

# Het ontstaan van gesteenten en mineralen in grotten

door Herman de Swart  
hermandeswart@casema.nl

In dit laatste artikel in de serie over 'speleogenese' ga ik in op het ontstaan en de afzetting van gesteenten en mineralen in grotten: speleomineralogie en speleosedimentologie.

Afzettingen in grotten worden onderverdeeld in drie categorieën:

- klastische sedimenten, die bestaan uit losse fragmenten van geërodeerde gesteenten;
- chemische afzettingen, in het dagelijks gebruik 'druipsteen' genoemd. Een betere term is kalksinter of 'speleothems' (in het Engels), want niet alle chemische afzettingen ontstaan uit druipend water;
- biologische afzettingen, ook wel biogene afzettingen genoemd.

## Klastische sedimenten

Klastische sedimenten, van leem tot en met grote steenblokken, komen vaak in grotten voor. Ze zijn in de grot zelf ontstaan of van buiten af in de grot ingespoeld of gevallen.

Als kalk corrodeert blijven de andere oorspronkelijk in de kalk aanwezige mineralen, vooral kleimineralen en ijzer, achter.

Als de opgeloste kalk is afgevoerd, is het restproduct dan ook een door ijzer min of meer roodgekleurde leem, 'terra rossa' genaamd. In dolinen vormt deze terra rossa een vruchtbare bodem waardoor de dolinen qua begroeiing vaak sterk tegen de kale omgeving afsteken. In de terra rossa, bijvoorbeeld in de vullingen van diepere dolines en karstspalten, vinden we de overgebleven ijzermineralen (meestal limoniet) vaak in de vorm van enkele centimeters grote knollen, die boonerts worden genoemd (afb. 1). Ook kan leem in een grot zijn ingespoeld, of zelfs door gletsjers of landijs in de grot als eindmorene zijn afgezet; ook kan leem met gletsjerwater in de grot terecht zijn gekomen. In dat geval zijn zelfs varven herkenbaar. Deze 'jaarlingen' zijn van belang voor datering en geven informatie over het paleoklimaat.

Als in een grotgang de bodem met leem is bedekt en het water



Afb. 1. Boonerts (limoniet) uit een karstspeltvulling in de Schwäbische Alb, Zuid-Duitsland. Beeldbreedte 10 cm. Foto en collectie auteur.

niet snel genoeg stroomt om de leem af te voeren, zal de corrosie vooral het plafond aantasten; de grotgang wordt dan steeds hoger. Vaak zijn grotgangen door leem afgesloten. Graven is

dan de enige manier om een doorgang te vinden. Op een leembedekking van de bodem worden soms weer een laag calciet en stalagmieten afgezet. Als later de leem door stromend water wordt weggespoeld, kan de calcietlaag als een 'valse vloer' of 'calcietbrug' achterblijven. In de Grotten van Han (België) loopt het pad voor de toeristen onder enkele van deze calcietbruggen door. Door water dat vanaf het plafond druipen kunnen in leem op de bodem van de grot ook mooie formaties ontstaan, zoals 'inslagkraters' of (soms hele wouden van) leemsparran.

Zand en grind, waar geen kalk in voorkomt, zijn in karstgrotten meestal van buiten de grot afkomstig en door rivieren naar binnen gespoeld. In Belgische grotten vinden we vaak afzettingen van de gesteenten die de kalkgebieden omzomen, bijvoorbeeld de zandstenen uit Devoon en Carboon die de kalken afwisselen. Grotere blokken bestaan dikwijls wel uit kalk en zijn na instortingen van het plafond of de wanden achtergebleven. In de loop van de (geologische) tijd zullen die door corrosie weer verdwijnen. Soms blokkeren die blokken de gang compleet en vormen ze een blokkenstort of éboulis. Speleologen zien zich dan genoodzaakt hun weg tussen deze blokken door te zoeken.

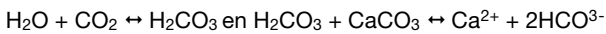
Onder zowel speleologen als een breder publiek is er veel aandacht voor druipsteengrotten. Hoewel we er in grotten dikwijls zo maar overheen lopen, zijn leem en andere 'losse' sedimenten als zand en grind ook belangrijk. Deze sedimenten:

- geven aanwijzingen over het ontstaan van de grot (speleogenese);
- 'beschermen' onderliggende vormen en materiaal;
- geven informatie over het klimaat tijdens de sedimentatie;
- kunnen gebruikt worden voor absolute dateringen, zoals pollenanalyse, paleomagnetisme en C14-dateringen op ingesloten organisch materiaal;
- maken ook relatieve dateringen mogelijk omdat sedimenten in grotten vaak netjes op elkaar en ongestoord zijn afgezet;
- zijn van groot belang voor paleontologen en archeologen omdat ze overblijfselen kunnen bevatten van uitgestorven diersoorten en prehistorische mensen, zelfs van kwetsbare spoorfossielen zoals voetafdrukken van de prehistorische mens;
- zijn interessant voor biologen vanwege de in het sediment levende dieren. Heel beroemd zijn de wormen uit het Hölloch in Zwitserland, die als relict van de tijd voor de laatste ijstijd worden beschouwd en die nu - behalve in het Hölloch - alleen nog ten zuiden van de Alpen voorkomen.

Een voorbeeld van een klein eigen onderzoek (met dank aan de GEA-werkgroep Zand) wil ik in dit verband noemen. De sedimenten diep in een lavagrot op het Canarische eiland La Palma werden in de vakliteratuur toegeschreven aan een tsunami. Ik kon aantonen dat ze gewoon van de oppervlakte afkomstig waren en door spleten in het plafond in de grot terecht waren gekomen!

## Chemische afzettingen ('druipsteenvorming')

In het eerste artikel van deze serie (zie onder literatuur) beschreef ik het proces van corrosie met de chemische formule:



Water (H<sub>2</sub>O) neemt kooldioxide (CO<sub>2</sub>) op uit lucht of bodem, waarbij een zwak zuur (koolzuur, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) wordt gevormd. Dit zuur lost de kalk (CaCO<sub>3</sub>) langzaam op tot calciumhydrogeencarbonaat-ionen (Ca<sup>2+</sup> en 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Dit proces van corrosie is een evenwichtsreactie, d.w.z. een proces dat doorgaat totdat er een bepaald evenwicht is bereikt. Dit evenwicht is afhankelijk van de temperatuur, druk en de concentratie.

