

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:

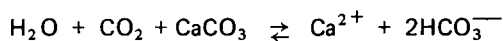
Sarawak Chamber (Nasib Bagus Cave, Sarawak)
 700x300x70 m, (± 12 miljoen m³).
 Salle Verna (Pierre Saint Martin, Spanje/Frankrijk)
 230x180x150 m, (± 4 miljoen m³).
 La Torca del Carlista (Spanje) 520x245x120 m, (± 4 miljoen m³).

afb. 16. "Erosieorgels" (rillenkarren) in de Grotte des Planches (Arbois, Jura, Frankrijk) met een hoogte van ± 1 ½ 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

groeit een hol buisje, met een doorsnede gelijk aan die van een druppel.

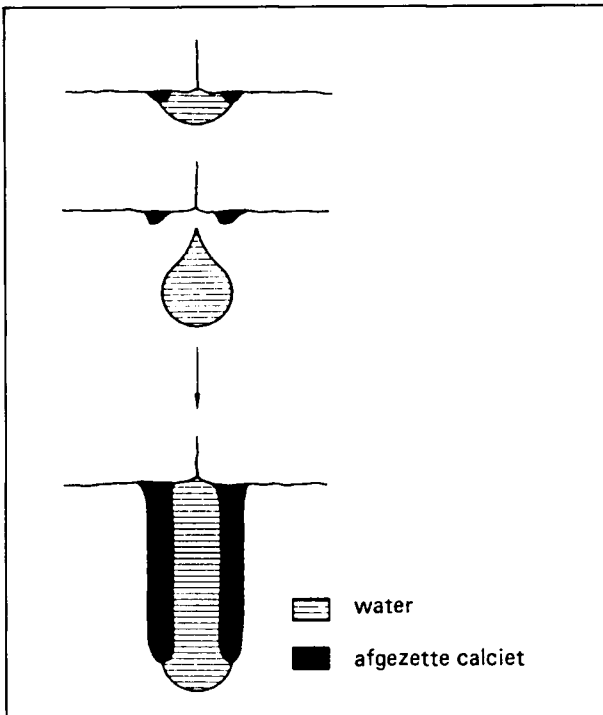
Er vormt zich een hangende druipsteen, een **stalactiet**, van het macaronitype. Deze kan tot enkele meters lang worden! Afb. 17 en 18.

Als het buisje verstopt raakt, of de watervoorziening erdoor stopt, dan kan de macaroni door kalkhoudend water dat b.v. van opzij komt en langs de macaroni naar beneden stroomt in de breedte verder groeien. Ook nog in de lengte, maar dan zonder centraal kanaal. We spreken dan niet meer van macaroni, maar van stalactiet zonder meer. In oorsprong is dus in stalactieten altijd een centraal kanaal aanwezig.

Ook vallen er waterdruppels op de grond. Ook dan ontwikkelt CO_2 en slaat kalk neer. Er ontstaat een bodemdruip-



afb. 18. Macaroni's en excentriques in de Galerie des 800 mètres in het Zwitserse Hölloch. Deze galerie ligt relatief hoog en wordt niet meer bedreigd door de regelmatige overstromingen zoals die zich in andere gedeelten van het Hölloch voordoen. Daardoor kunnen de zeer kwetsbare druipsteenvormen ontstaan.



afb. 17. Groei van een macaroni (naar Moore en Nicholas Sullivan, 1978)

