

Karstgebiete und Höhlen in Deutschland

Karst und Höhlen sind eng miteinander verbundene geologische Erscheinungen. Im Karst werden Niederschläge sofort über Schwinden, Erdfälle, Dolinen, Schächte und Höhlen in den Untergrund geleitet. Oberirdische Gewässer fehlen generell. Dank der Hohlräume kann Grundwasser im Karst mit einer Geschwindigkeit von Hunderten bis Tausenden von Metern pro Tag fließen, viel schneller als in Poren- oder Kluftwasserleitern. Erst am Rande der Karstgebiete tritt das Wasser in teilweise sehr kräftig schütenden Quellen wieder zutage.

Für den Karst spielt es keine Rolle, ob die Oberfläche kahl und felsig oder grün und bewaldet ist. „Verkarstet“ bedeutet also nicht unbedingt eine leere, wüste Landschaft ohne Vegetation und Boden, wie es die umgangssprachliche Bedeutung suggeriert. Dieser Wortgebrauch geht auf das Gebiet des „klassischen“ Karstes zurück, das Gebirge Kras in Italien und Slowenien oberhalb von Triest. Es lag seit der Römerzeit entwaldet und wüst da. Heute ist dies aber Geschichte, denn fast das gesamte Gebiet ist aufgeforstet und von dichten Wäldern bedeckt. Grün sind auch die Karstgebiete Deutschlands. Sie sind ein wichtiger Landschaftstyp und weiter verbreitet, als gemeinhin angenommen: Die Fläche der alten Bundesländer wird zu 14 % von verkarstungsfähigen Gesteinen bedeckt.

Der schnelle Grundwasserabfluss durch sekundär im Gestein gebildete Röhrensysteme ist das entscheidende Erkennungsmerkmal von Karstgebieten. Ein beeindruckendes Beispiel hierfür sind die Timavo-Quellen, die mit einer Schüttung von ca. $30 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Duino nördlich von Triest austreten und nach kurzem, früher schiffbarem Flusslauf in die Adria münden. In ihnen tritt das gesamte Wasser der Reka aus, die 40 km weiter südlich im unterirdischen

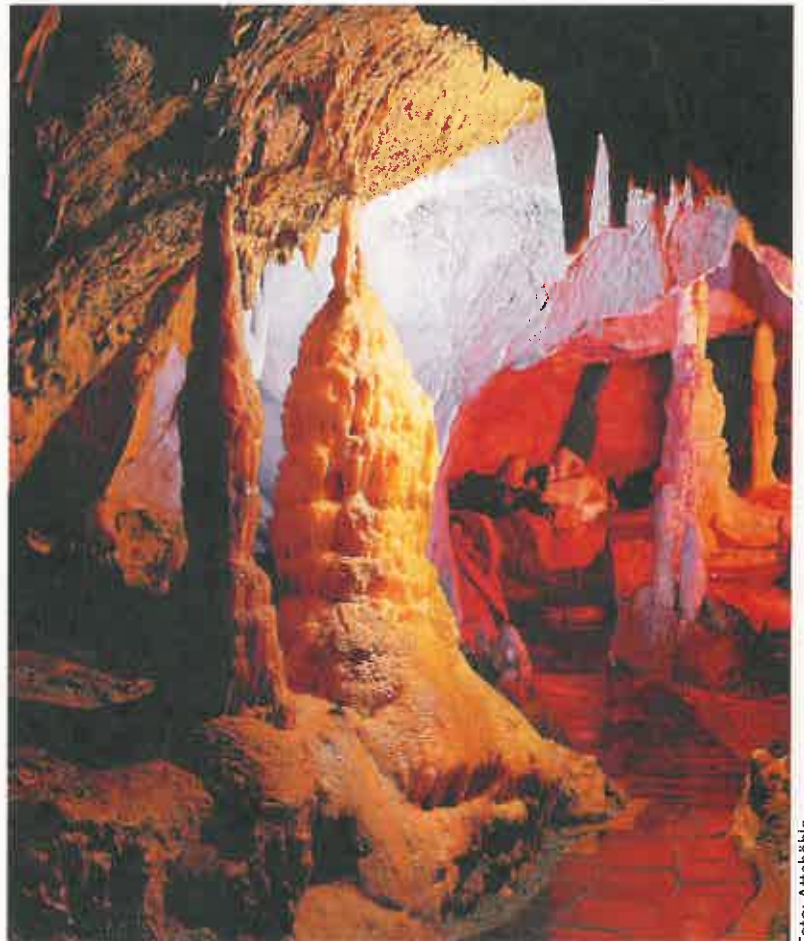


Foto: Attahöhle

Foto 1: Innere der Attahöhle bei Attendorn im Sauerland

Canyon der Škocjanske jama verschwindet. Solche Flussversinkungen gibt es auch in Deutschland. Die beiden berühmtesten sind die Donauversickerung, die das Donauwasser dem 175 m tiefer liegenden Aachtopf und damit dem Rhein zuführt (Schüttungsmenge: $8,2 \text{ m}^3/\text{s}$, Fließgeschwindigkeit: 800 m/h), und die Versickerungen der Harzflüsse Sieber und Oder, die ihr Wasser unterirdisch der Rhumequelle zuführen (Schüttungsmenge $2 \text{ m}^3/\text{s}$; vgl. Foto 2).

Verkarstungsfähige Gesteine

Damit sind auch gleich zwei der wichtigsten Karsttypen genannt, der Kalkkarst am Beispiel der Donauversickerung und der Gipskarst am Beispiel des Südharzes. Kalk (CaCO_3) und Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sind die beiden dominanten Gesteine, die in

Deutschland für Verkarstung sorgen. Sie unterscheiden sich in ihrer Chemie allerdings grundsätzlich, denn der Kalkkarst ist in seiner Entwicklung vom CO_2 - und Wasserangebot abhängig, beruht also auf einer Säurereaktion (zur Thermodynamik und Kinetik der Kalklösung vgl. Dreybrodt 1988, Gabrovsek 2002 sowie Klimchouk et al. 2000), während der Gipskarst nur vom Wasserangebot allein, also durch die Löslichkeit des Gipses bestimmt wird (vgl. Kempe 1997). Daneben gibt es auch Gebiete mit Dolomit ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$), die gleichfalls verkarstet sind. Außerdem kann auch das in Deutschland nur in Tiefen von über 150 m vorkommende Salz gelöst werden und zu karstähnlichen Erscheinungen führen, wie z. B. im Falle der kilometergroßen Einsenkungsbecken (Subrosionsbecken) des „Süßen“



Foto 2: Rhumequelle am Südharz. Das versickerte Wasser der Harzflüsse Sieber und Oder tritt hier wieder aus und bildet den Fluss Rhume

und (mittlerweile trockenengefallenen) „Salzigen“ Sees zwischen Halle und Eisleben oder der runden, tiefen Erdfälle („Wolkenbrüche“) an der Sababurg im hessischen Reinhardswald, von denen der größte 150 m Durchmesser und 50 m Tiefe aufweist.

