

Speleogenese: het ontstaan van grotten.

Deel II: Grotten, maar geen karst

door Herman de Swart
hermandeswart@casema.nl

In het vorige artikel over speleogenese (in *Gea*, december 2013) hebben we gezien hoe grotten in kalkgesteente ontstaan als gevolg van uiteenlopende chemische en biologische processen. Kalksteengrotten (karstgrotten) krijgen veel aandacht, simpelweg omdat ca. 95% van de grotten op aarde zijn gevormd in kalkgesteente; ook toeristische grotten zijn meestal karstgrotten. Daarnaast bezoeken speleologen meestal karstgrotten. Bovendien staan karstgrotten wat hun lengte, diepte en volume betreft ook ruim bovenaan de ranglijst (zie tabellen). Dagelijks worden er nieuwe ontdekkingen gedaan; zo worden nieuwe grotten ontdekt en sneuvelen regelmatig de diepte- en lengte-reords.

Maar er is meer dan karstgrotten. Er zijn ook grotten in andere gesteenten dan kalk, en er zijn grotten in kalksteen die niet door oplossing of door bacteriën zijn ontstaan.

1	Mammoth Cave System	USA	Kentucky	643	124
2	Sistema Sac Actun (Nohoch Nah Chic)	Mexico	Quintana Roo	310	77
3	Jewel Cave	USA	South Dakota	267	192
4	Sistema Ox Bel Ha	Mexico	Quintana Roo	243	34
5	Optymistychna	Oekraïne	Ternopil	236	15
6	Wind Cave	USA	South Dakota	228	193
7	Lechuguilla Cave	USA	New Mexico	222	488
8	Hölloch	Zwitserland	Schwyz	200	938
9	Fisher Ridge Cave System	USA	Kentucky	197	108
10	The Clearwater System (Gua Air Jernih)	Maleisië	Sarawak	197	355

Tabel I. De langste grotten (resp. naam, locatie, lengte in kilometers, diepte in meters). In totaal zijn er nu 23 grotten bekend die langer dan 100 kilometer zijn. Bron: Bob Gulden, 2014.

1	Krubera (Voronja) Cave	Georgië	Abchazië	2197	16
2	Sarma	Georgië	Abchazië	1830	6
3	Ilyuzia-Mezhonnogo-Snezhnaya	Georgië	Abchazië	1753	24
4	Lamprechtsofen Vogelschacht Weg Schacht	Oostenrijk	Salzburg	1632	51
5	Gouffre Mirolda / Lucien Bouclier	Frankrijk	Haute-Savoie	1626	13
6	Reseau Jean Bernard	Frankrijk	Haute-Savoie	1602	20
7	Torca del Cerro del Cuevon (T.33)-Torca de las Saxifragas	Spanje	Asturië	1589	7
8	Sistema Huautla	Mexico	Oaxaca	1545	64
9	Shakta Vjacheslav Pantjukhina	Georgië	Abchazië	1508	5
10	Sima de la Cornisa - Torca Magali	Spanje	León	1507	6

Tabel II. De diepste grotten (resp. naam, locatie, diepte in meters, lengte in kilometers). In totaal zijn er nu 98 grotten dieper dan 1 kilometer bekend. Bron: Bob Gulden, 2014.

1	Sarawak Chamber (Lubang Nasib Bagus)	Maleisië	163.000	9.6 miljoen
2	Miaos Room	China	118.000	7.1 miljoen
3	Torca del Carlista	Spanje	87.000	niet bekend
4	Ghar-e-Dosar	Iran	81.500	niet bekend
5	Majlis al Jinn	Oman	58.000	4,2 miljoen
6	Titan Chamber	China	54.000	niet bekend
7	Cloud Ladder Hall	China	51.000	5.8 miljoen
8	Belize Chamber	Belize	49.000	niet bekend
9	Hong Meigui Chamber	China	48.000	niet bekend
10	Salle de la Verna	Frankrijk	43.000	3.6 miljoen

Tabel III. De zalen met het grootste volume en vloeroppervlakte (resp. naam, locatie, vloeroppervlakte in m², volume in m³). Bron: Mike Futrell, Ben Schwartz en Fabian Darne, 2013.

