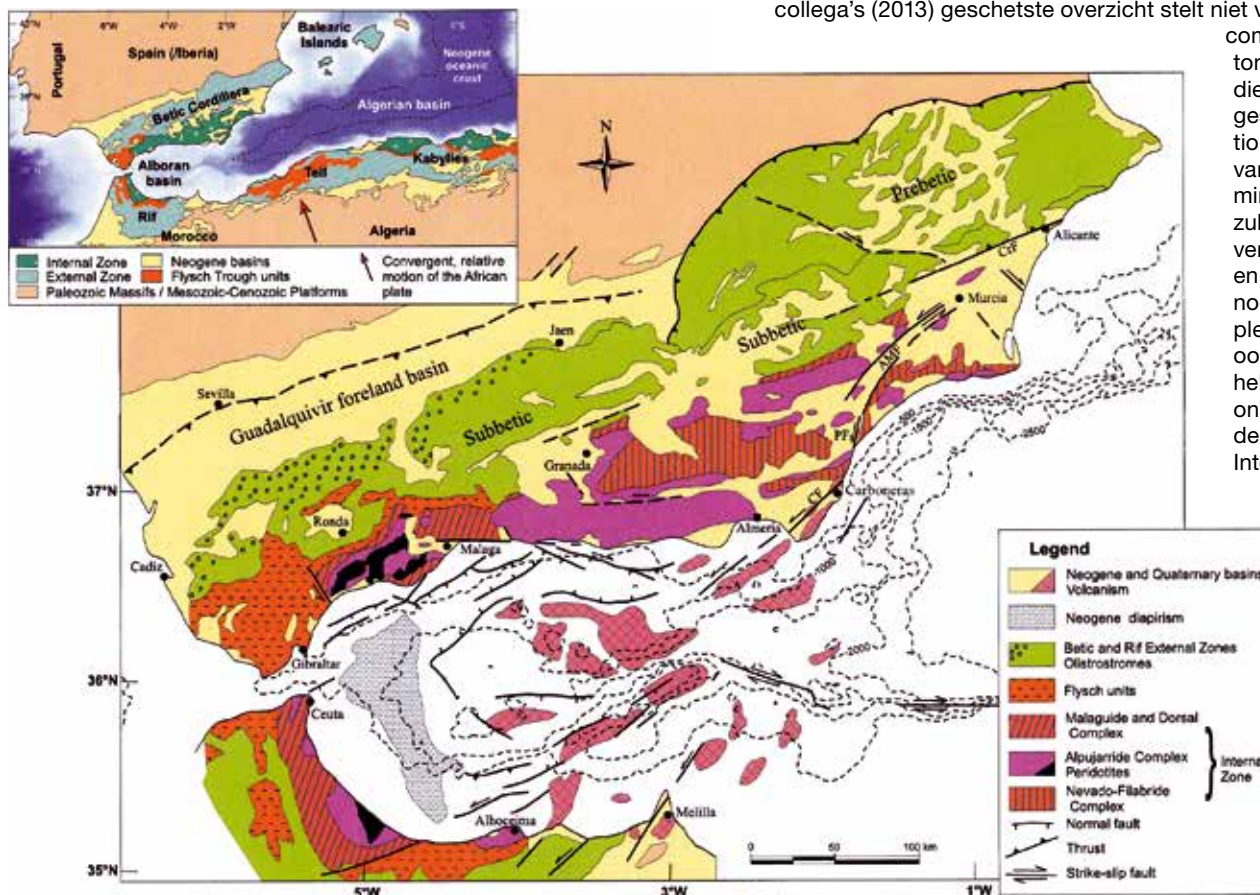
De Betische Cordilleren zijn gevormd uit de vroegere zuidelijke passieve continentrand van Iberië, die als gevolg van de alpiene botsing tussen de Afrikaanse en Europese plaat in elkaar is ge-

drukt. De geschiedenis van deze bergketens is nogal complex en is al behandeld in een eerder Gea-overzichtsartikel (Biermann, 2007, ook online vrij beschikbaar, zie onder literatuur). Lezers die het naadje van de kous willen weten verwijs ik naar Platt et al., 2013. Hier volgt alleen een uiterst compact overzicht.

Ruwweg 60 miljoen jaar geleden manifesteerden zich de eerste grote compressieve bewegingen, waarbij het front van de Afrikaanse (Nubische) plaat onder de Iberische plaat geschoven werd. Als eindresultaat zien we nu de Betische-Rif-gebergte-gordel (afb. 2). De huidige snelheid van nadering tussen Spanje en Afrika is tamelijk bescheiden (~5 mm/jr, de bewegingsrichting van Afrika ten opzichte van Europa is NW gericht, zie afb. 2, linksboven). Ter hoogte van Gibraltar draait de overwegend westzuidwestelijke-oostnoordoostelijke plooi richting van het Betische deel naar noord-zuid en in Marokko loopt dit gebergte min of meer gespiegeld door als Rifgebergte. De gesteenten van dit aangrenzende Rifgebergte vormen daarbij de gedeformeerde continentrand van de Nubische (Afrikaanse) plaat. Tussen de beide gebergten in ligt de Alboran Zee, die vooral uit sterk verdunde, 12-20 km dikke continentale korst bestaat. Ook de zogenaamde Interne Zone van de Betische ketens (afb. 1) hoort tot deze Alboran-korst, die vooral bestaat uit een stapel metamorfe dekbladen, als zichtbare getuigen van het complexe subductieproces tussen Afrika en Europa.

In plaattektonisch opzicht markeert de Betische-Rifgebergte-boog oostwaarts duikende subductie (onderschuiving), maar er bestaat geen eensluidende uitleg van de huidige plaattektonische ontwikkeling. Bij actieve subductie hoort bijvoorbeeld vulkanische activiteit, maar het meest recente vulkanisme in de Betische ketens is al 5 miljoen jaar geleden geëindigd. Volgens sommige geofysici scheurt deze oostwaarts duikende lithosfeerplaat van ondergeschoven en weggezonden oceanische korst in westelijke richting langzaam los. Het door John Platt en collega's (2013) geschetste overzicht stelt niet voor niets dat de

complexe plaat-tektonische processen die een rol hebben gespeeld de traditionele concepten van gebergtevorming tartten. We zullen er hier niet verder bij stilstaan en volstaan met het noemen van enkele plekken die het oog wat te bieden hebben, waarbij we ons beperken tot de geologie van de Interne Zone.



Afb. 2. Tektonisch overzicht van de alpiene Betische-Rif-gebergteboog. Het aangegeven Prebeticum en Subbeticum vormen samen de Interne zone. De afkortingen voor de aangegeven hoofdbreuken in het Alicante-Almeria-gebied zijn: AMF = Alhama de Murcia-breuk; PF = Palomares-breuk; CF = Carboneras-breuk. Kaart gebaseerd op meerdere bronnen; deze versie is ontleend aan Meijninger, 2006.



Afb. 3. De zuidelijke randbreuk van het Sorbas Bekken in een wegbocht ca. 1 km ten oosten van Lucainena. Links op de foto de rode kleuren van het Malaga Beticum, met rechts daarvan het breukcontact met sterk verbrokken Tortoon-afzettingen (diepere deel). Wrijfkrassen maken het plaatselijk mogelijk om een dextraal bewegingskoppel te concluderen, zoals ook aangegeven.



De drie hier te bespreken Vera-, Sorbas- en Nijar-bekken geven een mooi beeld van ongeveer 10 miljoen jaar bekken-geschiedenis en wel vanaf het Tortonien (Laat Mioceen) tot nu toe. Het westelijke deel van het Sorbas Bekken wordt ook wel Tabernas Bekken genoemd (afb. 1). Ten tijde van hun vorming waren de bekken onderling verbonden en samen met verder westwaarts gelegen zeestraten vormden de Betische bekken een belangrijke verbinding tussen de wateren van de Atlantische Oceaan en de Middellandse Zee. De Straat van Gibraltar bestond nog niet, die opende zich pas 5,33 miljoen jaar geleden en die opening markeert het begin van het Pliocceen. Het moment van doorbraak betekende voor alle Mediterrane bekken een belangrijke en ook in het sediment zichtbare verandering; deze omslag is internationaal vastgelegd als de tijdgrens tussen het Mioceen en het Pliocceen.

De bekken in Zuidoost-Spanje zijn te beschouwen als doorontwikkelde breukdalen tussen gestaag oprijzende en in grote lijnen antiforme sierra's. Antiforme structuren zijn plooistructuren waarin de lagen vanuit de plooirug in tegengestelde richting hellen. Deels zijn de bekken door breuken begrensd, waarvan de west-oost verlopende en uit de verder westelijker sierra's aankomende Alpujarras-breukzone de belangrijkste is (afb. 1, 3 en 6). Deze breukzone begrenst de noordkant van Sierra Alhamilla. Verder oostwaarts splitst de breuk zich op in een noordelijke en een zuidelijke Gafarillos-tak. De noordelijke sector is niet meer actief, terwijl de zuidelijke zone dat wel is. Deze Gafarillos-

Afb. 4. Een van de vele marmereexploitaties bij Macael. Deze groeve is vanuit het zuiden komend goed zichtbaar en laat zien hoeveel dekterrein afgebouwd moet worden om drie niveaus met de zeer begeerde witte tot grijze marmerte kunnen exploiteren. De dikste marmelaag op de foto is ca. 4,4 m dik.



Afb. 5. De witte Andalusische marmeer werd al toegepast bij de beroemde Leeuwenfontein van het Alhambra en de omringende ranke zuilen.

breuken voegen zich verder oostwaarts bij de Carboneras-breukzone en samen lopen ze uit tegen de NNO-ZZW gerichte Palomares-breuk.

De west - oost gerichte Alhamilla-Gafarillos-breukzones vertonen een rechts-horizontaal verschuivend en transpressief (= ook samendrukkend naast verschuivend) karakter. Onder invloed van deze breuken is het oudere Tortoon van het zuidelijke deel van het Sorbas Bekken, dat aan deze breuken grenst, flink geplooid en gebroken onder invloed van compressie in combinatie met dextrale strike-slip bewegingen en omhoog komen gedurende het laatste Tortonien. Het dwarsprofiel (afb. 6) laat dit (versimpeld) voor de Cantona-rug zien, waar steil opgeplooid Tortoon van het zuidelijke Sorbas Bekken begrensd wordt door de Gafarillos-breuk, die daar de noordrand van het kleinere Cabrera-massief vormt.

De kleinere Sierra Cabrera begon pas gedurende het jongere Messinien als topografisch element omhoog te komen en was de voornaamste reden dat de Sorbas-Vera-bekken geïsoleerd raakten van het Nijar Bekken. Je kunt dit o.a. aantonen op basis van het feit dat de open mariene, vroeg-Messinien Abad mergels in het Sorbas en Nijar Bekken precies overeenkomen, terwijl het jongere Messinien verspoelde gips bevat dat door erosie vanuit het Cabrera-gebied is aangevoerd. En er is nog een aardig argument: langs de noordrand van het Sorbas Bekken ter hoogte van Los Castaños is aan de N340 het contact tussen de Betische

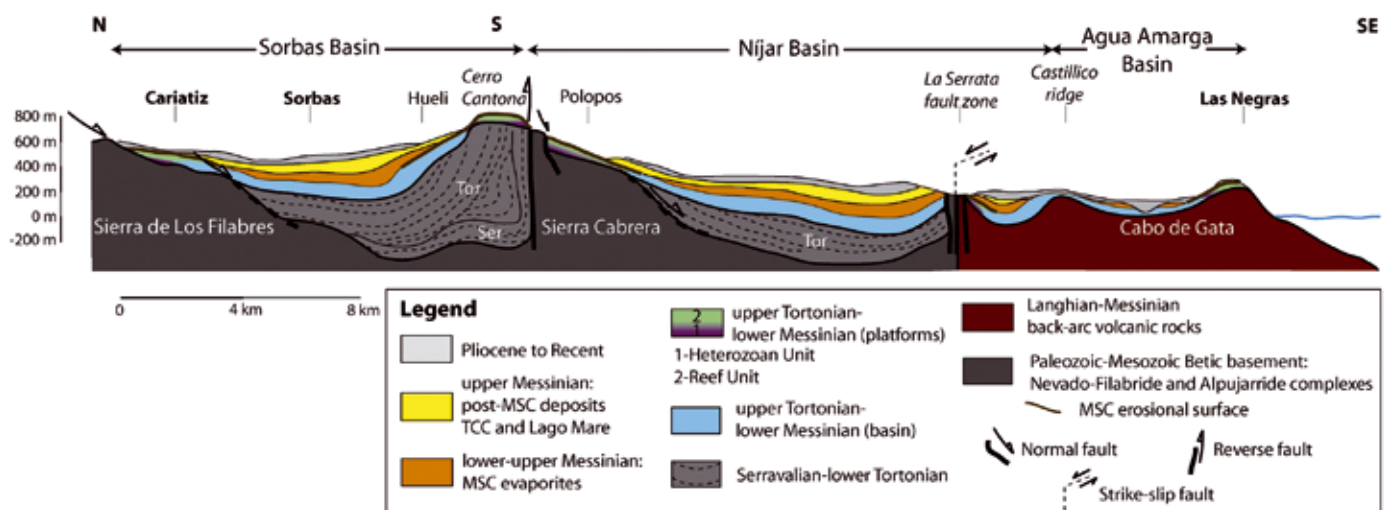
ondergrond en de laat-Tortoon-afzettingen van de Azagador Member mooi ontsloten (afb. 7). Op dit onregelmatige contact volgen grote, marien afgeronde keien. In een bescheiden zeebekken zou de golfslag niet voldoende energie hebben om dergelijke grote keien zo mooi af te ronden. Daarvoor moet de open zee bij stormen de kust kunnen beuken. Kortom, er was toen nog geen zuidelijke bekkenrand in de vorm van Sierra Cabrera, waarvan de noordelijke hellingen niet ver verwijderd zijn.

Kijken naar breuken

De bekken maken deel uit van wat wel de Trans-Alboran Schuifzone genoemd wordt, een breukensysteem dat vanaf Noord-Marokko is te vervolgen in de richting van Alicante (afb. 2) en gekenmerkt wordt door NO-ZW breuken met een sinistrale (linksverschuivende) bewegingscomponent (afb. 8). Structureel geologisch onderzoek toont aan dat de breuken en bijbehoren-

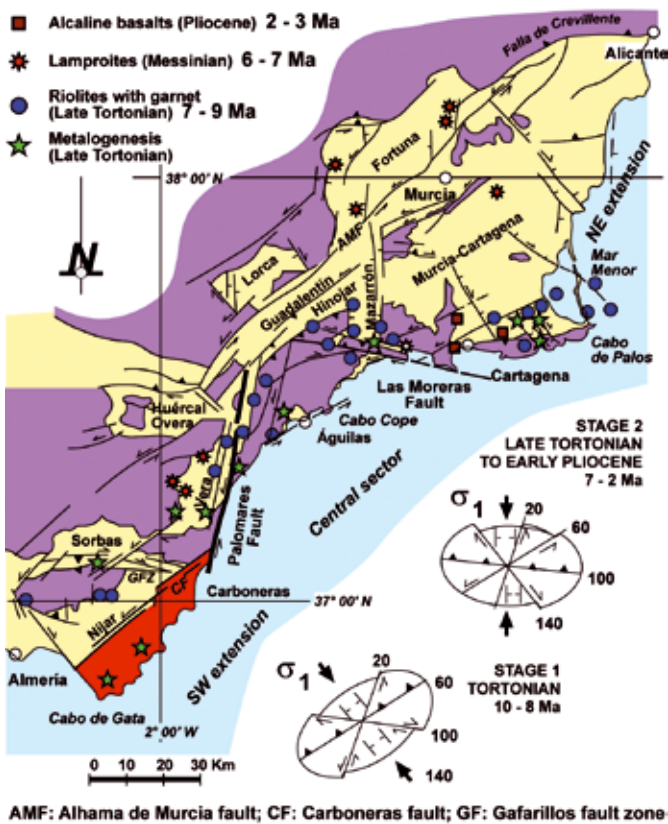


Afb. 7. Stratigrafisch contact met verdrongen kustreliëf tussen Betische schisten van het Nevado-Filabride-dekblad (aan de noordrand van het Sorbas Bekken bij Los Castaños) en het mariene Azagador Member, dat aan de basis een keienlaag is. De keien zijn afgerold in een sterke brandingszone, een aanwijzing dat deze bekkenrand toen nog in rechtstreeks contact stond met de Alboran Zee. Sinds een jaar wordt de ontsluiting door stalen veiligheidsnetten bedekt, maar de situatie is nog goed zichtbaar.



Afb. 6. Vereenvoudigd en overhoogd dwarsprofiel vanaf de noordrand van het Sorbas Bekken bij Cariatiz over de Cantona-rug met net als bij Cariatiz meteen rifbedekking, gevolgd door de Gafarillos-breuk en vervolgens het Nijar Bekken. Ten oosten van de Serrata- (= Carboneras-) breukzone volgen de vulkanische gesteenten van het Cabo de Gata-massief, die op hun beurt bedekt zijn door mariene sedimenten die tot het kleine Agua Amarga Bekken gerekend worden.

de bekkenpatronen vooral bepaald zijn door het enkele malen wijzigen van de richting van regionale compressie. Gedurende het Tortonien zorgde NW-SE plaatsspanning voor dextrale beweging langs de W-O gerichte breuken en juist voor sinistrale verschuiving langs de NO-ZW gerichte hoofdbreuken (zie Stage 1 in afb. 7; afb. 3). Tegen het eind van het Tortonien activeerde



Afb. 8. Tektonisch overzicht van de Betische randbekkens zoals deze zich tussen Alicante en Almeria gevormd hebben als gevolg van doorgaande sinistrale strike-slip bij wisselende NW-ZO en NZ gerichte compressie (naar Montenat en Ott d'Estevou, 1996). Onder invloed van de breuken is op meerdere plaatsen en op verschillende momenten vulkanisme opgetreden. De verspreiding, ouderdom en samenstelling van de verschillende eruptiepunten is aangegeven.



Afb. 9. De Cerro Colorado bij Sopalmo, Sierra Cabrera, is door zijn kleuren en goede zichtbaarheid de meest bezochte ontsluiting van de Carboneras-breuk. De breukzone snijdt hier door het basement met sterk verknepen eenheden, waaronder ook resten van Vroeg-Miocene mergels.