Erscheinungsformen des Karstes

Reicht der verkarstungsfähige Gesteinskörper bis unter das Niveau des nächstgelegenen Vorfluters, so spricht man von tiefem Karst. Die Sieber- und Oderversickerung ist folglich ein Phänomen des tiefen Karstes. Höhlen, die sich unterhalb des Karstwasserspiegels befinden, werden als phreatisch bezeichnet. Das Niveau des Karstwasserspiegels ist dabei nicht konstant, sondern stetigen Veränderungen unterworfen, da das Wasser sich im Karst nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren bewegt.

Beim seichten Karst dagegen liegt der wasserstauende Untergrund oberhalb des nächsten Vorfluterniveaus. Das versickern der Oberflächenwasser wird vados, d.h. in unterirdischen Bächen mit freier Wasseroberfläche dem Vorfluter zugeführt. Große Teile der nördlichen Schwäbischen Alb gehören diesem Karsttyp an.

Die Verkarstungsprozesse gehen aber auch dort weiter, wo ein nicht verkarstungsfähiges Gestein direkt an der Oberfläche ansteht. Man spricht dann von bedecktem Karst. Allerdings sind es in erster Linie die Formen des nackten Karstes, dessen Kalke, Dolomite und Gipse direkt bis an die Oberfläche reichen, die dem unvoreingenommenen Betrachter

als landschaftliche Besonderheiten auffallen.

Pseudokarst

Wie bei allen Erscheinungsformen von Naturphänomenen gibt es auch beim Karst bestimmte Zweifelsfälle. So gibt es beispielsweise große Schotterflächen oder Flächen aus porösen Gesteinen (wie z.B. Vulkaniten), in denen ebenfalls sämtliches Niederschlagswasser sofort versickert und in tiefer gelegenen Quellen wieder hervorbricht. Große Teile Hawaiis (vor allem die entstellungsgeschichtlich jungen Oberflächen der Vulkane Kilauea, Mauna Loa und Hualalai) sind trotz der starken tropischen Regenfälle ohne oberirdischen Abfluss, da die Niederschläge aufgrund der Kontraktionsrisse, Fließtunnel und Blasen Hohlräume in der Lava sofort im Untergrund versinken. Für solche, nicht durch Lösungsvorgänge geschaffene unterirdische Entwässerungsformen hat sich der Begriff „Pseudokarst“ eingebürgert.

Wie aber soll man in dieser Hinsicht die Verhältnisse im Oberharz bezeichnen? Hier haben Bergleute umfangreiche Graben-, Schacht- und Stollensysteme geschaffen, durch welche das Wasser der Innerste und anderer Flussoberläufe in den *Ernst-August*-Stollen abgeführt wird und so ebenfalls unterirdisch das Flussgebiet wechselt. Für diese Vorgänge wäre vielleicht die Bezeichnung „Anthropokarst“ angemessen.

Die Karstregionen Deutschlands

Die Karstgebiete Deutschlands lassen sich unter geologischen

Gesichtspunkten in sieben regionale Einheiten untergliedern:

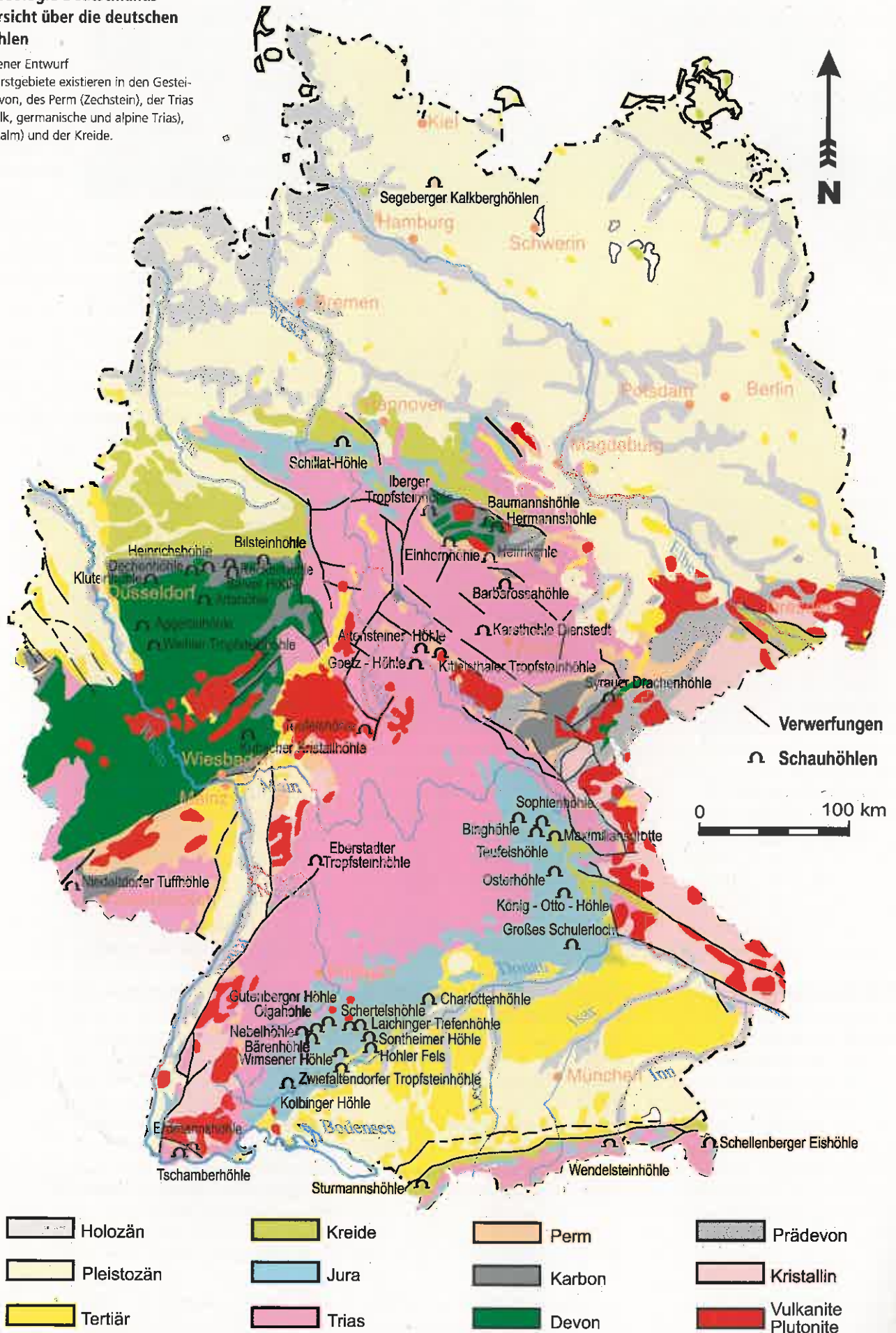
- Weserbergland und Umrahmung des Münsterländer Beckens (Kreide- und Jurakalke);
- Rheinisches Schiefergebirge und Harz (Devonische Kalke);
- Randbereiche der variskischen Gebirgsrümpfe (Kalke, Dolomite und Anhydrit- bzw. Gipsgesteine des Zechstein);
- Gebiet zwischen Hannover, Halle und Basel (Muschelkalk und Keuperkalke);
- Fränkische Alb (malmzeitliche Kalke und Dolomite);
- Schwäbische Alb (malmzeitliche Kalke und Dolomite);
- Bayerische Alpen (triassische und Kreidezeitliche Kalke).