Omdat het om een evenwichtsreactie gaat, is de reactie omkeerbaar, d.w.z. dat het proces ook de andere kant op verloopt. In dat geval komen kooldioxide, water en kalk vrij. De kooldioxide ontwijkt in de lucht en de kalk slaat neer in de vorm van kalksinter.

Afhankelijk van de kristalstructuur van de sinter spreken we van calciet (trigonaal) of aragoniet (orthorhombisch). Het idee dat de temperatuur hiervoor bepalend was (naar analogie van de vorming van calciet (onder 16 °C) en aragoniet (boven 16 °C) in schelpdieren) blijkt niet juist. Inmiddels weten we dat niet de temperatuur, maar spoorjes van magnesium ervoor zorgen dat niet calciet, maar aragoniet wordt gevormd. Aragoniet is een polymorf van calciet: het heeft dezelfde chemische samenstelling maar een andere kristalvorm. Het is bovendien niet stabiel en wordt uiterst langzaam in calciet omgezet. Dat proces doet zich ook in grotten voor.

## Drupsteen

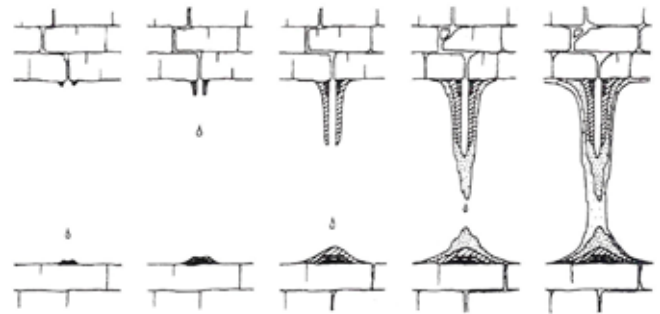
Ook bovengronds kennen we het verschijnsel van sintervorming, bijvoorbeeld bij sterk kalkhoudende riviertjes en water-vallen. De kalk slaat dan neer op takken en boomblaadjes en vormt zo kalktuf of travertijn. Dit proces besprak ik in deel III van deze serie (zie onderaan dit artikel). Het chemische proces dat verantwoordelijk is voor het ontstaan van grotten blijkt ook de oorzaak van de vorming van de fraaiste formaties in die grotten: alle vormen van druipsteen.

Het proces van druipsteenvorming verloopt als volgt: Met kalk verzadigd water sijpelt door spleten in het gesteente. Dit water staat door het gewicht van de waterkolom erboven onder een zekere druk. Deze druk bepaalt mede hoeveel CO<sub>2</sub>, en dus indirect hoeveel kalk (een zuurdere oplossing kan meer opgeloste kalk bevatten) in het water opgelost is. Als dit water vanuit een spleet in de vrije ruimte komt (bijv. in een eerder door corrosie gevormde grotgang) dan neemt de druk af. Er kan minder CO<sub>2</sub> in het water opgelost blijven en het 'overschot' aan CO<sub>2</sub> ontwijkt. Vergelijk dit maar met het openen van een fles Coca Cola of Champagne: als de druk afneemt ontwijkt het gas. In de formule hierboven verloopt de reactie naar links en er slaat kalk neer. CO<sub>2</sub> ontwijkt ook uit een waterige oplossing als gevolg van diffusie. In het water bevindt zich meer CO<sub>2</sub> dan in de lucht en dus zal een evenwicht ontstaan.

In de literatuur kom je nog wel eens tegen dat ook verdamping van het water een rol zou spelen. Ook in toeristengrotten wordt dit meestal als uitleg voor het ontstaan van druipsteen gegeven. De luchtvochtigheid in grotten is echter dermate hoog – tot wel 99% – dat verdamping hier nauwelijks een rol speelt. Wanneer een waterdruppel aan het plafond hangt zal de kalk neerslaan daar waar de buitenkant van de druppel (waar het CO<sub>2</sub>-gas ontwijkt) het plafond raakt. Er ontstaat zo een ringetje van kalk. Dit proces zet zich voort en er groeit een hol buisje, met een doorsnede gelijk aan die van de druppel. Zo vormt zich in de loop van de tijd een hangende druipsteen, een stalactiet, van het macaronitype. Deze kan tot enkele meters lang worden. Als het buisje verstopt raakt, of de watervoorziening door het buisje stopt, dan kan de macaroni door kalkhoudend water dat bijv. van opzij komt en langs de macaroni naar beneden stroomt in de breedte verder groeien. Ook kan het buisje in de lengte doorgroeien, maar dan zonder centraal kanaal. We spreken dan niet meer van macaroni, maar van stalactiet zonder meer. In de basis van stalactieten is in principe altijd een centraal kanaal aanwezig.

Ook vallen er waterdruppels op de grond. Ook dan ontwijkt CO<sub>2</sub> en slaat kalk neer. Er ontstaat een bodemdruipsteen of stalag-

miet (let op: stalactiet en stalagmiet), ditmaal zonder centraal kanaal en vaak wat breder en minder spits dan de dikwijls er direct boven groeiende stalactiet. De waterdruppels vallen soms van grote hoogte en spatten uiteen voordat de kalk neerslaat. Er ontstaan dan stalagmieten met een merkwaardig model, die lijken op een stapel bordes en daarom *piles d'assiettes* worden genoemd. Als een stalactiet en een stalagmiet aaneengroeien, spreken we van een zuil. Het zal duidelijk zijn dat zowel stalactieten als stalagmieten in concentrische lagen worden afgezet. Deze lagen zijn bij afgebroken stukken meestal aan de kleur te herkennen. IJzerdeeltjes die tegelijkertijd met calciet of aragoniet neerslaan, oxideren ('roest') en zorgen voor tinten van crème tot diepzwart, terwijl zuivere kalk kleurloos of wit is (afb.2). De oorspronkelijke macaroni bestaat uit lange kristallen die in de lengte van de macaroni georiënteerd zijn. Naar buiten toe

