

Wissenschaftliche Grundlagen der Karst- und Höhlenkunde

(Auszug aus der Examensarbeit „Das Karstgebiet von Erdbach im Westerwald

– Speläologie, Hydrologie und aktuelle Probleme“ von Annette Hüser)

1 Wissenschaftliche Grundlagen der Speläologie

1.1 Definition grundlegender Begriffe der Karst- und Höhlenkunde

Grundlage dieses Kapitels ist folgende Literatur: TRIMMEL (1965), BÖGLI (1978), KEMPE (1982), AHNERT (1996) und NAZARENUS (1999).

In diesem Abschnitt sollen die Karstformen definiert und erläutert werden, welche für diese Arbeit von Bedeutung sind. Die Anwendung der Begriffe auf das Karstgebiet von Erdbach erfolgt im Kapitel 6.2: *Übersicht über die bekannten Karsterscheinungen*. Für die folgenden Fachwörter finden sich in der Literatur unterschiedliche Anwendungen bzw. Abgrenzungen, eine genaue Definition ist allerdings nötig, um sie auf konkrete Objekte anzuwenden. Einige grundlegende Begriffe, die der Karsthydrologie zuzuordnen sind, werden im Kapitel 3: *Wissenschaftliche Grundlagen der Karsthydrologie* erklärt.

1.1.1 Karst

Der Begriff „Karst“ ist ursprünglich der Eigenname der Gebirgslandschaft östlich von Triest. Er wurde übernommen als Bezeichnung für die Gebiete, die dieser Gebirgslandschaft morphologisch und hydrologisch verwandt sind. Diese Landschaftsform zeichnet sich durch weitgehend fehlende Oberflächenentwässerung aus, die ihre Ursache in der Klüftigkeit und Löslichkeit des Gesteins hat. Kompakte Karbonatgesteine (Kalkstein und Dolomit) sind praktisch für Wasser undurchlässig. Da sie aber spröde sind, führen auch kleine tektonische Beanspruchungen zur Bildung von Klüften. Durch die Erweiterung der Klüfte durch Korrosion wird der Kalk zum durchlässigsten Gestein (BÖGLI 1978, S.10). Die Durchlässigkeit nimmt mit der Zeit noch zu. Da Karstlandschaften überwiegend durch Tektonik und Wasser geformt werden, werden sie auch „Korrosionslandschaften“ oder „Lösungslandschaften“ genannt (TRIMMEL 1965, S.57). Die weitgehend fehlende Oberflächenentwässerung beeinflusst nicht nur die Entwicklung der Oberflächenformen, sondern auch die der Pflanzenwelt und des Bodens, so dass insgesamt ein eigenes Landschaftsbild entsteht. Den Entwicklungsvorgang, der zur Ausbildung einer Karstlandschaft führt, bezeichnet man als Verkarstung. Man unterscheidet verschiedene Karst-

typen: Dem bedeckten Karst ist eine Sedimentbedeckung aufgelagert. Liegt das verkarstete Gestein an der Oberfläche, spricht man von offenem Karst. Der offene Karst wird nach dem Vorhandensein einer Humusdecke weiter unterteilt in subkutanen und nackten Karst (NAZARENUS 1999, S.9). Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach seichtem Karst, bei dem zwischen dem verkarstungsfähigen Gestein und dem Niveau des Vorfluters eine undurchlässige Schicht eingeschaltet ist und dem tiefen Karst, bei dem das verkarstungsfähige Gestein bis in beliebige Tiefe unter das Vorfluterniveau hinabreicht (TRIMMEL 1965, S.58). In anderen Klimazonen findet man noch weitere Karsttypen wie Turm- und Kegelkarst, die aber für das hier beschriebene Gebiet ohne Bedeutung sind.

Durch die lösende Wirkung des Wassers verfügen die Karstlandschaften über einen ihnen eigenen Formenschatz. Formen des Oberflächenkarstes, des Exokarstes, sind Karren, kleine geschlossene Hohlformen (Dolinen, Uvalas, Cenotes, Cockpits), Korrosionsebenen, Karsttäler, Schichttreppenkarst und Poljen (BÖGLI 1978, S.51). Einige dieser Formen sind allerdings an ein bestimmtes Klima oder andere Bedingungen gebunden und darum nur in anderen Erdteilen zu finden. In den folgenden Abschnitten werden die Karstformen beschrieben, die typisch für das deutsche Mittelgebirge sind.

Der Endokarst ist der unterirdische Karst. Ein verkarstungsfähiger Gesteinskomplex ist zuerst nur an der Oberfläche der Verkarstung ausgesetzt. An den austreichenden Fugen setzen Lösungsvorgänge ein, die sich in den Gesteinskörper fortsetzen, wenn zwischen der Oberfläche und dem Vorfluter eine Höhendifferenz besteht.

1.1.2 Karren

Karren sind die Kleinformen der Korrosion. Im Speläologischen Fachwörterbuch (TRIMMEL 1965, S.55) sind sie definiert als „Korrosionsformen, die auf verkarstungsfähigen Gesteinen bei flächenhafter Benetzung durch Atmosphärien und Sprühwasser und durch das dabei ablaufende Wasser unter gelegentlicher Mitwirkung von Organismen entstehen.“ Unterschieden werden **oberirdische Karren**, die auf nacktem Fels oder unter einer Boden- und Vegetationsschicht entstehen, und **Höhlenkarren**, die im Inneren von Höhlen an den Wänden, der Decke oder an der Sohle von Höhlenräumen vorkommen.

Die folgende Beschreibung der für das deutsche Mittelgebirge typischen Karrenarten erfolgt in Anlehnung an TRIMMEL (1965, S.55-57), ergänzt nach BÖGLI (1978, S.51-61)

Formen der oberirdischen Karren sind

- a) **Kluftkarren.** Sie entstehen sowohl im nackten Karst als auch unter einer Bodendecke (BÖGLI 1978, S.59) durch vorwiegend korrosive Erweiterung von Klüften. Kluftkarren treten an geneigten und an horizontal gelagerten Kalkoberflächen

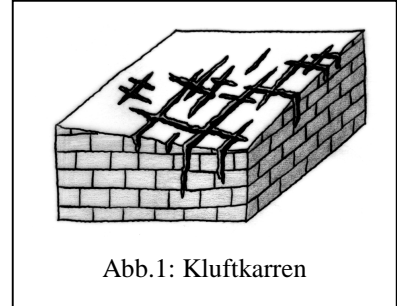


Abb.1: Kluftkarren

auf. Sie können mehrere Meter tief werden und sind häufig mit Feinerdematerial und Pflanzenresten ganz oder teilweise verfüllt.

- b) **Rinnenkarren.** Diese kleinen Furchen kommen in nackten Gesteinsoberflächen vor (BÖGLI 1978, S.57) und entstehen durch das Abfließen des Niederschlagswassers. Verschiedene Formen sind vom Gefälle und von der Art der Bewässerung

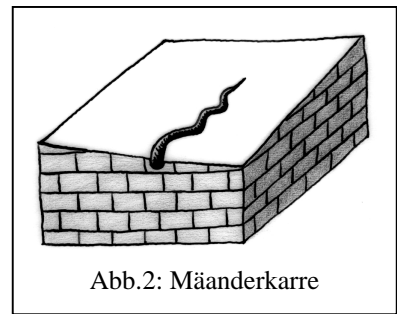


Abb.2: Mäanderkarre

abhängig. Bei flächenhafter Benetzung und stärkerem Gefälle entwickeln sich Regenrinnenkarren, die parallel und gerade verlaufen, bei geringem Gefälle entstehen Mäanderkarren, die eine leicht gewundene Form haben.

- c) **Rillenkarren.** Sie entstehen dort, wo frisches, unverbrauchtes Niederschlagswasser auf eine nackte Gesteinsoberfläche einwirkt. Rillenkarren sind lückenlos aneinandergereiht und besitzen scharfe Zwischengrate, die kaum 1cm

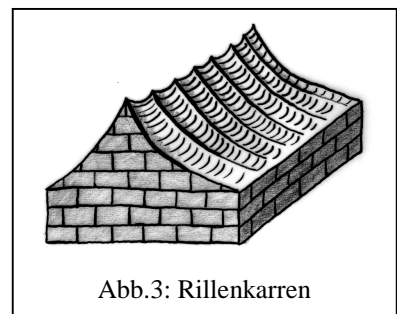


Abb.3: Rillenkarren

Höhe erreichen. Die Länge nimmt mit dem Gefälle zu, die Breite variiert zwischen 1 und 3 cm (BÖGLI 1978, S.55, 56).

- d) **Rundkarren.** Sie werden unter Humusbedeckung gebildet oder bei später einsetzender Bodenbedeckung aus einer anderen Grundform entwickelt. Charakte-

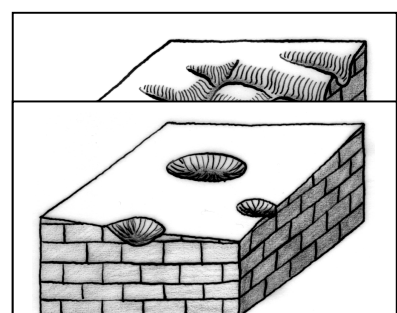


Abb.5: Kamenitsa

ristisch für diese Karren ist die Zurundung der Firste.

- e) **Kamenitsa.** Bei diesem Karrentyp handelt es sich um beckenförmige, geschlossene Vertiefungen im Gestein. Sie entstehen auf nackten Kalkflächen durch örtlich aufgelagerte Humuspolster und haben einen Durchmesser von 1 cm bis 1 m. Kamenitsa werden selten tiefer als 15 cm, da der Bodenschlamm vor Auflösung des Gesteins schützt (BÖGLI 1978, S.58).
- f) **Wurzelkarren.** Dieser Karrentyp wird von Bögli, nicht aber von Trimmel beschrieben. Er entsteht entlang von Wurzeln, weil deren Abgabe von Kohlendioxid die Kalklösung fördert. Wurzelkarren sind klein und flach, bei Entblößung verschwinden sie schnell durch Flächenkorrosion (BÖGLI 1978, S.58, 59).

Häufig treten Karren nicht einzeln auf, sondern in Karrenfeldern.

1.1.3 Dolinen

Dolinen sind die verbreitetste Karstform. Nach A. BÖGLI (1978, S.62) werden sie definiert als „einfache, trichter-, schüssel- oder kesselförmige geschlossene Karsthohlformen mit unterirdischem Abfluß und einem Durchmesser, der größer ist als die Tiefe“. Sie können einzeln auftreten, Dolinenfelder oder -reihen bilden. Der Durchmesser der Dolinen variiert zwischen einigen Metern und einem Kilometer (BÖGLI 1978, S.62). Die verschiedenen Dolinentypen werden nach ihrer Entwicklung unterschieden in Lösungsdolinen, Sackungsdolinen, Schwemmlanddolinen und Einsturzdolinen (NAZARENUS 1999, S.13-15).

Die **Lösungsdoline** ist allgemein der häufigste Dolinentyp, im Kalkkarst des deutschen Mittelgebirges kommt er überwiegend vor. Lösungsdolinen werden durch das Weglösen des Kalkes unter einer Bodendecke gebildet. Sie entstehen meist an Spalten im Gestein, häufig an Kluftkreuzungen, da das Gestein hier mehr Angriffsflächen für die Lösungsverwitterung bietet. Dort versinkt das Wasser im Untergrund und löst oberflächlich die Hohlformen heraus. Wenn die Hohlformbildung erst einmal begonnen hat, fließt das ablaufende Regenwasser aus der Umgebung an der Oberfläche oder an der Grenze zwischen Boden und Gestein der Doline zu ((AHNERT 1996, S.315)). In die einmal entstandene Vertiefung wird immer mehr Boden von den Seiten her eingeschwennt, was eine gesteigerte CO₂-Produktion und damit zunehmende Kalk-

lösung am Grunde der Mulde bewirkt (KEMPE 1982, S.34). Lösungsdolinen weisen verschiedene Formen von flachen Senken bis zu tiefen Trichtern auf. Die Form richtet sich nach dem Verhältnis zwischen der Lösungseintiefungsrate im Zentrum und der des Umfeldes (AHNERT 1996, S.315). Der Dolinenboden kann aus anstehendem Gestein bestehen, der offene Klüfte aufweist oder mit einer dünnen Bodenschicht bedeckt ist, die sich durch Einschwemmungen gebildet hat. Häufig besteht der Dolinengrund aber auch aus einer dickeren über dem Anstehenden liegenden Sedimentschicht, die die Doline nur schwach gewellt aussehen lässt. Sie hat dann eine schüssel- oder muldenartige Form (NAZARENUS 1999, S.13).