Die Jura- und Kreidekalke des Weserberglands sind nur geringfügig verkarstet (vereinzelt Höhlen und Bachschwinden). Stärker verkarstet ist dagegen die Umrahmung des Münsterländer Beckens. Vor allem die Paderborner Hochfläche mit ihren Trockentälern und Dolinenfeldern besitzt einen ausgesprochenen Karstcharakter. Die Entwässerung erfolgt unterirdisch und speist die berühmten Paderquellen in Paderborn (Schüttungsmenge: 5 m³/s) und die Lippequellen in Bad Lippspringe.

Im Rheinischen Schiefergebirge stehen die durch die variskische Gebirgsbildung gefalteten Kalkschichten des Mitteldevons und die Massenkalk des Mittel- und Oberdevons nur an relativ wenigen Stellen oberflächlich an. Karstgebiete mit einer größeren Zahl an Höhlen haben sich im Sauerland, im Bergischen Land, in der Eifel und im Westerwald entwickelt. So versinkt beispielsweise der Wäschegraben bei Warstein bei dessen Annäherung an

Abb. 1: Geologie Deutschlands und Übersicht über die deutschen Schauhöhlen

Quelle: eigener Entwurf
 Größere Karstgebiete existieren in den Gesteinen des Devon, des Perm (Zechstein), der Trias (Muschelkalk, germanische und alpine Trias), des Jura (Malm) und der Kreide.



Tab. 1: Liste der deutschen Schauhöhlen

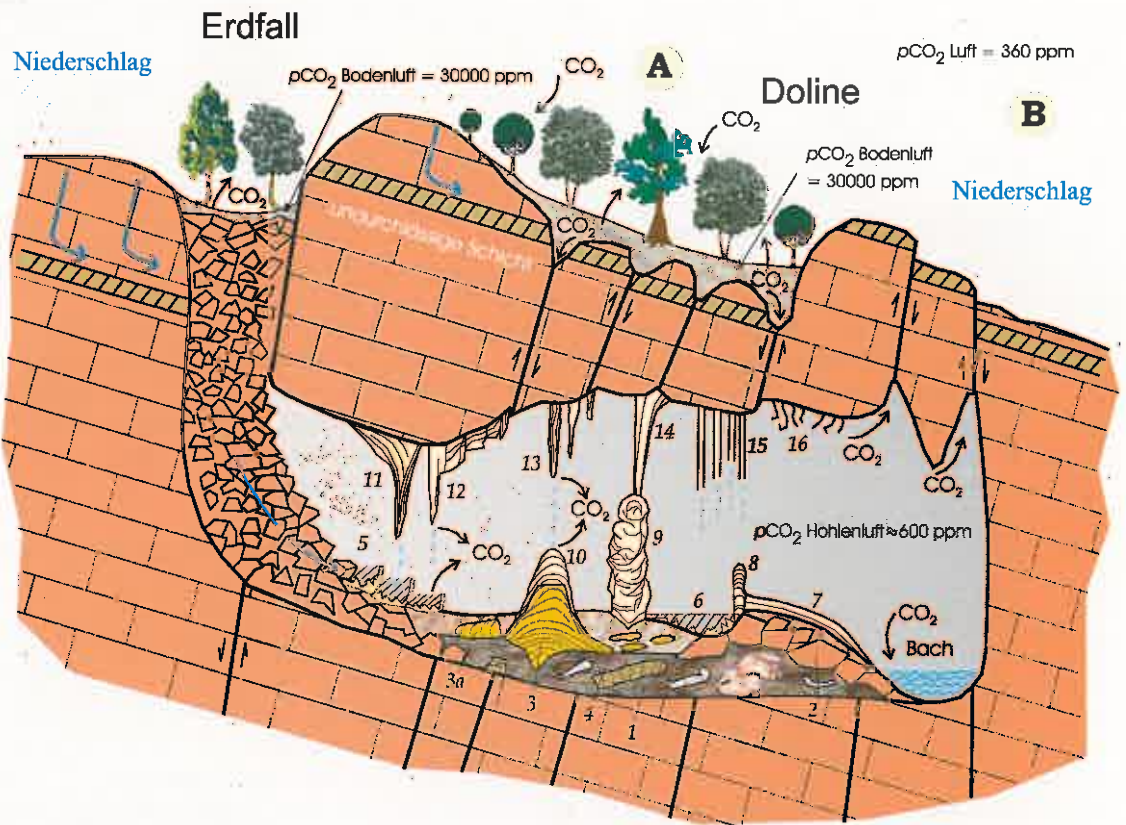
Sofern nicht anders angegeben, handelt es sich hierbei um Kalkhöhlen

