

Grotten: een wereld in duisternis

Als we praten over ondergrondse afwatering als specifiek kenmerk van karst dan is het duidelijk dat grotten daarbij een rol spelen. Immers, water dat via breuken, diaklazen en laagvoegen in de uit kalk bestaande ondergrond verdwijnt lost door corrosie het gesteente op. De breuken, diaklazen en laagvoegen worden zo breder en uiteindelijk is er een grot gevormd. We noemen de op deze wijze ontstane grotten (vanzelfsprekend) **karstgrotten**. Zij behoren tot de groep van **secundaire grotten**. Secundair, omdat eerst het gesteente werd gevormd en pas (veel) later de grot. Ook b.v. de grotten die ontstaan door de eroderende werking van de branding in steile zeekusten, en die we **abrasiegrotten** noemen, behoren hiertoe.

Er zijn natuurlijk ook **primaire grotten**, d.w.z. grotten die tegelijkertijd met het gesteente werden gevormd. Een voorbeeld daarvan zijn de grotten die ontstaan als onder de afzetting van kalktuf door een waterval een vrije ruimte blijft bestaan, omdat de waterval zich als het ware over zijn eigen afzettingen naar voren verplaatst. Een ander mooi voorbeeld van primaire grotten vormen de z.g. **lavagrotten**. (Afb. 9). Deze worden gevormd tijdens vulkanische uitbarstingen. Wanneer uit een vulkaan een lavastroom uitvloeit dan begint deze lava aan de buitenkant af te koelen. De warme binnenkant van zo'n stroom kan echter verder stromen, zodat een soort tunnel ontstaat. Wanneer het dak van die tunnel plaatselijk instort is de grot toegankelijk. Soms doen hete gassen op sommige plaatsen opnieuw het plafond van een tunnel smelten. De



afb. 9. Lavatunnel aan de voet van de Gullborg-vulkaan (Borgarhellir, IJsland). Waar het dak is ingestort is de grot toegankelijk.

afb. 10. Een mooie freatische gang in Castleguard Cave, Canada. Een eerste aanzet tot vadose grotvorming is gegeven. Ook vormt zich al druipsteen.



vloeibare lava druipt dan naar beneden en vormt, zowel aan het plafond als op de vloer, lavadruipsteen. Mooie voorbeelden van lavagrotten, die soms een lengte hebben van enkele tientallen kilometers, zijn o.a. te vinden op de Canarische Eilanden, op IJsland en op Hawaïi.

Karstgrotten

Kalkgesteenten zijn gelaagd en vertonen vaak breuken en diaklazen. Grotten in dit gesteente kunnen ontstaan doordat regen- of rivierwater langs de laagvoegen of breuken en diaklazen in het gesteente naar beneden sijpelt en de kalk oplost.

Zo ontstaan grotten die, behalve door de structuur van het gesteente, door de zwaartekracht beïnvloed worden. De grotten snijden zich naar beneden in. Dit proces vindt natuurlijk alleen boven de grondwaterspiegel plaats; alleen daar kan het water min of meer vrij stromen. We noemen gangen en grotten van dit type **vadose-grotten**.

Maar ook onder de grondwaterspiegel, in het grondwater dus, vindt corrosie plaats. Hier is de directe zwaartekracht nauwelijks van invloed. Veel meer speelt de hydrostatische druk (de druk die ontstaat door het gewicht van de kolom water boven de plaats waarover we praten) een rol. Deze hydrostatische druk werkt naar alle kanten, is ook naar boven gericht!