Discussie over definities

In de wetenschappelijke speleologie wordt al jaren gediscussieerd over de term *pseudokarst*. Onderzoekers die strikt in de leer zijn, beschouwen alle grotten die niet in kalksteen door corrosie gevormd zijn als 'pseudokarst'. Zoals de naam al aangeeft, lijkt pseudokarst wel op karst, maar is het dat niet. Voor andere onderzoekers hoeft een grot niet per se in kalkgesteente gevormd te zijn, als er maar sprake is van corrosie (het mag dus ook bijvoorbeeld in gips – zie onder het kopje evaporieten). Voor de volledigheid geef ik hier nogmaals de definitie van corrosie zoals in het vorige artikel is beschreven: water neemt kooldioxide op uit de lucht, vormt een zwak zuur (koolzuur H₂CO₃); dit zuur lost de kalk (CaCO₃) langzaam op, waarbij de calciumhydrogeencarbonaat-ionen (Ca²⁺ en 2HCO₃⁻) in de waterige oplossing worden opgenomen.

Voor andere onderzoekers bestaat de term pseudokarst simpelweg niet omdat deze niets zegt over het uiterlijk van het fenomeen en niets over de wijze van ontstaan. Er is in de *Union Internationale de Spéléologie* wel een commissie ingesteld voor pseudokarst. Deze houdt zich onder meer bezig met grotten in zandsteen en graniet, maar niet met grotten in vulkanisch gesteente of in ijs. Daar zijn weer aparte commissies voor. De definitie is dus volstrekt onduidelijk. Mijn persoonlijke mening is dat het geen geologische maar vooral een taalkundige discussie betreft.

Ook wordt er een onderscheid gemaakt tussen *primaire* en *secundaire* grotten, begrippen die vooral in de oudere literatuur voorkomen. Primaire grotten zijn tegelijk met het gesteente gevormd, zoals grotten in lava en in kalktuf. Secundaire grotten ontstaan pas (veel) *later* dan het gesteente zelf. Voorbeelden zijn karstgrotten in België, die voorkomen in kalkgesteente uit het Devoon en Carboon, maar zelf pas veel recenter zijn gevormd, in de laatste paar miljoen of honderdduizend jaar.

Grotten, maar geen karst

Ik zal hierna de verschillende typen van (niet-karst)grotten beschrijven aan de hand van het gesteente waarin ze voorkomen, of de wijze waarop ze zijn gevormd. De indeling primair/secundair is niet altijd van toepassing, omdat grotten in kalk zowel primair (kalktufgrotten) als secundair (karstgrotten, kustgrotten) gevormd kunnen zijn.

Niet-karstgrotten kunnen worden ingedeeld in *andere sedimentgesteenten* dan kalk, zoals dolomiet, gips, anhydriet, haliet of steenzout, kaliumzouten, zandsteen en conglomeraat. Daarnaast onderscheiden we niet-karstgrotten in stollingsgesteenten, zoals in graniet, carbonatiet (een magmatisch carbonaatgesteente) en grotten in metamorfe gesteenten, zoals kwartsiet.

Dolomiet

Bij dolomiet spelen alle processen een rol die ik in het eerste artikel over speleogenese heb beschreven.

Over het ontstaan van dolomiet, of calciummagnesiumcarbonaat $[CaMg(CO_3)_2]$ bestaan verschillende theorieën. Volgens een oude theorie wordt een deel van de calciumionen vervangen door magnesiumionen wanneer op de zeebodem afgezet kalkgesteente op zeeniveau komt te liggen; dit gebeurt (mede) onder invloed van zonlicht en warmte, vooral in de (sub)tropen. Recent is echter aangetoond dat anaerobe bacteriën hierbij een rol spelen. (Overigens is het verschil tussen dolomiet en kalksteen is eenvoudig te zien door er zoutzuur op te druppelen: kalksteen bruist reeds met koude zoutzuur; dolomiet bruist pas met verwarmde zoutzuur.)

In dolomietgesteente ontstaan ook grotten en andere karstverschijnselen onder invloed van H_2CO_3 , maar minder en langzamer dan in 'gewone' kalk. In een volgend artikel komt dolomiet onder 'oppervlakte-karstverschijnselen' uitgebreider aan de orde.

Grotten in evaporietgesteenten

Evaporieten zijn afzettingsgesteenten die gevormd zijn door indamping van zeewater, vaak onder tropische of subtropische omstandigheden, in lagunes of binnenzeeën. Voorbeelden van dergelijke recente milieus zijn de Dode Zee, en de Middellandse Zee toen die in het Messinien (ongeveer 6 miljoen jaar geleden) was afgesloten van de Atlantische Oceaan.

Voor het oplossen van de evaporietgesteenten gips $[CaSO_4 \cdot 2H_2O]$, anhydriet $[CaSO_4]$ en diverse natrium- en kaliumzouten is geen zuur nodig; water is voldoende. Maar ook hier geldt dat warm water en aangezuurd water het oplossingsproces aanzienlijk versnellen. De verkarsting in deze gesteenten is heftiger dan in kalk of dolomiet, maar daar staat tegenover dat de karstfenomenen sneller verdwijnen (afb. 1).



