

Merkblätter A – Höhlenbefahrung

Persönliche Ausrüstung

A1 a,b	Bekleidung (<i>Sulzbacher</i>)
A2 a,b	Beleuchtung (<i>Sulzbacher & Plan</i>)
A3 a	Gurtzeug (<i>Sulzbacher</i>)
A4 a,b	Abseilgeräte und Steigzeug (<i>Sulzbacher</i>)
A5 a	Schleifsäcke (<i>Sulzbacher</i>)
A6	Verpflegung

Gemeinschaftsausrüstung

A10 a	Seile (<i>Plan & Resch</i>)
A11	Bandschlingen, Repschnüre etc.
A12	Karabiner, Schraubglieder etc.
A13	Laschen (<i>Berghold-Markom</i>)
A14 a	Klemmkeile, Haken und Cliffhanger (<i>Sulzbacher & Herrmann</i>)

Befahrungstechnik-Grundwissen

A20 a	Schachtbefahrung (<i>Sulzbacher</i>)
A21 a-e	Seilknoten (<i>Berghold-Markom & Sulzbacher</i>)
A22 a-j	Seilbefestigung (<i>Berghold-Markom</i>)
A23 a-m	Abseilen und Aufsteigen am Seil (<i>Berghold-Markom</i>)
A24	Klettertechniken in Höhlen
A25	Schlotklettern
A26 a,b	Schließen (<i>Herrmann</i>)
A27 a,b	Biwakieren in Höhlen (<i>Knobloch</i>)
A28	Befahrung von Wasserhöhlen

Befahrungstechnik-Know-how

A40 a-c	Planung von Höhlentouren (<i>Wielander</i>)
A41	Planung von Forschungseinsätzen
A42 a,b	Umweltschonende Höhlenbefahrung (<i>Herrmann</i>)
A43 a-c	Behelfsmäßige Befahrungsmethoden (<i>Berghold</i>)
A44 a	Risikoprävention: „Spielregeln“ (<i>Herrmann</i>)
A45 a-c	Risikoprävention: natürliche Risiken (<i>Herrmann</i>)
A46 a-c	Risikoprävention: persönliche Risiken (<i>Herrmann</i>)
A47	Risikoprävention: Notfallausrüstung
A48	Notfallmaßnahmen: Erste Hilfe
A49	Notfallmaßnahmen: Sofortmaßnahmen
A50 a,c	Behelfsmäßige Kameradenrettung (<i>Hofmann & Gsenger</i>)
A51	Flaschenzüge
A52 a	Lotung von Schachttiefen (<i>Herrmann</i>)
A53 a	Leichtausrüstung (<i>Berghold & Herrmann</i>)
A54 a,b	AS Verankerung (<i>Herrmann</i>)

Merkblätter B – Höhlendokumentation

B1 a Grundelemente der Höhlendokumentation (*Herrmann*)

Prospektion, Daten- und Arbeitsgrundlagen

B2 a,b Das Österreichische Höhlenverzeichnis (*Stummer & Herrmann*)
B3 Der Höhlenkataster
B4 Katasterdatenbanken
B5 a,b Aufnahme einer Höhle in den Kataster (*Plan & Stummer*)
B6 a-d Nummerierung von Höhlen (*Plan*)
B7 a-d Systematische Prospektion im Gelände (*Herrmann*)
B8 Hilfsmittel Landkarte
B9 a Kartenprojektionen (*Stummer*)
B10 Koordinatensysteme
B11 Geländedarstellung in Landkarten
B12 Hilfsmittel Karstgefährdungskarte
B13 Hilfsmittel Luftbild/Orthofoto
B14 Archive, Sammlungen und Datenaustausch

Vermessung

B20 a Methoden zur Lageermittlung (*Herrmann*)
B21 a-e Lageermittlung mit GPS (*Neugebauer*)
B22 a,b Höhenermittlung von Höhleneingängen (*Herrmann*)
B23 a Geodätische Lageermittlung (*Stummer*)
B24 a,b Die Angabe der Lagegenauigkeit (*Plan*)
B25 Unterschiedliche Nordrichtungen (*Herrmann, Plan & Stummer*)
B26 a,b Die Höhlenvermessung (*Stummer, Herrmann & Plan*)
B27 Gebräuchliche Messgeräte (*Herrmann*)
B28 a,b Der Polygonzug (*Herrmann & Stummer*)
B29 a-c Systematische Bezeichnung der Messpunkte (*Behm & Herrmann*)
B30 a,b Das Messprotokoll (*Herrmann & Plan*)
B31 a Arbeitsweise der Messgruppe (*Herrmann*)
B32 a-c Tipps und Tricks für eine genaue Vermessung (*Straka*)
B33 EDV-gestützte Messdatenauswertung
B34 a-d Genauigkeit von Höhlenplänen (*Häuselmann*)

Plandarstellung

B40 a	Grundriss, Längsschnitt, Aufriss und Profile (<i>Plan</i>)
B41 a,b	Die Grundausrüstung des Höhlenplanes (<i>Stummer & Herrmann</i>)
B42 a,b	Gebräuchliche Darstellungsmaßstäbe (<i>Herrmann & Plan</i>)
B43 a	Höhlenplansignaturen (<i>Plan</i>)
B44 a-c	Schachtdarstellung in Höhlengrundrissen (<i>Herrmann</i>)
B45 a	Nordpfeile für Höhlenpläne (<i>Herrmann</i>)
B46 a	Maßstabsleisten für Höhlenpläne (<i>Herrmann</i>)
B47 a-c	Die Entwurfszeichnung in der Höhle (<i>Herrmann</i>)
B48 a-d	Übertragung vom Entwurf zum Plan per Hand (<i>Herrmann</i>)
B49 a-c	Übertragung vom Entwurf zum Plan am Computer (<i>Klampfer</i>)
B50	Händisches Planzeichnen
B51 a-d	Planzeichnen am Computer (<i>Klampfer</i>)
B52 a,b	Generalisierung von Höhlenplänen (<i>Herrmann</i>)
B53	Begriffe der Höhlenkartographie
B54	Gebräuchliche Darstellungsmethoden v. Höhlensystemen
B55	GIS in der Höhlenkunde

Schriftliche Höhlendokumentation

B60 a,b	Prägung von Höhlennamen (<i>Pfarr</i>)
B61 a	Schreibung von Höhlennamen (<i>Pfarr</i>)
B62 a	Inhalt von Forschungsberichten (<i>Herrmann</i>)
B63 a	Abfassung von Raumbeschreibungen (<i>Herrmann & Pfarr</i>)

Bildliche Höhlendokumentation

B70 a-c	Dokumentarische Höhlenfotografie (Herrmann)
B71 a-d	Filmen in Höhlen (<i>Zadrobilek & Wimmer</i>)

Merkblätter C – Wissenschaftliche Höhlenkunde

Speläologie und Karstkunde

C1 a	Speläologie - Höhlenkunde (<i>Plan</i>)
C2 a,b	Karst und Karsthöhlen (<i>Plan</i>)
C3 a,b	Nicht-Karst-Höhlen (<i>Plan</i>)
C4 a	Prozess der Verkarstung (<i>Plan</i>)
C5 a	Verkarstungsfähige Gesteine (<i>Plan</i>)
C6 a,b	Entstehung von Karsthöhlen (<i>Plan</i>)
C7 a-c	Raumprofile in Höhlen (<i>Plan</i>)
C8 a,b	Kleinformen in Höhlen (<i>Plan</i>)
C10 a,b	Oberflächenkarstformen – Großformen (<i>Plan</i>)
C11 a	Oberflächenkarstformen – Kleinformen (<i>Fink & Plan</i>)

Geologisch relevantes

C20 a,b	Karstgebiete Österreichs (<i>Pavuz</i>)
C21 a,b	Zeitliche Einstufung wichtiger verkarstungsfähiger Gesteine (<i>Plan</i>)
C22 a,b	Trennflächen im Gestein (<i>Plan</i>)
C23 a,b	Sedimentäre Schichtung (<i>Plan</i>)
C24 a,b	Bruchtektonische Strukturen (<i>Plan</i>)
C25 a	Großtektonische Strukturen (<i>Plan</i>)
C26 a-c	Tertiäre Entwicklung der Nördlichen Kalkalpen (<i>Frisch</i>)
C27 a-d	Das Quartär (<i>Spötl</i>)

Höhleninhalt

C30 a	Höhleninhalt (<i>Häuselmann</i>)
C31 a-g	Sedimente in Höhlen (<i>Häuselmann</i>)
C32 a-c	Minerale in Höhlen (<i>Häuselmann & Seemann</i>)
C33 a-e	Höhlensinter (<i>Spötl</i>)
C34 a-c	Datierung von Höhlensintern (<i>Spötl</i>)

Karsthydrologie

C40 a	Typen von Karstquellen (<i>Völkl</i>)
C41 a,b	Die wichtigsten Untersuchungsmethoden an Karstwässern (<i>Völkl</i>)
C42 a-c	Interpretation hydrochemischer Parameter (<i>Pavuz & Plan</i>)
C43 a,b	Elektronische Datensammelmess-Systeme (<i>Völkl</i>)

Höhlenklima und Paläoklimaforschung

C50	Temperaturverteilung in Höhlen
C51	Bewetterung von Höhlen
C35	Höhleneis
C52	Radon in Höhlen
C53 a-d	Höhlen und Paläoklimaforschung (<i>Spötl</i>)

Biospeläologie

C60 a-c	Wirbellose Tiere in österreichischen Höhlen (<i>Christian</i>)
C61 a,b	Fledermäuse in Höhlen (<i>Bürger</i>)
C62 a-e	Fledermausbeobachtungen (<i>Bürger</i>)
C63	Knochenfunde in Höhlen
C64 a,b	Paläontologie – Fossile Wirbeltierreste in Höhlen (<i>Rabeder</i>)
C65 a-c	Grüne Pflanzen und Pilze in Höhlen (<i>Passauer</i>)

Historische Speläologie und Anthropospeläologie

C70 a,b	Prähistorische Funde in Höhlen (<i>Kusch & Kusch</i>)
C71	Meilensteine der Höhlenforschung
C72	Arbeitsgebiete der historischen Speläologie
C73 a,b	Erdstallforschung (<i>Bednarik</i>)
C74 a,b	Montanspeläologie (<i>Knobloch</i>)
C75	Naturzustand der Höhlen in Österreich
C76	Höhenschutz

Merkblätter D – Organisation der Höhlenkunde in Österreich und Rechtsfragen der Höhlenkunde

Organisation

D1	Struktur der Höhlenforschung in Österreich
D2	Aufgaben und Dienstleistungen des VÖH
D3 a-c	Mitglieder des VÖH (Greger)
D4 a-e	Schauhöhlen in Österreich (Stummer)
D5	Höhlenkundliche Schulung in Österreich
D6	Internationale höhlenkundliche Organisationen
D7 a,b	Höhlenkundliche Periodika und Schriftenreihen in Österreich (Pfarr)
D8 a,b	Wichtige internationale höhlenkundliche Periodika (Pfarr)
D9 a	Wesentliche Standardwerke der Karst- und Höhlenkunde (Pfarr)
D10	Höhlenausstatter

Höhlenrecht

D20	Naturschutzrecht in Österreich
D21	Höhlenschutzrecht in Österreich
D22	Höhlenführerwesen in Österreich
D23	Zugangs- und Betretungsrecht von Höhlen
D24	Haftungsrecht bei Höhlenbefahrungen

Speläologie - Höhlenkunde

Speläologie ist die Wissenschaftsdisziplin, die sich mit Höhlen beschäftigt. Aufgrund der engen Verflechtung mit der Karstkunde wird der Begriff teilweise auf die Karst- und Höhlenkunde ausgeweitet. Er stammt vom lateinischen *spelaeum* bzw. *spelunca* – die Höhle, womit auch der Titel dieser Merkblätter erklärt ist.

Definition von Höhle

Es gibt keine allgemeingültige Definition für Höhle. Eine der am häufigsten verwendeten ist folgende: *Eine Höhle ist ein natürlicher, mehr als menschengroßer unterirdischer Hohlraum.* Das Hauptproblem ist der Bezug zum Menschen, der, wenn man die Entstehung von Höhlen betrachtet, keinen Sinn ergibt. In Österreich und einigen anderen Ländern wird als Untergrenze für die Aufnahme einer Höhle ins Höhlenverzeichnis (bis auf wenige Ausnahmen) eine Ganglänge von 5 m vorausgesetzt.

Aufgrund der obigen Definition ist der Begriff *Naturhöhle* überflüssig. Der Begriff *Grotte* wurde ursprünglich gleichbedeutend mit *Höhle* verwendet, sollte aber vermieden werden, da seine Definition noch uneinheitlicher ist und meist auch künstliche Objekte beinhaltet.

Typen von Höhlen

Höhlen können nach diversen Kriterien unterschieden werden:

- *Ganglänge* (die Werte in Klammern beziehen sich auf die für Österreich definierten Grenzen): Kleinhöhle (5 – 49 m), Mittelhöhle (50 – 499 m), Großhöhle (500 – 4999 m) und Riesenhöhle (≥ 5000 m)
- *Höhleninhalt*: Eishöhle, Tropfsteinhöhle, Wasserhöhle, Knochenhöhle
- *Räumliche Anlage*: Horizontalhöhle, Schachthöhle, Halbhöhle (Breite größer maximale Distanz von der Trauflinie), Abri (Felsdach), Naturbrücke...
- *Verwendung*: Wohnhöhle
- *Zoologisch-paläontologische Bedeutung*: Fledermaushöhle, Bärenhöhle...
- *Umgebendes Gestein*: Lavahöhle, Gipshöhle, Karsthöhle, Lößhöhle, Gletscherhöhle...
- *Entstehung der Höhle im zeitlichen Bezug zum umgebende Gestein*: Primärhöhle (entsteht gleichzeitig mit dem Umgebungsgestein z.B. Lavahöhle, Tuffhöhlen) und Sekundärhöhlen (entstehen später, z.B. Karsthöhlen, Brandungshöhlen)
- *Entstehungsprozess*: wird im MB „Karst und Karsthöhlen“ sowie „Nicht-Karst-Höhlen“ behandelt.

Als *Höhlensystem* wird ein zusammenhängendes, verzweigtes Netz von Hohlräumen mit einer beliebigen Anzahl von Tagöffnungen bezeichnet.

Höhlenkunde als Wissenschaft

Höhlenkunde ist eine interdisziplinäre Wissenschaft am Schnittpunkt diverser Fachdisziplinen wie Biologie (Zoologie, Botanik,...), Erdwissenschaften (Geologie, Petrologie, Paläontologie, Mineralogie, Klimaforschung,...), Geographie, Geomorphologie, Anthropologie, (Ur)Geschichte, Kunst, Medizin, etc. Teilweise werden auch Begriffe aus der Kombination zweier Disziplinen verwendet, z.B. Biospeläologie oder Geospeläologie.

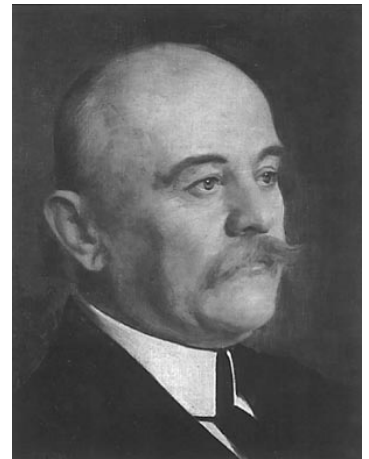
Die Speläologie kann neben dem Wissen über die Höhlen und ihrer Lebewesen selbst auch Aussagen über Prozesse außerhalb der Höhle liefern, z.B. über die Landschaftsentwicklung. Große Bedeutung für das tägliche Leben hat die Karstforschung vor allem bei der Wasserversorgung, da Wässer aus Karstgebieten wichtige Trinkwasservorkommen darstellen. In Österreich z.B. wird rund die Hälfte der Bevölkerung mit Karstwasser versorgt. Erkenntnisse aus der Karst und Höhlenkunde helfen, die Eigenschaften von Quellen und ihrer Einzugsgebiete zu charakterisieren. Im Zuge der Klimadebatte wurde in den letzten Jahrzehnten die Bedeutung von Höhlensedimenten als hervorragende Klimaarchive entdeckt und mit großem Aufwand erforscht (siehe MB Höhlen und Paläoklimaforschung). Die Speläotherapie, bei der vor allem Atemwegserkrankungen durch Aufenthalte in Höhlen behandelt werden, ist eine medizinische Anwendung der Speläologie.

Karst und Karsthöhlen

Die überwiegende Zahl der Höhlen weltweit sind Karsthöhlen; das gilt auch für Österreich. Damit sind Karst- und Höhlenforschung eng miteinander verbunden. Ein entsprechendes Wissen über Karst ist daher notwendig, um auch das Gepräge und die Entstehung von (Karst)höhlen verstehen zu können.

Was bedeutet Karst?

Der Begriff *Karst* (vom slowenischen *Kras* bzw. dem italienischen *Il Carso*) stammt von einem Regionalnamen für das Gebiet an der slowenisch-italienischen Grenze im Hinterland von Triest, wo die Karstforschung ihren Ursprung nahm. Heute wird der Begriff weltweit für den dort beschriebenen Landschaftstyp verwendet. **Jovan Cvijić**, der an der Uni Wien dissertierte, ist für die Verbreitung des Begriffes maßgeblich verantwortlich, da er ihn erstmals in seiner Arbeit „Das Karstphänomen“ in Pencks Geographischen Abhandlungen aus dem Jahre 1893 als überregionalen wissenschaftlichen Terminus verwendete. Viele der heute international verwendeten Fachbegriffe in der Karstkunde stammen daher aus dem Serbokroatischen (z.B. „Dolina“, was soviel wie Tal bedeutet). Auch der Begriff „Krâs“ selbst ist serbokroatisch und bedeutet „steiniger Boden“.



Jovan Cvijić (1865-1927)

Definition des Begriffs Karst

Nach Ford und Williams (2007) ist **Karst** eine **Landschaft mit charakteristischer Entwässerung und charakteristischen Landformen**, die von der **Löslichkeit des Gesteins** und der dadurch entstandenen **hohen (Kluft-)Porosität** herrühren.

Das Charakteristische an der Entwässerung ist, dass sie vorwiegend unterirdisch abläuft, wobei in weiten Bereichen der Landoberfläche Gewässer fehlen, im Tal aber meist große Quellen zu Tage treten. Die speziellen Landformen können zum Beispiel geschlossene Hohlformen wie Dolinen oder Poljen sein (siehe MB Oberflächenkarstformen). Gut wasserlösliche Gesteine wie Kalk, Dolomit, Gips u.a. werden ebenfalls in einem eigenen Merkblatt besprochen. Große Poren schaffen das Betätigungsfeld des Höhlenforschers, da die durch Lösung entstandenen Hohlräume und Röhren oft für Menschen befahrbare Ausmaße erlangen und somit als Höhlen bezeichnet werden.



Karsthöhlen

Eine **Karsthöhle** (auch Lösungshöhle bzw. etwas eingeschränkt Korrosionshöhle genannt) ist eine Höhle, die vorwiegend durch die korrosive Wirkung des Wassers, also durch chemische Lösung (= Verkarstung, siehe eigenes MB) entstanden ist. Dies bedeutet aber, dass nicht alle Höhlen in verkarstungsfähigen Gesteinen Karsthöhlen sind, obwohl dies teilweise aufgrund abweichender Definitionen nicht so gehandhabt wird. Selbst in einigen Plateaukarstgebieten (z.B. Schneeberg, NÖ) überwiegen zahlenmäßig Höhlen, die nicht hauptsächlich durch Verkarstung, sondern durch Frostsprengung und gravitative Prozesse entstanden sind (Auswitterungshöhlen und Spalthöhlen an den Flanken der Plateaus).

Typen von Karsthöhlen

Neben den bei den Höhlen allgemein genannten Typen gibt es mehrere Gesichtspunkte, die zu einer Einteilung von Karsthöhlen bzw. Teilen von Karsthöhlen herangezogen werden können:

- *Bezug zum Wasser:* Quellschöpfung, Ponorhöhle
- *Initialfuge:* Schichtfugenhöhle, störungsgebundene Höhle, Schichtgrenzhöhle (oder Kombination)
- *Entstehungsbedingungen in Bezug zum Karstwasserspiegel:* eine vadosa Höhle entstand über, eine phreatische Höhle unter dem Karstwasserspiegel, eine epiphreatische Höhle im Schwankungsbereich (meist gibt es auch Kombinationen)
- *Hydrologisches Regime:* Bei dieser, die Entstehungsbedingungen berücksichtigenden Einteilung, werden drei Grundtypen unterschieden, wobei auch Mischtypen auftreten:
 1. „Normale“ meteorische Wässer: für die Entstehung sind Niederschlagswässer verantwortlich, die der Schwerkraft folgend abfließen. Dabei entstehen die meisten der bekannten Höhlen.
 2. *Hypogene Wässer (Tiefenwässer, wörtlich in/aus der Tiefe entstanden):* Wässer, die in größerer Tiefe erwärmt werden (Thermalhöhlen) oder mit geogenen (unterirdisch gebildeten) Gasen (hauptsächlich Schwefelwasserstoff H_2S und/oder Kohlendioxid CO_2) angereichert sind und somit Karstgesteine lösen können.
 3. *Mischwässer in Küstengebieten:* beim Mischen von Salz- und Süßwasser können unter gewissen Bedingungen Karbonate gelöst werden, z.B. an den Flanken von tropischen Karbonatinseln.

Klassifizierung des Karsts

Wieder gibt es je nach Betrachtungsweise viele Möglichkeiten der Einteilung:

- *Gestein:* Kalkkarst, Gipskarst...
- *Bezug zur Oberfläche:* Exokarst (Oberflächenkarst) oder Endokarst (unterirdischer Karst)
- *Auftreten von Oberflächengerinnen:* die Einteilung reicht vom *Vollkarst*, wo keine Oberflächengerinne auftreten, über den *Halbkarst* bis zum *Fluviokarst*, der bedeutende Oberflächengerinne aufweist.
- *Tiefe der Verkarstung:* tiefer Karst (die unterirdische Verkarstung reicht unter das Niveau des Vorfluters bzw. der Quellen), seichter Karst (die das Karstgestein unterlagernden wasserstauenden Gesteine verhindern eine tieferreichende Verkarstung)
- *Vegetation:* Grünkarst, Kahlkarst oder nackter Karst, silvaner (=bewaldeter) Karst ...
- *Landschaftsrelief:* Plateaukarst, Karstebene, Hochgebirgskarst, Kegelskarst ...
- *Klima:* tropischer Karst, alpiner Karst, temperierter Karst, mediterraner Karst ...
- *Geologischen Gegebenheiten:* bedeckter Karst (z.B. mit eiszeitlichen Geröllen), Kontaktkarst (an der Grenze verschieden verkarstungsfähiger Gesteine)

Weiters werden folgende Karstphänomene unterschieden:

Paläokarst: alte Oberflächen- oder Untergrundkarstformen, die mit jüngeren Gesteinen bedeckt oder verfüllt und **inaktiv** sind. Teilweise werden diese Formen auch als begrabener oder plombierter Karst bezeichnet.

Pseudokarst: Karst-ähnliche Formen, die nicht hauptsächlich auf Lösungsprozesse zurückzuführen sind (siehe MB Nicht-Karst-Höhlen).

Thermokarst oder Gletscher (Pseudo)karst: durch das Schmelzen und Sublimieren von Eis bilden sich auf bzw. in Gletschern und Eisfeldern karstähnliche Formen wie Höhlen, Schwinden (sog. Moulins) etc.

Nicht-Karst-Höhlen

Die Entstehung einer ansehnlichen Anzahl Höhlen ist auch in Österreich auf Vorgänge zurückzuführen, die nichts mit Verkarstung zu tun haben. Für diese Bildungen wird oft der Begriff **Pseudokarst** (manchmal auch irreführend) verwendet. Im Folgenden werden die wichtigsten Typen aufgezählt, wobei es wie immer Übergänge zwischen diesen Formen untereinander, aber auch zwischen diesen und Karsthöhlen gibt.

Typen von Nicht-Karst-Höhlen

Tuffhöhlen

Bei der Bildung von Quelltuffen in kalkübersättigten Wässern kann es zur Hohlraumbildung bei kleinen Wasserfallstufen kommen (Primärhöhle). Einige kleinere Beispiele gibt es in Österreich (z.B. Tuffsteinhöhle, 1827/19, NÖ). Berühmt sind die Quelltuffe und Höhlen der Plitvicer Seen in Kroatien.

Spalt(en)höhlen

Vorwiegend durch gravitatives (schwerkraftbedingtes) Abgleiten bzw. Rotieren (Bergzerreißen) oder selten durch tektonische Prozesse (Bewegungen der Erdkruste) entstehen befahrbare tw. überdeckte Spalten in verschiedensten Festgesteinen. Oft ist die Spaltenbildung hangparallel und die resultierenden Höhlen werden als Abrisspalten, oder ungenauer, als Abrissklüfte bezeichnet. Früher wurde oft allgemein von *tektonischen Höhlen* gesprochen, was nicht korrekt ist, da meist nur die ursprüngliche Anlage der Störung tektonisch ist, nicht aber der Öffnungsvorgang der zur Höhlenbildung führt. In Österreich ist keine durch tektonische Zugspannungen gebildete befahrbare Höhle nachgewiesen. Schöne Beispiele tektonischer Höhlen findet man z.B. auf Island.

Erosionshöhlen, Uferhöhlen und Brandungshöhlen

Im Bereich von Flüssen oder im Brandungsbereich von stehenden Gewässern bzw. des Ozeans können durch die erodierende Wirkung des bewegten Wassers Höhlen entstehen. Oft handelt es sich jedoch nur um Halbhöhlen.

Auswitterungs- bzw. Ausbruchshöhlen

Hierbei ist der wichtigste Mechanismus die Frostsprengung, die durch infiltriertes oder kondensiertes Wasser ausgelöst wird, sowie der meist gravitative Abtransport des Schuttes. Aufgrund der zweiten Bedingung kommen diese Höhlen hauptsächlich im geneigten bis steilen Gelände vor und stellen meist ansteigende Halbhöhlen dar. Objekte mit knapp 100 m Länge (Wetzsteinloch, 1744/12, Stmk) und ähnlicher Breite (Hornermauer-Riesendach, 1851/207, NÖ) sind bekannt. Diese Nicht-Karst-Höhlen machen sogar in etlichen Karstgebieten die Mehrzahl der Höhlen aus. Durch feinsplittrige Frostverwitterung entstehende runde Profile täuschen auf den ersten Blick Karstprozesse vor und machen so eine Erkennung nicht immer leicht. Da andererseits das Wasser, das die Frostsprengung fördert, meist durch kleine Fugen oder unbefahrbare Karströhren sickert oder fließt, ist teilweise ein Übergang zu den Karsthöhlen gegeben.

Überdeckungshöhlen

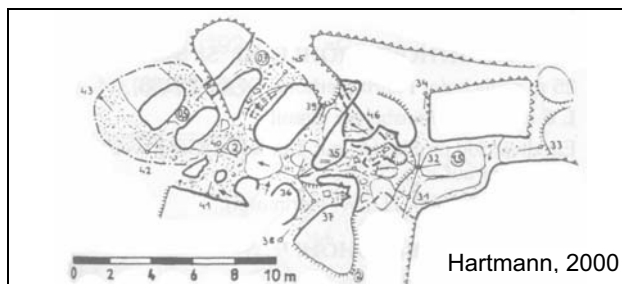
In den Ablagerungen von Massenbewegungen (Bergsturz, Felssturz) bleiben Lücken, die befahrbare Ausmaße haben können. Vor allem hier sind oft Übergänge zu den Spalthöhlen gegeben.



Das 40 m hohe und 30 m breite Portal des Wetzsteinlochs (Auswitterung von Tuffiten im Kern einer Falte im Grafensteigkalk).

Erosionsüberdeckungshöhlen und Wollsackhöhlen

Bei diesen beiden Typen werden große Blöcke durch Massenbewegungen oder die sog. Wollsackverwitterung, die vor allem im Granit wirkt (und z.B. die Wackelsteine formt), gebildet. Der Abtransport von Gesteinsmaterial erfolgt erosiv oder gravitativ. Die Mehrzahl der Höhlen im Granit der Böhmisches Masse gehört zu diesem Typ. Ein Beispiel für ausgedehnte Erosionsüberdeckungshöhlen im Granit sind die von einem Bach durchflossenen Obere und Untere Saubachhöhle (6847/127 u. /128, NÖ), die zusammen über 500 m Ganglänge und je ca. 130 m Horizontalerstreckung aufweisen und die längsten Höhlen Österreichs nördlich der Donau darstellen.