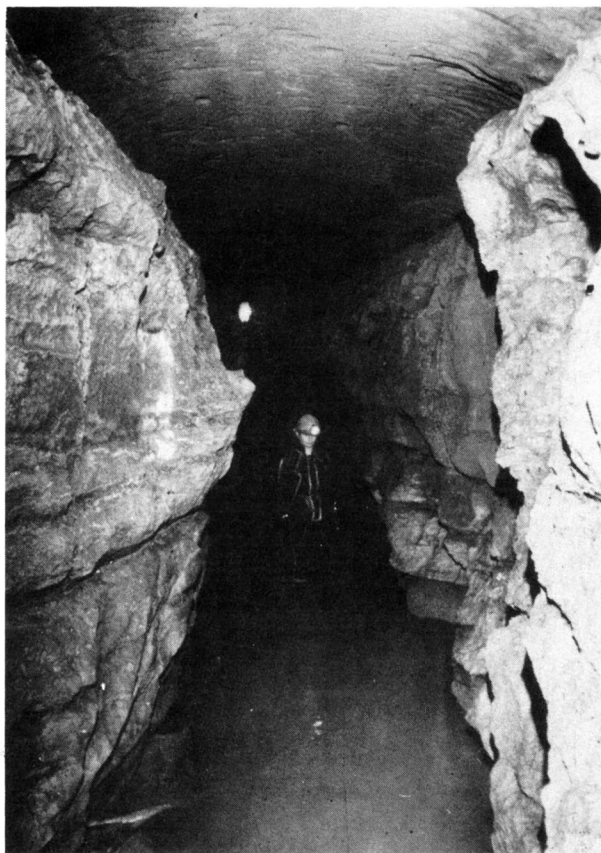
Ook de corrosie werkt dus alle kanten op en zo ontstaan meestal ronde of ellipsvormige 'druk'gangen. We noemen dit type van gangen en grotten **freatisch**. Afb. 10.

Heel vaak zien we een combinatie van beide processen: freatische en vadose grotvorming. Deze situatie doet zich voor wanneer de grondwaterspiegel in een karstgebied lager is komen te liggen, b.v. omdat de rivier waarop het gebied afwatert zich heeft ingesneden.

De aanvankelijk in het grondwater gevormde freatische gangen komen nu vrij te liggen en eventuele vadose waterlopen in deze gangen zullen zich nu, onder invloed van de zwaartekracht, in de bodem insnijden. De gang krijgt de vorm van een **sleutelgat** en wordt ook zo genoemd. Afb. 11.

Ook erosie (door meegevoerd puin), inkasie (instorting van het plafond na ondermijning van de wanden) en afvoer van los materiaal gaan een rol spelen, waardoor soms de zo typische vorm op de lange duur weer verdwijnt. Afb. 12.

Gemakshalve ben ik even aan een probleem voorbijgegaan. Als b.v. regenwater in een diaklaas naar beneden sijpelt dan zal het gesteente worden aangetast, beginnend aan de bovenkant van de diaklaas. Na laten we zeggen een halve meter is echter het water verzadigd en houdt de corrosie in de diepte op. Meer water zal de ontstane spleet slechts verbreden. Een analoog verhaal gaat op voor het grondwater: ook dat raakt verzadigd. Toch zijn op grote diepte uitgestrekte grotssystemen ontstaan. Hoe is dat nu te verklaren?

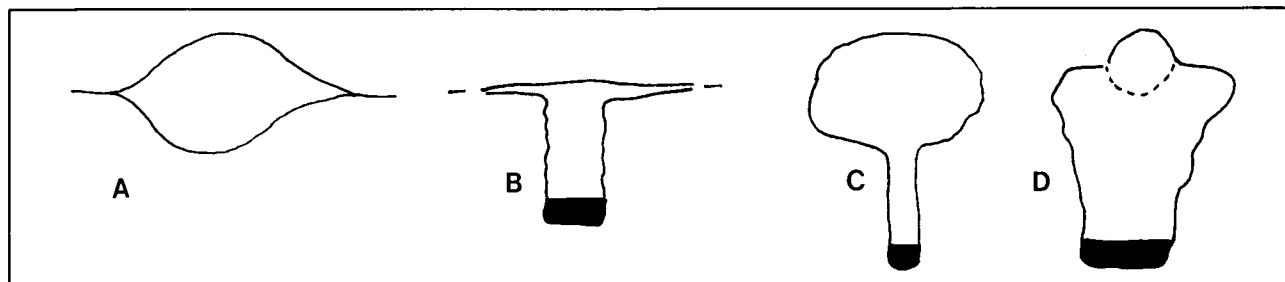


afb. 11. Vanuit een ellipsvormige freatische gang, waarvan het plafond nog goed zichtbaar is, heeft zich een vadose stroom breed en diep in de bodem ingeslepen. Het zo gevormde 'sleutelgatprofiel' is een indicatie voor de verlaging van de grondwaterspiegel. (Gouffre de Pourpelle, Doubs, Frankrijk)

