

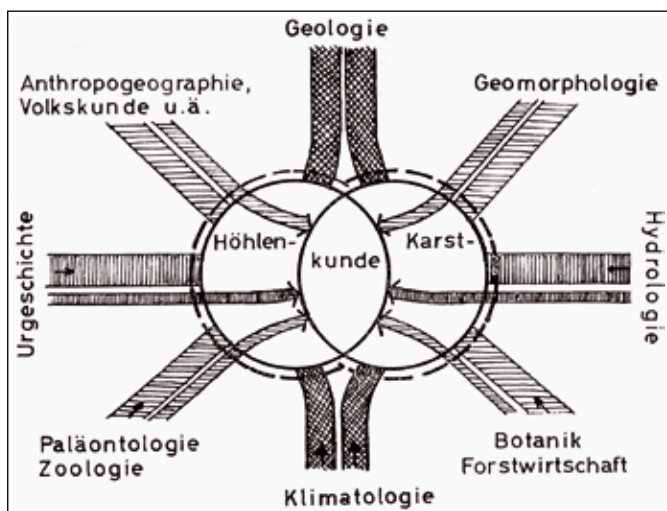
Speleogenese: het ontstaan van grotten.

Deel III: Karstverschijnselen aan de oppervlakte

door Herman de Swart
hermandeswart@casema.nl

In de twee voorgaande artikelen over speleogenese (resp. in Gea december 2013 en maart 2014) heb ik karstgrotten en grotten in ander gesteente dan kalk behandeld. Maar speleologen bestuderen behalve de grotten ook de oppervlakte van gebieden waar grotten voorkomen, zoals karstgebieden.

De vertaling van speleologie in het Duits is 'Karst- und Höhlenkunde'. Dat geeft beter aan wat de speleologie bestudeert, namelijk de studie van zowel grotten als karstverschijnselen. Want niet alle grotten zijn karstgrotten, zoals we in de vorige artikelen hebben kunnen lezen, en wat speleologen onderzoeken beperkt zich niet tot grotten alleen.



Afb. 1. Speleologie ('Karst- und Höhlenkunde') als multidisciplinaire wetenschap (Trimmel, 1968).

Trimmels Höhlenkunde uit 1968 geeft daarvan een overzichtelijk schema (afb. 1): de cirkel links geeft het onderzoek van alle grottypen aan, de cirkel rechts de studie van karstverschijnselen (zowel ondergronds als aan het aardoppervlak). Daar waar beide cirkels overlappen, is het onderzoek van karstgrotten gesitueerd. De pijlen om de cirkels geven aan welke wetenschappen gezamenlijk de speleologie of Karst- und Höhlenkunde vormen. Daar mogen er overigens nu, bijna vijftig jaar later, wel een aantal aan worden toegevoegd, zoals de studie van bacteriën (micro(geo)biologie), astronomie (vanwege de aanwezigheid van grotten op andere planeten en manen) maar vooral de studie van 'systeem aarde', waarbij de diverse disciplines veel meer als onderling afhankelijk worden gezien. De koolstofcyclus wordt in die benadering bijvoorbeeld zowel vanuit de geologie, de hydrologie, de biologie als de astronomie bestudeerd. In dit artikel geef ik een overzicht van de 'bovengrondse' karstverschijnselen.

Enkele begrippen

Misschien is het goed nog even stil te staan bij de verschillende benamingen waarmee het onderzoek van karst en grotten wordt aangegeven. De studie van karstverschijnselen is duidelijk een onderdeel van de geologie en wordt dan ook met de term *karstgeologie* aangeduid. De Fransen hebben de studie van de karst tot een min of meer zelfstandig terrein van onderzoek bevorderd

en spreken van *karstologie*. In het Engels wordt soms de term *karst science* gebruikt.

Als het de landschapsvorming betreft kunnen we het onderzoek naar karst ook onderbrengen bij de geomorfologie; we spreken dan van karstgeomorfologie. Dit is de beschrijving van de verschillende vormen in het karstlandschap. In de hydrologie of karsthydrologie ligt het accent op de studie van de ondergrondse waterlopen en het ontstaan van grotten. Bestuderen we mineralen in grotten dan noemen we dit speleomineralogie. Het totaal van deze (geologische) wetenschappen wordt ook wel met de term *fysische speleologie* aangeduid, hoewel speleologie meer omvat dan alleen de studie van geologische processen. Ook biologie (zoölogie, botanie en microbiologie), paleontologie, archeologie, klimatologie, astronomie en zelfs psychologie hebben bijgedragen tot de vorming van wat nu de (wetenschappelijke) speleologie inhoudt. Die disciplines krijgen dan vaak het voor- of tussenvoegsel speleo – bijvoorbeeld biospeleologie. Ook het (economisch en sociaal) gebruik van grotten, culturele speleologie (zoals grotten in de beeldende kunst en literatuur) en de ontwikkeling van technieken voor grotexplootatie worden tot de wetenschappelijke speleologie gerekend. Speleologie is ook een fascinerende sport, al is de naam daarvoor misleidend (logos betekent immers kunde, wetenschap) en er zou beter, naar analogie van bergsport, van grottsport gesproken kunnen worden. In het Engels zijn er wel verschillende woorden voor: *speleology* voor de wetenschap, *caving* of *potholing* voor de sport. Ook in het Amerikaans is er onderscheid: *speleology* en *spelunking*. In het Nederlands wordt voor de sport meestal 'grotten' als werkwoord gebruikt (naar analogie van fiets/fietsen is er grot/grotten).

Cryptokarst en paleokarst

In de twee voorgaande artikelen in Gea is reeds een groot aantal begrippen uit het onderzoek van grotten en karst aan de orde geweest. In dit artikel over oppervlaktekarst wil ik daar nog twee belangrijke begrippen aan toevoegen: cryptokarst en paleokarst.