Nr.	Name	Typ
1.	Segeberger Höhle (Zechstein, Anhydrit/Gips)	konvektiv, flachphreatisch
2.	Schillat-Höhle, Langenfeld – Hessisch Oldendorf (Oberer Jura)	turbulent vados
3.	Iberger Tropfsteinhöhle, Bad Grund (Devon)	konvektiv, tiefphreatisch
4.	Einhornhöhle, Scharzfeld (Zechstein, Dolomit)	unklar
5.	Baumannshöhle, Rübeland (Devon)	konvektiv, tiefphreatisch
6.	Hermannshöhle, Rübeland (Devon)	turbulent vados
7.	Heimkehle, Ufrungen (Zechstein, Anhydrit/Gips)	konvektiv, flachphreatisch (noch aktiv)
8.	Barbarossahöhle, Kyffhäuser (Zechstein, Anhydrit)	konvektiv
9.	Bilsteinhöhle, Warstein (Devon)	turbulent vados
10.	Reckenhöhle, Binden (Devon)	konvektiv?
11.	Balver Höhle (Devon)	durch Frostsprengung überprägt
12.	Heinrichshöhle, Hemer (Devon)	unklar
13.	Dechenhöhle, Iserlohn (Devon)	turbulent vados
14.	Kluterthöhle, Ennepetal (Devon)	turbulent vados
15.	Attendorner Tropfsteinhöhle (Devon)	unklar
16.	Aggertalhöhle, Ränderoth (Devon)	konvektiv phreatisch
17.	Wiehler Tropfsteinhöhle (Devon)	konvektiv?
18.	Tropfsteinhöhle Kittelsthal	konvektiv, tiefphreatisch
19.	Altensteiner Höhle, Schweina (Zechstein, Dolomit)	turbulent vados?
20.	Karsthöhle Dienstadt (Muschelkalk)	unklar
21.	Goetzhöhle, Meiningen (Muschelkalk)	Spaltenhöhle
22.	Drachenhöhle Syrau (Oberdevon)	konvektiv, flachphreatisch
23.	Kubacher Kristallhöhle (Devon)	konvektiv, tiefphreatisch
24.	Teufelshöhle, Steinau (Muschelkalk)	turbulent vados
25.	Niedaltdorfer Tuffhöhle (Holozän, Quelltuff)	Primärhöhle
26.	Eberstadter Tropfsteinhöhle (Unterer Muschelkalk)	turbulent vados
27.	Binghöhle, Wiesenthal (Oberer Jura)	turbulent vados
28.	Sophienhöhle, Waischenfeld (Oberer Jura)	konvektiv?
29.	Teufelshöhle, Pottenstein (Oberer Jura, Dolomit)	konvektiv, tiefphreatisch
30.	Maximiliansgrotte, Neuhaus (Oberer Jura, Dolomit)	konvektiv, tiefphreatisch
31.	Osterhöhle, Neukirchen (Oberer Jura, Dolomit)	konvektiv, phreatisch
32.	König-Otto-Tropfsteinhöhle, Velburg (Oberer Jura, Dolomit)	konvektiv?
33.	Schulerloch, Essing (Oberer Jura)	unklar
34.	Charlottenhöhle, Giengen (Oberer Jura, Dolomit)	turbulent, vados
35.	Lajchinger Tiefenhöhle (Oberer Jura, Dolomit)	konvektiv, tiefphreatisch
36.	Sontheimer Höhle (Oberer Jura)	konvektiv?
37.	Hohler Fels, Schelklingen (Oberer Jura)	konvektiv?
38.	Schertelshöhle, Westerheim (Oberer Jura)	turbulent, vados
39.	Gutenberger- und Gussmannshöhle (Oberer Jura, Dolomit)	unklar
40.	Olgahöhle, Lichtenstein-Honau (Holozän, Quelltuff)	Primärhöhle
41.	Nebelhöhle, Sonnenbühl (Oberer Jura)	konvektiv, phreatisch
42.	Bären- und Karlshöhle, Sonnenbühl (Oberer Jura)	konvektiv, phreatisch, vados überprägt
43.	Wimsener Höhle, Zwiefalten (Oberer Jura)	turbulent, tiefphreatisch (noch aktiv)
44.	Zwiefaltener Tropfsteinhöhle (Quelltuff)	Primärhöhle
45.	Kolbinger Höhle (Oberer Jura)	unklar
46.	Tschamberhöhle, Rheinfelden (Muschelkalk)	turbulent, vados (noch aktiv)
47.	Erdmannshöhle, Hasel (Muschelkalk)	turbulent, vados (noch aktiv)
48.	Sturmannshöhle, Obermaiselstein (Untere Kreide)	turbulent, phreatisch (noch aktiv)
49.	Wendelsteinhöhle, Brannenburg (Trias)	turbulent, vados
50.	Schellenberger Eishöhle, Marktschellenberg (Trias)	durch Frostsprengung überprägt

Quelle: eigene Zusammenstellung
 ? = Typ ungeklärt

Abb. 2: Übersicht über die Vielfältigkeit der Speläotheme (Sinterbildungen) in Höhlen

Quelle: eigener Entwurf



die Massenkalksteine und tritt 1,5 km entfernt in den Rangequellen wieder aus, überlagert begleitet von einem Trockental. Die durch zahlreiche Höhlen gekennzeichnete Felsenschlucht des Hönnetals gilt ebenso wie das sog. Felsenmeer bei Hemer als ein herausragendes Naturdenkmal.

Auch die Zechsteinränder der variskischen Gebirgsmassive sind reich an Höhlen und ausgeprägten Karstformen. Ausgedehnte Erdfallfelder prägen die Gipskarstareale des Südharz. Im Naturschutzgebiet Hainholz bei Osterode findet man auf 70 ha Fläche Erdfälle, Dolinen, Steilkuppen, Trockentäler, Rillenkarran, Felder geologischer Orgeln, Höhlen verschiedener Entwicklungsstufen, Bachschwunden und Karstquellen, die hier lehrbuchartig in der Landschaft angeordnet sind.

Landschaftlich weniger auffällig sind dagegen die breiten Ausstriche des Muschelkalkes. In der Südeifel, der hessischen Senke, in Thüringen sowie in Süddeutschland sind nur gelegentlich lokale Dolinenfelder, Erdfälle, Bachschwunden und Karstquellen anzutreffen.

Die Fränkische und die Schwäbische Alb sind die höhlenreichsten und zugleich größten zusammenhängenden Karstgebiete Deutschlands. Ihr breites, zumeist durch eine imposante Schichtstufe (Albtrauf) begrenztes Band zieht sich durch Baden-Württemberg und Franken. Hier treten die flach nach Süd und Südosten einfallenden Schichten des Oberen Jura (Malm) zutage. Dessen Kalksteine, Kalkmergel und dolomitisierten, massigen „Schwammstotzen“ sind zwischen 200 und 350 m mächtig.

Die Fränkische Alb ist von Wisent, Pegnitz und Altmühl sowie deren Nebenflüssen tief zerschnitten. Das Niederschlagswasser verschwindet in Dolinen mit darunter liegenden, beinahe senkrechten Sickerschächten (wie beispielsweise in der bis in 100 m Tiefe erforschten Fellnerdoline bei Gößweinstein), um dann auf Talniveau den genannten Flüssen zuzuströmen. Die Albhochflächen sind aufgrund dieser schnellen Entwässerung dementsprechend trocken, und die Wasserversorgung ist häufig ein Problem.