Tot 1964 bleef het een raadsel. In dat jaar echter publiceerde prof. dr. Alfred Bögli, een fysisch geograaf die veel onderzoek had gedaan (en nog doet, trouwens) in het Hölloch, met ruim 140 km Europa's grootste grot, zijn bevindingen inzake het proces dat als **Mischungskorrosion**

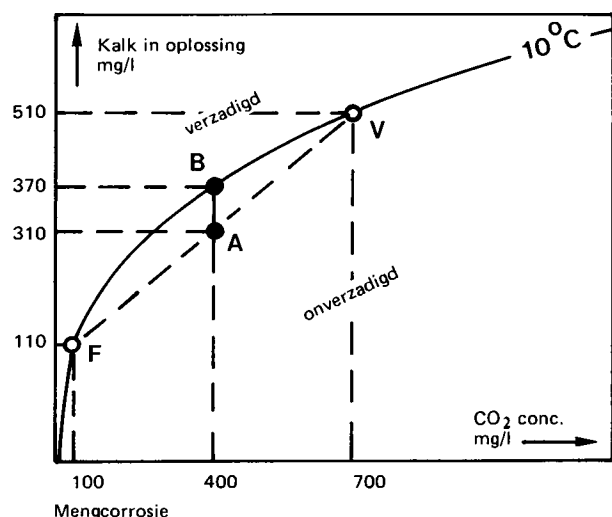
afb. 12. Enkele typische doorsneden door grotgangen.

*A: profiel van een freatische gang,
B: profiel van een vadose gang, A en B door een laagvoeg bepaald.
C: sleutelgatprofiel; een vadose insnijding in een freatische gang.
D: geëvolueerd sleutelgatprofiel. Het lijkt een vadose gang maar de freatische oorsprong is in het plafond nog te herkennen.*



onder speleologen terecht veel bekendheid zou krijgen. Wat is *Mischungskorrosion*, of mengcorrosie? Dit is het verschijnsel dat twee hoeveelheden water, beide verzadigd aan kalk doch met een verschillende CO_2 -concentratie, bij menging opnieuw in staat zijn kalk op te lossen. De oorzaak hiervan is het feit dat de hoeveelheid opgeloste kalk niet evenredig is met de CO_2 -concentratie van het water, het verband is niet lineair.

Een aan de werkelijkheid ontleend voorbeeld verduidelijkt dit misschien wat ingewikkelde theoretische verhaal. In afbeelding 13 geeft de doorgetrokken lijn aan, dat bij een toenemende CO_2 -concentratie de hoeveelheid opgeloste kalk eveneens kan toenemen. Onder de lijn is het gebied waar de oplossing onverzadigd is, m.a.w. waar het water chemisch actief is en het gesteente corrodeert. Op de lijn liggen de punten waar de oplossing verzadigd is. Stel nu een hoeveelheid grondwater van 10°C , met een CO_2 -concentratie van 100 mg/l. Wanneer deze oplossing verzadigd is bevat zij 110 mg kalk per liter (in de afbeelding punt F, van freatisch). Uit een spleet sijpelt vadoos water, eveneens van 10°C en verzadigd, met een CO_2 -concentratie van 700 mg/l, waarbij 510 mg opgeloste kalk hoort (punt V in de afbeelding). Stel dat gelijke hoeveelheden vadoos en freatisch water mengen. Deze nieuwe oplossing bevat dan $(100 + 700) : 2 = 400$ mg/l CO_2 , en $(110 + 510) : 2 = 310$ mg/l kalk (punt A in de afbeelding). Deze oplossing is echter pas verzadigd als 370 mg/l kalk is opgelost (punt B in de afbeelding, liggend op de doorgetrokken lijn).



afb. 13. Curve van hoeveelheid opgeloste kalk bij mengcorrosie.
Voor verklaring zie de tekst (gewijzigd naar Bögli, 1978)