Afb. 10. Wrijfspiegels in de Palomares-breukzone, te zien bij het beklimmen van de Moorse Perulico-wachttoeren uit de 13e-14e eeuw.

draaiing van de drukrichting naar noord-zuid, juist NNO-ZZW sinistrale breuken, waardoor de W-O breuken van horizontaal verschuivend veranderden in breuken met een opschuivend karakter door de noord-zuid gerichte drukrichting. De Palomares-breuk is een belangrijke NNO-ZZW gerichte langsverschuivende breuk. Deze loopt parallel met de kust aan de oostkant van Sierra Cabrera en doorsnijdt vervolgens het oostelijke deel van het Vera Bekken (afb. 1) De breuk was vooral tijdens het Messinien - Vroeg-Pliocene actief. De Carboneras-breuk is nog steeds actief. Waar deze het Nijar Bekken doorsnijdt valt de breukzone op door de vorming van een heuvelrij bestaande uit in de breukzone opgestuwde laagpakketten. De horizontale verschuiving langs de Carboneras-breuk is ten minste 15 km en maximaal 40 km. De Messinien- en Pliocene afzettingen van het noordelijke Nijar Bekken zijn onder invloed van de Gafarillos-Carboneras breukenactiviteit tot soms steile plooien gedeformeerd. De invloed van flinke aardbevingen ten tijde van het latere Messinien is in dit gebied aantoonbaar (Fortuin en Dabrio, 2008). De kustweg van Carboneras naar Mojacar is niet alleen toeristisch aantrekkelijk, het geeft je ook de kans om wat van



Afb. 11. Sedimentaire hellingen (clinoforms) in Messinien-rifkalken bij Cariatiz aan de noordrand van het Sorbas Bekken. Het levende rif groeide destijds dicht onder de zeespiegel en het afgebroken dode rifmateriaal vormde aan de zeekant een natuurlijke helling. Door uitgroei van het rif over het eigen puin is zo een bekkenwaarts hellend kalkpakket gevormd. Op de foto is zichtbaar dat de clinoform naar onderen toe minder steil kan hellen en uitpunten doordat het steeds verder zeewaarts verplaatste hellingmateriaal plaats maakt voor fijnkorreliger bekkensediment. Dit rifsysteem is gedetailleerd bestudeerd om zo goed mogelijk inzicht te krijgen in onder meer reacties van rifgroei op zeespiegelfluctuaties. De vrijwel massieve rifkalk zit bovenin de topografie en is ook deels afgeërodeerd.

de breukactiviteit te zien. Sla bij binnenkomst in het dorpje Sopalmo rechtsaf en volg de onverharde weg door het droge rivierdal richting kust. Na 750 m bereik je de niet mis te lopen bonte kleuren in de helling van de Cerro Colorado (afb. 9). Dit is de plek waar de Carboneras-breuk het metamorfe Cabrera-gesteente doorsnijdt. De bonte kleuren zijn te danken aan het voorkomen van in de breukzone meegesleurde rode silt en grijze en zwarte fyllieten, glimerschisten, etc. De breukzone is

en duinzanden te zien. Deze dekken de Palomares-breukzone af, wat aantoonde dat de verschuiving nu inactief is. Aan de zuidkant van de toren is langs het klif een natuurlijke boog in de rotsen te zien.

Een kijkje in de bekkens

De bekkens blijken nog steeds aantrekkelijk voor onderzoek. Het laatste decennium zijn er weer heel wat aanvullende studies

hier een paar honderd meter breed. De invloed van de Palomares-breuk is iets verderop te zien en wel aan de kust ten zuidoosten van Mojacar. Vervolg vanuit Sopalmo de kustweg richting Mojacar en sla rechtsaf op een rotonde zodra de kust weer bereikt wordt en volg een onverharde kustweg richting Castillo de Macenas. Na ca. 1 km volgt de Perulico-toren, een gerestaurerde moorse wachttoren die beklommen kan worden. Door goed op te letten bij het omhoog gaan vallen diverse breukvlakken met subhorizontale wrijfkassen te ontdekken (afb. 10). Zulke wrijfkassen ontstaan als gevolg van horizontale schuif in de breukzone. Net voor de toren zijn bovendien opgeheven oud-Pleistocene (Tyrrhenien) strand-



Afb. 12. Continentale conglomeraten van het oudste Tortoon, Rambla de Tabernas, afgezet in alluviale puinkegels. De lagen staan bijna verticaal. Boven het hoofd van het studentengroepje rechts is een megaclast met een lengte van 3,40 meter zichtbaar.



Afb. 13. Het droge, mergelrijke badlands turbidietenlandschap dat inspirerend was voor het opnemen van westernfilms. Op de voorgrond de Rambla de Tabernas.

gepubliceerd, zeker waar dit de Messinien-problematiek betreft. De Sorbas-Nijar-bekkens zijn daarvoor dé standaard geworden voor het westelijke Middellandse Zeegebied. Voor meer informatie over de spannende geschiedenis van een Middellandse Zee, die tussen 8 en 6 miljoen jaar geleden langzaam aan de westkant dichtgeknepen wordt met alle gevolgen van dien voor de sedimentatie (indampen en uiteindelijk zelfs deels droogvalen) leze men het eerdere Gea-artikel hierover (Krijgsman en Fortuin, 2007, ook online vrij beschikbaar, zie onder literatuur). De bekkenstratigrafie kan hier slechts uiterst summier behandeld worden. Grofweg valt de 10 miljoen jaar bekkenvulling in te delen in kalkrijke en vooral klastische eenheden, met als uitzondering de tot ruim 100 m dikke gipsafzettingen, evaporieten uit het Messinien. Het merendeel van de kalkige pakketten is langs de ondiepe bekkenranden afgezet als franjerif. Aanvankelijk vooral gedurende het jongere Tortonien langs de noordrand van het Sorbas Bekken en daarna in de vorm van algen- en mollus-

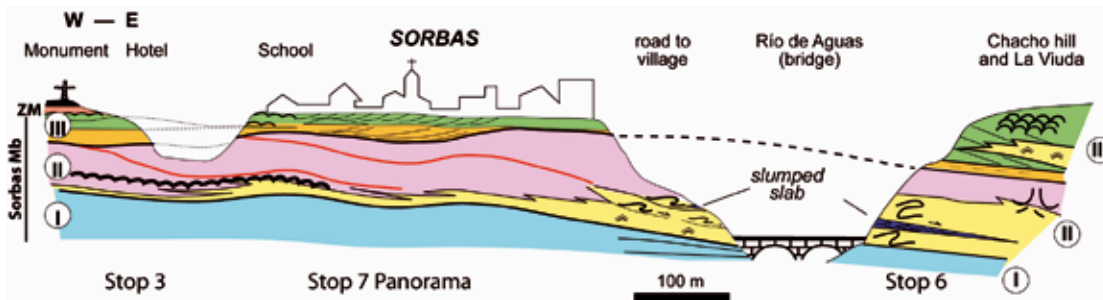
kenrijke, gemengd zandig-kalkige randafzettingen (Azagador Member). Deze gaan lateraal en naar boven toe over in fijnkorrelige, dieper mariene mergels. Deze zogenaamde Abad-mergels zijn rijk aan planktonische en benthonische foraminiferen en behoren tot het nog normaal mariene oudere Messinien. Door hun faunarijckdom en goede correlatiemogelijkheden hebben deze mergels een goed beeld opgeleverd van de wisselende klimatologische- en paleoecologische omstandigheden onder invloed van astronomisch bepaalde cycli. Door verslechterende verbandingen met de wereldzee wordt de

jongere Abad gekenmerkt door de herhaalde aanwezigheid van gelamineerde, sapropelische mergels (mergels verrijkt met organisch materiaal). Zulke lagen werden afgezet onder periodiek warmere en vochtiger omstandigheden, waarbij door zuurstofarmoede op de zeebodem organische resten in het sediment achterbleven. Vanaf deze omslag ontwikkelden zich langs de bekkenranden flinke rifsysteem, gekenmerkt door maar één koraalsoort: *Porites*.

Een rif dat zich langs een bekkenrand heeft gevestigd is naast ecologische factoren ook sterk afhankelijk van het gedrag van de zeespiegel. Een dalende zeespiegel zal ertoe leiden dat het levende rif gedwongen wordt zich verder zeewaarts bovenop het eigen afbraakmateriaal te ontwikkelen. Dat rifpuin (en de daarmee geassocieerde levende organismen, zoals o.a. de kalkalg *Halimeda* bij deze *Porites* riffen) ligt als een soort puinstort voor het rif en kan zeewaartse hellingen bereiken van 30



Afb. 14. Het Gordo-Megabed zoals ontsloten in de Rambla de Tabernas. Op deze plaats is een meegesleurd laagpakket aanwezig (zie de vreemd geplooidde lagen) dat feitelijk een apart sedimentbrok is met een afmeting van 60 x 20 meter. Op de meeste plekken zie je vooral een ongesorteerd mengsel van stenen en mergelballen in een mergelig-kleiige matrix. De basis van de hier ca. 40 m dikke laag is hier niet ontsloten, wel de geleidelijke overgang naar de erboven liggende gewone turbidieten.



Afb. 15. West-oost profiel (naar Roep et al., 1998) door de drie kustsequenties van de Sorbas Member, ontsloten in de steilwanden en langs de weg bij Sorbas. Dit profiel is ongeveer loodrecht op de oriëntatie van de vroegere strandwal. Wandelend van oost naar west langs de N340 kun je de ontwikkeling binnen de tweede sequentie volgen. Eerst zijn er de soms wat geslumpde offshore kleien en zanden (groengele kleur) te zien en geleidelijk gaan deze over in kustnabije afzettingen met duidelijke sporen van golfwerking (roze kleur). Dichter naar de hoofdontwikkeling van de strandwal volgt een niveau met algenlaminaties (stromatoliet: gegolfde laag, zwart). In de derde sequentie onder het dorp zijn (waarschijnlijk) ook scheef gelaagde eolische afzettingen tot ontwikkeling gekomen.

graden. Een dergelijke oorspronkelijke sedimentaire helling wordt een cliniform genoemd. Zulke cliniforms zijn op meer plekken te zien, waarbij die aan de noordrand van het Sorbas bekken bij Cariatiz wel tot de mooiste behoren. De makkelijkste manier om dit fenomeen te zien is door de weg te nemen van Sorbas naar Lubrin (A1101) en dan na een km of 7 scherp rechtsaf te slaan richting Cariatiz, een smalle geasfalteerde landweg. Al gauw volgt het panorama (afb. 11). Dikke klastische eenheden zijn vooral tijdens het Tortoon afgezet. De oudste afzettingen, nabij Tabernas ontsloten, zijn weinig verharde, in alluviale puinwaaiers afgezette en zeer matig afgeronde conglomeraten en grindige zanden (afb. 12). Dit grof-klastische materiaal, vooral bestaande uit toermalijngeis, granaatglimmerschisten en zwarte schisten, werd geleverd vanuit de opkomende Sierra de los Filabres, dus vanuit het noorden. Sierra Alhamilla was nog niet of maar ten dele boven water. Door doorgaande bodemdaling verdrongen de puinkegels en verschenen dieper-waterafzettingen in de vorm van turbidieten (afb. 13). Deze episodisch uit modderig-zandige, turbulente bodemstromingen afgezette zandrijke lagen worden afgewisseld door mergelig-kleiige lagen, gevormd tijdens rustige bezinkingsperiodes. Terwijl een turbidiet binnen een dag afgezet kan worden heeft een even dikke mariene kleilaag doorgaans duizenden jaren nodig. Wie waar dan ook turbidieten bekijkt realiseren zich dat die plotselinge zandaanvoer dus meer uitzondering dan regel was, echte gebeurtenissen binnen het bekken. De dikte van deze Tortoon-serie kan oplopen tot 1-2 km. Vooral de turbidieten van het Tabernas Bekken zijn goed ontsloten en in detail onderzocht. Dit laatste vooral om meer te weten te komen over de geometrie van de zandrijke aanvoersystemen en hun relatie

Afb. 16. Een deel van de tweede sequentie ca. 100 m voor het hotel (afb. 15). De student staat op het golvende oppervlak van de stromatoliet (met groen aangegeven). De afdekkende lagen zijn links op de foto ouder dan rechts, wat wijst op een iets oplopende topografie naar rechts (W) tijdens de sedimentatie. Eveneens is goed te zien dat er als gevolg van de geleidelijke verondieping binnen de sequentie een verticale toename is van de gemiddelde korrelgrootte (van mergelige naar zandige calcarenieten), samen met vergroving van de sedimentaire structuren door golfwerking (onderste helft kleinschalige golfribbels, in snoeren ontwikkeld en naar boven toe grootschalige sets door veel heftiger golfwerking dicht onder de brandingszone).



tot de fijnkorrelige bekensedimenten die vooral buiten de aanvoersystemen afgezet werden. Kennis van de geometrie van zandige diepwatersystemen en hun interrelatie met afdekkende kleipakketten is van essentieel belang voor de olie-industrie en heel wat oliegeologen hebben inmiddels dit terrein bezocht en zo hun inzicht laten bijspijkeren.

Het grappige van dit Tabernas-gebied is dat dit stevig ingesneden

mergel- en zandlandschap met zijn woestijnachtige karakter Wild-West-achtig aandoet en door filmregisseurs in de jaren '60 en '70 werd uitgekozen voor westernfilms. Veel beroemde acteurs, van Clint Eastwood tot Brigitte Bardot, hebben zonder dit te beseffen turbidieten aanschouwd. Klassieke westerns als "The good, the bad and the ugly", of "Once upon a time in the West" zijn er geschoten. Wie dus niet alleen maar turbidieten wil bekijken kan gewoon naar nagebouwde cowboystadjes als "Mini Hollywood" en "Fort Bravo" rijden en zich daar laten vermaken door schietende en paardrijdende acteurs. Onlangs is men zelfs met een themapark aan de slag gegaan. De nu zo in opkomst zijnde Tabernas-woestijn was in de tijd van de filmopnames een afgelegen en armoedige streek. De Amsterdamse promovendus Kick Kleverlaan had er in die jaren zijn onderzoeksterrein (Kleverlaan, 1987). Amerikaanse politiewagens, indianenpoppen en cowboys vrolijkten zijn gezwoeg af en toe op. Een belangrijke waarneming van hem bleek dat het zogenoemde Gordo Megabed – een tot 40 m dikke laag van uiteengevallen en vergleden resten van oudere lagen en keien afkomstig van de bekkenrand – een te karteren laag bleek. Hij kon het over bijna 13 km uitkarteren en zo de nogal monotone pakketten erboven en eronder goed van elkaar scheiden, wat voor de bekkenanalyse van groot nut bleek. Deze Gordo (= dikke) laag (afb. 14) wordt gezien als het resultaat van een enkele

catastrofale gebeurtenis. Een flinke beving vermoedelijk, waarbij een deel van de bekkenrand instabiel werd en afgleed. Het volume van het vergleden materiaal bedraagt naar schatting 6 km³.

Rond Sorbas

Sorbas kent diverse ambachtelijke pottenbakkerijen. Fijnkorrelige pakketten van het niet meer mariene en allerjongste Messinien worden daarvoor in de nabije omgeving geëxploiteerd. Een van onze studenten vond in deze afzettingen de resten van een grote landschildpad, terwijl vertebratenpaleontologen in een kleilaag in de groeve de kiezen van kleine muisachtige zoogdieren vonden en beschreven. Hun vondst bevestigt correlatie met het allerbovenste Messinien (Martin-Suarez et al., 2000). Sorbas is een bijzondere plaats omdat het aan alle kanten omgeven wordt door steile hellingen. Dit komt doordat twee



Afb. 17. Mega-scheve gelaagdheid gevormd door migrerende zandbanken (type 'sandwave') in het dal van de Alias-rivier ten zuidwesten van El Argamason, Nijar Bekken. Voor de duidelijkheid zijn de setbegrenzungen in rood aangegeven. De zichtrichting is naar het zuiden, terwijl de stroming vooral (maar niet alleen) west- en oostwaarts gericht was.

riviersystemen, de grotere Rio de Aguas en de zijrivier Rambla de Cinta Blanca, een soort erosie-eiland met daarop Sorbas achterlieten. Onder het dorp zijn bijzondere Messinien-afzettingen ontsloten (Sorbas Member) in de vorm van drie boven elkaar liggende kustsequenties (afb. 15). Rond Sorbas bevond zich tijdens het jongste Messinien in het bekken een noord-zuid georiënteerde strandwal. Deze begrenste aan de westkant een ondiepe, kleiige lagune en aan de oostkant een strand dat overging naar dieper water. Een Sorbas-sequentie bestaat uit een laagpakket van 10 tot 25 m dik dat aan de basis vooral kleiig is, met dunne zandige tussenlagen, en buiten de kust in wat dieper water is afgezet. Naar boven toe wordt het karakter van de afzettingen minder diep, golfwerking wordt duidelijk zichtbaar en uiteindelijk verschijnen witte, wat oölitische zanden (zandkorrels omhuld met een kalkkorstje) die zelfs wat grofkorrelig worden. Deze markeren met hun vlakke, grote scheve gelaagdheden het strandniveau.

Omdat het Messinien-milieu door het extreme klimaat geen tot heel weinig biota bevatte is het sediment nauwelijks omgewoeld, zodat kleinschalige sedimentaire structuren zoals golfribbels erg mooi bewaard zijn. Al wandelend langs de grote weg voor het dorp langs, vanaf de oostelijke afslag naar het dorp (bij de brug; afb. 15) tot aan Hostal Sorbas bij de hoofd-

toegang tot Sorbas, kun je in de tweede sequentie prachtig de geleidelijke laterale en verticale verondieping volgen met o.a. door golfwerking gevormde sedimentaire structuren, waarbij op een gegeven moment ook algenlaminaties met hun opbollende bovenkant te zien zijn; duidelijke indicatoren voor een zodanig extreem milieu dat bodem begrazende en algen minnende organismen zich er niet kunnen ophouden (afb. 16). Wie tegenwoordig Sorbas zegt moet eigenlijk ook aan de gips-grotten denken. De Cuevas de Sorbas zijn een interessante optie voor hen die graag ondergronds een kijkje nemen. Het gaat om een uitgebreid gangenstelsel door oplossing van gips. Via internet kan men hierover verdere informatie krijgen naast de nodige voorlichting in Sorbas zelf. De grotten liggen in een uniek en beschermd gipslandschap dat als zodanig dan ook beschermd wordt. De weg van Sorbas naar het gehucht los Mo-

linos de Rio Aguas en verderop Nijar slingert erdoorheen.

Pliocene zandbanken

Het Pliocéen van het Sorbas Bekken is vooral aanwezig in de vorm van vooral grindige en conglomeratische rivierafzettingen. Marien Pliocéen is wel goed ontwikkeld in de beide andere bekkens. Omdat de bekkens langzamerhand opgeheven werden zien we een veronddiepende trend in dit Pliocéen, van fossielrijke zandige mergels (dieper shelfmilieu) naar ondiep-mariene, grindrijke afzettingen. Rond Vera en Cuevas de Almanzora zijn deze fossielrijke vroeg Pliocene afzettingen her en der ontsloten. De naam Cuevas wijst op de vroeger veel voorkomende troglodytische woningen (uitgehoid in

de mergel) in het dal van de rivier Almanzora. Het jongste mariene Pliocéen is hier in de vorm van grindige fan-delta afzettingen, bijvoorbeeld aan de westkant van Vera ontsloten.

Persoonlijk reken ik de Pliocene ontsluitingen in het dal van de Alias-rivier in het noordoostelijke Nijar Bekken, een kilometer ten zuidwesten van El Argamason, tot de mooiste. Collega Cristino Dabrio heeft de situatie daar uitgeplozen en zijn onderzoek wijst uit dat het hier een nogal plaatselijk voorkomen van grote zandbanken in het Vroeg-Pliocéen betreft. Net ten noorden van dit punt snijdt de Alias door een kleine, goed ontsloten anticline in vooral Boven-Messinien en een kap met Pliocéen. Aan de zuidkant zijn de zandbanken te zien als grote scheve gelaagdheden, ontstaan door migrerende zandbanken (afb. 17). Om zandbanken te laten ontstaan en migreren, zoals ook in de Noordzee, heb je flinke getijdestromingen nodig, maar die zijn in de bijna afgesloten Middellandse Zee van geen betekenis. Dabrio legt hun aanwezigheid uit als gevolg van de aanwezigheid van een lokale ondiepte (het begin van de plooiing ter plaatse) waardoor periodiek optredende stormen sterke stromingen genereerden: watermassa's die hetzij vanuit het Nijar Bekken richting open zee gestuwd werden dan wel andersom. Je kunt er zowel langs als over de mooie scheve gelaagdheden lopen en als je dat doet let dan ook op de aanwezigheid van

grote kreeftengraafgangen. Overigens is het mariene Pliocen dat tussen de dorpjes Gafares en El Argamason rijkelijk in de heuvels aanwezig is behoorlijk fossielrijk. Naast op schelpen en microfossielen kun je af en toe op een haaiantand of een stukje zeekeobot stuiten.

