

Speleogenese: het ontstaan van grotten

Geologie of biologie?

door Herman de Swart
hermandeswart@casema.nl

In enkele artikelen zal ik aandacht besteden aan de nieuwste inzichten in de geologie van grotten. Hoe grotten ontstaan is algemeen bekend: rivier- en regenwater lossen kalk op. Maar er is meer over te vertellen (zie ook Gea 1982/1). De wetenschap staat niet stil. In dit eerste artikel ga ik in op de verschillende wetenschappelijke theorieën over *speleogenese*, het ontstaan van grotten, in dit geval kalksteen grotten in karstgebieden. Om de theorieën over het ontstaan van grotten in de tijd te kunnen plaatsen, heb ik ervoor gekozen hier een historisch overzicht te geven (afb.1).

Karstgebieden

Ongeveer 10% van het landoppervlak van onze aarde bestaat uit kalkgesteenten. Kalkgesteenten bestaan uit op de zeebodem neergedaalde skeletjes van zeedieren (zoöplankton, schelpen enz.) of plantaardig materiaal, voornamelijk algen (fytoplankton); daarnaast slaat in zeewater opgeloste kalk neer (chemische sedimenten). Ook kan kalksteen uit koralen en koraalriffen bestaan. Bij gebergtevorming ten gevolge van platentektoniek worden de zeebodems 'opgetild' en vormen ze gebergten, zoals de Alpen, de Pyreneeën, de Himalaya of de Ardennen.

Kalkgesteenten hebben twee belangrijke eigenschappen:

- het zijn afzettingsgesteenten en zijn dus meestal gelaagd; tussen de lagen bevinden zich *laagvoegen*. Door tektonische bewegingen bij gebergtevorming ontstaan in het gesteente bovendien breuken (waar het gesteente aan beide zijden van de breuk is verplaatst) of diaklazen (barsten in het gesteente zonder verplaatsing). Laagvoegen, breuken en diaklazen zijn relatief zwakke zones in het gesteente.
- kalkgesteenten zijn oplosbaar.

Deze twee eigenschappen hangen direct samen met het begrip karstverschijnsel. Karst is tevens de naam van een gebied in Slovenië, in het voormalige Noordwest-Joegoslavië, zo ongeveer tussen Triëst en Ljubljana. Daar werd in de vorige eeuw al veel aandacht aan deze verschijnselen geschonken. Het gebied vertoont een aantal specifieke kenmerken. Grotten, dolinen, karren en ondergrondse afwatering zijn daarvan de meest karakteristieke; wanneer deze kenmerken elders voorkomen, wordt zo'n gebied daarom een karstgebied genoemd. De streek in Slovenië is nog steeds een belangrijk centrum van onderzoek naar karstvorming, zoals in Postojna, waar een uniek instituut voor grot- en karstonderzoek gevestigd is.

Erosie en oplossing van kalk

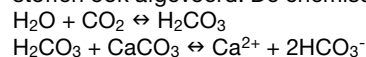
Aanvankelijk dacht men dat grotten - grotten in kalksteen (karstgrotten) - ontstaan door erosie, zoals ook bovengrondse rivieren zich in de ondergrond insnijden. Als een grotgang voldoende groot is, kunnen er blokken van het plafond vallen, en



Afb. 1. Trou Belvaux, waar de Lesse verdwijnt en ondergronds verder stroomt in de Grotten van Han (Han-sur-Lesse, België).

kan er zelfs een z.g. blokkenstort ontstaan. Ondergrondse rivieren kunnen dit materiaal weer afvoeren. Nu weten we dat erosie zeker een rol speelt, maar niet de hoofdrol!

In de tweede helft van de 19^e eeuw verschijnen de eerste publicaties waarin wordt aangetoond dat het niet (of niet alleen) om erosie gaat, maar om oplossing van de kalk in water, en dat kooldioxide uit de lucht daarbij een belangrijke rol speelt. Water (H₂O) neemt kooldioxide (CO₂) 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. We noemen dat corrosie. In stromend water worden de opgeloste stoffen ook afgevoerd. De chemische reactie is als volgt:



De pijltjes geven aan dat het om een evenwichtsreactie gaat, waarbij de omgekeerde reactie de vorming van druipsteen beschrijft: uit het water ontwijkt koolzuurgas en kalk slaat in de vorm van calciet of aragoniet neer. Het water is in het geval van grot- en karstvorming regenwater, smeltwater van sneeuw of ijs, rivierwater, of grondwater, dat het gesteente binnendringt via breuken, diaklazen of laagvoegen, en het gesteente dan langzaam oplost. Wordt het gesteente aan de oppervlakte opgelost, dan worden bijv. karren ('lapiaz') gevormd, of oplossingsdolines. Samen met grotten noemen we dat 'karstverschijnselen'. Is oppervlaktewater, water in de bodem of grondwater verantwoordelijk, dan spreken we van *epikarst*, en *epigenetisch* of

hypergenetisch gevormde grotten. Door onderaardse rivieren, en op het niveau van de grondwaterspiegel, ontstaan door stromend water *vadose* grotten, dieper in het grondwater ontstaan *freatische* gangen. Wanneer de grondwaterspiegel daalt door insnijding van rivieren 'buiten', dan kan zich in een freatische gang een vadose stroom insnijden, en kan er een zogenaamd sleutelgatprofiel ontstaan. Veel van de *river caves* zijn op die wijze ontstaan. Speelt in het vaste gesteente grondwater dat vanuit de diepe ondergrond opstijgt de hoofdrol (worden de grotten dus van onderaf gevormd), dan noemen we dat *hypogenetisch* gevormde grotten. Dan zijn ook dikwijls andere chemische processen verantwoordelijk. Ik geef daar later enkele voorbeelden van. Uiteraard spelen beide processen in de loop van de tijd dikwijls samen een rol bij de vorming van grotere grottenstelsels.