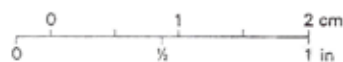
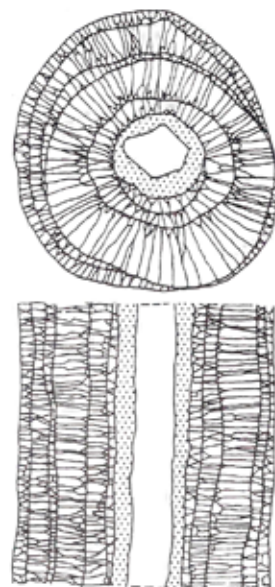


Afb. 2. Het ontstaan van druipsteen: een druppel aan het plafond, een macaroni, stalactieten en stalagmieten, een zuil. Bron: Binggeli et al. Karst, 1976.

volgt een dunne laag kriskras door elkaar liggende korte kristallen en dan weer een laag lange kristallen, die loodrecht op de richting van de oorspronkelijke macaroni staan. Calcietkristallen groeien het snelst in de lengterichting. De kristallen die de meeste ruimte hebben om te groeien zijn degene die loodrecht op de oorspronkelijke macaroni staan, want die hinderen elkaar niet. Anders georiënteerde kristallen stoppen elkaars groei en blijven daarom klein. Deze zijn met het blote oog nauwelijks herkenbaar. De door het ijzer gevormde kleur blijft, ook in de lange kristallen, als banden zichtbaar. Het kan dus voorkomen dat tussen het begin van de vorming van een calcietkristal en het einde daarvan vele duizenden jaren liggen. Want al kan een

macaroni onder natuurlijke omstandigheden wel tot 2 cm per jaar groeien, voor een 'massieve' druipsteen gelden veel lagere waarden. Afb. 3. Macaroni's breken onder hun eigen gewicht af als ze een lengte van maximaal enkele meters hebben bereikt. Een mooi voorbeeld van macaroni's vindt u op de omslag van Gea van december 2013.

Afzettingen van kalk op de grotwanden kunnen eveneens heel fraaie vormen



Afb. 3. Kristalstructuur in een stalactiet. In de wand van het centrale kanaal zijn de kristallen verticaal georiënteerd, de buitenste lagen hebben een uitstralend kristalpatroon. Bron: Moore and Sullivan Speleology, 1997.

aannemen. Zo zijn er de 'versteende watervallen', die natuurlijk weinig met echte watervallen van doen hebben. Immers, in een echte waterval zal eerder sprake zijn van corrosie (en erosie) dan van sinterafzettingen.

De structuur van de wand speelt een belangrijke rol. Is deze oneffen, dan zal ook de wandsinter een bepaalde structuur gaan vertonen. Is de kalk poreus, dan kan er kalkhoudend water uitsijpelen en ontstaan soms velden van kleine bobbeltjes van kalk. We spreken dan van koraal- en knopsinter, of van 'popcorn'. Op licht hellende wanden kunnen zogenaamde grot- of sinterbekkens ontstaan, gours. Deze worden gevormd als in een oneffenheid op de wand water blijft staan. Als dit 'bekkentje' overloopt, wordt op de randen kalk afgezet door een interactie van omgevingsfactoren die steeds veranderen, zoals het zuurstof- en kooldioxidegehalte en de stroomsnelheid. Ook de uit microben opgebouwde biofilm speelt bij dit proces een rol. De gours zijn te vergelijken met de bovengrondse kalktuf- of travertijdammen (zie ook het derde deel in de serie, *Gea sept.*'14 op p. 83). Hier breekt het laagje water als het ware en ontwijkt CO<sub>2</sub>. Hierdoor komt het water iets hoger te staan. Dit proces gaat zo door en de wanden van de bekkens worden steeds hoger, soms tot 50 cm toe! Vergelijkbare vormen komen ook aan de oppervlakte voor, zoals de beroemde bekkens van Pamukkale in Turkije. Op de bodem van dergelijke bekkens vinden we vaak calciëtkristallen; op het water drijft soms een dun laagje kalk, calcite flottante. Heel fraaie bekkens zijn ook te bewonderen in de Skocjanska Jame in Slovenië.

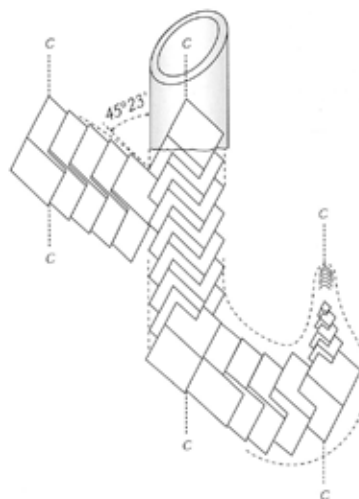
### Grotparels

Fascinerend zijn de in de bekkens soms voorkomende grotparels of pisolieten. Op een voorwerp in zo'n bekken, bijvoorbeeld een zandkorrel, kan zich kalk afzetten. Als het voorwerp in beweging raakt door de beweging van het water zal kalk op het voorwerp neerslaan zonder dat het voorwerp aan de bodem vastgroeit. Er ontstaat een concentrisch gelaagde kalkconcretie, een zogeheten grotparel. Meestal is het vaste voorwerp een zandkorreltje of een calciëtkristal, maar er is ook een grotparel bekend die een vleermuizenschedel als kern heeft. Net als in stalactieten en stalagmieten (en in parels die in oesters groeien) groeien de calciëtkristallen in de lengterichting, loodrecht op het oppervlak van de parel. De geleidelijk afgezette concentrische laagjes zijn alleen nog te zien aan de verschillende kleurbanden, die soms door de aanwezigheid van ijzer wordt veroorzaakt. Parels kunnen tot enkele centimeters groot worden.

Vaak komen calciëtkristallen in bekkens voor, zowel op de bodem als aan de wanden. Daarvan hebben de triangulaires een heel bijzonder vorm, met driehoekige wandjes van calciëtkristal tot zo'n 5 cm lang en 2 à 3 cm hoog. Deze ontstaan wanneer de bodem van het bekken met een heel dun laagje magnesiumhoudend water bedekt is. Triangulaires zijn zeldzaam en komen slechts in enkele grotten, onder meer in Frankrijk en België voor.