Cryptokarst, letterlijk 'verborgen karst', is het ontstaan van karstfenomenen onder de bodem die het kalkgesteente bedekt. Verderop in dit artikel noem ik het ontstaan van 'rundkarren' hiervan als voorbeeld. (Het ontstaan van grotten gebeurt ook vaak in het verborgene, maar dat valt buiten de definitie van cryptokarst.)

Met *paleokarst*, letterlijk 'oude karst', worden karstfenomenen bedoeld die in het geologisch verleden zijn ontstaan (paleo betekent 'oud' in het Grieks). Bij boringen wordt op grote diepte vaak dergelijke paleokarst aangetroffen, maar ook in het hooggebergte – nu zonder grote rivieren – vinden we grotten die ooit door rivieren gevormd zijn. Soms worden *karrenvelden* (zie hierna voor de uitleg) aangetroffen in bijvoorbeeld Devonische kalksteen die door sedimenten uit het Mesozoïcum zijn bedekt. Ook dat is paleokarst.

Karren, limestone pavements en karrentafels

Het eerste wat we in het veld waarnemen waar de ondergrond uit kalk bestaat, waar bovendien voldoende neerslag valt én waar geen of matige plantenbedekking is, zijn de zogenaamde karren (*lapiaz*, *lapiez*). Deze ontstaan doordat regenwater CO₂ opneemt uit de lucht en hierdoor enigszins zuur wordt. Dit regenwater komt op de kalk terecht en lost het tijdens het wegstromen een beetje op, met een geultje als gevolg. Steeds meer

water zal via dit geultje wegstromen (het gaat als een gootje fungeren) en zo zal het geultje steeds dieper worden. In die gootjes ontstaat een humuslaag(je) als gevolg van kleimicroben die achterblijven als de kalk corrodeert, door bacteriën en algen en later ook door rottend plantenmateriaal. Want hier zullen plantjes (algen, mossen) gaan groeien die op hun beurt door ademhaling en rotting kooldioxide vormen. Op den duur ontstaat zo een 'karrenveld' of 'karrenlandschap'. Afb. 2.



Afb. 2. Karrenveld op het Massif de Parmelan (Fr.).

Er zijn vele vormen van karren te onderscheiden. Belangrijke factoren die bij het ontstaan van deze verschillende vormen een rol spelen, zijn de structuur van het kalkgesteente, de helling van de kalklagen, de aan- of afwezigheid van een humusrijke bodem, de hoeveelheid neerslag en de aanwezigheid van breuken en diaklazen. Enkele kenmerkende karrenvormen zal ik kort noemen, waarbij men zich moet realiseren dat er vele overgangsvormen bestaan.

Kenmerkende karrenvormen

Stroomt het water snel weg, dan zullen vele, naast elkaar liggende, betrekkelijk ondiepe geultjes ontstaan, de **rillenkarren**. Deze komen vooral voor op hellende oppervlakken.

Op vlakker liggende kalkoppervlaktes, waar het water langzamer wegstroomt en de tijd heeft naar dieper gelegen plaatsen te stromen, zullen enkele, relatief diepe geulen ontstaan, de **kluftkarren**. Veelal zullen die voorkomen op plaatsen in het gesteente waar breuken of diaklazen al voor een zwakkere of lagere plek hebben gezorgd; deze bepalen de richting van de kluftkarren. In kluftkarren kan ook een humuslaag en plantengroei ontstaan. Hierdoor zal het corrosieproces sneller en ook zijwaarts verlopen. In de loop van de tijd raken de kluftkarren zo bedekt en worden de wanden tussen de karren ondermijnd zodat ze uiteindelijk zullen verdwijnen.

Rundkarren ontstaan onder een bodem (of gletsjerijs). Hierdoor hebben de wanden tussen de karren geen spitse top, maar zijn ze afgerond.

Kamenica zijn kleine bekkens in het (horizontale) kalkgesteente, enkele tientallen centimeters in doorsnede, waar regenwater zich verzamelt en het bekken langzaam groter en dieper wordt totdat er een uitstroomopening ontstaat en het water wegloopt. Deze uitstroomopeningen verdiepen zich en zo ontstaan **meanderkarren**.

Daar waar de kalk (vrijwel) horizontaal ligt en de bodembedekking ontbreekt, bijvoorbeeld omdat gletsjers de bodem in de laatste ijstijd hebben weggeschrapt, kunnen **limestone pave-**

ments ontstaan. Hiervan vinden we prachtige voorbeelden in de Burren, aan de Ierse westkust. Zo'n **limestone pavement** lijkt inderdaad op een *pavement* (plaveisel of bestrating), alsof het door mensen is gemaakt. Het bestaat uit **grikes** (of grykes), de soms meters diepe kluftkarren, en **clints**, de blokken ertussen (afb. 3).



Afb. 3. Limestone pavement in de Burren (Ierland).

Op karrenvelden vinden we vaak **karrentafels**. Deze zijn op min of meer dezelfde manier ontstaan als de veel bekendere gletsjertafels (vandaar ook de naam). In dat geval bedekt een zwerf- of morenekei een deel van het kalkoppervlak; om de kei heen vindt corrosie plaats en er ontstaan karren. Omdat de kalk ónder de kei beschermd is, komt de kei ten opzichte van zijn omgeving steeds hoger te liggen.