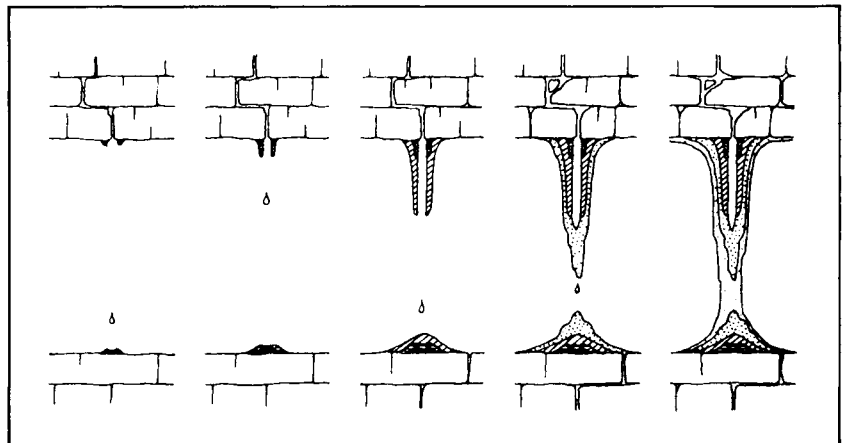
afb. 19. Het ontstaan van druipsteen (uit Binggeli et al., 1976)

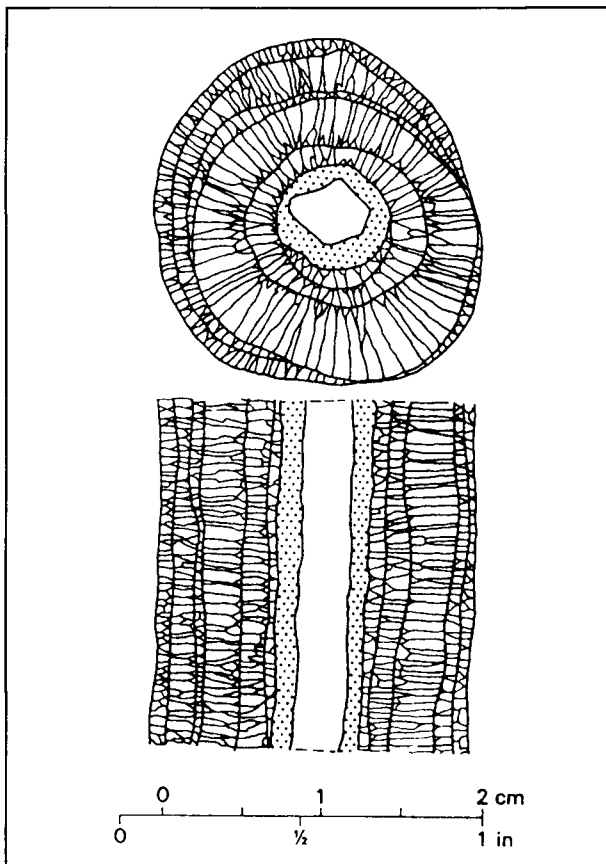
steen of **stalagmiet** (let op: stalactiet en stalagmiet). Natuurlijk zonder centraal kanaal en vaak wat breder en minder spits dan de (dikwijls er direct boven groeiende) stalactiet.

De waterdruppels vallen soms van grote hoogte en spatten uiteen voordat de kalk neerslaat. Er ontstaan dan stalagmieten van een merkwaardig model, die lijken op een stapel borden en zo dan ook worden genoemd (**piles d'assiettes**).

Als een stalactiet en een stalagmiet aaneengroeien, spreken we van een **zuil**. Afb. 19.

Het zal duidelijk zijn dat druipsteen, zowel stalactieten als stalagmieten, in concentrische lagen wordt afgezet. Deze lagen zijn bij afgebroken stukken meestal op de kleur te herkennen. IJzerdeeltjes die tegelijkertijd met de calciet of aragoniet neerslaan zorgen voor tinten van crème tot diepzwart (zuivere kalk is kleurloos of wit). De oorspronkelijke macaroni bestaat uit lange kristallen die in de lengte van de macaroni georiënteerd zijn. Naar buiten toe volgt een dunne laag kristal door elkaar liggende korte kristallen en dan weer een laag lange kristallen, die loodrecht op de richting van de oorspronkelijke macaroni staan. Calcietkristallen groeien in de lengterichting het snelst en die kristallen die de meeste ruimte hebben om te groeien zijn degene die loodrecht op de oorspronkelijke macaroni staan, want die hinderen





afb. 20. De kristalstructuur in een doorsnee van een stalactiet. De buitenste lagen hebben een uitstralend kristalpatroon. In de wand van het centrale kanaal hebben de kristallen een verticale oriëntatie (naar Moore en Nicholas Sullivan, 1978).

elkaar niet. Anders georiënteerde kristallen stoppen elkaars groei en blijven derhalve 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. 20.