Excentriques (helictites in het Engels) behoren tot de mooiste en qua ontstaan ook de ingewikkeldste verschijningen in grotten. Druipsteen vormt zich normaalgesproken onder invloed van de zwaartekracht, die ervoor zorgt dat stalactieten netjes naar beneden groeien en stalagmieten ontstaan door vallende druppels. Bij de vorming van excentriques lijkt het echter of de zwaartekracht geen invloed heeft, wat betekent dat er andere, grotere, krachten zouden werken (afb. 4). Over het ontstaan van excentriques bestaan meerdere theorieën variërend van verschillen in groeisnelheid aan de randen van het kristal, aardmagnetisme en de invloed van micro-organismen.

Een verklaring die tamelijk algemeen aanvaard is gaat ervan uit dat via een uiterst dun kanaaltje in de excentrique door de capillaire kracht water wordt aangezogen. Aan de top van de excentrique treedt het water naar buiten, maar de hoeveelheid is zo gering dat de oppervlaktespanning van de microscopisch kleine waterdruppel groter is dan de zwaartekracht. De kalk slaat dan neer in een richting die niet door de zwaartekracht wordt bepaald. Neemt de watertoevoer toe, dan zal aan de excentrique



Afb. 4. Het veranderen van een macaroni in een excentrique. De C-as blijft constant. Bron: Cabrol et Mangin.

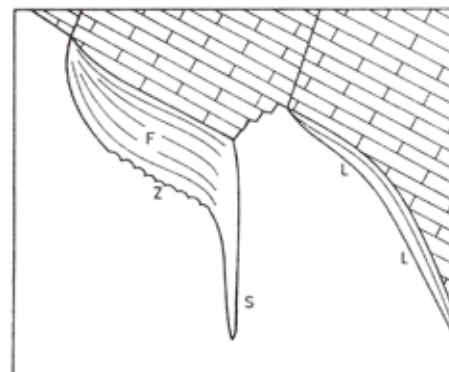
een macaroni beginnen te groeien. Raken macaroni's verstopt, op een microscopisch klein kanaaltje na, dan kan zich ook een excentrique vormen. Beide vormen van druipsteen komen dan ook regelmatig naast en aan elkaar gegroeid voor.

Ook osmose kan bij de vorming van excentriques een rol spelen. Het water in het centrale kanaal van de macaroni bevat meer kalk in oplossing dan het condenswater aan de buitenkant daarvan. Omdat er dus geen evenwicht is, zal (door osmose) het kalkhou-

dende water naar buiten treden, door de wand van de macaroni heen. Als de kalk neerslaat, kunnen allerlei grillige vormen ontstaan.

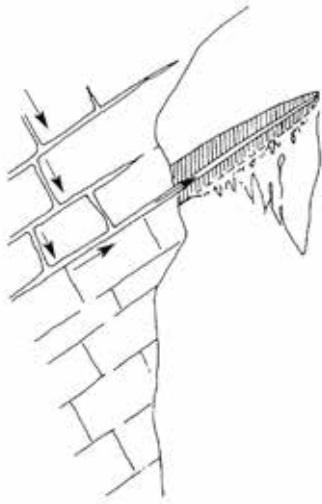
Als langs een hellend plafond kalkhoudend water stroomt zonder dat de druppels naar beneden vallen (zodat er geen stalactieten worden gevormd) kan toch kalk worden afgezet. De afzettingen vormen zich in meerdere lagen die in kleur kunnen verschillen, zogeheten 'draperieën' (of gordijnsinter, of in het Engels heel sprekend bacon sinter) (afb. 5).

Disques ontstaan doordat het water uit een barst in het gesteente onder druk naar buiten komt. Er wordt dan calciëtkristal afgezet die – door de waterdruk – tegen de zwaartekracht in kan groeien en als het ware twee platte schijven vormt. Deze staan loodrecht of schuin op de wand waartussen het water steeds verder naar voren dringt. De tekening (afb. 6) spreekt voor zich. Op een bepaald moment is de formatie zo zwaar dat hij afbreekt. Disques hebben hierdoor een beperkte grootte, tot een meter in doorsnede (afb. 7).



Afb. 5. De vorming van eerst een draperie (gordijnsinter) langs een hellend plafond en uiteindelijk een stalactiet. Bron: Cabrol et Mangin.

Er zijn nog vele andere vormen van calciëtkristalafzetting, maar in het kader van dit artikel wil ik besluiten met Mondmilk (lett. bergmelk; moonmilk in Engels/Amerikaanse literatuur, wat een onjuiste naam is omdat het Duitse 'Mond' 'berg' en niet 'maan' betekent). Dit verweringsproduct van kalk of kalksinter ontstaat meestal onder invloed van bacteriën. Bergmelk bestaat uit een min of meer plastische massa van microkristallijne calciëtkristal en water (35-70%), soms nog verontreinigd met kleimineralen. Wanneer het water verdampt blijft de kalk als een witachtig poeder over. Hoewel bergmelk meestal uit calciëtkristal bestaat, zijn er nog ten minste acht andere mineralen bekend die als bergmelk in grotten voorkomen. Het is niet de mineralo-



Afb. 6. Zo ontstaan disques; een schuine gelaagdheid van de kalksteen is een voorwaarde.  
Bron: Cabrol et Mangin.