Verdwijngaten en bronnen

In het eerste artikel (in *Gea* 2013 nr. 4) hebben we gezien dat grotten op verschillende manieren kunnen ontstaan, waarbij ondergrondse afwatering in karstgebieden een belangrijke rol speelt. Verdwijngaten (*sinkholes*, *pertes*, *chantoirs*) en bronnen zijn de eerste karstfenomenen die we aan het aardoppervlak kunnen waarnemen. Rivier- en regenwater verdwijnt in de ondergrond en komt soms vele kilometers verderop weer te voorschijn, nadat het water 'vrij' stromend – en niet via de poriën in het gesteente – een ondergronds traject heeft afgelegd. Verdwijngaten vinden we meestal op de grens van kalk en een ander, niet (of veel minder) oplosbaar gesteente. Afb. 4. Het water stroomt bijvoorbeeld over zandsteen of leisteen als oppervlakterivier(tje), om daar waar het de kalk ontmoet via laagvoegen of diaklazen z'n weg ondergronds te vervolgen. Een



Afb. 4. Hier verdwijnt een beekje in een kalkwand in de buurt van Remouchamps (België).

mooi voorbeeld daarvan is de Trou Belvaux in België, waar de Lesse in de Grotten van Han verdwijnt. Alleen bij uitzonderlijke neerslag of het smelten van de sneeuw in het voorjaar stroomt de Lesse ook nog deels bovengronds, via de vallei van de Chavée, die de rest van het jaar droog staat. In het Engels wordt zo'n drooggevallen rivier in een karstgebied (waar het water dus ondergronds verder stroomt) een 'dry valley' genoemd. Daar waar het water nog bovengronds stroomt, over zandsteen bijvoorbeeld, is soms ook een vallei uitgesleten, die plotseling, dikwijls tegen een rotswand van kalk, kan eindigen. Zo'n vallei noemen de Engelsen, ook weer heel toepasselijk, een 'blind valley'. Bronnen in karstgebieden worden onderscheiden in twee types, waar weer geen goede Nederlandse benamingen voor bestaan. Is er sprake van een rivier die ondergronds verdwijnt en later weer als rivier tevoorschijn komt (met weer de Grotten van Han-



Afb. 5. De (karst)bron van de (Grotte de la) Diau (Fr.)

sur-Lesse als een spectaculair voorbeeld), dan spreken we van een *résurgence*. Is het regen- of smeltwater dat in een groot gebied min of meer diffuus in de ondergrond verdwijnt, zich daar verzamelt en dan uit één bron als rivier tevoorschijn komt, dan spreken we van een *exurgence*. Afb. 5.

Exsurgences en résurgences kunnen soms stroomopwaarts migreren, door een combinatie van ondergrondse corrosie en (vorst)erosie (al in het Pleistoceen) van de wand boven de bron. Ook dan ontstaat er een *blind valley*. In het Franse Juragebergte (met name in de departementen Doubs en Jura) is dit verschijnsel mooi waar te nemen. Ze worden *cirques* genoemd, letterlijk arena of amfitheater, niet te verwarren met gletsjercirques. Door 'terugschrijdende' erosie van die cirques kunnen soms kilometers lange 'doodlopende' valleien ontstaan, '*reculées*' genaamd. In de Franse Jura (voornamelijk in de departementen Doubs en Jura) is dit verschijnsel mooi waar te nemen. Ze heten daar vaak '*bout du monde*' (einde van de wereld).

Een bijzondere vorm van karstbronnen is de *vaoclusebron*, genoemd naar de Fontaine-de-Vaucluse, in het Zuid-Franse stadje met dezelfde naam. Hier welt onder een loodrechte wand vanuit een diep gat het water op. De waterspiegel rijst en daalt al naar gelang de hoeveelheid neerslag op het karstplateau boven de bron. Na extreme regenval of bij smelten van de sneeuw kan er per seconde 200 m³ water uitstromen. De bron voedt de rivier de Sorgue (bij laag water via een niet toegankelijke ondergrondse stroom), bij hoog water direct vanuit de *Fontaine* zelf. Duikers zijn tot 200 m diep in de bron afgedaald en met een tv-camera is de bron tot een diepte van 315 m verkend, maar nog steeds gaat de waterloop omlaag en is er geen horizontaal gedeelte gevonden. De Fontaine de Vaucluse is een van de meest fascinerende objecten voor (Franse) grotduikers. Dat deze bron zo diep gaat is veroorzaakt tijdens de Messiniaanse Crisis (aan het einde van het Messinien, de bovenste etage van het Mioceen, tussen ca. 7 en 5 miljoen jaar geleden); de Middellandse Zee raakte toen afgesloten van de Atlantische Oceaan en viel grotendeels droog. Ook het grondwaterpeil stond in het Middellandse Zeegebied aanzienlijk lager dan tegenwoordig.

Nog een bijzonder fenomeen zijn de *estavelles*, openingen in de ondergrond die afwisselend verdwijngaten en bronnen zijn. Als de grondwaterspiegel laag is, kan regen- of smeltwater via een gat in de ondergrond verdwijnen en ondergronds verder stromen. Zo'n opening wordt in dat geval een verdwijngat genoemd. Als het grondwaterniveau, bijvoorbeeld na heftige regenval of smelten van de sneeuw, plotseling stijgt, kan er uit datzelfde gat juist water tevoorschijn komen en is het een bron geworden (meestal een *exurgence*, maar soms ook een *résurgence*). Een mooi voorbeeld is de Puits de la Brême bij Ornans (Doubs), waar soms een rivier tevoorschijn komt, en soms een rivier verdwijnt. De Puits de la Brême is dan ook soms een spectaculaire put, meters diep, en soms gewoon een meertje aan de oppervlakte! (zie ook afb. 9 en 10)

De ondergrondse afwatering in een karstgebied heeft een aantal nare kanten. Zo is de oppervlakte dikwijls droog en kan er nauwelijks iets groeien, zodat zelfs schapenteelt niet mogelijk is. Ook kunnen verbindingen tussen verdwijnpunten en bronnen onbekend zijn. Dit had met name in Frankrijk in het nabije verleden nogal eens tot gevolg dat het ene dorp z'n afval (bijvoorbeeld kadavers van aan hondsdolheid gestorven dieren) in een diepe karstput gooide, die echter via een ondergrondse

waterloop in verbinding stond met een bron die een ander dorp van drinkwater voorzag. De gevolgen laten zich raden. Ondanks allerlei wetten, die dankzij de fameuze Franse speleoloog E.-A. Martel in het begin van deze eeuw tot stand kwamen, doet zich dit soort situaties helaas nog steeds voor.