Grundriss der Fahrthoferhöhle V (6845/181) – eine typische Erosionsüberdeckungshöhle im Weinsberger Granit.

Piping Höhlen

In schlecht verfestigten feinkörnigen Sedimenten wie Torf, Lehm aber vor allem im Löß (feinkörnige eiszeitliche Windablagerungen) können entlang von Initialfugen durch erodierende Wässer unterirdische Hohlräume entstehen. Sie sind oft raschen Veränderungen unterworfen. Teilweise bedingen auch menschliche Bauwerke die Bildung dieser Höhlen. In den Lößgebieten in Niederösterreich ist das ausgedehnteste Objekt das Wasserschloß (6846/12, NÖ) mit 38 m Länge und 10 m Höhenunterschied.



Durch Piping entstandener Schluf unterhalb des Ottentalerschlingers (6846/14).

Vulkanische Höhlen und Lavahöhlen

Durch verschiedene Prozesse während der Bildung von Vulkanen können Höhlen entstehen (Primärhöhlen). Die bedeutendsten sind Lavahöhlen (*Lavatubes*), die durch das Ab- bzw. Ausfließen der Lava aus einem unter der erstarrten Oberfläche fließenden Lavastrom entstehen. Die zurzeit ausgedehnteste Lavahöhle (Kazumura Cave) auf Hawaii und hat 66 km Länge und 1101 m Höhenunterschied. In Österreich sind keine echten Lavahöhlen bekannt. Lediglich einige Höhlen in vulkanischen Gesteinen, die sekundär (nachträglich) durch gravitative Prozesse (Spalthöhlen) entstanden, sind bekannt.

Gletscherhöhlen

Unter und innerhalb von Gletschern bilden sich durch das Schmelzen und Sublimieren vom Eis Formen, die Karstformen sehr ähnlich und teilweise auch ausgedehnt sind. Diese entstehen an Spalten und Fugen im Eis und am Kontakt Eis-Fels.

Konsequenzhöhlen

Darunter versteht man Höhlen, die durch die Wechselbeziehung von menschlichen (z.B. Bergbau) und natürlichen Prozessen entstehen. Obwohl der Ursprung antropogen (menschengemacht) ist, entstehen durch anschließend natürliche Prozesse (z.B. Versturzvorgänge) Räume, die oft auch von gänzlich natürlichen nicht zu unterscheiden sind. Zumeist fanden diese Höhlen bisher keinen Eingang in den Höhlenkataster.

Für Mitteleuropa unbedeutende Nicht-Karst-Höhlen sind Winderosionshöhlen, blasenartige Hohlformen die durch die sog. Tafoni-Verwitterung in trockenen Gebieten entstehen, sowie Höhlen im Permafrost.

Weiterführende Literatur

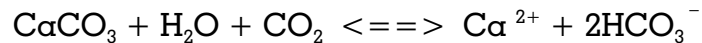
Striebl, T. (2005): Höhlenbildung in „nicht verkarstungsfähigen“ Gesteinen: welche Formen sind Karstformen? – Laichinger Höhlenfreund, 40 (1): 31-52.

Prozess der Verkarstung

Verkarstung und Höhlenbildung sind eng miteinander verknüpft. Im Folgenden soll kurz auf die Grundvoraussetzungen für die Verkarstung eingegangen werden. Da Karbonate (u.a. Kalk und Dolomit) die bedeutendsten Karstgesteine sind, wird nur auf diese genauer eingegangen.

Kalk und Dolomit

Die Lösung von Kalken (Korrosion) erfolgt nach der allgemeinen und vereinfachten Summenformel:



Im Detail laufen bei der Lösung von Kalken eine Vielzahl von chemischen und physikalischen Prozessen ab. Analog funktioniert auch die Lösung von Dolomit.

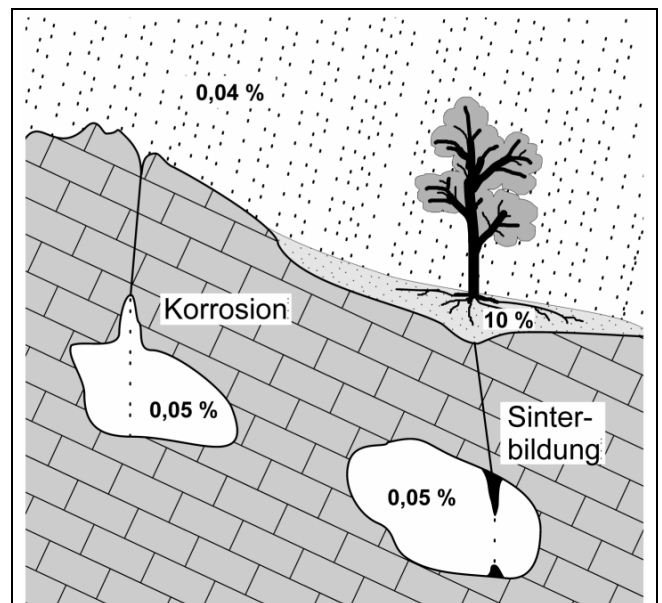
Wasser wird durch Lösung von Kohlendioxid zur Kohlensäure. Kohlensäurehaltiges Wasser löst den Kalk durch Bildung der Ionen Ca^{2+} und HCO_3^- . Es handelt sich um eine Gleichgewichtsreaktion (Doppelpfeil): Kommt auf der linken Seite CO_2 hinzu, kann zusätzlich Kalk gelöst werden (aggressives Karstwasser); Verliert das System CO_2 , wird Kalk z.B. als Sinter ausgeschieden (Wasser ist übersättigt).

Faktoren der Verkarstung

Aus obiger Formel kann man leicht erkennen, dass neben dem Vorhandensein von verkarstungsfähigem Gestein (Kalk bzw. Dolomit) auch Wasser und CO_2 wichtig sind. Somit spielt auch das Klima bei der Verkarstung eine wichtige Rolle.

Niederschlag muss ausreichend fallen. Aus diesem Grund gibt es in ariden (trockenen) Gebieten aber auch in Gebieten mit Permafrost kaum Verkarstung. Es kann aber in solchen Gebieten „alte“ Karsterscheinungen/Höhlen geben, die unter anderen Klimabedingungen entstanden sind.

CO_2 (genau genommen der CO_2 -Partialdruck oder $p\text{CO}_2$) ist in der Luft nur in sehr geringem Anteil vorhanden: 0,04 % (Genau: 375,6 ppm im Jahre 2003; Tendenz steigend). Es kann aber im Boden durch Bodenorganismen um das Hundertfache höher sein. Dies macht auch die großen Unterschiede zwischen nacktem und bedecktem Karst.



Beispiele für Korrosion oder Sinterbildung:

Fall Korrosion: Das Regenwasser mit dem atmosphärischen $p\text{CO}_2$ von rund 0,04 % kann nur wenig Kalk lösen. Trifft es auf einen Höhlenraum, wo der $p\text{CO}_2$ größer ist (im Beispiel 0,05 %), nimmt es CO_2 auf und kann Kalk lösen, wodurch z.B. ein Deckenkolk entsteht.

Fall Sinterbildung: Das Regenwasser nimmt im Boden, der einen $p\text{CO}_2$ von bis zu 10 % haben kann, reichlich CO_2 auf, wodurch es viel Kalk lösen kann. Kommt dieses in einen Höhlenraum mit deutlich geringerem CO_2 -Anteil fällt dieses aus und Kalk lagert sich als Sinter ab (s. MB Sinterbildung).

Gips und Salz

Die Lösung von Gips und Salz ist vom CO_2 -Angebot unabhängig. Sie ist nur von der Löslichkeit des Minerals im Wasser begrenzt. Da Gips westlich besser löslich ist als die oben beschriebenen Karbonate geht auch die Verkarstung im Gips um ein Vielfaches schneller. Salz ist so leicht löslich, dass es nur in ariden (trockenen) Gebieten oberflächlich vorkommt.

Verkarstungsfähige Gesteine

Karsthöhlen können nur entstehen, wenn das Gestein verkarstungsfähig, d.h. löslich ist. Das Auftreten von Karsthöhlen ist also an bestimmte Gesteine gebunden. Daher ist es hilfreich bei der Höhlensuche einen Blick auf die Geologische Karte zu werfen. Folgende Gesteine sind verkarstungsfähig:

Karbonate: Kalk CaCO_3 , Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, Marmor – die bei weitem wichtigsten Karstgesteine (s.u.)

Sulfate: Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Anhydrit CaSO_4 – in Österreich wenige bedeutende Höhlen, sehr ausgedehnte Systeme z.B. in der Ukraine mit mehreren 100 km Ganglänge!

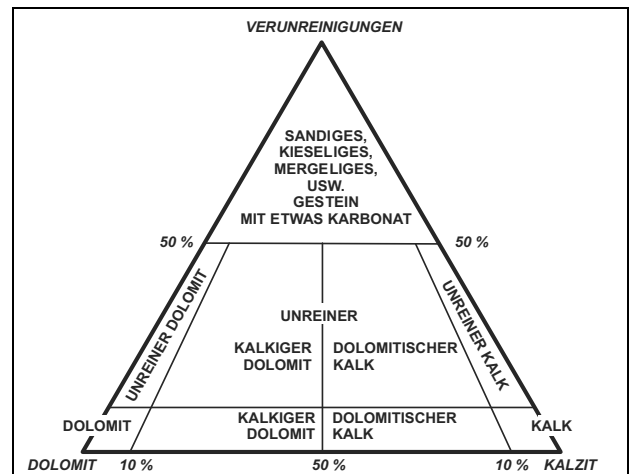
Für Österreich unbedeutend:

Salz: Steinsalz NaCl – in ariden (trockenen) Gebieten kann Salz an der Oberfläche erhalten bleiben, Salzkarst mit Höhlen gibt es z.B. in Israel nahe dem Toten Meer.

Quarzit: SiO_2 – verkarsten nur unter tropischen Klimabedingungen, bedeutende Höhlen gibt es z.B. in Venezuela und Südafrika.

Kalk - Dolomit

Eine Klassifikation der Karbonate liefert nebenstehendes Diagramm. Man kann sehen, dass es zwischen reinem Kalk und reinem Dolomit alle Übergangsformen gibt. Auch die Verunreinigung mit nicht karbonatischen Anteilen kann recht unterschiedlich sein. Hierbei ist zu beachten, dass bereits wenige % feinverteiltes Material (z.B. unlöslicher Quarzsand) die Höhlenbildung stark beeinträchtigt, da etwaige wasserwegsame Fugen mit diesen Lösungsrückständen verstopft werden. Einzelne unlösliche Hornsteinknollen wie sie in einigen Kalken vorkommen stören die Verkarstung nicht. Sie stehen oft markant aus der Höhlenwand heraus, da sie unlöslich sind.



Klassifikation der Karbonatgesteine.

Für den Höhlenforscher ist der Unterschied zwischen Kalk und Dolomit recht bedeutend, da bereits leicht dolomitischer Kalk wesentlich schlechter löslich ist als reiner Kalk. Somit ist Dolomit schlechter verkarstungsfähig und weist meist eine wesentlich geringere Höhlendichte auf als Gebiete im Kalk. Ausnahmen bestätigen wie immer die Regel!

Andererseits können sich am Kontakt von Kalk und Dolomit (wenn der Kalk über dem Dolomit liegt) bevorzugt Höhlen (Schichtgrenzhöhlen) entwickeln.

Wie unterscheide ich Kalk und Dolomit?

Das genaue Ca-Mg-Verhältnis eines Gesteines kann nur im Labor ermittelt werden. Eine grobe Einteilung kann im Gelände mit **Salzsäure** (HCl) vorgenommen werden. Man verwendet dazu rund 10-fach verdünnte Salzsäure (konzentrierte = 36%). Eine *frische* Bruchstelle wird vorsichtig betropft: schäumt die Säure auf handelt es sich um Kalk. Achtung: Auch Dolomit kann feine Äderchen von Kalzit aufweisen – genau beobachten ob nicht diese für das Schäumen verantwortlich sind.

Mit etwas Erfahrung kann man auch am Bruchmuster und an der Oberflächenstruktur eine grobe Einteilung treffen.

Marmor ist metamorpher (=kristalliner) Kalk, d.h. seine Struktur wurden bei einer Gebirgsbildung in großer Tiefe im Zuge einer Gesteinsmetamorphose unter großem Druck und Temperatur verändert. Genau genommen gibt es auch hier wieder Kalk- und Dolomitmarmore.

Entstehung von Karsthöhlen

Im Folgenden soll kurz auf die lange Entwicklungsgeschichte von wasserwegsamem Fugen, die Bruchteile eines Millimeters breit sind bis zu luftegefüllten für Menschen befahrbaren Höhlen eingegangen werden.

Welche Kräfte sind vorwiegend an der Bildung von Karsthöhlen beteiligt?

- **Korrosion:** chemische Lösung des Verkarstungsfähigen Gesteines.
- **Mechanische Erosion:** Erweiterung durch fließendes Wasser und seiner Sedimentfracht.

Weitere wichtige Prozesse

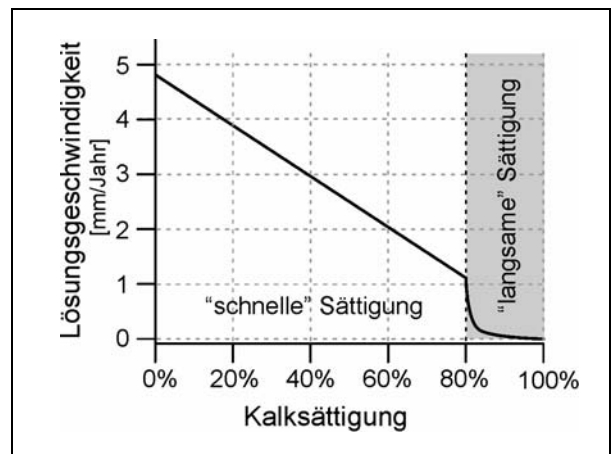
- **Versturzvorgänge** (Inkasion) tragen nicht nur zu einer Überprägung des Gangprofils bei, sondern beschleunigen auch die Lösung, da sie die Gesteinsoberfläche vergrößern.
- **Sedimentation:** Durch Ablagerung von Sediment (vor allem Lehm) kann es zur vollständigen Verfüllung von Gangprofilen kommen, wodurch das Wasser Umgehungsstrecken (Bypässe) erweitert. Ist nur der Boden mit Sediment bedeckt wird der Gangquerschnitt nach oben erweitert.

Entstehung von Höhlengängen

Neben dem Vorhandensein von Wasser mit Lösungspotential und der Löslichkeit des Gesteins ist die Existenz von wasserwegsamem Trennflächen eine Voraussetzung für die Entstehung von Karsthöhlen. Nur wenn es sog. Initialfugen gibt (man nimmt an, dass Öffnungsweiten von ca. 0,1 mm ausreichend sind), kann das Wasser in den Gebirgskörper eindringen und unterirdisch zu den Quellen fließen. Gibt es keine Fugen bleibt der Verkarstungsprozess auf die Oberfläche beschränkt. Entlang dieser Fugen bzw. bevorzugt an der Kreuzung zweier Flächen bildet sich durch Korrosion ein Netz von vielen kleinen Röhren (sog. Anastomosen). Durch Selbstverstärkungsprozesse (eine Röhre ist geringfügig größer → es fließt mehr Wasser → sie wird schneller erweitert als die anderen usw.) werden aber nur einige wenige auf Kosten der anderen zu größeren Gängen erweitert.

Aggressives (CaCO_3 untersättigtes) Wasser ist allerdings nach relativ kurzem Kontakt mit dem Gestein fast vollständig (zu 80 bis 90%) gesättigt und braucht dann lange um vollständige Sättigung zu erreichen. Deshalb geht die Höhlenbildung in der Anfangsphase extrem langsam voran. Erst wenn in einer Röhre auf die gesamte Strecke zwischen Versickerung und Quelle eine gewisse Fließgeschwindigkeit erreicht wird, kann weniger gesättigtes – also aggressiveres – Wasser auf der gesamten Länge den Gang „schnell“ erweitern.

Messungen und Modellierungen haben gezeigt, dass tieferliegende Höhlenteile fast ausschließlich bei Hochwassersituationen korrosiv erweitert werden. Nur dann kann das untersättigte Wasser aufgrund der erhöhten Fließgeschwindigkeit sehr schnell tief in die Höhlen eindringen. Mathematischen Modellierungen zufolge sind für die Aufweitung eines Ganges auf befahrbare Ausmaße mehrere 10.000 Jahre nötig.



Lösungsgeschwindigkeit von Kalken (nach Dreybrodt, 1997 verändert).

Tieferlegung der Karstwasseroberfläche

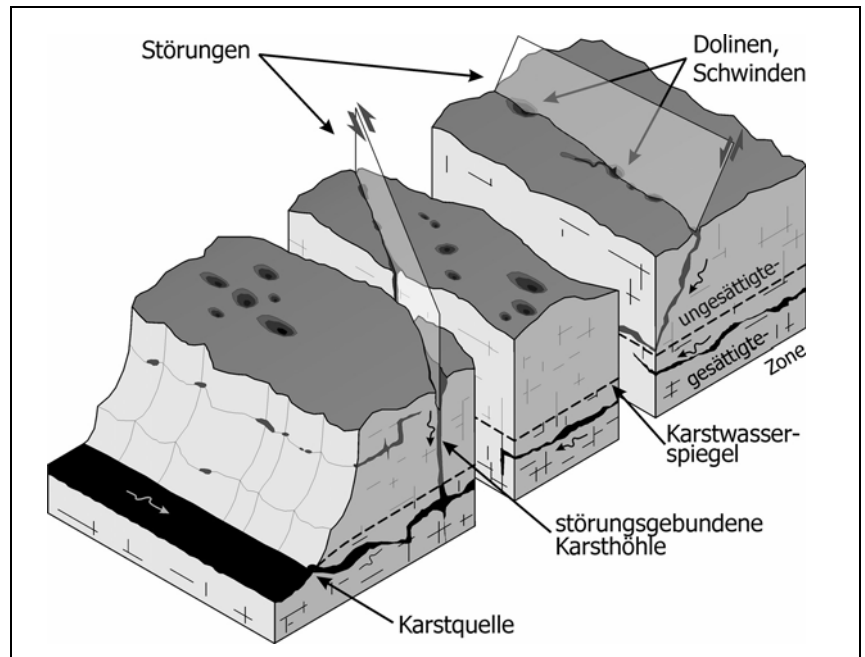
Während im Anfangsstadium der Verkarstung die Grenze der mit Wasser gesättigten Zone noch nahe der Oberfläche liegt, gleicht sich der Karstwasserspiegel durch die Entwicklung des unterirdischen Entwässerungsnetzes immer mehr dem Niveau der umgebenden Flüsse (Vorfluter) an. Auch bei gut verkarsteten Gebieten darf man sich den Karstwasserspiegel jedoch nicht als horizontale Fläche vorstellen, sondern vielmehr als eine aufgewölbte Oberfläche (piezometrisches Niveau), die auch starken Schwankungen (Hochwasser, Schneeschmelze...) unterworfen ist.

Vor allem die Erforschung von Schachthöhlen mit tiefelegenen Siphonen hat zum Wissen über die Wasserverhältnisse in Karstplateaus entscheidend beigetragen.

Vadose und phreatische Zone

Der unterhalb der Karstwasser-oberfläche liegende, mit Wasser gesättigte Bereich wird phreatische Zone genannt. In der darüber befindlichen ungesättigten, sog. vadosen Zone gibt es auch Gerinne, die der Schwerkraft entsprechend nach unten in die phreatische Zone fließen. Im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels besteht eine Übergangszone (epiphreatische Zone). Auch in der vadosen Zone können, z.B. aufgrund von wasserstauenden Schichten oder vordefinierten Abflusswegen lokale Siphone auftreten.

Abgesehen von der Befahrungstechnik – in die phreatische Zone können nur Höhlentaucher in eher geringe Tiefen vordringen – hat diese Zweiteilung auch auf die Entwicklung der Höhle großen Einfluss, die sich auch oft sehr deutlich in der Ausprägung der Höhlenteile widerspiegelt.



Schematisches Blockdiagramm eines Karstmassivs.

Literatur:

Klimchouk, A., Ford, D., Palmer, A. & Dreybrodt, W. (2000): **Speleogenesis, Evolution of Karst Aquifers**. Huntsville – National Speleological Society. Sehr umfangreiches tw. anspruchsvolles Werk. Gute Englischkenntnisse und geologische Grundkenntnisse sinnvoll (ISBN- 1-879961-09-1, www.caves.org).

Kempe, S. (1997): **HB-Bildatlas – Sonderausgabe 17 (1997)**. HB-Bildatlas – Sonderausgabe 17. Leicht verständlicher Artikel über Höhlenbildung von W. Dreybrodt, einem der Begründer der neuesten Modelle zur Höhlenentstehung.

www.speleogenesis.info Online-Journal mit Beiträgen zur Höhlenentstehung (englisch).

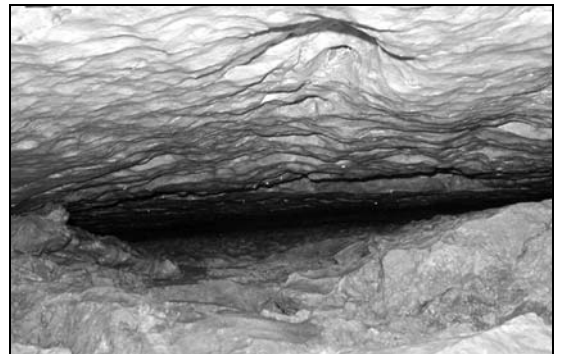
Raumprofile in Höhlen

Wenn wir die Gangprofile und den Verlauf eines Höhlenabschnittes betrachten, so ist es oft möglich auf seine Entstehungsgeschichte rückzuschließen. Auch bei der Suche nach Neuland kann es sehr hilfreich sein, sich Gedanken über die Genese zu machen. So wird es sich wahrscheinlich auszahlen, in einem Canyonschacht nach Schachtfenster zu suchen, wenn dieser das „Ende“ eines phreatischen Tunnels bildet.

Phreatische und Epiphreatische Profile

Bei völliger Wassererfüllung kann das Profil nach allen Richtungen gleichmäßig erweitert werden. Inhomogenitäten im Gestein (wie leichter lösliche Schichten oder Trennflächen) werden nachgezeichnet und führen dabei oft zu charakteristischen Formen. Da das Wasser nicht der Schwerkraft folgt, können phreatisch entstandene Gänge ihr Gefälle wechseln. Sie können auch senkrecht ausgebildet sein, obwohl die meisten Schächte unter vadosen Bedingungen entstehen.

Den Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels nennt man epiphreatische Zone. In manchen Höhlen konnte nachgewiesen werden, dass vor allem in diesem Bereich Höhlenbildung stattfindet.



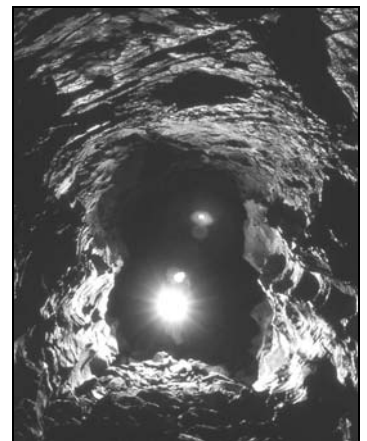
Phreatisch erweiterte Störung mit ~10 cm Höhe (Wasseralmquelle 1851/216, NÖ).



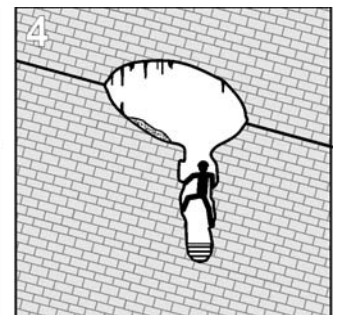
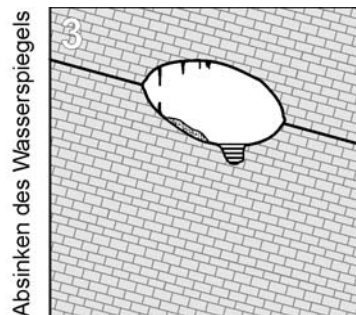
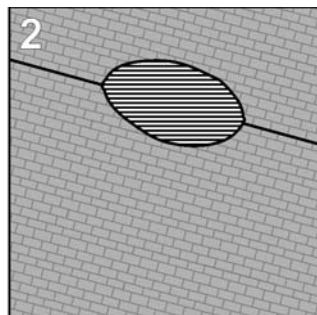
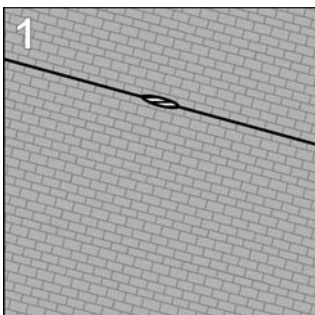
Schichtgebundene phreatische Röhre mit kleinen Fließfacetten (Trobachhöhle, 1836/27, NÖ, E. Herrmann).



Schichtgebundene phreatische Röhre (Dachstein-Mammuthöhle, 1547/9, OÖ).



Phreatischer Gang mit großen Fließfacetten (Trobachhöhle, 1836/27).



Absinken des Wasserspiegels

Eine wasserwegsame Initialfuge (1) wird unter phreatischen Bedingungen nach allen Richtungen erweitert (2) und fällt durch Absinken des Karstwasserspiegels trocken. Ein vadoser Bach / Canyon schneidet sich am Boden des Profils ein (3) und es kommt zur Ausbildung eines Schlüssellochprofils (4).

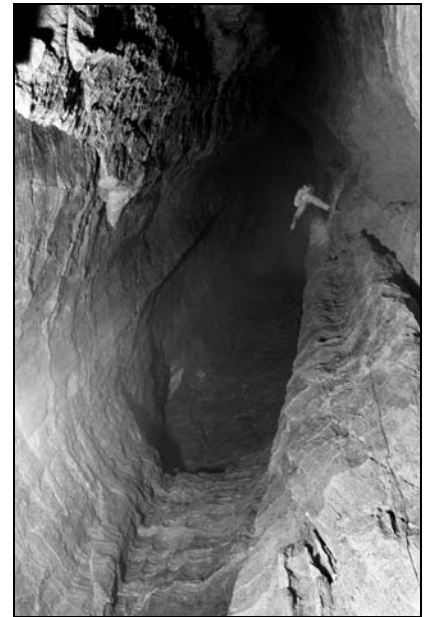
Vadose Profile

Profile, die unter teilweiser Wassererfüllung entstanden, sind meist als Canyons ausgebildet. Hier schneidet sich das Gerinne der Schwerkraft entsprechend ein, wodurch hohe schmale Passagen entstehen. Es kann keine Gegenanstiege der Sohle geben! Typisch für Canyons ist auch die Ausbildung von Mäandern - das schnell fließende Wasser neigt nämlich dazu S-Kurven zu modellieren.

Kann das Wasser entlang von vertikalen Trennflächen in die Tiefe stürzen, bilden sich Schächte aus. Diese haben oft wesentlich größere Dimensionen als ihre Zu- und Abflüsse, wie in vielen alpinen Höhlen zu beobachten ist. Durch den größeren CO₂ Austausch und die verstärkte Erosionskraft kann hier mehr Gestein abtransportiert werden.



Vadoser Canyon mit Erweiterung bei kleinem Abbruch. (Seekarschacht III, 1712/33, Stmk., A. Klampfer)



Vadoser Schacht (Slovačka Jama, Velebit, KRO, A. Stroj).

Das Schlüssellochprofil

Oft schneiden sich in vorhandene phreatisch entstandene Gänge vadoser Canyons ein, wodurch es zur Ausbildung eines schlüssellochförmigen Profils kommt. Dies muss nicht das ehemals phreatische Gerinne nach der Tieferlegung des Karstwasserspiegels sein. Meist kann man beobachten, dass junge Canyons alte phreatische Gänge mehr oder weniger zufällig anschneiden und diese auf eine bestimmte Länge benutzen, um sie dann wieder entlang einer wasserwegsamten Fuge zu verlassen. Zwischen diesen zwei wasseraktiven Phasen können beachtliche Zeitspannen liegen.