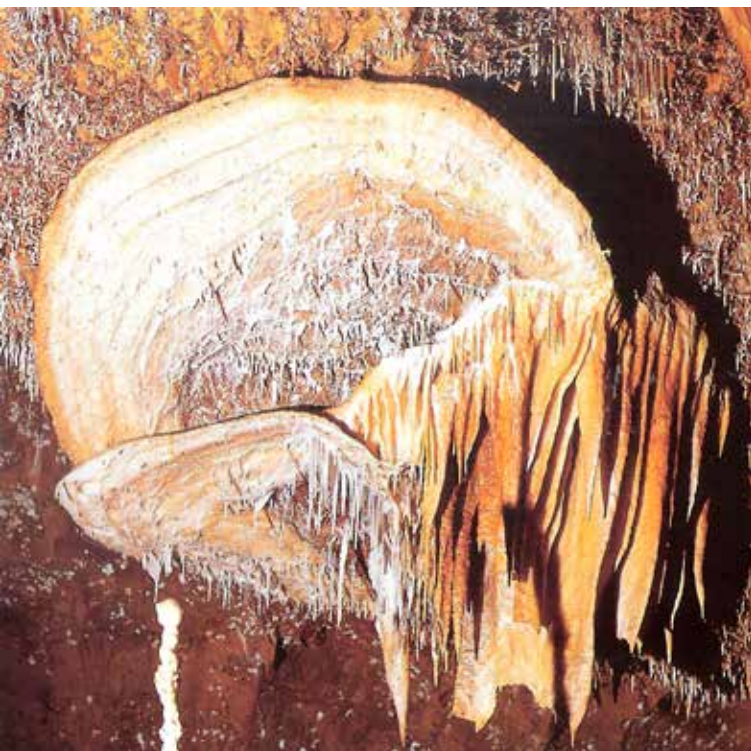
gische samenstelling maar de textuur die bepaalt of we een afzetting bergmelk noemen.

In de hydrothermale karst (zoals beschreven in het eerste artikel in deze serie) ontstaan sinterafzettingen op een bijzondere wijze. Het stijgende warme grondwater verliest druk en koelt af en CO<sub>2</sub> ont-

wijkt. Koud water bevat meer CO<sub>2</sub> en het resultaat van deze drukverlaging en afkoeling is een evenwichtssituatie. Als op een bepaald moment het drukverlies aanzienlijk sneller verloopt dan de afkoeling zal toch CO<sub>2</sub> ontsnappen en calciet neerslaan, vaak als wandsinter. Het grensvlak, waar het drukverlies ten opzichte van afkoeling de overhand kreeg en het evenwicht verstoord raakte, is bijvoorbeeld in de grotten onder Boedapest goed waar te nemen.

### Kleur in druipsteen

Zuivere calciet is helder, of wit. Maar eerder noemde ik al het ontstaan van crème tot dieprode, bijna zwarte tinten, die veroorzaakt worden door tegelijk met de calciet afgezette ijzerdeeltjes. Het merendeel van de kleuren die je onderaards aantreft is daarmee te verklaren. Overigens is het niet de hoeveelheid ijzer die de kleur bepaalt, maar met name de tijd die de ijzerionen aan de lucht zijn blootgesteld voordat ze weer met calciet werden bedekt. De tijd dus die het ijzer heeft gehad om te oxideren ('roesten'), afhankelijk van de snelheid van druipsteenvorming. Snel groeiende druipstenen zijn hierdoor meestal wit, ook al bevatten ze misschien veel ijzer. Kleurvorming in druipsteen kan ook worden veroorzaakt door andere mineralen, zoals mangaan



Afb. 7. Disques in de Aven d'Orgnac, Zuid-Frankrijk. Foto: Cabrol.

(zwart), koper (groen of blauw) nikkel (groen) en zwavel (geel). Ook stof, klei, algen, kleurstoffen afkomstig van begroeiing in de bodem boven de grot (vaak tannines uit bomen) en vleermuisen mest kunnen tegelijk met calciet worden afgezet en zo de kleur bepalen. De kleur wordt ook bepaald door de (lichtbreking van de) kristalstructuur.

Het verschijnsel van luminescentie (of nauwkeuriger: fluorescentie) wordt veroorzaakt door organisch materiaal dat in de calcietafzettingen is opgenomen. Zowel de kleurvariatie door tannine als door fluorescentie (ten gevolge van de aanwezigheid van organisch materiaal) kan aanwijzingen geven over het klimaat en seizoensinvloeden buiten de grot.

### Andere mineralen in grotten

Tot nu toe heb ik me beperkt tot een aantal verschillende vormen van calciet en aragoniet, beide CaCO<sub>3</sub>. Maar grotten komen ook voor in gesteenten als gips en anhydriet. In dergelijke grotten komen vaak gipskristallen voor. Gipsafzettingen komen we ook in kalkgrotten tegen, soms als kristalnaalden van meer dan een halve meter lang. De gipsformaties uit de Chandelier Ballroom in Lechuguilla Cave (VS) zijn zelfs meer dan zes meter lang! Gips kan in grotten ontstaan door een chemische omzetting van pyriet (FeS<sub>2</sub>) in kalk. Bacteriën spelen bij deze omzetting ook een rol, hoewel de omzetting soms ook geheel anorganisch plaatsvindt, in een veel trager tempo. Meestal slaat gips neer als zwavelzuur reageert met kalk. In het eerste deel van deze serie ben ik hier al uitvoerig op ingegaan. De enorme glasachtige selenietkristallen van gips in de Grot van Naica in Mexico (tot wel twaalf meter lang, vier meter in doorsnede en 55 ton in gewicht) hebben de laatste jaren veel pers aandacht gekregen. De grot, die op 300 meter diepte ligt, bevindt zich boven een magmakamer, waardoor de temperatuur van het water in de grot zo'n 50° C bedraagt. De kristallen zijn in een half miljoen jaar afgezet, zo is gebleken uit dateringen met uraniumthoriumdatering, totdat als gevolg van mijnbouwactiviteiten in deze streek de grot droogviel. De grot werd toevallig ontdekt tijdens een boring voor een tunnel.

In het tweede artikel beschreef ik grotvorming in andere gesteenten dan kalk en gips. Ook daar komen minerale afzettingen voor. Zo kunnen in lavagrotten de (laagviskeuze of taai-vloeibare) lava's van het plafond druipen, net zo als kaarsvet. Direct bij de vorming of later, wanneer het plafond onder invloed van hete gassen opnieuw smelt, vormen zich druipstenen uit lava. De nog hete lava kan ook met de lucht in de grot reageren waarbij nieuwe mineralen kunnen ontstaan. Bijzonder zijn de lavagrotten op de Azoren en de Canarische Eilanden, waar de lava reageerde met de zeelucht en chloormineralen bevatten.