In het geval van *paragenese* wordt de grot ook van onderaf gevormd, echter niet door water uit de diepe ondergrond, maar door langzaam stromend water dat op de bodem sediment afzet; hierdoor treedt alleen nog corrosie van het plafond op. De gang 'groeit' dus naar boven, maar er is wel sprake van *epigenese*! (In de diverse taalgebieden, en door verschillende auteurs, worden overigens vaak afwijkende definities voor al deze begrippen gebruikt.) Ook water dat op de wanden of het plafond van grotten condenseert en CO₂ uit de lucht in de grot opneemt, kan de kalk oplossen. We spreken dan van *condensatiecorrosie*. De huidige CO₂-concentratie is 390 ppm (parts per million). De toename van kooldioxide sinds de industriële revolutie is ongunstig voor het klimaat, maar wel bevorderlijk voor grotvorming! Overigens komt de meeste CO₂ die voor het ontstaan van grotten verantwoordelijk is uit bodems; in humus komt door rottend plantenmateriaal – de omzetting van organische stof door bacteriën – tot wel duizend keer zo veel CO₂ voor!

Mengcorrosie

Hoewel oppervlaktewater al snel verzadigd is met kalk en CO₂, vinden we op grote diepte ook grotten. De indrukwekkende zalen in het Hölloch in Zwitserland liggen op bijna een kilometer onder het aardoppervlak. Dat was voor de Zwitserse geograaf Alfred Bögli de aanleiding om een alternatieve verklaring voor grotvorming te zoeken. Hij vond een verklaring in het Hölloch, waar hij veel onderzoek deed. In 1964 publiceerde hij zijn theorie onder de titel *Misschungscorrosion* (mengcorrosie, afb. 2). Zijn theorie komt in essentie hierop neer: wanneer twee verzadigde oplossingen, die iets verschillen in chemische samenstelling

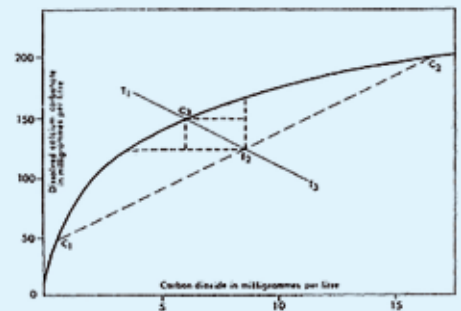


Afb. 2. Een mooi voorbeeld van mengcorrosie in het Hölloch (Muotathal, Zwitserland).

Mengcorrosie: een voorbeeld in getallen

In een horizontale laagvoeg op 800 meter diepte bevindt zich verzadigd water met een CO₂-concentratie van 1 mg/l, waarbij 50 mg/l kalk is opgelost (punt C₁ in de grafiek). In een verticale diaklaas is verzadigd water met 17 mg/l CO₂ en 200 mg/l opgeloste kalk (punt C₂). Als die laagvoeg en diaklaas elkaar kruisen, mengt het water (punt T₂), met dus een (gemiddelde) concentratie CO₂ van 9 mg/l, en een hoeveelheid opgeloste kalk van 125 mg/l. De verzadigingskromme verloopt echter niet lineair, volgens een rechte lijn, maar volgens een kromme lijn. Voor de oplossing van 125 mg/l kalk is in theorie slechts 3 mg/l CO₂ nodig, d.w.z. er komt dus 9 min 3 = 6 mg/l CO₂ vrij. Een deel daarvan zal in oplossing blijven, 3 mg/l, maar de resterende 3 mg/l is beschikbaar voor het wederom oplossen van CaCO₃. Er ontstaat dan een nieuwe evenwichtssituatie (punt C₃), waarbij 150 mg/l kalk in oplossing is. Er wordt dus 150 min 125 = 25 mg/l kalk nieuw opgelost. En zo vindt, op grote diepte, door het mengen van twee verzadigde oplossingen, toch opnieuw corrosie plaats, en kunnen grote gangen en zalen ontstaan. De mate van verzadiging is overigens druk- en temperatuurafhankelijk (hoe hoger de druk en/of hoe lager de temperatuur, des te meer CO₂ in oplossing) maar de hellingshoek van de lijn T₃ - T₁ blijft gelijk.

(afbeelding naar Bögli 1978)



en/of druk, elkaar treffen, kan er opnieuw corrosie plaatsvinden. Ook langs kusten kan een vergelijkbare mengcorrosie plaatsvinden door menging van (zout) zeewater en (zoet) rivier- of regenwater. Dit proces is verantwoordelijk voor de vorming van veel kustgrotten in kalksteen. Veel onderzoek hiernaar is gedaan op de eilanden van de Bahama's, die ontstaan zijn in recente koraalkalken. Maar ook langs bijv. de kust van Noordwest-Spanje komen grotten voor waar ten minste twee processen bij hun ontstaan een rol hebben gespeeld: 'gewone' corrosie en mengcorrosie.