Als het water langs het plafond wegstroomt zonder een stalactiet te vormen kan er toch kalk worden afgezet. Er ontstaan dan stroken van sinter, die we gordijnsinter of draperie noemen. Ook zijn er overgangsvormen. Afb. 21.

Afzettingen van kalk op de wanden kunnen eveneens heel fraaie vormen aannemen. Zo zijn er de 'versteende water-vallen', die natuurlijk weinig met watervallen van doen hebben. Immers, in een echte waterval zal eerder sprake zijn van corrosie (en erosie!) dan van sinterafzetting. De structuur van de wand speelt een belangrijke rol. Is deze oneffen, dan zal ook de wandsinter een bepaalde structuur gaan vertonen. Soms ontstaan velden van kleine bobbeltjes van kalk, dan spreken we van koraal- en knopsinter. Op licht hellende wanden kunnen z.g. grot- of sinterbekkens ontstaan. Afb. 22.

Deze worden gevormd als in een oneffenheid op de wand water blijft staan. Langs de randen wordt dan kalk afgezet en het water kan iets hoger komen te staan. Dit proces

gaat zo door en de wanden van de bekken worden steeds hoger, soms tot 50 cm toe! Vergelijkbare vormingen komen ook aan de oppervlakte voor, b.v. de beroemde bekken van Pamukkale in Turkije. Op de bodem van dergelijke bekken vinden we vaak calcietkristallen; op het water drijft soms een dun laagje kalk, calcite flottante. Heel fraaie bekken zijn te bewonderen in de Skocjanska Jama in Joegoslavië.

Fascinerend zijn de in de bekken soms voorkomende grotparels of pisolieten.

Op een voorwerp in zo'n bekken kan zich kalk afzetten. Als nu van enige hoogte in het bekken water drupt, zodat het voorwerp in beweging raakt, zal de kalk op het voorwerp neerslaan zonder dat dit echter aan de bodem vastgroeit. Er ontstaat een concentrisch gelaagde kalkconcretie, een grotparel.

Het vaste voorwerp is meestal een zandkorreltje of een calcietkristal, maar er is ook een grotparel bekend met een vleermuizenschedel als kern.

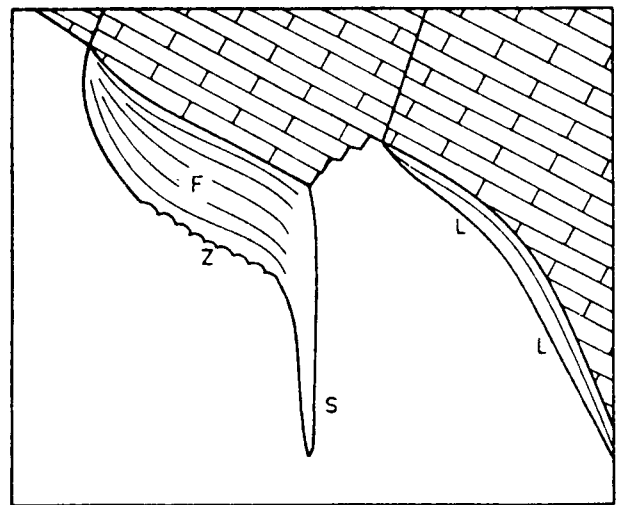
Evenals in stalactieten en stalagmieten, en ook zoals in echte, in oesters gegroeide parels, groeien de calcietkristallen in de lengte, loodrecht op het oppervlak van de parel. Afb. 23.