Voor een uitvoerig gedetailleerd en mooi geïllustreerd overzicht van mineralen in lavagrotten verwijs ik naar Cave Minerals of the World (afb. 8, zie onder literatuur), waarin 255 verschillende



Afb. 8. 'Cave Minerals of the World'. Op de omslagfoto aragoniet in een grot in Zuid-Frankrijk, blauw door koper.  
Foto: Patrick Cabrol.

mineralen uit grotten worden beschreven. Intussen zijn er nog veel meer ontdekt, waarvan de meeste slechts in één of enkele grotten voorkomen.

Afzettingen in grotten zijn de moeite waard vanwege het esthetische aspect, maar ook voor de wetenschap. De grotten zelf zijn moeilijk te dateren omdat het in feite 'lege ruimtes' zijn, maar van de druipstenen kan de ouderdom wel bepaald worden. Ouderdomsbepaling van druipstenen tot zo'n 50.000 jaar terug vindt plaats door de biologische insluitsels te dateren, zoals met pollenanalyse of met radiokoolstofmetingen (C14-datering). Voor metingen die verder terug gaan wordt meestal de uranium-thoriumdatering (ofwel thorium-230-datering) gebruikt, die tot zo'n 500.000 tot 700.000 jaar teruggaat. Door analyse van ingesloten organisch materiaal, of door directe toepassing van zuurstof- en koolstofisotopenonderzoek ( $\delta^{18}\text{O}$  en  $\delta^{13}\text{C}$ ) is informatie over het klimaat tijdens het ontstaan van de druipsteen te verkrijgen. Zo leveren grotten vaak gegevens op die anders niet te verkrijgen zijn. Op die manier worden ook wetenschappelijke bijdragen geleverd aan het huidige klimaatonderzoek. In de Grotten van Han bijvoorbeeld, een bekende toeristenattractie, wordt ook veel klimatologisch onderzoek gedaan.

## IJs in grotten

IJs als minerale afzetting biedt ons een uitstapje naar het terrein van de speleoklimatologie.

Het gesteentepakket waarin een grot gevormd is, functioneert als een zeer goede isolatielaag. Hierdoor is de temperatuur in de grot vrijwel constant gedurende dag en nacht en zomer en winter. De temperatuur komt overeen met de gemiddelde jaartemperatuur van de buitenlucht; in gematigde streken bedraagt deze ongeveer 10 °C. 's Winters voelt een grot dan ook behaaglijk warm, 's zomers comfortabel koel.

In talrijke gebieden komt het fenomeen van de ijsgrotten voor: grotten met een permanente hoeveelheid ijs, ook daar waar de gemiddelde jaartemperatuur bóven het vriespunt ligt, zoals in de Franse Jura. IJsvorming is afhankelijk van het klimaat in de grot, dat weer afhankelijk is van het 'buitenklimaat'. Het meeste ijs wordt gevormd als de buitentemperatuur iets boven nul is en er veel water in de grot doorsijpelt. Is de temperatuur te laag, dan zal ook het omliggende gesteente een temperatuur onder nul aannemen en zal het water bevroren voor het in de grot kan doordringen. Streken van een gemiddelde geografische breedte zijn dan ook bij uitstek geschikt voor de vorming van ijsgrotten. In de winter is er vorst en sneeuwval en in de lente ligt de temperatuur onder het vriespunt, terwijl buiten de sneeuw al begint te smelten en voor watertoevoer zorgt.

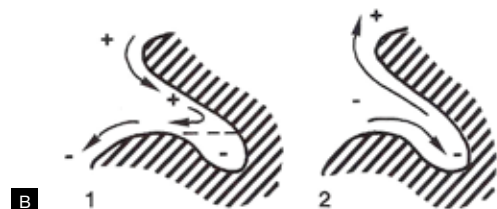
IJs in grotten vormt dezelfde formaties als kalksinter: druipijs aan het plafond, ijsfiguren op de grond en rijp op de wanden. Een permanente ijslaag op de bodem van de grot kan soms tientallen meters dik zijn. Stromend water en wind modelleren het ijs soms tot bizarre vormen. IJsvorming in grotten vindt vooral in het voorjaar plaats; in de zomer smelt het gedeeltelijk waarna het de volgende lente op dezelfde plaats opnieuw wordt afgezet.

Twee grottypen zijn geschikt om tot ijsgrot te worden gevormd. Ten eerste de zogeheten 'dynamische weergrotten', die op verschillende niveaus twee of meer ingangen hebben (afb. 9A). Doordat het soortelijk gewicht van warme lucht kleiner is dan van koude lucht, zal de warme lucht in de grot in de winter maanden door de boveningang de grot uitstromen. Koude buitenlucht zal via de benedeningang de grot instromen. In de zomer, wanneer de binnentemperatuur lager is dan de buitentemperatuur, zal de (koudere) lucht uit de grot door de laagste opening naar buiten stromen, daarbij de lucht uit de hogere gedeelten van de grot 'meezuigend'. Door de boveningang stroomt nu warme lucht naar binnen. Deze zal echter door de lagere temperatuur van het omringende gesteente en door het afgeven van warmte aan het ijs (dat daardoor ten dele smelt) al snel afkoelen. Het ijs in de bovenste gedeelten van de grot zal smelten, in het onderste gedeelte gebeurt dat niet of veel min-

der. Een fraai voorbeeld van een dergelijke grot is de (ook voor toeristen toegankelijke) Eisriesenwelt, ten zuiden van Salzburg. Naast deze dynamische weergrotten onderscheiden we 'statische weergrotten', die niet twee maar één opening bezitten. Hier is geen sprake van een doorgaande luchtstroom (vandaar de naamgeving met 'statisch'). In dit grottype zakt in de winter de zwaardere, koude lucht in de grot en blijft daar ook gedurende de zomer. In de zomer stijgt de temperatuur slechts langzaam, er is immers geen luchtstroming. In de winter wordt de koude toestand weer hersteld. Ook hier blijft gedurende het gehele jaar ijs bestaan. Een voorbeeld van een statische weergrot is de Grotte de la Glacière, niet ver van Besançon in Frankrijk. In de Romeinse tijd werd hier al ijs voor consumptie uit de grot werd gewonnen (afb. 9B).