El Hoyazo vulkaan, Nijar

Net ten oosten van Nijar bevindt zich een beroemd solitair vulkaantje. Tegenwoordig is het vooral bekend onder mensen die graag granaatjes verzamelen en bij mineralogen als de typelokaliteit van het blauwige mineraal cordieriet. Dit vulkaantje is al vermeld door de Romein Plinius de Oude vanwege die aanwezigheid van granaat. Het bijzondere van de Hoyazo is dat het na zijn vorming (gedateerd op 6,3 miljoen jaar) werd omringd

gesteente, waaronder granaat-glimmerschist. Dateringen aan zirkoonkristallen in wijzen op zowel het omhoog komen van gesteenten uit het diepe basement (ouderdommen tussen 2,8 en 1 miljard jaar) als ook een eruptieouderdom van 6,3 miljoen jaar, een ouderdom die overeenkomt met de afzetting van de Abad-mergels in de bekkens (mondelinge mededeling H. Zeck). De vroegere Amsterdamse geoloog Hubert Zeck deed aan deze vulkaan in de jaren '60 van de vorige eeuw zijn promotieonderzoek (promotie in 1968). Ruim tien jaar geleden ontmoette ik hem in Nijar. Hubert bleek vanuit Denemarken, waar hij aan de universiteit als petroloog was verbonden, aanvullende studies te doen naar vulkaanlichamen en hun ouderdommen in de regio. Een persoonlijke rondleiding in deze Hoyazo-vulkaan was uiteraard heel bijzonder. De echte liefhebbers verwijs ik naar een gedegen Spaans overzichtsartikel, dat bij de toeristeninformatie van Nijar te vinden is (Leal Echevarra en Fidalgo Alonso, 2008).



Afb. 18. Het door erosie uitgeholde en cirkelvormige vulkaanlichaam van de Hoyazo. De foto is genomen vanaf de noordelijke rifrand. De kijkrichting is naar het zuidoosten, waar naar de horizon allereerst de kassen van de Campo de Nijar te zien zijn en vervolgens de heuvelrij die de Carboneras Breuk (strike-slip) markeert, met daarachter de hogere rand van het Cabo de Gata-massief. De opwelling rechts achterin de Hoyazo is een restant van de kraterpijp, waarin bij ijverig zoeken en hameren nog steeds het mineraal cordieriet te vinden is. De ingang tot de Hoyazo is het scherpe dal links achter de meer centraal gelegen heuvel, restant van een tweede pijp.

door een Laat-Messinien franjerif. Dit rifcomplex is grotendeels gedolomitiseerd, maar wie vanaf de snelweg afslaat naar Nijar kan ter hoogte van het zwembad aan de rand van het dorp de rif-clinofom goed zien. De eigenlijke rifcomplexen zijn daar echter grotendeels afgeërodeerd, maar aan de noordrand van de krater zijn wel degelijk *Porites*-resten en daarop liggende bolvormige algenlaminaties en zandige afzettingen van het nog jongere Messinien te vinden. De voorplaat geeft een blik op Nijar en een afzetting uit het Boven-Mioceen.

Het vulkaanlichaam zelf is nu door sterke erosie van de vrij zachte granaathoudende daciet uitgehold (afb. 18) en overall waar water heeft gestroomd liggen slierten bijgespoelde granaten. De meesten zijn niet erg fraai, maar er zijn nog altijd gave exemplaren te vinden. Vroeger ging het vooral om het vinden van de edele exemplaren, maar in de vorige eeuw zijn de granaten industrieel geëxploiteerd als grondstof voor schuurpapier en zijn de mooie en grote exemplaren schaars.

Het vulkaanlichaam bestaat feitelijk uit het restant van een kraterpijp (deze is nog deels te zien als een centraal gelegen heuveltje) plus uitgeworpen blokken en as. Deze waren tijdens de eruptie zeer heet en rolden de helling af en explodeerden. Je ziet geen vulkanische bommen, maar verkitte hoekige brokken. Ook kwamen uit de diepte brokken mee van het omringende

Sierra del Cabo de Gata

Het meest zuidoostelijke stukje Spanje, met kaap Cabo de Gata als meest prominente rotspuntje, is een mini-vulkanische provincie van ruwweg 10 bij 40 km. Klein, maar toch het grootste vulkaanpark van Spanje. Het woord 'gata' suggereert dat deze kaap naar een kat is genoemd, maar het woord is een verkorting van 'agaat'. Er zijn hier vooral in vroeger tijden agaten aangetroffen. De sinistral verschuivende Carboneras-breuk (ook wel Serrata-breuk genoemd) scheidt deze sierra van het aangrenzende Nijar Bekken, dat daar volgebouwd is met tuinbouwkassen. Gelukkig is een groot deel van het Cabo de Gata-gebied inmiddels tot natuurgebied en Europees Geopark verheven. Door de kale begroeiing (gemiddeld valt er minder dan 200 mm regen per jaar) en de vaak rode verweringsaarde heeft het gebied een heel eigen karakter. De kust is bovendien op veel plaatsen aantrekkelijk (achterplaat, afb. 19).

Het vulkanisme in het Cabo de Gata-gebied was van het calc-alkaline type, dat wil zeggen dat er een hogere concentratie van calcium (CaO) in relatie tot alkalische elementen (Na₂O/K₂O) in het magma aanwezig was. Het gaat om andesitische gesteenten, waarbij pyroxeenrijke andesieten en vooral dacieten het meest voorkomend zijn. Er zijn twee periodes van vulkanisme geweest. Het eerste vulkanisme deed zich voor tussen 15 en 10 miljoen jaar geleden en de tweede fase was ongeveer 9 – 7,5 Ma geleden (tijdens het Tortonien). Het meeste vulkanisme vond op de zeebodem of dicht bij de zeespiegel plaats. Vooral op en tussen de vulkaantjes is het tot afzetting van mariene sedimenten gekomen. Af en toe waren er Stromboli-type uitbarstingen. Ook pyroklastische afzettingen komen voor. De meest bijzondere zijn ignimbritische (=gloedwolk) erupties, die ook de calderarand van Rodalquilar hebben gevormd.

De Rodalquilar-caldera is een ovale, nog deels in het terrein zichtbare, 4 bij 8 km grote instortingsstructuur. De opvulling ervan bestaat uit twee pyroklastische eenheden, elk het gevolg van een uiterst explosieve eruptie, gevolgd door instorting met calderavorming. Ignimbrietten zijn daarbij uitgestroomd naar zowel het noorden, richting Las Negras, als het zuiden, waar ze een groot deel van het La Rellana-plateau vormen. In tweede instantie intrudeerden andesietkoepels. Dit veroorzaakte in-



Afb. 19. Playa del Monsul heeft klifwanden die gevormd worden door submariene uitgestoten vulkanische breccies. Zo'n zogenaamde hyaloklastische breccie ontstaat bij het snelle, explosieve afkoelen van hete lava onder water. De Monsul-voorkomens zijn gekoppeld aan kleine eruptiepunten die vlak achter het strand te vinden zijn. De breccie bestaat uit hoekige brokken van andesitische samenstelling, gemengd met een lichtgrijze tot witte matrix van as en lapilli-fragmenten (glasschilfers, pyroxeen en plagioklaas). Zie ook de overzichtfoto van het strand op de achterplaat.

tensieve hydrothermale omzetting van de vulkanieten, waarbij goudhoudende alunieten gevormd werden. Deze zijn een tijdlang vooral in dagbouw ontgonnen. Het goud van Rodalquilar wordt niet meer geëxploiteerd, maar in 1964 werd er nog 700 kg goud geproduceerd, waarvoor maar liefst 50.000 m³ gesteente werd afgegraven. Vanuit Rodalquilar is het voormalige winningsterrein te bezoeken. In een klein museum op het terrein en bij de overgebleven installaties wordt uitleg gegeven. Omdat het vulkanisme in zee plaatsvond, zijn hier en daar mariene afzettingen te zien die op en tussen de vulkaanlichamen zijn afgezet. Ook hier komen de franjeriffen uit het Messinien voor. Vooral rond het kustplaatsje Agua Amarga is zoveel Neogeen aanwezig dat het als een afzonderlijk Agua Amarga Bekken wordt onderscheiden. Een van de leukste plekken om de iets diepere mariene afzettingen te zien is El Playazo, terwijl de kust bij Playa del Monsul (achterplaat, afb. 19) ook zeer bijzonder is door recente duinvorming en kliffen met vulkanische breccies.

Onder auspiciën van het gouvernement van Andalusië is een geologische gids voor Cabo de Gata-Níjar Geopark verschenen, dat via internet te downloaden is (Villalobos Megia, 2007). Wie meer aandacht aan dit interessante en fraaie gebied wil besteden - van vulkanisme en ertswinning tot duinvorming - kan daar terecht.

Alle foto's werden door de schrijver gemaakt. Bevriende collega prof. Cristino Dabrio (Madrid) leverde de kleurplaten voor afb. 6 en 8, waarvoor dank.

Alle foto's werden door de schrijver gemaakt. Bevriende collega prof. Cristino Dabrio (Madrid) leverde de kleurplaten voor afb. 6 en 8, waarvoor dank.

Literatuur

- Biermann, C., 2007. De Betische Cordilleren van Zuid-Spanje. *Gea*, jaargang 2007 nr. 3, p. 78-81. Als pdf te downloaden via de link: <http://natuurtijdschriften.nl/record/415439>
- W. Krijgsman & A.R. Fortuin, 2007. Zout en gips in het Middellandse Zeebekken: De saliniteitscrisis van het Messinien (Mioceen). *Gea*, jaargang 2007 nr. 3, p. 70-77. Als pdf te downloaden via de link: <http://natuurtijdschriften.nl/record/415438>
- Fortuin, A.R. and Dabrio, C.J., 2008. Evidence for Late Messinian seismites, Níjar Basin, south-east Spain. *Sedimentology*, 55: 1595-1622.
- Kleverlaan, K., 1987. Gordo Megabed: A possible seismite in a Tortonian submarine fan, Tabernas Basin, Province Almería, Southeast Spain. *Sedimentary Geology*, 51: 165-180.
- Krijgsman, W. en Fortuin, A.R., 2007. De saliniteitscrisis van het Messinien (Mioceen): zout en gips in het Middellandse Zeebekken. *Gea*, 40 (3): 70-77.
- Leal Echevarra, G. en Fidalgo Alonso, J.M., 2008. El Hoyazo de Níjar. *Axarquía, Revista del Levante Almeriense*, 13: 65-88.
- Martín-Suárez, E., Freudenthal, M., Krijgsman, W. and Fortuin, A.R., 2000. On the age of the continental deposits of the Zorerras Member (Sorbas Basin, SE Spain). *Geobios*, 33: 505-512.
- Mather, A.E., Martin, J.M., Harvey, A.M., Braga, J.C. (eds.), 2001. *A Field Guide to the Neogene Sedimentary Basins of the Almería Province, South-East Spain*. IAS Field Guide, Blackwell Science, p. 200-211.
- Meijninger, B.M.L., 2006. Late-orogenic extension and strike-slip deformation in the Neogene of southeastern Spain. PhD thesis, *Geologica Ultrajectina* 269, 179 p.
- Montenat, C., Ott D'estevou, P., 1996. Late Neogene basins evolving in the Eastern Betic transcurrent fault zone: an illustrated review. In: Friend, P.F., Dabrio, C.J. (Edit.) *Tertiary Basins of Spain: The stratigraphic record of crustal kinematics*. Cambridge University Press, *World and Regional Geology Series* 6: 372-386.
- Platt, J., Behr, W.M., Johannesen, K. and Williams, J.R., 2013. The Betic-Rif Arc and its orogenic hinterland: a review. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 41: 313-357.
- Villalobos Megia, M. (editor) 2007. *Geology of the Arid Zone of Almería, SE Spain – an educational field guide*. N.B. Als pdf-bestand te downloaden via de Junta de Andalucía, bijv. via <https://www.yumpu.com/en/document/view/3033862/of-cabo-de-gata-junta-de-andalucia> of google op "Geology of the Arid Zone of Almería, Southeast Spain, an educational guide" en "Junta de Andalucía".
- Roep, T.B., Dabrio, C.J., Fortuin, A.R., Polo, M.D., 1998. Late highstand patterns of shifting and stepping coastal barriers and washover-fans (late-Messinian, Sorbas Basin, SE Spain). *Sedimentary Geology*, 116: 27-56.

Bij de voorplaat:

Een winterfoto van het vriendelijke Andalusische stadje Níjar aan de zuidooststrand van Sierra Alhamilla. Hogerop ligt het dorpje Huebro, dat het zo belangrijke water levert. Op de voorgrond mariene Torton-mergels (Boven-Mioceen) met zandige tot grindige tussenlagen, afgezet vanuit troebelingsstromen. Voordat het grind in de laag achter het verkeersbord werd afgezet, zorgde een turbulente onderstroom voor het uitschuren van een geultje, dat vervolgens werd opgevuld.

Bij de achterplaat:

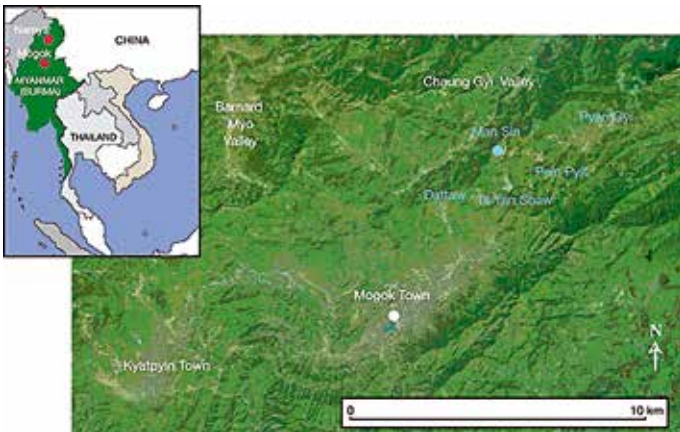
Het strand van Monsul wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van kliffen van submariene uitgestoten, vulkanische agglomeraten (breccies), die gekoppeld zijn aan kleine eruptiepunten, die vlak achter het strand te zien zijn. De breccie bestaat uit hoekige brokken van andesitische samenstelling, ingebed in een lichtgrijze tot witte matrix van as en lapilli-fragmenten (glasschilfers, pyroxeen en plagioklaas).

Op jacht naar de Jedi-spinel

A.J. (Tom) van Loon

Geologisch Instituut, Adam Mickiewicz University, Poznan, Polen
e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Lang niet alle geologische artikelen zijn prettig leesbaar. Gelukkig worden soms wél goed leesbare artikelen gepubliceerd, die bovendien ook nog interessant zijn. Eén daarvan trof ik onlangs aan in 'Gems & Gemology' (Edelstenen & Edelsteenkunde) 50 (1), blz. 46-57. Dit tijdschrift van het Gemological Institute of America publiceerde het artikel onder de titel: *Hunting for Jedi spinels in Mogok* (vrij toegankelijk op www.gia.edu/gems-gemology/spring-2014-pardieu-jedi-spinels-in-mogok). In overleg met de auteur van het artikel en de redactie van G&G volgt hier een sterk ingekorte samenvatting. Het is het verhaal van een bijzondere jacht.



Afb. 1. Het gebied rondom Mogok, met de locaties van enkele bekende vindplaatsen van edelstenen, en het 'mijn'gebied van Man Sin, waar de mooiste Jedi-spinellen vandaan komen.

Een verrassende stage

In 2001 volgde Vincent Pardieu, de auteur van het artikel, een stage in Myanmar (het voormalige Birma) in het kader van zijn studie edelsteenkunde. De stageplaats dankte hij aan een handelaar in edelstenen uit Mogok (afb. 1). Vincent woonde in bij een Birmaanse familie, waar op een gegeven dag een handelaar in edelstenen uit Bangkok kwam om hem iets bijzonders te laten zien. Het bleken kristallen van spinel te zijn met een zeer heldere roze-rode kleur. Ze konden in schoonheid zeker met robijnen wedijveren.



Afb. 2. Spinel uit Man Sin (links en midden) en Namya is even helder, maar de stenen uit Man Sin hebben hun kristalvorm meestal behouden, terwijl die uit Namya meestal zijn afgerond.

Op Vincents vraag waar ze bij Mogok (een bekende vindplaats van spinel) waren gevonden, kwam een verrassend antwoord: ze kwamen uit Namya, waar zowel robijn als spinel wordt gevonden. In december van het jaar ervoor had daar nog een ware 'edelsteenrush' plaatsgevonden. Terwijl de spinellen uit Mogok gewoonlijk een mooie kristalvorm bezitten, zijn de meeste stenen uit Namya echter secundair (d.w.z. getransporteerd door water), waardoor er veel meer afgeronde exemplaren voorkomen (afb. 2). De stenen uit Namya hadden nóg een bijzondere eigenschap: in tegenstelling tot de meeste kristallen (ook die van hoge kwaliteit) hadden sommige van deze spinellen geen donkere 'schaduw' van binnen. De naam 'Jedi-spinel' dankt de steen aan de destijds populaire films van Star Wars, waarin de *Jedi* voorkomen die de 'donkere kant' moeten proberen te vermijden.

Speurtochten zonder en mét resultaat

Vincent kon zijn geluk niet op toen hij in 2002 de opdracht kreeg van een handelaar in edelstenen uit Bangkok om Jedi-spinel te gaan zoeken. Samen met deze handelaar ging hij op pad om een Jedi-spinel uit Namya te pakken te krijgen van minimaal 10 karaat (1 karaat is 0,2 g). Waar moesten ze gaan zoeken? Geruchten leidden hen naar Mogok, waar heel soms Jedi-spinellen waren gevonden. Het lukte hen echter niet Mogok te bereiken omdat deze plaats voor buitenlanders niet toegankelijk was. Ook Namya leverde niets op zodat deze eerste zoektocht geen resultaten opleverde. Maar Vincent was voorgoed gefascineerd door deze speciale stenen.

In 2013 werd Mogok weer toegankelijk voor buitenlanders. Een collega van Vincent, Lou-Pierre Bryl, bevestigde dat er nieuwe vindplaatsen waren in twee gebieden nabij Mogok waar al eerder prachtige spinellen waren gevonden. Daartoe behoorden ook enkele exemplaren waarin een Davidster gegraveerd leek (afb. 3), maar die volstrekt natuurlijk was: de inkepingen danken hun vorm aan de natuurlijke splijtvlakken!



Afb. 3. Een spinel uit het gebied van Pein Pyit/Pyant Gyi, ten oosten van Mogok. De Davidster is natuurlijk: de uithollingen volgen splijtvlakken.

Vincent was niet meer te houden. In september 2013 vertrok hij naar Birma om daar met Lou-Pierre opnieuw te gaan zoeken. De handelaar U Ko James, die in Mogok bekend stond als de 'spinel-koning', sloot zich bij hen aan en nam ze mee naar de Pan Shan edelsteenmarkt, waar binnen enkele minuten een wonder geschiedde.