Dat de parel is ontstaan uit geleidelijk afgezette concentrische laagjes is alleen nog te zien aan de kleurbanden, die soms door ijzerdeeltjes worden veroorzaakt.

Parels worden tot enkele cm's groot.

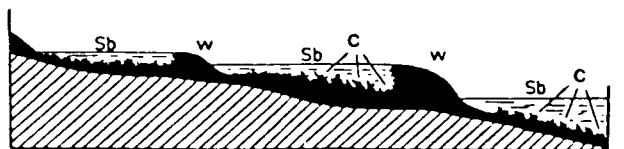
Calcietkristallen komen in bekken, op de bodem en de wanden, vaak voor. Een heel bijzondere vorm daarvan is die van de 'triangulaires', wandjes van calciet, tot zo'n 5 cm lang en 2 à 3 cm hoog, in een driehoekige vorm.

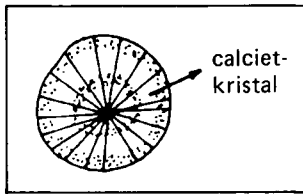
Deze schijnen te ontstaan wanneer de bodem van het bekken met een heel dun laagje water bedekt is. Zij komen slechts in enkele grotten in Frankrijk voor. Afb. 24.



afb. 21. Gordijnsinter (F), wandsinter (L), getande sinter (Z) en stalactiet (S). (naar Bögli, 1978)

afb. 22. Grot- of sinterbekkens. Sb = sinterbekken. W = wand. C = calcietkristallen. (Bögli, 1978)





afb. 23. Doorsnede van een grotparel.

Excentriques behoren tot de mooiste, maar qua ontstaan ook ingewikkeldste verschijningen in grotten.

Druipsteen is normaal gesproken onderworpen aan de zwaartekracht; ofwel de zwaartekracht zorgt ervoor dat stalactieten netjes naar beneden groeien, ofwel hij laat de druppel vallen en doet zo stalagmieten ontstaan.

Bij de vorming van excentriques lijkt het echter of de zwaartekracht niet bestaat. Dat betekent dus dat er andere, grotere, krachten werken. Afb. 25.

Er zijn vele theorieën over het ontstaan van excentriques, die gaan van variërend aardmagnetisme tot de invloed van micro-organismen. Een tamelijk algemeen aanvaarde verklaring is, dat via een uiterst dun kanaaltje in de excentrique door capillaire kracht water wordt aangezogen. Aan de top van de excentrique treedt dit water naar buiten, doch 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 bepaald wordt. Neemt de watertoevoer toe, dan zal aan de excentrique een macaroni beginnen te groeien. Raken macaroni's verstopt op een microscopisch klein kanaaltje na, dan zal zich een excentrique kunnen vormen. Beide vormen van druipsteen komen dan ook regelmatig naast en aan elkaar gegroeid voor.

Als laatste calciëtvorming (er zijn er nog vele) noem ik **bergmelk**. Deze ontstaat als verweringsprodukt van sinter, onder invloed van bacteriën. Hij bestaat uit een min of meer plastische massa van calciëtkristallen en water (35-70%), soms nog verontreinigd met kleimineralen. Wanneer het water verdwijnt blijft de kalk als een witachtig poeder over.

Andere mineralen in grotten

Het verhaal is tot nu toe beperkt gebleven tot een aantal verschillende vormen van calcië en aragoniet, beide CaCO_3 . Maar grotten komen ook voor in gips en in die grotten zijn natuurlijk gipskristallen niet ongewoon. Ook in kalkgrotten komen afzettingen van gips voor, soms als kristalnaalden van meer dan 20 cm lengte. Gips is hier ontstaan door een omzetting van pyriet (FeS_2) die in de kalk voorkomt. Bacteriën spelen bij deze omzetting een rol, hoewel de omzetting soms ook anorganisch, doch dan veel langzamer, geschiedt.