Neben dem o.g. Aachtopf gehört auch der Blautopf bei Blaubeuren (Schüttungsmenge: 2,3 m³/s) zu den größten Karstquellen der Schwäbischen Alb. Auf einer Fläche von 150 km² liefert die Alb ihr Sickerwasser an diese Quelle, die einer (durch Taucher gut erforschten) über 1 km langen Unterwasserhöhle entströmt.

Der Südteil der Schwäbischen Alb, die „Flächenalb“, ist die fossile Abrasionsterrasse des tertiären Burdigalmeeres. Die vor 20 Mio. Jahren hier entstandene Klifflinie trennt die Flächen- von der Kuppenalb ab. Nicht alle Oberflächenformen in Karstgebieten müssen also notwendigerweise auch durch Karstprozesse entstanden sein.

Dieser Grundsatz gilt auch für die Karstgebiete der deutschen Alpen, wie dem Gottesackerplateau im Allgäu. Hier ist der Einfluss der letzten Eiszeit in Form von Gletscherkaren und Moränenzügen vielfach stärker an der Oberflächengestaltung beteiligt als Dolinen und Erdfälle. Dagegen sind die Formen des nackten Karstes (wie z. B. Karren) hier

Zu Abb. 2:

Linke Bildseite (A):

Die Wechselwirkung zwischen Sickerwasser, im Boden erzeugtem (biogenem) CO₂ und Kalkstein erzeugt eine Calcium- und Bikarbonatreiche Lösung. Trifft sie beim Versickern im Gestein auf einen Hohlraum, so kann CO₂ abgegeben werden, und die Lösung erreicht eine sehr hohe Übersättigung mit Calcit. Das Mineral fällt aus und bildet eine Vielzahl von Speläothemen:

- 1 – Gefällte älteste Stalagmiten und vom Sinter umschlossene Knochen eines Höhlenbären
- 2 – Glazialer Frostschutt
- 3 – Älterer Stalagmit mit gefällter Spitze (3 a)
- 4 – Von Hohleneis abgerissene Stalaktiten
- 5 – Aktive Sinterbecken
- 6 – Unterwassersinter in Sinterbecken
- 7 – Bodensinter
- 8 – Kerzenstalagmit
- 9, 14 – Sintersäulen
- 10 – Kegelstalagmit
- 11 – Stalaktit mit Fahne
- 12 – Sintervorhang
- 13 – Konische Stalaktiten
- 15 – Makkaroni (Sinterröhrchen)
- 16 – Excentriques

Rechte Bildseite (B):

Wenn das Wasser nicht durch Boden versickert, wird der geringe atmosphärische CO₂-Gehalt zur Lösung von Kalk verbraucht, und in der Höhle kann erneut CO₂ aufgenommen werden. Dies führt lokal zur Kalklösung und zur Zerstörung von Sintermaterial.

besonders gut zu studieren. Sie brauchten nur wenige tausend Jahre zu ihrer Bildung. Die Höhlensysteme dieser Gebiete sind im Vergleich dazu viel älter. Sie müssen z. T. noch vor der heutigen Talbildung entstanden sein, da die Zeit seit der letzten Vereisung zur Bildung dieser oftmals sehr großen Höhlenräume nicht ausgereicht haben kann.

Höhleltypen und deren Entstehungsmerkmale Karsthöhlen

Karsthöhlen im engeren Sinne sind durch turbulent fließendes Wasser entstanden und als Röhrensysteme (sofern sie phreatischer Natur sind) oder mäandrierende unterirdische Canyons mit Wasserfällen und Bodenkolk (sofern sie vadoser Natur sind) ausgeprägt. Die Wände sind

häufig von Fließfacetten bedeckt, deren asymmetrische Form die Richtung der Wasserströmung anzeigt und deren Größe umgekehrt proportional zur Wassergeschwindigkeit ist. Die Sedimente enthalten oft Kiese und Sande.

Konvektionshöhlen

Neben den Karsthöhlen im engeren Sinne gibt es Höhlen, deren Entstehung zwar prinzipiell auf Lösungsvorgängen beruht, aber nichts mit einer unterirdischen Abführung von Oberflächenwasser zu tun hat, so dass diese Höhlen kein integratives Element des Karstes sind. Dies sind die Konvektionshöhlen (Laughöhlen), die phreatisch, d. h. tief im Gestein unterhalb des Karstwasserspiegels entstehen. Eine Verbindung zur Oberfläche ist hierbei nicht erforderlich. Konvektionshöhlen sind durch große, hallenartige Räume

gekennzeichnet, die nicht oder nur zufällig miteinander verbunden sind. Auf kleinem Raum konzentrieren sich hierbei große Hohlraumdichten. Diese Eigenschaften stehen im Gegensatz zum Charakter der Höhlen im Bereich der vadosen Zone, die sich linear über größere Entfernungen erstrecken und deren Umgebungsgestein nur geringe Hohlraumdichten aufweist. Die Morphologie der Konvektionshöhlen ist durch Lösungskuppeln, schräge Wandflächen (Facetten), horizontale Laugdecken sowie Laugnäpfe gekennzeichnet. Die Sedimente bestehen aus Lösungsresten des anstehenden Gesteins.

Höhlen mit einer Entstehung ohne Beteiligung von Lösungsvorgängen

Die Entstehung einer Höhle muss nicht immer etwas mit unterirdischen Lösungsvorgängen zu tun haben. So bilden sich z. B. durch langsamen Vorbau von Sinterkrusten unter Wasserfällen (an Quelltuffbarrieren) oder durch den schnellen Abfluss von Lava im Inneren von Lavafeldern sog. „Primärhöhlen“, d. h. unmittelbar bei der Entstehung des Gesteins gebildete Hohlräume. Aber auch viele „Sekundärhöhlen“ (erst nach der Entstehung des Gesteins gebildete Hohlräume) gehören nicht zu den Karsthöhlen. So können sich z. B. in allen Gesteinsarten Abrisspalten entlang von Talhängen öffnen, die, wenn sie später wieder überdeckt werden, ebenfalls Höhlen bilden, wie es z. B. bei vielen Höhlen im Elbsandsteingebirge der Fall ist.

Auch Höhlen in periglazialen Blockströmen oder unter verstorzten Blöcken aus Kristallgesteinen zählen nicht zu den Karsthöhlen. Schöne Beispiele dafür gibt es z. B. im Fichtelgebirge. Ebenso gehören Unterschneidungen der Böschung an Flussprallhängen, Auskolkungen unter Wasserfällen oder Löcher in weichen Gesteinen, die an Quellaustritten durch allmähliche Verwitterung und Frostsprengung entstehen, nicht zu den Karsthöhlen.