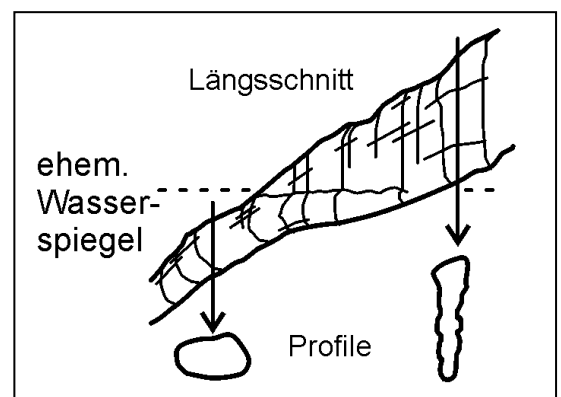


Schlüssellochprofil: Phreatische Röhre mit 20 m tiefem Canyoneinschnitt (Dachstein-Mammuthöhle 1547/9).

Übergang Canyon-Röhre

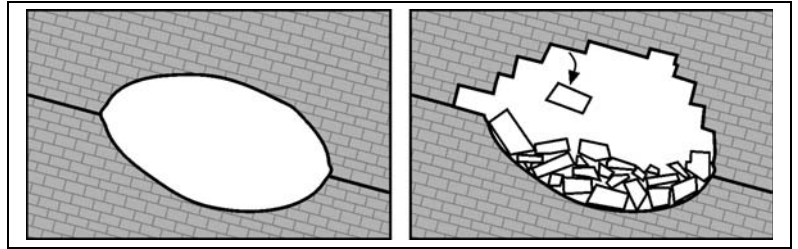
Für die präzise Erfassung von Höhlenniveaus sind besonders Punkte wichtig, wo man den Übergang von einem Canyon- zu einem Röhrenprofil erkennt, da diese die Lage ehemaliger Wasserspiegel anzeigt.

Übergang von vadosen Mäandern in eine phreatische Röhre.



Überprägung der Profile durch Versturzvorgänge

Durch Versturzvorgänge kann es zu einer Veränderung des Profils kommen. Dies kann soweit führen, dass von den ursprünglichen durch Wasser entstandenen Formen nichts mehr zu erkennen ist. Zu beachten ist, dass sich dabei der Gang nach oben verlagert.



Überprägung eines phreatischen Profils durch Versturzvorgänge.

Typische Profile, die durch Versturzvorgänge entstehen, sind Kasten- und Tonnenprofile wobei die Trennflächendichte (meist Schichtmächtigkeit) ausschlaggebend für die Gestalt ist. Auch die meisten größeren Hallen sind durch Versturz maßgeblich erweitert worden. Kennzeichnend für Versturzvorgänge sind natürlich die autochthonen, nicht gerundeten Blöcke am Höhlenboden. Oftmals sind diese aber wieder entfernt und die Erkennung ist schwierig.



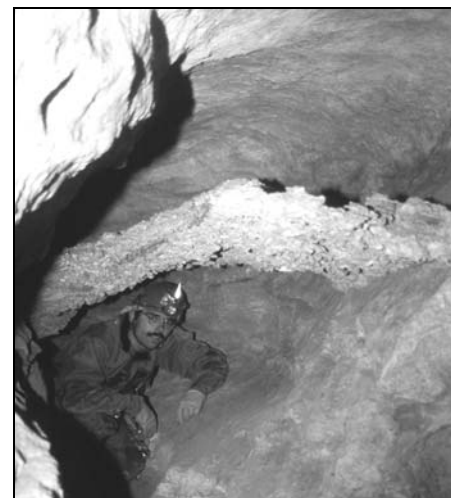
Durch Versturzvorgänge geprägter Raum im gebankten Dachsteinkalk. (Bärwies-Eishöhle, 1812/11, Stmk., W. Hartmann).



Versturzgeprägte Halle mit relativ ebener Decke. Das autochthone Blockwerk bedeckt den gesamten Boden (Grauer Riese 1625/391, Totes Gebirge, Stmk.).

Problematisierung bei der Zuordnung von Gangprofilen zu einem Genesetyp

Da die meisten Höhlen eine vielphasige Entstehungsgeschichte aufweisen, werden die Profile mehrmals überprägt, was die Entschlüsselung der einzelnen Phasen oft schwierig macht. Außerdem können Verbrauchvorgänge oder Sedimententfüllung die genetische Interpretation erschweren oder verunmöglichen.



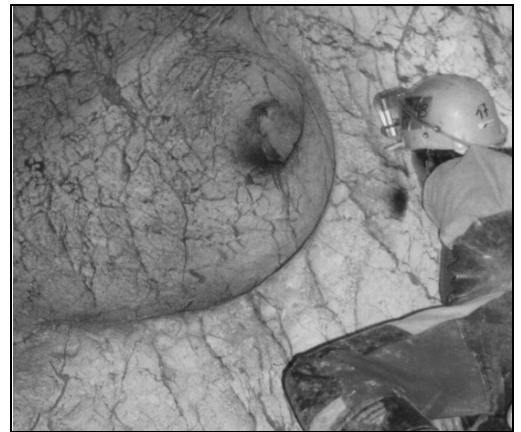
Eine Konglomerat-Bogen zeigt eine vielphasige Entstehungsgeschichte (Burgunderschacht, 1625/20, Stmk.).

Kleinformen in Höhlen

Kleinformen in Höhlen können als Indikatoren für die Entstehungsbedingungen des jeweiligen Höhlenteiles herangezogen werden. Im Folgenden werden die wichtigsten in unseren Höhlen vorkommenden hydrischen Formen beschrieben.

(Decken-) Kolke

Runde, glocken- bzw. kuppelförmige Vertiefungen bis hin zu kleinen Schloten. Typische phreatische Bildungen, wo entlang einer Trennfläche punktförmig oder linear ein geringer Wasserzutritt erfolgte. Durch Mischung zweier unter unterschiedlichen Bedingungen aufgesättigter Wässer ist verstärkte Lösung möglich („Mischungskorrosion“).



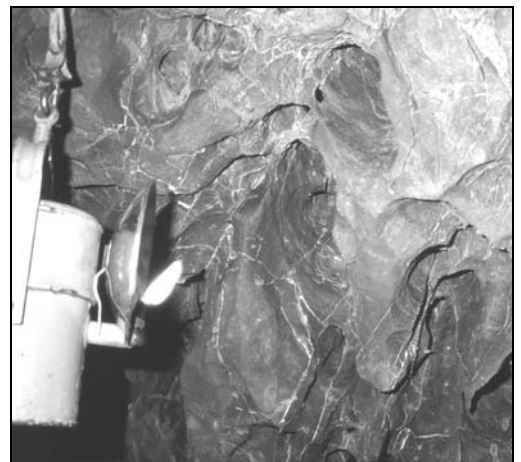
Kolk an Höhlenwand (C.Probst)

Wasserstandsmarken

Horizontale Kehle in der Höhlenwand. Entstanden entlang der Oberfläche stehender Gewässer, da an der Wasseroberfläche unter bestimmten Bedingungen verstärkt Korrosion stattfinden kann.

Karrenbildungen

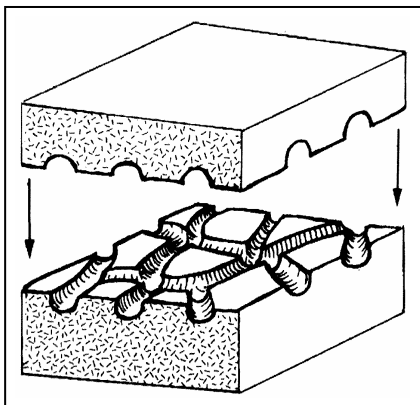
Verschiedene unter vadosen oder epiphreatischen Bedingungen entstandene Formen, die teilweise den Oberflächenformen ähneln. Die häufigsten sind Rinnenkarren, die unterhalb einer wasserführenden bzw. wasserspeichernden (bei schwankendem Wasserspiegel) Trennfläche ausgebildet sind.



Kleine Deckenkolke (möglicherweise hydrothermal entstanden, Altenburgerhöhle 2921/23, NÖ).

Bodenkolke, Strudeltöpfe

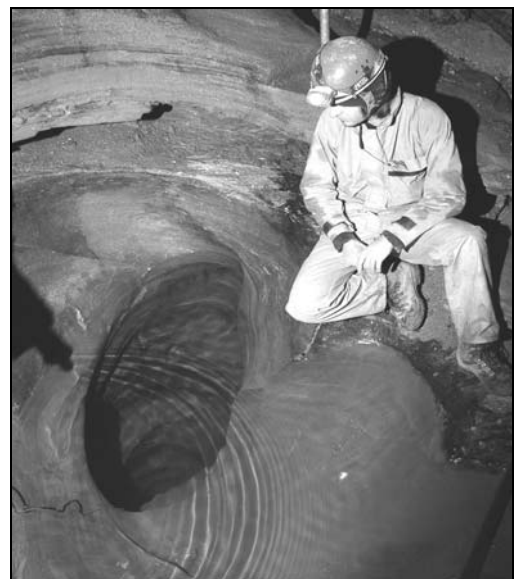
Zylindrische Eintiefungen mit bis zu einigen Metern Tiefe in der Gangsohle. Enthalten oft noch die gerundeten Steine, die für ihre Entstehung verantwortlich waren. Sie sind kennzeichnend für Passagen mit hohen Fließgeschwindigkeiten. Sie entstehen durch die bohrende Wirkung von rotierenden Steinen und zählen somit zu den erosiven Formen. Ähnliche Formen (Gesteins- und Gletschermühlen) gibt es auch an der Oberfläche.



Anastomosen an einer Trennfläche (aus Lauritzen & Lundberg, 2000).

Anastomosen

Röhren mit einigen cm bis dm Durchmesser entlang der Initialfuge. Entstanden unter phreatischen Bedingungen in einem frühen Stadium der Höhlenentstehung, bevor sich ein Hauptwasserweg (der heutige Höhlengang) „auf Kosten“ vieler Anastomosen entwickeln konnte.



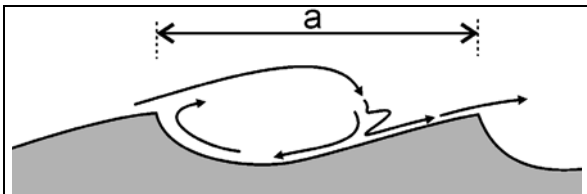
Mit Wasser gefüllter Bodenkolk (Spannagelhöhle, Tirol).

Deckenkarren, Deckenmäander

Phreatische Formen an der Höhlendecke. Es gibt mehrere Entstehungsmöglichkeiten: Teilweise handelt es sich um den oberen Teil von Anastomosen, die durch Herabbrechen des unteren Gesteinspaketes freigelegt wurden. Viele Formen entstanden durch sog. Paragenese (siehe nebenstehende Abbildung), wenn sich in einem völlig mit Sediment verfüllten Gang zwischen der Höhlendecke und dem Sediment neue Wasserwege ausbilden, wobei das Wasser nur korrosiv wirksam ist und die Strömungsenergie nicht ausreicht um das Sediment zu erodieren. Die Formen werden freigelegt, wenn in einer späteren Phase das Sediment wieder ausgeräumt wird. Paragenese ist in alpinen Höhlen wegen ihrer vielphasigen Entwicklungsgeschichte sehr häufig zu beobachten.

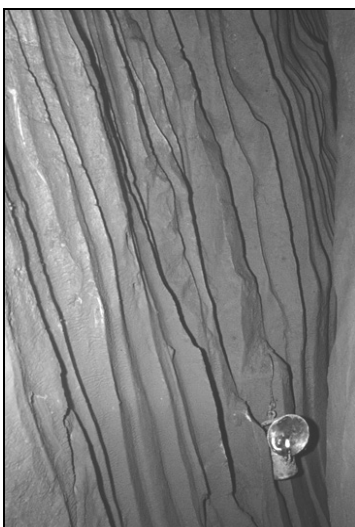
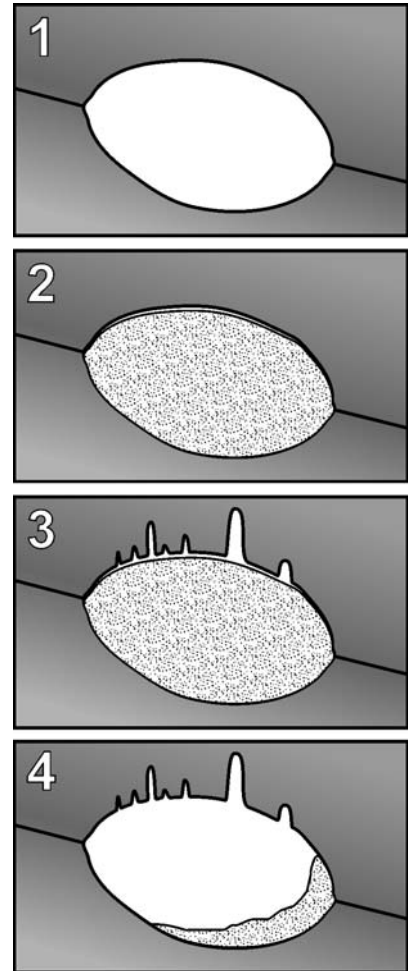
Fließfacetten

Flächenhaft angeordnete asymmetrische Näpfchen. Die Asymmetrie zeigt die Fließrichtung des Wassers an (siehe Abb.). Die Länge (a) ist indirekt proportional zur Fließgeschwindigkeit, wodurch über den Gerinnequerschnitt die Durchflussmenge berechnet werden kann. Ähnliche Formen können auch im Höhleneis beobachtet werden.

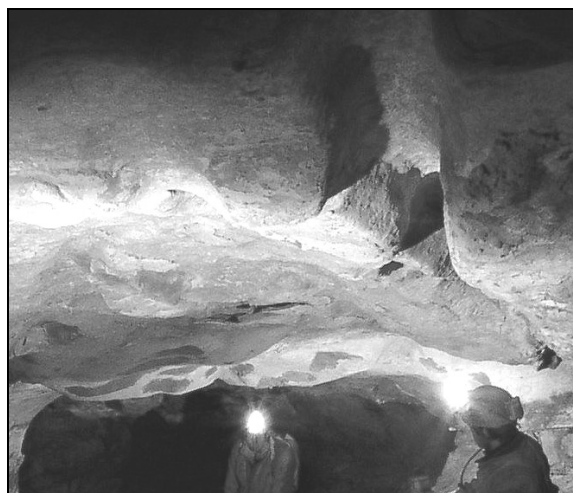


Längsschnitt einer Fließfacette mit Fließwegen des Wassers. „a“ ist die Länge der Fließfacette.

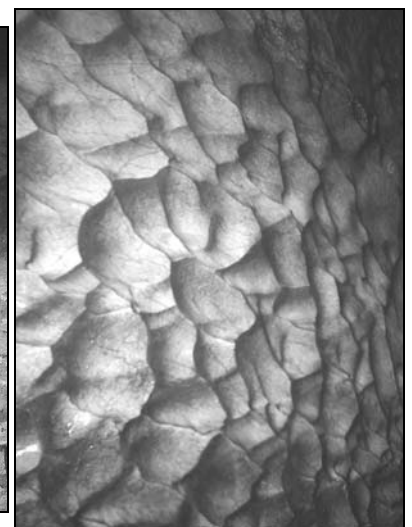
Paragenese: Ein Gang (1) wird mit Sediment verfüllt (2). Zwischen diesem und der Decke entstehen Wasserwege (Deckenmäander bzw. -karren) durch Korrosion (3). Das Sediment wird wieder ausgeräumt (4).



Rinnenkarren an einer Höhlenwand (Trockenes Loch, 1836/34, NÖ, W. Hartmann).



Paragenetische Deckenmäander (Grauer Riese 1625/391, Totes Gebirge, Stmk.).



Fließfacetten mit durchschnittlich 10–15 cm Länge. Fließrichtung von links nach rechts (Trockenes Loch, 1836/34, NÖ).

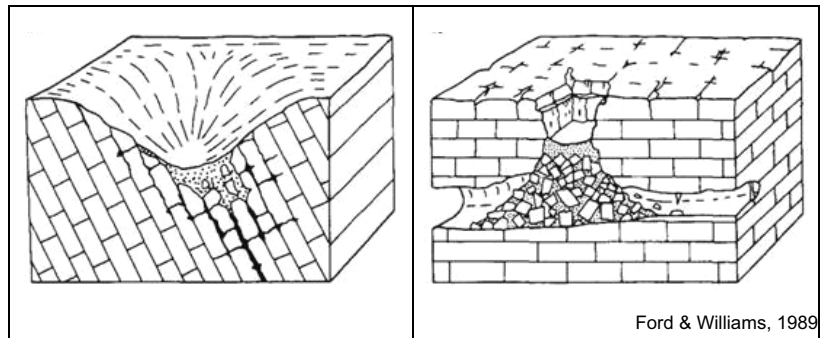
Oberflächen Karstformen – Großformen

Karstlandschaften weisen verschiedene typische Oberflächenformen auf. Der Höhlenforscher sollte diese Formen erkennen, da sie einerseits helfen Karstlandschaften bzw. gut verkarstungsfähige Gebiete als solche zu erkennen und andererseits oft in Zusammenhang mit der Höhlenentwicklung stehen und somit Aufschluss über mögliche unterirdische Karstformen geben können.

Karsthohlformen

Dolinen

Dolinen sind besonders charakteristische Formen von Karstlandschaften. Es sind einfache meist rundlich-ovale schüssel-, trichter- oder zylinderförmige (schachtartige) Hohlformen mit unterirdischem Abfluss. Ihr Durchmesser reicht von wenigen Metern bis zu über 1000 m. Auch die Tiefe kann 100 m weit übersteigen. Nach ihrer Entstehung unterscheidet man generell Lösungsdolinen, wo ein langsamer Verkarstungsprozess die Hohlform bildet, und Einsturzdolinen, bei denen unterirdische Hohlräume plötzlich einstürzen. Die Unterscheidung zwischen diesen Typen ist nicht immer einfach.



Lösungsdoline

Einsturzdoline

Nach ihrer Form kann man folgende Typen unterscheiden (nach Fink, 1973):



Trichterdoline

Wannendoline

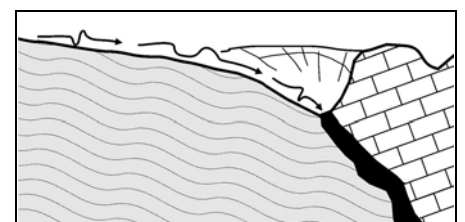
Muldendoline

Schachtdoline

Ponordolinen sind Hohlformen, in die ein permanentes oder temporäres Gerinne eintritt. Prinzipiell haben aber alle Lösungsdolinen die Eigenschaft, dass sie Wasser punktuell in den Karst infiltrieren und dadurch sind unterhalb der meisten Formen größere Wasserwege, also befahrbare Höhlen, ausgebildet. Oft sind diese aber durch nachrutschenden Schutt und eingeschwemmten Lehm verstopft. In etlichen Formen konnten schon großräumige Höhlen ergraben werden.

Schacht oder Doline?

Bei Schachtdolinen wird für die Einteilung das Verhältnis von Durchmesser zu Tiefe herangezogen. Ist der Durchmesser größer als die Tiefe, wird die Form als Doline bezeichnet, ist er kleiner als Schacht. Natürlich gibt es im Grenzbereich Übergangsformen.



Ponordoline mit Höhle am Kontakt von Karst- und Nicht-Karst-Gestein.

Uvalas

Uvalas sind größere unregelmäßige Hohlformen, die aus mehreren Hohlformen (Dolinen) zusammengesetzt sind. Im alpinen Raum ist eine weitere Unterteilung sinnvoll:

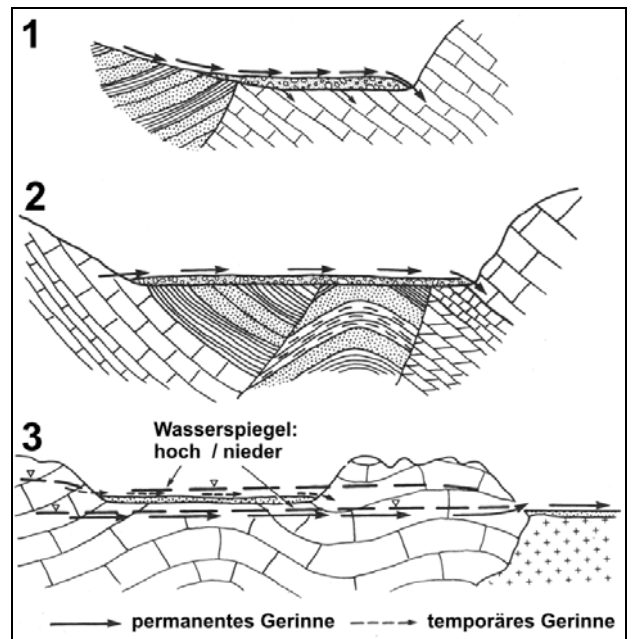
Karstmulden: Große geschlossene Karsthohlformen mit unregelmäßigem Boden, der oft von Dolinen weiter untergliedert wird.

Karstwannen: Große geschlossene schüsselförmige Karsthohlformen mit ebenem, meist durch Lehme abgedichtetem Boden, der sich mit scharfem Knick, der tw. von kleinen Dolinen nachgezeichnet wird, von den Seitenflanken absetzt.

Poljen

Ein Polje (das Polje) ist eine große (mehrere 100 m Durchmesser) geschlossene Karsthohlform, die Wasserzutritte aufweist und von Oberflächengerinnen durchflossen wird. Der flache Boden kann als „normale“ fluviale Landschaft betrachtet werden, während die steileren Flanken verkarstet sind. Die Wasserläufe können auch temporär sein, wobei die Gerinne an Ponoren (Schwinden) wieder in den Karst eintreten. Bei großem Wasserangebot kann es zur Überflutung des Poljes kommen. Mehrere Bedingungen können zur Ausbildung dieser Karsthohlform führen (siehe nebenstehende Abb.):

1. **Grenzpolje:** Sedimentschüttungen aus nicht verkarsteten Gebieten können den Boden abdichten.
2. **Strukturpolje:** Aufgrund tektonischer Gegebenheiten kann die Basis aus wasserstauenden Gesteinen aufgebaut sein.
3. **Vorfluterpolje:** Der Boden entspricht dem Niveau des Vorfluters und hat kein Erosionspotential mehr.



Typen von Poljen (aus Ford & Williams, 1989).

Da an den Schwinden oft große Wassermengen infiltrieren, bestehen besonders gute Chancen, dass großräumige Höhlen ausgebildet sind. Diese sind aber oft verstopft.

Polygenetische Hohlformen

In den Alpen gibt es oft Hohlformen, deren Entstehung neben Verkarstung auch auf Gletscher-Erosion zurückzuführen ist.

Lineare Karstformen

Trockentäler

Dies sind nicht mehr wasseraktive Täler im Karst. Oft zeigen Dolinen oder Ponore, dass kein durchgehender Wasserlauf mehr möglich ist. Ihre Entstehung geht auf eine Zeit zurück, wo die Verkarstung noch nicht so entwickelt war und es noch Oberflächengerinne gegeben hat oder durch Permafrost die Infiltration in den Karst nicht möglich war.

Karstgassen

Sind mehrere Meter bis Zehnermeter breite und um ein Vielfaches längere geradlinige Gräben mit meist steilen Wänden. Das Gefälle muss nicht gleichsinnig sein und der Boden kann von Dolinen und Schächten durchsetzt sein. Sie entstehen entlang von Störungszonen.

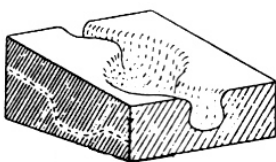
Oberflächen Karstformen – Kleinformen

Karren

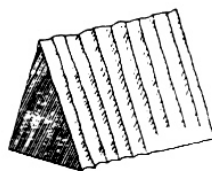
Karren sind korrosiv entstandene Kleinformen der Karstlandschaft. Die alpinen Typen können folgendermaßen eingeteilt werden:

	Neigung	freier Abfluss				gebundener Abfluss	
		flächige Korrosion		lineare Korrosion		strukturgebundene Korrosion	
Freie Felsfläche (Nackter Karst)	flach	Skulpturformen	Karrenbecken (=Kamenica) Trittkarren	freiliegend gebildete Rinnenkarren	mäandrierende Rinnenkarren	freie Strukturkarren (scharfgratige Korrosionsformen an lithologischen Trennflächen)	
	steil		Grübchenkarren Firstrillenkarren				Rinnenkarren (± in Falllinie)
Boden-bedeckte Felsfläche (Bedeckter Karst)	flach	flächige Korrosion ohne spezielle Karrenformen		subkutane Karren (Rundkarren)	mäandrierende Rund- und Hohlkarren		subkutane Strukturkarren (gerundete Korrosionsformen an lithologischen Trennflächen)
	steil				Rund- und Hohlkarren (± in Falllinie)		

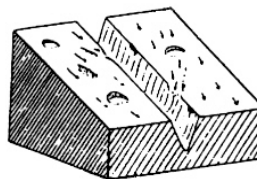
Besonders die Differenzierung von Formen, die ohne Bodenbedeckung entstanden sind und subkutan (unter einem Boden) gebildeten Karren, lässt Rückschlüsse auf die Vegetationsbedeckung während der Genese zu.



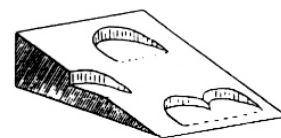
Rundkarren



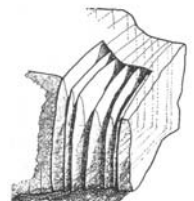
Firsttrillenkarren



Rinnenkarren



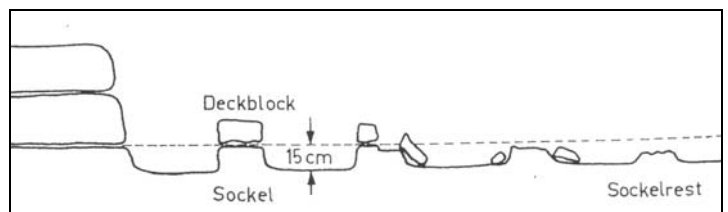
Trittkarren



Strukturkarren

Karsttische (Karrentische)

Karsttische sind Sockel unter Felsblöcken, die entstehen, wenn die Umgebung durch die Korrosion des Niederschlagswassers abgetragen wird, aber unter dem Felsblock kein Niederschlag fällt. Geht man in glazial überformten Gebieten davon aus, dass die Lage der Blöcke seit dem Eisrückzug unverändert ist, dann entspricht die Höhe des Sockels dem Karbonatabtrag in dieser Zeitspanne.



Karrentische nach Bögli, 1978

Karstgebiete Österreichs

In der nachfolgenden Karte ist – in schwarzer Farbe unterlegt – überblicksartig die Verbreitung der verkarstungsfähigen Gesteine (nicht der Höhlengebiete!) – insgesamt rund 21 % des österreichischen Staatsgebietes – ausgewiesen. In diesen überwiegend karbonatischen Gesteinen finden sich naturgemäß die meisten der derzeit knapp 14 000 Höhlen Österreichs. Doch auch außerhalb dieser Zonen konnten und können immer wieder bedeutende Höhlen entdeckt werden.

Der Nordosten Österreichs hat einen flächenmäßig erheblichen Anteil am **Südböhmischen Kristallin**, das durch Mühl-, Wald- und (teilweise) das Weinviertel repräsentiert wird. Verkarstungsfähige Gesteine (hauptsächlich Marmor) finden sich hier nur sehr selten, die Höhlen sind zumeist rein tektonisch entstanden oder auch als teilweise recht ausgedehnte Blockhöhlen in Nichtkarstgesteinen (z.B. Granit) entwickelt.

In den **Beckenlandschaften** (z.B. Wiener Becken) gibt es gesteinsbedingt nur recht wenige Höhlen, die dann zumeist in verfestigten Konglomeraten und jungtertiären Kalken (z.B. Leithakalk) entwickelt sind. Auch die südlich anschließende **Molasse**- und die **Flyschzone** sind materialbedingt äußerst höhlenarm, wiewohl auch nicht wirklich hinreichend untersucht.