Jedi-spinellen!

Het was een van de contacten van U Ko James die met twee



Afb. 4. De drie prachtige kristallen van Jedi-spinel die Vincent op de Pan Shan edelsteenmarkt in Mogok te zien kreeg. Let op de bijzondere en voor Jedi-spinellen karakteristieke roze-rode kleur.

kleine plastic zakjes kwam aanzetten. Ze bevatten drie Jedi-spinellen met een diepe, verzadigde kleur, en zonder 'schaduw'. In tegenstelling tot het overgrote deel van de Jedi-spinellen uit de omgeving van Namya waren dit geen afgeronde stenen, maar hadden ze hun perfecte kristalvorm nog (afb. 4). Op een andere edelstenenmarkt vonden zij spinellen van vooral lage kwaliteit, maar ook belangrijke informatie over actuele vindplaatsen en de karakteristieken van de daar gevonden spinellen.



Afb. 5. De 'klassieke' spinel uit de omgeving van Mogok (rechts) is rood; de spinellen uit de mijn bij Man Sin (links) zijn echter roze-rood.

U Ko James voorzag Vincent van nog meer relevante informatie. Weliswaar bleken de meeste roze-rode spinellen uit de buurt van Namya te komen, maar ook waren er enkele exemplaren gevonden bij Man Sin in de omgeving van Mogok, waar ook diverse vindplaatsen voorkomen. Deze leveren spinellen op met uiteenlopende karakteristieken (afb. 5). De roze-rode exemplaren uit Man Sin bleken zeldzaam: U Ko James had in de afgelopen jaren nog geen honderd Jedi-spinellen uit die vindplaats gezien met een gewicht van 10 karaat of meer, en zelfs nog geen 10 met een gewicht van meer dan 20 karaat. De meeste wogen minder dan 1 karaat. Hij toonde twee exemplaren, en het leken Vincent de mooiste spinellen die hij ooit had gezien. Niet onterecht, want de spinellen van Man Sin werden als nog mooier (en dus ook duurder) beschouwd dan de veel bekendere exemplaren uit Namya. Man Sin lokte...

De mijnen van Man Sin

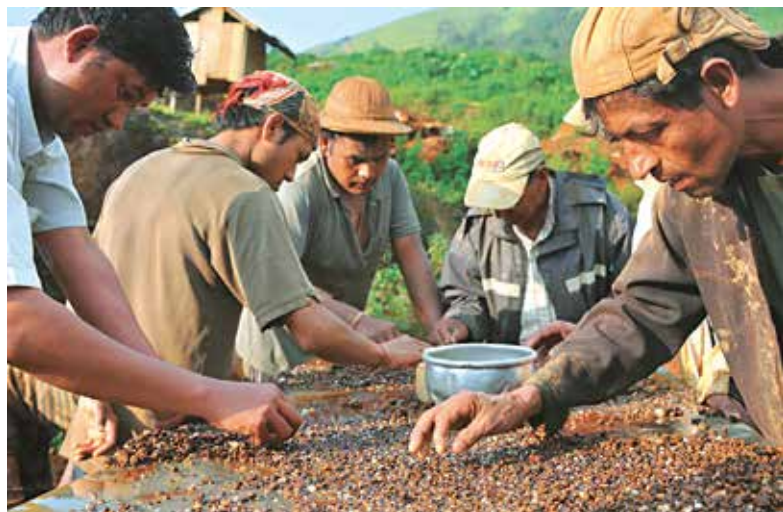
Man Sin (dat 'heldere spiegel' betekent) ligt in een karstgebied. Drie mijngebieden produceren vooral robijn, een andere (afb. 6) voornamelijk spinel. Het werk wordt verricht door zo'n twintig arbeiders die het sediment, vrij recent door erosie van de steile



Afb. 6 Het mijntje bij Man Sin.

rotswanden van een nauw dal vrijgekomen, uitgraven, vervolgens met waterkanonnen schoonspuiten, machinaal wassen en uit het zo verkregen grind de edelstenen selecteren (afb. 7). Hoewel nabij Mogok de meeste edelstenen worden gevonden door grindpakketten te wassen, is deze manier van het wassen van veel modderiger bodemsediment daar ook niet ongebruikelijk.

De eerste Jedi-spinellen werden hier ongeveer twaalf jaar geleden gevonden. Dat leverde in het eerste jaar onverwacht een hoeveelheid prachtig gekleurde, maar kleine spinellen op.



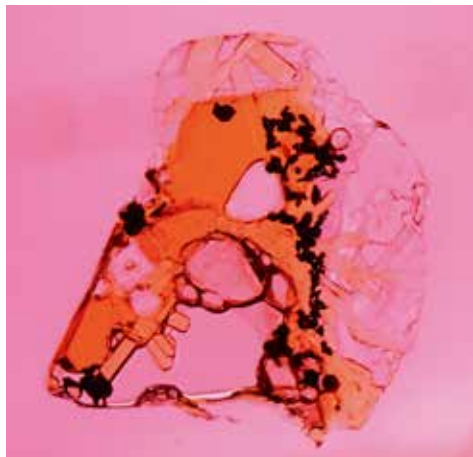
Afb. 7. Na een lange werkdag selecteren arbeiders de spinellen uit via wassen verkregen grind uit de mijn van Man Sin.

Sindsdien is de productie onregelmatig. Soms wordt er een hele week niets gevonden, maar dan kan de volgende dag één of zelfs twee kilo van behoorlijke kwaliteit gevonden worden. Alleen in het noordelijke deel van de mijn worden Jedi-spinellen gevonden; in het oostelijk deel komen alleen de meer rode, donkerder 'klassieke' spinellen voor en in het zuiden wordt vooral

robijn aangetroffen. Vincent en zijn metgezel konden het met eigen ogen aanschouwen: tijdens hun bezoek werden enkele Jedi-spinellen gevonden, enkele robijnen, wat groene toermalijn en talrijke donkerpaarse spinellen met een blauwige glans. De stenen waren echter niet te koop.

Eigenschappen van de Jedi-spinellen

Weer terug in Mogok bezochten ze de eigenaars van de mijn, waar ze weer enkele Jedi-spinellen te zien kregen. Ze waren - in tegenstelling tot de meeste spinellen uit Namya - niet of nauwelijks verweerd. Maar de spinellen waren wel relatief klein:



Afb. 8. De spinellen van Man Sin hebben karakteristieke oranjekleurige insluitels die uit meer fasen (vaste stof, vloeistof, gas) bestaan, die niet uit spinel van elders bekend is. Microfoto (vergroting 100x) van Jonathan Muyl.

volgens de mijnwerkers hadden ze nooit Jedi-spinellen van meer dan 5 karaat gevonden. Maar dat hoorde mogelijk wel bij een spel: de mijnwerkers in Mogok hebben het nooit over zulke grote stenen als de handelaren...

In Bangkok werden de verkregen stenen nader geanalyseerd. Het bleek dat ze alle, hoewel op verschillende plaatsen gekocht (Mogok, Namya, Man Sin), gelijke eigenschappen hadden die niet vaak in andere spinellen voorkomen, zoals oranje insluitels (afb. 8) waarin diopsied, pyriet, zwavel en dolomiet samen voorkomen. Ze hadden verder dezelfde samenstelling wat betreft de sporenelementen waardoor deze stenen gemakkelijk te onderscheiden zijn van andere spinellen, waar ook ter wereld. Verder bleek dat de Jedi-spinellen uit Man Sin en Namya een veel lager ijzergehalte hebben dan de stenen uit Mogok, maar ook vergeleken met spinellen uit bijvoorbeeld Vietnam, Tanzania en Tadzjikistan. Ook de niet-Jedi-spinellen uit Mogok blijken meer ijzer te bevatten dan de Jedi-spinellen uit hetzelfde gebied. Verder blijkt dat de rode spinel uit dit gebied zijn kleur vooral dankt aan verontreiniging met chroom. Zo leverde de 'jacht op de Jedi-spinel' niet alleen bijzondere stenen op, maar ook enkele nieuwe wetenschappelijk interessante gegevens.

Dankwoord

Ik dank de redactie van 'Gems & Gemology' voor hun medewerking aan de bewerking van het artikel van Vincent Pardieu tot deze samenvatting. Ook dank ik zowel de redactie als de auteur, Vincent Pardieu, voor zijn toestemming om enkele van de oorspronkelijke foto's te mogen gebruiken.

Copyright van alle afbeeldingen: Gemological Institute of America

Boekbespreking

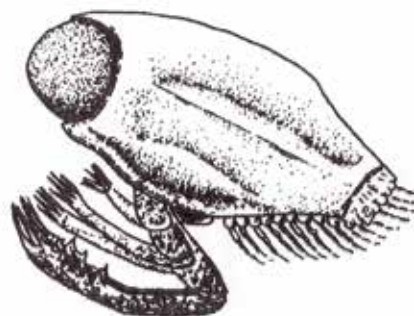
De Geschiedenis van het Leven, deel 8d, Jura, Arthropoda (behalve Insecta), door J.F. Geys, uitg. Vlagast v.z.w. 2014, 208 pag., 14,7 x 21 cm, 177 zw/w pentekeningen, 320 g. ISBN 978-90-809140-8-7. Prijs € 16,50; porto Ned. € 8,-, België € 2,50. Voor bestelling zie www.vlagast.be.

Dit is het twintigste deel van de serie en het vierde deel over de Jura-periode. Eigenlijk het vijfde, want deel 8 bestaat uit twee banden. De voorgaande delen verschenen doorgaans een jaar na elkaar, nu duurde het drie jaar. Gezien de ijver voor zijn levenswerk is dit een aanwijzing dat prof. dr. J.F. Geys bijzonder veel werk moest verzetten om tot een afronding van dit omvangrijke hoofdstuk van *De Geschiedenis van het Leven* te komen. Die kennis van het fyllum Arthropoda is door vondsten in nieuwe vindplaatsen, en uitgebreid – ook Chinees en Russisch – onderzoek, sterk toegenomen. Van diverse groepen is de aanwezigheid nu ook in het Jura aangetoond. Over de inpassing in de bestaande taxonomie is soms nog geen algemene overeenstemming bereikt, zodat de auteur dan een keus moest maken.

Arthropoda – de stam van de geleedpotigen – waartoe nu meer dan de helft van de diersoorten behoort, hadden ook in de Jura-periode al een uitgebreide radiatie. Al komt de meest soortenrijke groep, die van de insecten, in dit deel nog niet aan bod, de variatie aan vormen van de twee andere belangrijke groepen: Crustacea en Chelicerata, was toen ook al aanzienlijk. "Op enkele uitzonderingen na zijn fossielen van de meeste soorten erg zeldzaam en moeilijk te prepareren", en: "Dit boek is geen determinatiewerk. Het is enkel de bedoeling een overzicht te schetsen van wat er in het Jura geleefd heeft". Zo geeft Geys zelf de rijkdom én de beperkingen van zijn boek aan. Door de uitgebreide onderverdeling in subfyla, klassen, subklassen, superorden, enzovoort, waarvan de belangrijkste vertegenwoordigers met voorbeelden behandeld en afgebeeld zijn, kan bij elke groep niet te lang worden stilgestaan. De korte maar trefzekere beschrijvingen hebben ook in dit deel weer tot een immense

hoeveelheid details geleid en veelal vreemde, nooit vermoede wezens ten tonele gevoerd (afb. 1). Maar we komen toch ook bekenden tegen. Bij de supergroep van de Crustacea (schaaldieren) zijn dat bijvoorbeeld de ostracoden, zeepokken, eendenmossels, watervlooien, maar vooral de Decapoda (tienpotigen): kreeften, krabben, Anomura (zoals heremietkreeften) en garnalen. De Decapoda beslaan maar liefst met hun 52 pagina's een kwart van het boek. De andere supergroep is die der Chelicerata. 'Levende' fossielen als Xiphosura leveren steeds de bekende plaatjes van de degenkrab in fossielenboeken op, maar ook schorpioenen, hooiwagens, teken en spinnen behoren ertoe. Myriapoda (duizendpoten) zullen we niet gauw in Jura-gesteenten tegenkomen, maar ze waren er al wel. Arthropoda zijn een bloeiende, perspectiefrijke diergroep, die in de Jura-tijd een belangrijke groei doormaakte. Dit deel 8d van *De Geschiedenis van het Leven* geeft er een verhelderende, zo precies mogelijk weergave van. Professor Geys heeft weer eens baanbrekend werk gedaan om dit alles in onze taal te boekstaven. De volledige reeks van *De Geschiedenis van het Leven* van J.F. Geys is te vinden op de website www.vlagast.be. Daar staan ook de nog te verwachten Jura-delen vermeld.

Joke Stemvers



Afb. 1. *Dollocaris ingens* Van Straelen 1923, 19 cm, reconstructie, Callovien (Midden-Jura), La Voulte-sur-Rhône, Ardèche, Fr. Figuur 22.47 uit het besproken boek.

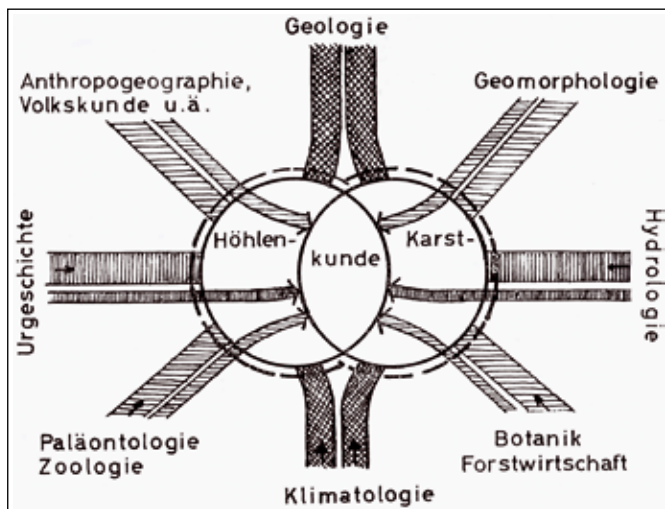
Speleogenese: het ontstaan van grotten.

Deel III: Karstverschijnselen aan de oppervlakte

door Herman de Swart
hermandeswart@casema.nl

In de twee voorgaande artikelen over speleogenese (resp. in Gea december 2013 en maart 2014) heb ik karstgrotten en grotten in ander gesteente dan kalk behandeld. Maar speleologen bestuderen behalve de grotten ook de oppervlakte van gebieden waar grotten voorkomen, zoals karstgebieden.

De vertaling van speleologie in het Duits is 'Karst- und Höhlenkunde'. Dat geeft beter aan wat de speleologie bestudeert, namelijk de studie van zowel grotten als karstverschijnselen. Want niet alle grotten zijn karstgrotten, zoals we in de vorige artikelen hebben kunnen lezen, en wat speleologen onderzoeken beperkt zich niet tot grotten alleen.



Afb. 1. Speleologie ('Karst- und Höhlenkunde') als multidisciplinaire wetenschap (Trimmel, 1968).

Trimmels Höhlenkunde uit 1968 geeft daarvan een overzichtelijk schema (afb. 1): de cirkel links geeft het onderzoek van alle grottypen aan, de cirkel rechts de studie van karstverschijnselen (zowel ondergronds als aan het aardoppervlak). Daar waar beide cirkels overlappen, is het onderzoek van karstgrotten gesitueerd. De pijlen om de cirkels geven aan welke wetenschappen gezamenlijk de speleologie of Karst- und Höhlenkunde vormen. Daar mogen er overigens nu, bijna vijftig jaar later, wel een aantal aan worden toegevoegd, zoals de studie van bacteriën (micro(geo)biologie), astronomie (vanwege de aanwezigheid van grotten op andere planeten en manen) maar vooral de studie van 'systeem aarde', waarbij de diverse disciplines veel meer als onderling afhankelijk worden gezien. De koolstofcyclus wordt in die benadering bijvoorbeeld zowel vanuit de geologie, de hydrologie, de biologie als de astronomie bestudeerd. In dit artikel geef ik een overzicht van de 'bovengrondse' karstverschijnselen.

Enkele begrippen

Misschien is het goed nog even stil te staan bij de verschillende benamingen waarmee het onderzoek van karst en grotten wordt aangegeven. De studie van karstverschijnselen is duidelijk een onderdeel van de geologie en wordt dan ook met de term *karstgeologie* aangeduid. De Fransen hebben de studie van de karst tot een min of meer zelfstandig terrein van onderzoek bevorderd

en spreken van *karstologie*. In het Engels wordt soms de term *karst science* gebruikt.

Als het de landschapsvorming betreft kunnen we het onderzoek naar karst ook onderbrengen bij de geomorfologie; we spreken dan van karstgeomorfologie. Dit is de beschrijving van de verschillende vormen in het karstlandschap. In de hydrologie of karsthydrologie ligt het accent op de studie van de ondergrondse waterlopen en het ontstaan van grotten. Bestuderen we mineralen in grotten dan noemen we dit speleomineralogie. Het totaal van deze (geologische) wetenschappen wordt ook wel met de term *fysische speleologie* aangeduid, hoewel speleologie meer omvat dan alleen de studie van geologische processen. Ook biologie (zoölogie, botanie en microbiologie), paleontologie, archeologie, klimatologie, astronomie en zelfs psychologie hebben bijgedragen tot de vorming van wat nu de (wetenschappelijke) speleologie inhoudt. Die disciplines krijgen dan vaak het voor- of tussenvoegsel speleo – bijvoorbeeld biospeleologie. Ook het (economisch en sociaal) gebruik van grotten, culturele speleologie (zoals grotten in de beeldende kunst en literatuur) en de ontwikkeling van technieken voor grotexplooratie worden tot de wetenschappelijke speleologie gerekend. Speleologie is ook een fascinerende sport, al is de naam daarvoor misleidend (logos betekent immers kunde, wetenschap) en er zou beter, naar analogie van bergsport, van grottsport gesproken kunnen worden. In het Engels zijn er wel verschillende woorden voor: *speleology* voor de wetenschap, *caving* of *potholing* voor de sport. Ook in het Amerikaans is er onderscheid: *speleology* en *spelunking*. In het Nederlands wordt voor de sport meestal 'grotten' als werkwoord gebruikt (naar analogie van fiets/fietsen is er grot/grotten).

Cryptokarst en paleokarst

In de twee voorgaande artikelen in Gea is reeds een groot aantal begrippen uit het onderzoek van grotten en karst aan de orde geweest. In dit artikel over oppervlaktekarst wil ik daar nog twee belangrijke begrippen aan toevoegen: cryptokarst en paleokarst.

Cryptokarst, letterlijk 'verborgen karst', is het ontstaan van karstfenomenen onder de bodem die het kalkgesteente bedekt. Verderop in dit artikel noem ik het ontstaan van 'rundkarren' hiervan als voorbeeld. (Het ontstaan van grotten gebeurt ook vaak in het verborgene, maar dat valt buiten de definitie van cryptokarst.)

Met *paleokarst*, letterlijk 'oude karst', worden karstfenomenen bedoeld die in het geologisch verleden zijn ontstaan (paleo betekent 'oud' in het Grieks). Bij boringen wordt op grote diepte vaak dergelijke paleokarst aangetroffen, maar ook in het hooggebergte – nu zonder grote rivieren – vinden we grotten die ooit door rivieren gevormd zijn. Soms worden *karrenvelden* (zie hierna voor de uitleg) aangetroffen in bijvoorbeeld Devonische kalksteen die door sedimenten uit het Mesozoïcum zijn bedekt. Ook dat is paleokarst.