Dolines in allerlei soorten en maten

Nauw verwant aan de verdwijngaten zijn dolines, verdiepingen in het landschap van één tot enkele meters tot vele tientallen meters in doorsnede en diepte. Doline is het Sloveense woord voor dal. Dolines, die soms geïsoleerd, maar vaak ook met vele bij elkaar voorkomen, zijn globaal in twee categorieën te onderscheiden: oplossingsdolines en instortingsdolines.

De *oplossingsdolines* zijn ontstaan doordat kalk oplost en via spleten in de ondergrond wordt afgevoerd, dikwijls op een plek waar twee diaklazen elkaar snijden. Steeds meer water zal via deze spleet wegstromen en de wanden raken door corrosie steeds verder van elkaar verwijderd zodat er een soort trechter ontstaat. Oplossingsdolines zijn veelal komvormig en dikwijls is de bodem vruchtbaar, bestaande uit weinig tot niet oplosbare mineralen die achterblijven als de kalk verdwijnt (vooral kleimineralen en ijzer). In de tropen en subtropen heeft die bodem door de geoxideerde ijzermineralen vaak een roodbruine kleur en wordt daarom *terra rossa* genoemd. We spreken van bauxiet als de achtergebleven bodem veel aluminiummineralen bevat. Daarom wordt in karstgebieden vaak bauxiet gewonnen.

Instortingsdolines worden gevormd als het plafond van een grotzaal instort en dit aan het aardoppervlak zichtbaar is. Instortingsdolines hebben vaak rechte wanden. De hierboven beschreven verdwijngaten komen ook vaak in dolines voor. Oplossingsdolines liggen soms in grote aantallen bij elkaar, zoals in Slovenië, niet ver van Postojna, waar in een gebied vierhonderd oplossingsdolines per vierkante kilometer zijn geteld (allemaal van enkele meters doorsnede en een paar meter diep). Instortingsdolines liggen vaak op één lijn en volgen het traject van de onderliggende grot. Vaak vormen instortingsdolines de toegang tot een grot, maar soms sluit het ingestorte materiaal de ingang juist af. Ook als het plafond van de grot (de bodem van de doline) heel dik is - tot wel tientallen of honderden meters - is er geen toegankelijke verbinding. Mooie voorbeelden daarvan zijn te zien in de Pyreneeën, op de Frans-Spaanse grens, boven de gangen en zalen van de Gouffre de la Pierre-Saint-Martin, één van de langste (80 km) en diepste (1410 m) grotsystemen van Europa. Afb. 6.

Als dolines aan elkaar vastgroeien, en zo een onregelmatige vorm krijgen, spreken we van *uvala's* (letterlijk inham of baai). In de wanden van een uvala zijn soms nog de vormen van de individuele dolines te herkennen. Langere uvala's worden soms ook 'blinde dalen' genoemd, maar zijn dan 'blind' aan beide kanten. Als een reeks instortingsdolines aaneengroeit ontstaat er een



Afb. 6. Dolines op een rij boven een van de grotsystemen aan de Frans-Spaanse grens in de Pyreneeën.

grot zonder plafond, een 'openluchtgrot'. Dikwijls is aan beide kanten de nog wel overdekte grot toegankelijk. De vorming van veel kloven in karstgebieden (*limestone gorges*) wordt door het instorten van grotsystemen verklaard. Een prachtig en spectaculair voorbeeld van een dergelijk karstfenomeen is het dal van Rakov Škocjan in Slovenië (niet te verwarren met de toeristengrotten van Škocjan/Škocjanske jame, ook in Slovenië, waar naast spectaculaire grotten trouwens ook fraaie instortingsdolines te zien zijn).

Er zijn enkele bijzondere vormen van dolines die ik nog even afzonderlijk wil noemen, om te beginnen de *cenotes* in onder meer Mexico. Cenotes zijn instortingsdolines waarvan de onderliggende grot nu vol water staat. Ze zijn een eldorado voor grotduikers, die de vele kilometers grot met perslucht verkennen. In veel cenotes in Yucatan (Mexico) worden op de bodem offergaven uit de Maya-cultuur gevonden. De cenotes zijn gevormd toen de zeewaterspiegel aanzienlijk lager stond dan nu. In de grotten zijn druipstenen gevormd (dat gebeurt alleen maar in de vrije lucht, niet onder water) die, na de zeespiegelstijging, nu onder water staan of hangen. Het water in de cenotes en grotten die nabij de kust liggen heeft vaak een *halocline*, een overgangslaag tussen het lichtere, zoete regenwater en het zwaardere, zoute zeewater. Die halocline lijkt op een band van 'mist', maar dan onder water.

Dan zijn er de *sinkholes*, ook wel instortingsdolines genoemd. Vooral in Florida (VS) krijgen sinkholes veel aandacht omdat ze regelmatig midden in woonwijken ontstaan en er daardoor complete huizen in verdwijnen. Recent verdween daar een zaal van een automobielmuseum met acht antieke auto's in een sinkhole. De grotten onder Florida, dat goeddeels uit kalkgesteente bestaat, staan vol water dat oorspronkelijk tegen het plafond 'tegendruk' leverde, waardoor dit intact bleef. De laatste decennia is er echter veel water voor onder meer de landbouw opgepompt, waardoor het waterniveau in de grotten daalde. Hierdoor kan het plafond veel gemakkelijker instorten. Ook zijn er sinkholes ontstaan omdat de bodem uitsluitend nog uit kleilagen bestond, en alle kalk door corrosie was verdwenen. Als die bodem dan belast wordt, door bebouwing bijvoorbeeld, stort die gemakkelijk in. Ook bij heftige regenval kan de klei wegspoelen en kunnen er sinkholes ontstaan.