Afb. 1. Corrosie van gips op een los blok in een steengroeve in de Harz. Deze formaties van enkele decennia oud laten zien hoe snel dat proces verloopt. De uitstekende punten zijn enkele centimeters lang.

Bij anhydriet verloopt het proces vooral zo snel omdat dit zout eerst water opneemt en gips vormt $[CaSO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O]$. Hierdoor neemt het gesteente de helft in volume toe, waardoor het breken gaat vertonen en snel uiteenvalt. Gipsgrotten kunnen uiteindelijk grote systemen vormen. De

grootste is de in 1966 ontdekte Optymistychna Grot in Oekraïne, 230 kilometer lang en geheel ontstaan in een laag gips van slechts 20 meter dik. De van tv beroemde, in 2000 ontdekte Grot van de Kristallen (Cave of Giants) in de Naica-mijn in Mexico bevat welliswaar gipskristallen tot 12 meter lang, maar is een kalksteengrot.

Enkele grotten in gips, anhydriet en kalizout die een bezoek waard zijn wil ik hier noemen. Aan de randen van de Harz, in het oosten van Duitsland, zijn dikke lagen gips afgezet die voor een groot deel mooi verkarst zijn. De Jettenhöhle (600 meter lang, 9 meter hoog) ligt in het natuurgebied Gipskarstlandschaft Hainholz, bij Döna, waar tijdens de wandeling naar de Jettenhöhle ook fraaie oplossingsverschijnselen van gips aan de oppervlakte te zien zijn. Vlakbij ligt de toeristengrot Heimkehle, eveneens in gips en met een fraaie geologie, zoals grote zalen en mooie corrosievormen. Deze is ook historisch van betekenis want in de Tweede Wereldoorlog bevond zich in de grot een Duitse fabriek voor de productie van vliegtuigonderdelen.

In de Harz en het nabijgelegen Kyffhäusergebirge is trouwens nog een aantal grotten te bezoeken, de Iberger Tropfsteinhöhle bijvoorbeeld met siderietverkarsting, de Barbarossahöhle, in anhydriet en gips, en een aantal 'gewone' karstgrotten. Verder weg, in het zuiden van Spanje, bij Almería, ligt het spectaculaire natuurpark 'Karst en Yesos de Sorbas' (de gipskarst van Sorbas), met mooie oppervlakte karstformaties en meer dan duizend bijzondere grotten, sommige ook voor toeristen toegankelijk. Er is een bezoekerscentrum met veel informatie over gipskarst.

Een mooi en spectaculair voorbeeld van een grot in kalizout, in dit geval carnalliet $[KMgCl_3 \cdot 6H_2O]$, is de in 1980 ontdekte natuurlijke grot in de kalimijn ('Erlebnis Bergwerk') van Merkers (Thüringen), die na reservering te bezoeken is. Op 800 meter diepte ligt een ruimte met een volume van circa 4500 kubieke meter, met een indrukwekkende hoeveelheid steenzoutkristallen met kristalribben van meer dan een meter! De zoutkristallen zijn in het warme water gevormd toen dit langzaam afkoelde. De ondergrondse ruimte is gevormd door oplossing van warm water, afkomstig uit de vulkanische ondergrond. De grot is te bereiken na een afdaling met een lift tot -800 meter en een rit in een vrachtauto van 20 minuten (de mijn heeft een gangenstelsel van maar liefst 4600 km). In de grot is het 28 graden Celsius. In deze mijn lag in de Tweede Wereldoorlog een grote goudschat van de nazi's verstopt.

Grotten in zandsteen en kwartsiet

Bij de studie van zandsteengrotten is de discussie over 'pseudokarst' onvermijdelijk. De kwestie is dat zandsteengrotten soms op kalkgrotten lijken en er sprake is van ondergrondse afwatering. De vraag is of het nu karst is of niet?



Afb. 2. Het 'zandsteenlandschap' van het Boheems Paradijs (Tsjechië).