Karren, limestone pavements en karrentafels

Het eerste wat we in het veld waarnemen waar de ondergrond uit kalk bestaat, waar bovendien voldoende neerslag valt én waar geen of matige plantenbedekking is, zijn de zogenaamde karren (*lapiaz*, *lapiez*). Deze ontstaan doordat regenwater CO₂ opneemt uit de lucht en hierdoor enigszins zuur wordt. Dit regenwater komt op de kalk terecht en lost het tijdens het wegstromen een beetje op, met een geultje als gevolg. Steeds meer

water zal via dit geultje wegstromen (het gaat als een gootje fungeren) en zo zal het geultje steeds dieper worden. In die gootjes ontstaat een humuslaag(je) als gevolg van kleimicroben die achterblijven als de kalk corrodeert, door bacteriën en algen en later ook door rottend plantenmateriaal. Want hier zullen plantjes (algen, mossen) gaan groeien die op hun beurt door ademhaling en rotting kooldioxide vormen. Op den duur ontstaat zo een 'karrenveld' of 'karrenlandschap'. Afb. 2.



Afb. 2. Karrenveld op het Massif de Parmelan (Fr.).

Er zijn vele vormen van karren te onderscheiden. Belangrijke factoren die bij het ontstaan van deze verschillende vormen een rol spelen, zijn de structuur van het kalkgesteente, de helling van de kalklagen, de aan- of afwezigheid van een humusrijke bodem, de hoeveelheid neerslag en de aanwezigheid van breuken en diaklazen. Enkele kenmerkende karrenvormen zal ik kort noemen, waarbij men zich moet realiseren dat er vele overgangsvormen bestaan.

Kenmerkende karrenvormen

Stroomt het water snel weg, dan zullen vele, naast elkaar liggende, betrekkelijk ondiepe geultjes ontstaan, de **rillenkarren**. Deze komen vooral voor op hellende oppervlakken.

Op vlakker liggende kalkoppervlaktes, waar het water langzamer wegstroomt en de tijd heeft naar dieper gelegen plaatsen te stromen, zullen enkele, relatief diepe geulen ontstaan, de **kluftkarren**. Veelal zullen die voorkomen op plaatsen in het gesteente waar breuken of diaklazen al voor een zwakkere of lagere plek hebben gezorgd; deze bepalen de richting van de kluftkarren. In kluftkarren kan ook een humuslaag en plantengroei ontstaan. Hierdoor zal het corrosieproces sneller en ook zijwaarts verlopen. In de loop van de tijd raken de kluftkarren zo bedekt en worden de wanden tussen de karren ondermijnd zodat ze uiteindelijk zullen verdwijnen.

Rundkarren ontstaan onder een bodem (of gletsjerijs). Hierdoor hebben de wanden tussen de karren geen spitse top, maar zijn ze afgerond.

Kamenica zijn kleine bekkens in het (horizontale) kalkgesteente, enkele tientallen centimeters in doorsnede, waar regenwater zich verzamelt en het bekken langzaam groter en dieper wordt totdat er een uitstroomopening ontstaat en het water wegloopt. Deze uitstroomopeningen verdiepen zich en zo ontstaan **meanderkarren**.

Daar waar de kalk (vrijwel) horizontaal ligt en de bodembedekking ontbreekt, bijvoorbeeld omdat gletsjers de bodem in de laatste ijstijd hebben weggeschrapt, kunnen **limestone pave-**

ments ontstaan. Hiervan vinden we prachtige voorbeelden in de Burren, aan de Ierse westkust. Zo'n **limestone pavement** lijkt inderdaad op een *pavement* (plaveisel of bestrating), alsof het door mensen is gemaakt. Het bestaat uit **grikes** (of grykes), de soms meters diepe kluftkarren, en **clints**, de blokken ertussen (afb. 3).



Afb. 3. Limestone pavement in de Burren (Ierland).

Op karrenvelden vinden we vaak **karrentafels**. Deze zijn op min of meer dezelfde manier ontstaan als de veel bekendere gletsjertafels (vandaar ook de naam). In dat geval bedekt een zwerf- of morenekei een deel van het kalkoppervlak; om de kei heen vindt corrosie plaats en er ontstaan karren. Omdat de kalk onder de kei beschermd is, komt de kei ten opzichte van zijn omgeving steeds hoger te liggen.

Verdwijngaten en bronnen

In het eerste artikel (in *Gea* 2013 nr. 4) hebben we gezien dat grotten op verschillende manieren kunnen ontstaan, waarbij ondergrondse afwatering in karstgebieden een belangrijke rol speelt. Verdwijngaten (*sinkholes*, *pertes*, *chantoirs*) en bronnen zijn de eerste karstfenomenen die we aan het aardoppervlak kunnen waarnemen. Rivier- en regenwater verdwijnt in de ondergrond en komt soms vele kilometers verderop weer te voorschijn, nadat het water 'vrij' stromend – en niet via de poriën in het gesteente – een ondergronds traject heeft afgelegd. Verdwijngaten vinden we meestal op de grens van kalk en een ander, niet (of veel minder) oplosbaar gesteente. Afb. 4. Het water stroomt bijvoorbeeld over zandsteen of leisteen als oppervlakterivier(tje), om daar waar het de kalk ontmoet via laagvoegen of diaklazen z'n weg ondergronds te vervolgen. Een



Afb. 4. Hier verdwijnt een beekje in een kalkwand in de buurt van Remouchamps (België).

mooi voorbeeld daarvan is de Trou Belvaux in België, waar de Lesse in de Grotten van Han verdwijnt. Alleen bij uitzonderlijke neerslag of het smelten van de sneeuw in het voorjaar stroomt de Lesse ook nog deels bovengronds, via de vallei van de Chavée, die de rest van het jaar droog staat. In het Engels wordt zo'n drooggevallen rivier in een karstgebied (waar het water dus ondergronds verder stroomt) een 'dry valley' genoemd. Daar waar het water nog bovengronds stroomt, over zandsteen bijvoorbeeld, is soms ook een vallei uitgesleten, die plotseling, dikwijls tegen een rotswand van kalk, kan eindigen. Zo'n vallei noemen de Engelsen, ook weer heel toepasselijk, een 'blind valley'. Bronnen in karstgebieden worden onderscheiden in twee types, waar weer geen goede Nederlandse benamingen voor bestaan. Is er sprake van een rivier die ondergronds verdwijnt en later weer als rivier tevoorschijn komt (met weer de Grotten van Han-



Afb. 5. De (karst)bron van de (Grotte de la) Diau (Fr.)

sur-Lesse als een spectaculair voorbeeld), dan spreken we van een *résurgence*. Is het regen- of smeltwater dat in een groot gebied min of meer diffuus in de ondergrond verdwijnt, zich daar verzamelt en dan uit één bron als rivier tevoorschijn komt, dan spreken we van een *exsurgence*. Afb. 5.

Exsurgences en *résurgences* kunnen soms stroomopwaarts migreren, door een combinatie van ondergrondse corrosie en (vorst)erosie (al in het Pleistoceen) van de wand boven de bron. Ook dan ontstaat er een *blind valley*. In het Franse Juragebergte (met name in de departementen Doubs en Jura) is dit verschijnsel mooi waar te nemen. Ze worden *cirques* genoemd, letterlijk arena of amfitheater, niet te verwarren met gletsjercirques. Door 'terugschrijdende' erosie van die cirques kunnen soms kilometers lange 'doodlopende' valleien ontstaan, '*reculées*' genaamd. In de Franse Jura (voornamelijk in de departementen Doubs en Jura) is dit verschijnsel mooi waar te nemen. Ze heten daar vaak '*bout du monde*' (einde van de wereld).

Een bijzondere vorm van karstbronnen is de *vaoclusebron*, genoemd naar de Fontaine-de-Vaucluse, in het Zuid-Franse stadje met dezelfde naam. Hier welt onder een loodrechte wand vanuit een diep gat het water op. De waterspiegel rijst en daalt al naar gelang de hoeveelheid neerslag op het karstplateau boven de bron. Na extreme regenval of bij smelten van de sneeuw kan er per seconde 200 m³ water uitstromen. De bron voedt de rivier de Sorgue (bij laag water via een niet toegankelijke ondergrondse stroom), bij hoog water direct vanuit de Fontaine zelf. Duikers zijn tot 200 m diep in de bron afgedaald en met een tv-camera is de bron tot een diepte van 315 m verkend, maar nog steeds gaat de waterloop omlaag en is er geen horizontaal gedeelte gevonden. De Fontaine de Vaucluse is een van de meest fascinerende objecten voor (Franse) grotduikers. Dat deze bron zo diep gaat is veroorzaakt tijdens de Messiniaanse Crisis (aan het einde van het Messinien, de bovenste etage van het Mioceen, tussen ca. 7 en 5 miljoen jaar geleden); de Middellandse Zee raakte toen afgesloten van de Atlantische Oceaan en viel grotendeels droog. Ook het grondwaterpeil stond in het Middellandse Zeegebied aanzienlijk lager dan tegenwoordig.

Nog een bijzonder fenomeen zijn de *estavelles*, openingen in de ondergrond die afwisselend verdwijngaten en bronnen zijn. Als de grondwaterspiegel laag is, kan regen- of smeltwater via een gat in de ondergrond verdwijnen en ondergronds verder stromen. Zo'n opening wordt in dat geval een verdwijngat genoemd. Als het grondwaterniveau, bijvoorbeeld na heftige regenval of smelten van de sneeuw, plotseling stijgt, kan er uit datzelfde gat juist water tevoorschijn komen en is het een bron geworden (meestal een *exsurgence*, maar soms ook een *résurgence*). Een mooi voorbeeld is de Puits de la Brême bij Ornans (Doubs), waar soms een rivier tevoorschijn komt, en soms een rivier verdwijnt. De Puits de la Brême is dan ook soms een spectaculaire put, meters diep, en soms gewoon een meertje aan de oppervlakte! (zie ook afb. 9 en 10)

De ondergrondse afwatering in een karstgebied heeft een aantal nare kanten. Zo is de oppervlakte dikwijls droog en kan er nauwelijks iets groeien, zodat zelfs schapenteelt niet mogelijk is. Ook kunnen verbindingen tussen verdwijnpunten en bronnen onbekend zijn. Dit had met name in Frankrijk in het nabije verleden nogal eens tot gevolg dat het ene dorp z'n afval (bijvoorbeeld kadavers van aan hondsdolheid gestorven dieren) in een diepe karstput gooide, die echter via een ondergrondse

waterloop in verbinding stond met een bron die een ander dorp van drinkwater voorzag. De gevolgen laten zich raden. Ondanks allerlei wetten, die dankzij de fameuze Franse speleoloog E.-A. Martel in het begin van deze eeuw tot stand kwamen, doet zich dit soort situaties helaas nog steeds voor.

Dolines in allerlei soorten en maten

Nauw verwant aan de verdwijngaten zijn dolines, verdiepingen in het landschap van één tot enkele meters tot vele tientallen meters in doorsnede en diepte. Doline is het Sloveense woord voor dal. Dolines, die soms geïsoleerd, maar vaak ook met vele bij elkaar voorkomen, zijn globaal in twee categorieën te onderscheiden: oplossingsdolines en instortingsdolines.

De *oplossingsdolines* zijn ontstaan doordat kalk oplost en via spleten in de ondergrond wordt afgevoerd, dikwijls op een plek waar twee diaklazen elkaar snijden. Steeds meer water zal via deze spleet wegstromen en de wanden raken door corrosie steeds verder van elkaar verwijderd zodat er een soort trechter ontstaat. Oplossingsdolines zijn veelal komvormig en dikwijls is de bodem vruchtbaar, bestaande uit weinig tot niet oplosbare mineralen die achterblijven als de kalk verdwijnt (vooral kleimineralen en ijzer). In de tropen en subtropen heeft die bodem door de geoxideerde ijzermineralen vaak een roodbruine kleur en wordt daarom *terra rossa* genoemd. We spreken van bauxiet als de achtergebleven bodem veel aluminiummineralen bevat. Daarom wordt in karstgebieden vaak bauxiet gewonnen.

Instortingsdolines worden gevormd als het plafond van een grotzaal instort en dit aan het aardoppervlak zichtbaar is. Instortingsdolines hebben vaak rechte wanden. De hierboven beschreven verdwijngaten komen ook vaak in dolines voor. Oplossingsdolines liggen soms in grote aantallen bij elkaar, zoals in Slovenië, niet ver van Postojna, waar in een gebied vierhonderd oplossingsdolines per vierkante kilometer zijn geteld (allemaal van enkele meters doorsnede en een paar meter diep). Instortingsdolines liggen vaak op één lijn en volgen het traject van de onderliggende grot. Vaak vormen instortingsdolines de toegang tot een grot, maar soms sluit het ingestorte materiaal de ingang juist af. Ook als het plafond van de grot (de bodem van de doline) heel dik is - tot wel tientallen of honderden meters - is er geen toegankelijke verbinding. Mooie voorbeelden daarvan zijn te zien in de Pyreneeën, op de Frans-Spaanse grens, boven de gangen en zalen van de Gouffre de la Pierre-Saint-Martin, één van de langste (80 km) en diepste (1410 m) grotsystemen van Europa. Afb. 6.

Als dolines aan elkaar vastgroeien, en zo een onregelmatige vorm krijgen, spreken we van *uvala's* (letterlijk inham of baai). In de wanden van een uvala zijn soms nog de vormen van de individuele dolines te herkennen. Langere uvala's worden soms ook 'blinde dalen' genoemd, maar zijn dan 'blind' aan beide kanten. Als een reeks instortingsdolines aaneengroeit ontstaat er een



Afb. 6. Dolines op een rij boven een van de grotsystemen aan de Frans-Spaanse grens in de Pyreneeën.

grot zonder plafond, een 'openluchtgrot'. Dikwijls is aan beide kanten de nog wel overdekte grot toegankelijk. De vorming van veel kloven in karstgebieden (*limestone gorges*) wordt door het instorten van grotsystemen verklaard. Een prachtig en spectaculair voorbeeld van een dergelijk karstfenomeen is het dal van Rakov Škocjan in Slovenië (niet te verwarren met de toeristengrotten van Škocjan/Škocjanske jame, ook in Slovenië, waar naast spectaculaire grotten trouwens ook fraaie instortingsdolines te zien zijn).

Er zijn enkele bijzondere vormen van dolines die ik nog even afzonderlijk wil noemen, om te beginnen de *cenotes* in onder meer Mexico. Cenotes zijn instortingsdolines waarvan de onderliggende grot nu vol water staat. Ze zijn een eldorado voor grotduikers, die de vele kilometers grot met perslucht verkennen. In veel cenotes in Yucatan (Mexico) worden op de bodem offergaven uit de Maya-cultuur gevonden. De cenotes zijn gevormd toen de zeewaterspiegel aanzienlijk lager stond dan nu. In de grotten zijn druipstenen gevormd (dat gebeurt alleen maar in de vrije lucht, niet onder water) die, na de zeespiegelstijging, nu onder water staan of hangen. Het water in de cenotes en grotten die nabij de kust liggen heeft vaak een *halocline*, een overgangslaag tussen het lichtere, zoete regenwater en het zwaardere, zoute zeewater. Die halocline lijkt op een band van 'mist', maar dan onder water.

Dan zijn er de *sinkholes*, ook wel instortingsdolines genoemd. Vooral in Florida (VS) krijgen sinkholes veel aandacht omdat ze regelmatig midden in woonwijken ontstaan en er daardoor complete huizen in verdwijnen. Recent verdween daar een zaal van een automobielmuseum met acht antieke auto's in een sinkhole. De grotten onder Florida, dat goeddeels uit kalkgesteente bestaat, staan vol water dat oorspronkelijk tegen het plafond 'tegendruk' leverde, waardoor dit intact bleef. De laatste decennia is er echter veel water voor onder meer de landbouw opgepompt, waardoor het waterniveau in de grotten daalde. Hierdoor kan het plafond veel gemakkelijker instorten. Ook zijn er sinkholes ontstaan omdat de bodem uitsluitend nog uit kleilagen bestond, en alle kalk door corrosie was verdwenen. Als die bodem dan belast wordt, door bebouwing bijvoorbeeld, stort die gemakkelijk in. Ook bij heftige regenval kan de klei wegspoelen en kunnen er sinkholes ontstaan.

Ten slotte noem ik *megadolines*, die in de tropen voorkomen en met de Chinese naam *tiankeng* (letterlijk een gat of put gericht naar de lucht, hemel) worden aangeduid. Megadolines zijn vooral bekend uit China. De grootste is de Xiaozhai tiankeng, met een diameter van de ingang van ongeveer 600 meter, een diepte van 662 meter diep, en een volume van 120.000 m³! Bij het ontstaan van deze reusachtige instortingsdolines speelt waarschijnlijk ook tektoniek een rol.

Een bijzonder karstfenomeen in België: de Fondry des Chiens

Nabij Couvin, in het zuiden van België, ligt een spectaculair karstgebied, de Abannets, met daarin een serie fraaie karstputten: de Fondry des Chiens. De namen van deze karstfenomenen zijn op zich al een object van studie. Abannets komt waarschijnlijk van het Franse abannir, verbieden, waar ook het Nederlandse 'ban' aan is ontleend. Fondry komt van fond, diepte (fondrière is afgrond), of van fondre, smelten (ijzerwinning - zie hierna); chien komt van hond (er zouden honden in deze putten gegooid zijn), maar waarschijnlijk van Sarrasin (Saraceen), middeleeuwse nomaden uit Noord-Afrika, die ijzer smolten en smeedden.

Deze streek, die rijk is aan karstverschijnselen, bestaat vooral uit Givetien-kalk (Midden-Devoon), zoals grote dolines, karrenvelden en talrijke grotten (o.a. de toeristengrot Grotte de Neptune in Petigny). Op het hoogste punt liggen een aantal spectaculaire putten, tot wel veertig meter diep (afb. 7). Volgens een oudere theorie zijn de abannets gevormd doordat grotten hier zijn ingestort. Het probleem bij deze verklaring was dat de

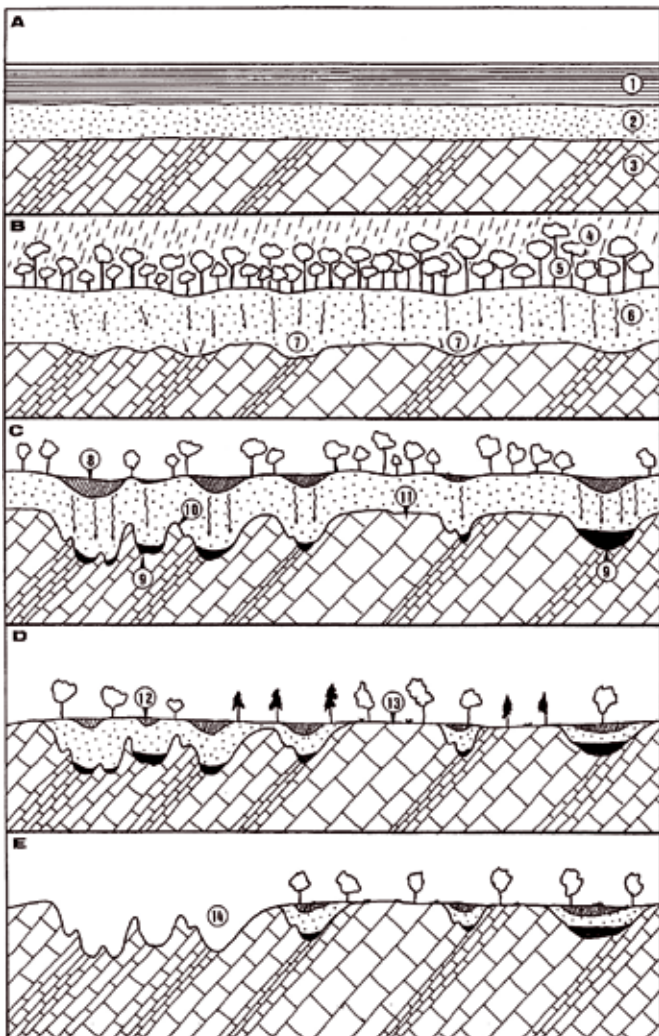


Afb. 7. De Fondry des Chiens bij Nismes (B.) (zie persoon met paraplu voor de schaal).

berg) ligt tussen leisteen- en schalielagen (nu dalen). In het Tertiair lagen deze lagen hoger dan de kalk. Rivieren stroomden over de schalie en leisteen tot ze de kalk bereikten en verdwenen vervolgens in de ondergrond, waarbij door

abannets op het hoogste punt in de omgeving liggen, wat de vraag onbeantwoord liet waar de rivieren dan vandaan kwamen die de grotten gevormd hebben. De verklaring hiervoor werd gezocht in een 'omkering van het reliëf'. De Givétienkalk (nu een

corrosie de grotten gevormd werden. Tijdens het Pleistoceen was er minder neerslag waardoor de kalk minder werd aangetaast, maar als gevolg van vorsterosie de leisteen en schalie juist gemakkelijker wegerodeerden. Op een zeker moment stak de kalksteen, met de grotten, boven de schalie en leisteen uit. Het plafond van de grotten stortte in, en daar waren de abannets!