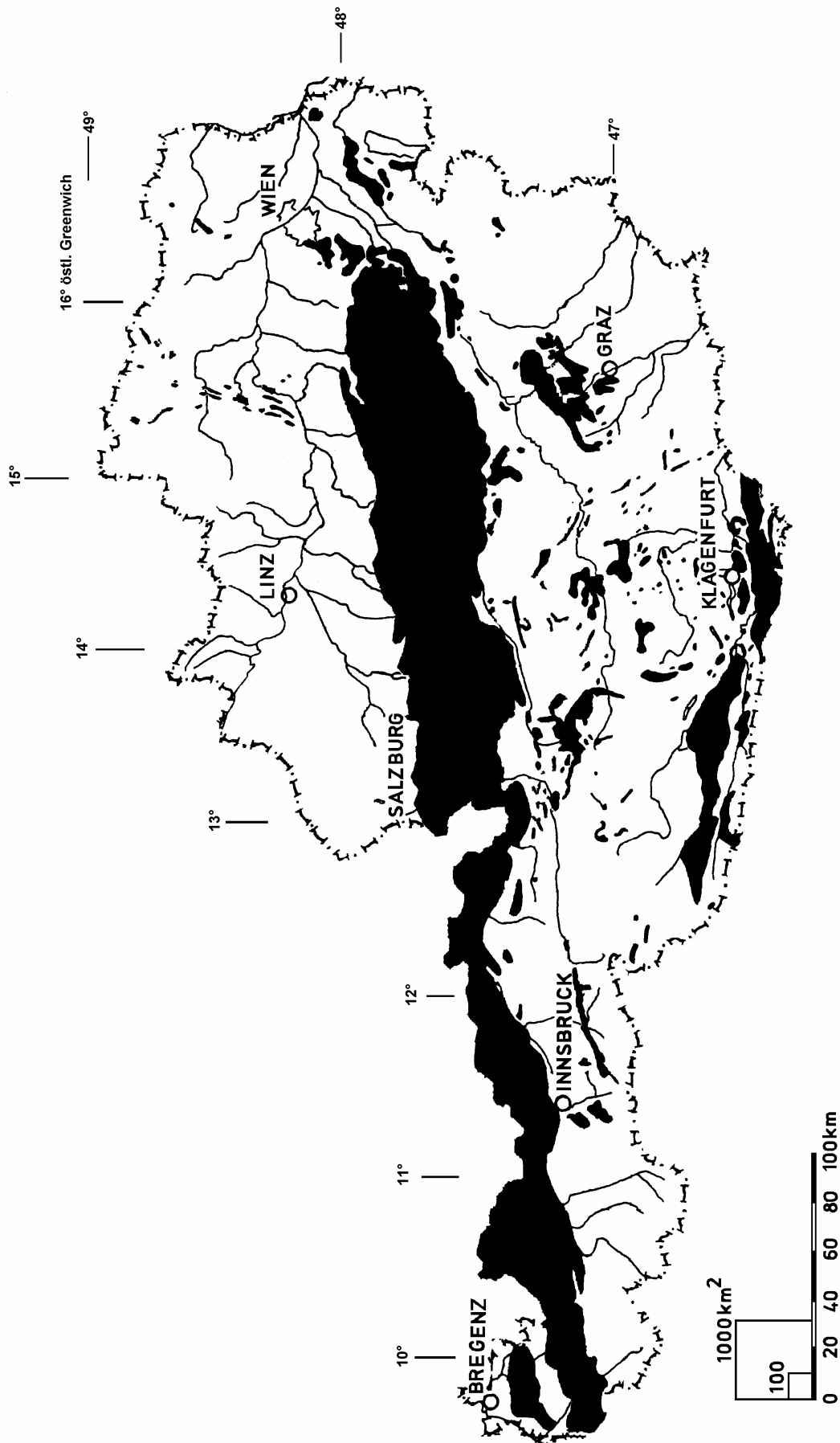
Im **Helvetikum** bzw. **Ultrahelvetikum** trifft man im vor allem im Westen Österreichs, in Vorarlberg, auf einen breiten Bereich bedeutender und höhlenreicher Karstgesteine jurassisch-kretazischen Alters (z.B. Schrattekalk)

In den **Nördlichen Kalkalpen**, wo sich der flächenmäßig weitaus größte (und die nachstehende Abbildung auch entsprechend dominierende) und vielfach zusammenhängende Bereich verkarstungsfähiger Gesteine befindet, dominieren triassische Karstgesteine, vor allem Dachsteinkalk, in dem die weitaus größten Höhlensysteme entwickelt sind und der hauptsächlich im östlichen Bereich der Nördlichen Kalkalpen verbreitet ist. Daneben sind exemplarisch Wettersteinkalk und -dolomit sowie Hauptdolomit zu nennen. Alle genannten Gesteine können Mächtigkeiten von 1000 Metern und mehr erreichen. Die Dolomitgesteine sind zwar als Höhlenmuttergesteine aufgrund ihrer gesteinsmechanisch bedingten Brüchigkeit relativ wenig bedeutend, als Karstwasserspeicher jedoch durchaus von erheblicher Relevanz für die Trinkwasserversorgung im alpinen Raum. Die geringer mächtigen jurassisch-kretazischen Karstgesteine sind in den Nördlichen Kalkalpen zwar oftmals bereits der Erosion zum Opfer gefallen, jedoch als Träger des Karstphänomens mancherorts von durchaus regionaler Bedeutung (z.B. Plassenkalk, Oberalmer Schichten).

Die **Zentralalpen** erscheinen auf den ersten Blick für die Höhlenbildung weniger prädestiniert, doch findet sich hier eine überraschende, wenngleich oft kleinräumige Vielfalt an meist metamorphen Karbonaten (Marmoren), die in weiten Bereichen noch einer genauen karstkundlichen Untersuchung harren. In den tektonisch höheren Bereichen der Zentralalpen zeigen sich dabei durchaus Verwandtschaften der triassischen Schichtfolgen mit jener der Nördlichen Kalkalpen – so etwa in den Niederen Tauern. In den Hohen Tauern indessen finden sich bedeutende Karst- und Höhlengebiete hauptsächlich in den jurassischen Hochstegen- und Klammkalken.

Im Südosten des Bundesgebietes liegt mit dem **Grazer Paläozoikum** der größte zusammenhängende Bereich von schwach metamorphen Kalken devonischen Alters (z.B. Schöcklkalk), wo eine große Zahl bedeutender und überaus tropfsteinreicher Höhlen beheimatet ist.

Die **Südlichen Kalkalpen** (Nordkarawanken, Dobratsch, Lienzer Dolomiten) und die **Südalpen** (Karnische Alpen, Südkarawanken), sind durch die „Periadriatische Naht“, eine gewaltige, hunderte Kilometer lange Bewegungsfläche getrennt. Hier gibt es sowohl recht mächtige Karstgesteine aus der Trias (untergeordnet auch aus dem Jura), als auch aus dem Paläozoikum, das vor allem in den Südalpen größere Mächtigkeiten erreicht (z.B. Troglkofelkalk).



Die verkarstungsfähigen Gesteine in Österreich (Grundlage: Geologische Karte der Republik Österreich. Entwurf: Günter Stummer).

Zeitliche Einstufung wichtiger verkarstungsfähiger Gesteine

Oft ist es für den Höhlenforscher sinnvoll sich mit der Geologie des Gebietes, in dem er seine Forschungen betreibt, auseinander zu setzen. Geologische Karten und Beschreibungen bzw. die Kenntnis der Gesteine helfen bei der Suche nach neuen Höhlen oder unter anderem auch bei der Beurteilung des Forschungspotentials einer Höhle. Außerdem sollte eine gute Höhlendokumentation die Angabe des (der) Gesteins(e), in dem sich die Höhle befindet, beinhalten.

Die geologische Zeittafel auf der folgenden Seite soll dabei helfen, sich bei geologischen Beschreibungen, bei denen die einzelnen Schichten meist in chronologischer Reihenfolge behandelt werden, zurechtzufinden.

Stratigraphie und Geochronologie

Die für die Darstellung der 4,6 Ga (Milliarden Jahre) Erdgeschichte notwendige zeitliche Gliederung liefern uns die Stratigraphie und die Geochronologie. Die Stratigraphie gibt eine hierarchisch gegliederte relative Einteilung von den großen Abschnitten bis hin zu den kleinen (z.B. Stufen).

Die absoluten Alter liefert uns die Geochronologie mit ihren unterschiedlichsten Datierungsmethoden. In der Zeittafel wurden die Alter der Stufen in Ma (Millionen Jahren) angegeben – diese können aber in den verschiedenen Publikationen - je nach Forschungsstand – etwas variieren. Die Darstellung der Zeit ist natürlich nicht maßstäblich. Maßstäblich dargestellt würde z.B. das Quartär mit rund 2 Ma nur ca. 0,5% auf der Zeitachse ausmachen.

Es muss festgehalten werden, dass diese Gliederungen nicht weltweit gültig sind. So gilt die in der Zeittafel angegebene Serien und Stufengliederung der Trias nur für den alpinen Raum und die des Tertiärs nur für das Wiener Becken.

Bei den Beispielen für die Gesteine, die in der jeweiligen Zeit abgelagert wurden, sind einige für Höhlenforscher wichtige Vertreter ausgewählt, ohne die Zugehörigkeit zu ihrem Ablagerungsraum zu berücksichtigen. Sie dürfen also nicht als Schichtfolge gelesen werden!

Bei den Höhlen wurden einige bekannte Objekte angeführt, die in diesen Gesteinen entwickelt sind.

Literatur:

Faupl, P. (1997): **Historische Geologie, Eine Einführung**. Wien. WUV-Universitätsverlag (ISBN 3-85114-356-6). Gibt einen breiten recht detaillierten Einblick in die Ereignisse der Erdgeschichte. Mit besonderer Berücksichtigung Österreichs und der Alpen. Kenntnisse der Grundbegriffe der Geologie sind hilfreich.



	System	Ma	Serie	Stufe	Ablagerung wichtiger Gesteine	Bsp. f. Höhlen i. diesen Gesteinen
K ä n o z o i k u m	Quartär	0,01	Holozän (Geol. Gegenwart)			Bildung von Tuffhöhlen (Primärhöhlen!)
		~2	Pleistozän (Eiszeit)		Quartäre Schotter, Moränen...	viele Uferhöhlen
	Tertiär	Neogen	Pliozän			
			Miozän		Leithakalk	Höhlen in St. Margarethen (Bgld.) (Augensteinsedimentation)
	Paleogen	24	Oligozän			
			Eozän			
		65	Paleozän		Schichten der Höheren Gosau	kaum verkarstungsfähig
M e s o z o i k u m	Kreide	144	Ober-		Schichten der Tieferen Gosau	kaum verkarstungsfähig
			Unter-		Schrattenkalk	Schneckenloch (V)
	Jura	206	Malm		Hochstegenmarmor	Spannagelhöhle (T)
			Dogger		Klauskalk	
			Lias		Hierlatzkalk / Adneter Kalk	
	Trias	248	Ober-	Rhät	Dachsteinkalk und Haupt- dolomit	fast alle großen Höhlen , große Karst Plateaus (Dachstein, Tennengeb. Totes Geb...)
				Nor		
				Karn	Opponitzer Kalk Lunzer Schichten	nicht verkarstungsfähig
			Mittel-	Ladin	Wettersteinkalk u. -dolomit / Reifflinger Kalk	Kettengebirge der NKA in W- Österreich, Hochschwab: (Frauenmauer-Langstein-Höhlensys.)
				Anis	Steinalmkalk Gutensteiner Kalk	Schachernhöhle (NÖ)
			Unter-	Skyth	Werfener Schichten	nicht verkarstungsfähig, bedeutender Wasserstauer (Schichtgrenzhöhlen!)
P ä l ä o z o i k u m	Perm	290			Haselgebirge (Salz, Gips, Anhydrit...)	viele der Gipshöhlen
	Karbon	354				
	Devon	417			Hochlantschkalk Schöcklkalk (Marmor)	Höhlen im „Grazer Paläozoikum“: Drachenhöhle, Lurgrotte...
	Silur	443				
	Ordovizium	494				
	Kambrium	545				
Proterozoikum					Marmor der Böhmischen Masse	Höhlen des Kremszwickel (NÖ): Gudenushöhle...
Archaikum			2500			
Hadäikum			4000			
			4600			Entstehung der Erde

Trennflächen im Gestein

Trennflächen bestimmen maßgeblich die Anlage von Höhlen

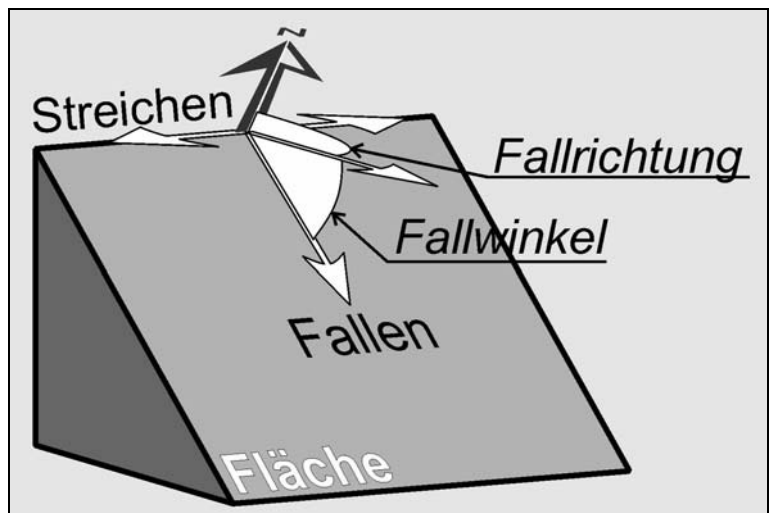
Für den Höhlenforscher ist es wichtig Trennflächen zu erkennen und zu charakterisieren, da wasserwegsame Fugen eine der Voraussetzungen für die Entstehung von Karsthöhlen sind. Erst diese ermöglichen das Eindringen von Wasser in den Gebirgskörper. Die Beschaffenheit und die räumlich Lage solcher Flächen haben großen Einfluss auf den Verlauf von Höhlen.

Prinzipiell muss man **Schichtflächen** und **Tektonische Trennflächen** unterscheiden.

Angabe der räumlichen Lage von Trennflächen

Flächen werden am einfachsten durch **Fallrichtung** und **Fallwinkel** definiert. Die Fallrichtung ist die Richtung (Angabe wie bei den Kompassrichtungen) der Falllinie, der Fallwinkel ist der Winkel zwischen der Fläche und der Horizontalen und gibt also die Neigung der Fläche wieder.

Bei fast senkrechten Flächen (z.B. Klufrichtung) ist es oft anschaulicher das **Streichen** der Fläche, also die Richtung einer Horizontalen auf der Fläche, anzugeben. Verwendet man die Streichrichtung auch für nicht senkrechte Flächen, so muss man zusätzlich angeben in welche Richtung die Fläche einfällt (die Streichrichtung ist nicht eindeutig!).



Beispiel:

Fallrichtung Fallwinkel	Streichen	Beschreibend	Symbol f. Schichtfallen
090/10	0 – 180	flach nach Osten	┐
247/80	157 – 337	steil nach Westsüdwesten	↙

Wie kann man Flächen mit den üblichen Vermessungsgeräten messen?

Wird der Kompass horizontal an die Fläche angehalten kann eine der Richtungen des Streichens abgelesen werden. Für die Fallrichtung müssen dann 90° addiert bzw. subtrahiert werden (Überlegen wohin die Fläche einfällt!). Legt man den Neigungsmesser an die Fläche an, so kann man das Einfallen messen.

Messung mit dem Geologenkompass

Für genauere und schnellere Messungen wird ein Geologenkompass (nach E. Clar) verwendet. Dieser ermöglicht das Ablesen von Fallrichtung und Fallwinkel mit einer Messung. Bei horizontaler Lage des Kompasses (Libelle) kann seitlich der Fallwinkel abgelesen werden. Die Seite der zweifarbigen Kompassnadel zeigt zur Fallrichtung, welche dieselbe Farbe wie die Skala im Bereich des abgelesenen Fallwinkels hat.

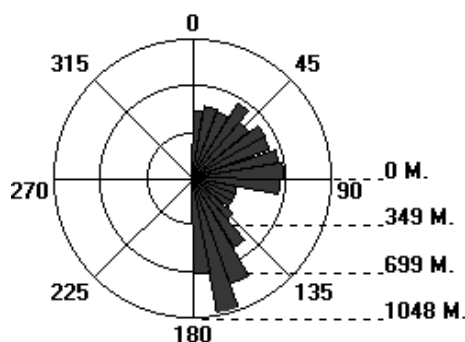


Darstellung von Flächen

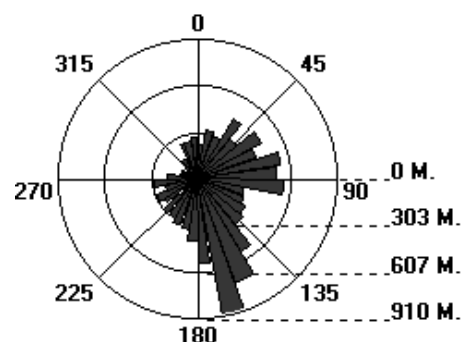
Um Aussagen über die Richtungsverteilung von Flächen zu erhalten ist es hilfreich diese graphisch darzustellen. Will man daraus bevorzugte Richtungen der Höhlenentstehung und Verkarstung ablesen, so ist es weiters wichtig zu beobachten, an welchen Flächen Verkarstung stattgefunden hat. Viele Flächen die in der Höhle gemessen werden können sind zwar deutlich ausgeprägt (z.B. Harnischfläche, die durch Versturzvorgänge freigelegt wurde), hatten aber auf die Anlage der Gänge keinen Einfluss.

Kluftrosen

Mehr oder weniger vertikale Trennflächen aus Geländemessungen bzw. Lineamente aus der Luftbildinterpretation werden als Kluftrosen dargestellt. Auch Höhlenvermessungsdaten können annäherungsweise für die Charakterisierung des Trennflächennetzes herangezogen werden, wenn man geringe Fehler durch schräg zum Gang verlaufende Visurlinien vernachlässigt. Dabei werden die einzelnen Streichrichtungen in Klassen (z.B. 10°) aufsummiert und nach ihren Richtungen aufgetragen.



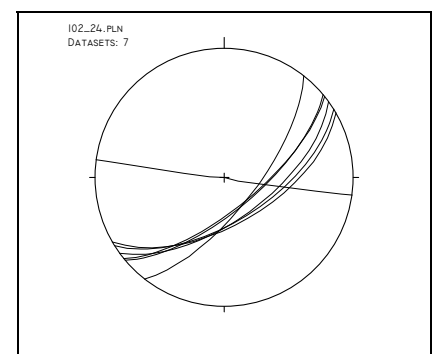
Mit dem Messdatenberechnungsprogramm COMPASS erzeugte Kluftrose der Polygonzug-Richtungen des Burgunderschachtes (1625/20). Man kann erkennen, dass NNW-SSE und E-W streichende Trennflächen dominieren. Die Meterangaben beziehen sich auf die aufsummierten Längen der einzelnen Klassen.



Selber Datensatz wie links, wobei bei der Darstellung die Neigung des Messzuges berücksichtigt wurde. Zusätzlich kann man hier ablesen, dass das Einfallen der Schichten nach SSE ebenfalls großen Einfluss auf die Anlage der Höhlengänge hat.

Komplexere Methoden

Zur Darstellung von Fallrichtung und Fallwinkel werden stereographische Projektionen wie z.B. das Schmidt'sche Netz verwendet. Bei dieser Methode wird der Verschnitt von Flächen mit dem unteren Teil einer Halbkugel (vergleichbar einer Salatschüssel) als Grundriss projiziert. Je steiler eine Fläche ist, desto näher verläuft ihr Großkreis (Kreisbogen) beim Mittelpunkt. Flach einfallende Flächen projizieren nahe beim Umkreis der Halbkugel. Details zu dieser Darstellung findet man in Eisbacher (1996).



Stereographische Projektion: Darstellung von Flächen als Großkreise im Schmidt'schen Netz (untere Halbkugel).

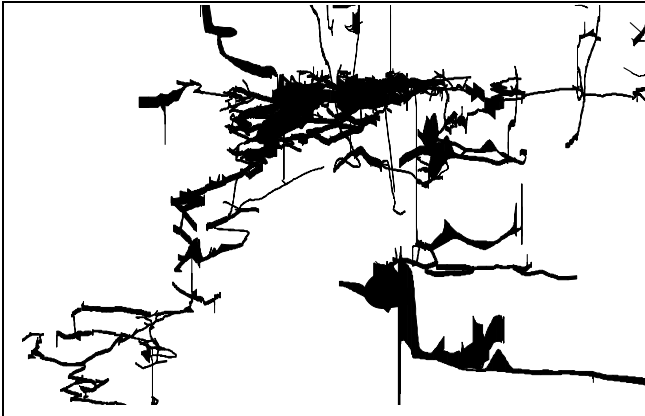
Literatur:

Eisbacher, H. (1996): Einführung in die Tektonik. - Spektrum Akademischer Verlag. ISBN: 3827412307.

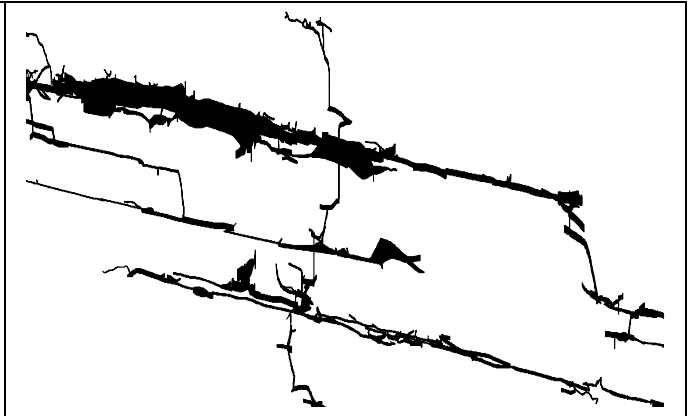
Sedimentäre Schichtung

Durch sedimentäre Schichtung können wasserwegsamen Fugen entstehen, welche die Richtung der unterirdischen Entwässerung und somit der Höhlenbildung vorgeben. Weiß man über die Ausbildung und räumliche Lage Bescheid, kann man abschätzen in welche Richtung sich Höhlen bevorzugt entwickelt haben.

Sedimentäre Schichten entstehen während der Ablagerung des Gesteins durch Änderung bzw. Unterbrechung der Sedimentation. Wie die meisten Sedimentgesteine weisen auch viele Kalke und Dolomite sedimentäre Flächen auf.



Ausschnitt (Gr. Horizontalsystem) des Burgunderschachtes im Aufriss. Blickrichtung (NW).



Selber Ausschnitt wie links. Blick in Richtung des Streichens der Schichten (NNE). Man erkennt, dass die Gänge an wenigen Schichtfugen angelegt sind.

Wichtige Begriffe bei der Beschreibung sedimentärer Flächen

Je nach Dicke der Schichten unterscheidet man:

- **Bankung:** Meter-Bereich
- **Schichtung:** Dezimeter-Bereich
- **Lamination:** Sehr regelmäßige Feinschichtung, typischerweise im Millimeter-Bereich

Beschreibung der Lage von Schichten bzw. Gesteinsblöcken:

- **(das) Hangende** (die hangende Schicht): Bezeichnet die darüber befindliche Schicht (bzw. das Gesteinspaket). Der Begriff bezieht sich auf die räumlichen Verhältnisse und nicht auf die zeitlichen, welche durch Faltung und Überkippen der Schichten nicht mehr übereinstimmen müssen.
- **(das) Liegende:** bezeichnet die darunter liegende Schicht.

Signaturen auf geologischen Karten für das Einfallen von Schichten

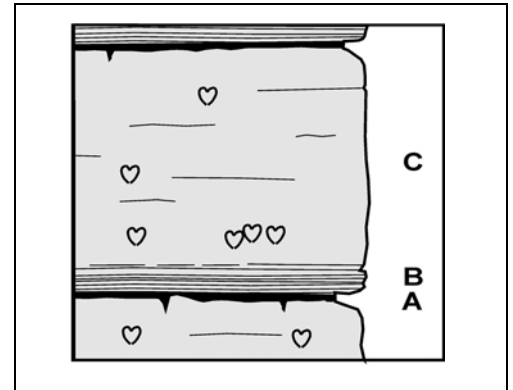
Auf detaillierten geologischen Karten ist auch das Einfallen der Schichten dargestellt. So können oft schon grobe Vorhersagen über unterirdische Entwässerungsrichtungen getroffen werden.

+	└	⬆	⬇	+	
0° – 5°	– 30°	– 60°	- 85°	- 90°	> 90°
eben (söhlig)		flach	steil	senkrecht (saiger)	überkippt

Wie entsteht Schichtung?

Schichtzyklen am Beispiel des Dachsteinkalkes

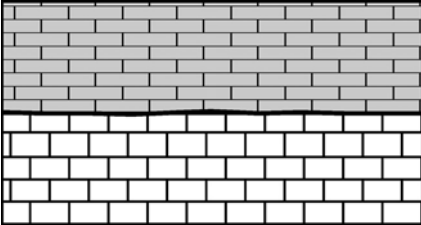
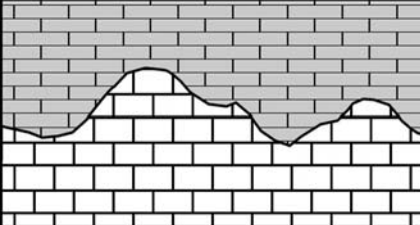
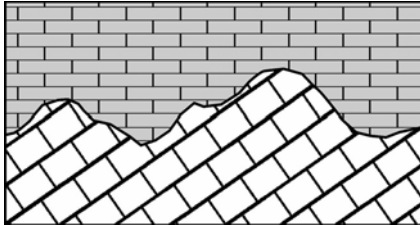
Die gebankten Dachsteinkalke wurden in durch Riffe geschützten Lagunen abgelagert. Aus der zyklischen Abfolge der Bänke lässt sich ablesen, dass Teile der Karbonatplattform immer wieder trocken gefallen sind. Unter dem Aufarbeitungshorizont (A) bildete sich ein schwacher Paläokarst aus, welcher vereinzelt auch Bodenbildungen zeigt. Anschließend hatten sich knapp über bzw. im Bereich der Gezeiten dünne Schichten von Algen (dolomitische Algenlaminite) entwickelt (B). Nach dem weiteren (relativen) Anstieg des Meeresspiegels bildete sich dann unterhalb der Gezeitenlinie im flachen Wasser der Megalodonten (Kuhtrittmuscheln) führende Kalk (C). Diese Bankfolge wiederholt sich viele Hunderte Male. Die massigen, d.h. schichtungslosen Dachsteinkalke repräsentieren dagegen den eigentlichen Riffbereich mit Korallen und Kalkschwämmen.



Aufbau einer ideal ausgebildeten Dachsteinkalkbank

Schichtkontakte

Aus der Art der Abfolge zweier Schichten lässt sich erkennen, ob und welche geologische Ereignisse stattgefunden haben. Folgende Abbildung zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten der Abfolge von Sedimentschichten:

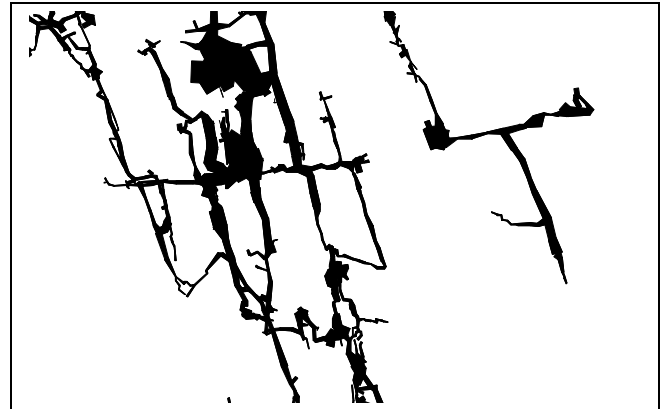
Konkordante Schichtung	Erosionsdiskordanz	Winkeldiskordanz
		
Zwischen der Ablagerung der Schichten hat keine Erosion stattgefunden (kann trotzdem große Zeitspanne umfassen).	Zwischen der Ablagerung der Schichten war eine Unterbrechung, in der Erosion stattgefunden hat.	Zwischen der Ablagerung der Schichten ereignete sich eine Faltungsphase mit Erosion.

Liegt über einem nicht verkarstungsfähigen Gestein (z.B. Sandstein) ein verkarstungsfähiges (z.B. Kalk) kann ein sog. Kontaktkarst mit Schichtgrenzhöhlen entstehen, da das Wasser bevorzugt am Kontakt der beiden Gesteine in den Untergrund eintritt.

Bruchtektonische Strukturen

Eine weitere Möglichkeit für die Bildung wasserwegsamere Fugen ist die spröde (bruchhafte) Deformation des Gesteins. Das oft regelmäßige Netzwerk der dadurch entstandenen Flächen kann meist schon beim Betrachten von Höhlenplänen beobachtet werden. Für den Höhlenforscher ist das Erkennen tektonischer Trennflächen wichtig, da sie sowohl Einfluss auf die Verkarstung haben, als auch die Stabilität des Gesteins bestimmen. So können sich zum Beispiel an größeren Störungen Versturz zonen in der Höhle bilden.