Ergo, simpelweg door menging van de twee verzadigde hoeveelheden vadoos en freatisch water kan opnieuw 60 mg/l kalk, dat is 20%, worden opgelost! Het mengen van vadoos en freatisch water zal meestal plaatsvinden net onder de grondwaterspiegel en dit is dan ook het niveau waar de meeste grotten worden gevormd. Een verschijnsel dat hiermee nauw samenhangt is het voorkomen van z.g. kolkaten in plafonds van freatische gangen. Deze komen altijd voor op plaatsen waar vanuit spleten (diaklazen of laagvoegen) vadoos water in het grondwater terecht kwam en waar de corrosie (mengcor-

rosie dus) opnieuw begon, die een holte in het plafond deed ontstaan. Kolkgat is voor een dergelijk fenomeen, hoewel zeer ingeburgerd, een beslist onjuiste naam. Het is trouwens ook op zich al onwaarschijnlijk dat kolkaten, die ontstaan door snel ronddraaiende stenen, in het plafond van een grot zouden zijn gevormd. Echte kolkaten komen wel voor in de bodem van een gang. Afb. 14. Als een vadoze rivier door een grot gaat stromen dan gedraagt deze zich net zo als een bovengrondse rivier. Hij gaat meanderen (en ondermijnt zo de wanden en het plafond!), hij vormt kolkaten en zet sediment af op plaatsen waar hij, b.v. door verbreding van z'n bedding, langzamer gaat stromen.

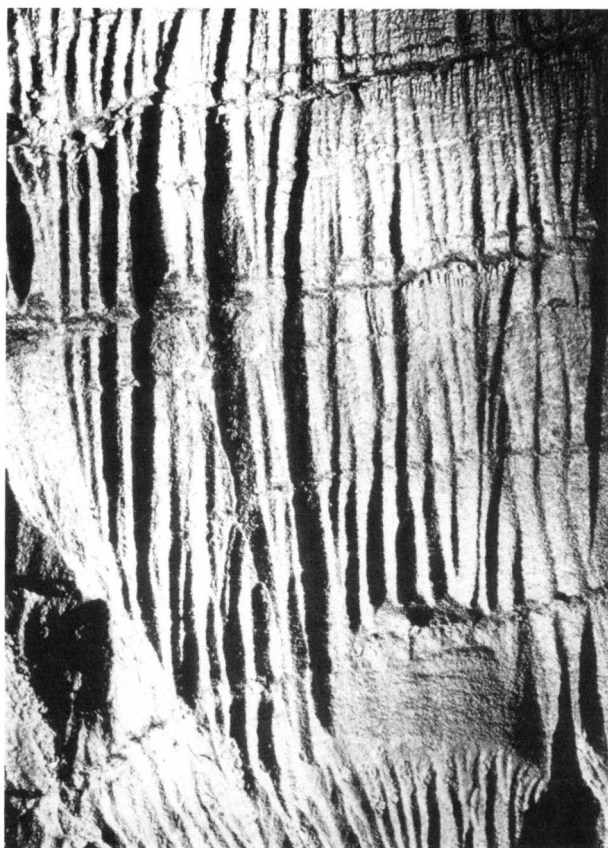


afb. 14. Kolkgat in het Hölloch, Zwitserland.

In gangen waar een rivier heeft gestroomd is aan een soort van stroomribbels, maar dan ontstaan door corrosie, te zien in welke richting het water heeft gestroomd. Deze fenomenen noemen we *scallops*. De lengte van de scallops is afhankelijk van de stroomsnelheid van het water en loopt van enkele cm's tot een meter. De steile kant wijst stroomopwaarts, evenals bij b.v. stroomribbels op het strand. Afb. 15. Ook karren komen in grotten voor, b.v. daar waar vanuit een laagvoeg halverwege een wand water naar beneden sijpelt. Op de lange duur kan dan het onder de voeg liggende gedeelte van de wand karren gaan vertonen. Afb. 16. Deze verticaal verlopende karren kunnen soms het horizontale patroon van de scallops doorkruisen. Zo kunnen zeer onregelmatig gecorrodeerde wanden ontstaan, met soms vele heel scherpe uitsteeksels. Om u tot slot van dit hoofdstukje over het ontstaan van grotten, of *speleogenese*, nog een indruk te geven van de kracht van een in wezen toch op kleine schaal en langzaam werkend chemisch proces als corrosie treft u onderstaand een lijstje van 's werelds diepste en langste grotten aan, alsmede van de grootste ondergrondse ruimten.

afb. 15. *Scallops*.