Lithofagen of 'steenretertjes'

In 1968 publiceerde Robert Garcet zijn '*L'Origine des Cavernes*' over het ontstaan van de grotten (afb. 3). Volgens hem zijn grotten niet ontstaan als gevolg van geologisch processen, maar door kleine diertjes die de kalk wegraten. Nu was Garcet een bijzondere man met bijzondere ideeën. Hij bouwde in zijn woonplaats Eben-Emael eigenhandig een toren van vuursteen, de toren van Eben-Ezer, een fraai monument. Hierin stelde hij zijn vondsten tentoon, een fraaie collectie fossielen van de mosasaurus bijvoorbeeld, maar ook werktuigen van 'de mens uit het Tertiair' (maar onze eerste voorouders verschenen pas tientallen miljoenen jaren later!) Garcet, en zeker zijn boek, werden dan ook begrijpelijkerwijs niet helemaal (of beter: helemaal niet) serieus genomen. Maar ruim dertig jaar later vraagt Michael Ray Taylor in zijn fascinerende boek '*Dark Life*' zich – goed onderbouwd – af hoeveel geologie eigenlijk biologie is! (Zie onder het kopje Bacteriën)

Siderietverwerking

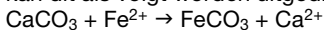
Stephan Kempe beschrijft in 1975 een tot dan niet eerder ont-



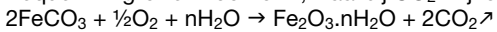
Afb. 3. De omslag van het boek van Robert Garcat met zijn idee van 'steenvretertjes'.

dekt proces dat hij in de Iberger Tropfsteinhöhle bestudeert. De Iberger Tropfsteinhöhle is een (voor toeristen toegankelijke) kalksteengrot in de Harz (Duitsland) die in de 19^e eeuw ontdekt werd door mijnwerkers op zoek naar ijzererts. Kempe ontwikkelde de theorie waarbij

ijzererts verantwoordelijk is voor het ontstaan van grotten, of op z'n minst van deze grot: hierbij zou siderietverwerking een belangrijke rol spelen. Tijdens de vorming door opheffing van het Harzgebergte infiltreren ijzerrijke oplossingen de diaklazen in de kalk, waarbij de calciumionen worden vervangen door ijzerionen en sideriet (FeCO_3) wordt afgezet; in een chemische formule kan dit als volgt worden uitgedrukt:



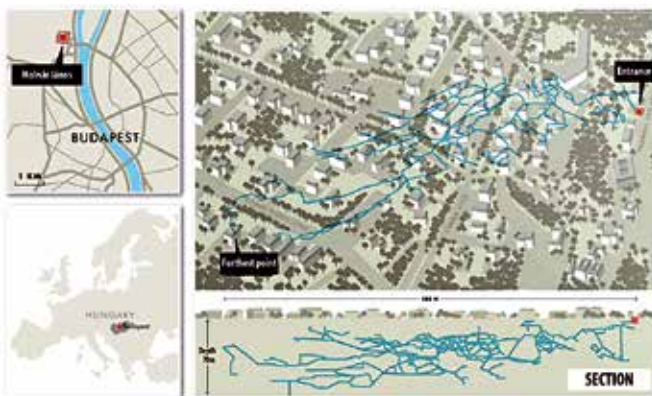
Later kan sideriet omgezet worden in goethiet ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), dat frequent in grotten voorkomt, waarbij CO_2 vrijkomt:



Vervolgens corrodeert de vrijgekomen CO_2 op de gebruikelijke wijze, via H_2CO_3 , de kalk. In de Iberger Tropfsteinhöhle is dat goed waar te nemen. Zowel sideriet als goethiet worden als ijzererts gewonnen, en beide mineralen zorgen voor de roestbruine kleur van verweerde kalksteen.

Hydrothermale karst

Onder de stad Boedapest bevindt zich een hele reeks indrukwekkende en grote grotten (zowel boven als onder water), sommige met prachtige druipsteenafzettingen. De meeste zijn toegankelijk vanuit keldertjes onder woonhuizen in het centrum van de stad (afb. 4). Enkele grotten zijn voor toeristen ingericht en zijn zeer de moeite van een bezoek waard! Het bijzondere aan



Afb. 4. Molnár János Cave, een ongeveer 10 kilometer lang grottenstelsel onder het centrum van Boedapest.

deze grotten is dat ze ontstaan zijn door warm water afkomstig uit de diepe ondergrond. Dit zijn zogenaamde hydrothermale (letterlijk: warm water) grotten, en een eerste voorbeeld van de hypogene grotten. De grotten in Boedapest zijn het beroemd-

ste voorbeeld van hydrothermale of thermale speleogenese. Ze werden uitvoerig wetenschappelijk beschreven in 1977. Het thermale water heeft temperaturen tussen 20 en 60°C, waardoor de oplossing van kalk aanzienlijk sneller verloopt dan bij de normale temperatuur van grondwater. Ook de rijke afzettingen van mineralen is aan de hoge temperatuur toe te schrijven; de mineralen worden afgezet door afkoeling en het ontwijken van CO_2 wanneer het water aan de oppervlakte komt.



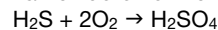
Afb. 5. 'Warmwatergrot' in Miskolc (Hongarije). In Hongarije zijn meer dan 600 warmwaterbronnen, waarvan een aantal in grotten.