Die Fachrichtungen die sich mit diesen Phänomenen beschäftigen nennt man Struktur geologie bzw. Tektonik.



Störungsgebundener Höhlenverlauf (Grundriss) im großen Horizontalsystem des Burgunderschachtes (1625/20, Stmk).

Welche bruchtektonischen Strukturen gibt es?

Klüfte

(Bruch)fuge ohne merkbaren Versatz. Sie entstehen u. a. durch Spannungsausgleich oder Entlastung. Fälschlicherweise werden in Höhlenbeschreibungen fast alle tektonischen Trennflächen als Klüfte bezeichnet. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich aber bei den meisten um Störungen (s.u.).

Spalten

Offene Fuge im Gestein von meist wenigen mm Öffnungsweite. Spalten sind für die Höhlenentstehung von untergeordneter Bedeutung, da sie meist nur relativ geringe Ausdehnung haben.

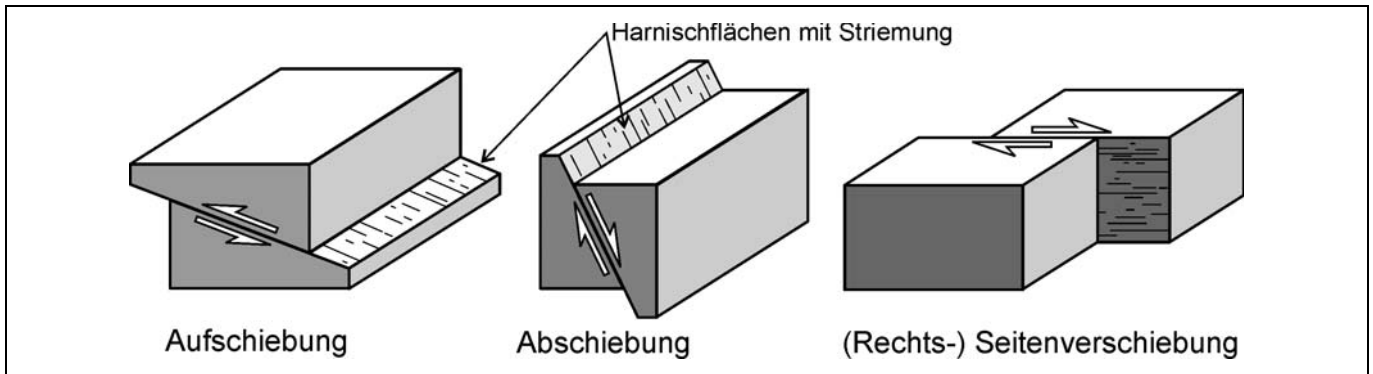
Bergzerreißen, Abrissklüfte

Entstehen durch Rotieren bzw. Abgleiten von hangnahen Felspartien bei fehlendem Gegendruck (eiszeitlich übertiefte Täler). Teilweise entstehen dadurch befahrbare Höhlen mit typischen schmalen hohen Profilen welche oft durch Blockwerk in Etagen untergliedert sind.

Störungen (= Verwerfungen)

Trennflächen, an denen ein merkbarer Versatz stattgefunden hat. Je nach Bewegungsrichtung werden sie in 3 Gruppen unterteilt:

- **Blattverschiebung (= Seitenverschiebung)** Zwei Gesteinspakete werden horizontal gegeneinander verschoben. Um die Richtung der Bewegung anzugeben, bezieht man sich immer von einem Block ausgehend auf die relative Bewegungsrichtung des anderen Blockes (es ist egal von welchem Block man ausgeht!). Somit unterscheidet man Störungen mit linksseitigem (sinistralen) und rechtsseitigem (dextralen) Schersinn.
- **Aufschiebung** Wird der Block über der Störungsfläche auf den darunter liegenden geschoben so spricht man von einer Aufschiebung. Es kommt zu einer Verkürzung in der Bewegungsrichtung.
- **Abschiebung** Hier wird der hangende Block vom liegenden abgeschoben. Es kommt zu einer Ausdehnung in Bewegungsrichtung.



Die durch Störungen entstehenden, meist recht glatten Flächen, die oft freigelegt sind, nennt man **Harnischflächen**. Wenn eine Striung (=Lineation) ausgeprägt und erhalten ist, kann man auf die Bewegungsrichtung rückschließen.

Bei größeren Versatzbeträgen bilden sich zwischen den Harnischflächen durch das Zerschneiden des Gesteins **Reibungsbrekzien** aus. Sind diese verfestigt, so werden sie als **Kataklasit** bezeichnet, unverfestigte nennt man **Kakirit**. Störungsgesteine haben auf die Verkarstung und Höhlenbildung großen Einfluss, da sie besondere hydrologische Eigenschaften haben – sie sind meist gut wasserdurchlässig, können aber auch völlig dicht sein. Der früher für diese Gesteine verwendete Begriff „**Mylonit**“ bezeichnet Gesteine der plastischen (=duktilen) Deformation, welche während einer Metamorphose unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen entstehen.

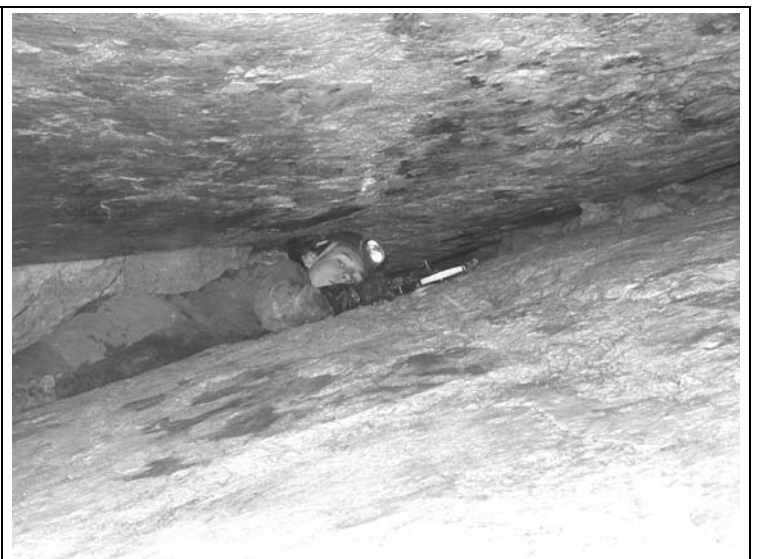
Besonders interessant sind Störungen die jünger als der Höhlenraum sind, also diesen versetzen oder „zerschneiden“. Sie sind ein Hinweis auf junge Tektonik.



Harnischfläche einer Abschiebung mit deutlicher vertikaler Striung (Hirschgrubenhöhle).



Kataklasit (= Reibungsbrekzie; Hirschgrubenhöhle, 1744/450 Hochschwab).



Höhlenraum zwischen zwei Harnischflächen, der durch Ausspülen des Kataklasites entstand (Frenzsattel-Quellhöhle).

Großtektonische Strukturen

Die Alpen sind ein durch mehrphasige starke Einengung entstandener Falten- und Überschiebungsgürtel. Folgende fundamentale Begriffe sind für das geologische Verständnis und die Interpretation geologischer Karten wichtig.

Decke

Als tektonische Decke bezeichnet man einen ausgedehnten (10er km), von seinem Untergrund abgelösten Gesteinskörper, der um eine große (im Vergleich zur Dicke) Distanz auf den heutigen Untergrund überschoben wurde, wobei der innere Gesteinsverband erhalten geblieben ist. Es können auch mehrere Decken übereinander liegen (Deckenstapel). Kleinere Einheiten, wobei allerdings keine scharfe Abgrenzung besteht, nennt man **Schuppen**.

(Decken-) Fenster

Durch Erosion kann die Decke durchschnitten werden und damit örtlich die Deckenunterlage freigelegt werden.

Deckscholle, klippe

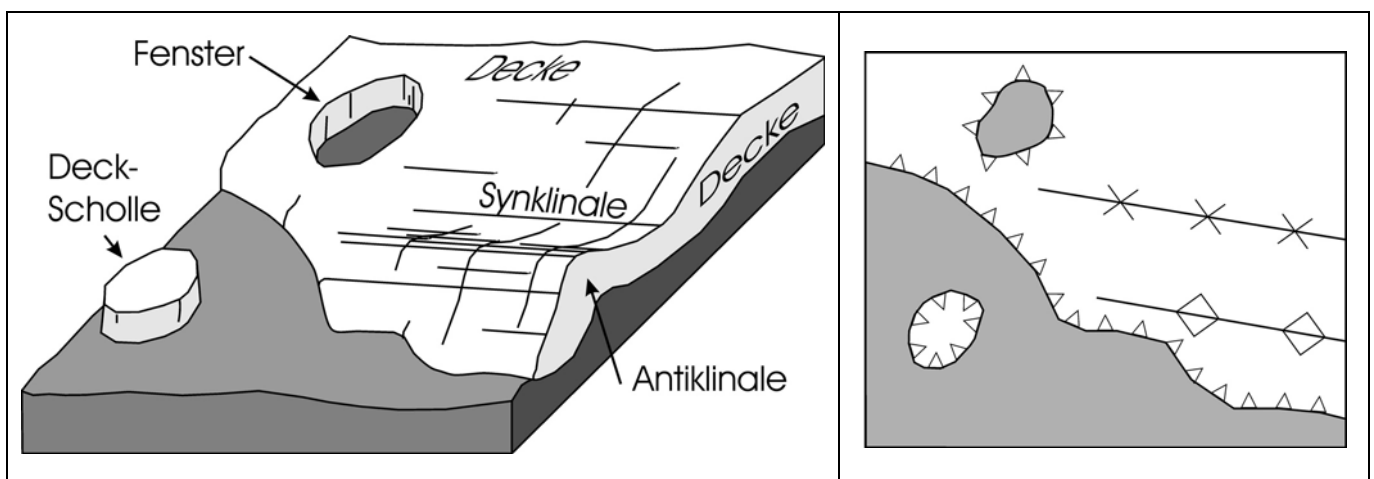
Bleibt durch fortschreitende Erosion nur mehr ein kleiner Teil einer Decke über, der isoliert auf dem Untergrund liegt, spricht man von einer Deckscholle bzw. klippe.

Antiklinale (Aufwölbung)

Durch Faltung des Gesteins entstandene langgestreckte Aufwölbung der Gesteinsschichten. (Streng genommen gilt der Begriff nur wenn die Gesteinsfolge nicht überkippt ist. Ist diese unklar bzw. überkippt spricht man von einer Antiform.)

Synklinale (Mulde)

Durch Faltung entstandene langgestreckte Mulde. Synklinale stellen (karst)hydrologisch wichtige Strukturen dar, da sie ein Zusammenfließen bzw. Bündeln der Wässer bewirken, was zu bevorzugter **Höhlenbildung im Kern** der Synklinale führen kann. Gute Beispiele gibt es im französischen Faltenjura (Synform wie oben).



Schematische Darstellung von großtektonischen Strukturen.

Situation wie links als Kartendarstellung (Die Richtung der Zacken ist „umgekehrt“ als bei den Höhlensignaturen).

Tertiäre Entwicklung der Nördlichen Kalkalpen

Das Landschaftsbild der zentralen und östlichen Nördlichen Kalkalpen wird von verkarsteten Hochplateaus geprägt, die Relikte der sogenannten **Dachstein-Altfläche** darstellen und spärliche Reste der Augenstein-Formation tragen. Die Entwicklung der Kalkalpenplateaus ist eng mit der Bildung der großen Höhlensysteme verbunden.

Dachstein-Altfläche

Die Nördlichen Kalkalpen nahmen während der eozänen Gebirgsbildungsperiode ihre heutige tektonische Position ein. Die Dachstein-Altfläche (der Begriff "Rax-Landschaft" ist umstritten und nicht ausreichend präzise definiert, weshalb er nicht mehr verwendet wird) bildete sich unmittelbar danach in geringer Höhe über dem Meeresspiegel als ein verkarstetes Hügelland. Die Bildung der Altfläche erfolgte zwischen eozäner Gebirgsbildung und Ablagerung der Augenstein-Formation und kann deshalb auf die Zeit Obereozän und Unteroligozän eingegrenzt werden.

Augenstein-Formation

Im Oligozän erfuhr die Dachstein-Altfläche eine Absenkung und wurde dabei von der Augenstein-Formation verschüttet, einer terrestrischen Abfolge von Konglomeraten und Sandsteinen, die heute nur in kleinen Resten auf den Karstplateaus erhalten ist.

Das Alter der Augenstein-Formation kann aus der geologischen Situation heraus und aufgrund von Datierungen mit Unteroligozän bis frühes Untermiozän angegeben werden, obwohl in den wenigen verbliebenen *in situ* Vorkommen (z. B. Augensteinldgrube am Dachstein-Plateau) nur basale Reste erhalten sind. Das Liefergebiet der Augenstein-Sedimente lag im Süden und war fast ausschließlich aus schwach metamorphen paläozoischen Gesteinen (Grauwackenzone und ihre Äquivalente) sowie Äquivalenten der permotriadischen siliziklastischen (d. h. großteils nicht-karbonatischen) Basis der Kalkalpen aufgebaut. Uran-Spaltspurendaten aus Apatitkristallen, die in Geröllen enthalten sind, legen nahe, dass die Augenstein-Formation lokal (z. B. am Dachstein) Mächtigkeiten von über 1000 m, möglicherweise bis über 2000 m erreichte. Die Augenstein-Sedimentation endete im Untermiozän mit dem Einsetzen eines tektonischen Umbruchs, der eine Relieferniedrigung im Liefergebiet der Augenstein-Sedimente und ein neues, an Störungen gebundenes W-O orientiertes Entwässerungsnetz (Ennstal, Murtal) mit sich brachte. In der Folge wurden die Augenstein-Sedimente erodiert und in der Vorlandmolasse wieder abgelagert.



In eine Höhle eingeschwemmte und wieder verfestigte Augensteine. (Dachstein, Margschierf)

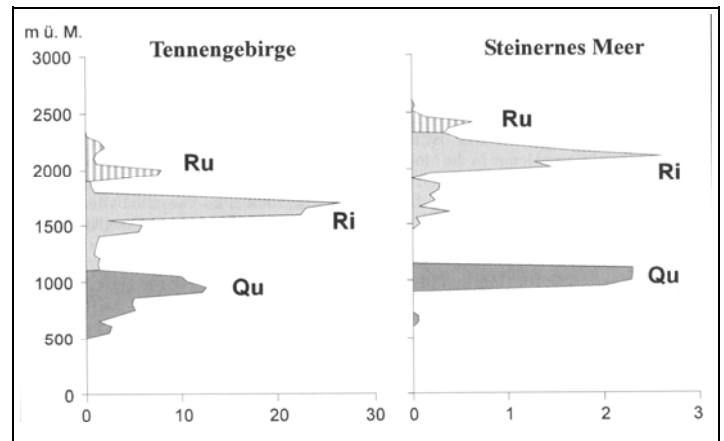
Ausbildung der Karstplateaus

Ab dem Obermiozän erfuhren die zentralen und östlichen Nördlichen Kalkalpen und mit ihnen die inzwischen wieder freigelegte Dachstein-Altfläche ihre Heraushebung in mehreren Schüben. Die Altfläche blieb dort erhalten, wo mächtige Kalksteinabfolgen (hauptsächlich Dachsteinkalk) die unterirdische Erosion in Höhlensystemen ermöglichten und damit die Oberflächenerosion auf ein Minimum begrenzten. Die heute in verschiedener Höhe liegenden Altflächenreste gehen nicht auf sukzessive Bildung als Piedmonttreppe zurück. Sie sind vielmehr Reste, die bei der finalen Heraushebung unterschiedlich stark gehoben und z. T. auch verkippt (z. B. westlicher Dachstein, Hochkönig) wurden.

Die Kalkalpen westlich des Inn-Durchbruchs enthalten keine Plateaus und weisen eine deutlich unterschiedliche Entwicklungsgeschichte seit dem Eozän auf. Sie wurde bereits im Oberoligozän und Untermiozän herausgehoben und schütteten Gerölle in die Molassezone. Augensteinreste sind aus dieser Region nicht bekannt.

Entwicklung der Höhlen

Die Anordnung der Höhlen in drei Horizonten (Höhlenniveaus) zeigt, dass die Heraushebung der Kalkalpen in Etappen erfolgte. Vermutlich wurde das höchste Höhlensystem, das oberflächennahe Ruinenhöhlenniveau, bereits während der Bildung der Dachstein-Altfläche angelegt. Augenstein-Sedimente wurden während der Überschüttung über die Altfläche in dieses Höhlensystem eingeschwenkt. Das größte Höhlenniveau, das Riesenhöhlenniveau, wurde im frühen Stadium der Heraushebung der zentralen und östlichen Kalkalpen, im Obermiozän, gebildet, das jüngste und tiefste Höhlensystem, das Quelhöhlenniveau, im Pliozän und Quartär. Augensteinmaterial wurde sukzessive in die tieferen Höhlensysteme umgelagert.



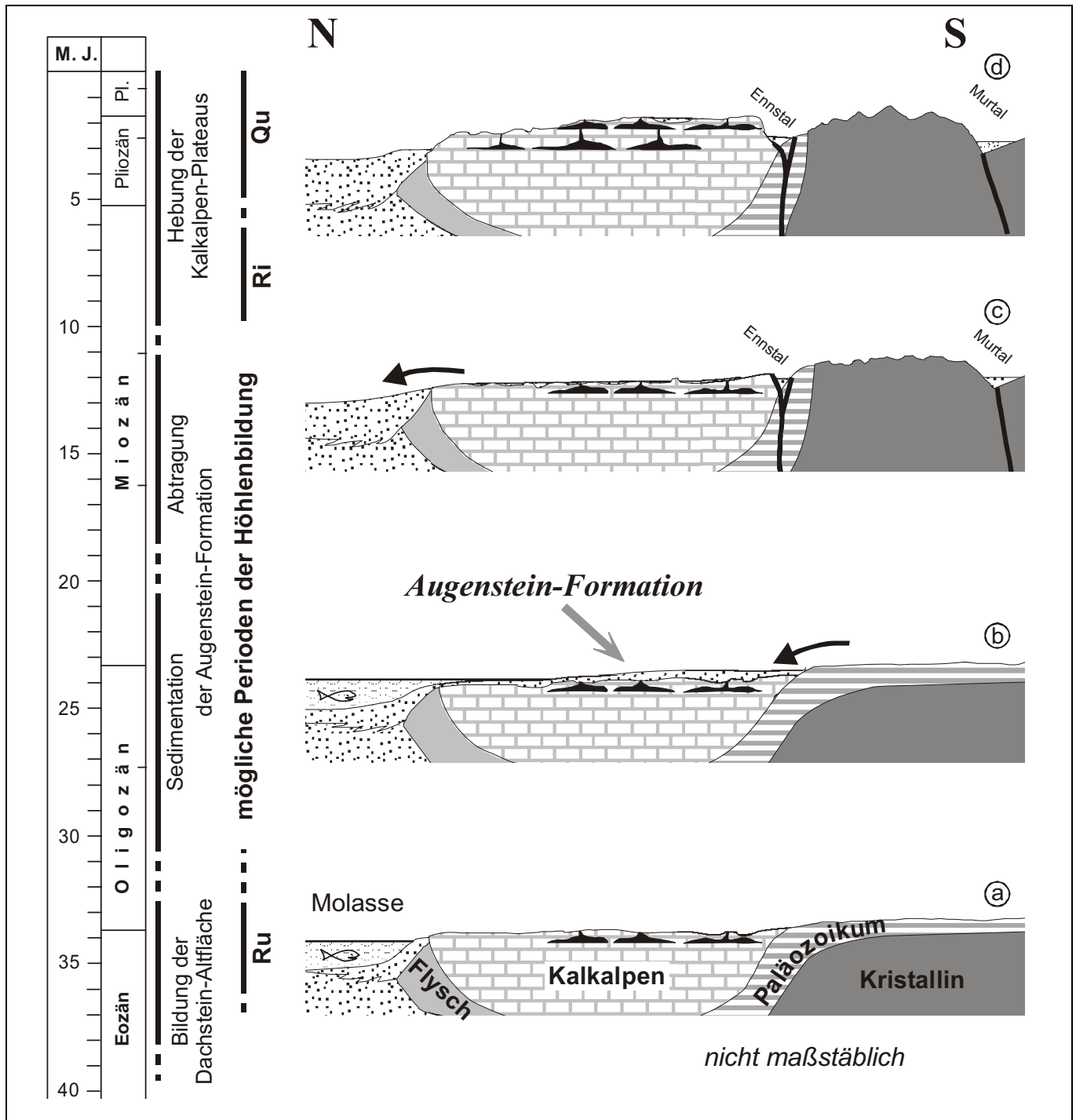
Länge (in km) der Höhlengänge in Höhenintervallen von 50 m. Ru: Ruinen-, Ri: Riesen-, Qu: Quelhöhlenniveau. (nach Fischer, 1990)

Es wurde versucht, Gesteinsmaterial aus dem Riesenhöhlensystem zu datieren. Uran-Blei-Datierungen an Tropfsteinen aus der Dachstein-Mammuthöhle und der Eisriesenwelt (Tennengebirge) erbrachten wegen zu geringer Urangelhalte kein direktes Alter, doch lassen Isotopenverhältnisse auf ein vor-pleistozänes Alter schließen. Untersuchungen der Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse an dem Tropfsteinmaterial aus der Eisriesenwelt wurden durchgeführt, um Hinweise auf klimatische Veränderungen zu erhalten. Ein 280 mm langer Probenkern vom Außenrand des Tropfsteins ergab geringe Schwankungen für die Temperatur der Regenwässer, die zur Tropfsteinbildung in die Höhlen einsickerten, was auf ein gemäßigtes Klima hinweist und ebenfalls auf eine vorpleistozäne Bildung des Tropfsteins schließen lässt. Diese Ergebnisse stehen mit der angenommenen obermiozänen Bildung des Riesenhöhlensystems in Einklang. Zerschierung von Tropfsteinen und durch Störungen verursachte Geländestufen auf den Plateaus bezeugen eine junge, teilweise quartäre Tektonik, von der die Nördlichen Kalkalpen erfasst wurden.

Literatur

Frisch, Kuhleemann, Dunkl, Székely, Vennemann & Rettenbacher (2002): Dachstein-Altfläche, Augenstein-Formation und Höhlenentwicklung - die Geschichte der letzten 35 Millionen Jahre in den zentralen Nördlichen Kalkalpen. "Die Höhle", Jg. 53, Heft 1.

Haseke-Knapczyk (1989): Der Untersberg bei Salzburg. Die ober- und unterirdische Karstentwicklung und ihre Zusammenhänge. Ein Beitrag zur Trinkwassererforschung. Österr. Akad. Wiss., MaB-Reihe, Bd. 15.



Entwicklung der zentralen und östlichen Nördlichen Kalkalpen seit dem späten Eozän: (a) Nach Beendigung der Deckenbewegungen entstand eine hügelige Abtragungsfläche (= Dachstein-Altfläche) knapp über dem Meeresspiegel und ein seichtliegendes Höhlensystem (Ruinenhöhlenniveau). (b) Die Dachstein-Altfläche wurde mit Augenstein-Sedimenten versiegelt. Das Material kam von vorwiegend paläozoischen Arealen in den Zentralalpen. Die terrestrischen Augenstein-Sedimente gingen nach N in die marine Molasse über. (c) Störungsgebundene Längstäler verhinderten weitere Sedimentzufuhr von S. Die Augenstein-Sedimente wurden abgetragen und in die Vorlandmolasse umgelagert. (d) Hebung der Kalkalpen in Schüben ermöglichte die Bildung von tieferliegenden Höhlensystemen, die sich nach dem jeweiligen Vorfluter ausrichteten. Riesen- und Quelhöhlenniveau zeigen, dass die Hebung in zwei Schüben mit einem zwischengeschalteten Stillstand erfolgte. Der Endokarst verhinderte die vollständige Zerstörung der Dachstein-Altfläche. Ru, Ri, Qu: Ruinen-, Riesen-, Quelhöhlenbildung.

Das Quartär

Der große Rahmen

So wie die Geschichte der Menschheit in einzelne Abschnitte gegliedert wird, so hat die Wissenschaft die ungleich längere und wechselvolle Geschichte unseres Planeten, die Erdgeschichte, in eine Reihe von Zeitperioden unterteilt. Wir leben derzeit in der Erdneuzeit (auch Känozoikum genannt), die übrigens bereits schon seit 66 Millionen Jahre währt. Den allergrößten Teil dieser Zeit umfasst das Tertiär, in dem z.B. die Anlage der großen Höhlensysteme der Nördlichen Kalkalpen und des Grazer Berglandes erfolgte (s. Merkblatt C26). Die letzten 1,8 Millionen Jahre der Erdneuzeit (und damit der jüngste Abschnitt der Erdgeschichte) werden jedoch eigens abgetrennt und als Quartär bezeichnet (siehe Abbildung). Wir leben im Quartär.

Was geschah im Quartär?

Die Grenzziehung der erdgeschichtlichen Abschnitte erfolgt nicht willkürlich und das Quartär hat trotz seiner relativen Kürze im Vergleich zur 4,5 Milliarden Jahre langen Erdgeschichte durchaus seine Berechtigung. Wir wissen heute, dass das Erdklima seit dem ausgehenden Tertiär eine klar erkennbare Tendenz hin zu globaler Abkühlung aufwies (siehe Abbildung). Diese Entwicklung setzte sich im Quartär fort und führte insbesondere in dessen jüngerem Abschnitt zum bekannten Wechsel von Zeiten großer Vereisung in der Nordhemisphäre (Eiszeiten, Glaziale) und wesentlich kürzeren Abschnitten mit ähnlichem Klima wie heute (Warmzeiten, Interglaziale). Einen solchen hochfrequenten Klima-Rhythmus und dem damit verbundenen Kommen und Gehen der Gletschern und dem Auf und Ab des Meeresspiegels wies die Erde nur zu gewissen Zeiten ihrer langen Geschichte auf; so das letzte Mal vor ca. 300 Millionen Jahren (Spuren davon finden sich z.B. in Gesteinen der Karnischen Alpen). Die jüngsten 1,8 Millionen Jahre der Erde sind etwas Besonderes und nach dem, was wir von der früheren Erdgeschichte wissen, dürfte das Quartär durchaus noch etliche Jahrmillionen andauern.

Quartär und Eiszeiten

Das Besondere am Quartär sind bzw. waren zweifelsohne die Eiszeiten. Stell dir vor, du würdest die Erde vor 20.000 Jahren mit einem Raumschiff umkreisen. Wie würde unser Planet aussehen? Der auffälligste Unterschied zu heute wären große, schillernd-weiße Gebiete in Nordamerika, Skandinavien, den Britischen Inseln und dem nördlichen Sibirien. Diese Gebiete waren von einer bis zu 3 km mächtigen Eisschicht bedeckt. Davor breiteten sich große Flussebenen und riesige Eisstauseen aus. Die Ostsee war vom Eis skandinavischer Gletscher erfüllt und im Ärmelkanal – der durch den Tiefstand des Meeresspiegels zu Festland wurde – bahnte sich ein gewaltiger Fluss seinen Weg in Richtung Atlantik. Auch in den Alpen hatten die Gletscher das Sagen und stießen zu gewissen Zeiten während den Eiszeiten bis über den Alpenrand vor. Etwa 22% der Landfläche waren während der Höhepunkte der Eiszeiten eisbedeckt (heute sind es knapp 10%). Dieses Schauspiel fand das bislang letzte Mal vor 20.000 Jahren statt, dem Höhepunkt der letzten Eiszeit in den Alpen und im Alpenvorland, auch Würm-Eiszeit genannt (siehe Abbildung). Atemberaubend schnell zerfiel anschließend dieses Eisstromnetz und seit etwa 14.000 Jahren finden wir ähnliche klimatische Bedingungen vor wie heute.

Früher glaubte man, dass es insgesamt vier Eiszeiten gegeben hat; später kamen einige weitere (ältere) dazu. Heute wissen wir jedoch, dass es im Quartär dutzende Eiszeit-Warmzeit-Zyklen gegeben hat, von denen jedoch nur die der letzten ca. 800.000 Jahre zu Großvereisungen geführt haben dürften, und zwar in einem zeitlichen Abstand von etwa 100.000 Jahren (siehe Abbildung).