Het antwoord is: ja én nee. Ook al aan het aardoppervlak, in de 'zandsteenlandschappen' van bijvoorbeeld Klein Zwitserland in Luxemburg, het fascinerende rotslandschap bij Echternach en Berdorf (Müllerthal) of de fameuze zandsteengebieden in Tsjechië (Boheems Paradijs (afb. 2) en Boheems Zwitserland) en Duitsland (Saksisch Zwitserland), is goed te zien hoe zandsteen erodeert (of corrodeert). Voor die erosievormen, alveolen genaamd, zijn in de literatuur vele verklaringen te vinden (afb. 3). De meest voorkomende verklaring gaat uit van zoutafzetting tussen de zandkorrels in kust-, delta- en duingebieden, vele miljoenen jaren geleden. Het zout neemt vocht op, zet uit, en de zandkor-



Afb. 3. Erosie (of corrosie?) van zandsteen in Klein-Zwitserland, Berdorf (Luxemburg).

rels laten los. Wind en zwaartekracht doen de rest. Volgens sommigen volstaat de eroderende werking van wind. Maar kwartszand (de korrels of het uit kwarts bestaande cement) lost ook op, al gaat dat heel langzaam, en soms bestaat het cement tussen de zandkorrels niet uit kwarts, maar uit kalk, afkomstig van onder meer schelpen langs de kust. De kalk lost relatief gemakkelijk op. De zandkorrels raken los en zo kan er een grot ontstaan (afb. 4). In dit geval is er sprake van corrosie van kalk, en dus van karst, terwijl zandsteengrotten traditioneel tot pseudokarst worden gerekend. De laatste jaren wordt bij de vorming van zandsteengrotten ook een rol toebedeeld aan bacteriën (afb. 5).



Afb. 4. Grotjes in de zandsteen van de Sächsische Schweiz (Duitsland).

De langst bekende grot in *metamorfe* zandsteen is de Charles Brewer Grot in Venezuela, met een gangenstelsel van ca. 100 kilometer. Om het ontstaan van een dergelijk groot systeem te



Afb. 5. De Grot van Postojna (niet die in Slovenië maar in Tsjechië) in zandsteen. De grot meet 15 bij 30 m en is 2 m hoog.

verklaren, zijn allerlei theorieën geopperd waarbij alle processen die ik in het eerste artikel heb behandeld, zoals hydrothermaal water, vorming van laterieten en alterieten of fantomisatie en de werking van bacteriën voorbijkomen. Ook in kwartsiet, sterk metamorfe zandsteen, komen grotten voor die geheel en al ontstaan zijn door corrosie van het gesteente, een langzaam maar gestaag proces. In 2009 zijn spectaculaire grotten ontdekt in de tafelbergen (Tepuis) van Venezuela, waarvan de Guacamaya Cave met ruim een kilometer lengte de tot nu toe grootste grot in kwartsiet is.

Grotten in conglomeraat

Ook in conglomeraat ('puddingsteen') komen grotten voor. De Trou Ozer bijvoorbeeld, in Bévercé nabij Malmédy (België), is geheel en al gevormd in Poudingue de Malmédy, een fossiele rivierafzetting uit het Perm. De grot is 500 meter lang en 70 meter diep en begint met een put van 20 meter, waar je afdalt tussen zandsteenkeien tot wel 40 cm doorsnede die met kalkcement zijn 'vastgekit', en soms zijn losgekomen. Dit verklaart het ontstaan van de grot. Aangezuurd water is hier via diaklazen naar binnen gesijpeld en heeft het cement opgelost.

Grotten in graniet

Graniet, een stollingsgesteente, ontstaat als in de aardkorst magma langzaam afkoelt. Bij die afkoeling vormen zich barsten in het gesteente en treedt exfoliatie op: als de druk van het bovenliggende gesteente door erosie afneemt, vormen zich 'schilfers' van graniet (afb. 6). In beide gevallen is er ruimte voor binnendringend water en kan de graniet ververen. Ook aan het aardoppervlak verweert het gesteente, eerst lokaal, een proces dat erg op fantomisatie lijkt en waarbij ook microben een rol spelen, vervolgens volgens bepaalde patronen (sferoidale vertering, waarbij *wolzakken* ontstaan). Er vormen zich klippen (of 'tors') en uiteindelijk 'rivières de rochers', zoals de Fransen het noemen.



Afb. 6. Een mooi voorbeeld van exfoliatie van graniet, Castelo da Furna, Valença (Portugal).

De ruimte die ontstaat bij exfoliatie en de vorming van wolkzaken leiden tot grotvorming, vooral putten en gangen, soms kilometers lang, tussen de blokken in de rotsrivieren. In Galicië en ten oosten van Toulouse (Sidobre) zijn daarvan prachtige voorbeelden te vinden. In graniet kunnen ook 'tafoni' ontstaan (enkelvoud tafone, waarschijnlijk van het Siciliaans voor 'venster'): niet al te grote 'kamertjes'. Dit gaat als volgt: langzaam verweert door vocht, wind en warmte het graniet als het ware omhoog; het losse ma-



Afb. 7. De 'geleerden' discussiëren over het ontstaan van deze granietgrot, een tafone in Galicië (Spanje) tijdens het internationale pseudokarstsymposium in 2012 in Tui (Spanje).