Sackungsdolinen, auch Senkungsdolinen genannt, entstehen durch „langsame Massenbewegung zur Tiefe hin“ (BÖGLI 1978, S.62). Die Bodenschicht, die dem verkarsungsfähigen Gestein aufliegt, sackt allmählich über einer Lösungshohlform nach. Sackungsdolinen sind sanft trichterförmig und treten oft innerhalb größerer Karsthohlformen auf (NAZARENUS 1999, S.14).

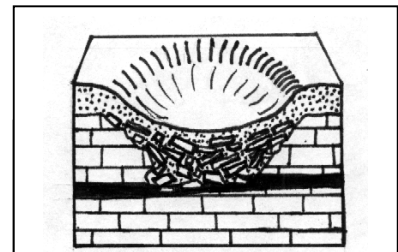


Abb.7: Sackungsdoline

Schwemmlanddolinen entstehen nur im bedeckten Karst. Für diese Arbeit sind sie ohne Bedeutung, daher werden sie nicht näher behandelt.

Der Begriff „**Einsturzdoline**“ wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert.

Im Zusammenhang mit dem Begriff „**Erdfall**“

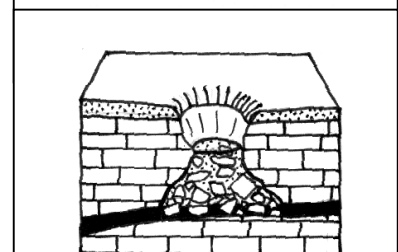


Abb.8: Einsturzdoline

wird er in der Fachliteratur viel diskutiert. TRIMMEL (1965, S.18, 22) erkennt Einsturzdolinen nicht als echte Dolinen an, da sie sich in einem schnellen, meist einmaligen Vorgang bilden, während die Dolinenbildung nach seiner Auffassung durch eine langsame, allmähliche Entstehung gekennzeichnet ist. Daher verwendet er wie auch viele andere Autoren den Begriff „Erdfall“ für alle plötzlichen Einbrüche der oberen Gesteinsschichten unabhängig vom Karsttyp. Im Sprachgebrauch ist diese Anwendung noch immer gängig. Besonders in der neueren Literatur bezeichnet der Begriff „Erdfall“ dagegen den Einbruch des Deckgesteins im bedeckten Karst (Ahnert 1996, S.316). Einsturzdolinen

nennen diese Autoren Hohlformen des offenen Karstes, die dann entstehen, wenn die Decke oberflächennaher unterirdischer Hohlräume durch Korrosion oder Inkasion seine Tragfähigkeit verliert und einstürzt. Sie haben meist ursprünglich eine kesselartige Form, die häufig durch Verwitterungsprozesse zu Trichtern werden (BÖGLI 1978, S.62). Der Boden ist überwiegend mit Felssturzmassen bedeckt oder schließt direkt an eine Höhle an.

Erdfälle entstehen, wenn das überlagernde nichtlösliche Gestein über einem Hohlraum im Karstgestein einbricht. Sie sind im Kalkstein eher selten, vermehrt kommen sie im Gips- und Salzkart vor (TRIMMEL 1965, S.22).

Wenn zwei oder mehrere Dolinen so dicht nebeneinander liegen, dass sich ihre Ränder überschneiden, so wird daraus eine längliche Hohlform, die gewöhnlich mehrere tiefe Stellen aufweist. Diese Karstform heißt **Uvala** (AHNERT 1996, S.317). Uvalas können aus jedem Dolinentyp entstehen.

1.1.4 Karsttäler

Man unterscheidet solche mit heute noch aktiven Oberflächengerinnen und die inaktiven Trockentäler. Karstflüsse sind meistens allochthon, d.h. sie fließen von einem unverkarsteten Raum in das Karstgebiet hinein, durchqueren es auf der ganzen Länge oberirdisch oder im Wechsel von oberirdischem und unterirdischem Lauf. Folgende Bedingungen können die Ursache für oberirdische Karstflüsse sein (nach BÖGLI 1978, S.68):

Die Verkarstung ist noch nicht so weit fortgeschritten, dass die unterirdischen Hohlräume das gesamte Wasser aufnehmen können.

Der Fluss hat sich bis zum Karstwasserspiegel eingeschnitten und bildet den Vorfluter. Diese Möglichkeit besteht nur im tiefen Karst.

Der Fluss hat im seichten Karst die unterlagernden, undurchlässigen Schichten erreicht.

Das Flussbett wurde nachträglich abgedichtet.

Die karsthydrologisch wirksamen Klüfte und Hohlräume sind durch Permafrost verplombt. Dadurch wird das alte, aus der Zeit vor der Verkarstung stammende Gewässernetz reaktiviert, es bilden sich aber auch neue, wenig tiefe Täler. Ein großer Teil dieser Täler wird nach Abklingen des Permafrostes zu Trockentälern.

Das Gefälle der Talflanken hängt von der Verwitterungsanfälligkeit der Gesteine ab. In grobgebanktem, dichtem Kalk sind sie sehr steil bis senkrecht.

Eine besonderer Typ von Karsttälern sind die **Einsturztäler**, die durch Einbruch von Flusshöhlen entstehen (NAZARENUS 1999, S.17).

Ein **Trockental** ist eine Altform der Karstlandschaft, die aus der Zeit vor dem Einsetzen der Verkarstung stammt. Es entstand durch oberirdisch fließendes Wasser bzw. dessen Erosion und wurde durch die Verkarstung trockengelegt, wobei der Vorgang der Trockenlegung allmählich oder plötzlich erfolgen kann. In Ausnahmefällen wie starkem Regen können in Trockentälern kurzfristig Gerinne auftreten. Die vor Beginn der Verkarstung entstandene Form der Täler bleibt im Großen und Ganzen unverändert, da die Erosion nach der Trockenlegung weitgehend wegfällt. Dadurch sind Trockentäler wichtige Zeugen der Landschaftsentwicklung in Karstgebieten (TRIMMEL 1965, S.99).

1.1.5 Höhlen

Den Begriff „Höhle“ zu definieren, ist schwierig. Es gibt in der deutschsprachigen Grundlagenliteratur keine Definition, die völlig eindeutig ist. TRIMMEL (1965, S.34) schlägt folgende Definition vor: „Eine Höhle ist eine durch Naturvorgänge gebildete unterirdische Hohlform, die ganz oder teilweise von anstehendem Gestein umschlossen wird.“ Diese Definition ist problematisch, da in der höhlenkundlichen Literatur immer wieder nach einer Definition für Höhlen gesucht wird, die eine Mindestgröße festsetzt. Spalten und flache Mulden im Gestein werden allgemein noch nicht als Höhle bezeichnet, der Übergang zu größeren Hohlformen ist aber fließend.

Nach der Internationalen Speläologischen Union (ISU) wird die Höhle definiert als ein „natürlicher, mehr als menschengroßer unterirdischer Hohlraum, der teilweise oder ganz von Sedimenten, Wasser oder Eis erfüllt sein kann“ (BÖGLI 1978, S.238). Demnach wird der Mensch als das Maß für Höhlen festgesetzt. Aber auch diese Definition gilt nicht absolut, da die Größe von Menschen, z.B. die eines Kindes und die eines ausgewachsenen Menschen, sehr stark schwankt. Dazu kommt, dass kleine Gänge und Kammern, die mit Höhlen verbunden sind, zu diesen hinzugezählt werden und damit doch als Höhlen gelten (BÖGLI 1978, S.238).

Da es jedoch keine eindeutigere Definition gibt, wird die der ISU weitgehend anerkannt. In die Höhlenkataster der deutschen Bundesländer werden dagegen nur Hohlräume mit einer Gesamtganglänge oder -tiefe von mindestens 5 m aufgenommen, es sei denn, sie weisen eine Besonderheit wie z.B. vorgeschichtliche Funde auf (STEIN 1985, S.30).

Die Einteilung der Höhlen geschieht nach unterschiedlichen Gesichtspunkten (nach BÖGLI 1978, S.238-244):

Bei der geologisch-petrographischen Klassifikation erfolgt die Einteilung nach dem umgebenden Gestein. Als lithologische Kriterien gelten die Löslichkeit, die geomorphologische Härte und die Verwitterungsbeständigkeit. Man unterscheidet demzufolge zwischen Kreidehöhlen, Karbonatgesteinshöhlen (Kalk- und Dolomithöhlen), Gipshöhlen, Sandsteinhöhlen, Konglomerat-höhlen, Granithöhlen und Gletscherhöhlen.

Karbonatgesteinshöhlen sind die üblichen Höhlen des Karbonatkarstes und entstehen überwiegend durch Korrosion.

Nach der genetischen Klassifikation werden die Höhlen nach ihrer Entstehungsweise unterschieden in Primär- und Sekundärhöhlen. Als Primärhöhlen bezeichnet man alle unterirdischen Hohlräume, die gleichzeitig mit dem Gestein entstehen. Es sind verschiedene Arten wie Blasenhöhlen und Lavahöhlen bekannt geworden. Da sich diese Arbeit jedoch auf das Karstgebiet von Erdbach bezieht, werden im Folgenden lediglich die Höhlentypen behandelt, die im Kalkstein vorkommen können. Im Karbonatkarst sind Primärhöhlen sehr selten. Dort, wo Wasser über Felswände fließt, können sich Tuffablagerungen bilden, in denen sich Hohlräume befinden. Gelegentlich entstehen bereits bei der Riffbildung sogenannte Riffhöhlen. Sie halten sich aber in der Regel nicht lange, da sie sich mit Korallen- bzw. Riffsand füllen.

Sekundärhöhlen entstehen nach der Gesteinsbildung durch Korrosion und Erosion. Es sind exogene (durch Einwirkung von außen gebildete) Höhlen und endogene Höhlen, die durch im Gesteinsinneren wirkende Faktoren entstanden sind, zu unterscheiden. Im Kalkstein bilden sich exogene Höhlen nur dort, wo das Gestein starken erosiven Kräften wie starkem Wind, stark strömendem Wasser mit hohem Schwebstoffanteil oder Wasserfällen ausgesetzt ist. In diesen Fällen können Halbhöhlen, Auswitterungshöhlen, Windhöhlen, Tosbeckenhöhlen, Uferhöhlen und Brandungshöhlen entstehen.

Endogene Höhlen sind typisch für den Karbonatkarst. Sie werden in tektonische Höhlen, Spaltenhöhlen und Karsthöhlen eingeteilt.

Wenn durch tektonische Vorgänge Hohlräume entstanden, die nachträglich nur unwesentlich durch Korrosion und Erosion verändert wurden, spricht man von tektonischen Höhlen. Sie sind allerdings im Kalk ausgesprochen selten.

Spaltenhöhlen entstehen durch morphologische Vorgänge wie das Abgleiten von Kalkschichten. Sie sind häufig nach oben offen.

Die Karsthöhlen entstehen durch das unterirdische Wasser. Sie treten viel häufiger auf als die anderen Höhlentypen und werden auch oft wesentlich größer. Man unterteilt sie weiter in

Schichtfugenhöhlen, die zwischen zwei gleichartigen, löslichen Gesteinschichten verlaufen,

Schichtgrenzhöhlen, zwischen zwei verschiedenen Gesteinsarten verlaufend, von denen die liegende schwer löslich ist und

Klufthöhlen (Kluftfugenhöhlen), die auf Klüften und Verwerfungen oder Spalten entstanden sind.

Die Klassifikation nach der Größe teilt die Höhlen entsprechend der vermessenen Gesamtganglänge in folgende Kategorien ein:

Kleinhöhlen bis zu 50 m

Mittelhöhlen 50-500 m

Großhöhlen 500-5000 m

Riesenhöhlen über 5000 m

Die Einteilung einer Höhle hängt nach dieser Klassifikation allerdings weitgehend vom Stand der Erforschung ab.