Die vor allem an Ozean-Sedimenten durchgeführte Paläoklima-Forschung hat gezeigt, dass die Glazialzeiten der Normalfall des Quartärs sind und dass die Warmzeiten nur etwa 10 – 15 % der Zeit ausmachen. Und noch etwas ist mittlerweile klar: Man darf sich diese Eiszeiten nicht statisch vorstellen; das Klima war nachweislich wesentlich größeren und rascheren Veränderungen unterworfen als alles, was wir aus vergangenen Jahrhunderten gewohnt sind.

Wo findet sich das Quartär?

Für einen Laien ist das Erkennen des geologischen Alters eines Gesteins, eines Felsens oder eines Berges ein Buch mit sieben Siegeln. Das Quartär hingegen macht hier eine angenehme Ausnahme. Wir brauchen nur in unserer näheren Umgebung herumspazieren und werden es, so wir nicht gerade felsiges Gelände betreten,

fast immer mit Sedimenten zu tun haben, die genau aus dieser Zeit stammen. Stark vereinfacht kann man sagen, dass die quartären Ablagerungen einen geringen oder oft auch fehlenden Verfestigungsgrad aufweisen und sich dadurch klar von älteren Sedimentgesteinen z.B. der Trias unterscheiden. Die Eiszeiten waren bekanntlich für die Gestaltung der alpinen Landschaft prägend (Stichworte U-Tal, Kar, Hängetal) und auch sämtliche Seen im Alpenraum und im Alpenvorland sind Kinder des Quartärs.

Die Bedeutung des Quartärs

Das Jüngste, das Quartär, liegt zu oberst, heißt ein Grundprinzip der (stratigraphischen) Geologie und so gehen die meisten Bauvorhaben in quartären Kiesen, Sanden oder Schluffen um, so beziehen wir den größten Teil unserer Massenrohstoffe aus dem Quartär und es befinden sich große Grundwasser-Reserven in den quartären Lockergesteinsfüllungen unserer Becken und Täler. Dass wir gerade diesen wichtigen Teil der Erdkruste durch unkontrolliertes Ausbeuten von Grundwasserkörpern bzw. durch Abwässer (z.B. undichte Mülldeponien) nachhaltig verändern, sollten wir nicht aus den Augen verlieren.

Quartär und Menschheitsgeschichte

Wenngleich sich die Evolution des Menschen über das Quartär hinweg bis in das ausgehende Tertiär zurückverfolgen lässt, so tauchen verlässliche Spuren (Artefakte) in Österreich erst um ca. 220.000 Jahre vor heute auf, übrigens in einer Höhle, der Repolusthöhle (2837/1) im Grazer Bergland. Wir befinden uns mitten in der Altsteinzeit. Die Herren dieser Zeit waren die Neandertaler. Die heutige Menschenrasse (*Cro Magnon* bzw. *Homo sapiens sapiens*) taucht erst mitten in der letzten Eiszeit vor ca. 40.000 Jahre auf, während der Neandertaler das Ende derselben nicht mehr erlebt hat (siehe Abbildung).

Bald nach Beginn des heutigen Interglazials (das auch als Holozän oder Postglazial bekannt ist) beginnt die Mittelsteinzeit, die ab dem 6. Jahrtausend vor Christus von der Jungsteinzeit abgelöst wird. Ab dieser Zeit wird der Mensch in unseren Breiten sesshaft, wird Bauer. Von da an geht es Schlag auf Schlag: Um 5000 v. Chr., also 7000 vor heute wurde die Kupfer-Technologie entwickelt und das 4. und 3. vorchristliche Jahrtausend wird auch als die Kupferzeit bezeichnet. In dieser Zeit lebte übrigens der „Eismann Ötzi“, dessen Mumie ca. 5300 Jahre alt ist. Die Kulturfolge ab dem 2. Jahrtausend v. Chr. ist die Bronzezeit, die im 8. Jahrhundert v. Chr. von der Eisenzeit abgelöst wurde (siehe Abbildung).

Quartär und Höhlen

Auch wenn das Kommen und Gehen der Gletscher während des Quartärs gerade in einem Gebirgsland wie Österreich sicherlich seinen Einfluss auf die Höhlen im Untergrund gehabt hat, so dürfen wir diesen jedoch nicht überschätzen. Neuere Forschungsergebnisse (siehe Merkblatt C26) legen nahe, dass gerade die großen und heute z.T. über der Waldgrenze gelegenen Höhlensysteme der zentralen und östlichen Nördlichen Kalkalpen, aber wahrscheinlich auch jene des Grazer Berglandes in einem feucht-subtropischen Klima entstanden sind, das während ihre Entstehung einem feucht-subtropischen Klima verdanken, das während des vorangegangenen Tertiärs herrschte. Somit sind also diese Höhlen, zumindest in ihrer prinzipiellen Anlage, viele Millionen Jahre alt, sozusagen fossil. Dass solche alten Systeme in späterer Zeit als Wasserwege wieder benutzt und weiterentwickelt, z.T. aber auch zusedimentiert wurden, ist naheliegend. Leider fehlen den Wissenschaftlern zur Zeit noch einfache Methoden, um Höhlen-Sedimente aus dem früheren Abschnitt des Quartärs präzise datieren zu können und so den genauen zeitlichen Ablauf der speläogenetischen Prozesse rekonstruieren zu können.

Weiterführende Literatur

Berner, U. & Streif, H. (2004): *Klimafakten. Der Rückblick - ein Schlüssel für die Zukunft.* – 4. Auflage, 259 S., Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

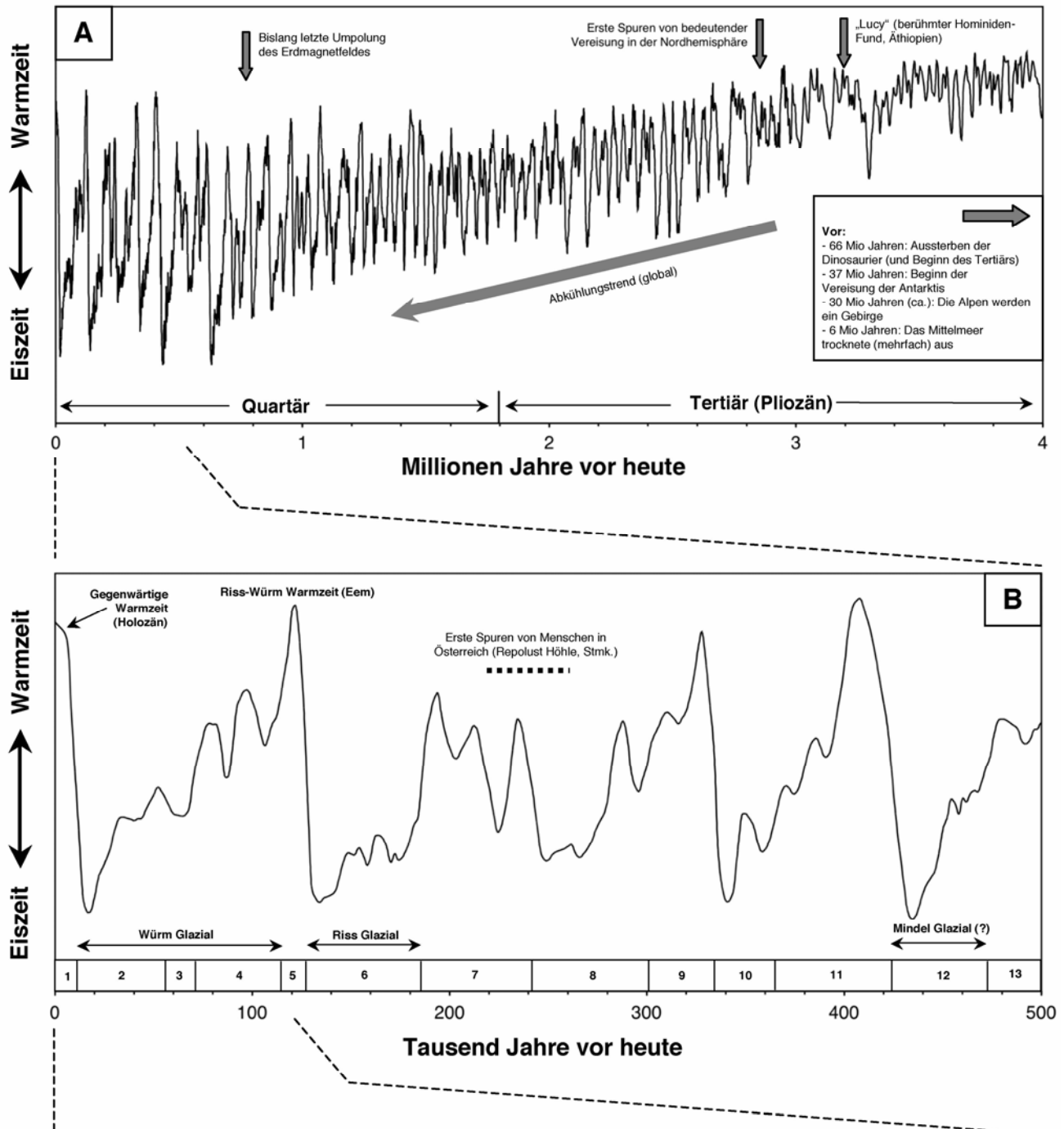
Hauser, W. (2002): *Klima. Das Experiment mit dem Planeten Erde.* – 400 S., Stuttgart (Theis).

Jost, D. & Maisch, M. (2006): *Von der Eiszeit in die Heisszeit. Eine Zeitreise zu den Gletschern.* - 149 S., Oberhofen (Zytglogge).

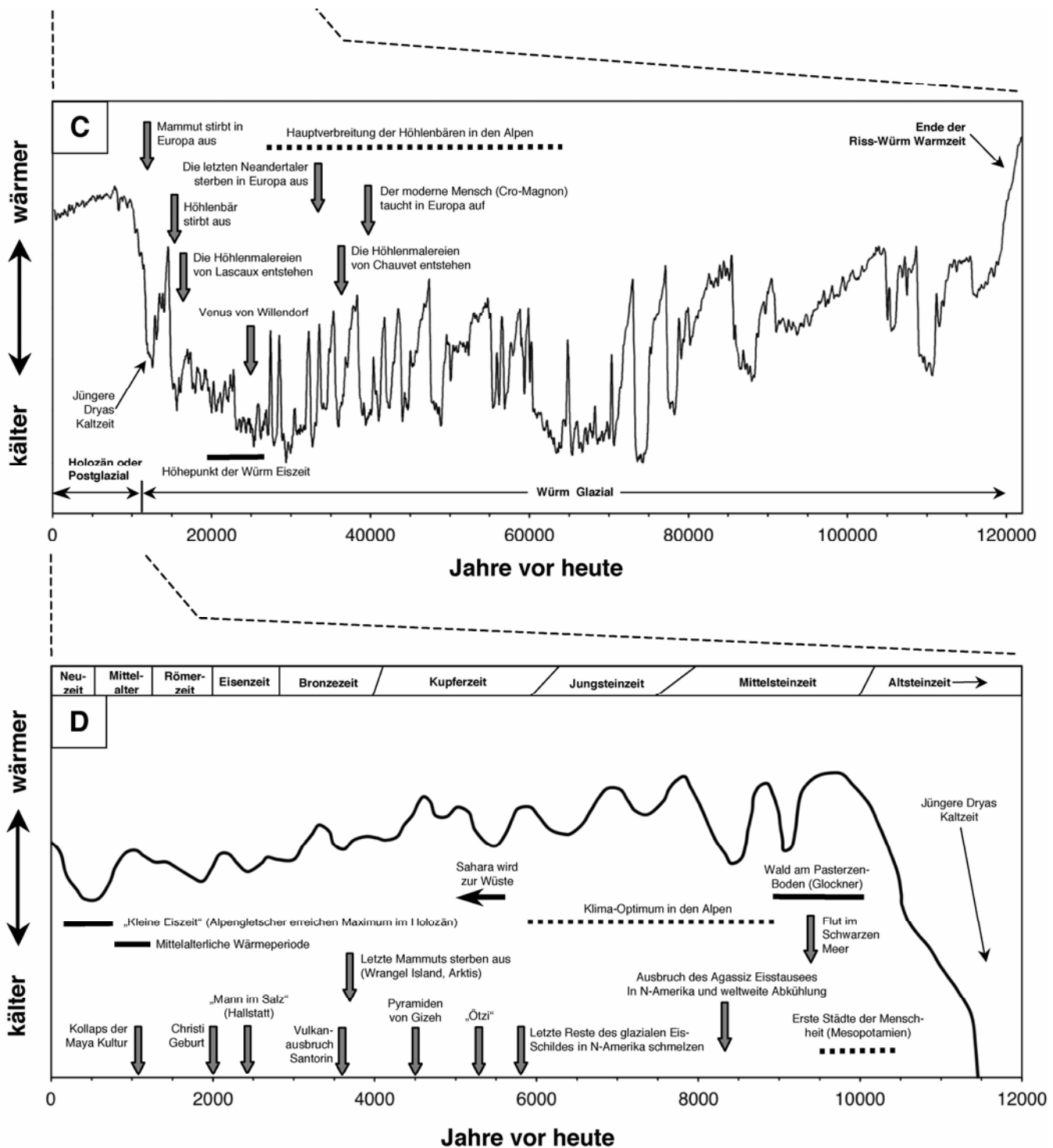
Klostermann, J. (1999): *Das Klima im Eiszeitalter.* - 284 S., Stuttgart (Schweizerbart).

Urban, O.H. (2000): *Der lange Weg zur Geschichte. Die Urgeschichte Österreichs.* – In: *Österreichische Geschichte* (Hrsg. H. Wolfram), 511 S., Wien (Ueberreuter).

van Husen, D. (1987): *Die Ostalpen in den Eiszeiten:* Wien, Geologische Bundesanstalt, 24 S.



Mit dieser zweiseitigen Abbildung wurde der Versuch unternommen, den Zeitraum des Quartärs graphisch darzustellen, wichtige Zeitabschnitte zu zeigen und bedeutende Ereignisse chronologisch einzugliedern. Die Zeit läuft in allen Diagrammen von rechts nach links, d.h. links ist heute und nachfolgende Diagramme stellen immer einen vergrößerten zeitlichen Ausschnitt der vorangegangenen dar. Die Kurven geben dabei nur schematisch den Klimaverlauf für die Alpenregion wieder. Die beiden Kurven A und B wurden aus Tiefsee-Sedimenten erstellt. In der Abbildung B (unten) sind einige der bekannten alpinen Eiszeiten eingetragen. Die Liste ist jedoch nicht vollständig, da die zeitliche Einstufung der älteren großen Gletschervorstöße nach wie vor offen ist (analoges gilt für die Zwischeneiszeiten, z.B. die Mindel-Riss Warmzeit). In dieser Abbildung findet sich am Unterrand auch eine Skala mit Zahlen von 1 bis 13. Dies sind die so genannten Marinen Isotopenstadien, mit deren Hilfe das Quartär weltweit fein gegliedert wird. Geradzahlige Stadien bezeichnen klimatisch generell warme Zeiten mit hohem Meeresspiegel, ungeradzahlige stellen Kalt- bzw. Glazialzeiten dar.



Die beiden Graphen C und D schließen an Diagramm B (Vorseite) an und geben einen einfachen Überblick über den letzten Eiszeit-Warmzeit-Zyklus bzw. die gegenwärtige Warmzeit, das so genannte Holozän. Die Kurve in C stammt aus dem Eis in Zentralgrönland. Beachte erstens, dass diese deutlich von der Tiefseekurve in Diagramm B abweicht (welche ein gedämpftes Signal im Ozean zeigt), und zweitens, welche große Unruhe das glaziale Klima während der letzten 100.000 Jahre (der Würm-Eiszeit) zeigte und wie gering sich demgegenüber die Schwankungen während der letzten ca. 11.000 Jahre (dem Holozän) ausmachen. Die Kulturfolgen sind am oberen Rand von Abbildung D eingetragen; deren Abgrenzung ist unscharf und schwankt von Region zu Region.

Höhleninhalt

Jeder Höhlenforscher hat bereits Erfahrungen mit dem Höhleninhalt gemacht. Röhren, gefüllt mit Schlamm und "Dreck", haben schon manches üble Wort hervorgerufen. Taucher wissen um die Gefährlichkeit von wassererfüllten Höhlenteilen. Viele gehen in Höhlen, um Tropfsteine zu bewundern. Und selbst der frei hängende Schachtbefahrer hat Kontakt mit dem Höhleninhalt – gehört doch die Luft der Höhlen ebenfalls zum Inhalt.

Eine simple Einteilung unterscheidet nach dem physikalischen Zustand, also ob es sich um gasförmigen, flüssigen oder festen Höhleninhalt handelt. Betrachtet man die Entstehung, ist interessant, ob der Höhleninhalt an Ort und Stelle (autochthon) entstanden ist oder in die Höhle transportiert wurde (allochthon).

Doch lassen wir in den nachfolgenden Seiten die Luft und das Wasser aus dem Spiel. Die Eigenschaften dieser Stoffe sind an anderer Stelle (Karsthydrologie, Höhlenklima etc.) eingehend beschrieben. Wir konzentrieren uns hier auf die Ablagerungen in den Höhlen, die Sedimente.

Das Studium der Sedimente kann auch dem Höhlenforscher unter Umständen Hinweise auf mögliche Fortsetzungen oder Indizien zur Höhlenentstehung geben.

Definitionen:

- Ein **Mineral** ist eine Festsubstanz, deren chemische Bausteine gesetzmäßig aufgebaut sind (und somit ein Kristallgitter aufbauen).
- Ein **Kristall** ist ein Mineral, das ungestört wachsen konnte und deshalb eine charakteristische Form aufweist.
- Ein **Gestein** besteht aus einer natürlichen Ansammlung von Mineralen. Diese Ansammlung kann aus einem (z.B. Kalk – bestehend aus dem Mineral Calcit) oder mehreren (Gneis – bestehend aus Feldspäten, Quarz, Glimmer, u.a.) Mineralen bestehen.
- Als **Sediment** bezeichnet man eine Ablagerung von Mineralien und/oder organischen Stoffen. Ist die Ablagerung verfestigt, spricht man von Sedimentgestein (z.B. Sandstein), ansonsten nur von (Locker)Sediment (z.B. Gletschermoräne oder auch Höhlenlehm).

Sedimente in Höhlen

Die Einführung in die Höhlensedimente soll Auskunft geben über Typen, Art und Eigenschaften der Sedimente. Darauf folgt ein Kapitel über die Wichtigkeit des Zusammenhanges zwischen Sedimenten und der Gangform. Zum Schluss wird ein Überblick über die Methoden der Sedimentuntersuchung präsentiert.

Ganz wichtig ist, dass alle Höhlensedimente Aussagen zur Höhle und unter Umständen zum Klima geben können. Die oben erwähnte Schlammröhre ist also nicht nur gatschgefüllt, sondern vielleicht ist der dieser Schlamm ein Zeuge einer Eiszeit?

Kann man sodann die Sedimente mit der Entstehungsgeschichte der Höhle koppeln, erhält man unter Umständen ein recht komplettes Schema der Ereignisse im Leben einer Höhle. Wird dieses Schema dann datiert, können wir wertvolle Informationen zur Klima- und Erosionsgeschichte der Gegend, wo sich die Höhle befindet, erhalten.

Höhlenmineralien und Höhlensinter

Höhlenmineralien gehören zwar auch zu den Sedimenten, werden aber in der Höhle gebildet und deshalb separat behandelt. Streng genommen gehören die häufigsten Formen, die Sinterbildungen und Tropfsteine, ebenfalls zu den Höhlenmineralien. Gleiches gilt auch für das Höhleneis. Diese haben aber wiederum ein eigenes Kapitel.

Datierung von Höhlensintern

Tropfsteine und Sinterböden waren lange Zeit die einzigen datierbaren Materialien neben Holzresten. Deswegen – und auch, weil die Sinterdatierung mittlerweile eine Routineangelegenheit geworden ist, die auch sehr oft zuverlässige Resultate liefert – ist dieser ein eigenes Kapitel gewidmet.

Sedimente in Höhlen

Welche Sedimenttypen gibt es in Höhlen?

Wir unterscheiden zwischen:

- chemischen Sedimenten (Höhlensinter, Tropfsteine, Zemente, Ausblühungen, Mineralien i.A.)
- detritischen/klastischen Sedimenten (Lehm bis Geröll, Versturz...)
- biogenen Sedimenten (Guano, Knochen...)
- Höhleneis

Die chemischen Sedimente

Als chemisch ausgefällte Sedimente gelten neben allen Sorten von Tropfsteinen auch diejenigen Calcitausscheidungen, die andere Sedimenttypen verfestigen: die Zemente. In Höhlen sind diese Zemente meist zusammen mit Tropfsteinen (gelegentlich auch verfestigten Schottern) zu finden. Sie werden deshalb nicht gesondert behandelt.

Weitere chemische Sedimente sind Mineralausblühungen an Wänden und auf Ablagerungen; hierzu zählen neben Aragonit der häufige Gips, Hydromagnesit, sowie andere, seltenere Mineralien.

Ein Spezialfall der chemischen Sedimente sind hydrothermale Hohlraumfüllungen, die im Kalkgestein ebenfalls meist aus Calcit sind. Da diese meistens in Klüften zu finden sind und in der überwiegenden Anzahl der Fälle nichts mit der Höhlenentstehung zu tun haben, werden sie hier nicht weiter erwähnt.

Mineralien wie auch Tropfsteinen sind eigene Kapitel gewidmet. Hier soll nur die Information gegeben werden, dass das Tropfsteinwachstum zumeist an Warmzeiten gebunden ist, weil dann Bodenbildung an der Oberfläche mehr CO₂ ins Wasser bringt. Des weiteren ist wichtig, dass (von Spezialfällen abgesehen) sich Sinter fast nur oberhalb des Wasserspiegels bildet.

Detritische/klastische Sedimente

"Detritisch" oder "klastisch" bedeutet zerbrochen. Detritische Sedimente sind also Ablagerungen, die aus einem bereits bestehenden Gestein oder Mineral hervorgehen, ohne (mit Ausnahme der Tonmineralien) chemischen Änderungen unterworfen zu sein. Zu den detritischen Sedimenten zählen wir nicht nur das zerbrochene Material im engeren Sinne (Versturzblöcke), sondern auch gerundete Bachgerölle, Sand und Lehm. Detritische Sedimente können entweder autochthon (aus dem Nebengestein) oder aber allochthon (von draußen) sein.

Herkunft

Die Herkunft der detritischen Sedimente kann völlig verschieden sein. Die nachfolgende Liste ist nicht abschließend, sondern gibt einige Möglichkeiten an:

- aus dem Nebengestein: Versturzblöcke, Schutt, Frostbruch, Kalkgerölle
- aus dem Nebengestein: unlösliche Bestandteile des Kalkes: Lehm, Hornstein etc.
- aus benachbarten Gesteinen: Gerölle, Sand, Lehm
- vom Gletscher: Gesteine aller Art
- aus Höhlensedimenten: umgelagerter Sand, Tropfsteingerölle etc.
- von der Oberfläche: Knochen (manchmal aber auch autochthon), Holz, Humus, Sand, Lehm etc.

Eigenschaften

a) Nicht transportierte detritische Sedimente

Darunter fallen Versturzblöcke und Deckenbruch. Schutt im Eingangsbereich der Höhle ist meist auf Frostbruch zurückzuführen. Alter, verkitteter Schutt deutet auf eine kältere Zeit in der Vergangenheit hin. Versturzblöcke im Höhleninnern sind schwieriger zu deuten. Es muss nicht sein, dass Verstürze in Zeiten erhöhter Erdbeben-Aktivität auftreten. Stimmt die Statik der Höhlendecke nicht, so wird es zum Einsturz kommen. Die Deutung von Deckenverstürzen wird meist dem Geologen vorbehalten bleiben.

b) transportierte detritische Sedimente

Umlagerung und Transport geschieht in der Höhle wohl immer durch fließendes Wasser. Charakteristisch für transportierte Sedimente ist, dass die Körner / Gerölle gerundet sind. Faustregel: Je runder ein Stein, desto länger dauerte der Transport. Diese Faustregel kennt natürlich viele Abweichungen. Die Härte des Steines spielt eine Rolle, aber auch die Größe! Große Blöcke sind nach vergleichsweise kleiner Transportdistanz bereits recht gut gerundet, während kleine Kiesel deutlich mehr Distanz benötigen, um ähnlich rund zu werden.

Etwas sehr Typisches für transportierte detritische Sedimente ist neben der Rundung die Sortierung: Sie beschreibt, ob nur Sedimente einer Korngröße oder verschiedene Korngrößen gemeinsam vorkommen. In einem Wildbachbett findet man riesige Blöcke, in einem schnellen Fluss bis kopfgroße Gerölle, weiter stromab, wo die Fließgeschwindigkeit nicht mehr groß ist, Kiesel, schließlich Sand und dann Silt (auch Schluff genannt). Je ausgeglichener ein Bach fließt, desto deutlicher sieht man diese Sortierung nach der Fließgeschwindigkeit. Sie wurde experimentell bestimmt und im Hjulström-Diagramm eingetragen. Nun kann man die gefundenen Höhlensedimente analysieren, um die mittlere Korngröße herauszufinden (oft geht das auch von Auge!), und daraus schließen, wie schnell der Bach floss.

Benennung: Vielen Leuten ist der Unterschied zwischen Sand, Silt und Ton nicht klar. Dieser Unterschied ist nicht vom Mineral, das das Sediment aufbaut, abhängig, sondern von der **Korngröße**. Im Folgenden die Unterschiede:

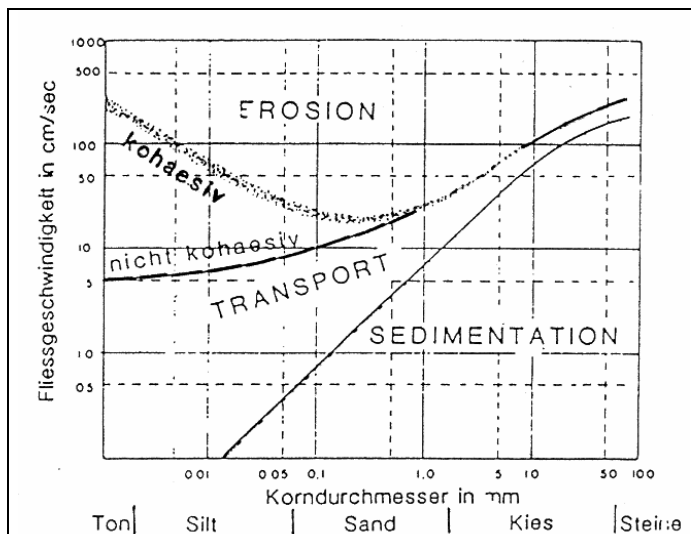
- über 20 cm: Blöcke
- zwischen 20 cm und 2 mm: Kies (auch Schotter genannt; Unterteilung in Grobkies: bis 2 cm)
- zwischen 2 mm und 0.063 mm (=63µm): Sand
- zwischen 63 µm und 2 µm: Silt (Merkmal: knirscht noch zwischen den Zähnen)
- darunter: Ton

Mit dem freien Auge sind Silt und Ton allerdings nicht voneinander zu unterscheiden. Detritische Sedimente müssen nicht von einem frei fließenden Bach transportiert und abgelagert werden. Sie können sich auch in Siphons und unterhalb des Karstwasserspiegels absetzen, vergleichbar mit der Ablagerung in einem See.

Die Farbe der detritischen Sedimente ist von ihrer Zusammensetzung abhängig. Lehm, mit Humusmaterial (oder auch Manganabscheidungen) vermischt, ist schwärzlich, mit Eisenmineralien meist rötlich. Sandsteingeröll ist sandsteinfarben etc. Ausnahmen sind da zu verzeichnen, wo die Oberfläche durch chemische Einflüsse verändert wurden. Die häufigste Alteration ist, dass gewisse Gerölle durch Manganablagerungen schwarz aussehen. Schlägt man sie jedoch auseinander, erkennt man die Eigenfarbe.

Ein spezieller, wichtiger Fall von detritischen Sedimenten sind die Sinterbruchstücke. Gesetzt den Fall, man finde in einer ansonsten schmucklosen Höhle ein altes Sediment, das Sintergeröll aufweist, so weiß man, dass diese Höhle einmal sintergeschmückt (Warmzeit?) war, dann dieser Sinter zerstört wurde (Gletscherhochwasser?) und wieder abgelagert wurde.

Je mehr Kalk ein Feinsediment hat, desto stärker überwog die Erosion über die Korrosion (Gletschermehl). Stark kalkhaltige Feinsedimente in Höhlen sind praktisch ausnahmslos während Eiszeiten abgelagert worden.