Een mooi voorbeeld is de Molnár János-grot, tien kilometer lang en met een watertemperatuur tot wel 27°C een paradijs voor grootduikers. Het warme water wordt ook benut voor de beroemde warmwaterzweembaden in Hongarije, die ook om therapeutische redenen worden bezocht. Sommige baden bevinden zich zelfs in de grotten (afb. 5), maar de oudere Hongaren die daar voor hun gezondheid komen stellen het niet op prijs als er ineens een groep – misschien wat lawaaiiger - speleologen opduikt. Hydrothermale grotten komen overigens overal ter wereld voor. In thermaal water is vaak ook H_2S opgelost (waterstofsulfide of zwavelwaterstof, het gas dat naar rotte eieren stinkt), dat ook voor corrosie zorgt).

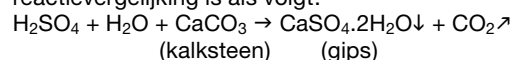
Zwavelzuur

Zo tussen 1979 en 1986 verschijnen de eerste publicaties over gips in grotten, vooral in Carlsbad Caverns, New Mexico (VS). Het gaat hier om afzettingen van gips in grotten die volledig in kalksteen zijn gevormd, dus niet om grotten in gipsgesteenten. Waar komt dit gips dan vandaan?

Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is een mineraal dat zwavel bevat en zwavel is een vreemd element in kalksteengrotten. In kalkgesteenten komt soms echter wel de zwavelverbinding pyriet (ijzerdisulfide, FeS_2) voor, in kleine, goudkleurige, kubusvormige kristalletjes (vanwege de kleur ook wel 'fools gold' genoemd). Volgens Dave Jagnow kan pyriet de bron van zwavel zijn. Carol Hill schrijft in haar gezaghebbende studies over de Guadalupe Mountains, dat de zwavel in dit gebied afkomstig is uit H_2S uit aardolie dat langzaam met water uit de ondergrond naar boven komt. Dat is niet zo'n gekke veronderstelling, want in dit gebied staan honderden jaknikkers, die duiden op oliebronnen. Waterstofsulfide kan oxideren en vormt dan zwavelzuur (H_2SO_4):



Het net gevormde zwavelzuur, een veel agressiever zuur dan het koolzuur (H_2CO_3), waar we tot nu toe over spraken, corrodeert dan de kalksteen en als resultaat slaat gips neer. Niet alleen zijn daarmee nu de gipsafzettingen in kalkgrotten verklaard, maar is met dit proces ook het ontstaan van grotten te verklaren! De reactievergelijking is als volgt:



De hier vrijgekomen kooldioxide lost weer op in water, zoals in condenswater op wanden en plafonds, en corrodeert als H_2CO_3 de kalk! Dit wordt het 'dubbel effect' genoemd: corrosie door zowel zwavelzuur als koolzuur. Het ontstaan van Carlsbad Caverns, met zijn enorme zalen, is op deze wijze goed te verklaren en tevens een mooi voorbeeld van hypogene speleogenese.

Bacteriën

In 1968, 45 jaar geleden en drie jaar nadat ik met speleologie begon, verscheen het boek "Höhlenkunde" van de Weense professor Hubert Trimmel, waarin een destijds actueel en volledig

overzicht werd gegeven van de wetenschappelijke speleologie, een boek dat nu nog steeds bruikbaar is. Aan bacteriën wordt in deze publicatie slechts summier aandacht besteed, dit in tegenstelling tot het moderne aanbod literatuur over bacteriën in grot-

Bacteriën en grotvorming

Welke bacteriën spelen bij het proces van grotvorming een rol? In plaats van over bacteriën, spreken we liever over *archaea* (van het Griekse *archaios* = primitief), ook wel oerbacteriën of archaeobacteriën genoemd. Soms wordt ook wel gesproken over nanobacteria (van het Griekse *nanos* = dwerg), uiterst kleine bacteriën, maar die benaming raakt een beetje uit de mode. Alle levende wezens worden onderverdeeld in drie 'domeinen': bacteriën, archaea en eukaryoten. De groep eukaryoten omvat dus alle levende organismen met uitzondering van bacteriën en archaea. Eukaryoten zijn alle organismen waarvan de cel een celkern bevat: eencelligen, schimmels, planten en dieren. In onderstaande afbeelding zijn de drie domeinen weergegeven in de *Tree of Life*.

Het domein archaea omvat ook de *extremofielen*, organismen die de voorkeur geven aan extreme omstandigheden, zoals grotten met zwavelzuur, maar ook milieus met extreme temperaturen, van wel min 65°C in gletsjerijs tot plus 170°C in vulkanische heetwaterbronnen. Tot voor kort dachten we dat er geen leven mogelijk was bij meer dan 100°C omdat het water in organismen dan zou gaan koken, maar dat blijkt dus niet het geval te zijn. Weer andere extremofielen leven bij extreme druk, tot wel 1100 bar in de diepste oceanen, of bij een extreem hoge zuurgraad (pH van 0,5) tot een zeer basisch milieu (pH van 10). Weer andere extremofielen overleven een extreem hoge radioactieve straling (tot wel 1000 maal de voor mensen toelaatbare waarde). Uit boringen blijkt dat zij op grote diepte kunnen leven, tot 12 km diepte in de continentale korst en tot 3,5 km in oceanische korst; in de atmosfeer vinden we ze tot 40 km hoogte.