teriaal valt op de bodem en de tafone wordt steeds groter. In het plafond zijn komvormige alveolen te zien (afb. 7). Tijdens een congres in Galicië in 2012 werd geopperd dat bacteriën hierbij een rol zouden kunnen spelen. Dat is niet zo vreemd omdat bacteriën ook verantwoordelijk zijn voor de vorming van afzettingen in granietgrotten: druipsteen, echter niet van kalk! In een volgend artikel ga ik hier dieper op in. Een tweede dieptegesteente dat ik in dit verband wil noemen is carbonatiet. Heel zelden komt carbonatiet ook als uitvloeiingsgesteente voor. Omdat carbonatiet in feite een kalkgesteente is, kunnen op min of meer 'traditionele' wijze karstfenomenen ontstaan.

Grotten in travertijn of kalktuf

Rivier- of regenwater dat over kalk stroomt kan die kalk oplossen en zo grotten of andere karstverschijnselen vormen. Uit dat water kan ook weer kalk neerslaan, als druipsteen bijvoorbeeld wanneer het in grotten gebeurt, of als travertijn of kalktuf aan de oppervlakte. Kalktuf wordt ook wel tuf genoemd, maar om verwarring met de vulkanische afzetting met dezelfde naam te voorkomen is het beter om over kalktuf te spreken.

Kalktufafzettingen zien we vaak bij de bronnen van rivieren in karstgebieden waar, zodra het water in de buitenlucht komt, CO₂ ontwijkt en CaCO₃ neerslaat (het omgekeerde proces van corrosie dus dat een evenwichtsreactie is). Bij dit ontwijken van CO₂ en neerslaan van kalk zijn vooral bacteriën de aanjagers van het proces, maar spelen ook planten, zoals mossen en algen, een rol (afb. 8). Op deze wijze kunnen soms indrukwekkende formaties ontstaan waarin af en toe ook grotten gevormd worden, tegelijk dus met de afzetting van kalk, een prachtig voorbeeld van primaire grotten.

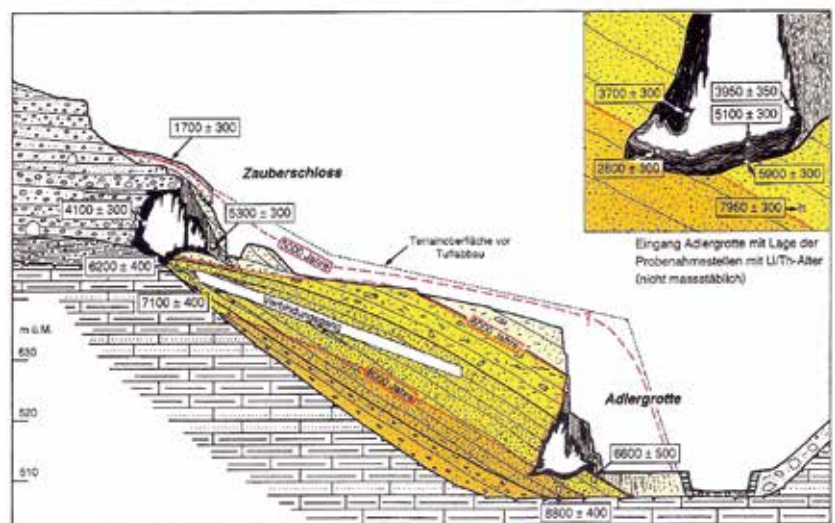


Afb. 8. Kalktufwaterval. De begroeiing en de (niet zichtbare bacteriën) nemen CO₂ uit het water op, waardoor de kalkneerslag en de formatie groeit. Bad Urach (Duitsland).

Tot de grootste grotten in kalktuf, die ook voor toeristen open staan, behoren de Höllgrotten bij Baar, in Zwitserland (niet te verwarren met het Hölloch, niet ver daar vandaan en de grootste karstgrot van Europa). De 500 meter lange Höllgrotten zijn zo'n 6000 jaar geleden ontstaan, tijdens de vorming van het kalktufmassief. Oorspronkelijk bedroeg dit massief zo'n 200.000 kubieke meter; inmiddels is een deel afgegraven als grondstof voor bouwsteen. De afbeelding (afb. 9) laat goed zien hoe de kalktufafzetting als het ware het plafond van de grotten vormt.