Ten slotte noem ik *megadolines*, die in de tropen voorkomen en met de Chinese naam *tiankeng* (letterlijk een gat of put gericht naar de lucht, hemel) worden aangeduid. Megadolines zijn vooral bekend uit China. De grootste is de Xiaozhai tiankeng, met een diameter van de ingang van ongeveer 600 meter, een diepte van 662 meter diep, en een volume van 120.000 m³! Bij het ontstaan van deze reusachtige instortingsdolines speelt waarschijnlijk ook tektoniek een rol.

Een bijzonder karstfenomeen in België: de Fondry des Chiens

Nabij Couvin, in het zuiden van België, ligt een spectaculair karstgebied, de Abannets, met daarin een serie fraaie karstputten: de Fondry des Chiens. De namen van deze karstfenomenen zijn op zich al een object van studie. Abannets komt waarschijnlijk van het Franse abannir, verbieden, waar ook het Nederlandse 'ban' aan is ontleend. Fondry komt van fond, diepte (fondrière is afgrond), of van fondre, smelten (ijzerwinning - zie hierna); chien komt van hond (er zouden honden in deze putten gegooid zijn), maar waarschijnlijk van Sarrasin (Saraceen), middeleeuwse nomaden uit Noord-Afrika, die ijzer smolten en smeedden.

Deze streek, die rijk is aan karstverschijnselen, bestaat vooral uit Givetien-kalk (Midden-Devoon), zoals grote dolines, karrenvelden en talrijke grotten (o.a. de toeristengrot Grotte de Neptune in Petigny). Op het hoogste punt liggen een aantal spectaculaire putten, tot wel veertig meter diep (afb. 7). Volgens een oudere theorie zijn de abannets gevormd doordat grotten hier zijn ingestort. Het probleem bij deze verklaring was dat de

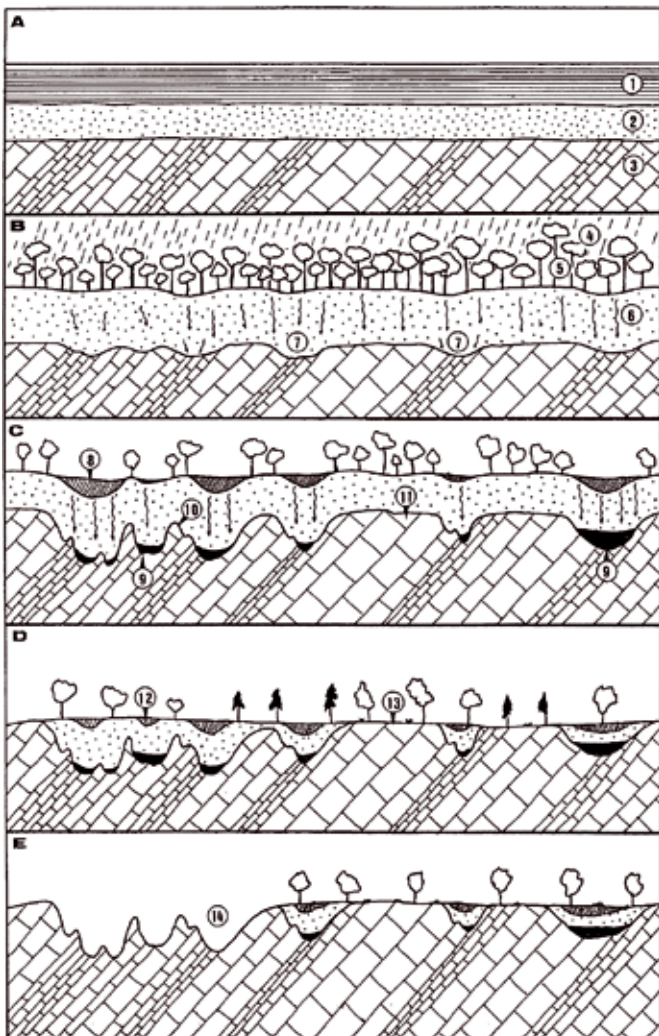


Afb. 7. De Fondry des Chiens bij Nismes (B.) (zie persoon met paraplu voor de schaal).

berg) ligt tussen leisteen- en schalielagen (nu dalen). In het Tertiair lagen deze lagen hoger dan de kalk. Rivieren stroomden over de schalie en leisteen tot ze de kalk bereikten en verdwenen vervolgens in de ondergrond, waarbij door

abannets op het hoogste punt in de omgeving liggen, wat de vraag onbeantwoord liet waar de rivieren dan vandaan kwamen die de grotten gevormd hebben. De verklaring hiervoor werd gezocht in een 'omkering van het reliëf'. De Givétienkalk (nu een

corrosie de grotten gevormd werden. Tijdens het Pleistoceen was er minder neerslag waardoor de kalk minder werd aangetaast, maar als gevolg van vorsterosie de leisteen en schalie juist gemakkelijker wegerodeerden. Op een zeker moment stak de kalksteen, met de grotten, boven de schalie en leisteen uit. Het plafond van de grotten stortte in, en daar waren de abannets!



Afb. 8. De ontstaansgeschiedenis van de 'abannets' en de Fondry des Chiens in België (Quinif, 1990).