Op de Azoren ontmoette ik een hoogleraar geomicrobiologie die zich in de VS met dit onderwerp bezighoudt, en tijdens het Internationale Congres voor Speleologie in Brno (Tsjechië) in juli 2013 sprak ik nog vier specialisten. (Overigens alle vijf vrouwen; mannen kiezen blijkbaar vaker voor de 'harde' geologie.) Opvallend is dat er de laatste twee decennia veel aandacht is voor de rol van bacteriën bij grotvorming. Dit heeft te maken met de technologische ontwikkelingen. Het 'oude' onderzoek aan bacteriën gebeurde voornamelijk met lichtmicroscopen met beperkte vergrotingen, tot zo'n duizend keer. Daarmee kun je geen archaea bestuderen. Tegenwoordig hebben we meerdere typen van elektronenmicroscopen tot onze beschikking, met vergrotingen van honderdduizend tot een miljoen keer! Bovendien gebeurde het traditionele onderzoek aan bacteriën door ze op kweek te zetten in glazen of kunststof petrischaaltjes; slechts een zeer beperkt aantal bacteriesoorten laat zich echter kweken in het laboratorium. Nu staat DNA-onderzoek tot onze beschikking waarmee heel nauwkeurig soorten en verwantschappen zijn vast te stellen.

Ook zijn er de laatste jaren indrukwekkende ontdekkingen gedaan die veel publiciteit genereerden, niet alleen in de vakpers maar ook bij het grote publiek, door fascinerende tv-documentaires van bijv. National Geographic en BBC (Planet Earth). Lechuguilla in de VS noemde ik al, en Frasassi in Italië. Maar ook is er bijv. de Cueva de Villa Luz in Mexico, met zwavelzuur in het rivierwater en in de lucht, waar onderzoek gedaan wordt in beschermende kleding en met maskers, en waar een rijkdom aan bacteriesoorten voorkomt.

De in 1986 door een boring ontdekte grot van Moville in Roemenië ten slotte, ook ontstaan dankzij bacteriën, heeft vooral aandacht getrokken omdat deze bacteriën ook de basis vormen

van de voedselpiramide in deze grot. Een gesloten ecosysteem, dat bestaat uit 35 endemische diersoorten, zoals insecten, kreeftachtigen, duizendpoten, en dat allemaal zonder een straaltje zonlicht of een sprietje gras!

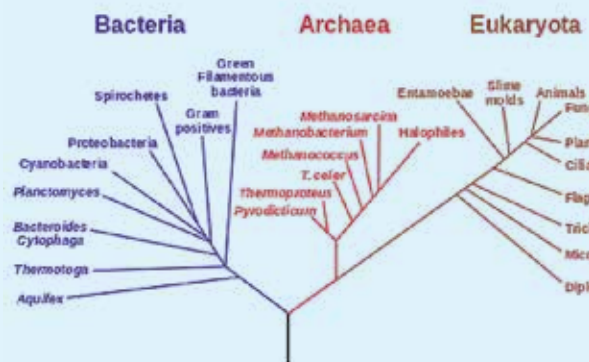
Behalve de aanzienlijk toegenomen mogelijkheden van onderzoek en de spectaculaire vondsten is er natuurlijk ook geld nodig, zowel voor onderzoek in het laboratorium als voor expedities. Twee groepen van onverwachte sponsors zijn hiervoor belangrijk: de Amerikaanse ruimtevaartorganisatie NASA en de farmaceutische industrie.

Wat heeft ruimtevaart met speleologie te maken (behalve dan dat er zowel op de Maan als op Mars grotten voorkomen)? NASA is bijzonder geïnteresseerd in de mogelijkheid van leven op Mars, en er zijn vondsten in Marsmeteorieten die sterk aan bacteriën doen denken (wetenschappers discussiëren hier overigens nog over). Verkennend onderzoek aan extremofielen, zoals de archaea uit grotten, ligt daarom voor de hand. Als er leven op Mars was of is, dan lijkt dat waarschijnlijk veel op deze oerbacteriën.

De farmaceutische industrie is de tweede geïnteresseerde partij omdat nog onbekende bacteriën een rol kunnen spelen bij de ontwikkeling van nieuwe medicijnen. Nieuwe levensvormen worden verzameld in regenwouden, maar ook in grotten. Vooral de in grotten gevonden biofilm (de dunne laag bacteriën op het gesteente) wordt intensief onderzocht met dit doel. Het onderzoek staat nog in de kinderschoenen, maar is veelbelovend (zie de publicatie van Cheeptham, 2013).

In dit verband wil ik ook fenomenen als biocorrosie en biokarst noemen: resp. corrosie door biologische organismen en het landschappelijk resultaat daarvan. Meestal worden dan geen bacteriën bedoeld, maar andere organismen zoals borende schelpen in kustgebieden die een zuur afscheiden en daarmee kalk oplossen. Dat is natuurlijk wel karst, maar het is een kleinschalig proces zodat op deze wijze geen grotten gevormd zullen worden. Als gevolg van urine van vleermuizen, bijv. tegen het plafond van een grot, kunnen uithollingen in het kalkgesteente ontstaan; ook dat is biokarst. In Franstalige literatuur wordt soms over biokarst gesproken als de bron van de CO₂ vegetatie is, maar dat is m.i. wat overdreven want dan zou alle epigenetische karst tot biokarst gerekend moeten worden.