Weiter gibt es die Klassifikation nach hervorstechenden Merkmalen. Genaugenommen werden hier aber nur einzelne Gruppen aus der Gesamtheit der Höhlen herausgenommen. Man spricht von aktiven Höhlen / Höhlenteilen (wenn sie von Wasser durchflossen werden), inaktiven Höhlen / Höhlenteilen (wenn keine Raumbildung durch Wasser erfolgt), Tropfsteinhöhlen, Versturzhöhlen, Eishöhlen (wenn in Höhlenteilen Dauereis enthalten ist), Knochenhöhlen und anderen Höhlentypen, die nach ihren besonderen Merkmalen bezeichnet werden.

Komplizierter gebaute, d.h. verzweigte und vernetzte, sowie aus Schächten und Horizontalstrecken zusammengesetzte Höhlen fasst man als Höhlensysteme zusammen.

1.2 Speläologie als Zweig der Wissenschaft

1.2.1 Definition und Umfang des Begriffs

Für den Begriff „Speläologie“ gibt es noch keine allgemeingültige eindeutige Definition. Der Grund dafür ist, dass dieser Zweig der Wissenschaft als synthetische Disziplin an den Schnittpunkten verschiedener Grundwissenschaften entstanden ist. Er hat sowohl die Untersuchung des Leblosen zum Ziel (Geologie, Mineralogie, Petrographie u.a.), beinhaltet aber auch biologische Wissenschaften (Zoologie, Botanik, Paläobiologie, Anthropologie) und Geisteswissenschaften wie Urgeschichte und Kulturgeschichte (TRIMMEL 1968, S.1).

Ursprünglich entstammt der Begriff Speläologie für „Wissenschaft von den natürlichen Höhlenräumen“ dem Französischen. W. KNEBEL wendete ihn 1906 erstmals im deutschen Sprachraum an. Mit dem Aufschwung der Höhlenforschung im 20. Jahrhundert wurde der Umfang der Speläologie immer wieder diskutiert. Die meisten Höhlen liegen in Karstlandschaften. Daher ist die Karstkunde Grundlage für die Höhlenkunde, weil viele Fragen der Höhlenentstehung und Raumentwicklung nur im Zusammenhang mit ihr geklärt werden können. Umgekehrt besteht aber ebenfalls eine Abhängigkeit. Dieser enge Zusammenhang zwischen Höhlenkunde und Karstkunde an sich ist eine unbestrittene Tatsache. Diskutiert wird die Frage, ob das Gesamtgebiet als eine Gruppenwissenschaft mit zwei Schwerpunkten der Forschung aufgefasst wird oder ob man von zwei einander überschneidenden Wissenschaften spricht.

Um den Umfang des Begriffs „Speläologie“ für die vorliegende Arbeit klar abzugrenzen, übernehme ich die Definition von TRIMMEL. Er schlägt vor, „als ‚Speläologie‘ in Erweiterung des tatsächlichen Wortsinnes die ‚Lehre von den Naturhöhlen und von den Karsterscheinungen‘ zu bezeichnen“

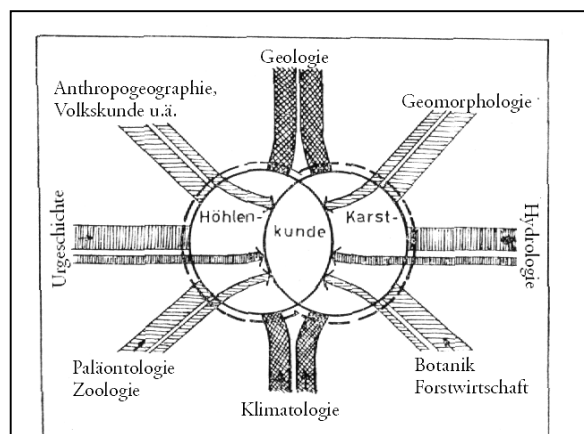


Abb.9: Die Überschneidung der Problemkreise der Speläologie nach TRIMMEL (1972)

(TRIMMEL 1968, S.2). Die Abgrenzung der Karstkunde gegen andere Teilbereiche der Geomorphologie ist klar gegeben, damit ergibt sich ein in sich geschlossener Zweig der Naturwissenschaft, der in der Geomorphologie wurzelt, ihr aber gewissermaßen entwachsen ist. Er umfasst die beiden Problemkreise „Karst“ und „Höhle“. Eine ähnliche Auffassung von Speläologie haben einige weitere Autoren, andere lehnen die vorgeschlagene Ausweitung des Begriffs ab. Auf diese Diskussion geht TRIMMEL (1968, S.1-3) ausführlicher ein. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff „Speläologie“ verwendet, wenn das Gesamtgebiet nach der oben erläuterten Definition gemeint ist, dagegen „Höhlenkunde“ bzw. „Karstkunde“, wenn von einem der beiden Schwerpunkte die Rede ist.

Unter Höhlenkunde hat man ausschließlich die Höhlenforschung im wissenschaftlichen Sinn zu verstehen, nicht die Beschäftigung mit Höhlen aus touristischen oder sportlichen Motiven. Dieser Hinweis ist wichtig, weil z.B. im Französischen „spéléologie“ jede Beschäftigung mit Höhlen bedeutet.

1.2.2 Gliederung

Diese Einteilung der Speläologie nahm TRIMMEL (1968, S.4, 5) vor.

Die **Geospeläologie** behandelt Entstehungsbedingungen, Entwicklung und Erscheinungen des Karst- und Höhlenphänomens, sowie dessen Vorkommen und Verbreitung.

Die **Biospeläologie** behandelt Karst und Höhlen als Lebensraum in Vergangenheit und Gegenwart, untersucht die dort herrschenden Lebensbedingungen (Biofaktoren) und die in diesem Lebensraum existierenden Pflanzen und Tiere.

Die **Anthropospeläologie** behandelt die Beziehungen des Menschen zu Karst und Höhlen in Vergangenheit und Gegenwart. Sie ist ein klar umgrenzter, besonderer Ausschnitt aus der Anthropogeographie.

Die **Angewandte Speläologie** umfasst alle mit der Auswertung der Karstlandschaft und der Höhlen zusammenhängenden Themen. In der Regel handelt es sich um die wirtschaftliche Nutzung, die auf den Ergebnissen der geo-, bio- und anthropospeläologischen Untersuchungen beruht.

Die **Historische Speläologie** behandelt die historische Entwicklung sowie die Organisation der Karst- und Höhlenkunde.

Die **Technische Speläologie** behandelt die Methoden und Möglichkeiten praktischer Forschungsarbeit im Karst und in Höhlen.

1.2.3 Organisation in Deutschland

Obwohl die seriöse Höhlen- und Karstforschung wichtige wissenschaftliche Ergebnisse erzielt, ist sie in Deutschland – und auch weltweit – kein Lehrberuf, sondern eine idealistische Freizeitbeschäftigung, mit der sich kaum Geld verdienen läßt. Die praktische Forschung wird überwiegend von ehrenamtlich arbeitenden Amateuren ausgeübt. In Deutschland gibt es keine staatliche Organisation wie die Institute für Speläologie in manchen anderen Ländern, z.B. Österreich und Rumänien.

Viele Höhlenforscher haben sich in Vereinen zusammengeschlossen, um gemeinsam ein bestimmtes Gebiet bearbeiten zu können. Die Dachorganisation in Deutschland ist der „Verband der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.“ (VdHK). Ihm sind 91 Vereine mit insgesamt etwa 2000 Mitgliedern angeschlossen, außerdem weitere 500 Mitglieder als Einzelpersonen, Institute, Be-

hörden und Schauhöhlenbetriebe. Die vorrangigen Ziele des VdHK sind die Erforschung und der Schutz der Höhlen und Karsterscheinungen, der Umwelt- und Naturschutz sowie der Denkmalschutz in den Karstgebieten Deutschlands (<http://www.hfc-hersfeld.de/vdhk/vdhk.html>). Die nationalen Verbände der einzelnen Länder halten über die Internationale Speläologische Union (ISU) Kontakt (KEMPE 1982, S.10).

1.2.4 Ziele und Forschungsmethoden

Im Folgenden werden die Ziele und Forschungsmethoden nach TRIMMEL (1968) und GRUBERT (1998 b) dargestellt.

Die **Ziele** der speläologischen Forschung sind die Erforschung von Höhlen und anderen Karsterscheinungen sowie deren Schutz, um sie als besondere Lebensräume und natürliche Archive für die Forschung zu erhalten. Das Ziel der angewandten Speläologie ist das Gewinnen von Erkenntnissen über den geologischen Aufbau, die Landschafts- und Klimaentwicklung und die wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten von Karstgebieten.

Methoden der speläologischen Forschung:

In weitgehend unerforschten Karstgebieten stehen die Erforschung des Exokarstes und die Suche nach bisher unbekanntem Höhlenräumen im Vordergrund. Karstformen wie Dolinen und Ponore werden ebenso wie offene Höhleneingänge durch Geländebegehungen gesucht. Dort, wo Hohlräume vermutet werden, allerdings kein Zugang zu erkennen ist, gibt es verschiedene Möglichkeiten, Erkenntnisse über die unterirdische Situation zu gewinnen. Mit Hilfe verschiedener geophysikalischer Methoden können Störungen im Gesteinskörper und größere Hohlräume festgestellt werden. Dienen die Höhlen der Wasserführung, so werden häufig Färbeversuche angewendet, um die Durchflusszeit und die Verdünnungsrate des Wassers zu ermitteln. Damit können ungefähre Aussagen u.a. über das Ausmaß und die Lage der Hohlräume sowie über hydrologische Beziehungen zwischen Ponoren und Karstquellen gemacht werden. Auch Untersuchungen des Chemismus von Wässern können ähnliche Erkenntnisse bringen.

Gibt es Hinweise auf verdeckte Höhleneingänge, so werden Grabungen durchgeführt, um sie zu öffnen. Solche Hinweise können z.B. Dolinen und Ponore sein, aber auch Luftzug aus unbefahrbar engen Felsspalten und episodisch fließende Quellen. Grabungen gibt es auch innerhalb der Höhlen, wenn z.B. hinter lehmverfüllten Spalten oder Versturz Fortsetzungen vermutet werden. Für die Grabungsarbeiten werden in der Regel einfache Hilfsmittel verwendet. Sedimente und Steine werden mit Spaten und Eimern über Menschenketten befördert, was besonders in engen Höhlenteilen beschwerliche Arbeit ist. An der Oberfläche werden gelegentlich Maschinen wie Bagger eingesetzt, um größere Sedimentschichten zu entfernen.

Expeditionen in Höhlen werden als „**Höhlenbefahrungen**“ bezeichnet. Die besonderen Verhältnisse, die in Höhlen herrschen, machen die Verwendung einer speziellen Ausrüstung für Befahrungen notwendig. Die Ausrüstung stammt teilweise aus dem Bergsteigerbereich, wurde aber eigens für die Bedürfnisse der Höhlenforschung weiterentwickelt. Für die Befahrung einfacher Höhlen sind Helm, Schutzanzug, ausreichende Beleuchtung und entsprechendes Schuhwerk nötig. Dazu kommt eine umfangreichere Schachtausrüstung für vertikale Höhlenabschnitte. Schachtstrecken werden mit Hilfe von Drahtseilleitern und vor allem speziellen Seilen überwunden. Wichtige Vorbilder für die Entwicklung der Höhlenbefahrungstechnik waren Bergbau (Beleuchtung) und Schifffahrt (Orientierung und Seilknotentechnik). Die Sicherheit wird in den Vereinen sehr ernst genommen, wodurch es nur äußerst selten zu schweren Unfällen in Höhlen kommt.

Es gibt viele unterschiedliche Gründe für Höhlenbefahrungen: Erforschung, Dokumentation, Grabung und Sammeln bzw. Untersuchung von Höhleninhalten.

Die Dokumentation von Höhlen erfolgt in erster Linie durch die Kartografie und durch Fotografien.