Tegenwoordig is er een aannemelijker verklaring. De wanden van de abannets zijn in feite enorme rundkarren. Het schema (naar Quinif, afb. 8) laat in vijf stappen het ontstaan zien: In het Oligoceen (A) bedekt de zee dit gebied (1) en wordt er zand afgezet (2) op de dan relatief vlakke oppervlakte van de Devonische kalkgesteenten (3). Nadat de zee zich heeft teruggetrokken (B) ontwikkelt zich in het dan tropische klimaat (4) een uitbundige begroeiing (5). Regenwater infiltreert, spoelt het ijzer uit het Tertiaire zand (6) en lost de kalk op (7). Aan de oppervlakte (C) ontstaan moerassen en venen (8) en de kalk onder het zand corrodeert (9). Op het contact met de kalk worden ook de uitgespoelde ijzermineralen afgezet. Tussen de diepere gecorrodeerde plekken blijven wanden en punten van kalk staan (10), en ook blijven er minder steile 'plateautjes' van kalk achter (11). Die onder een bedekking ontstane karren worden (naar analogie van cryptokarst) cryptokarren genoemd. Vervolgens verandert het klimaat tijdens het Kwartair sterk (D). Behalve in de depressies (12) verdwijnt door erosie de zandbedekking (13). Vanaf de ijertijd tot aan de 19^e eeuw (E) worden de ijzerafzettingen gewonnen, de abannets leeggehaald en ontstaat het huidige landschap (14). Een karstverschijnsel staat dus aan de wieg van de ijzerindustrie van Wallonië! Het zal geen verbazing wekken dat recent het idee heeft postgevat dat fantomisatie en misschien zelfs bacteriën een rol hebben gespeeld. Een uitdaging voor de onderzoekers die zich nu met karstvorming bezighouden!

Grotten zonder dak ('roofless caves')

Als grotten niet al te diep liggen, en in de loop van de geschiedenis de oppervlakte boven de grot denudeert door chemische en mechanische erosie, kan het dak – het plafond van de grot – verdwijnen. De denudatiesnelheid hangt van allerlei factoren af (gesteente, klimaat enz.), maar twintig meter per miljoen jaar is niet ongewoon. Instortingen, zoals bij het ontstaan van dolines, spelen daarbij geen rol. De grotgangen, zalen, druipstenen en klastische bodemsedimenten zoals grind en leem, worden dan aan de oppervlakte zichtbaar. Zo'n 'roofless cave' lijkt op een dal, maar er stroomt geen rivier en de bodem bestaat uit grotsedimenten. In de 'klassieke karst' in Slovenië zijn zulke 'roofless caves' (ofwel 'unroofed caves') tot bijna drie kilometer lengte bekend.



Afb. 9. Overzichtsfoto van de polje van Comeya, Picos de Europa (Sp.)

Poljes

In veel karstgebieden komen *poljes* voor (polje=veld): gebieden met een relatief vlakke bodem die aan alle kanten omgeven zijn door wanden. Afb. 9. Soms stromen er riviertjes, maar een in- of uitgang aan de oppervlakte is er niet. Het water komt aan de ene kant uit één of meerdere grotten en verdwijnt aan de andere kant via een verdwijngat (ponor=afgrond) weer ondergronds. Sommige poljes staan in de winter en het voorjaar vol met water, in perioden met veel neerslag en smeltende sneeuw. De polje is dan een meer, waarin door de bewoners uit de omgeving wordt gevist. In de zomer en de herfst staat de polje droog en dient als landbouw- en weidegebied. Een beroemd en spectaculair voorbeeld is Cerkniško jezero (het meer van Cerknica) in Slovenië. In winter en voorjaar is deze polje met een oppervlakte van bijna 40 km² het grootste meer van Slovenië, maar in de zomer is er geen druppel water te vinden! Zie voor dit verschijnsel afb. 10.

Bij het ontstaan van poljes speelt tektoniek een rol. Er zijn poljes bekend met een oppervlakte tot wel 700 km². In Ierland kennen



Afb. 10. Estavelles op de bodem van de drooggevalle Radensko Polje in Slovenië. Als het grondwater hoog staat – bijvoorbeeld in het voorjaar bij de sneeuwsmelt in de omringende bergen – functioneren de estavelles als bronnen, waardoor de polje volloopt. Is de wateraanvoer later in het jaar gering, dan zijn het juist verdwijngaten waardoor de polje – zoals nu – weer langzaam leeg raakt.

we de *turlough* (=droog meer), een 'kruising' tussen een (grote) doline en een (kleine) polje die, zoals de naam al aangeeft, een wisselend waterregime kent. Bij deze Ierse variant van de polje speelt tektoniek echter geen rol; waarschijnlijk zijn ze gevormd als oplossingsdolines.

Tropische karst

In tropische en subtropische gebieden kunnen grote aantallen dolines vlakbij elkaar liggen, een zogeheten 'cockpitlandschap'. Wanneer deze dolines zich door corrosie nog verder uitbreiden dan ontstaat een vlakte met daarin alleen nog ronde of kegelvormige restbergen op die plaatsen waar de dolines elkaar niet raakten. Dat is de bekende 'tropische karst' van bijvoorbeeld Java (Gunung Sewu), of Vietnam, het decor van vele speelfilms. Torenkarst (*tower karst*) heeft steile wanden en min of meer ronde toppen. Kegelkarst (*cone karst*) bestaat uit kegelvormige bergen met schuine wanden en spitse toppen. Dat we soms ook in gematigde gebieden op aarde 'tropische' karstbergen tegenkomen, zoals in de Franse Jura, is een aanwijzing voor andere klimaten in het verre verleden.

Overigens is het klimaat een belangrijke factor bij de proces van karstvorming: in de tropen en subtropen is veel meer begroeiing en is er door de groei en rotting van planten meer CO₂. Door verdamping is er ook meer regenval (de tropische moessons). Bovendien verlopen chemische reacties bij hogere temperaturen sneller. Deze condities zorgen ervoor dat er in de tropen en subtropen meer corrosie is, met als gevolg de enorme grotten in bijvoorbeeld Maleisië en de typische tropische karst.