Phylogenetic Tree of Life



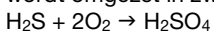
(Wikipedia, 2013, naar Carl Woese, 1977)



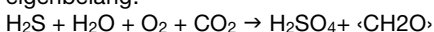
Afb. 6. Bacteriekolonies in de grot Carvao Sao Miguel, Azoren (Portugal).

ten (afb. 6). In 1986 wordt in Lechuguilla Cave, New Mexico (VS), niet ver van Carlsbad Caverns een belangrijke doorbraak geforceerd. Aanvankelijk was slechts iets meer dan 100 meter aan gangen bekend. De grot is nu (2013) 222 kilometer lang en 489 meter diep en is daarmee de zevende van de wereld wat diepte betreft. Maar dat is niet het belangrijkste kenmerk. In deze enorme grot is ontdekt dat bacteriën een belangrijke rol hebben gespeeld bij de vorming van de grot! Na ruim 45 jaar krijgt Garcet alsnog gelijk: er bestaan steenvretertjes! Aan dit proces ligt *chemolithoautotrofie* ten grondslag. Het is duidelijk een chemisch proces en het heeft met gesteente (lithos) te maken; het proces verloopt vanzelf (autos) en levert voedsel op (trofie).

We zagen hiervoor al dat waterstofsulfide door oxidatie wordt omgezet in zwavelzuur:

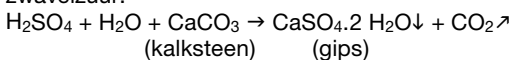


Maar dat gaat niet zomaar; hier spelen bacteriën een rol, uit eigenbelang!



Dit laatste element in de formule, CH_2O , is de algemene omschrijving van koolhydraten of suikers, voedsel dus!

Het tweede deel van het proces is corrosie van kalk door zwavelzuur:



Er bestaan ook bacteriën die kalk rechtstreeks aantasten, zonder tussenkomst van zwavelzuur, en bacteriën die kalk afscheiden en kristallen en druipstenen vormen.

Fantomisatie

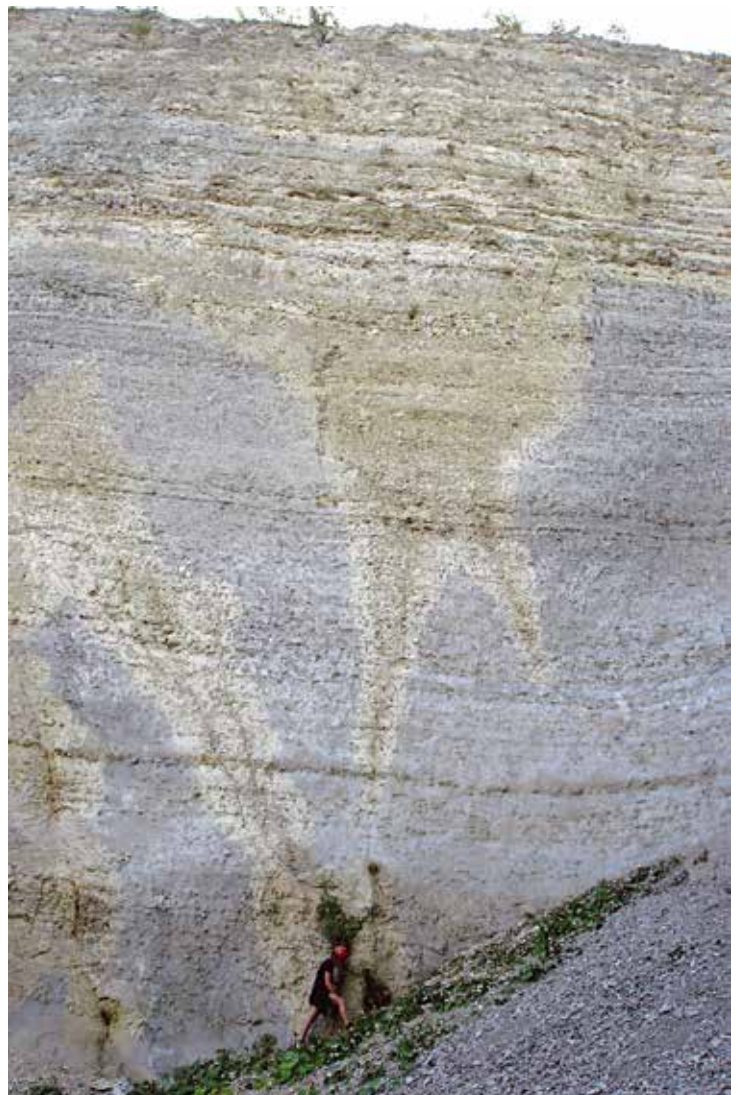
In relatie tot grotvorming is *fantomisatie* een belangrijk begrip. De eerste artikelen over fantomisatie verschenen in het begin van de jaren '90. Yves Quinif, (thans emeritus) hoogleraar geologie in Bergen (België) is de 'éminence grise' van dit onderzoek. In 2010 schreef hij hierover een fascinerend (Franstalig) boek.

Wat is fantomisatie, wat zijn fantomen? Dit proces heeft te maken met de omzetting van kalk. Kalksteen kan langzaam worden omgezet in een alteriet (letterlijk: veranderd gesteente). De structuur van het gesteente (gelaagdheid, breuken, diaklazen enz.) blijft daarbij intact, maar de samenstel-

ling wijzigt. Vaak is de gewijzigde samenstelling goed waarneembaar omdat het gesteente van kleur verandert (afb. 7); de hardheid neemt meestal aanzienlijk af. Een keiharde kalksteen wordt een zachte massa, maar bevindt zich wel op dezelfde plaats; de verandering vindt dus 'in situ' plaats. Voor de oorspronkelijke kalksteen heb je een geologenhamer nodig, voor de fantomen is een truffel voldoende!