An der Auswertung der Höhleninhalte beteiligen sich Wissenschaftler verschiedener Bereiche. Sie untersuchen Sedimente und Gesteinsproben, Mineralien, Tiere und Pflanzen, Fossilien, Höhleneis, anthropologische Funde, das Höhlenklima und die medizinische Wirkung von Höhlen auf Menschen.

Eine Sonderform von Höhlenforschung ist das Höhlentauchen. Es ist wesentlich gefährlicher als das Tauchen in offenen Gewässern und verlangt eine gute Ausrüstung und sichere Kenntnisse über Höhlen.

Alle diese Forschungsergebnisse werden zentral in Höhlenkatastern gesammelt. Dadurch erhält man mit der Zeit eine Übersicht über alle bekannten Höhlen und Karsterscheinungen in einem Gebiet. Sie ist besonders interessant aus geowissenschaftlicher Sicht und für die Belange des Naturschutzes.

2 Wissenschaftliche Grundlagen der Karsthydrologie

2.1 Definition grundlegender Begriffe

2.1.1 Karsthydrologie

In der Karsthydrologie steht die Beschreibung unterirdischer Gewässer mit ihrem physikalischen und chemischen Verhalten im Mittelpunkt (BÖGLI 1978, S.V). Sie ist unmittelbar mit der Höhlenforschung verbunden, da sich diese mit den unterirdischen Hohlräumen und deren Inhalten beschäftigt, die meist durch die Wässer entstanden sind. Die Hohlräume lassen sich nur mit Hilfe karsthydrologischer Kenntnisse richtig interpretieren, geben aber andererseits auch Hinweise auf das Verhalten der Karstgewässer.

2.1.2 Unterirdische Gewässer

Das Hauptmerkmal einer Karstlandschaft ist die unterirdische Entwässerung in einem verkarstungsfähigen Gestein.

In der Karsthydrologie werden verschiedene Gewässertypen unterschieden:

Grundwasser wird nach der Internationalen Vereinigung für wissenschaftliche Hydrologie definiert als „das Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und nur der Schwere und dem hydrostatischen Druck unterliegt“ (BÖGLI 1978, S.113). Nach der Größe der Hohlräume, deren gegenseitigen Beziehungen sowie nach der dadurch bedingten Bewegungsweise des Wassers wird es unterteilt in Porengrundwasser, Kluftgrundwasser und Karstgrundwasser (Karstwasser) (BÖGLI 1978, S.115).

Das Karstwasser bildet sich aus dem einsickernden Niederschlagswasser auf dem nackten Kalk, aus dem Bodenwasser, dem einfließenden Wasser oberirdischer Gerinne und aus dem Kondenswasser (BÖGLI 1978, S.76).

Der für die Entwicklung des Endokarstes notwendige unterirdische Abfluss setzt ein zusammenhängendes Netz **unterirdischer Wasserbahnen** voraus, das sich aus Klüften, Spalten, Brüchen, Höhlen, Röhren und Zerrüttungszonen zusammensetzt (MARCINEK, ROSENKRANZ 1989, S.234).

Fließendes unterirdisches Wasser tritt auf als Sickerwasser, in freien Gerinnen, in denen es mit freier Oberfläche dahinfließt, als Druckgerinne, in denen es den ganzen Raum ausfüllt und als Karstwasserkörper, die ganze wassererfüllte (phreatische) Zone umfassend (BÖGLI 1978, S.84).

Höhlenbäche können sich sowohl im Endokarst neu aus Sickerwässern bilden, als auch die unterirdische Fortsetzung oberirdischer Gerinne darstellen. Der Verlauf der Höhlenbäche ist meist Veränderungen unterworfen. In Höhlensystemen sind Verzweigungen eines Baches sowie Zusammenflüsse möglich, bei Hochwasser können andere unterirdische Abflusswege benutzt werden als sonst. Verlauf und Richtung sind völlig unabhängig von den topographischen Gegebenheiten der Oberfläche über den Höhlen.

Aktive Wasserhöhlen sind Höhlen, in denen ständig ein größeres Gerinne vorhanden ist (TRIMMEL 1968, S.78).

Wird ein Höhlengang vollständig von fließendem Wasser ausgefüllt und dieses mit erhöhter Geschwindigkeit durch den Gang gedrückt, so spricht man von einem **Druckgerinne** oder von **Druckfließen** (TRIMMEL 1968, S.79,80).

Alle **stehenden unterirdischen Wasseransammlungen** verschiedenster Art werden unter dem Begriff **Höhlenseen** zusammengefasst.

2.1.3 Vadose und phreatische Zone

Im tiefen Karst gliedert sich der verkarstete Raum in

- eine trockene und inaktive Zone mit Sickerwasser, gekreuzt von Zubringern (vadose, inaktive Zone)
- eine periodisch überflutete obere aktive Zone (vadose, aktive Zone oder Hochwasserzone)
- die untere aktive, dauernd wassererfüllte Zone (phreatische Zone).

Im seichten Karst fehlen heute die phreatische und stellenweise auch die Hochwasserzone (BÖGLI 1978, S.100).

Die **vadose Zone** umfasst sowohl den durch Gerinne gequerten inaktiven Bereich als auch die Hochwasserzone. Ihr Merkmal ist die dauernde oder temporäre Anwesenheit von Luft. Der CO₂-Gehalt der Luft bestimmt den Gleichgewichtsgehalt von gelöstem Kalk im Wasser. Dadurch wird entweder Kalk gelöst oder Sinter ausgeschieden (BÖGLI 1978, S.102). In der vadosen Zone fin-

det vertikale Entwässerung statt, die Entwässerung in der phreatischen Zone erfolgt seitlich.

2.1.4 Karstwasserspiegel

Der **Karstwasserspiegel** grenzt den phreatischen Raum vom Vadosen ab. Die Karstwasserflächen in den aus der phreatischen Zone aufsteigenden Gängen sind **piezometrische Niveaus**, Druckspiegel. Der Druck entspricht dem atmosphärischen, somit ist der Druckspiegel eine Gleichgewichtsfläche (BÖGLI 1978, S.85). Piezometrische Flächen können verschieden hoch liegen, denn die durch Zu- und Abflüsse eines Karstwasserkörpers hervorgerufenen Wasserbewegungen bewirken zeitlich und örtlich variierende Fließgeschwindigkeiten, auch wenn der phreatische Bereich räumlich verbunden ist (BÖGLI 1978, S.86). Als Karstwasserspiegel wird der Mittelwert der Höhen der einzelnen Druckspiegel bezeichnet (BÖGLI 1978, S.102).

Die Wasserstandsschwankungen in den freien Wasserspiegeln von Kluft- und Karstwässern sind im Allgemeinen größer als bei den Grundwasserspiegeln in porösen Gesteinen (MARCINEK, ROSENKRANZ 1989, S.245).

2.1.5 Ponore

Das Ponor wird definiert als „jede Stelle, an der Wasser in den Karstuntergrund eintritt“ (WILHELMY 1992, S.44). Es wird auch als Schwinde, Schluckloch, Kattavothre und Schlinger bezeichnet. Bei geeigneter Lage und hohem Wasserangebot können Ponore auch als Quellen dienen. Diese Ponore werden als Wechsellöcher oder Estavellen bezeichnet.

2.1.6 Karstquellen

Karstquellen sind „Wasseraustritte aus karsthydrographisch wirksamen Hohlräumen in wasserlöslichen Gesteinen, sei es an der Oberfläche, sei es im Erdinnern (Höhlenquellen)“ (BÖGLI 1978, S.123). Den zahllosen Versickerungsstellen im Karst stehen vergleichsweise wenige Quellen gegenüber. Eine Karstquelle ist meist an ein ausgedehntes Kluftsystem gebunden, in dem das Wasser vieler Versickerungsstellen gesammelt wird und das häufig mehrere

Austrittsstellen in verschiedener Höhe aufweist. Mit fortschreitender Verkarstung bildet sich aus der Fülle der ursprünglich verfügbaren Fugen durch selektive Korrosion ein Netz von Wasserwegen, von denen immer mehr inaktiv werden, so dass sich das Wasser auf einige wenige Fugen konzentriert. Je stärker ein Gebiet verkarstet ist, desto kleiner ist die Zahl der Quellen und umso größer deren mittlere Schüttung. Wenn die Quellen das Wasser aus dem phreatischen Raum beziehen, wächst die Schüttung der tiefer liegenden auf Kosten der Höheren. Durch den schnelleren Abfluss sinkt die Karstwasserfläche, und die höheren Quellen fallen nacheinander aus. Sie werden so zu periodisch bzw. episodisch fließenden Quellen, die bei starkem Regen oder Hochwasser aktiv werden.

Karstquellen werden nach verschiedenen Kriterien eingeteilt. Die Einteilung erfolgt nach BÖGLI (1978, S.124, 125).

Einteilung nach der Wasserführung:

- perennierende, ständig fließende Quellen
- periodisch fließende Quellen
- sog. intermittierende, rhythmisch fließende Quellen
- episodisch fließende Quellen, z.B. „Hungerbrunnen“

Perennierende Quellen unterscheiden sich in der Ausgeglichenheit der Wasserführung. **Stark schwankende Quellen** entspringen aus weiten Karstgefäßen oder Höhlengängen mit rascher Durchflutung. Auf Niederschlag und Schneeschmelze reagieren sie schnell, oft innerhalb weniger Stunden. Die Wassertemperatur und der Chemismus schwanken in geringem Maß gegenläufig zur Schüttung, bei hoher Schüttung sind Temperatur und Härte niedrig.

Ausgeglichene Karstquellen zeigen keine oder nur geringe Reaktion auf Niederschlag und Schneeschmelze. Sie weisen einen ausgeglichenen Jahresgang von Schüttung, Temperatur und Härte auf. Die unverminderte Schüttung nach längerer Trockenheit weist auf ein großes Wasserreservoir im Karstkörper hin. Dieser Quelltyp kommt selten im Kalk, häufiger in Dolomitgebieten vor (VÖLKL 1986, H1).

Intermittierende Quellen, auch Heber genannt, kommen selten vor. Sie weisen eine ausgesprochen rhythmische Periodizität von einigen Minuten oder Stunden mit scharfen Maxima und/oder Minima auf. Üblich ist eine unvermittelte Zunahme der Schüttung, ein meist kürzeres Verharren auf dem hohen Pe-

gelstand und ein schnelles Absinken auf den alten Wert. Im extremen Fall kann die Wasserführung ganz abbrechen. Die Ursache ist rein physikalisch. Das Wasser sammelt sich im Gesteinsinnern in einem Becken, das einen in Richtung Quelle erst ansteigenden, dann wieder abfallenden Abfluss hat. Hebt sich der Wasserspiegel im Sammelbecken über die Abflussröhre an, dann fließt Wasser über und füllt die absteigende Röhre. Ist der Abfluss zur Quelle hin unten eng genug, dann baut sich eine Wassersäule auf, die letztlich das Wasser durch ihre Saugkraft solange aus dem Becken absaugt, bis dessen Spiegel unter die Ansaugstelle gesunken ist. Es folgt dann Luft nach, und die Wasserzufuhr zur Quelle wird unvermittelt unterbrochen (BÖGLI 1978, S.129).

Wenn der Heber nahe an der Quelle liegt, erfolgt an der Quelle ein scharfer Wechsel zwischen Wasserschwall und völligem Aussetzen (BÖGLI 1978, S.131).

Einteilung nach geologisch-tektonischen Bedingungen:

- Schichtgrenzquellen mit liegendem, undurchlässigem und hangendem, durchlässigem Gestein
- Schichtfugenquellen auf Schichtflächen innerhalb derselben Gesteinsart; meist klein
- Spaltquellen aus Spalten bzw. erweiterten Klüften
- Überfallquellen entwässern einen phreatischen Raum bei bergwärts einsinkender undurchlässiger Unterlage
- Aufsteigende Quellen aus Druckgerinnen, bei starker Wasserführung auch als Vaclusequellen bezeichnet

2.1.7 Vorfluter

Der Vorfluter ist das Gewässer, welches das Wasser eines Einzugsgebietes aufnimmt und wegführt und dadurch zur hydrologischen Basis wird. Im Endokarst können sich die Einzugsgebiete von relativen Vorflutern überschneiden. Das Auftreten und die Anzahl karsthydrologisch voneinander unabhängiger Quellen werden durch die Tektonik und das Entwicklungsalter des Karstes bestimmt. Der **absolute Vorfluter** eines Karstgebietes liegt an dessen Rand (BÖGLI 1978, S.81).