Afb. 8. De ontstaansgeschiedenis van de 'abannets' en de Fondry des Chiens in België (Quinif, 1990).

Tegenwoordig is er een aannemelijker verklaring. De wanden van de abannets zijn in feite enorme rundkarren. Het schema (naar Quinif, afb. 8) laat in vijf stappen het ontstaan zien: In het Oligoceen (A) bedekt de zee dit gebied (1) en wordt er zand afgezet (2) op de dan relatief vlakke oppervlakte van de Devonische kalkgesteenten (3). Nadat de zee zich heeft teruggetrokken (B) ontwikkelt zich in het dan tropische klimaat (4) een uitbundige begroeiing (5). Regenwater infiltreert, spoelt het ijzer uit het Tertiaire zand (6) en lost de kalk op (7). Aan de oppervlakte (C) ontstaan moerassen en venen (8) en de kalk onder het zand corrodeert (9). Op het contact met de kalk worden ook de uitgespoelde ijzermineralen afgezet. Tussen de diepere gecorrodeerde plekken blijven wanden en punten van kalk staan (10), en ook blijven er minder steile 'plateautjes' van kalk achter (11). Die onder een bedekking ontstane karren worden (naar analogie van cryptokarst) cryptokarren genoemd. Vervolgens verandert het klimaat tijdens het Kwartair sterk (D). Behalve in de depressies (12) verdwijnt door erosie de zandbedekking (13). Vanaf de ijertijd tot aan de 19^e eeuw (E) worden de ijzerafzettingen gewonnen, de abannets leeggehaald en ontstaat het huidige landschap (14). Een karstverschijnsel staat dus aan de wieg van de ijzerindustrie van Wallonië! Het zal geen verbazing wekken dat recent het idee heeft postgevat dat fantomisatie en misschien zelfs bacteriën een rol hebben gespeeld. Een uitdaging voor de onderzoekers die zich nu met karstvorming bezighouden!

Grotten zonder dak ('roofless caves')

Als grotten niet al te diep liggen, en in de loop van de geschiedenis de oppervlakte boven de grot denudeert door chemische en mechanische erosie, kan het dak – het plafond van de grot – verdwijnen. De denudatiesnelheid hangt van allerlei factoren af (gesteente, klimaat enz.), maar twintig meter per miljoen jaar is niet ongewoon. Instortingen, zoals bij het ontstaan van dolines, spelen daarbij geen rol. De grotgangen, zalen, druipstenen en klastische bodemsedimenten zoals grind en leem, worden dan aan de oppervlakte zichtbaar. Zo'n 'roofless cave' lijkt op een dal, maar er stroomt geen rivier en de bodem bestaat uit grottedimenten. In de 'klassieke karst' in Slovenië zijn zulke 'roofless caves' (ofwel 'unroofed caves') tot bijna drie kilometer lengte bekend.



Afb. 9. Overzichtsfoto van de polje van Comeya, Picos de Europa (Sp.)

Poljes

In veel karstgebieden komen *poljes* voor (polje=veld): gebieden met een relatief vlakke bodem die aan alle kanten omgeven zijn door wanden. Afb. 9. Soms stromen er riviertjes, maar een in- of uitgang aan de oppervlakte is er niet. Het water komt aan de ene kant uit één of meerdere grotten en verdwijnt aan de andere kant via een verdwijngat (ponor=afgrond) weer ondergronds. Sommige poljes staan in de winter en het voorjaar vol met water, in perioden met veel neerslag en smeltende sneeuw. De polje is dan een meer, waarin door de bewoners uit de omgeving wordt gevist. In de zomer en de herfst staat de polje droog en dient als landbouw- en weidegebied. Een beroemd en spectaculair voorbeeld is Cerkniško jezero (het meer van Cerknica) in Slovenië. In winter en voorjaar is deze polje met een oppervlakte van bijna 40 km² het grootste meer van Slovenië, maar in de zomer is er geen druppel water te vinden! Zie voor dit verschijnsel afb. 10.

Bij het ontstaan van poljes speelt tektoniek een rol. Er zijn poljes bekend met een oppervlakte tot wel 700 km². In Ierland kennen



Afb. 10. Estavelles op de bodem van de drooggevalle Radensko Polje in Slovenië. Als het grondwater hoog staat – bijvoorbeeld in het voorjaar bij de sneeuwsmelt in de omringende bergen – functioneren de estavelles als bronnen, waardoor de polje volloopt. Is de wateraanvoer later in het jaar gering, dan zijn het juist verdwijngaten waardoor de polje – zoals nu – weer langzaam leeg raakt.

we de *turlough* (=droog meer), een 'kruising' tussen een (grote) doline en een (kleine) polje die, zoals de naam al aangeeft, een wisselend waterregime kent. Bij deze Ierse variant van de polje speelt tektoniek echter geen rol; waarschijnlijk zijn ze gevormd als oplossingsdolines.

Tropische karst

In tropische en subtropische gebieden kunnen grote aantallen dolines vlakbij elkaar liggen, een zogeheten 'cockpitlandschap'. Wanneer deze dolines zich door corrosie nog verder uitbreiden dan ontstaat een vlakte met daarin alleen nog ronde of kegelvormige restbergen op die plaatsen waar de dolines elkaar niet raakten. Dat is de bekende 'tropische karst' van bijvoorbeeld Java (Gunung Sewu), of Vietnam, het decor van vele speelfilms. Torenkarst (*tower karst*) heeft steile wanden en min of meer ronde toppen. Kegelkarst (*cone karst*) bestaat uit kegelvormige bergen met schuine wanden en spitse toppen. Dat we soms ook in gematigde gebieden op aarde 'tropische' karstbergen tegenkomen, zoals in de Franse Jura, is een aanwijzing voor andere klimaten in het verre verleden.

Overigens is het klimaat een belangrijke factor bij de proces van karstvorming: in de tropen en subtropen is veel meer begroeiing en is er door de groei en rotting van planten meer CO₂. Door verdamping is er ook meer regenval (de tropische moessons). Bovendien verlopen chemische reacties bij hogere temperaturen sneller. Deze condities zorgen ervoor dat er in de tropen en subtropen meer corrosie is, met als gevolg de enorme grotten in bijvoorbeeld Maleisië en de typische tropische karst.



Afb. 11. 'Dolomietruïne' in het Bois de Paiolive bij Les Vans (Fr.)

In een koel klimaat heb je echter ook veel corrosie omdat koud water meer CO₂ kan bevatten (denk maar aan een koel biertje, dat veel meer 'prik' bevat dan een lauwar biertje). Grotvorming is daarom ook een bekend verschijnsel in het hooggebergte, zoals in Noord-Noorwegen en Patagonië. Karstverschijnselen komen door corrosie dus overal op onze aarde voor.

Dolomietruïnes

Daar waar de ondergrond uit dolomiet [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] bestaat (een carbonaatgesteente dat minder goed dan kalk, maar toch wel oplosbaar is), kunnen we dolomietruïnes aantreffen, ook een bijzonder karstfenomeen. In de Zuid-Franse Causses zijn daarvan enkele mooie voorbeelden te vinden, zoals de 'Chaos' van Montpellier-le-Vieux (bij La Roque-Sainte-Marguerite bij Millau), de Chaos van Nîmes-le-Vieux (bij Florac) en het Bois de Païolive (bij Les Vans) (afb. 11). Zij zijn bij de oplossing door corrosie van de dolomietgesteenten van Jura-ouderdom ontstaan. Mede door de gelaagdheid zijn hier spectaculaire formaties ontstaan in een labyrintachtig landschap. Deze drie gebieden staan ook bekend als prachtige wandelgebieden. Ook elders in karstgebieden treffen we dolomietruïnes aan.



Afb. 12 . De bijzondere vormen – zowel wat ontstaan als corrosie betreft – van Les Mourres (Luberon, Fr.)

Biokarst

In sommige publicaties wordt corrosie van carbonaatgesteenten toegeschreven aan 'kalketende' (calcifage) bacteriën. Al in 1982 verscheen een artikel van Triat over biocorrosie van oppervlaktekalk in de Zuid-Franse Luberon, door de bacterie *Microcodium*. Deze bacteriesoort zullen we verderop nog tegenkomen, maar dan juist bij het afzetten van kalk. Ook algen kunnen een rol spelen bij karstvorming (fytokarst). Aan de kust zien we vaak kleinschalige oplossing van kalk door allerlei diersoorten, zoals schelpdieren, zeekomkommers en zee-egels. In dat geval is er meestal sprake van een samenwerking of symbiose van deze dieren met bacteriën. Alle vormen van karst waarbij organismen een rol spelen, wordt als 'biokarst' aangeduid.

Kalkafzettingen

Tot zover de karstfenomenen die door corrosie en instorting gevormd zijn. Ook de afzetting van kalk kan – vanzelfsprekend – soms tot 'karst' worden gerekend, zoals druipstenen, die duidelijk karstverschijnselen zijn en tot de speleologie gerekend worden. Ook aan het aardoppervlak kunnen we dergelijke vormen waarnemen, zoals travertijn en kalktuf (zie het tweede artikel in deze serie in het maartnummer van Gea (2014).

Misschien is het goed nog even kort in te gaan op het ontstaan van kalkgesteenten. Kalk is een veel voorkomend sedimentgesteente, dat op de bodem van zeeën en oceanen is afgezet. We kunnen daarbij verschillende kalkafzettingen onderscheiden. *Neritische* kalkgesteenten worden gevormd door de skeletten van vastzittende organismen, zoals koralen. Deze riffen komen in het algemeen in ondiep water voor, maar er zijn ook

diepzeeriffen, zoals voor de kust van Schotland en Noorwegen. Daarnaast onderscheiden we *pelagische* kalken, opgebouwd uit de skeletjes van *vrij* levende dieren en planten, zoals foraminiferen en andere kalkalgen, coccolieten, die na afsterven naar de bodem van de (diep)zee zinken. (Op zeer grote diepte en afhankelijk van de zuurgraad lossen de kalkskeletjes overigens weer op.) Als derde categorie zijn er de chemisch gevormde sedimenten, die neerslaan uit kalk in oplossing, bijvoorbeeld door oververzadiging van het zeewater, zoals kalkgesteente in tropische zeeën en vooral lagunes.

Er zijn ook zoetwaterkalken, afgezet in meren of rivieren. Een voorbeeld van kalkafzettingen in meren zijn de bijzondere formaties gevormd in het zuidwesten van Frankrijk, waar op planten en plantenwortels door bacteriën kalk is afgezet, een voorbeeld van biolithogenese (gesteentevorming door organismen). De bacteriën behoren in dit geval tot de (hierboven genoemde) *Microcodium*-soorten. Door de combinatie van kalkafzetting op waterplanten, en, als die later droog vallen, de corrosie van diezelfde structuren, ontstaan merkwaardige formaties, die lijken op enorme paddenstoelen (afb. 12).

Eerder zagen we al de afzetting van kalktuf, waarbij formaties en soms zelfs grotten gevormd worden. Ook in rivieren in karstgebieden, die verzadigd zijn aan kalk, kan kalk worden afgezet. Er kunnen dan dammen ontstaan, soms van een meter of hoger. Daar waar het water in een dun laagje over de dam stroomt, op het raakvlak van ondergrond, water en lucht, wordt opnieuw



Afb. 13 . Tufdammen (kalktuf of travertijn) in het riviertje de Dard bij Baumeles-Messieurs, dept. Jura, Frankrijk. De Dard is een echte karstrivier, die uit de grotten van Baumeles-Messieurs tevoorschijn komt na een ondergronds traject, en dan door de Cirque de Baumeles-Messieurs aan de oppervlakte verder stroomt.

kalk afgezet, en zo groeien de dammen steeds hoger (afb. 13). Ook hier spelen bacteriën naar alle waarschijnlijkheid een belangrijke rol. Tussen de dammen blijven diepe bekkens achter, in de speleologie meestal 'gours' genoemd. Door sommige auteurs worden juist de dammen 'gours' genoemd. Die dammen en bekkens zien we ook ondergronds, in grotten.

Karst en flora

Ik besluit dit artikel met enkele opmerkingen over karst en plantengroei, een fenomeen dat ook aan het aardoppervlak goed is waar te nemen. (De relatie tussen de ondergrond en plantengroei rechtvaardigt zelfs meerdere artikelen.) In karstgebieden, waar de ondergrond uit kalk bestaat, zien we vaak een kenmerkende flora, of toch op z'n minst enkele kenmerkende,

kalkminnende planten. De flora kan helpen bij het herkennen van het gesteente en zelfs bij het vinden van nog niet ontdekte grotten! Een van de meest voorkomende kalkminnende planten is de maretak (ofwel vogellijm of mistletoe, *Viscum album*), een groenblijvende halfparasiet die op verschillende bomen voorkomt. Afb. 14. Als halfparasiet gebruikt deze plant slechts water (met daarin kalk opgelost) van zijn gastheer. Het bijzondere is dat de maretak alleen voorkomt als er kalk in de bodem aanwezig is, terwijl de gastheer die kalk zelf niet nodig heeft. Zo groeien appelbomen en populieren op allerlei bodems, maar komen deze bomen met maretakken alleen in kalkgebieden voor. Nog zo'n kenmerkende kalkminnende plant is de bosrank of clematis (*Clematis vitalba*), een klimplant die tot tientallen meters hoog kan groeien en die in de herfst en winter goed te herkennen is aan de witte vruchtpluizen als de groene bladeren zijn afgevalen. Tijdens een autoritje door hoog België kun je van het najaar tot het vroege voorjaar dankzij de bosrank vrij nauwkeurig zien



Afb. 14. Populieren met maretak in de Belgische karststreek nabij Namen (B.)

waar de ondergrond uit kalk bestaat.

Talrijke varen-, orchideeën- en bessensoorten zijn ook kalkminnend, zoals de schildvaren (*Dryopteris submontana*), de bruinrode wespenorchis (*Epipactis atrorubens*), de noordse aalbes (*Ribes spicatum*), de zwarte gifbes (*Actea spicata*) en de jeneverbes (*Juniperus communis*). De in Duitsland nog schaars voorkomende en beschermde Wacholderheiden – Wacholder is Duits voor jeneverbes – zijn in feite ook karstfenomenen. Vaak groeien op kalkrotsen bepaalde varensorten, in of boven de ingang van een grot, waar de temperatuur dikwijls net iets hoger is dan elders in de omgeving door de uit de grot stromende warmere lucht. Als die varens dan ook groeien op een rotswand in een gebied waar geen grot bekend is, kan het de moeite zijn daar in de winter terug te komen om te kijken of juist op die plek de sneeuw smelt. Is dat het geval, dan kan met wat graafwerk in het losse sediment misschien een grotingang worden vrijgelegd! Dankzij de varens zijn ook in de Ardennen diverse grotten gevonden.

Relict uit de ijstijd

Als u echt iets moois wilt zien waarin de wisselwerking tussen ondergrond (kalk), karst (de *limestone pavements*), klimaat én flora zichtbaar wordt, is een bezoek aan de Burren in het westen van Ierland zeer aan te bevelen (afb. 15). Dankzij het zeer gematigde klimaat door de warme golfstroom, de zuivere lucht vlakbij de oceaan, het vele licht door het ontbreken van bomen, de afwezigheid van harde wind in de *grikes* tussen de *clints* en het feit dat kalksteen warmte vasthoudt, is hier een bijzonder microklimaat ontstaan. In dit unieke microklimaat groeien tientallen bijzondere, vaak *endemische* planten (planten die uitsluitend in een bepaald gebied voorkomen), zoals de talrijke kalkminnende



Afb. 15. Typische karstflora in de karren van de Burren (Ierland)

orchideeën. Bijzonder is ook dat sommige planten vaak uit een heel andere klimaatzone afkomstig zijn. We vinden bijvoorbeeld vlak bij elkaar de varen venushaar (*Adiantum capillis-veneris*), een van oorsprong mediterrane plant en zilverkruid (*Dryas octopetala*), een noordelijke plant die hier als 'ijstijdrelict' is achtergebleven.

Foto's: Herman de Swart, tenzij anders vermeld

Literatuur

Zie voor algemene literatuur over de geologie van grotten en karst het artikel in Gea 2013 nr. 4 (december); in het bijzonder beide encyclopedieën.

Algemeen

- Marjorie M. Sweeting *Karst Landforms*, Macmillan, London, 1972
- Hubert Trimmel *Höhlenkunde*, F. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1968
Over karren(landschappen)
- Angel Ginés et al., eds. *Karst rock features: Karren sculptures*, Založba ZRC, Postojna/Ljubljana, 2008
Over dolines
- Tony Waltham et al. *Sinkholes en Subsidence*, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2005
Over planten en geologie
- Arthur R. Kruckeberg *Geology and Plant Life – the Effects of Landforms and Rock Types on Plants*, University of Washington Press, Seattle and London, 2002
- J.E. Lousley *Wild Flowers of Chalk & Limestone*, Collins, London, 1950, 1969² (series The New Naturalist, vol. 16)
- E. Charles Nelson, Wendy Walsh *The Burren – a companion to the wildflowers of an Irish limestone wilderness*, Boethius Press & The Conservancy of the Burren, Aberystwyth, 1991

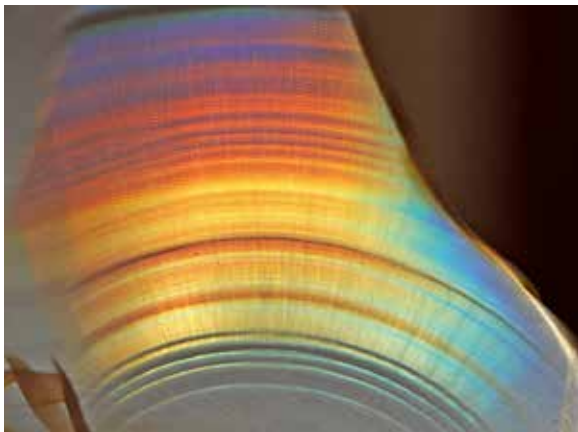
Iris-agaat: een iriserende variëteit

A.J. (Tom) van Loon

Geologisch Instituut, Adam Mickiewicz University, Poznan, Polen

e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Agaat is, hoewel geen edelsteen, zeer geliefd in sieraden. Dat komt door de fraaie kleuren en vanwege de grillige vormen van de laagjes van opeenvolgende kleuren. Meestal wordt agaat in sieraden verwerkt op dezelfde wijze als andere stenen; soms wordt het in dunne plakjes gepolijst, waardoor de kleurbanden vaak nog mooier uitkomen. Zelden echter wordt agaat in zulke dunne plakjes gesneden dat het mineraal echt doorschijnend wordt. Jammer, want dan wordt het kleurenspeel nog veel mooier.