Die verandering kan op twee manieren plaatsvinden:

Soms verdwijnt bij het ontstaan van fantomen langzamerhand alle kalk en bestaat het centrale deel van een fantoom uitsluitend nog uit klei- en ijzermineralen (smectieten). Dit is bijvoorbeeld goed te zien in de fantomen in de onderaardse kalksteengroeven van de Sint Pietersberg (afb. 8). Soms bestaat



Afb. 7. Fantoom in de ENCI-groeve, Maastricht. De meters grote fantoom is goed te zien aan de verkleuring van het gesteente; de gelaagdheid is nog volledig intact.



Afb. 8. Fantoom in de onderaardse kalksteengroeve (calcareeniet uit het Laat-Maastrichtien, Krijt) van Caestert (Belgisch Limburg).

de fantoom echter nog volledig uit kalk, wat je goed kunt zien door het bruisen als je er een beetje zoutzuur op druppelt. Dat is bijvoorbeeld het geval bij de harde kalksteen in de buurt van Mons, die uit (minder goed oplosbare) skeletjes van fossiele diertjes bestaat. De skeletjes zijn aan elkaar gekit met een cement (biomicriet) die ook uit (goed oplosbare) kalk bestaat. Het cement lost op, en wat overblijft is een fantoom die bestaat uit de resterende, losse microfossielen. Afb. 9. In beide voorbeelden kan, als het evenwicht verstoord wordt (bijv. door het insnijden van rivieren of het uitgraven van steengroeven), het losse fantoommateriaal eruit vallen of uitspoelen, en dan vormt zich een grot. Het proces van fantomisatie kan heel lang duren (we weten nog niet hoe lang) maar de grotvorming is een heel snel proces dat in steengroeven al is waargenomen!

Zo langzamerhand zijn er ook aanwijzingen voor de rol van bacteriën bij het oplossen van de kalk bij de vorming van fantomen. Hoewel het een boeiende materie is, ontbreken de 'keiharde' bewijzen vooralsnog. Een aantal deskundigen is het er wel over eens dat ook hier biologische processen een belangrijke rol spelen. Sommige onderzoekers menen ook dat de eerste fase



Afb. 9. Een fraaie horizontale fantoom in de wand van de groeve Les Nutons bij Spontin, België (crinoïdenkalksteen of petit granit, Midden-Tournaisien, Carboon)

van grotvorming altijd op deze wijze begint: eerst door omzetting van de kalk in een alteriet en pas daarna uitspoeling (erosie) door water. Dit proces wordt wel *primokarst* genoemd.

Hypogene speleogenese

De laatste jaren krijgt *hypogene speleogenese* veel aandacht, onder andere door de voortreffelijke publicaties van Alexander Klimchouck (2007, 2009). Hierboven zijn de belangrijkste voorbeelden van *hypogene speleogenese* beschreven: door warm water, door zwavelzuur en door bacteriën. Helemaal nieuw is het echter niet. Al in 1931 schreef de Duitse geoloog Walter Biese op basis van zijn onderzoek in onder meer de Harz (Duitsland) over 'Lauchhöhlen': grotten die door uitloging ontstaan zijn. Met de kennis van nu zouden we dat ook 'hypogene grotten' noemen. Hij vergelijkt die onder meer met de 'traditionele' Fließhöhlen ('river caves') van het klassieke karstgebied.



Afb. 10. Een door mengcorrosie ontstaan 'kolkgat' in het plafond; de diaklaas is goed te zien omdat zich daar nu druipsteen vormt

Tot slot

Er zijn weinig grotten die slechts aan één van de hierboven genoemde processen kunnen worden toegeschreven. Zo is het systeem van de Grotten van Han een typische 'river cave', maar worden er steeds meer bewijzen van fantomisatie gevonden. Ook worden in de 'klassieke' karstgrotten steeds meer aanwijzingen gevonden van de invloed van bacteriën. De Grot van Frasassi in Italië is daarvan een prachtig voorbeeld. Bij het onderzoek naar en de verklaring van het ontstaan van een bepaalde grot moeten we dus openstaan voor de combinatie van meerdere processen. Het zou daarvoor trouwens goed zijn als de Europese, veelal Franstalig georiënteerde, onderzoekers meer kennis zouden nemen van de Amerikaanse literatuur, en andersom. Bacteriën lijken, als je de literatuur bestudeert, alleen in Amerika voor te komen, fantomen alleen in Franstalig en Italiaans Europa! (Ik overdrijf misschien een beetje, maar toch...). Al deze theorieën over speleogenese maken het er ook voor de 'gewone' speleoloog niet overzichtelijker op. Vaak is het lastig om een verklaring voor een bepaald fenomeen in een grot of groot grotstelsel te geven, zoals bij de zogenaamde 'kolkgaten'. Dit zijn komvormige uithollingen die vaak in het plafond van gangen en zalen in grotten voorkomen. Er zijn ten minste drie serieuze verklaringen voor het ontstaan van deze 'kolkgaten'. Bögli verklaart kolkgaten uit *mengcorrosie*. Als een freatische grotgang, die dus vol water staat, wordt aangesneden door een breuk of diaklaas, kan op het 'kruispunt' mengcorrosie ontstaan en zich een 'kolkgat' vormen. Soms is die diaklaas of breuk goed te zien als de gang is drooggevallen doordat zich dan in het 'kolkgat' druipstenen afzetten. Afb. 10. De tweede theorie is die van de hypogenese (zie o.a. de studies van Alexander Klimchouck).