2.1.8 Unterirdische Karstniveaus

Unterirdische Karstniveaus sind nur in Höhlen direkt zugänglich, weshalb man häufig auch von **Höhlenniveaus** spricht. Ein Höhlenniveau umfasst „die Summe aller Karsthohlräume, die unter der Einwirkung eines gegebenen Vorfluters angelegt worden sind und daher eine genetische und chronologische Einheit bilden“ (BÖGLI 1978, S.119).

Nach Bögli gibt es zwei Typen von Höhlenniveaus:

- das an die Piezometerfläche gebundene und zum Vorfluter hin orientierte, das Evolutionsniveau, und
- das durch den unterirdischen Anteil eines Talflusses geschaffene, ein homologes zu den oberirdischen Terrassensystemen.

2.2 Eigenschaften des Karstwassers

Elektrische Leitfähigkeit

Unverschmutztes Wasser ist nur in sehr geringem Maße ionisiert. Dadurch leitet reines Wasser den elektrischen Strom fast gar nicht. Spuren von Salzen, Basen oder Säuren erhöhen die elektrische Leitfähigkeit erheblich (MARCINEK, ROSENKRANZ 1989, S.14).

PH-Wert

Außer den Wassermolekülen finden sich im Wasser freie Wasserstoff- (H^+ -) und Hydroxyl- (OH^- -) Ionen. Die Wasserstoffionenkonzentration wird als pH-Wert angegeben. Mit den freien Wasserstoffionen kann das Wasser selbst schwer bis kaum lösliche Minerale teilweise in Lösung überführen (MARCINEK, ROSENKRANZ 1989, S.17).

Wasserhärte und Gesamthärte

Unter Wasserhärte wird die Summe der im Wasser gelösten Kalzium- und Magnesiumsalze verstanden. Als Gesamthärte wird die Summe aus Karbonat- und Nichtkarbonathärte bezeichnet. Die Lösungskonzentration wird in der Einheit Deutscher Härtegrad ($^{\circ}dH$) angegeben. $1^{\circ}dH = 10 \text{ mg/l CaO}$ (MARCINEK, ROSENKRANZ 1989, S.18).

Wichtige Kennzeichen des Karstwassers (nach WILHELMY 1992, S.44)

- Temperatur und Härte sind weitgehend konstant
- geringe Durchlaufzeiten durch den Gesteinskörper bei Hochwasser-situation, aber auch lange Verbleibzeiten
- mangelnde natürliche Filtrierung

2.3 Korrosion im Stoffsystem $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3$

2.3.1 Die Normalkorrosion

Korrosion ist die chemische Tätigkeit des fließenden Wassers. Im Stoffsystem $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3$ spielen sich im Wesentlichen folgende Schritte ab (nach BÖGLI 1978, S.16-18):

1. An der Trennfläche Luft / Wasser diffundiert Luft- CO_2 in Wasser hinein.
2. Das physikalisch gelöste CO_2 hydratisiert größtenteils zu Kohlensäure. ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$)
3. Die Kohlensäure oxidiert. ($\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$)
4. An der Trennfläche Wasser / Kalkstein werden die Ionen physikalisch aus dem Kristallgitter herausgelöst. ($\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$)
5. Das neu entstandene CO_3^{2-} verbindet sich mit dem H^+ -Ion der Kohlensäure. ($\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$)
6. Die Lösung entlang der Gesteinsoberfläche verarmt an CO_3^{2-} . Um das Lösungsgleichgewicht wieder herzustellen, geht erneut CaCO_3 in Lösung. Durch die Verbindung von H^+ und CO_3^{2-} werden alle Reaktionsschritte reaktiviert, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat.

Diese Lösungsvorgänge werden zusammengefasst in der Summgleichung der Kalklösung $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^{2-}$.

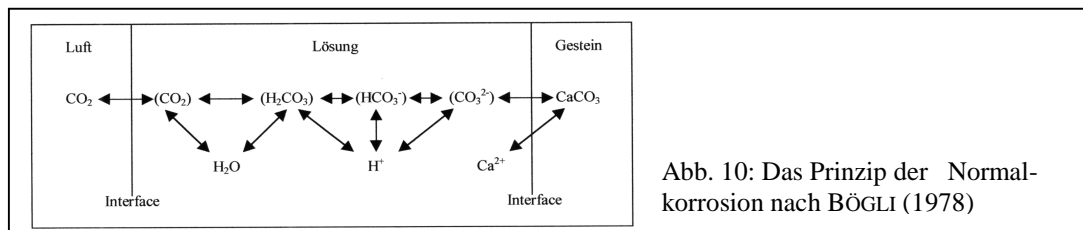


Abb. 10: Das Prinzip der Normalkorrosion nach BÖGLI (1978)

2.3.2 Möglichkeiten des Wassers zur Aufnahme von CO₂

(nach KEMPE 1997, S.20,21)

Aufnahme aus der atmosphärischen Luft

Aus der atmosphärischen Luft diffundiert CO₂ in Niederschlagswasser und anderes oberirdisch fließendes Wasser. Dieses Wasser kann bis zu 40 mg/l Kalk lösen, deutlich mehr als ganz reines Wasser.

Aufnahme aus der Bodenluft

Im Boden wird CO₂ bei der Zersetzung organischer Substanzen und durch Abgabe über Wurzeln an den Boden frei. Diese Prozesse haben zur Folge, dass der CO₂-Druck der Bodenluft bis auf das hundertfache der freien Luft ansteigen kann. Werte über 10 000 ppm können für den CO₂-Partialdruck im Boden leicht gemessen werden. Sickerwasser setzt sich in der Bodenzone mit dem hohen CO₂-Druck ins Gleichgewicht und bildet eine entsprechend starke Kohlensäure. Die Lösungsfähigkeit beträgt bis zu 200 mg/l.

Bildung von CO₂ durch Siderit-Verwitterung

Aus Siderit (Eisenkarbonat, FeCO₃) wird bei der Reaktion mit Luftsauerstoff Eisenoxid und Kohlendioxid frei. Das CO₂ kann vom Wasser aufgenommen werden.

Vulkanisches CO₂

Vulkanisches CO₂ wird in aufsteigenden Thermalwässern transportiert.

Das Verhältnis des CO₂-Drucks zur Lösungsfähigkeit

Es gilt die Regel, dass ein höherer CO₂-Druck auch eine höhere Kalklösung möglich macht. Dieses Verhältnis ist aber nicht linear. Die Abhängigkeit ist aus der nebenstehenden Grafik zu erkennen. Die Kalklösungsfähigkeit richtet sich auch nach der Temperatur der Lösung und nach der Art des gelösten Minerals.

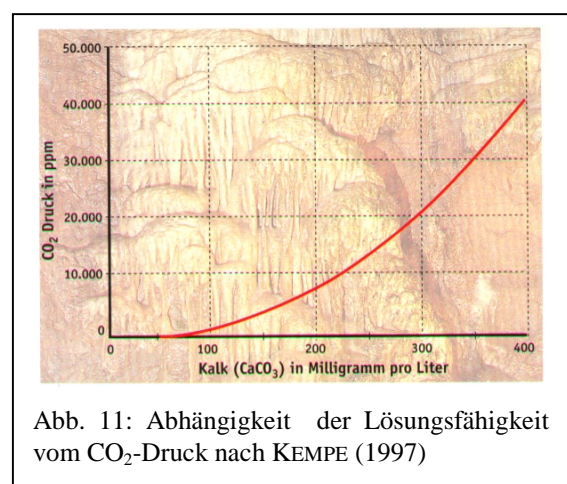


Abb. 11: Abhängigkeit der Lösungsfähigkeit vom CO₂-Druck nach KEMPE (1997)

2.3.3 Einflüsse von Fremdionen

Bei der Korrosion sind fast immer Fremdionen beteiligt: Mg^{2+} , Salz (NaCl) und Sulfat (SO_4^{2-}). Dazu kommen lokal noch Ionen aus Mineralquellen, verwitternden Gesteinen und Erzen, Guano, Düngemitteln, Abwässern und Mineralwässern. Bei einer gesättigten Lösung eines wenig löslichen Salzes erhöht die Zugabe eines anderen, leichter löslichen ohne gemeinsames Ion mit dem ersten dessen Löslichkeit. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die ursprünglich gesättigte Lösung durch Zugabe von Fremdionen untersättigt wird, wodurch eine zusätzliche Auflösung von $CaCO_3$ erforderlich wird.

Umgekehrt bewirkt die Zugabe einer Substanz mit einem gleichen Ion ein Absinken der Kalklöslichkeit, es erfolgt eine Kalkausscheidung (BÖGLI 1978, S.34, 35).

2.3.4 Korrosion durch Veränderung der physikalischen Bedingungen

(nach BÖGLI 1978, S.39-41 und KRAUTHAUSEN 1994, S.26)

Durch Veränderung der physikalischen Bedingungen kann zusätzliches Lösungspotential in einer bereits gesättigten Lösung erreicht werden.

Abkühlungskorrosion

Bei jedem Sinken der Temperatur in einem Gleichgewichtswasser erhöht sich dessen Lösungsfähigkeit. Eine Möglichkeit der Temperaturänderung ist das Anpassen des Wassers an Temperaturschwankungen der atmosphärischen Luft. Dies kommt bei starken thermischen Tagesschwankungen oder ausgeprägten Jahreszeiten vor (BÖGLI 1978, S.39).

Auf wesentlich höhere Werte steigt die Korrosionsfähigkeit bei der Abkühlung von Thermalwässern. Das CO_2 kann beim Rückgang des Druckes, besonders beim Austritt an der Oberfläche spontan frei werden.

Druckkorrosion

Bei den im Karst auftretenden Drucken ändert sich nichts an der Lösungsfähigkeit, wenn keine Gasblasen anwesend sind, da das Wasser für diesen Druckbereich inkompressibel ist.

Wenn Gasblasen im Wasser eingeschlossen sind, ändert Druck die Lösungsfähigkeit. Schnell fließendes unterirdisches Wasser reißt am Übergang zur phreatischen Zone Luft mit sich, wodurch es bei zunehmendem Wasserdruck zu ver-

stärkter Korrosion an der Höhlendecke und zur Bildung eines sogenannten Wirbelkanals kommt.

2.3.5 Mischungskorrosion

Bei unterschiedlicher Temperatur haben zwei verschiedene Wässer einen verschieden großen Gehalt an Kohlendioxid und daher im Sättigungszustand verschiedene Kalkgehalte (AHNERT 1996, S.324). „Mischen sich zwei Gleichgewichtswässer verschiedenen Kalkgehaltes, dann erhält die Mischung überschüssiges CO₂ und ist kalkaggressiv.“ (BÖGLI 1969, S.399). Der Grund ist, dass die Funktionalbeziehung zwischen Kohlendioxidgehalt und Kalksättigung nicht linear ist (s.3.3.2), sich die Vermischung zweier Wässer dagegen als eine lineare Funktion beschreiben lässt. Die zusätzlich gelöste Kalkmenge ist umso größer, je unterschiedlicher die Ausgangskonzentrationen waren.

Entwicklung der Forschung in Bezug auf die Mischungskorrosion

Anfang der 60er Jahre versuchten Karstforscher, den Verkarstungsprozess aus den Gesetzen der Normalkorrosion und physikalischen Kenntnissen zu erklären. Bahnbrechend war eine Arbeit von THRAILKILL (1968), in der er zeigte, dass eine ausreichende Menge von Kalkstein aufgelöst werden kann, und damit die räumliche Ausdehnung von Höhlensystemen begründete. Außerdem schrieb er, dass Wasser bei Erreichen des Karstwasserspiegels kalkgesättigt sein sollte. Da dies die vielen horizontal angelegten Höhlensysteme der USA nicht erklärte, suchte THRAILKILL nach einem Mechanismus, der die Kalkaggressivität des unterirdischen Wassers erneuert, nachdem es den Karstwasserspiegel gesättigt erreicht.