Das Hjulström-Diagramm. Kohäsiv bedeutet zusammenklebend. Kleben Tone stark zusammen, braucht es eine viel höhere Wassergeschwindigkeit, um sie zu erodieren, als sie nur zu transportieren. Deshalb steigt die "kohäsiv" beschriftete Kurve wieder an, je feiner das Sediment wird.

Aussagen

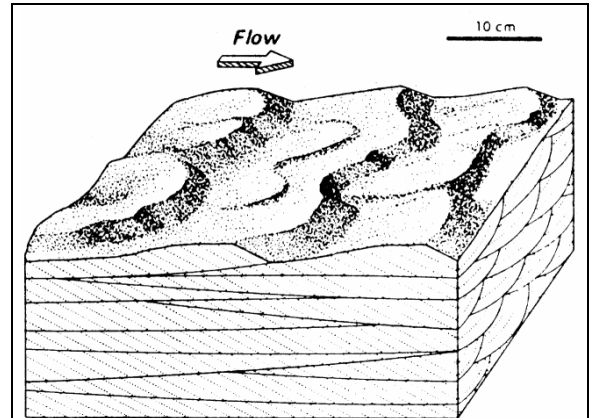
Soeben haben wir gesehen, dass detritische Sedimente Aussagen über die Transportdistanz und die Fließgeschwindigkeit geben. Daher ist auch klar, dass Silt (=kaum Geschwindigkeit) in einem Mäander (=schnell fließender Bach) darauf hindeuten kann, dass beispielsweise die Höhle nach der Entstehung nochmals unter Wasser gesetzt wurde.

Des Weiteren zeigen sie auch häufig die Fließrichtung an. Dies ist nicht so trivial wie es klingt. Wasser fließt in Höhlen nämlich recht häufig gangaufwärts, und zwar in phreatischen Bedingungen. Gute Fließrichtungsanzeiger sind Sande und Silte, denn sie bauen Rippel auf. Die flache Seite einer Rippel ist immer der Strömung zugewandt. Im Querschnitt zeigen sich häufig Schrägschichtungsformen, die ebenfalls eine Fließrichtung angeben.

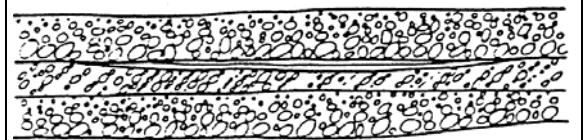
Gerölle können ebenfalls Fließrichtungen anzeigen, nämlich wenn sie nicht kugelförmig, sondern abgeplattet oder gelängt sind. Sie liegen dann wie Fischschuppen übereinander und bilden so eine Imbrikation. Imbrikationen sind oft recht schwierig zu erkennen und nur dort gut zu sehen, wo der Sedimentschnitt parallel zur Strömungsrichtung liegt.

Auch die Lage der Sedimentkörper (im Strömungsschatten? Düseneffekte?) kann unter Umständen Fließrichtungen anzeigen.

Aussagen über die Herkunft der detritischen Sedimente können wichtig sein, indem sie zum Beispiel mithelfen, ein aktuelles oder ehemaliges Einzugsgebiet abzugrenzen. Ein typisches Beispiel hierfür sind die Augensteine, die bezeugen, dass die Nördlichen Kalkalpen einstmalig Wasser und Sediment von den Gesteinen südlich davon (Zentralalpen, Grauwackenzone) erhielten.



Sedimenttrippel und ihre Abbildung im Sedimentstapel.



Imbrikation von Geröllen. Fließrichtung von links nach rechts.

Biogene Sedimente

Unter biogenen (biologisch entstandenen) Sedimenten verstehen wir Guano, Knochen und Schalen, die durch Tiere produziert oder eingeschleppt werden. Humus, ebenfalls biogen, fällt meistens im Eingangsbereich an und wird deshalb zu den detritischen Sedimenten gezählt.

Über den Wert und der Aussagen solcher Sedimente muss hier nichts gesagt werden; es versteht sich von selbst, dass solche Sedimente direkte Zeugen einer Besiedelung und indirekt Klimazeugen sind. Zu erwähnen ist vielleicht, dass Fledermausguano einen hohen ökonomischen Wert als Dünger hat und in einigen Ländern abgebaut wird oder wurde. In Österreich wurden zum selben Zweck Phosphate als Zersetzungsprodukt von Höhlenbärenknochen aus der Drachenhöhle bei Mixnitz verwendet, ebenso wurden Phosphate in der Ciclovina uscata (Rumänien) bergmännisch abgebaut.

Höhleneis

Das Höhleneis bildet einen Spezialfall unter den Sedimenten, da seine Existenz sowohl abhängig ist vom Wasserfluss (wie die detritischen und chemischen Sedimente) als auch von der Temperatur. Es liegt auf der Hand, dass die Gegenwart von Eis direkt eine Klimainformation birgt.

Mindestens theoretisch können drei Arten von Höhleneis unterschieden werden:

- Eis, das von draußen her (z.B. durch Gletscherdruck) eingepresst wurde;
- Eis, das in Form von Schnee in eine Höhle verbracht wurde und durch Umkristallisation zu Eis wurde;

- Eis, das in Form von Wasser in die Höhle kam und durch die kalte Luft oder durch die kalte Höhlenwand erstarrte.

Die erste Art von Höhleneis ist hypothetisch, da selbst bei den vorhandenen hohen Drucken am Grund eines Gletschers die Höhlengänge zu klein sind, um ein Fließen über längere Zeit zu ermöglichen. So zeigen Castleguard Cave (Kanada) wie auch die Milchbachhöhle (Schweiz), dass der Gletscher an der Höhle vorbeifließt.

Dagegen sind die beiden anderen Arten sehr gut bekannt und dokumentiert. Schnee- und Eisschächte finden sich in den Alpen zuhauf, und oft auch sind große Eishöhlen (Eisriesenwelt, Dachstein-Rieseneishöhle) Zeugen der dritten Art.

Oft kontrovers diskutiert ist, inwiefern und bis in welche Tiefe sich während den Eiszeiten Höhleneis im Innern (Typ 3) bildete. Indizien dazu sind sehr oft kaum zu erkennen, allfällige Zeugen können oft durch andere Vorgänge erklärt werden. Bildete sich Höhleneis, oder wurde das Wasser von der Oberfläche her durch Permafrost von der Einsickerung abgehalten? Wurden die Höhlen so kalt, dass eine Eisbildung möglich war, oder wurden sie durch die Isolationswirkung des Gletschers und Schnees (an der Basis oft 0 °C und mit Schmelzwasser) von der Außenwelt abgeschirmt? Diese Frage ist soweit unklar.

Die Sedimentabfolge und ihr Bezug zur Gangmorphologie

Dieses Kapitel ist sehr wichtig, denn die Abfolge der Sedimente erschließt uns die (relative) zeitliche Abfolge der Ereignisse in der Höhle. Die Basis der Sedimentuntersuchungen ist immer die **Beobachtung**, die jeder Höhlenforscher selbst durchführen kann, ohne eine geologische Vorbildung zu haben. Einzig das Grundprinzip der Ablagerungen muss beachtet werden: junge Sedimente liegen über älteren Ablagerungen, wobei das bei komplexen Gangprofilen für die absolute Höhenlage nicht zutreffen muss. Ebenfalls wichtig ist, dass Erosionsspuren beachtet werden.

Erosionsanzeiger sind wichtig: Genauso, wie die Korngröße eines detritischen Sedimentes Aussagen macht über die Geschwindigkeit des Wassers, so zeugt auch die spätere Erosion desselben Sedimentes von einer größeren Wassergeschwindigkeit. Sehr oft werden nämlich Sedimentabfolgen später (zumindest teilweise) wieder erodiert; diese Erosionsphase muss, wenn man die Entstehungsabfolge der Höhle studieren will, ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Wie oben erwähnt, zeigen uns die Sedimente, zumindest in erster Linie, die Wassermenge, ab und zu auch das vermutlich vorhandene Klima vor der Höhle, an:

- Tropfstein: vermutlich Warmzeit
- Geröll: hoher Durchfluss
- Sand: niedriger Durchfluss
- Lehm: kaum Durchfluss, Stauung
- Silt: Stauung (evtl. durch Gletscher, Kaltzeit?)

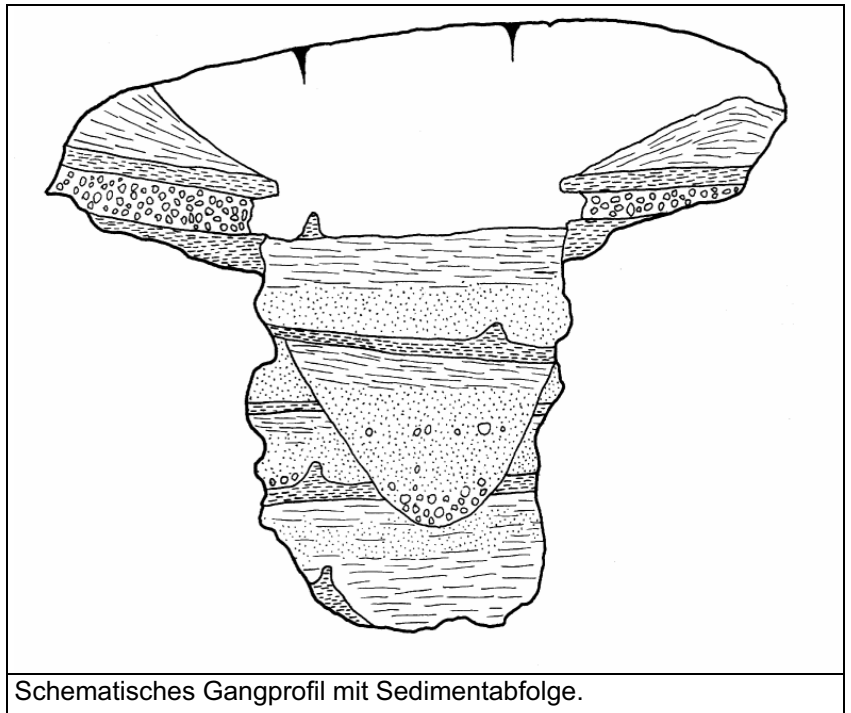
Wenn wir nun beispielsweise in einem phreatischen (elliptischen) Gang am Boden Geröll finden, darüber Silte, und zum Schluss einen Tropfstein, so wissen wir, dass nach (oder während) der Gangentstehung ein hoher Durchfluss herrschte. Danach wurde am Eingang das Wasser aufgestaut. Nach dem Abfluss des Wassers wuchs sodann der Tropfstein.

Der Durchfluss in einer Höhle ist abhängig von der Wassermenge, diese wiederum hängt ab von der Regenmenge resp. von der Schneeschmelze. Natürlich muss in Betracht gezogen werden, dass sich das Einzugsgebiet auch verändern kann. Dennoch zeigt uns eine Schüttungsänderung mittelbar eine Klimaänderung an. Selbstverständlich muss diese verifiziert werden - das Entstehen eines Umlaufganges z.B., oder Versturzerereignisse in einem Gang können die Schüttung ändern, ohne dass sich das Klima geändert hat. Dennoch: der Nutzen der detritischen Sedimente für eine Rekonstruktion des Paläoklimas ist unbestritten.

Da Erosionen oft nicht alle Sedimente wegräumen, ist es so, dass die Höhlen über lange Zeiträume Ereignisse aufzeichnen: sie sind richtige Archive der Erdgeschichte. Die Kopplung von Morphologie, Sedimenten und weiteren Daten erlaubt oft das Erkennen von mehreren Klimawechseln - Informationen, die vor der Höhle vom letzten Gletscher weggewischt worden sind. Aus diesem Grunde sind Höhlen von großer Bedeutung für die Rekonstruktion des Klimas und der Landschaftsgeschichte.

Beispiel

Die nebenstehende Abbildung ist schematisch, jedoch gezeichnet aufgrund eines realen (etwas weniger komplexen) Beispiels. Sie soll illustrieren, was man eigentlich alles in Höhlen sehen kann und wie viel Information man ohne aufwendige technische Untersuchungen bereits durch Beobachtung erhalten kann. Die Figur ist bereits nummeriert, die "Lösung" respektive Interpretation befindet sich jedoch auf der nächsten Seite, so dass der geneigte Leser die Figur als Übung betrachten kann.



Schematisches Gangprofil mit Sedimentabfolge.

Aufgabe

a) Betrachte das Profil genau. Erstelle eine Liste der Abfolgen: Was geschah zuerst, was passierte dann? Schreibe zeilenweise, vergiss die Erosionsformen nicht. Notiere separat, wo Du unsicher bist, notiere auch, wo Du mit bestem Gewissen nicht weiter weißt - falls es das gibt!

b) Was kann man über Ablagerungsbedingungen aussagen? Schreibe sie neben die Nummern:

- | | | |
|---|----------------------------|------------------------------------|
| 1 | Höhlenentstehung (Ellipse) | keine Ablagerung |
| 2 | Geröll | hohe Fliessgeschwindigkeit |
| 3 | Sinter | (vermutlich) wenig Wasserfluss |
| 4 | Erosion | demzufolge viel Wasserfluss, Kraft |

Mögliche Lösung

- | | | |
|----|---------------------------|---|
| 1 | Höhlenentstehung | keine Ablagerung |
| 2 | Sinterboden | kleiner Wasserfluss |
| 3 | Geröll | große Schüttung |
| 4 | Sinterboden | kleine Schüttung |
| 5 | Erosion | große Schüttung, viel Kraft |
| 6 | Tropfsteinwachstum | kleiner Wasserfluss |
| 7 | kalkige Silte, etwas Sand | sehr kleiner Durchfluss |
| 8 | Tropfsteinwachstum | kleiner Wasserfluss |
| 9 | Sand/Geröll | mäßige Schüttung |
| 10 | kalkige Silte | Stauung |
| 11 | Sinterboden | wenig Schüttung |
| 12 | Sand | mäßige Schüttung |
| 13 | Erosion | starke Schüttung |
| 14 | Geröll | recht starke Schüttung |
| 15 | Sand mit Geröll | mäßige Schüttung |
| 16 | kalkige Silte | Stauung |
| 17 | Sinterboden | wenig Schüttung |
| 18 | Sand | mäßige Schüttung |
| 19 | kalkige Silte | Stauung |
| 20 | Tropfsteinwachstum | kein Durchfluss (da kein Bach auf dem Silt) |

Die größte Unklarheit betrifft den Silt auf den Rändern der phreatischen Röhre. Silte lagern sich bei Stauungen ab. Aufgrund der erhöhten Position könnte dieser Silt zeitgleich mit der Nr. 7 abgelagert worden sein und die nachfolgende Erosion überlebt haben, genauso könnte er aber während Nr. 10, 16 oder 19 abgelagert worden sein.

Nichtsdestotrotz haben wir eine Abfolge festgestellt, während der derselbe Gang ganz unterschiedlichen Wasserflüssen ausgesetzt war. Wird nun das Profil klimatisch interpretiert (die vier unterschiedlichen Siltlagen deuten zum Beispiel auf vier Eiszeiten hin), und werden ausgewählte Sedimente sodann datiert, so haben wir eine zeitlich eingeordnete Abfolge - mit einer Genauigkeit, die oft nur in Höhlen zu finden ist.

Methoden der Sedimentuntersuchung

In diesem kurzen Abschnitt werden die verschiedenen Methoden vorgestellt, die sich zur Sedimentbeschreibung und Problemlösung eignen; diese Aufzählung soll kein Rezeptbuch darstellen, sondern die Möglichkeiten beschreiben. Viele dieser Methoden sind nur mit großem Aufwand von Spezialisten durchführbar. Wie bereits gesagt, ist die Grundlage **jeder** Sedimentuntersuchung die **Beobachtung** im Feld – und beobachten und beschreiben kann jeder Höhlenforscher!

Methoden zur Sedimentcharakterisierung

Profilaufnahme

Um Änderungen in den Ablagerungsbedingungen zu dokumentieren, ist eine Aufnahme der Sedimentprofile (maßstäbliche Zeichnung) oftmals nötig.

Korngrößenanalyse

Wie im allgemeinen Teil schon angetönt, sagt die Korngröße etwas über die Fließgeschwindigkeit aus. Das Gesamtsediment wird gesiebt und die einzelnen Fraktionen gewogen. Feinanteile, die für ein Sieb zu klein sind, werden mit der Sedimentationswaage gewogen. Die erhaltenen Kornsummenkurven geben Aufschluss über Fließgeschwindigkeit und z.T. Ablagerungsmilieu.

Geröllanalyse

Bei der Geröllanalyse schaut man, wieviel von welchem Gestein im Sediment vorhanden ist (eignet sich bis zur Kiesfraktion). Dies gibt ungefähren Aufschluss über die Herkunft des Gesteines. Nebenbei kann die Rundung abgeschätzt und so auf die Transportdistanz geschlossen werden.

Tonmineralogie

Die Analyse der Tonminerale kann unter speziellen Umständen zu einer besseren Kenntnis der Sedimententstehung beitragen. Die Tonmineralienaufbereitung ist relativ komplex, die Analyse, die mit Röntgengeräten erfolgt, ebenso.

Calcimetrie

Die Calcimetrie gibt Aufschluss über den Kalkgehalt des (Fein-)Sedimentes. Man versetzt eine bestimmte Menge Sediment mit Säure und misst die entstehende Menge an Kohlendioxid. So lässt sich der Gehalt an Karbonat (meist Kalk und Dolomit) errechnen.

Schwermineralanalyse

Bei der Schwermineralanalyse werden sandige Sedimente dekarbonatisiert und dann in eine Schwereflüssigkeit gegeben. Die schweren Mineralien (schwerer als Quarz und Feldspäte, d.h. mit einer Dichte größer 2,7 g/cm³) sinken ab. Im optischen Mikroskop werden die Häufigkeiten der einzelnen Mineralien gezählt. Diese Methode gibt Aufschluss über die Herkunft des Sedimentes. Die Schwermineralanalyse ist im Prinzip bei Sanden, was die Geröllanalyse bei Kiesen ist.

Quarzmorphoskopie

Bei der Quarzmorphoskopie wird die Gestalt der Quarzkörner unter dem Mikroskop beobachtet. Zerbrochene Körner deuten auf (Frost-)Bruch hin, runde, matte Körner auf Wind- (selten Meer-) Transport mit chemischer Alteration, runde, polierte Körner auf Flusstransport und/oder Strandablagerungen. Die Morphoskopie gibt vor allem Auskunft über das Ablagerungsmilieu und das Geschehen VOR dem Einwaschen in die Höhle.

Dünnschliffmikroskopie

Die Dünnschliffmikroskopie ist die für Festgesteine am häufigsten angewandte Methode. Ein Gestein wird auf 30 µm geschliffen und unter dem Mikroskop begutachtet. In günstigen Fällen lassen sich nebst der Zusammensetzung des Gesteins auch die Geschichte der Ablagerung und Verfestigung ermitteln.

Datierungsmethoden

Radiokarbon Methode - ^{14}C

Die ^{14}C -Methode (gesprochen: „C-14-Methode“) wird vorwiegend an organischen Resten des Höhleninhalts angewendet. Sie kann bis zu einem Alter von ca. 50 000 Jahren verwendet werden.

U-Th-Methode

wird hauptsächlich an Tropfsteinen angewandt und dort besprochen.

Kosmogene Nuklide

Gesteine an der Oberfläche der Erde werden aus dem Kosmos bestrahlt. Aufgrund dieser Bestrahlung bilden sich kosmogene Nuklide. Im Mineral Quarz bilden sich unter anderem ^{10}Be und ^{26}Al , und zwar im Verhältnis 1:7. Wird nun dieser Quarz von der Oberfläche in eine Höhle gewaschen, so bilden sich keine neuen Nuklide, und die vorhandenen beiden (radioaktiven) Nuklide zerfallen weiter. Da ^{26}Al nur die Hälfte der Halbwertszeit von ^{10}Be aufweist, verringert sich das Verhältnis von 1:7 mit zunehmender Aufenthaltsdauer in der Höhle. Die Messung dieses Verhältnisses ergibt somit die Dauer der Zeit, seitdem das Sediment sich unter Boden befindet. Der datierbare Zeitraum liegt zwischen rund 100 000 und 5 Millionen Jahren.

Pollenanalyse (Palynologie)

Baum- und Strauchpollen sind weit verbreitet. Sie werden durch das Wasser in die Höhlen verfrachtet und lagern sich dort ab. Pollen können uns einerseits über das Paläoklima Auskunft geben (Laubbaumpollen in einer hoch liegenden Höhle deuten auf ein deutlich wärmeres Klima als heute); andererseits auch etwas direkter über die Ablagerungszeit, nämlich wenn sich Pollen heute ausgestorbener Pflanzen finden. Oft auch verrät rein die relative Häufigkeit von Pollen dem Experten, aus welcher Zeit der Blütenstaub stammt. Abgesehen von diesen seltenen Fällen ist die Pollenanalyse nur ein Hilfsmittel zur Datierung, das keine absoluten Werte liefert. Die Pollenanalyse kann auch für Tropfsteine benutzt werden.

Paläomagnetismus

Im Laufe der Erdgeschichte wechselten die Polaritäten von Nord- und Südpol mehrmals relativ abrupt. Dieser Polumkehr wird in magnetischen Mineralien festgehalten. Der Zeitpunkt dieser Umkehren ist bekannt; die letzte fand vor 780 000 Jahren statt. Der Nachteile dieser Methode sind, dass ein exaktes Alter sehr oft nicht ermittelt werden kann, da es in der Erdgeschichte mehrere Umkehren gab. Immerhin verrät ein revers magnetisiertes Sediment ein *Minimalalter* von 780 000 Jahren.

Minerale in Höhlen

Minerale (auch Mineralien) in Höhlen gibt es zuhauf! Aber Höhlenminerale gibt es nur wenige. Dies ist kein Widerspruch: Zum Beispiel besteht Quarzsand aus dem Mineral Quarz, und deshalb ist Quarz ein Mineral, das man in Höhlen findet. Aber entstanden ist er nicht in der Höhle. Allgemein bezeichnet man als "Höhlenminerale" solche, die sich in der Höhle bilden, sei es durch Kristallisation (z.B. wiederum der Spezialfall Eis) und Ausfällung (Tropfsteine, Aragonitkristalle...), oder durch chemische Reaktion zwischen Sedimenten (z.B. diverse Phosphate aus der Reaktion von Guano mit Kalkstein).

Trotz dieser obigen Einschränkung gibt es - weltweit gesehen - sehr viele Mineralien, die sekundär in Höhlen entstanden sind. In unserem Klima und bei unserer Felsbeschaffenheit sind jedoch nur wenige so wichtig, dass sie hier ausführlicher erwähnt werden sollen.

Calcit- und Aragonitkristalle scheiden sich aus calciumkarbonathaltigen Wässern aus. Um Kristalle wachsen zu lassen, muss das Wasser ruhig sein (See, langsame Verdunstung), sonst bilden sich Tropfsteine, die aus kleinsten Kriställchen zusammengesetzt sind. Sehr viele Untersuchungen wurden bereits über das Thema gemacht, wieso manchmal Aragonit entsteht anstelle von Calcit. Fest steht, dass das Angebot von Fremdionen (Mg, Fe etc. statt Ca) im Wasser ein wichtiger Faktor ist.

Ein Spezialfall, der ab und zu angetroffen wird, sind Aragonitnadeln, die an Tropfsteinen wachsen, so genanntes "Frostwork". Dieses bildet sich durch kapillare Wasserfilme an den Außenseiten des Kristalls. Dieser wächst durch Entgasung und auch Verdunstung des Wasserfilms.

Gips und Mirabilit (Natriumsulfat), sowie auch andere Salze, kommen in der Höhle nur vor, wenn Ausgangsmaterialien mit entsprechender Ionenzusammensetzung vorhanden sind. Calcium ist naheliegend aus den Kalkwänden der Höhle zu beschaffen. Sulfate entstehen sehr oft durch Oxidation von (im anstehenden Fels vorhandenem) Pyrit. Die Quelle von Natrium ist oft unklar, es wird angenommen, dass ein Ionenaustausch an Tonmineralien dafür verantwortlich sein könnte.

Als Faustregel gilt: Gips entsteht gerne in der Nähe von Mergeln und mergeligen Fugen, Mirabilit kommt nur bei niedriger Luftfeuchtigkeit vor und ist dementsprechend selten.

Für den Höhlenforscher wichtig ist die Unterscheidung zwischen Aragonit, Calcit, Gips und Mirabilit:

- Gips und Mirabilit lassen sich mit dem Fingernagel ritzen
- Mirabilit schmeckt salzig, Gips ist geschmacklos
- Aragonit ist, sofern Kristalle erkennbar sind, fast immer nadelig ausgebildet. In Tropfsteinen bildet er Lagen, die allermeist milchigweiß und undurchsichtig sind. Vorsicht: Bei weitem nicht alle solchen Lagen bestehen auch tatsächlich aus Aragonit.

In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle handelt es sich entweder um Calcit (der unter Umständen umgewandelt wurde) oder um Gips.

In Höhlen der Nördlich Kalkalpen findet sich manchmal Hydromagnesit. Meist sind keine mit freiem Auge erkennbaren Kristalle ausgebildet, sondern eher weiße Krusten oder blasenartige Gebilde, die an kleine Popcorn erinnern.

Eine genaue und sichere Identifizierung von Höhlenmineralen ist meist nur im Labor z.B. im Röntgendiffraktometer möglich.

Die nachfolgende Liste gibt die in Österreich bisher beobachteten der Höhlenminerale und Mineralien in Höhlen wieder. Bei jedem Mineral wird das Kristallsystem angeführt: **triklin**, **monoklin**, **orthorhombisch**, **tetragonal**, **trigonal**, **hexagonal**, **kubisch**.