Ein besonders merkwürdiger Höhlentyp sind die Quellungshöhlen. Sie entstehen dort, wo Anhydrit oberflächlich ansteht. Anhydrit ist wasserfreies Calciumsulfat (CaSO_4), das allmählich durch Wasseraufnahme in Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) übergeht. Dabei nimmt das Volumen um etwa 60 % zu, was zur Folge hat, dass die Gesteinsoberfläche aufgewölbt wird und sich darunter (z. T. begehbare) Hohlräume öffnen. Quellungshöhlen gibt es z. B. auf dem Sachsenstein bei Bad Sachsa am Südharz, wo sie auch als „Zwerglöcher“ bekannt sind. Die größte Höhle (Waldschmiede) ist dabei vor einigen Jahren einstürzt, wurde aber inzwischen mit Hilfe von Beton wieder instand gesetzt.

Es gibt auch zahlreiche Höhlen, bei denen die Entstehung bisher noch nicht zweifelsfrei geklärt werden konnte. Einige wurden vom vorgeschichtlichen Menschen geschaffen und sind inzwischen so verwittert, dass Bearbeitungsspuren verschwunden sind und es schwer zu entscheiden ist, ob sie künstlichen oder natürlichen Ursprungs sind. Dazu zählen z. B. unterirdische Mühlsteinbrüche in Vulkaniten oder Sandsteinen, Krypten, Grabhöhlen, Einsiedeleien, alte Weinkeller, Verließe, Flucht- oder Wasserstollen, Zisterne, Brunnen, Quellerweiterungen, Mutungsstollen, Erzabbau, Stubensandabgrabungen oder die seltsamen Erdställe, die man in Süddeutschland findet, um nur einige Typen zu nennen. Sind sie im Kalkstein angelegt, so kann man schnell in Zweifel geraten, ob es sich nicht doch um eine Karsthöhle handelt. Ein gutes Beispiel für einen solchen Zweifelsfall ist die sog. Steinkirche bei Scharzfeld am Südharz. Sie öffnet sich mäandrisch in einer Dolomitklippe. Im Mittelalter diente sie als Wallfahrtskirche, inklusive aus dem Fels geschlagener Kanzel, Weihwasserbecken und treppenartigem Altar. Die große, zentrale Halle ist größten Teils künstlich angelegt. Im Inneren öffnet sich ein natürlich entstandener Schacht, der sich zu einem Raum erweitert, in dem

sich früher sogar ein Holzboden befand. Es wird vermutet, dass der Schacht als „Grab-Christi-Höhle“ verwendet wurde, einer typischen Einrichtung in Wallfahrtskirchen aus der Kreuzfahrzeit. Die Steinkirche ist ein typisches Beispiel für eine Mischung von natürlichen und künstlichen Hohlraumanteilen.

Die deutschen Schauhöhlen und deren Entstehung

Die Liste der deutschen Naturschauhöhlen (zur Lage vgl. *Abb. 1*, zur Typisierung vgl. *Tab. 1*) umfasst 50 Objekte, darunter drei Primärhöhlen unter Quelltuffen und eine Spaltenhöhle. Von den restlichen Höhlen können ca. 20 Höhlen einer konvektiven Entstehung im stehenden Grundwasser und nur 16 einer Entstehung durch turbulent fließendes Wasser zugeordnet werden. Dies zeigt, dass bei weitem nicht nur der schnelle, lineare Grundwasserabfluss in Karstgesteinen zu einer Höhlenbildung führt. Vielmehr gibt es offenbar auch zahlreiche weitere speläogenetische (höhlenbildende) Prozesse. Da die heute in Deutschland bekannten Höhlen überwiegend vor langer Zeit entstanden sind (unter den Schauhöhlen gibt es lediglich vier Höhlen, die sich auch heute noch aktiv erweitern), ist man auf Indizien angewiesen, um diese Prozesse im Nachhinein zu rekonstruieren.

Höhlenentstehung durch Sideritverwitterung

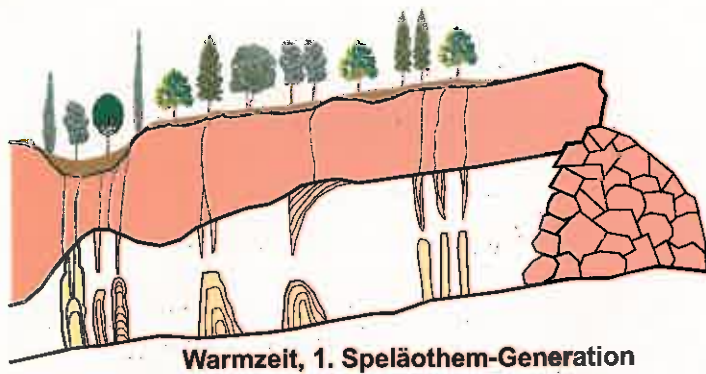
Die Iberger Tropfsteinhöhle im Harz, die Maximiliansgrotte in Franken, die Laichinger Tiefenhöhle in Schwaben und die Kubacher Kristallhöhle im Rheinischen Schiefergebirge sind typische Beispiele für konvektiv entstandene Höhlen. Sie alle bestehen aus isolierten, großen, häufig vertikal entwickelten Hallen. Die Decken haben rundliche Formen und weisen hohe Auskolkungen auf, die Wände gehen zum Teil in Facetten über. Die Entstehung dieser Formen geht auf die durch Lösungsvorgänge an Decken und

Wänden hervorgerufenen Dichteunterschiede im Wasser und die dadurch ausgelöste natürliche Konvektion zurück. Allerdings muss man sich fragen, woher die enorme, punktuell wirksame Lösungskraft stammt.