Gletsjergrotten

Ook in gletsjers treffen we grotten aan. Smeltwater dat over de gletsjer stroomt, verdwijnt via spleten ('moulin's' of smeltwaterspleten) en stroomt meestal tussen de gletsjer en de ondergrond verder, tot het uiteindelijk bij het gletsjerfront (het Engelse 'snout' is natuurlijk een veel mooier woord) als gletsjerbeek weer tevoorschijn komt. Onderweg doet het smeltwater het gletsjerijs lokaal smelten waardoor zich grotten kunnen vormen. Deze veranderen voortdurend van vorm doordat het ijs veel gemakkelijker smelt dan dat gesteente oplost, maar ook omdat gletsjers voortdurend in beweging zijn, met stroomsnelheden tot wel 200 meter per jaar. Vaak is in het gletsjerfront een grotere grot te zien omdat de temperatuur van de buitenlucht van invloed is op de grotvorming (afb. 10).



Afb. 9. Een doorsnede door de kalktufafzetting met de Höllgrotten bij Baar (Zwitserland). Bron: Georg Wyssling et al., Die Höllgrotten bei Baar (Kanton Zug), Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 145/1: 13-30, 2000.

Een andere benaming voor grotten in gletsjers is 'ijsgrotten'. Op zich is dat niet onlogisch, maar de term ijsgrot kan beter gereserveerd worden voor grotten waarin ijs is afgezet.

Bijzondere gletsjergrotten zijn onder meer te vinden op IJsland en Antarctica, waar gletsjers op vulkanen liggen en het ijs aan de onderzijde door de warmte van de vulkaan smelt. De grotten van de Mount Erebus (de meest zuidelijke actieve vulkaan ter wereld) op Antarctica zijn beroemd, maar vanzelfsprekend weinig bezocht.



Afb. 10. Gletsjergrot in het gletsjerfront van de Meije-gletsjer, Massif des Écrins (Frankrijk).

Abrasiegrotten, brandingsgrotten of kustgrotten

Abrasiegrotten, brandingsgrotten of kustgrotten zijn ontstaan door de eroderende werking van de branding, in vaak steile kustgebieden. Abrasie is mechanische erosie: de branding kan door een schurende werking van zand en grind kusten aanzienlijk ondermijnen en zelfs doen instorten. Zo kunnen omvangrijke grotten ontstaan in allerlei (of misschien wel alle) gesteenten. De branding aan oceaankusten kan een extreem effect hebben, zoals op de Shetland Eilanden, waar de Atlantische Oceaan met grote kracht op de kust beukt. Daar vinden we niet alleen tot op grote hoogte op de kust geworpen grote blokken, maar ook brandingsgrotten van tientallen meters lang en hoog in Devonische ignimbriet, ooit afgezet door een 'pyroclastic flow' (gloedwolk) ten tijde van actief vulkanisme.

De beroemdste grot is Fingal's Cave op Staffa, een eilandje aan de Schotse westkust (Binnen-Hebriden), die bestaat uit prachtige zeshoekige basaltzuilen (afb. 11). De grot is ook beroemd vanwege het bezoek van Felix Mendelssohn Bartholdy in 1829, waarbij hij zo onder de indruk raakte van de (echo in de) grot dat hij naar aanleiding hiervan zijn *Hebriden Ouverture* schreef, die dan ook als de *Fingal's Cave Ouverture* bekend staat. Fingal's Cave is met een avontuurlijke bootreis vanaf het eiland Mull te bereiken. De naam Fingal dankt de grot aan de reus uit de Keltische mythologie die voor die basaltzuilen zorgde, en ook voor die van Giant's Causeway in Noord-Ierland, het imposante resultaat van Vroeg-Tertiair vulkanisme.

Kustgrotten komen niet alleen voor langs zee- of oceaankusten, maar ook langs rivieren. Dat veroorzaakt soms spraakverwarring. De grotten benedenstrooms van de Niagara Falls zijn een bekend voorbeeld. Ook niet alle grotten aan de kust worden tot de kustgrotten gerekend. Zo zijn de grotten langs de Noord-Franse kust bij *Étretat* en *Fécamp* 'gewone' karstgrotten. Ze zijn bij het ontstaan van het Nauw van Calais, zo'n 12.000 jaar geleden, en het daaropvolgende afkalven van de wanden, als het ware afgesneden. Dat verklaart waarom we ze nu in de kliffen zien liggen. Om het nog ingewikkelder te maken: vaak is er bovendien sprake van een combinatie van ontstaansprocessen. Zo vinden we grotten aan de Spaanse noordwestkust waar zowel sprake is van corrosie door rivierwater (klassieke speleogenese), mengcorrosie van zoet rivierwater en zout zeewater en abrasie (golfeosie) (afb. 12).



Afb. 11. Staffa's Cave op het eiland Staffa (Schotland) in basalt.