Afb. 1. Het typische regenboogkarakter van iris-agaat bij doorvallend licht. Dit exemplaar is afkomstig van een extreem rijke (maar beschermde) vindplaats bij Horse Mountain in de Amerikaanse staat Tennessee. Foto: Dave Ault.

Dat geldt vooral bij een bijzondere agaatvariëteit: iris-agaat. Deze naam is ontleend aan de betekenis van 'iris' in de zin van een regenboogachtige presentatie van kleuren (vergelijk de iris in een oog, afb. 1). Het is een type agaat dat zeer fijn geband is. Het regenboogachtige karakter wordt pas duidelijk als er achter een dun plakje (tot ca. 3 mm dik) een sterke lichtbron wordt geplaatst en als die lichtbron, of het plakje agaat wordt bewogen,

of als de toeschouwer beweegt. De kleuren van de afzonderlijke bandjes veranderen dan en lijken soms te bewegen.

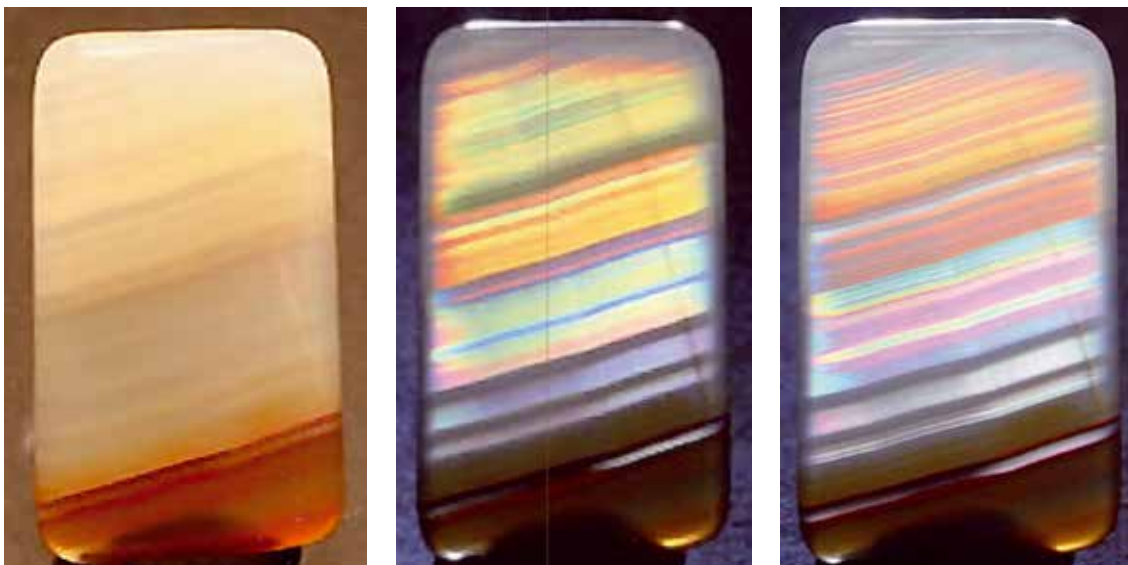
Doorvallend licht

Het bijzondere is dat dit type agaat bij ópvallend licht geen bijzonderheden laat zien (afb. 2A). Bij dóórvallend licht treedt echter diffractie (afbuiging van de lichtstralen) op, waardoor de kleuren van de banden lijken te veranderen (afb. 2B). De diffractie is een gevolg van hele kleine verschillen in de samenstelling van de kleurenbandjes - anders zouden er ook geen kleurverschillen tussen de bandjes bestaan! De grensvlakken tussen deze chemisch iets verschillende bandjes verstrooien het binnenvallende licht in verschillende richtingen. Komt zo'n verstrooide lichtstraal weer een ander grensvlak tegen, dan treedt weer hetzelfde proces op. Afhankelijk van de afstand die een lichtstraal binnen een bepaald bandje aflegt, en van het aantal bandjes dat hij doorkruist, verandert zijn golflengte, en daarmee ook zijn kleur (afb. 2C).

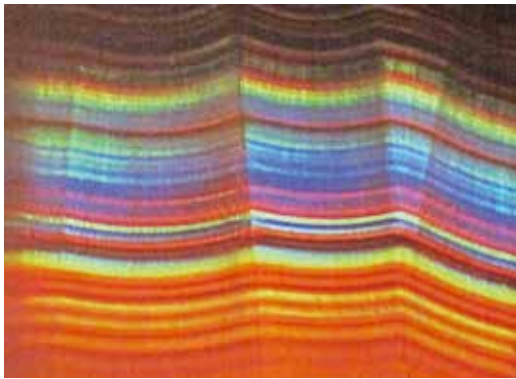
Omdat er zoveel lichtstralen door de iris-agaat gaan, resulteert dit in een breed scala van kleuren die veranderen wanneer de posities van de lichtbron, agaat of toeschouwer veranderen (afb. 3). Dit effect wordt iriseren genoemd. Om een maximaal effect te bereiken moet het plakje agaat goed gepolijste oppervlakken hebben, anders wordt het licht immers verstrooid op de onregelmatige buitenoppervlakken. Verder moet de lichtbron lichtstralen uitzenden die zoveel mogelijk loodrecht op het schijfje agaat staan. Plaats bijvoorbeeld een lamp recht achter het schijfje agaat, ga er zelf recht voor staan en beweeg je hoofd een beetje. Ook kan het schijfje agaat voor een raam worden gehangen. Het beweegt dan vanzelf iets doordat er altijd wel enige luchtstroom is; als de agaat doorschijnend genoeg is, is zomers zonlicht sterk genoeg om de kleureffecten te zien.

Prachtige variëteit

De meeste agaat is echter niet iriserend omdat de banden in de agaat vaak te dik zijn. Bij dikke banden heeft een lichtstraal die op een grensvlak tussen twee banden wordt afgebogen immers nauwelijks de kans om nog een ander grensvlak te treffen voordat hij weer uit de agaat naar buiten komt. Verder moet de agaat



Afb. 2. Gepolijst plakje iris-agaat uit Brazilië. Het plakje meet 25 bij 14 mm en is ca. 3 mm dik. A. Het plakje bij opvallend licht; er is weinig bijzonders te zien. B. Hetzelfde plakje bij doorvallend licht. C. Hetzelfde plakje bij doorvallend licht vanuit een andere hoek, waardoor de kleuren duidelijk anders zijn dan in foto B. Foto's: Hobart King, Geology.com.



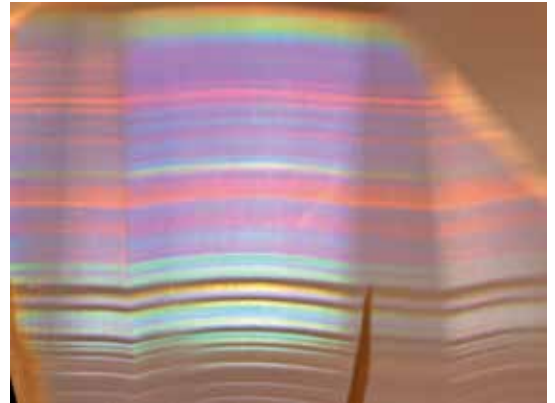
Afb. 3. Een dungebende iris-agaat bij doorvallend licht. De uiteenlopende kleuren zijn een gevolg van lichtbreking op de grensvlakken van de afzonderlijke bandjes. Foto: Agate Lady.

zo doorschijnend zijn dat de lichtstraal die aan de ene kant binnenvalt, er ook weer aan de andere kant uitkomt (althans voor een belangrijk deel; er wordt altijd licht in de steen geabsorbeerd). In principe zou het iriserend effect ook bij minder doorschijnende, dungebende agaten kunnen worden verkregen, maar dan zou het plakje agaat zo dun moeten zijn dat het nauwelijks te hanteren is zonder in stukjes uiteen te vallen.

Wel geldt uiteraard dat bij echte iris-agaat het effect sterker wordt naarmate het plakje dunner is. Juist omdat het iriseren pas optreedt wanneer de steen de juiste eigenschappen heeft en de omstandigheden daarvoor geschikt zijn, is iris-agaat weinig bekend en kan dit verhaal mensen bewust maken van deze merkwaardige en soms prachtige variëteit van agaat (afb. 4).

Dit artikel is gebaseerd op een bijdrage van Hobart King aan *Geology.com* (<http://geology.com/news/>). Ik dank hem en *Geology.com* voor de foto's van Afbeelding 2 en voor toestemming om dit fotomateriaal voor *Gea* te gebruiken.

Afb. 4. Blauwe variëteit van iris-agaat bij doorvallend licht, afkomstig van Horse Mountain. Foto: Dave Ault.



Stof zijt gij en als diamant zult gij wederkeren

A.J. (Tom) van Loon
Geologisch Instituut, Adam Mickiewicz University, Poznan, Polen
e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Diamant zeldzaam? Misschien worden we binnenkort overstroomd met diamant. Weliswaar kunstmatig vervaardigd, maar niet van echt te onderscheiden. De nieuwe synthetische diamanten hebben echter een bijzonder verleden: ze worden door een beperkt aantal bedrijven geproduceerd uit stof, of liever gezegd: uit as.



Afb. 1. Geslepen blauwe diamant, vervaardigd uit de as van een hond, sterk vergroot.

Het is geen nieuwe ontwikkeling, maar vanaf begin dit jaar zijn deze bedrijven veel actiever op de markt geworden. Ze bieden de mogelijkheid om de as na een crematie tot een diamant om te vormen. Aanvankelijk bestond die mogelijkheid alleen voor dieren (vooral in Amerika konden huisdieren zo in de vorm van een diamant - vaak gezet in een sieraad - voor altijd bij hun bedroefde baasjes blijven (afb. 1). Sinds enkele jaren bestaat die mogelijkheid ook voor mensen. Ze kunnen daartoe zelf besluiten via een

testament, of de nazaten kunnen daarvoor zelfstandig kiezen.

Lucratief maar relatief goedkoop

Vooral het van oorsprong Zwitserse bedrijf Algordanza timmert sinds begin dit jaar flink aan de weg. Het bedrijf, dat zo'n tien jaar geleden zijn oorsprong vond in een idee van Rinaldo Willy, is inmiddels actief in meer dan twintig landen. De laatste jaren maakten jaarlijks bijna duizend mensen gebruik van Algordanza's diensten. De diamanten worden in een gespecialiseerd laboratorium gemaakt (afb. 2). Kennelijk is deze vorm van diamantproductie lucratief, want ook andere bedrijven breiden uit. De productie van een diamant uit as kost niet veel meer dan een begrafenis, zo begrijpen we uit de folders, al hangen de begrafeniskosten sterk af van het land. Ruimtegebrek speelt daarbij immers een belangrijke rol. Het is dan ook niet verwonderlijk dat een kwart van de klanten uit Japan komt, een land waar een begrafenis bovengemiddeld duur is. De prijs van de verwerking van as tot diamant is afhankelijk van wat de klant wenst (geslepen of niet, in een sieraad gezet of niet, enz.).

Van as tot diamant

De behandeling van de as houdt in dat in een eerste productiestap de koolstof zo goed mogelijk handmatig wordt geïsoleerd (afb. 3). Deze wordt vervolgens in een 'groeicel' geplaatst (afb. 4) waarin de koolstof, door toevoeging van een katalysator (met vooral ijzer en kobalt) nog verder wordt gezuiverd. Voor een diamant van goede kwaliteit moet de koolstof ten minste 99% zuiver zijn. De gezuiverde koolstof wordt vervolgens gedurende één tot enkele weken in een drukcel geplaatst waarin de as bij zeer hoge temperatuur (oplopend tot 1500 °C) onder zeer hoge druk (6 GPa, ongeveer 60.000 keer de atmosferische druk) wordt gezet, onder insluiting van een miniem klein diamant-



Afb. 2. Deel van het laboratorium van Algordanza waar de diamanten uit as worden vervaardigd.



Afb. 3. Het verwijderen van onzuiverheden uit de as.

kristalletje. Door de extreme druk en temperatuur verandert de koolstof eerst in grafiet, later in diamant, dat uitgroeit vanuit het ingesloten 'diamantzaadje'. Dat gebeurt met een snelheid van ongeveer 0,2-0,4 karaat per dag (een karaat is 0,2 g). Dit proces is in principe gelijk aan de wijze waarop synthetische diamanten



Afb. 4. Apparatuur met groeicellen waarin de koolstof uit de as verder wordt gezuiverd.

uit koolstof met een andere herkomst worden vervaardigd. De diamant die zo wordt gevormd is meestal enigszins blauw (soms zelfs diepblauw), een gevolg van het uit de verbrande botten afkomstige borium. Omdat de concentratie borium per persoon verschilt, kan de 'diepte' van de blauwe kleur variëren. Soms zijn de diamanten echter wit, geel of bijna zwart; voorts is niet duidelijk waardoor de kleurverschillen worden veroorzaakt.

Na afkoelen van de diamant kan deze bewerkt worden, een handeling die grotendeels de variatie in kosten verklaart. Sommige mensen prefereren de ruwe diamant (afb. 5), anderen geven de voorkeur aan een tot briljant geslepen exemplaar (afb. 6), en weer anderen willen hem als een geslepen diamant of een briljant gezet in een sieraad.



Afb. 5. Uit ruwe as vervaardigde diamantkristallen.

Herinnering

In de natuur duurt het tientallen, mogelijk honderden miljoenen jaren om een diamant van enige omvang te laten groeien. Bij synthetische diamant gaat dat dus veel sneller, maar de grootte van de gevormde diamant hangt wel af van de behandelduur. Grote diamanten worden door de bedrijven echter niet vervaardigd omdat daarmee criminelen zouden kunnen worden aangehouden ("Politie, help! Oma is gestolen!"). Om een geschikte diamant te maken is ongeveer een halve kilogram as nodig. Omdat bij crematie van een mens gewoonlijk veel meer as overblijft, kunnen daarvan dus enkele diamanten worden vervaardigd (het hoogste aantal uit de as van één persoon is negen!); er hoeft dus door de nazaten niet om 'de' diamant te worden gevochten.



Afb. 6. Het slijpen van een diamant uit as.

Calciet als harnas

A.J. (Tom) van Loon
Geologisch Instituut, Adam Mickiewicz
University, Poznan, Polen
e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Calciet is een betrekkelijk bros mineraal. Toch gebruiken veel dieren - vooral schelpdieren - calciet om een stevig beschermend pantser te vormen. De mens weet steeds beter gebruik te maken van materialen die hun nut in de natuur hebben bewezen en nog steeds bewijzen. Daarom is, naar analogie van de bescherming die schelpen aan hun bewoners bieden, veel onderzoek gedaan naar het vervaardigen van keramisch materiaal voor bepantsering. Helaas wordt dit materiaal ook toegepast in de oorlogsindustrie.

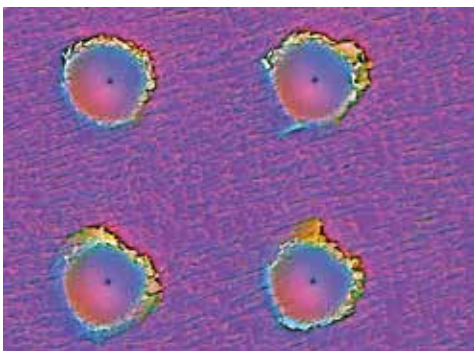
De natuur geeft haar geheimen echter niet zomaar prijs. Keramisch materiaal kan slecht tegen een serie harde slagen, klappen of tikken omdat het dan gemakkelijk breekt. Wanneer de bepantsering bovendien goed doorzichtig moet zijn, bijvoorbeeld in helmen van de mobiele eenheid, treedt er weer een ander probleem op. Om voldoende sterk en flexibel te zijn, worden dergelijke goed doorzichtige beschermmiddelen uit gelamineerd glas gemaakt. Dit type glas versplintert echter of komt vol barsten te zitten als het hard wordt geraakt, bijvoorbeeld door een kogel. De uitdaging is daarom te zoeken naar een materiaal dat zowel zeer sterk als goed doorzichtig is. Een dergelijke stof is nu gevonden in de voor 99% uit calciet bestaande schelp van de oesterachtige *Placuna placenta* (afb. 1). Dit type calciet is zowel zeer resistent als voldoende helder om er doorheen te kunnen kijken.

Het geheim van *Placuna placenta*

Waarom de schelp van deze oesterachtige zulke uitzonderlijke eigenschappen heeft, ligt - verrassend genoeg - niet alleen in die ene procent biomateriaal die in de schelp verwerkt zit. Het gaat vooral om de structuur van het calciet! Bij *Placuna placenta* heeft dit mineraal namelijk een uitzonderlijke nanostructuur (een structuur op moleculaire schaal), die inmiddels is ontrafeld. Niet alleen wordt hierdoor een optimale doorzichtigheid bereikt, ook reageert de stof anders op 'klappen' dan calciet met een 'normale' nanostructuur.

Uit experimenten blijkt dat een serie harde tikken met een

Afb. 2. False-colour opname met een elektronenmicroscop van een deelgebiedje op de schelp van *Placuna* waarin experimenteel enkele 'inslagen' werden veroorzaakt. Foto: Ling Li & James C. Weaver.



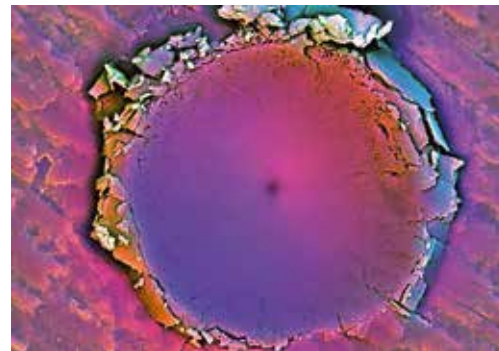
scherp gepunt diamantje (wat in principe vergelijkbaar is met een serie inslagen van kogels) niet leidt tot de breuk die gewoonlijk in (bio)keramisch materiaal optreedt, maar dat er slechts kleine beschadigingen ontstaan (afb. 2). De schelp als zodanig blijft intact.