Als agressief water zich van onderaf een weg naar boven baant, zijn de gevolgen daarvan ook in het plafond te zien. Ten slotte presenteerde Camille Ek een derde theorie. Stel je een grotgang voor met daarin water met lucht erboven. Als de waterstand stijgt, kan in bepaalde gevallen, bijv. in een gang tussen twee sifons, de luchtdruk in de lucht boven het water toenemen. De partiële CO₂-druk zal dan ook toenemen, en er kan opnieuw door het oplossen van de CO₂ met een hogere druk in condenswater op het plafond corrosie plaatsvinden, en ook zo kunnen 'kolkgangen' ontstaan. Het onderscheid tussen deze drie typen van kolkgangen is in de praktijk dikwijls moeilijk waar te nemen. (Een minder serieuze verklaring is dat ze geërodeerd zouden zijn door snel ronddraaiende stenen, zoals ook kolkgangen in rivierbeddingen en onder gletsjers zijn ontstaan.)

Regelmatig blijken geologische processen een biologische oorsprong te hebben! Bij grotvorming is daarover geen twijfel meer mogelijk. Het begint al met de plantengroei: zonder wortelbacteriën geen planten, en zonder bacteriën geen omzetting van dood plantenmateriaal, waarbij kooldioxide vrijkomt. En dan natuurlijk de eerder genoemde extremofiele bacteriën, met hun chemolithoautotrofie, die direct verantwoordelijk zijn voor de speleogenese. Van steeds meer chemische processen is aangetoond dat bacteriën hiervoor verantwoordelijk zijn. Bij oxidatie en reductie van elementen, verwerking van gesteenten, de vorming van mineralen (zie Hazen 2008), het ontstaan van afzettingsgesteenten etc. De invloed van bacteriën op de geologie en mineralogie zien we niet alleen in grotten, maar ook in vulkanische bronnen, bij tufwatervallen, in bodems, en gewoon op het strand (zie Dyer).

In de volgende artikelen zal ik ingaan op het ontstaan van grotten in andere gesteenten dan kalk, zoals grotten in gips, zandsteen en graniet en grotvorming met een geheel andere ontstaanswijze, zoals kalktufgrotten, kustgrotten, lavagrotten en grotten in gletsjers. Ook komen oppervlakte karst, klastische sedimenten en mineraalafzettingen in grotten aan de orde, zoals calciet of aragoniet en honderden andere mineralen.

Foto's 6, 7, 8, 9, 10 zijn van de auteur; foto 1 is een ansichtkaart uit 1900; foto's 2, 4, 5: Wikimedia Commons.

Leessuggesties

Dit is een persoonlijke keuze uit de overvloedige literatuur op dit gebied, waarbij ik me beperk tot de recentere uitgaven. De originele studies van bijv. Bögli en Hill zijn ook aan te bevelen.

Overzichtswerken speleologie:

- John Gunn (Ed) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn, New York/London, 2004. xviii + 902 pagina's.
- William B. White & David C. Culver (Eds) *Encyclopedia Of Caves*,

Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2012. xiv + 945 pagina's.

Geologie van grotten en karst:

- Derek Ford & Paul Williams *Karst Geomorphology and Hydrology*, Wiley, Chichester, 2007
- Alexander B. Klimchouk et al. *Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers*, National Speleological Society, Huntsville, AL., 2000
- Alexander B. Klimchouk *Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective*, Special Paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, 2007
- Alexander Klimchouk, Derek Ford (Eds) *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrology of Artesian Basins*, Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper 1, Simferopol, 2009
- Michael J. Lace, John E. Mylroie (Eds) *Coastal Karst Landforms*, Springer, Dordrecht, 2013
- Arthur N. Palmer *Cave Geology*, Cave Books, Dayton OH, 2007
- Yves Quinif *Fantômes de Roche et Fantômisation; essai sur un nouveau paradigme en karstogénèse*, Karstologia Mémoires 18, 2010
- William B. White *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford University Press, New York/Oxford, 1988

Historische ontwikkeling van de geospeleologie:

- M.M. Sweeting (Ed) *Karst Geomorphology*, Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg Penn., 1981 [Benchmark Papers in Geology / 59]
- William B. White and David C. Culver (Eds) *Benchmark Papers in Karst Science*, Karst Waters Institute, Leesburg VA, 2007

Bacteriën algemeen en in grotten:

- Betsy Dexter Dyer *A Field Guide to Bacteria*, Cornell University, Ithaca/London, 2003
- Geomicrobiology Journal Special: *Geomicrobiology of Caves*, Volume 18, Number 3 / July - September 2001
- H.A. Barton *Biospeleogenesis*. In: John F. Shroder (ed) *Treatise on Geomorphology*, Volume 6, pag. 38-56, Academic Press, San Diego, 2013
- Naowarat Cheeptham (Ed) *Cave Microbiomes: A Novel Resource for Drug Discovery*, Springer Briefs in Microbiology, Springer, New York, 2013
- Michael Ray Taylor *Dark Life*, Scribner, New York, 1999

Geo(micro)biologie:

- Kurt Konhauser *Introduction to Geomicrobiology*, Blackwell Publishing, Malden MA., 2007
- Andrew H. Knoll, Donald E. Canfield & Kurt O. Konhauser (Eds) *Fundamentals of Geobiology* Wiley-Blackwell, Chichester, 2012

Internet

- Wikipedia, met name de Engelstalige of Franse website;
- www.speleogenesis.info