Tektonische grotten en talus- of hellinggrotten

Soms zijn grotten het restant van ingestorte rotswanden in allerlei gesteenten; dit noemen we talusgrotten of hellinggrotten. We zagen dit fenomeen al eerder bij het ontstaan van granietgrotten. Het zou correcter zijn zo'n grot geen 'granietgrot' of 'talusgrot' te noemen, maar een 'talusgrot in graniet'. Ook op grotere schaal kunnen bij (tektonische) bewegingen in de aardkorst grotten ontstaan, die we daarom tektonische grotten noemen. Tektoniek veroorzaakt ook vaak barsten en diaklazen in het gesteente, waarlangs het water binnendringt en er corrosie kan optreden en bacteriën hun weg kunnen vinden. Ook karstgrotten hebben dus vaak hun eerste begin aan tektoniek te danken.



Afb. 12. De grot in kalksteen aan de Cantabrische kust (Spanje), waar drie processen tegelijk een rol spelen.

Losse sedimenten

In allerlei min of meer losse sedimenten als klei of löss of morenepuin kan ook, dikwijls door stromend water, 'een natuurlijke ruimte die voor de mens toegankelijk is' ontstaan - dat is de meest gebruikte definitie voor een grot. Maar meestal zijn die holtes ook weer snel verdwenen en voor speleologen niet zo interessant. Slechts af en toe wordt over dit type grotten gepubliceerd. (Overigens zijn de mergelgrotten in Limburg geen grotten, maar onderaardse groeves en is het gesteente geen mergel maar kalksteen of calcareniet.)

Lavagrotten of vulkaangrotten

Ten slotte noem ik grotten in vulkanisch gesteente, na karstgrotten de meest voorkomende grotten op aarde (en trouwens de meest voorkomende op de Maan en Mars).

Het merendeel van de vulkaangrotten zijn 'lavatubes' of lavatunnels. Deze worden gevormd tijdens vulkanische uitbarstingen, wanneer een lavastroom uitvloeit en de lava aan de buitenkant afkoelt en stolt. De hete binnenkant van zo'n stroom blijft echter vloeibaar en stroomt verder, zodat een tunnel ontstaat. De warme stroom koelt door het isolerende 'dak' langzamer af dan aan de buitenlucht; dankzij deze tunnels kan de lava dan ook veel verder stromen dan wanneer er geen tunnels gevormd zouden

zijn. Het potentiële gevaar van ver reikende lavatunnels is een van de redenen waarom er aan lavatunnels zoveel onderzoek wordt gedaan (afb. 13).

Zo is de Etna op Sicilië vooral een bedreiging voor de stad Catania, op zo'n 20 kilometer afstand, omdat er lavatunnels gevormd kunnen worden. De vloeibare, hete lava in zo'n tunnel erodeert (vooral door opsmelten) ook de onderliggende lagen, waardoor de stroom zich kan verdiepen en soms de onderliggende, oudere, tunnels aansnijdt. Op die manier kan een complex stelsel van gangen ontstaan. De Cueva del Viento-Cueva del Sobrado op Tenerife (Canarische Eilanden, Spanje) is zo'n ingewikkeld systeem van zalen en gangen. Met een totale lengte van 17 kilometer is hij de langste vulkanische grot van Europa. De langste lavatunnel van de wereld, met ruim 65 kilometer, is de Kazamura Cave op Hawaï. Deze is 1100 meter diep (het verschil tussen het hoogste en het laagste punt) en loopt over de



Afb. 13. Lavatunnel op IJsland waarvan het plafond is ingestort zodat de grot toegankelijk is. De oorspronkelijke lavastroom is nog goed te herkennen. Foto: Jan-Paul van der Pas.

helling van de vulkaan, wat het grote hoogteverschil verklaart. Het plafond is – zoals bij de meeste lavatunnels – nergens dikker dan enkele meters.

Wanneer het dak van zo'n tunnel plaatselijk instort, is de grot toegankelijk. Op de Canarische Eilanden wordt zo'n opening *jameo* genoemd. De *jameos* van de spectaculaire lavatunnel van de vulkaan Corona – de grootste vulkaan in het noorden van het eiland Lanzarote – worden gebruikt als ingangen tot de toeristengrot Cueva de los Verdes en een cultuurcentrum met concertzaal, tentoonstellingsruimte en restaurant (Jameos del Agua). De Corona-tunnel, van in totaal acht kilometer, loopt ook nog enkele honderden meter onder de zeebodem door, de Tunel de la Atlántida. Dit wijst op een lagere zeespiegel ten tijde van het ontstaan van de vulkaan, rond 4500 jaar geleden. De Atlántida is een bijzonder natuurlijk biologisch laboratorium voor de studie van grot dieren (afb. 14).