Zur Erklärung dieser Frage schlug BÖGLI bereits 1964 die Mischungskorrosion vor. THRAILKILL konnte zeigen, dass durch diesen Prozess in einer Zeit von etwa 100 000 Jahren in einem Einzugsgebiet von etwa 1 km² ein Höhlengang von 1 m Durchmesser und 500 m Länge entstehen kann. Um die komplexen Höhlensysteme der Alpen und des Dinarischen Karstes zu verstehen, wendete DREYBRODT ebenfalls das Prinzip der Mischungskorrosion an. Er kam zu dem Ergebnis, dass beim Zusammenfluss gesättigter Wässer in Kluftkreuzungen durch Mischungskorrosion Kanäle von 1 mm Durchmesser in einigen Tausend Jahren entstehen können (DREYBRODT 1990, S.49).

2.3.6 Die Bedeutung der unterschiedlichen Korrosionsarten für die Höhlenbildung

(nach BÖGLI 1978, S.39-47)

In deutschen Kalkkarstgebieten ist der überwiegende Anteil an der Höhlenbildung der Normal- und Mischungskorrosion zuzuschreiben.

Die Normalkorrosion ist abhängig vom CO_2 der atmosphärischen bzw. Bodenluft. Das bedeutet, sie ist begrenzt oder verhindert durch die Abwesenheit von Luft in der phreatischen Zone und in engen Primärfugen, die zu Beginn der Verkarstung die nahezu einzigen Wasserwege sind, und durch das Erreichen des $\text{CO}_2 / \text{CaCO}_3$ -Gleichgewichtes.

Mischungskorrosion tritt überall da auf, wo zwei verschiedene Wässer sich mischen, also im Unterschied zur Normalkorrosion im gesamten Karst, an der Oberfläche ebenso wie in den tiefsten Teilen des phreatischen Raumes.

Abgesehen von Sonderfällen ist die Mischungskorrosion pro Volumeneinheit gemessen bedeutend weniger wirksam als die Normalkorrosion. Sie reagiert aber noch unter Bedingungen, unter den die anderen Korrosionsformen keine Wirkungsmöglichkeiten mehr haben, vor allem in den Primärfugen und im phreatischen Raum.

Die Abkühlungskorrosion beschränkt sich auf die obersten Meter des Gesteins, da sie an Zonen mit starken thermischen Schwankungen gebunden ist. Im Vergleich mit der Mischungskorrosion ist ihre Wirksamkeit im Allgemeinen geringer (BÖGLI 1978, S.39).

Die Korrosionsfähigkeit von **Thermalwässern** steigt auf hohe Werte an, da bei der Abkühlung gelegentlich enorme Kohlendioxid-Mengen frei werden. (BÖGLI 1978, S.40)

Die Bildung von CO_2 durch Siderit-Verwitterung führt zu Hohlraumbildung um die Sideritlager. Dabei können zwar größere Räume entstehen, insgesamt ist die Siderit-Verwitterung aber ohne große Bedeutung für die Höhlenbildung, da solche Sideritlager selten sind. Die einzige heute zugängliche Höhle dieser Art ist die Iberger Tropfsteinhöhle bei Bad Grund im Harz (KEMPE 1997, S.21).

3 Grundlagen der Speläogenese

3.1 Rahmenbedingungen für die Lage und Verbreitung von Karsthöhlen

Die Entstehung einer Karstlandschaft ist zunächst grundsätzlich gebunden an die Existenz von löslichem Gestein und an das Vorhandensein von korrosionsfähigem Wasser. Ob und wie stark es unter diesen Voraussetzungen tatsächlich zur Verkarstung kommt, hängt von weiteren Rahmenbedingungen ab. Um die Entstehung von Höhlen nachvollziehen zu können, müssen diese Bedingungen möglichst genau abgeklärt werden.

Tektonik

Eine der Voraussetzungen für die Hohlraumbildung ist die Klüftigkeit des Gesteins. Ein Trennflächengefüge kann aus Klüften, Schichtfugen und Verwerfungen bestehen.

Kompakter Kalkstein ist praktisch für Wasser undurchlässig. Da er aber spröde ist, führen auch kleine tektonische Beanspruchungen zur Bildung von Klüften (BÖGLI 1978, S.10). In jedem Gesteinsverband haben die Klüfte eine charakteristische Richtung. In Deutschland sind zwei Kluftrichtungen besonders häufig: NNO-SSW und SO-NW, die sogenannte rheinische und herzyne Richtung (KEMPE 1997, S.21). Die Dichte und Anordnung der Klüfte ist entscheidend für die tiefgreifende Verkarstung und unterirdische Entwässerung. Schichtfugen entstehen bereits bei der Gesteinsbildung. Sie liegen im Normalfall waagrecht, können aber durch Auffaltungsvorgänge verstellt werden. Verwerfungen sind Trennflächen, an denen die Schichtpakete gegeneinander verschoben wurden (KEMPE 1997, S.22).

Stratigraphie

Auch die Stratigraphie des Gesteins ist von wesentlicher Bedeutung. Massige Kalke verhalten sich gegenüber der Korrosion anders als die von Schichtfugen durchsetzten gebankten Kalke. In mächtigen Kalksteinen ist die hydrologische Situation anders als in nur gering ausgebildeten Vorkommen (MORELL 1990, S.4).

Petrographie

Die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Gesteins ist aus verschiedenen Gründen Ursache für Verkarstung und Höhlenbildung. Die Reinheit des Kalkes spielt eine große Rolle für dessen Auflösung, ein zu hoher Anteil an nichtlöslichen Bestandteilen führt nach einer anfänglichen Korrosion zur Abdichtung des Gesteins und Verfüllung der wasserwegsameren Klüfte. Dadurch wird die Verkarstung beeinträchtigt.

tigt oder völlig gestoppt. Verkarstungsfähig sind Kalke mit mindestens 60% Karbonat, eine deutliche Verkarstung zeigt sich aber erst bei Gesteinen mit über 90% CaCO₃-Gehalt.

Eine enge Verbindung besteht zwischen den tektonischen und den petrographischen Gegebenheiten. Je reiner der Kalk ausgeprägt ist, desto stärker reagiert er auf tektonische Beanspruchung (MORELL 1990, S.4).

Klima

Entscheidend für die Ausprägung der Verkarstung und Höhlenbildung ist das regionale Klima. Unter tropischem Klima ist z.B. eine besonders intensive Korrosion möglich, während sie bei Permafrost weitgehend verhindert wird. In den gemäßigten Breiten führen Unterschiede in Menge und Intensität der Niederschläge sowie den Temperaturwerten zur Ausbildung unterschiedlicher Karstlandschafts- und Höhlentypen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass besonders die Klimaentwicklung im Laufe der Erdgeschichte die Karstregion prägte. Direkte Auswirkungen des Klimas sind die Boden- und Vegetationsbedeckung, die durch ihren Gehalt an Kohlendioxid und Humussäuren die Korrosion erheblich steigern können (MORELL 1990, S.4).

Morphologie

Eine notwendige Voraussetzung für die Verkarstung ist die Möglichkeit der Wasserzirkulation im Gestein, die durch ein hydraulisches Gefälle gegeben ist (KRAUTHAUSEN 1994, S.23). Meist bedeutet dies einen Höhenunterschied zwischen der Gesteinsoberfläche und dem Vorfluter. Ein Höhenunterschied wird durch epirogenetische Hebungsvorgänge oder / und durch Tieferlegung des Vorfluters erreicht (MORELL 1990, S.4).

Der Tiefe der Verkarstung ist theoretisch keine Grenze gesetzt, sofern nur ein Druck vorhanden ist, der das Wasser bewegt (BÖGLI 1978, S.75).

3.2 Speläogenese

Speläogenese ist nach Definition „die Gesamtheit aller Prozesse, welche die Entstehung und Entwicklung natürlicher unterirdischer Hohlräume bewirken“ (BÖGLI 1978, S.206). Diese Prozesse umfassen die Vorgänge der Korrosion, Erosion und Inkasion. Zum Verständnis der Korrosion sei auf Kapitel 3.3 verwiesen. Unter Erosion wird in der Speläologie die mechanische Tätigkeit des fließenden Wassers verstanden (TRIMMEL 1968, S.19). Ihr Anteil an der Raumbildung in Karsthöhlen ist um-

stritten. Inkasion bedeutet das natürliche Nachbrechen aus Decken und Wänden. Auf sie wird in Kapitel 4.2.3 näher eingegangen.

3.2.1 Die Phasen der Hohlraumentwicklung

Der Werdegang von Hohlräumen im Karst lässt sich in verschiedene Entwicklungsstufen unterteilen. Für die einzelnen Phasen finden sich in der Literatur unterschiedliche Bezeichnungen, ebenso werden häufig weniger Phasen unterschieden. BÖGLI (1978, S.218) nimmt folgende schematische Gliederung vor:

- a) Vorphase: Das Gestein verharrt im gegebenen Zustand; seine Hohlräume sind wassererfüllt, und es ändert sich nichts.
- b) Initialphase: Der Vorfluter hat eine solche Lage erreicht, dass in den Fugen ein Druckgefälle entsteht. Das Wasser bewegt sich, womit die Erweiterung der Fugen einsetzt. Es herrschen phreatische Bedingungen.
- c) Jugendphase: Das Wasser fließt schneller, zur Korrosion gesellt sich die Erosion. Die unterirdischen Hohlräume entwickeln sich zur Höhlengröße im Sinne der Höhlendefinition. Spannungsablösungen (Bergschlag) kommen vor, doch fehlen andere Inkasionserscheinungen.
- d) Reife: Die Querschnitte nehmen weiter zu bis zu den ersten Anzeichen der Inkasion mit vereinzelt Deckenbrüchen. Korrosion und Erosion in wechselnden Verhältnissen. Phreatisch und/oder vados.
- e) Altersstadium: Inkasion, vor allem Deckenbrüche, tritt allgemein auf. Überdeckung und Zerstörung der Reifeformen. Klüfte treten physiognomisch in den Vordergrund (fiktive Kluftgänge). Gewöhnlich vados und meist inaktiv, selten phreatisch.
- f) Greisenalter: Die Höhle zerfällt.

Ein Höhlensystem setzt sich in der Regel aus Höhlenräumen zusammen, die verschiedene Entwicklungsstufen erreichen und häufig auch verschiedenes Alter haben.

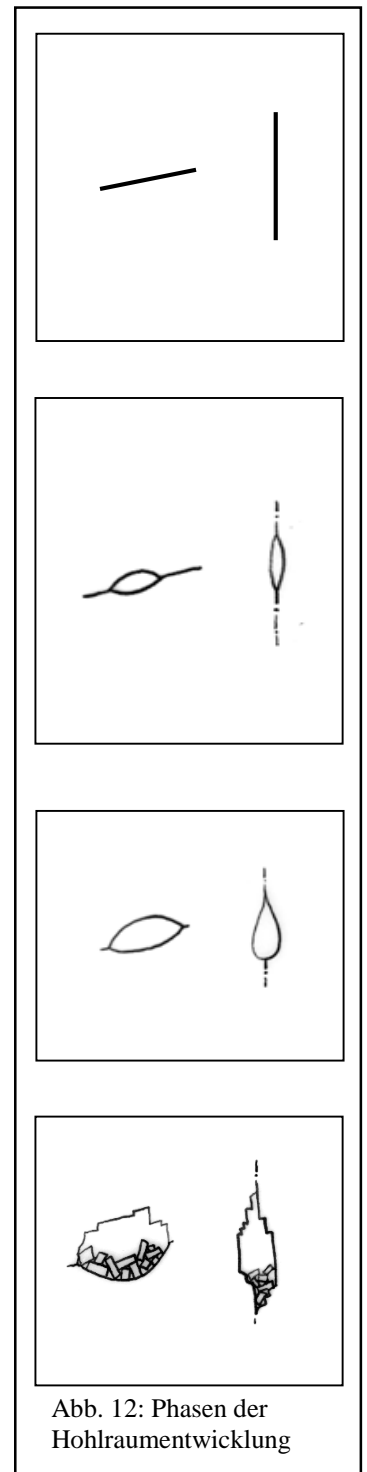


Abb. 12: Phasen der Hohlraumentwicklung

3.2.2 Die Entstehung bestimmter Höhlentypen

Es gibt kein für alle Höhlen gültiges Entstehungsmuster, da viele unterschiedliche Faktoren die Entwicklung beeinflussen. Man spricht von Polykausalität.