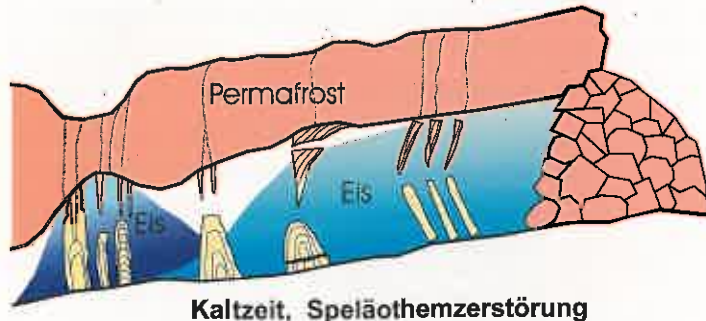
Im Falle der Iberger Tropfsteinhöhle ist die Antwort bekannt: Die Hohlräume gehen auf die Verwitterung von Siderit (Eisenkarbonat, FeCO_3) zurück. Das darin enthaltene zweiwertige Eisen kann unter Sauerstoffzufuhr zu dreiwertigem Eisen oxidiert werden. Hierbei entsteht ein hydratisiertes Eisenoxid (das Mineral Goethit), und es wird CO_2 freigesetzt, das den Kalkstein in der Umgebung der Sideritlagerstätte angreift und auf diesem Wege große Hallen herauslösen kann. Dabei entstanden nicht nur die Räume der kaum 150 m langen Iberger Tropfsteinhöhle, sondern auch ein System von ca. 8 km Gängen und Hallen auf einer Fläche von nur 200 x 200 m in der Umgebung der Höhle. In diesen natürlichen Hohlräumen wurden bis 1870 die Goethit- und Sideritlagerstätten abgebaut, wobei die isoliert liegenden Hallen z. T. durch künstliche Stollen miteinander verbunden wurden. Heute wird der historische Eisenstollen durch eine Speläotherapie-Station in Bad Grund genutzt, so dass hier nunmehr Asthmakranke eine Linderung ihrer Beschwerden finden. Es ist möglich, dass die Sideritverwitterung auch an der Entstehung der konvektiven Höhlen in den devonischen Massenkalken des Rheinischen Schiefergebirges (wie z. B. der Kubacher Kristallhöhle) beteiligt war, sicher sagen lässt sich das aber nicht.

Höhlenentstehung durch Oxidation von aufsteigenden Gasen

Die Höhlen in der Fränkischen und der Schwäbischen Alb können nicht durch Sideritverwitterung entstanden sein, weil sich in den dortigen jurassischen Gesteinen keine Sideritlagerstätten bilden konnten. Stattdessen kommen zwei andere chemische Reaktionen als Auslöser für die Höhlenbildung in Frage: die Oxidation von Schwefelwasserstoff



Warmzeit, 1. Speläothem-Generation



Kaltzeit, Speläothemzerstörung



Warmzeit, 2. Speläothem-Generation

Abb. 3: Auswirkung von Klimawechseln auf Speläotheme

Quelle: eigener Entwurf

(H₂S) oder von Methan (CH₄). Beide Gase könnten durch aus der Tiefe aufsteigendes Thermalwasser entlang von Gesteinsklüften in die jurassischen Kalke eingedrungen sein. Nahe der Oberfläche könnte sich sauerstoffhaltiges Sickerwasser mit dem Tiefenwasser gemischt haben, wonach der Sauerstoff möglicherweise von Bakterien dafür benutzt worden sein könnte, das H₂S zu schwefliger Säure bzw. Schwefelsäure (H₂SO₄) und das CH₄ zu CO₂ aufzuoxidierten. Schwefelsäure und CO₂ könnten dann gemeinsam den Kalk um die Aufstiegsstelle herum gelöst haben.

Die Reaktion von H₂S zu Schwefelsäure führt bei hohen Konzentrationswerten zur Ausfällung von Gips. Derartige Gips-

lagerstätten sind heute beispielsweise in der Carlsbad Cavern in New Mexico (USA) zu finden. Das für die Höhlenentstehung verantwortliche H₂S-haltige Wasser ist hier aus den darunter liegenden Erdöllagerstätten aufgestiegen. Im humiden, gemäßigt temperierten Klima Zentraleuropas wäre der Gips dagegen schon längst weggelöst worden. Daher sind in hiesigen Breiten etwaige Spuren einer Höhlenentstehung durch H₂S auf jeden Fall schon wieder verwischt.

In der Bismarckhöhle, der größten Konvektionshöhle in Franken, gibt es interessante Brauneisenablagerungen, die höchstwahrscheinlich ein Hinweis auf Methanoxidation sind. Hätte es nämlich in der Bismarck-

Zu Abb. 3:

Die deutschen Höhlen wurden durch die Eiszeiten ebenso geprägt wie die oberirdische Landschaft. Die während der Warmzeiten gewachsenen Speläotheme wurden während der Höhleneisphasen und während des Permafrostes zum Teil wieder zerstört (siehe mittleres Bild). Zu den durch Höhleneis verursachten Schäden gehören (vgl. Kempe 2004):

- 1 – Fehlen der Deckenspeläotheme älterer Generationen
- 2 – Abgeschernte Stalaktiten und Sintervorhänge, die auf Bodensinterformationen liegen
- 3 – Abgebrochene Stalagmiten
- 4 – Abgeschernte und verlagerte Stalagmiten
- 5 – Risse in Kegelstalagmiten
- 6 – Abgerissene und angelehnte Stalagmiten
- 7 – Zusammengeschobene Bodensinter
- 8 – Abgelegte Sinterbruchstücke

grotte H₂S-haltige Lösungen gegeben, dann hätte hier auf keinen Fall Fe²⁺ transportiert werden können – es wäre schon vorher tief im Untergrund als Eisensulfid (FeS) ausgefallen. Demgegenüber wären CH₄-haltige Lösungen in der Lage gewesen, auch merkliche Mengen an Fe²⁺ zu transportieren, welches dann durch das Methan zu Fe³⁺ aufoxidiert und anschließend ausgefallen sein könnte. Dies sind geochemische Indizien für einen Prozess, der unterhalb des heutigen Grundwasserspiegels, d. h. noch vor der Bildung der heutigen Täler und der damit verbundenen Absenkung des Karstwasserspiegels abgelaufen sein muss.

Gesamtzahl der deutschen Höhlen

Die Schauhöhlen sind nur einige wenige Beispiele für die insgesamt ca. 12 000 in Deutschland registrierten Naturhöhlen. Die Mitglieder des „Verbandes der Deutschen Höhlen- und Karstforscher“ (VDHK) führen regionale Kataster über alle Höhlen mit einer Gesamtlänge von über 5 m. Die meisten Objekte zählen dabei zu den Kleinhöhlen, nur 81 Höhlen haben eine Länge von über 1 km. Insgesamt verteilen sich die Höhlen in Deutschland

dabei wie folgt (Stand: 2001; vgl. *Laumanns* 2002):

- Norddeutschland (Weserbergland, Harz etc.): 732 Objekte;
- Nordrhein-Westfalen: 1 100 Objekte;
- Eifel: 677 Objekte;
- Rheinland-Pfalz und Saarland: 452 Objekte;
- Hessen: 441 Objekte;
- Baden-Württemberg (Schwäbische Alb): 2 418 Objekte;
- Baden-Württemberg (Muschelkalk etc.): 536 Objekte;
- Nordost-Bayern, Bayerischer Wald und Unterfranken: 273 Objekte;
- Fränkische Alb: 2 784 Objekte;
- Alpen und Alpenvorland: 1 812 Objekte;
- Thüringen: 350 Objekte;
- Sachsen: 411 Objekte.