Naast lavatunnels treffen we in vulkanen nog een drietal andere typen van grotten aan. Zo zijn er de 'leeggelopen' kraterpijpen, die soms meer dan honderd meter diep zijn. Op IJsland is recent de Thrihnukagigur-vulkaan toegankelijk gemaakt, met een soort glazenwassersgondel voor (rijke) toeristen. Speleologen kunnen in dit grottype onder meer op de Canarische Eilanden spectaculaire afdalingen maken. De abrasiegrotten in vulkanisch gesteente zijn al eerder aan de orde geweest. Ten slotte zijn er nog de kleinere, abri-achtige grotjes, die op de Canarische Eilanden en de Azoren vaak als geitenstallen gebruikt worden. Ze danken hun ontstaan aan grote, in het gesteente opgesloten gasbellen. Als zo'n gasbel door erosie wordt aangesneden, is de grot toegankelijk.

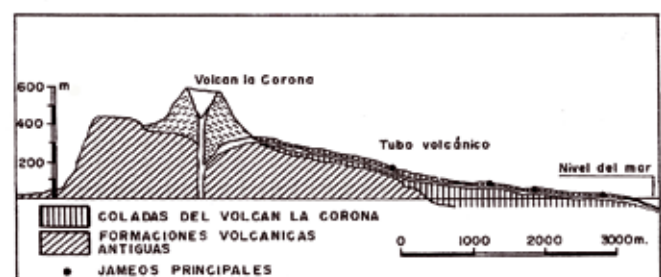
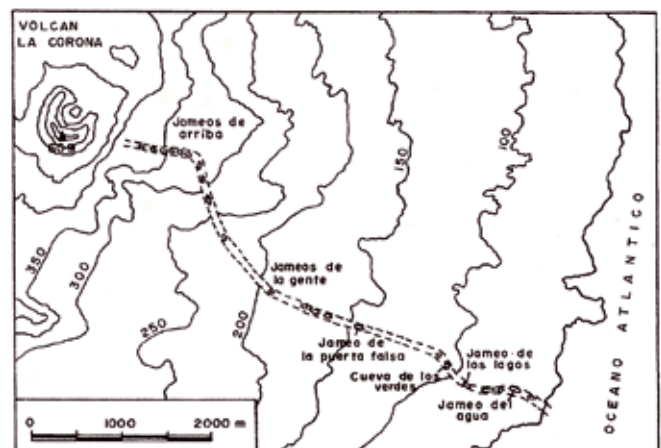
Foto's van de auteur, tenzij anders vermeld.

Literatuur

- Zie voor algemene literatuur over de geologie van grotten en karst het artikel in het vorige nummer, *Gea* december 2013, vol. 46, nr. 4, pag. 99; in het bijzonder de beide encyclopedieën.
- Over gipsgrotten: Alexander Klimchouk, David Lowe, Anthony Cooper, and Ugo Sauro (Eds) *Gypsum Karst of the World*, International Journal of Speleology, volume 25, number 3-4, 1996
- Over zandsteen landschappen en -grotten: Robert W. Young, Robert A.L. Wray and Ann R.M. Young *Sandstone Landforms*, Cambridge University Press, Cambridge, 2009
Handreij Härtel et al. (Eds) *Sandstone Landscapes*, Academia, Praha, 2007.
- Over granietlandschappen en -grotten: Charles Rowland Twidale and Juan Ramón Vidal Romani *Landforms and Geology of Granite Terrains*, CRC Press, Boca Raton Fl., 2005
- Over kalktuf (travertijn): H.M. Pedley and M. Rogerson (Eds) *Tufas and Speleothems; Unravelling the Microbial and Physical Control*, The Geological Society, Special Publication 336, London, 2010
Allan Pentecost *Travertine*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2005
- Over kustgrotten (niet alleen over karstgrotten, hoewel de titel anders suggereert): Michael J. Lace, John E. Mylroie (Eds) *Coastal Karst Landforms*, Springer, Dordrecht, 2013
- Over vulkaangrotten bestaat helaas (nog) geen standaardwerk. De eerder genoemde encyclopedieën geven echter veel informatie. Desgewenst stuur ik geïnteresseerde lezers een lijst van recente artikelen en congres-proceedings.

Internet (bronnen van de tabellen en suggesties)

- www.caverbob.com
- http://fabien.darne.free.fr/speleo/grandes_salles/index.html
- www.showcaves.com (een goede en complete website over toeristische grotten)



Afb. 14. De La Corona-tunnel met de Cueva de los Verdes, Lanzarote, Canarische Eilanden, Spanje.