Afb. 11. 'Dolomietruïne' in het Bois de Paiolive bij Les Vans (Fr.)

In een koel klimaat heb je echter ook veel corrosie omdat koud water meer CO₂ kan bevatten (denk maar aan een koel biertje, dat veel meer 'prik' bevat dan een lauwbier). Grotvorming is daarom ook een bekend verschijnsel in het hooggebergte, zoals in Noord-Noorwegen en Patagonië. Karstverschijnselen komen door corrosie dus overal op onze aarde voor.

Dolomietruïnes

Daar waar de ondergrond uit dolomiet [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] bestaat (een carbonaatgesteente dat minder goed dan kalk, maar toch wel oplosbaar is), kunnen we dolomietruïnes aantreffen, ook een bijzonder karstfenomeen. In de Zuid-Franse Causses zijn daarvan enkele mooie voorbeelden te vinden, zoals de 'Chaos' van Montpellier-le-Vieux (bij La Roque-Sainte-Marguerite bij Millau), de Chaos van Nîmes-le-Vieux (bij Florac) en het Bois de Païolive (bij Les Vans) (afb. 11). Zij zijn bij de oplossing door corrosie van de dolomietgesteenten van Jura-ouderdom ontstaan. Mede door de gelaagdheid zijn hier spectaculaire formaties ontstaan in een labyrintachtig landschap. Deze drie gebieden staan ook bekend als prachtige wandelgebieden. Ook elders in karstgebieden treffen we dolomietruïnes aan.



Afb. 12 . De bijzondere vormen – zowel wat ontstaan als corrosie betreft – van Les Mourres (Luberon, Fr.)

Biokarst

In sommige publicaties wordt corrosie van carbonaatgesteenten toegeschreven aan 'kalketende' (calcifage) bacteriën. Al in 1982 verscheen een artikel van Triat over biocorrosie van oppervlaktekalk in de Zuid-Franse Luberon, door de bacterie *Microcodium*. Deze bacteriesoort zullen we verderop nog tegenkomen, maar dan juist bij het afzetten van kalk. Ook algen kunnen een rol spelen bij karstvorming (fytokarst). Aan de kust zien we vaak kleinschalige oplossing van kalk door allerlei diersoorten, zoals schelpdieren, zeekomkommers en zee-egels. In dat geval is er meestal sprake van een samenwerking of symbiose van deze dieren met bacteriën. Alle vormen van karst waarbij organismen een rol spelen, wordt als 'biokarst' aangeduid.

Kalkafzettingen

Tot zover de karstfenomenen die door corrosie en instorting gevormd zijn. Ook de afzetting van kalk kan – vanzelfsprekend – soms tot 'karst' worden gerekend, zoals druipstenen, die duidelijk karstverschijnselen zijn en tot de speleologie gerekend worden. Ook aan het aardoppervlak kunnen we dergelijke vormen waarnemen, zoals travertijn en kalktuf (zie het tweede artikel in deze serie in het maartnummer van Gea (2014).

Misschien is het goed nog even kort in te gaan op het ontstaan van kalkgesteenten. Kalk is een veel voorkomend sedimentgesteente, dat op de bodem van zeeën en oceanen is afgezet. We kunnen daarbij verschillende kalkafzettingen onderscheiden. *Neritische* kalkgesteenten worden gevormd door de skeletten van vastzittende organismen, zoals koralen. Deze riffen komen in het algemeen in ondiep water voor, maar er zijn ook

diepzeeriffen, zoals voor de kust van Schotland en Noorwegen. Daarnaast onderscheiden we *pelagische* kalken, opgebouwd uit de skeletjes van *vrij* levende dieren en planten, zoals foraminiferen en andere kalkalgen, coccolieten, die na afsterven naar de bodem van de (diep)zee zinken. (Op zeer grote diepte en afhankelijk van de zuurgraad lossen de kalkskeletjes overigens weer op.) Als derde categorie zijn er de chemisch gevormde sedimenten, die neerslaan uit kalk in oplossing, bijvoorbeeld door oververzadiging van het zeewater, zoals kalkgesteente in tropische zeeën en vooral lagunes.

Er zijn ook zoetwaterkalken, afgezet in meren of rivieren. Een voorbeeld van kalkafzettingen in meren zijn de bijzondere formaties gevormd in het zuidwesten van Frankrijk, waar op planten en plantenwortels door bacteriën kalk is afgezet, een voorbeeld van biolithogenese (gesteentevorming door organismen). De bacteriën behoren in dit geval tot de (hierboven genoemde) *Microcodium*-soorten. Door de combinatie van kalkafzetting op waterplanten, en, als die later droog vallen, de corrosie van diezelfde structuren, ontstaan merkwaardige formaties, die lijken op enorme paddenstoelen (afb. 12).

Eerder zagen we al de afzetting van kalktuf, waarbij formaties en soms zelfs grotten gevormd worden. Ook in rivieren in karstgebieden, die verzadigd zijn aan kalk, kan kalk worden afgezet. Er kunnen dan dammen ontstaan, soms van een meter of hoger. Daar waar het water in een dun laagje over de dam stroomt, op het raakvlak van ondergrond, water en lucht, wordt opnieuw



Afb. 13 . Tufdammen (kalktuf of travertijn) in het riviertje de Dard bij Baumeles-Messieurs, dept. Jura, Frankrijk. De Dard is een echte karstrivier, die uit de grotten van Baumeles-Messieurs tevoorschijn komt na een ondergronds traject, en dan door de Cirque de Baumeles-Messieurs aan de oppervlakte verder stroomt.

kalk afgezet, en zo groeien de dammen steeds hoger (afb. 13). Ook hier spelen bacteriën naar alle waarschijnlijkheid een belangrijke rol. Tussen de dammen blijven diepe bekkens achter, in de speleologie meestal 'gours' genoemd. Door sommige auteurs worden juist de dammen 'gours' genoemd. Die dammen en bekkens zien we ook ondergronds, in grotten.