Den Charakter einer entstehenden Höhle legen einerseits die primäre Anlage von Klüften und Schichtfugen, andererseits die hydraulischen Bedingungen des eintretenden Wassers fest. Die spätere Entwicklung bestimmter Raumformen wird auch durch andere Faktoren bestimmt. Hierauf wird in Kapitel 3.6 ausführlicher eingegangen.

Das Klufnetz eines Gesteinskörpers legt die Lage, Richtung und mögliche Ausdehnung einer Höhle fest, da das Wasser nur an Trennflächen in den Untergrund eindringen und Hohlräume schaffen kann.

Für die räumliche Ausprägung der Hohlräume ist die Lösungskinetik¹ ausschlaggebend.

Lange Höhlengänge entwickeln sich bei einer langsamen Lösungskinetik. In diesem Fall erweitern sich die Klüfte im vorderen Bereich schnell, nach einer kurzen Strecke sehr langsam. Der Grund hierfür ist, dass sich die Lösungskinetik ändert, wenn dem Wasser kein zusätzliches Kohlendioxid zugeführt wird. Zwischen 0 und 75% Sättigung ist das Verhältnis zwischen Sättigung und Abtrag linear, zwischen 75 und 100%

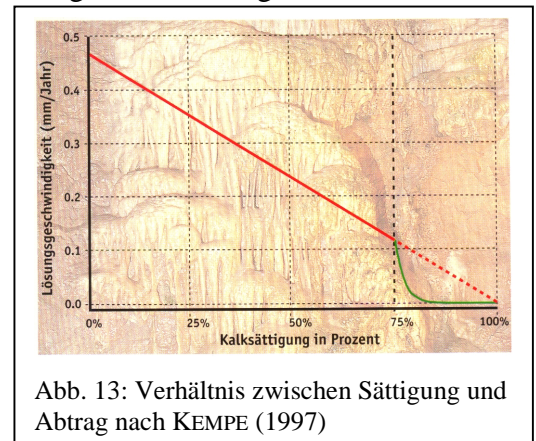


Abb. 13: Verhältnis zwischen Sättigung und Abtrag nach KEMPE (1997)

fällt die Lösungsgeschwindigkeit dramatisch ab (KEMPE, DREYBRODT 1997, S.23).

Dadurch kann die Lösungskraft noch über Distanzen von vielen Kilometern behalten werden. Die Aufweitung der Wasserwege bewirkt eine Erhöhung der Durchflussmenge, wodurch wiederum die Eindringtiefe der schnellen Kinetik vergrößert wird. So setzt ein selbstbeschleunigender Regelkreis ein. In dem Moment, in dem der Bereich der schnellen Kinetik mit seinen großen Aufweitungsraten die Quelle erreicht, erhöht sich die durchfließende Wassermenge stark. In der weiteren Entwicklung weitet sich die Fuge gleichmäßig mit einer Rate von 10^{-2} cm/Jahr bis zu 10^{-1} cm/Jahr (DREYBRODT 1990, S.78). Da die Aufweitungsraten ab dem Durchbruch exponentiell

¹ Geschwindigkeit des Korrosionsprozesses

ansteigt, haben nur solche Klüfte eine Chance zur Entwicklung eines Höhlenraumes, die bereits primär, d.h. vor Einsetzen der Verkarstung, etwas weiter waren als die umgebenden Klüfte. Als Grenzwert wird in der Literatur 0,1 mm angegeben (PAVUZA 1994, S.42). Örtliche Aufweitung der Gänge zu Höhlenräumen geschieht meist zunächst an Klufthkreuzungen durch Mischungskorrosion.

Die Erweiterung der Klüfte zu Höhlengängen erfolgt überwiegend unter phreatischen Bedingungen. In der vadosen Zone können offene Röhren und Schächte dort entstehen, wo Wasser in großen Mengen konzentriert in die Tiefe fließt (AHNERT 1996, S.322).

Da die Höhlenbildung im Bereich des Karstwasserspiegels am größten ist, spielen Veränderungen des Vorfluters eine entscheidende Rolle für die Entwicklung von Höhlen. Je länger der Vorfluter seine Höhenlage beibehält, d.h. nicht in die Tiefe erodiert, desto länger bleibt die Lage des Karstwasserspiegels stabil und desto größer und ausgeprägter kann ein Höhlensystem werden, das sich in dieser Zone entwickelt. Wenn der Fluss sich eintieft, sinkt die Karstwasserfläche ebenfalls ab und mit ihr die Zone der Grundwasserschwankungen. Dann hört die weitere Hohlraumbildung auf dem bisherigen Niveau auf. Eine neue Unterbrechung der Tiefenerosion des Vorfluters ermöglicht, wenn sie lange genug anhält, die Entwicklung eines weiteren Höhlenniveaus in Anpassung an diese neue Höhenlage (AHNERT 1996, S.323). Große Karsthöhlen bestehen häufig aus mehreren Stockwerken von Höhlengängen, die jeweils im Zusammenhang mit früheren Stillständen in der Höhenlage des Vorfluters entstanden sind. Zwischen diesen Stockwerken stellen meist nur enge, an Klufthkreuzungen gebundene Röhren und Schächte eine Verbindung her, weil der Karstwasserspiegel nicht lange in diesen Zwischenhöhen lag.

Reine phreatische Höhlen besitzen keine Stockwerke.

Wenn Wasser unter vadosen Bedingungen durch einen Gesteinskörper fließt, verhält es sich wie ein Oberflächengewässer und folgt der Schwerkraft. Es wird nicht wie das Wasser der phreatischen Zone unter Druck bewegt.

Bögli gliedert die Karsthöhlen aufgrund der hydrologischen Verhältnisse während der Entstehungsphase in phreatische, primär vadoso und sekundär vadoso Höhlen, die bestimmte Merkmale aufweisen.

Phreatisch entstandene Höhlen sind entlang Schichtfugen entstanden und horizontal netzförmig ausgedehnt. Gefälle und Gegengefälle wechseln ab. Typisch sind hydrisch geformte Gangdecken.

Primär vadose Höhlen folgen Klüften, das Gefälle ist gleichsinnig und ohne Gegensteigungen im Anstehenden. Diese Höhlensysteme sind entweder einfach oder ästig, Zwischenverbindungen sind selten und rein zufällig. Die Gangform ist hoch und schmal.

Sekundär vadose Höhlen sind unter phreatischen Bedingungen entstanden, fielen aber trocken und entwickelten sich unter vadosen Bedingungen weiter. Zubringer verlaufen weniger steil als bei primär vadoser Bildung. Durch die aus der phreatischen Phase stammenden Gegensteigungen bilden sich häufig Siphone² (BÖGLI, 1978, S.213, 214).

3.2.3 Inkasion

(nach BÖGLI, S.147-153)

Inkasion setzt meist im Reifestadium von Höhlen ein, besonders im Altersstadium spielt sie eine große Rolle. Der Zeitpunkt, wann die Inkasion einsetzt, hängt von felsmechanischen Eigenschaften und von der tektonischen Beanspruchung des umgebenden Gesteins ab. Wenn der Gebirgsdruck oder das Gewicht von Gesteinsanteilen in der Decke die örtliche Festigkeit des Gesteins überschreitet, ist das Nachbrechen aus Decken und Wänden die Folge.

Inkasion trägt zunächst nicht zur Raumvergrößerung bei, da sich der Blockschutt auf der Sohle des Hohlraumes sammelt. Raumvergrößernde Wirkung erhält die Inkasion erst in Kombination mit der Korrosion und Erosion. Blöcke, die ins Wasser fallen, werden aufgelöst oder erodiert, so können sich Hohlräume nach oben entwickeln.

3.3 Speläomorphologie

Speläomorphologie ist „höhlenbezogene Formenlehre, ist Beschreibung und Deutung der durch Korrosion, Erosion und Inkasion entstandenen Abtragungsformen“ (BÖGLI 1978, S.154). Die Formen werden unterteilt in Großformen, welche Gänge und Räume umfassen, und in Kleinformen, die sich auf den Oberflächen der Großformen entwickelt haben.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Formen und deren Entstehung erläutert (nach BÖGLI 1978, S.155-165, ergänzt nach KEMPE, DREYBRODT 1997, S.24-28).

² Abschnitt eines Höhlenganges, in dem die Höhlendecke so weit absinkt, dass sie in den festen (Höhlensedimente) oder flüssigen Höhleninhalt (Wasser) eintaucht (TRIMMEL 1965, S.88)

3.3.1 Großformen

Gänge sind „annähernd horizontal oder mäßig steil verlaufende Höhlenstrecken“ (BÖGLI 1978, S.155). Sie werden nach ihrem Querschnitt weiter unterteilt.

Ellipsengänge sind an Schichtfugen angelegt und haben einen linsenförmigen Querschnitt. Der Ellipsengang ist eine Leitform für phreatische Entstehung

und bei einem weitgehend symmetrischen Querschnitt auch typisch für die Mischungskorrosion. Ist die Wölbung an der Decke wesentlich stärker, so war Inkasion an der Raumbildung beteiligt. Eine stärkere Wölbung der Gangsohle weist auf Erosion hin.

Sackgänge beginnen unvermittelt mit einem halbrunden Raum, der meist als Ellipsengang in Richtung des wegfließenden Wassers weiterführt. Am Anfang des

Ganges gibt es nur kleine Wasserzuführungen von wenigen Zentimetern Größe.

Rechteckgänge entstehen an nahezu horizontal gelagerten Schichtfugen, meist in geringer Tiefe. Sie können sowohl phreatisch als auch vados gebildet werden, sind aber immer mit Inkasion verbunden.

Dreieckgänge entstehen durch natürliche Konvektion (KEMPE, DREYBRODT 1997, S.28). In phreatischen Gängen, in denen das Wasser nur sehr langsam fließt, kann die Lösung selbst die Wasserbewegung bewirken. An den Wänden entsteht ein dünner Wasserfilm, der aufgrund der höheren Ionenkonzentration eine höhere Dichte aufweist. Er gleitet an den Wänden nach unten. Daher ist die Lösungskraft in den oberen

Gangbereichen größer, und es bildet sich ein auf der Spitze stehendes Dreieck als Profil. Die Wände sind glatt und besitzen häufig Winkel von ungefähr 45 Grad, die sogenannten Laugfacetten. Die Decke wird eben und kann große Spannweiten entwickeln. Bei

sehr langsamer Konvektion wölbt sie sich zu großen Lösungskolken.

Schluchtgänge (Canyons) können sowohl an Schichtfugen als auch an Klüften entstehen, indem sich ein Gerinne unter vadosen Bedingungen eintieft. Sie haben viele gemeinsame Merkmale mit den oberirdischen Fließgewässern, vor allem können

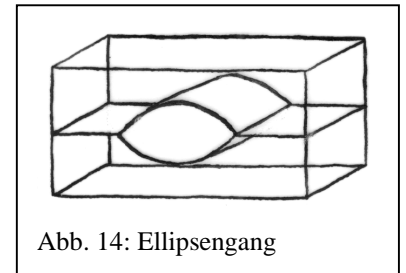


Abb. 14: Ellipsengang

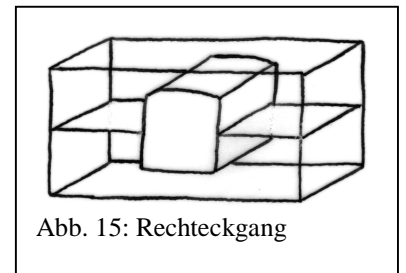


Abb. 15: Rechteckgang

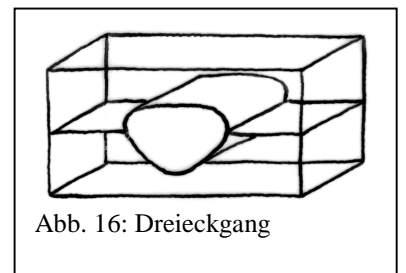


Abb. 16: Dreieckgang

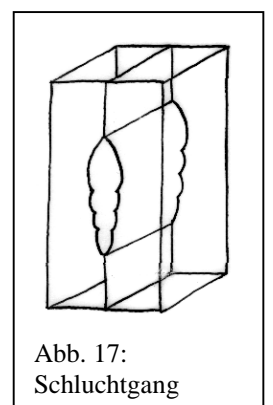


Abb. 17:
Schluchtgang

sie mäandrieren. In Canyons bilden sich häufig kleine Wasserfälle an wasserwegsaamen Klüften oder Verwerfungen, an denen das Wasser zur nächst tieferen Schichtstufe fällt (KEMPE, DREYBRODT 1997, S.26).