Hoe die kleine beschadigingen er precies uitzagen, werd onderzocht met een elektronenmicroscop. Hieruit bleek dat de schade door de 'inslagen' tot een zeer kleine 'inslagkrater' werd beperkt door een soort 'tweelingvorming' op atomair niveau (afb. 3). Het gebiedje waar het calciet werd geraakt,



Afb. 1. Klep van *Placuna placenta*. Foto: Daderot, Osaka Museum of Natural History.

brak op in een aantal deelgebiedjes waarvan telkens twee gebiedjes elkaars spiegelbeeld vormden; hierdoor ontstond een soort vlinderstructuur. Er werd als het ware een randzone om het gebiedje heen gevormd dat een barrière vormde voor breukvorming naar buiten toe, doordat in die zone de bij de 'inslag' vrijkomende energie werd opgenomen (afb. 4). In het vlindervormige gebied



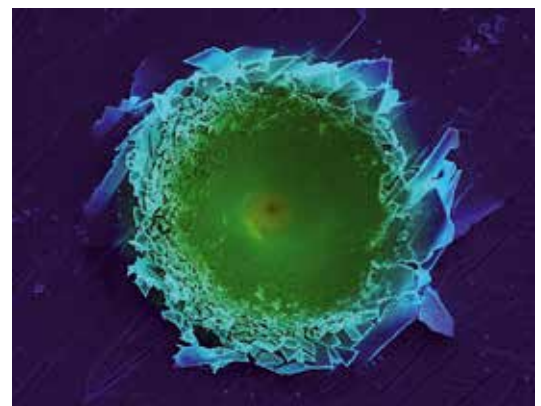
Afb. 3. Detail van afb. 2, met één van de karakteristieke 'inslagkraters'. Foto: Ling Li & James C. Weaver.

liggen voor de synthetische vervaardiging van dit materiaal, al zullen er nog diverse technische problemen overwonnen moeten worden. Dan kunnen op grote schaal bruikbare voorwerpen worden gemaakt; als mogelijke toepassing wordt onder meer aan windschermen gedacht.

Referentie

Li, L. & Ortiz, C., 2014. Pervasive nanoscale deformation twinning as a catalyst for efficient energy dissipation in a bioceramic armour. *Nature Materials* 13, 501-507.

Afb. 4. Detail van de randzone van een 'inslagkrater'. Foto: Ling Li & James C. Weaver.



Het vurige karakter van vuuropaal

A.J. (Tom) van Loon

Geologisch Instituut, Adam Mickiewicz University, Poznan, Polen

e-mail: tom.van.loon@wxs.nl; tvanloon@amu.edu.pl

Opaal is een waterhoudend silicaatmineraal en kent talloze variëteiten. Een daarvan is vuuropaal (afb. 1). In het algemeen is deze variëteit doorschijnend; in bijzondere gevallen is vuuropaal bijna doorsichtig. De naam doet vermoeden dat het om een mineraal gaat waar, net als bij diamant onder een lichtbron, de vurige stralen vanaf schieten, maar dat is meestal niet het geval. Overigens komen er ook (dure) exemplaren voor die, net als veel



Afb. 1. Vuuropaal uit Brazilië.
Foto: Justin Beveridge.



Afb. 2. In facetten geslepen vuuropaal.
Foto: Gemstone Guru.

andere variëteiten van opaal, uiteenlopende 'lichtflitsen' vertonen wanneer ze onder een lichtbron worden bewogen. Vuuropaal dankt zijn naam aan zijn met vuur overeenkomende helder gele tot helder rode kleur. De kleur wordt veroorzaakt door inclusions van ijzeroxiden en/of -hydroxiden (vaak goethiet en hematiet) en is in de meest gewilde exemplaren over de hele steen min of meer gelijk. De meeste vuuropaal - en ook de beste kwaliteit - komt al decennialang uit Mexico. De steen wordt daarom ook wel 'Mexicaanse opaal' genoemd. Minder rijke vindplaatsen komen voor in Australië, Brazilië, Ethiopië, Honduras, Guatemala en de Amerikaanse staten Nevada en Oregon.

Geen edelsteen

Hoewel vuuropaal qua schoonheid niet of nauwelijks onderdoet voor veel dure edelstenen, kan het daar vanwege de matige hardheid niet toe worden gerekend. De relatief geringe hardheid (ca. 6-6,5 op de schaal van Mohs) maakt de steen zelfs behoorlijk kwetsbaar voor krassen, die zelfs al door kleine zandkorreltjes in de lucht kunnen worden veroorzaakt. Hierdoor kan een geslepen steen uiteindelijk een mat uiterlijk krijgen. Mede daardoor is de waarde van vuuropaal minder vergeleken met echte edelstenen. De prijs ligt vanwege de geringe bekendheid van vuuropaal in bepaalde gevallen zelfs lager dan die van veel andere variëteiten van opaal, bijzondere exemplaren uitgezonderd.



Afb. 3. Cabochon geslepen vuuropaal.
Foto: Smithsonian Institution, Washington, DC.

Doorzichtige stenen van vuuropaal zijn duurder dan doorschijnende, heldere exemplaren zijn meestal duurder dan donkere exemplaren, rode stenen zijn duurder dan gele en stenen die 'lichtflitsen' afgeven zijn duurder dan 'gewone' exemplaren.

Slijpen

Net als bij echte edelstenen wordt de schoonheid van vuuropaal aanzienlijk vergroot door ze te slijpen. Terwijl bij diamant de briljantvorm meestal de voorkeur heeft omdat deze bij opvallend licht als gevolg van de straalbreking het mooiste schittert, is er bij vuuropaal geen voorkeur voor één bepaalde slijpvorm. De meeste doorzichtige vuuropalen worden met facetten geslepen (afb. 2) omdat daardoor de meest levendige kleuren worden opgewekt. Opvallend is dat ook bijna opake vuuropalen gewoonlijk met facetten worden geslepen; dan is namelijk met deze gewoonlijk minder fraaie stenen nog het meeste effect te bereiken. Wanneer de steen doorschijnend is of wanneer er kleurverschillen in optreden, wordt de steen meestal cabochon geslepen, d.w.z. gepolijst in een regelmatige gewelfde ronde of ovale vorm (afb. 3).

Gebruik

Vuuropaal is relatief zacht en is dus gemakkelijk te beschadigen; bij hard contact kunnen er snel schilfers vanaf springen. Hierdoor is de steen niet geschikt voor gebruik in sieraden die regelmatig wat te verduren krijgen, zoals ringen. Toch worden bijzonder fraaie exemplaren in ringen gezet, zeker als de drager (meestal een draagster) zuinig op de ring is omdat die waardevol is. Zo zijn er ringen met een vuuropaal als aandacht trekkend middelpunt met daaromheen een ring van briljantjes die voor de schittering moeten zorgen (afb. 4). Vaker wordt vuuropaal echter gebruikt in sieraden die minder te lijden hebben, zoals oorbellen, broches (afb. 5) en hangers.



Afb. 4. Ring met een vuuropaal als middelpunt, omgeven door tientallen briljantjes. Foto: Springer's jewelers.



Afb. 5. Broche met vuuropaal uit Mexico. Foto: Etsy.

Oorzaak van de lichtflitsen

Hoewel vuuropaal lang niet zo mooi schittert als briljant, vertonen sommige stenen toch, bij beweging onder een lichtbron, een soort lichtflitsen. Die ontstaan door verstrooiing van het licht in de steen zelf, een gevolg van lichtbreking die optreedt door de aanwezigheid in de steen van microscopisch kleine silica-bolletjes. Dit proces is in essentie hetzelfde als de lichtbreking van kleine waterbolletjes (regendruppels) in de lucht, waardoor de regenboog ontstaat. Dit proces treedt ook op in andere mineraalvariëteiten, zoals in iris-agaat (zie het artikel 'Iris-agaat: een iriserende variëteit' elders in deze Gea).

Boekbespreking

De vis die aan land kroop. De evolutie van gewervelde dieren in vogelvlucht. Jelle Reumer, 212 pag. Historische Uitgeverij, Groningen (2013). ISBN 9789065540393. Prijs € 25,00.

Wat is er zo bijzonder aan lopen, vliegen, zwemmen, kruipen en ademen? Wat is eigenlijk een vis? En waarom lijkt een koe meer op een dolfin dan op een paard? Deze vragen op de achterkant van het nieuwste boek van Jelle Reumer worden door hem onderhoudend en met gevoel voor humor besproken. Dit 21 hoofdstukken omvattende boekwerkje (14 x 21 cm) leest lekker weg, is prettig geschreven en omvat vele referenties naar dierlijk voedsel – vergroot zo je anatomische kennis, is het devies. Om één voorbeeld te noemen: '... als u binnenkort tijdens een maaltijd een gamba zit te pellen verwijderd u een exoskelet' (p. 27).

Het boek komt voort uit collegestof voor studenten van de Universiteit Utrecht, waar Reumer bijzonder hoogleraar paleontologie is. De onderliggende boodschap is meteen duidelijk: niet de mens, maar vogels zijn de kroon op de schepping. Daarnaast is de mening van de auteur dat 'toeval' het toverwoord in de evolutie is. Het ontrafelen van verwantschapsrelaties van fossielen, met name van gewervelden, wordt prima uit de doeken gedaan. De illustraties zijn goed op een aantal uitzonderingen na, bijvoorbeeld die op p. 103 (niet echt scherp) en p. 117 (klopt dat rechter maatbalkje wel?). Her en der in de tekst komt een aantal stijlfouten voor en sommige namen zijn foutief gespeld (o.a. Osteichtyes, *Maastrichtidelphis*). Wat betreft de ontdekking van de Neanderthaler worden in het boek twee tijden genoemd (drie jaar vóór de publicatie in 1859 van Darwins *Origin of Species* en twee jaar erna, op resp. p. 23 en p. 159). Hoewel gesuggereerd wordt (p. 61), dat alle haaien vijf zichtbare kieuwopeningen hebben, is dat niet het geval. De Grauwe haai (*Hexanchus griseus*) heeft er zes, en de Spitssnuitzevenkieuwshaai (*Heptranchias perlo*) heeft er, inderdaad, zeven. Er zijn nog enkele andere soorten met meer dan vijf kieuwopeningen. Verder verzuimt de auteur te vermelden dat er óók in Zuid-Amerika een longvis voorkomt, naast de soorten in Afrika en Australië. De bewering dat gibbons een staart hebben (p. 158) is onjuist: die hebben ze niet!

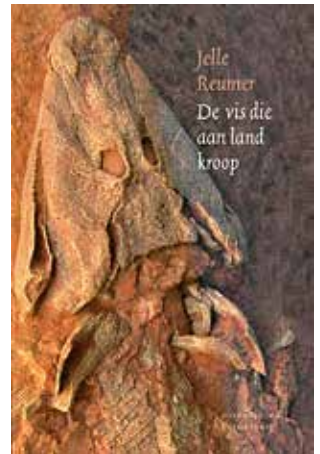
Serieuzere fouten komen ook voor in dit boek. Sommige beweringen zijn verwarrend, inmiddels achterhaald of gewoon niet waar. Om daarop nader in te gaan: bij het beeld van de eerste duidelijke voorouder van de gewervelde dieren moeten we ons een wormpje met een ruggenmergstreng en achter elkaar geschakelde spiersegmenten (myotomen) voorstellen. Het nu nog voorkomende Lancetvisje, o.a. in de Noordzee, voldoet in veel opzichten heel goed aan dat beeld en heeft (voor alle duidelijkheid) een veel primitievere anatomie dan een echte vis. Reumer noemt het Cambrische fossiel *Pikaia* (p. 29) uit de beroemde Canadese Burgess Shale en wijst terecht op de gelijkenis met het Lancetvisje. Maar een bladzijde verder (p. 30) is deze *Pikaia* ineens een larve van een zakpijp! Zakpijpen zien eruit als glazige theepotjes van enkele centimeters en leven in ondiepe zeeën. Het zijn kolonievormende organismen die zich vasthechten aan een substraat en zich dan dus niet meer kunnen verplaatsen. De zakpijplarve echter is heel bijzonder: vrij zwemend en met de anatomie van het hierboven genoemde 'wormpje met ruggenmerg'. Meer nog dan bij een Lancetvisje kan bij een zakpijplarve een structuur worden onderscheiden die het predicaat 'hersenen' enigszins verdient. Het larvestadium duurt slechts een paar uur en dan vinden de gedaanteverwisseling en aanhechting aan een substraat plaats. Van het ruggenmerg blijft niets over! Volgens een verouderde hypothese, die ook door Reumer wordt verkondigd (p. 30), stammen de gewervelde dieren af van een zakpijplarve die is blijven doorzwemmen. Leidende gedachte daarbij is de veronderstelling dat lancetvisjes méér met de gewervelde dieren verwant zijn dan zakpijpen. Vergelijkend DNA-onderzoek heeft echter uitgewezen dat dit niet het geval is. De lancetvisjes zijn juist

minder nauw verwant aan ons dan de zakpijpen. Dat betekent dat het vermogen tot voortbewegen de oudste eigenschap is en dat de bijzondere levenswijze van zakpijpen dus later is ontstaan en vanuit onze optiek een zijspoor van de evolutie is. Dat is dus precies het omgekeerde van wat de oude hypothese beweert.

Een belangrijke stap na het 'aan land kruipen' was het ontstaan van een ei met schaal, waardoor viervoeters bij hun voortplanting onafhankelijk werden van het water. Reumer gaat daar uiteraard op in en bespreekt ook de embryonale ontwikkeling van verschillende gewervelde dieren. Reptielen en vogelembryo's hebben behalve een functionele dooierzak met voedingsstoffen ook een soort afvalzak, allantoïs genaamd. Hierin komen de afvalstoffen uit de nieren terecht. In een latere fase spelen bloedvaten in het membraan van de allantoïs een rol bij de zuurstofvoorziening van het embryo. Bij zoogdieren heeft de allantoïs de functie van afvalzak verloren, maar wordt het membraan met bloedvaten ingebouwd in de navelstreng. Volgens Reumer (pp. 66, 67) kan een embryo zijn ontlasting (oftewel uitwerpselen, volgens Van Dale) kwijt in de allantoïs. Dat is absoluut onjuist. Een embryo poept niet! Ook is de omschrijving (p. 135) van de placenta (de verbindingzone tussen de navelstreng van een zoogdierembryo en de baarmoederwand) te kort door de bocht; ze gaat wel op voor Carnivora (vleesetende zoogdieren) en onevenhoevigen maar niet voor primaten, varkens en knaagdieren. De verhouding tussen vertebratenpaleontologie en moleculaire biologie die in het boek wordt gesuggereerd (p. 177) is toch echt anders. De prachtige oerwalvissen, gevonden door de Nederlandse geoloog Hans Thewissen, wijzen weliswaar op een verwantschap met evenhoevigen, maar de moleculaire biologie heeft aangetoond, dat walvissen in het bijzonder met nijlpaarden verwant zijn. Paleontologen werden zo gedwongen om anders naar oerwalvissen te kijken en vonden ook morfologische kenmerken die wezen op die verwantschap: overeenkomsten in de schedelelementen rond de gehoorgang. De moleculaire biologie hobbelt dus niet achter de paleontologie aan. Er is juist een interessant spanningsveld tussen die twee disciplines.

Afgezien van deze kritiekpunten is dit boek een aanrader. Dat is te danken aan de schrijfstijl van Reumer. De vraag 'Waar kom ik vandaan?' spreekt natuurlijk altijd tot de verbeelding en komt hier uitgebreid aan de orde. Dat vogels inderdaad heel belangrijk zijn en eigenlijk de meest succesvolle gewervelde dieren, blijkt wel uit hun nadrukkelijke aanwezigheid. Je ziet of hoort ze overal. Het is een verrassende gewaarwording en Reumer brengt het op bijna speelse wijze ter sprake. Het boek is een mooie inleiding tot de vertebratenpaleontologie, óók met een aantal voorbeelden van bijzondere fossielen van Nederlandse bodem (zoals de *Nothosaurus* van Winterswijk, en de mosasaurus *Prognathodon* van Maastricht). Van beide zeereptielen worden de prachtig bewaard gebleven schedels afgebeeld. Het boek is geschikt voor studenten en de gevorderde amateurpaleontoloog, allemaal 'doorgeëvolueerde kwastvinnige visen' die bladzijden omslaan met een 'voormalige borstvin', zoals Reumer het zo mooi verwoordt.

John W.M. Jagt



50^e Geologisch Evenement Amsterdam



19 oktober 2014 van 10.00 tot 17.00 uur

Amstelhal@Borchland, Borchlandweg 6-12, Amsterdam/Duivendrecht

JUBILEUM

Op 19 oktober wordt voor de 50e maal het Geologisch Evenement Amsterdam georganiseerd. 50 tentoonstellingen met uiteenlopende thema's, 50 beurzen en 3 locaties. Deze prestatie is slechts mogelijk geweest dank zij de inspanning van vele honderden vrijwilligers die elk met hun eigen inbreng en specialisatie hebben bijgedragen aan hoogwaardige Evenementen. Daaronder ook veel standhouders, vaak van 'het eerste uur', die met hun inzet en kennis een groot aandeel hebben gehad in de ontwikkeling van de geologie als hobby voor velen. Zonder al die medewerking zouden vijftig Evenementen niet mogelijk zijn geweest. Het vervult ons met grote dankbaarheid.

19 OKTOBER, EEN EVENEMENT VOL AFWISSELING

- Speciale aandacht voor de zelfzoekende verzamelaar door middel van tentoonstelling van de mooiste vondsten;
- Verzamelaarscafé: verzamelaars geven informatie over het zelf verzamelen van mineralen en fossielen;
- Internationaal jaar van de Kristallografie: Paul Tambuyser toont instrumenten, kristalmodellen e.d. (kristalmorfologie). 3D-animaties op de computer. En... Paul heeft een verrassing voor u in petto;
- Pyriet in alle vormen met bij behorende kristalmodellen worden tentoongesteld door Erik Vercammen;
- Schilderijtentoonstelling van Andree Roth uit Hamburg. Mineralen gezien door het oog van de kunstenaar;
- De eerste resultaten van de wedstrijd 'De vondst van het jaar'.

KINDERACTIVITEITEN

- Slijpactiviteit. Onder deskundige leiding kunnen kinderen zelf een mooie steen slijpen. GRATIS
- 'Kom in de tent', actieve miniworkshops over fossielen. GRATIS
- Kristalmodellen maken; knip, vouw en plak je eigen kristalmodel. GRATIS

GEA-MEDEWERKERS van Zand, Optische Petrologie, Micromounts, Mineraal-determinatie en Vereniging Gemma zijn weer aanwezig om te determineren, te demonstreren en voor het geven van advies. Verzamelt u dus edelstenen, mineralen of gesteenten kom dan naar het Evenement om onze experts te ontmoeten. U kunt er met al uw vragen over de hobby terecht.

STANDHOUDERS Ruim tachtig standhouders zorgen voor een breed aanbod op het gebied van mineralen, edelstenen, fossielen, gesteenten en sieraden. Er zit vast wel iets voor uw gading bij.

Alle activiteiten in één zaal, met ruime looppaden.

De Borchlandhal heeft een gezellig en goed restaurant. Familieleden die snel uitgekeken zijn kunnen zich uitleven op de bowlingbaan. Willen ze liever shoppen? De Arena-Boulevard is dichtbij.

Toegangsprijs. Volwassenen € 6,-; kinderen tot 12 jaar, onder begeleiding, gratis; donateurs € 4,-. Parkeren: € 3,- voor de hele dag!

Gratis shuttlebus vanaf NS-station Duivendrecht naar Borchland. Station Duivendrecht is vanaf ieder (Amsterdams) station bereikbaar, ook via de Amsterdamse metrolijnen.

Op onze site, www.gea-geologie.nl (klik op Evenement) staat uitgebreide informatie over de bereikbaarheid van het Evenement per openbaar vervoer en eigen vervoer.

Het Geologisch Evenement Amsterdam: ontmoetingsplaats voor 'stenen'-liefhebbers!