Karst en flora

Ik besluit dit artikel met enkele opmerkingen over karst en plantengroei, een fenomeen dat ook aan het aardoppervlak goed is waar te nemen. (De relatie tussen de ondergrond en plantengroei rechtvaardigt zelfs meerdere artikelen.) In karstgebieden, waar de ondergrond uit kalk bestaat, zien we vaak een kenmerkende flora, of toch op z'n minst enkele kenmerkende,

kalkminnende planten. De flora kan helpen bij het herkennen van het gesteente en zelfs bij het vinden van nog niet ontdekte grotten! Een van de meest voorkomende kalkminnende planten is de maretak (ofwel vogellijm of mistletoe, *Viscum album*), een groenblijvende halfparasiet die op verschillende bomen voorkomt. Afb. 14. Als halfparasiet gebruikt deze plant slechts water (met daarin kalk opgelost) van zijn gastheer. Het bijzondere is dat de maretak alleen voorkomt als er kalk in de bodem aanwezig is, terwijl de gastheer die kalk zelf niet nodig heeft. Zo groeien appelbomen en populieren op allerlei bodems, maar komen deze bomen met maretakken alleen in kalkgebieden voor. Nog zo'n kenmerkende kalkminnende plant is de bosrank of clematis (*Clematis vitalba*), een klimplant die tot tientallen meters hoog kan groeien en die in de herfst en winter goed te herkennen is aan de witte vruchtpluizen als de groene bladeren zijn afgevalen. Tijdens een autoritje door hoog België kun je van het najaar tot het vroege voorjaar dankzij de bosrank vrij nauwkeurig zien



Afb. 14. Populieren met maretak in de Belgische karststreek nabij Namen (B.)

waar de ondergrond uit kalk bestaat.

Talrijke varen-, orchideeën- en bessensoorten zijn ook kalkminnend, zoals de schildvaren (*Dryopteris submontana*), de bruinrode wespenorchis (*Epipactis atrorubens*), de noordse aalbes (*Ribes spicatum*), de zwarte gifbes (*Actea spicata*) en de jeneverbes (*Juniperus communis*). De in Duitsland nog schaars voorkomende en beschermde Wacholderheiden – Wacholder is Duits voor jeneverbes – zijn in feite ook karstfenomenen. Vaak groeien op kalkrotsen bepaalde varensorten, in of boven de ingang van een grot, waar de temperatuur dikwijls net iets hoger is dan elders in de omgeving door de uit de grot stromende warmere lucht. Als die varens dan ook groeien op een rotswand in een gebied waar geen grot bekend is, kan het de moeite zijn daar in de winter terug te komen om te kijken of juist op die plek de sneeuw smelt. Is dat het geval, dan kan met wat graafwerk in het losse sediment misschien een grotingang worden vrijgelegd! Dankzij de varens zijn ook in de Ardennen diverse grotten gevonden.

Relict uit de ijstijd

Als u echt iets moois wilt zien waarin de wisselwerking tussen ondergrond (kalk), karst (de *limestone pavements*), klimaat én flora zichtbaar wordt, is een bezoek aan de Burren in het westen van Ierland zeer aan te bevelen (afb. 15). Dankzij het zeer gematigde klimaat door de warme golfstroom, de zuivere lucht vlakbij de oceaan, het vele licht door het ontbreken van bomen, de afwezigheid van harde wind in de *grikes* tussen de *clints* en het feit dat kalksteen warmte vasthoudt, is hier een bijzonder microklimaat ontstaan. In dit unieke microklimaat groeien tientallen bijzondere, vaak *endemische* planten (planten die uitsluitend in een bepaald gebied voorkomen), zoals de talrijke kalkminnende



Afb. 15. Typische karstflora in de karren van de Burren (Ierland)

orchideeën. Bijzonder is ook dat sommige planten vaak uit een heel andere klimaatzone afkomstig zijn. We vinden bijvoorbeeld vlak bij elkaar de varen venushaar (*Adiantum capillis-veneris*), een van oorsprong mediterrane plant en zilverkruid (*Dryas octopetala*), een noordelijke plant die hier als 'ijstijdrelict' is achtergebleven.

Foto's: Herman de Swart, tenzij anders vermeld

Literatuur

Zie voor algemene literatuur over de geologie van grotten en karst het artikel in Gea 2013 nr. 4 (december); in het bijzonder beide encyclopedieën.

Algemeen

- Marjorie M. Sweeting *Karst Landforms*, Macmillan, London, 1972
- Hubert Trimmel *Höhlenkunde*, F. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1968
Over karren(landschappen)
- Angel Ginés et al., eds. *Karst rock features: Karren sculptures*, Založba ZRC, Postojna/Ljubljana, 2008
Over dolines
- Tony Waltham et al. *Sinkholes en Subsidence*, Springer, Berlin/Heidelberg/New York, 2005
Over planten en geologie
- Arthur R. Kruckeberg *Geology and Plant Life – the Effects of Landforms and Rock Types on Plants*, University of Washington Press, Seattle and London, 2002
- J.E. Lousley *Wild Flowers of Chalk & Limestone*, Collins, London, 1950, 1969² (series The New Naturalist, vol. 16)
- E. Charles Nelson, Wendy Walsh *The Burren – a companion to the wildflowers of an Irish limestone wilderness*, Boethius Press & The Conservancy of the Burren, Aberystwyth, 1991