Schlüssellochprofilgänge entstehen sekundär aus einem Ellipsen- oder Rechteckgang. Wenn ein solcher Gang unter vadosen Bedingungen weiterhin Wasser führt, schneidet sich das Gerinne ein und bildet ein Canyon. Überwiegt der Canyon gegenüber dem ursprünglichen Gang, so ist hier der Begriff Schluchtgang vorzuziehen.

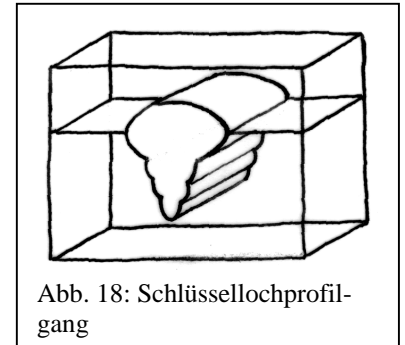


Abb. 18: Schlüssellochprofilgang

Kluftgänge sind an Klüften entstanden und immer höher als breit. Sie können sowohl phreatisch als auch vados entstehen, wodurch unterschiedliche Typen vorkommen. Unter phreatischen Bedingungen entstehen steil gestellte Ellipsen, die häufig nach oben in eine Kluft übergehen. Unter vadosen Bedingungen bilden sich spaltenförmige Gänge, die sehr hoch werden können.

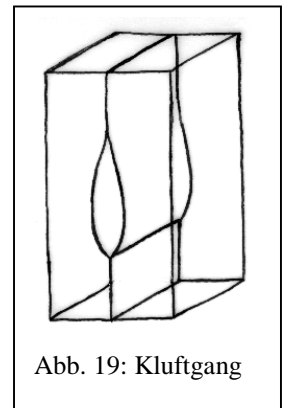


Abb. 19: Kluftgang

Wirbelkanalgänge beginnen im Bereich des einstigen Karstwasserspiegels. Dort, wo ein frei fließendes Gerinne ins Druckfließen übergeht, kann es bei schnellem Fließen beträchtliche Luftmengen einschließen und mit in die Tiefe reißen. Bei steileren Gängen bildet sich an der Oberfläche ein Wasserwirbel,

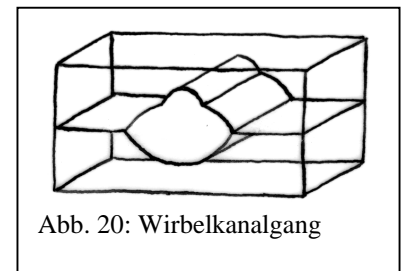


Abb. 20: Wirbelkanalgang

durch den Luft nachgesaugt wird. In den Luftblasen an der Decke nimmt der Druck um den Wasserdruck zu, wodurch es in der Luft zu einem CO_2 -Überschuss kommt. Die übersättigte Luft hat in Verbindung mit dem Wasser eine hohe Korrosionskraft und bildet den Wirbelkanal.

Hallen sind große Räume mit flacher, niedriger Decke. Sie bilden sich in dickbankigen, tektonisch wenig beanspruchten Gesteinen.

Dome sind große Räume mit hoch gewölbter Decke und bilden sich in dünnbankigen und / oder tektonisch stärker beanspruchten Gesteinen. Dome mit einem glockenförmigen Aufriss werden als Glockenhöhlen bezeichnet. An der Raumbildung von Hallen und Domen ist in großem Maß Inkasion beteiligt. Dadurch weisen diese Räume häufig große Mengen Blockschutt auf. Viele Dome haben oben eine Schachtfortset-

zung. Diese Schächte können die Primärform gewesen sein, aus der durch Unterschneidung und Inkasion eine Raumweitung stattgefunden hat.

Schächte entstehen an Klüften oder an steil stehenden Schichtfugen. Sie können sowohl phreatisch als auch vados entstanden sein, und alle drei Formungsfaktoren können bei der Schachtentstehung mitwirken. Im Allgemeinen bilden sich Schächte durch sich abwärts bewegendes Wasser, die Bildung durch aufsteigendes Wasser ist aber auch möglich. Schächte können nach ihrer Entstehung unterschieden werden:

- tektonische Schächte entstehen durch Erweiterung von Klüften und steil stehenden Schichtfugen.
- Einsturzschächte entstehen durch den Einsturz unterirdischer Hohlräume.
- Schluckschächte sind durch einfließendes Wasser entstanden. Im nackten Karst wachsen Sickerstellen häufig von unten als Schacht empor, da das ungesättigte Wasser beim Einsickern in den Hohlraum Kohlendioxid aufnimmt und die Decke korrodiert. Solche Schächte enden oben blind (KEMPE, DREYBRODT 1997, S.27).
- Quellschächte haben sich durch aufquellendes Wasser gebildet.
- Piezometerschächte werden durch die Schwankungen des Karstwasserspiegels in der Hochwasserzone geschaffen.
- Hydrothermal entstandene Schächte.

3.3.2 Kleinformen

Kleinformen sind vor allem an der Decke und an den Seitenwänden, seltener an der Gangsohle zu finden. Sie werden fast ausschließlich durch Korrosion gebildet.

Höhlenkarren sind reine Korrosionsformen. Deckenkarren entstehen unter phreatischen Bedingungen entweder verschlungen oder als Einzelstränge, die sog. Deckenrinnen. Durch Kondenswassertropfen entstehen an der Höhlendecke Deckengrübchen. Abfließendes Kondenswasser bildet auf steilen Flächen Höhlenrillen, wenig tiefe und dicht aneinandergereihte Karren. Wenn Tropfwasser auf wenig geneigten Oberflächen zusammenfließt, bilden sich Höhlenrinnen, sie entsprechen den oberirdischen Mäanderkarren.

Aus Schichtfugen oder Klüften austretendes Wasser ist ungesättigt, es nimmt sofort CO₂ aus der Höhlenluft auf und korrodiert große Höhlenrinnen, die unmittelbar an der Austrittsstelle beginnen.

Kolke entstehen durch Korrosion und Erosion. Korrosionskolke (Decken- und Wandkolke, auch Mischungskorrosionskolke genannt) treten an Decken und Seitenwänden auf, wo Wasser aus Fugen austritt. Sie bilden sich unter phreatischen Bedingungen. Ausnahmsweise bilden sich auch Kolke unter vadosen Bedingungen durch Normalkorrosion. Sie weisen zusätzliche Korrosionsrinnen auf, wodurch sie sich von den Mischungskorrosionskolken unterscheiden.

Auf der Gangsohle sind Korrosionskolke selten. Wenn jedoch kalkarmes Tropfwasser die Sohle angreift, entstehen auch hier Kolke. Sie bilden sich nur unter vadosen Bedingungen. Hierbei ist die Erosion mit einem hohen Anteil beteiligt.

Erosionskolke entstehen durch stationäre, mit Sand und Kies beladene Wasserwirbel. Diese oft zu Röhren entwickelten Kolke befinden sich meist hinter Engstellen, wo große Fließgeschwindigkeiten herrschen.

Fließfacetten sind Formen, die durch die Turbulenzwirbel des über den Kalk wegfließenden Wassers entstanden sind. Sie kommen an der Gangsohle, den Wänden und der Decke vor. Jede der 5-25 cm breiten Facetten weist eine steile

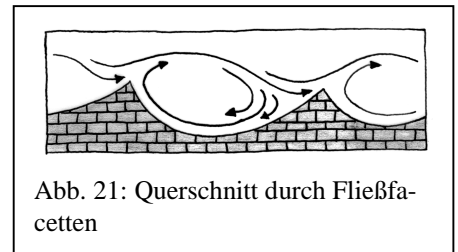


Abb. 21: Querschnitt durch Fließfacetten

und eine flachere Seite auf. Die steile Seite weist in die Richtung des wegfließenden Wassers. Durch die Fließfacetten lassen sich genaue Aussagen über die letzten Entstehungsphasen von Höhlen bzw. Höhlenteilen machen, da man über sie die Geschwindigkeit und Richtung des unterirdischen Wassers berechnen kann (KEMPE, DREYBRODT 1997, S.25-28).

3.4 Höhlensedimente

Im Endokarst findet außer Lösung auch Ablagerung statt, welche vor allem die Hohlräume der vadosen Zone verändert. Unter dem Begriff Höhlensedimente werden Ablagerungen, Ausscheidungen und Mineralneubildungen zusammengefasst. Es gibt, wie auch an der Erdoberfläche, klastische, organische und chemische Sedimente (BÖGLI 1978, S.169).

Klastische Sedimente

Am Höhlenboden liegt gewöhnlich **Höhlenlehm**, eine feinkörnige Ablagerung aus den unlöslichen Resten des Kalksteins. In Gerinnen findet sich mitunter **Sand** und **Kies**, der durch Reibung entstanden ist oder von der Oberfläche eingespült wurde.

Besonders in älteren Höhlenteilen findet sich häufig **Blockschutt**, der durch Inkasivonsvorgänge entstand (AHNERT 1996, S.324).

Organische Sedimente

Organische Sedimente sind in Höhlen „solche, die entweder direkt aus organischen Substanzen entstanden sind, z.B. Guano, oder solche, die ihre auffallenden Kennzeichen durch organische Beimengungen und ihre Folgeprodukte erhalten haben, z.B. Knochenbrekzien“ (BÖGLI 1978, S.181). Darunter fallen **phytogene Sedimente**, die aus Pflanzenresten entstanden sind, **koprogene Sedimente** (aus Exkrementen entstandene Sedimente wie Fledermausguano und Nitraterden) und **Höhlenphosphate**, die ebenfalls tierischen Überresten entstammen (BÖGLI 1978, S.181, 182).

Chemische Sedimente

Unter die chemischen Sedimente fallen **Kalkablagerungen** und andere Mineralien. Jeder CO₂-Entzug führt in einer Gleichgewichtslösung zur Übersättigung und damit zu einer Kalkausfällung. Dabei findet der umgekehrte Vorgang der Kalklösung statt: $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \downarrow$. Der in der Höhle als Sinter ausfallende Kalk kristallisiert als Calzit, CaCO₃. Es ist ein farbloses Mineral, das lediglich durch winzige Beimengungen anderer Minerale gefärbt werden kann (KEMPE 1985, S.26). In Höhlen des subkutanen Karstes wird Kalk in Form von Sinter ausgefällt, wenn Sickerwasser aus Fugen in Höhlenräume tropft. Das Wasser gibt Kalk ab, da der CO₂-Druck der Bodenluft bei Pflanzenbedeckung höher ist als der Druck der Höhlenluft. Auch Turbulenzen und der Fließvorgang an Stromschnellen und Wasserfällen führen zum CO₂-Entzug und somit zur Sinterbildung. Sinter tritt in verschiedenen Formen auf, z.B. Tropfsteinen, Sinterfahnen, Sinterbecken, Sinterkrusten und Sinterperlen. Anhand von Versinterungen in Höhlen können wichtige Aussagen über die Entstehung von Höhlen, über die Hydrologie, die Entwicklung des Klimas im Gebiet u.a. gemacht werden. Diese Aspekte sind jedoch für die vorliegende Arbeit zu weitgreifend, so dass dieser kurze Einblick in das Thema ausreichen muss.

Höhlenminerale entstehen immer nach der Höhlenbildung. Sie bilden sich teils aus dem Gestein durch Auflösung und erneutes Auskristallisieren, teils aus Höhlenseen.