Afb. 9A. Dynamische ijsgrotten: a. in de zomer; b. in de winter.



Afb. 9B. Statische ijsgrotten: 1. in de zomer; 2. in de winter. Bron: Trimmel, Höhlenkunde, 1968.

De klimaatverandering van de laatste jaren lijkt op deze grotten invloed te hebben omdat het 'permanente' ijs hier en daar toch aan het smelten is.

Nog een slotopmerking over het klimaat: de vochtige warme lucht die soms uit de grot stroomt zal bij een lage buitentemperatuur condenseren en wolkjes vormen. We spreken dan van een Trou qui Fume ('rokende grot'). Ook zal rondom de ingang van de grot door de relatieve warmte de sneeuw smelten. Daardoor zijn al veel grotten ontdekt, zoals de boveningang van de Galerie des Sources in België of Eingang 2 van Europa's langste grot, het Hölloch in Zwitserland.

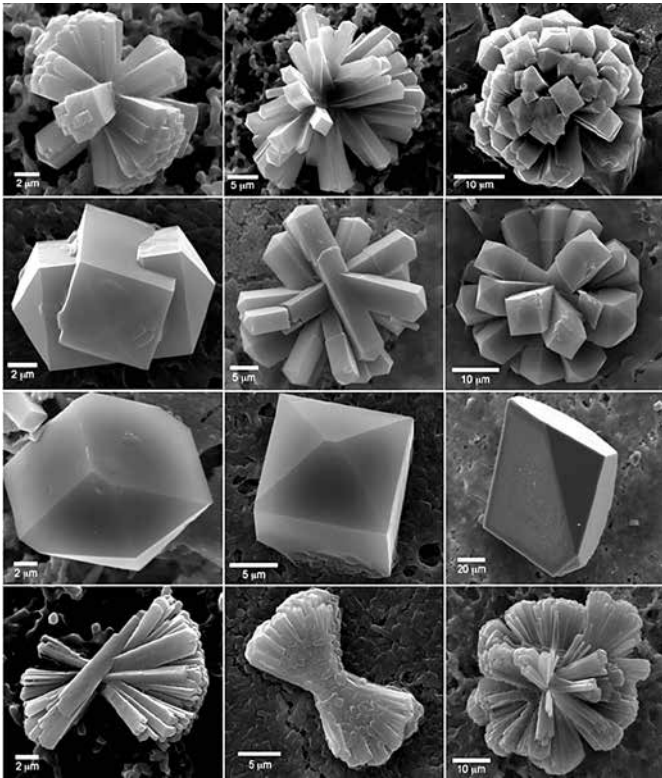
## Biologische (of biogene) afzettingen

Het zal de lezers van deze serie over speleogenese niet verbazen dat ook hier, bij het ontstaan van biologische afzettingen, microben een steeds belangrijker rol spelen.

Uit recent grottenonderzoek komt naar voren dat vrijwel alle wanden bedekt zijn met een slijmerig laagje, een biofilm die uit bacteriën bestaat. Een deel van deze bacteriën is verantwoordelijk voor grotvorming of afzettingen; een ander deel speelt hierbij geen actieve rol. (zie het eerste deel in deze serie). Ook onder de waterspiegel zijn bacteriën actief. Het gaat hier om drie processen:

1. 'Calcification': het afzetten van bacteriële stofwisselingsproducten of 'coatings' (ook stromatolieten ontstaan op deze wijze);
2. 'Trapping and binding': het 'afvangen' van mineralen uit het water. Zo ontstaan bijvoorbeeld microbially induced sedimentary structures (MISS), op stromatolieten gelijkende structuren;
3. 'Mediation': het veranderen van de zuurgraad van het water door bacteriën, waardoor het water oververzadigd raakt en kalk neerslaat; ook kunnen bacteriën de energie die beweging veroorzaakt tegengaan met als gevolg dat deeltjes uit het water neerslaan.

Vaak is er sprake van een combinatie van meerdere processen tegelijkertijd. Dit type onderzoek staat nog in de kinderschoenen, maar heeft toch al enkele belangrijke bevindingen opgeleverd. De studie van stromatolieten (niet in grotten) is al verder gevorderd en in laboratoria bestudeerd. Cyanobacteriën (verantwoordelijk voor de vorming van stromatolieten) vormen daadwerkelijk fraaie microkristallen, o.a. van aragoniet (afb. 10).



Afb. 10. Door bacteriën in het laboratorium afgescheiden aragonietkristallen. SEM-opname door Hazel Barton.

Het proces waarbij bacteriën voor minerale afzettingen (zoals kalk of kiezel) zorgen, wordt ook toegepast in de bouw: bacteriën die  $\text{CaCO}_3$  vormen, worden gebruikt om bouwsteen en monumenten te herstellen! Om hoeveel soorten bacteriën het gaat is niet bekend. Schattingen voor het aantal soorten in grotten lopen uiteen van vele tienduizenden tot honderdduizenden. Dit proces beperkt zich niet tot kalkgrotten. Dankzij bacteriën zijn er ook in grotten van graniet 'druipstenen' gevormd, met als bekende voorbeelden biogene opala [ $\text{SiO}_2 \cdot 15(\text{H}_2\text{O})$ ] en pigotiet [ $\text{Al}_4\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_{10} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$  of  $4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}_8 \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ ] (afb. 11 A en B).



Afb. 11. Afzettingen in de Cueva de la Trapa, een granietgrot in Galicië, Spanje: A. Pigotiet; B. Pigotiet in detail. Foto's M. Vaqueiro, CETRA Club, Galicia.