En dan noemt Bögli (1978) nog 100 andere mineralen uit grotten! De meeste daarvan blijven echter slechts tot één grot beperkt.

Leem

Als kalk corrodeert blijven de oorspronkelijk in de kalk aanwezige verontreinigingen achter. Voornamelijk zijn dit kleimineralen en ijzer. Als de opgeloste kalk is afgevoerd, is het restprodukt dan ook een min of meer door ijzer 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. Leem kan ook in een grot zijn ingespoeld, of zelfs door gletsjers of landijs in de grot als eindmorene zijn afgezet. Vaak zijn grotgangen dan ook door leem afgesloten, graven is dan de enige manier om een doorgang te vinden.

Ijsgrotten

Ijs in grotten is de laatste afzetting waarover nog wat gezegd moet worden. Het is dan tegelijk een uitstapje naar de **speleoklimatologie**.

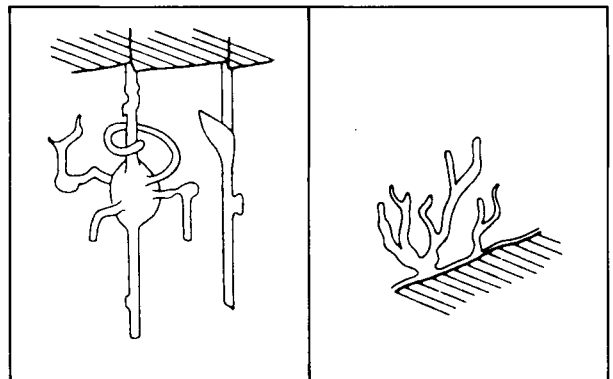
Doordat het gesteentepakket waarin een grot gevormd is als een geweldige isolatielaag werkt is de temperatuur in een grot constant, gedurende dag en nacht, gedurende zomer en winter, en wel gelijk aan de gemiddelde temperatuur van de buitenlucht. In de gematigde streken is dit zo ongeveer 10°C . 's Winters is een grot dan ook behaaglijk warm, 's zomers comfortabel koel. In talrijke gebieden komen echter ijsgrotten voor, d.w.z. grotten met een permanente hoeveelheid ijs, ook daar waar de gemiddelde jaartemperatuur boven het vriespunt ligt, zoals b.v. in de Franse Jura.

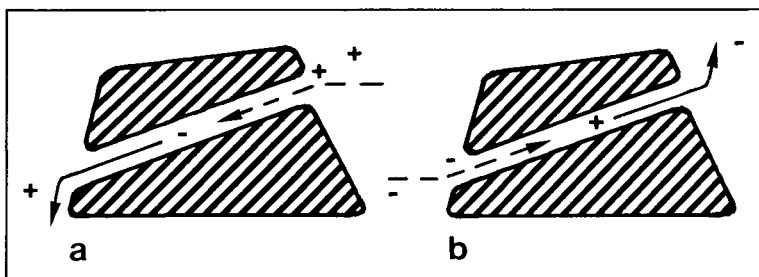
De vorming van ijs is afhankelijk van het klimaat in de grot, dat weer afhankelijk is van het 'buitenklimaat'. Het meeste ijs wordt gevormd als de temperatuur iets onder nul is, terwijl er veel water in de grot doorsijpelt. Is de temperatuur te laag, dan zal ook het omliggende gesteente een temperatuur onder nul aannemen en zal het



afb. 24. Een bijzondere vorm van calciëtafzettingen in grotten: triangulaires, hier uit de Gouffre de Proumeyssac (Dordogne, Frankrijk) en $\pm 5 \text{ cm}$ in doorsnede.

afb. 25. Excentriques (Bögli, 1978).





afb. 26. Dynamische ijsgrot. a: in de zomer. b: in de winter (naar Trimmel, 1968)

water bevrozen voor het in de grot kan doordringen. Streken van een gemiddelde geografische breedte zijn dan ook bij uitstek geschikt: in de winter vorst en sneeuwval en in de lente nog een temperatuur onder het vriespunt, terwijl dan 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, rijp op de wanden.