De diepste grotten:

Gouffre Jean Bernard (Frankrijk) 1455 m.
Sima de las Puertas de Illamina (Spanje) 1338 m.
Réseau de la Pierre Saint Martin (Spanje, Frankrijk) 1332 m.
Snienaja pieszcziera (USSR) 1280 m.
Sistema Huautla (Mexico) 1240 m.

De langste grotten:

Flint-Mammoth Cave System (USA) 361.620 m.
Optimisticeskaja (USSR, gevormd in gips!) 143.000 m.
Hölloch (Zwitserland) 140.000 m.
Jewel Cave (USA) 107.198 m.
Ozernaja (USSR), eveneens in gips, 104.000 m.

De grootste ruimten:

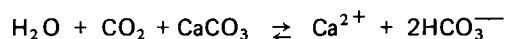
Sarawak Chamber (Nasib Bagus Cave, Sarawak)
700x300x70 m, (± 12 miljoen m³).
Salle Verna (Pierre Saint Martin, Spanje/Frankrijk)
230x180x150 m, (± 4 miljoen m³).
La Torca del Carlita (Spanje) 520x245x120 m, (± 4 miljoen m³).

afb. 16. "Erosieorgels" (rillenkarren) in de Grotte des Planches (Arbois, Jura, Frankrijk) met een hoogte van ± 1½ m.

Gesteenten en mineralen in grotten

Sintervorming

In het begin van dit verhaal, daar waar het proces van corrosie werd beschreven, kondigde ik aan op de chemische reactie die daar werd genoemd terug te komen. Daarvoor is nu het moment.



water + kooldioxide + kalk $\rightleftharpoons$ oplossing

De reactie is een evenwichtsreactie, d.w.z. dat het proces doorgaat totdat een bepaald evenwicht is bereikt. Dit evenwicht is onder meer afhankelijk van de temperatuur, van de druk en van de concentraties van de stoffen die aan de reactie deelnemen. De reactie is ook omkeerbaar, d.w.z. dat het proces de andere kant op verloopt: uit de oplossing komen kooldioxide, water en kalk vrij. De kooldioxide ontwijkt in de lucht, van het water merk je niet veel want de oplossing is ook waterig, maar de kalk slaat neer en vormt kalksinter.

Afhankelijk van de kristalstructuur waarin de sinter gevormd wordt spreken we van **calciet** (trigonaal) of **aragoniet** (orthorhombisch).

Hoewel dit nog niet helemaal vaststaat en er waarschijnlijk ook andere factoren een rol spelen wordt aragoniet gevormd als de temperatuur hoger is dan 16°C, daaronder wordt het calciet.

Ook bovengronds kennen we het verschijnsel van sintervorming, b.v. bij sterk kalkhoudende riviertjes en watervallen. De kalk slaat dan neer op takken en boomblaadjes en vormt zo kalktuf of travertijn.

Het chemische proces dat verantwoordelijk is voor het ontstaan van grotten blijkt ook de oorzaak van de vorming van de meest fraaie formaties in die grotten: alle vormen van druipsteen.

Aan kalk verzadigd water sijpelt door spleten in het gesteente. Dit water staat door de zwaarte van het omliggende gesteente en het gewicht van het water erboven onder een zekere druk. Deze druk bepaalt mede hoeveel CO₂ (en dus indirect hoeveel kalk) in het water opgelost is.

Als dit water vanuit een spleet in een vrije ruimte komt, een eerder door corrosie gevormde grotgang, dan neemt de druk af. Er kan minder CO₂ in het water opgelost blijven en dit ontwijkt (vergelijk dit maar met het openen van een flesje Coca Cola, als de druk afneemt ontwijkt het gas). De reactie verloopt naar links en er slaat kalk neer. (In de literatuur kom je nog wel eens tegen dat ook verdamping van het water een rol zou spelen. De luchtvochtigheid in grotten is echter dermate hoog dat verdamping nauwelijks van invloed is.)

Wanneer een waterdruppel aan het plafond hangt zal de kalk neerslaan daar waar de buitenkant van de druppel (waar de CO₂ ontwijkt) het plafond raakt. Er ontstaat zo een ringetje van kalk. Dit proces zet zich voort en er