In de moderne vakliteratuur wordt de invloed van microben bij het ontstaan van afzettingen in karstgebieden en grotten als volgt omschreven:	
stalactieten en stalagmieten	invloed mogelijk
grotparels (pisolieten)	invloed waarschijnlijk
mondmilch	invloed zo goed als zeker
poolfingers	invloed zeker
tufafzettingen (travertijn) en gours of grotbekkens	invloed zeker
snottitis	invloed zeker

Dan zijn er nog twee bijzondere vormen van "druipsteen" recent ontdekt: poolfingers en snottitis. 'Normale' druipstenen kunnen alleen in de vrije atmosfeer ontstaan. De fraaie druipstenen onder water in de grotten in Mexico, waar in talloze documentaire duikers tussendoor zwemmen, zijn in droge grotten ontstaan, maar staan en hangen door zeespiegel-, en dus grondwaterstijging, nu onder water. *Poolfingers* zijn 'druipstenen' die daadwerkelijk onder water door bacteriën zijn gevormd (afb 12). *Snottitis* (of mucolites of 'pendulous biofilm') zijn, zoals de officiële naam al aangeeft, voorbeelden van een 'hangende' biofilm. Ze bestaan uit een 'snotterig' materiaal dat geheel uit bacteriën is opgebouwd en in 1999 ontdekt in de door bacteriën en zwavelzuur gevormde Cueva de Villa Luz in Mexico, maar intussen

uit veel meer grotten bekend. Aan de snottites hangen druppels zwavelzuur, met een pH tussen 0 en 0,5 (dus sterker dan accu-zuur) en in dat extreem zure milieu leven de bacteriën! Afb. 13. Er zijn natuurlijk ook biogene afzettingen van een groter formaat. Ik ga daar niet al te uitgebreid op in omdat dit meer het werkterrein van biospeleologen, paleontologen en archeologen is. Om te beginnen is er de guano of vleermuizenmest, die soms in metersdikke pakketten voorkomt. Vroeger werd dit grootschalig gewonnen omdat het salpeter bevat, een grondstof voor buskruit. In de Amerikaanse Burgeroorlog heeft dit een belangrijke rol gespeeld. Guano is bovendien vaak de basis van de voedselpiramide in grotten. Maar de grotbewonende vleermuizen halen hun voeding natuurlijk wel buiten; voor het merendeel zijn dat insecten, voor een enkele soort bloed van grotere dieren. Andere biogene afzettingen - soms dikke lagen - bestaan uit fossielen van Pleistocene zoogdieren, incl. de mens. Die kunnen zijn:



Afb. 12. Poolfingers in Aven-Grotte de la Cave de Vitalis, Frankrijk. Foto: Peter en Ann Bosted, [www.cavepics.com](http://www.cavepics.com)

1. ingespoeld: zo zijn er grotten met botten van fossiele olifanten, die natuurlijk niet in grotten kwamen;
2. ingebracht door dieren, bijvoorbeeld door hyena's (jagers of aaseters) of stekelvarkens (die op botten knagen om zo hun permanent groeiende tanden kort te houden);
3. gevallen in de grot, zoals de vele fossielen van onze prehistorische voorouders in de grotten van Zuid-Afrika zoals Swartkrans, Kromdraai en Sterkfontein. Die kwamen daar terecht doordat luipaarden vaak in de bomen bij de ingang van de grot hun prooi (onze voorouders) oppeuzelden;
4. achtergebleven, omdat dieren die op eigen gelegenheid de grotten binnendrongen (als schuilplaats of voor hun winterslaap) daar doodgingen. In de Grot van Mixnitz (Oostenrijk), de 'Drachenhöhle', lagen overblijfselen van tienduizenden hollenberen, die daar allemaal, gedurende tienduizenden jaren, tijdens hun winterslaap zijn overleden. Die grot heet Drachenhöhle omdat men aanvankelijk dacht dat het om botten van draken ging. In grotten gevonden botten zijn overigens in grote massa's gewonnen ten behoeve van het gebruik als meststof.

Ik eindig hiermee mijn vierdelige serie over de geologie van grotten en karst. Ik heb niet meer dan enkele onderwerpen kunnen behandelen, en dan vaak nog in grote lijnen. Maar gelukkig is er veel goede literatuur, al gaat er niets boven het daadwerkelijk wandelen door karstgebieden en het bezoeken van de grotten, om het allemaal in werkelijkheid te kunnen aanschouwen.

## Literatuur

In de serie over speleogenese zijn eerder de volgende drie artikelen gepubliceerd:

Speleogenese: het ontstaan van grotten. Deel I: Geologie of biologie? In *Gea* december 2013, vol. 46 nr. 4

Speleogenese: het ontstaan van grotten. Deel II: Grotten, maar geen karst. In *Gea* maart 2014, vol. 47 nr. 1

Speleogenese: het ontstaan van grotten. Deel III: Karstverschijn-

selen aan de oppervlakte. In *Gea* september 2014, vol. 47 nr. 3. Zie voor algemene literatuur over de geologie van grotten en karst het artikel in *Gea* 2013 nr. 4; ook hier geldt weer dat in het bijzonder beide encyclopedieën veel informatie verschaffen. Bovenstaand artikel is gedeeltelijk gebaseerd op eerder in *Gea* gepubliceerde teksten van de auteur die inmiddels ook online beschikbaar zijn. Zie het themanummer 'Grotten en karst': *Gea* maart 1982, of op <http://natuurtijdschriften.nl>.



Afb. 13. Snottites in Cueva de Villa Luz. Foto: Kenneth Ingham.

## Over (klastische) sedimenten in grotten:

- Ira D. Sasowsky and John Mylroie (Eds) *Studies of Cave Sediments; Physical and Chemical Records of Paleoclimate*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2004

## Over mineralen in grotten:

- Patrick Cabrol, Alain Mangin *Fleurs de Pierre*, Delachaux et Niestlé, Lausanne, 2000
- Ian J. Fairchild and Andy Baker *Speleothem Science, from Process to Past Environments*, WileyBlackwell, Chichester, 2012
- Carol Hill and Paolo Forti *Cave Minerals of the World*, National Speleological Society, Huntsville, Al., 1997<sup>2</sup>

## Over de invloed van bacteriën:

- H.M. Pedley and M. Rogerson (Eds) *Tufas and Speleothems, Unravelling the Microbial and Physical Controls*, Geological Society Special Publication 336, The Geological Society, London, 2010

## Over kalktuf (travertijn):

- Allan Pentecost *Travertine*, Springer, Berlin/Heidelberg, 2005

## Over het klimaat in grotten (helaas in het Italiaans)

- Giovanni Badino *Fisica del Clima sotterraneo*, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia 7 serie II, Bologna, 1995