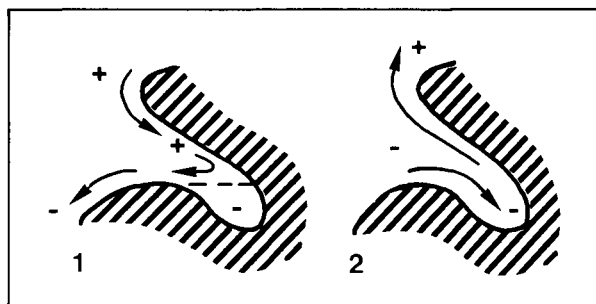
Een permanente ijslaag op de bodem van de grot kan soms tientallen meters dik zijn. Stromend water en wind modelleren het ijs tot soms bizarre vormen. Het meeste ijs wordt in het voorjaar gevormd, het smelt voor een deel in de zomer en wordt dan de volgende lente op dezelfde plaats opnieuw afgezet.

Er zijn twee typen van grot geschikt om tot ijsgrot te worden. Ten eerste de **dynamische weergrotten**, die twee of meer ingangen hebben op verschillend niveau. Afb. 26.

Doordat warme lucht soortelijk lichter is dan koude lucht, zal de warme lucht in de grot in de wintermaanden door de boveningang de grot uitstromen. Koude lucht van buiten zal via de benedeningang de grot binnendringen. In de zomer, wanneer de temperatuur van de lucht in de grot lager is dan die van de buitenlucht, 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 een lagere temperatuur aannemen. Het ijs in

de bovenste gedeelten van de grot zal smelten, in het onderste gedeelte echter niet of in veel mindere mate. Een fraai voorbeeld van een dergelijke grot is de ook voor toeristen toegankelijke Eisriesenwelt ten zuiden van Salzburg.

Dan zijn er ook nog z.g. **statische weergrotten**, die slechts één opening bezitten. Hier is natuurlijk geen sprake van een doorgaande luchtstroom, hetgeen ook in de benaming tot uiting komt. Hier 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 dergelijk type grot is de Grotte de la Glacière, niet ver van Besançon, waar in de Romeinse tijd al ijs voor consumptie uit de grot werd gewonnen. Afb. 27.



afb. 27. Statische ijsgrot. 1: in de zomer; 2: in de winter (Trimmel, 1968).

Biospeleologie: levensvormen in grotten

In de vorige hoofdstukken zijn de grotten en de landschappen waarin zij voorkomen uitsluitend vanuit een geologische, of zo u wilt geomorfologische invalshoek bekeken. En dat is in een tijdschrift als *Gea* natuurlijk terecht.

Maar er valt meer te zien (en te doen) onder de grond. In de volgende hoofdstukken zal ik trachten u een indruk te geven van een aantal andere aspecten van de speleologie.

Allereerst de biospeleologie.

Grotten hebben door het ontbreken van licht een geheel eigen flora en fauna.

De flora is beperkt tot schimmels, bacteriën en enkele algen. De overige, groene, planten zijn voor hun stofwissel-

ing afhankelijk van het (zon)licht, en ontbreken dus geheel. Bacteriën b.v. kunnen daarentegen de nodige energie halen uit de omzetting van kalk in bergmelk (biochemische corrosie) en kunnen dus wel onafhankelijk van het licht in grotten verblijven.

Toch tref je dikwijls in grotten groene planten aan, maar dan alleen in voor toeristen ingerichte grotten. Dit is de z.g. lampenflora die groeit dankzij de elektrische verlichting. Dit is dus in feite een verontreiniging. In Zuid-Duitsland zijn al meer dan 80 soorten tot de lampenflora behorende planten geteld.

Met de dieren is het geheel anders gesteld. Op allerlei manieren komt voedsel de grot binnen (via water, vliegend, via uitwerpselen van dieren die de grot regelmatig bezoeken