Die sechs längsten deutschen Höhlen liegen räumlich weit verteilt:

- Salzgrabenhöhle (Bayern): 9 064 m Länge
- Fuchslabyrinth (Baden-Württemberg): 8 300 m Länge
- Hölloch (Bayern): 7 085 m Länge,
- Attahöhle (Nordrhein-Westfalen): 6 670 m Länge (vgl. *Foto 1*),
- Wulfbachquellhöhle (Baden-Württemberg, Schwäbische Alb): 6 497 m Länge,
- Mühlbachquellhöhle (Bayern, Fränkische Alb): 6 090 m Länge.

Höhlen und Tropfsteine

Höhlen sind zugleich auch Ablagerungsräume, in denen Stalaktiten, Stalagmiten (hängende, stehende Tropfsteine) und Bodensedimente das Kommen und Gehen von Eiszeiten, die Veränderung von Vegetation und Tierwelt und die Entwicklung der menschlichen Kultur dokumentieren. Die chronologische Datierung der Tropfstein- und Ablagerungsschichten ist eine Voraussetzung für die Einordnung von Fundstücken (z. B. Knochen) in das pleistozäne Klimageschehen. *Abb. 2* gibt einen Überblick über die Vielfalt der unterirdischen Sinterbildungen. Zusammenfassend werden Höhlensinter als „Speläotheme“

bezeichnet. Sie verdanken ihre Entstehung den an der Erdoberfläche über den Höhlen befindlichen Böden. Hier wird durch Wurzelatmung und bakterielle Zersetzungs Vorgänge so viel CO₂ freigesetzt, dass es aufgrund von Lösungsvorgängen im darunter liegenden Gestein zu einer erhöhten Konzentration von Kalk im Sickerwasser kommt. Ohne eine Bodendecke gibt es also folglich auch keinen „Sinterschmuck“ in den darunter liegenden Höhlen. Allerdings spielt hier auch die Klimageschichte eine Rolle, da sich in den Kaltzeiten wiederholt Höhleneis gebildet hat, durch das jedes Mal ein Teil der Versinterungen wieder zerstört wurde. Auf diese Weise lassen sich in den deutschen Höhlen mehrere Sintergenerationen unterscheiden, die ein Abbild des oberirdischen Klimageschehens sind (vgl. *Abb. 3*).

Literatur

- DREYBRODT, W.: Processes in Karst Systems. Physics, Chemistry and Geology. Berlin 1988
- GABROVSEK, F. (Hrsg.): Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation. Postojna 2002
- KEMPE, S.: Gypsum Karst of Germany. In: A. KLIMCHOUK, D. LOWE, A. COOPER und U. SAURO (Hrsg.): Gypsum Karst of the World. Bologna 1997, S. 209–224 (International Journal of Speleology, Special Issue 25)
- KEMPE, S.: Natural speleothems damage in Postojnska jama (Slovenia), caused by glacial cave ice? A first assessment. *Acta Carsologica* 33 (2004) H. 1, S. 265–289
- KLIMCHOUK, A., D. FORD, A. PALMER und W. DREYBRODT (Hrsg.): Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers. Huntsville/Alabama 2000
- LÄUMANN, M.: Die Höhlen-Katastergebiete der Bundesrepublik Deutschland. Stand Juni 2001. *Mitteilungen des Verbandes der Deutschen Höhlen- und Karstforscher* 48 (2002) H. 2, S. 40–43

Internet

- Verband der Deutschen Höhlen- und Karstforscher; Portal zu Karst- und Höhleninformationen im Internet und zu den deutschen Schauhöhlen
www.vdhk.de
- Portal zu wissenschaftlichen Arbeiten zur Karst- und Höhlenentstehung
www.speleogenesis.info

Autor

Professor Dr. STEPHAN KEMPE,
geb. 1949
Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Schnittspahnstr. 9, 64287 Darmstadt
E-Mail: kempe@geo.tu-darmstadt.de
Arbeitsgebiete/Forschungsschwerpunkte:
Karst- und Höhlengeneese

Weiterführende Literatur zum Thema Höhlen

- BEDACHT, A. (Hrsg.): Fahrt in die Tiefe. Ein Handbuch für Höhlenbefahrungen. Augsburg 2004
- JACKSON, D.D.: Planet Erde: Höhlen. Amsterdam 1983
- KEMPE, S. (Hrsg.): Höhlen. Welt voller Geheimnisse. Hamburg 1997 (HB-Bildatlas Sonderausgabe 17)
- ROSENDAHL, W. und E.-B. KRAUSE (Hrsg.): Im Reich der Dunkelheit. Höhlen und Höhlenforschung in Deutschland. Gelsenkirchen 1996
- Zeitschrift: *Mitteilungen des Verbandes der Deutschen Höhlen- u. Karstforscher e.V.* (vierteljährliche Erscheinungsweise)
- Zeitschrift: *Die Höhle*. Gemeinsames Publikationsorgan des Verbandes der Österreichischen Höhlenforscher und des Verbandes der Deutschen Höhlen- und Karstforscher (früher vierteljährliche, jetzt jährliche Erscheinungsweise).

Summary

Karst Areas and Caves in Germany

by Stephan Kempe

West Germany has about 14 % karstifiable rocks, especially limestone, dolomite and gypsum of various geological ages. Subterraneously also salt occurs. The dissolution of these rocks forms karst landscapes that feature – among others – sinking creeks, large springs, caves, dry valleys, sinkholes and subsrosion basins. Some karst areas are quite small in extent, others like the Frankonian and Swabian Alb cover large areas. In addition to true karst caves in active or fossil groundwater conductors, Germany also has a high percentage of caves formed by convective processes. These were either fuelled by local water input (in case of many of the gypsum caves) or by the oxidation of H₂S and/or CH₄ rising from lower levels into the oxygenated shallow groundwater. Another CO₂-generating process that leads to convective cave formation is siderite weathering.

The Union of German Cave and Karst Explorers keeps regional lists of caves which (in 2001) registered 12 000 objects of which 81 are longer than 1 km. 50 caves are open to the public as show caves. About 20 of the German show caves belong to the type of convective caves.

Geographische Rundschau



Karst und Karstlandschaften

Karstmorphologie – eine Einführung
 Mediterraner Karst – tropischer Karst
 Der dinarische Karst als Lebensraum
 Umweltprobleme in Karstgebieten
 Karst und Tourismus
 Karstgebiete und Höhlen in Deutschland
 Boden und Karst als Thema im Unterricht
 Aktuell: Tsunami-Folgen in Südthailand