	Gruppen	Höhlenminerale (autochthon)	Mineralien in Höhlen (allochthon, oder aus Nicht-Karstprozessen)
I	Elemente	Kohlenstoff (C); organisch, amorph Schwefel (S); rh.	Gold (Au); kub. (Schwermineral)
II	Sulfide	Pyrit (FeS ₂); kub. Markasit (FeS ₂); rh.	
III	Halogenide		Fluorit (CaF ₂); kub. (hydrothermal)
IV	Oxide und Hydroxide	Eis (H ₂ O); hex. Quarz (SiO ₂); trig. Hornstein (Chalcedon: SiO ₂); trig. Magnetit (Fe ₃ O ₄); kub. Hämatit (Fe ₂ O ₃); trig. Maghemit (γ-Fe ₂ O ₃); kub. Goethit (α-FeOOH); rh. Lepidokrokit (γ-FeOOH); rh. Todorokit (Mn-Oxihydrat); mon.	Quarz (SiO ₂); trig. („Augensteine“) (hydrothermal) Hornstein, Jaspis, Opal (Chalcedon: SiO ₂); trig. (mikrokrist.) Magnetit (Fe ₃ O ₄); kub. (Schwermin.) Hämatit (Fe ₂ O ₃); trig. (Schwermin.) Goethit (α-FeOOH); rh. (Schwermin.) Gibbsit (γ-Al(OH) ₃); mon. Böhmit (γ-AlOOH); rh. div. Schwermin.: Rutil, Anatas etc.
V	Carbonate Nitrate	Siderit (FeCO ₃); trig. Calcit (CaCO ₃); trig. Dolomit (CaMg(CO ₃) ₂); trig. Ankerit (CaFe(CO ₃) ₂); trig. Aragonit (CaCO ₃); rh. Vaterit (CaCO ₃); hex. Thermonatrit (Na ₂ CO ₃ • H ₂ O); rh. Soda (Na ₂ CO ₃ • 10H ₂ O); mon. Hydromagnesit (Mg ₅ [OH/(CO ₃) ₂] ₂ • 4H ₂ O); mon. Monohydrocalcit (CaCO ₃ • H ₂ O); hex. Nesquehonit (MgCO ₃ • 3H ₂ O); mon. Lansfordit (MgCO ₃ • 5H ₂ O); mon.	Siderit (FeCO ₃); trig. Ankerit (CaFe(CO ₃) ₂); trig. Malachit (Cu ₂ [(OH) ₂ /CO ₃]); mon. Azurit (Cu ₃ [OH/CO ₃] ₂); mon.
VI	Sulfate	Thenardit (Na ₂ SO ₄); rh. Mirabilit (Na ₂ SO ₄ • 10H ₂ O); mon. Hexahydrat (MgSO ₄ • 6H ₂ O); mon. Epsomit (MgSO ₄ • 7H ₂ O); rh. Gips (CaSO ₄ • 2H ₂ O); mon. Coelestin (SrSO ₄); rh.	Baryt (BaSO ₄); rh. (hydrothermal) Coelestin (SrSO ₄); rh. (hydrothermal)
VII	Phosphate Arsenate	Carbonat-Hydroxyl-Apatit (Ca ₅ [OH/(PO ₄ /CO ₃) ₃]); hex. Brushit (CaH(PO ₄) • 2H ₂ O); mon.	Fluor-Hydroxyl-Apatit (aus Schwermin.) (Ca ₅ [(F/OH)/(PO ₄) ₃]); hex.
VIII	Silikate	Illit (ca. Hydromuskovit)	Tonminerale: Illit, Montmorillonit, Kaolinit, Chlorit („Augensteine“) Glimmer: Muskovit, Biotit („Augenst.“) Feldspat und div andere Mineralbestandteile aus den „Augensteinen“. div. Schwerminerale: Granat, Titanit, Turmalin, Zirkon Hornblende etc.
IX	Organische Substanzen		

PROBEENTNAHME VON MINERALIEN IN HÖHLEN

1. Es sind charakteristische kleine Stücke mit möglichst wenig Verunreinigungen zu nehmen. Die Probeentnahmestelle sollte sich eher in versteckten Bereichen befinden. Für die heutigen Bestimmungsmethoden sind auch sehr kleine Probenmengen ausreichend. Werden mehrere Mineralphasen vermutet, so sind entsprechend mehrere Beprobungen durchzuführen oder wenn möglich auch von der gesamten „Paragenese“ (Mineralvergesellschaftung).
2. Schöne repräsentative Mineralgruppierungen sollten nicht beprobt werden. Informative Fotos (mit Größenvergleich) sind ausreichend.
3. Auf geeignete Sammelgefäße ist zu achten: gut verschließbare, saubere Kunststoffbehälter oder Plastiksäckchen. Nicht zu große Gefäße für kleine Proben. Heikle zerbrechliche Proben sind in weiches sauberes Papier (Papiertaschentücher, WC-Papier) zu wickeln und in einen geeignet dimensionierten, druckfesten Transportbehälter zu geben.
4. Das Probengefäß ist mit Probennummer (oder Objekt- und Ortsbezeichnung) und Datum zu versehen.
5. Bei der Beprobung sehr wasserhaltiger Mineralvorkommen, z.B. bergmilchartigen Ausblühungen, ist darauf zu achten, dass so wenig als möglich Feuchtigkeit verloren geht (die Probe sollte möglichst den gesamten Inhalt des Probenbehälters ausfüllen und das Gefäß möglichst dicht zu verschließen sein). Beim Rücktransport sind starke Temperaturschwankungen zu vermeiden (nicht unter 0°C und nicht zu heiß). Wenn möglich sollte das Material schnell zur Untersuchung gebracht werden. Ist dies nicht möglich, im Eiskasten (nicht im Tiefkühlfach!) im geschlossenen Gefäß bis zur Weiterleitung aufbewahren (im Idealfall sollte die Aufbewahrungstemperatur jener in der Höhle entsprechen).
6. Bei markantem Nebengestein oder Begleitsediment ("Muttersediment") sind davon ebenfalls Proben zu entnehmen.
7. Wenn möglich ist an der Fundstelle Temperatur und Luftfeuchtigkeit, eventuell auch der CO₂ – Gehalt, sowohl in der Höhlenluft, als auch direkt an der Mineralbildung zu messen. Für Vergleichszwecke ist in diesem Fall, am selben Tag, zu ähnlicher Zeit, auch eine Klimamessung ober Tage durchzuführen.
8. Anfertigung eines Fundprotokolls: Folgende Daten und Informationen sollten enthalten sein: Höhlennamen (wenn bekannt auch die Katasternummer), Höhlenteil, Seehöhe und Koordinaten (GPS) des Höhleneingangs, Informationen zur Landschaft und Region. Wichtig wäre auch die umgebende geologische Formation. Finder mit Adresse, Beschreibung der Fundumstände (Skizze/Foto), Kurzbeschreibung des Materials, Probennummer, Datum.

Weiterführende Literatur

Hill, C.A. & Forti, P. (1997): Cave Minerals of the World. NSS, Alabama, 463 p.

Die "Bibel" der Höhlenminerale weltweit, mit geschätzten 90 % der vorhandenen Literatur. Für englisch-sprechende Mineralienliebhaber ein Muss.

Höhlensinter

Das Besondere an vielen Höhlen ist deren Sinterschmuck. Der Überbegriff für sämtliche mineralischen Bildungen aus wässrigen Lösungen, die in Höhlen entstehen, ist Höhlensinter oder Speläotheme. Darunter fallen Tropfsteine, grobkristalline Drusen, Bergmilch aber auch nicht-karbonatische Bildungen wie Überzüge aus Eisen- oder Manganoxid oder Gips (siehe MB Mineralien in Höhlen). Insgesamt sind weltweit aus Höhlen über 200 verschiedene Minerale bekannt, von denen das häufigste Kalzit, trigonal kristallisiertes Kalziumkarbonat (CaCO_3), ist, von dem hier im wesentlichen die Rede ist.

Terminologie

Die mannigfaltige Bildungsweise der Höhlensinter resultiert in einer großen Bandbreite an Bildungsformen, die naturgemäß zu einer Begriffsvielfalt führt. Die in unseren Breiten wichtigsten karbonatischen Formen umfassen:

Sinterröhrchen (Spaghetti, Makkaroni): Strohalm-ähnliche Gebilde, die von der Decke vertikal nach unten wachsen und deren hohler Durchmesser (4-6 mm) dem eines Wassertropfens entspricht. Diese Gebilde sind filigran, wachsen lokal relativ schnell und können im Extremfall mehrere Meter lang werden.

Stalaktite: Deckenzapfen, die sich häufig aus einem Sinterröhrchen entwickeln und deren Wachstum sowohl in vertikaler Richtung nach unten, als auch in seitlicher Richtung durch Ablagerung von Kalzit vom außen herunterrinnenden Tropfwasser erfolgt. Im Querschnitt zeigen Stalaktite deshalb eng gescharte Baumring-ähnliche Wachstumslagen, die sich um einen zentralen Zufuhrkanal legen.

Stalagmite: Bodenzapfen, die sich in der Regel unter einem Sinterröhrchen oder einem Stalaktiten bilden, d.h. das Tropfwasser, das auf der Spitze des Stalagmiten auftrifft, hat meist schon einen Teil seiner gelösten Stoffe abgegeben. Stalagmite wachsen meist vertikal nach oben (Idealfall: kerzenförmig mit gleich bleibendem Durchmesser), können aber auch ein beträchtliches Dickenwachstum aufweisen (kegelige Formen), und zwar dann, wenn die Menge des Tropfwassers abnimmt bzw. die Ausscheidung des Kalzits nicht nur an der Spitze, sondern entlang der Flanken des Stalagmiten erfolgt. Stalagmite weisen im Querschnitt einen Baumring-ähnlichen Aufbau auf, allerdings ohne einen Zentralkanal (vgl. Stalaktite). Im Längsschnitt zeigt sich der vertikale Aufbau mit flach liegenden Lagen im Zentralbereich und geneigten an den Flanken (letztere sind bei kerzenförmigen Stalagmiten nur schwach ausgebildet).

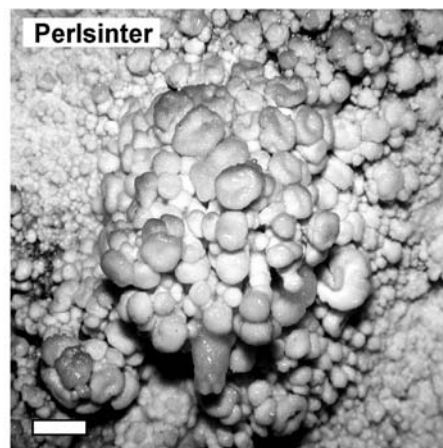
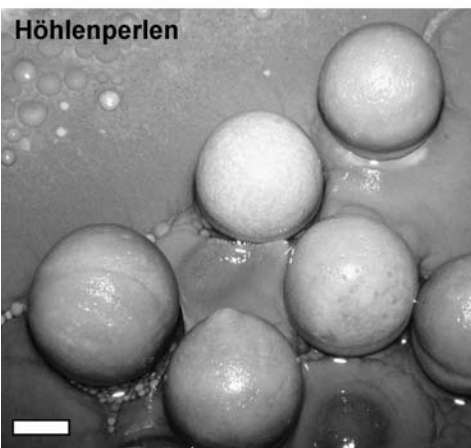
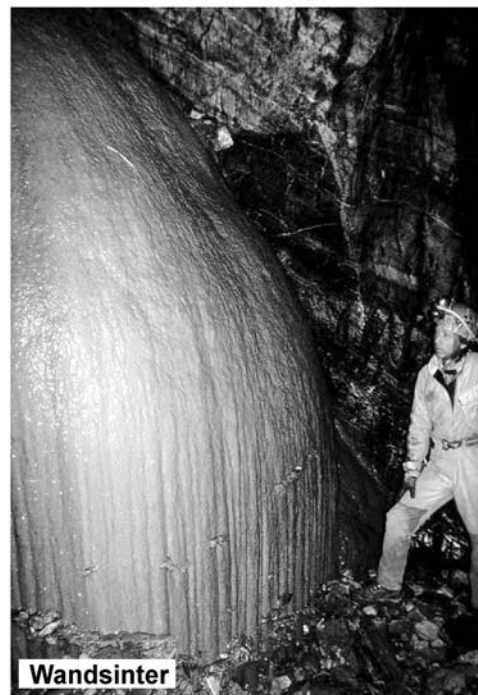
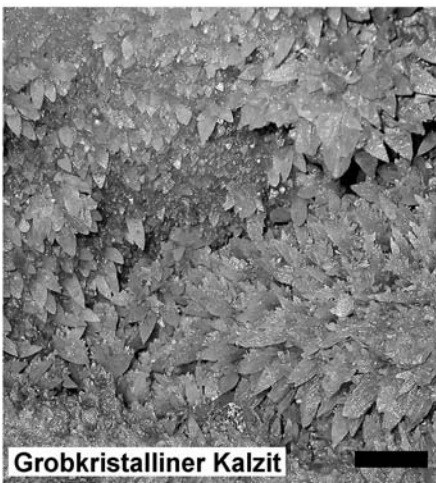
Tropfsteinsäule (Sintersäule): Wachsen Stalaktite und Stalagmite zusammen, so entsteht eine durchgehende Sintersäule, deren Wachstum ab diesem Zeitpunkt ausschließlich in die Breite erfolgt.

Sinterfahne, Sintervorhang: Schmucke, dünne, oft durchscheinende Ablagerungen aus Kalzit, die nicht selten dem Faltenwurf eines Kleides ähneln und z.B. seitlich aus einem Stalaktiten herauswachsen. Sie entstehen durch linear abrinnendes Tropfwasser und zeigen oft einen charakteristischen feingeschichteten Aufbau.

Boden- und Wandsinter (Sinterdecken): Die im internationalen Sprachgebrauch als „flowstone(s)“ bekannten Speläotheme stellen volumenmäßig die wichtigsten Formen überhaupt dar. Die Wasserzufuhr erfolgt nicht punktförmig wie bei Stalagmiten, sondern das Tropfwasser tritt z.B. entlang einer Kluft oder flächig aus dem Gestein aus und trifft (oft aus großer Höhe) unregelmäßig auf und führt so zu einer tafelförmigen Sinterbildung. Wandsinter können randlich an Kanten in Stalaktit-Reihen übergehen, mehrere Meter mächtig werden und mit Sedimenten (z.B. Lehm) wechsellagern.

Sinterbecken: Scheidet sich aus stehenden Gewässern in Höhlen Karbonat ab, so entstehen verschiedenartige Formen, die zum einen seitlich an der Wasseroberfläche bzw. knapp darunter vom Beckenrand Richtung Beckenzentrum wachsen und zum anderen den Boden von Höhlenseen auskleiden. Solche Sinterbecken sind je nach Lokalität z.T. nur episodisch wasserführend.

Höhlenperlen (Sinterperlen): Diese, aus konzentrischen Lagen aufgebauten, kugeligen Gebilde entstehen nur dort, wo Tropf- oder Spritzwasser eine ständige Umlagerung dieser Partikel bei langsam ablaufendem Weiterwachstum bewirkt. Unterbleibt die Zufuhr von oben bzw. ändert sich der Grad der Übersättigung in diesen kleinen Wasserbecken, dann sintern Höhlenperlen am Untergrund an.



Fotos der wichtigsten Sinterformen (Balken jeweils ca. 1 cm lang).

Excentriques: Diese, auch als Heliktite bekannten, abnormen Formen kennt jeder Höhlenforscher. Gewundene, oft korkenzieherartige Formen, die scheinbar unbeeinflusst von der Gravitation wachsen. Im Unterschied zu Sinterröhrchen fehlt ihnen oft ein Zentralkanal. Die Bildungsweise der Excentriques ist ganz offensichtlich uneinheitlich. Kapillareffekte verstärkt durch einseitige Verdunstung an bewetterten Stellen dürften aber eine wichtige Rolle spielen.

Perlsinter (Knöpfchen-, Korallen-, Warzen- oder Karfiolsinter): Kleinere Sinterformen, die, wie die vielfältigen Namen nahe legen, Ähnlichkeiten mit Perlen usf. aufweisen, deren Durchmesser typischerweise einen halben Zentimeter kaum übersteigt. Sie sind häufig an bewetterten Stellen und zeigen z.T. auch die Windrichtung an, unter der sie entstanden sind. Sie finden sich aber auch recht häufig eingangsnah, z.B. in Halbhöhlen.

Grobkristalline Sinter: In manchen Höhlen trifft man auf Kalzitkristalle, die mehrere Millimeter bis lokal Dezimeter groß sein können. Solche drusige Kristalle bilden sich charakteristischerweise nur unter phreatischen (d.h. wassererfüllten) Bedingungen bzw. können auf einen hydrothermalen Ursprung (d.h. Bergwässer, die höher temperiert sind als das Umgebungsgestein) eines Höhlensystems hindeuten.

Bergmilch (Mondmilch): Im Volksmund auch als „Nix“ bekannt unterscheidet sich diese Bildung von kristallinem Tropfstein-Kalzit durch seinen sehr hohen Wassergehalt, der bis zu 90 Gewichtsprozent betragen kann. Die einzelnen, extrem dünnen Kristalle (meist handelt es sich ebenfalls um Kalzit) sind so winzig, dass sie nur unter einem Elektronenmikroskop sichtbar gemacht werden können. Bei der Bildung der charakteristisch weißen und pastenförmigen Bergmilch dürften Mikroorganismen (Bakterien) eine wichtige Rolle spielen.

Warum bilden sich Höhlensinter?

Jeder Höhlenforscher weiß, dass im Zuge der Verkarstung aus dem Muttergestein gelöstes Karbonat beim Eintritt in einen Höhlenraum zum Teil wieder aus dem Tropfwasser ausfällt und Tropfsteine bildet. Nicht selten bekommt man zu hören, dass der Grund, warum diese Reaktion stattfindet, auf die Verdunstung des Tropfwassers zurückzuführen sei. Die Antwort trifft zwar auf einige Höhlen zu, übersieht aber die Hauptursache: Das Entgasen von Kohlendioxid (CO_2) aus dem Tropfwasser (siehe MB Verkarstung). Niederschlagswasser nimmt auf seinem Weg CO_2 aus dem Bodenhorizont auf und kann dadurch Karbonatgestein im Untergrund lösen. Würde dieses Grundwasser in einen völlig abgeschlossenen Höhlenraum tropfen, dann würde darin keinerlei Tropfsteinwachstum stattfinden. Erst wenn dieser Hohlraum – was in den allermeisten Höhlen der Fall ist – über Gänge, Spalten und Schächte mit der Außenluft in Verbindung steht, wenn also ein, wenn auch nur geringer, Luftaustausch mit der Atmosphäre (Bewetterung) stattfindet, sind die Grundvoraussetzungen für Sinterbildung gegeben. Das Tropfwasser „sieht“ beim Eintritt in einen Höhlenraum Luft, deren CO_2 -Anteil (genauer: Partialdruck) geringer ist als der in den engen Rissen und Klüften, in denen die Lösung des Muttergesteins stattfand. Es tritt also ein Effekt vergleichbar dem bei der Öffnung einer Flasche „nicht-stillen“ Mineralwassers ein: CO_2 entweicht. Wenn – was bei Höhlenwässern oft der Fall ist – dieses Wassers ursprünglich an Kalzit gesättigt war, dann bewirkt das Entgasen von CO_2 eine nunmehrige Übersättigung an diesem Karbonatmineral: Es scheidet sich aus. Zurück zur Verdunstung: Dieser Prozess verringert das Volumen an Wasser, was zwangsweise zu einer Aufkonzentration und in weiterer Folge ebenfalls zum Entweichen von CO_2 führen kann. In den meisten Höhlen ist die relative Luftfeuchtigkeit aber nahe bei 100%, d.h. Verdunstung findet kaum statt. In stark bewetterten Höhlen und besonders in solchen, die in trockenen Gebieten liegen und in denen die Tropfstellen immer wieder austrocknen, spielt die Verdunstung eine wichtige Rolle und ist eine treibende Kraft der Bildung von Sintern, nicht selten auch Aragonit (siehe unten).

Wie wachsen Höhlensinter?

Speläotheme „wachsen“, indem Myriaden mikroskopisch kleiner Kalzit- (oder seltener Aragonit-) Kristalle, die mit ihren Kristallflächen die Oberfläche eines Stalaktiten, eines Bodensinters oder eines Sintervorhanges bilden, sukzessive Lage für Lage an eben diese freien Kristallflächen anlagern. Es handelt sich stets um ein Weiterbauen an bestehenden Kristalloberflächen, auch wenn diese z.B. durch

feinste Tonmineral-Partikel verunreinigt sein können. Sintersubstanz ist daher stets kristalliner Natur, wenn auch mitunter von extrem kleiner Kristallgröße (z.B. Bergmilch).

Da der Wasserfilm, in dem die gelösten Stoffe angeliefert werden, nur Bruchteile eines Millimeters dünn ist, können sich bei den genannten Sinterformen keine größeren Kristalle bilden, da deren Enden über den Film hinausragen und so in ihrem Wachstum gestoppt würden. Anders hingegen die Situation in Sinterbecken. Dort können bei entsprechender Übersättigung Kristalle frei in die Lösung hinauswachsen und Kristallrasen oder -drusen entstehen.

Warum sind manche Höhlensinter gefärbt?

Das Hauptmineral der Speläotheme, Kalzit, besitzt keine Eigenfarbe (gleiches gilt für Aragonit). Hochreiner Kalzit, ob als Tropfstein, Kalkstein oder Kalkmarmor ist äußerlich weiß, mikroskopisch betrachtet farblos durchscheinend. Trotzdem erscheint die Mehrzahl der Höhlensinter in Farben, die im wesentlichen auf drei verschiedene Prozesse zurückgeführt werden können: Organische Stoffe, so genannte Humin- und Fulvinsäuren, die durch das Tropfwasser in Spuren aus dem Bodenhorizont in das Höhlensystem eingebracht werden, verursachen die häufige hell- bis dunkelbräunliche, seltener auch gelbbraune Färbung von Tropfsteinen. Eine zweite Form der Färbung wird durch winzige Partikel von Eisen- und/oder Manganoxiden und -hydroxiden bedingt, die über das Tropfwasser oder lokal auch durch die Höhlenluft (Staub) eingetragen werden. Diese anorganischen Pigmente resultieren in braunen (Eisenverbindungen) bzw. schwarzen (Manganverbindungen) Farben. Schwarze Pigmentierung kann lokal auch durch die Deposition von Ruß entstehen, z.B. wenn Rauch in eine Höhle zieht. Selten tritt auch eine dritte Form von Färbung durch den Einbau von spezifischen Spurenmetallen in das Kristallgitter des Kalzits auf. So färben Spuren von Kupfer kalzitische Sinter meist grün, aragonitische Sinter hingegen bläulich. Diese optisch attraktiven Sinterbildungen finden sich nicht selten in alten Erzbergbauen.

Wie rasch wachsen Höhlensinter?

Kaum eine Frage wird von Höhlenbesuchern so oft gestellt wie diese. Leider geistern diesbezüglich nicht immer gut fundierte Zahlen durch das bisherige höhlenkundliche Schrifttum. Zudem haben moderne Untersuchungen gezeigt, dass die Wachstumsgeschwindigkeit einer bestimmten Sinterform bei Leibe nicht mit einer Zahl charakterisiert werden kann und stark davon abhängt, wo die betreffende Höhle gelegen ist. Qualitativ kann gesagt werden, dass Höhlensinter in warm-feuchten Klimaten schneller wachsen also solche in trockenen und/oder kalten Regionen. Auf die Alpen umgelegt bedeutet dies, dass Sinter in einer Höhle auf Talniveau tendenziell schneller wachsen als vergleichbare Sinter einer hochgelegenen Höhle. Grund dafür ist letzten Endes die (mit der Seehöhe abnehmende) Temperatur, die die Vegetationsverhältnisse und den Aufbau des Bodens langfristig kontrolliert; Parameter, welche ihrerseits wieder den Motor für die Karstlösung und den Eintrag entsprechender Sickerwässer in unterirdische Hohlräume darstellen.

Zu den am schnellsten wachsenden Speläothemen zählen die Sinterröhrchen. Wie aus aufgelassenen Bergwerken bekannt können diese filigranen Gebilde bis zu mehrere Millimeter pro Jahr an Länge zunehmen, wenn auch die Hauptmasse deutlich langsames Wachstum "bevorzugen" dürfte. Über das Wachstumsverhalten von Stalaktiten existieren keine genauen Untersuchungen in alpinen Höhlen, aber man kann von Geschwindigkeiten zwischen einigen Hundertstel bis maximal wenigen Zehntel Millimeter pro Jahr ausgehen. Wesentlich besser Bescheid weiß man über Stalagmite. Altersbestimmungen (siehe Kap. Sinterdatierung) und (mikroskopische) Messungen sichtbarer Jahreslagen haben gezeigt, dass Stalagmite aus ostalpinen Höhlen unter derzeit herrschenden Klimabedingungen pro Jahr um etwa 4 bis 6 Hundertstel Millimeter größer werden. Umgelegt auf ein Menschenleben bedeutet dies einen Längenzuwachs von wenigen Millimetern.

Kalzit oder Aragonit?

Kalziumkarbonat, CaCO_3 , tritt in zwei kristallinen Modifikationen auf, einmal Kalzit (Kalkspat) und zum anderen Aragonit. Der Hauptunterschied liegt in der Kristallstruktur. Aragonit ist wesentlich seltener als Kalzit und weist oft auf spezifische Bildungsbedingungen hin (warme Höhlen, relativ geringe

Luftfeuchtigkeit der Höhlenluft, Mg-reiche Gesteine, z.B. Dolomit). Zudem ist Aragonit in Höhlen und nahe der Erdoberfläche instabil und wandelt sich langsam in den stabilen Kalzit um. Bekanntestes heimisches Beispiel für aragonitische Sinter sind die Eisenblüten, die allerdings hauptsächlich in Erzbergbauen vorkamen.

Das Erkennen von Aragonit erfordert einige Erfahrung. Hauptmerkmale von aragonitischen Speläothemen sind deren schneeweiße Farbe, die – falls erkennbar – extrem dünn-faserigen Kristalle, sowie deren Undurchsichtigkeit. Eine sichere Bestimmung ist jedoch nur mit Labormethoden möglich, wozu geringe Mengen etwa vom Volumen eines Streichholzkopfes benötigt werden. Solche Untersuchungen können in den meisten geowissenschaftlichen Instituten routinemäßig durchgeführt werden.

Aktiv oder fossil?

Die Entscheidung, ob eine bestimmte Tropfstein-Form momentan im „Wachsen“ begriffen, also aktiv ist, ist oft keine einfach zu beantwortende Frage. Das bloße Tropfen auf einen Stalagmiten muss nicht zwangsläufig bedeuten, dass hier Karbonat abgelagert wird (wenngleich es in vielen Fällen zutrifft). Den Tropfsteinen „beim Wachsen zusehen“ ist aus logistischen Gründen kaum durchführbar (und so auch deren „Wachsen“ nicht innerhalb kurzer Beobachtungszeiten nachweisbar). Antwort kann letztlich nur die Kombination von hydrochemischen Messungen, daraus erfolgter Berechnung der Unter- bzw. Übersättigung des Tropfwassers an Kalzit und die Langzeitbeobachtung z.B. durch genaues Vermessen oder Markieren von einzelnen Höhlensinterformen geben.

Fossile, d.h. seit Jahrtausenden oder gar Jahrmillionen inaktive Speläotheme erkennt man hingegen relativ leicht an Merkmalen wie graue oder braune Außenfarbe (bedingt durch nachträgliche Anlagerung z.B. von toniger Substanz), die nicht mit der des eigentlichen Sintermaterials im Inneren zusammenpasst, oberflächliche Erosionsmerkmale, fehlende Tropfwasserzufuhr, Versatz durch Brüche, und Umlagerung bzw. Überschichtung durch tonig-sandiges Sediment.

Höhlensinter als Indikatoren

Höhlen stehen in Kommunikation mit der Erdoberfläche und Höhlensinter sind gewissermaßen Stein gewordene Zeugnisse der Einwirkung von Niederschlagswässern und deren Einwirkung auf Karbonatgestein.

Rege Tropfsteinbildung weist auf intensive Karstlösungsprozesse oberhalb der Höhle hin bzw. auf ein humides (Niederschlag überwiegt die Verdunstung) und oft warm-feuchtes Klima mit hoher Niederschlagsrate und gut entwickelter Vegetation und Boden. Umgekehrt zeigen Höhlen in niederschlagsarmen Gebieten, aber auch in kalten (alpinen) Höhlen tendenziell geringeren Tropfsteinschmuck. Allerdings ist Vorsicht bei der unkritischen Übertragung solcher Aussagen angebracht, denn wir kennen in den allerwenigsten Höhlen die Altersverteilung der Speläotheme. Auch wenn es auf einen meterhohen Stalagmiten tropft, kann dieser aus einer klimatisch völlig anderen Zeit stammen und nichts über den heutigen Zustand der Höhle bzw. ihrer klimatischen Lage aussagen. Sicher ist jedoch, dass das Wachstum der Tropfsteine während der großen Eiszeiten des Quartärs (siehe Kap. Quartär) so gut wie völlig zum Erliegen gekommen ist bzw. ältere Sinterformationen lokal durch Gletscherschmelzwässer sogar zerstört worden sind.

Weiterführende Literatur

Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – 292 S., Berlin (Springer).

Ford, D.C. & Williams, P. (1989): Karst Geomorphology and Hydrology. - 601 S., London (Chapman & Hall).

Hill, C. & Forti, P. (1997): Cave Minerals of the World. – 2. Auflage, 463 S., Huntsville/Alabama (National Speleological Society).

Höhlengeheimnisse (2001): Ausstellungskatalog Mineralientage München, 272 S.

Datierung von Höhlensintern

Fragestellung

Es ist einleuchtend, dass Tropfsteine auf Grund ihres sehr langsamen Wachstums ein hohes Alter aufweisen können. Nur mittels physikalischer Methoden ist es jedoch möglich, die genaue Bildungszeit zu bestimmen. Alte Tropfsteine können auch ein sinnvolles Mindestalter der Höhle selbst liefern; eine höhlenkundlich zentrale Frage, die für die allermeisten Höhlensysteme nur annähernd beantwortet werden kann.

Physikalische Grundlagen

Die Altersbestimmung von Höhlensintern beruht auf dem fundamentalen physikalischen Gesetz des radioaktiven Zerfalls. Gewisse Atome, so genannte instabile Isotope, zerfallen mit präzise bekannter Geschwindigkeit. Diese Umwandlung von einem Element in ein anderes ist ein durch äußere Bedingungen unbeeinflussbarer Prozess, bei dem radioaktive Strahlung frei wird. Aus der Menge des heute noch vorhandenen Mutter-Isotops kann – stark vereinfacht gesagt – die Zeit bestimmt werden, seit dieser Zerfallsprozess abläuft. Eine wichtige Maßzahl in diesem Zusammenhang ist die bekannte Halbwertszeit: Sie gibt jenen Zeitraum an, in dem genau die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Isotope zerfallen sind. Vom Kohlenstoff-Isotop ^{14}C (sprich: C14) zerfällt in 5730 Jahren exakt die Hälfte zum Element Stickstoff. Heutige Messinstrumente erlauben es, maximal 8 bis 10 Halbwertszeiten zurück zu datieren. Im Falle von ^{14}C bedeutet dies, dass Proben bis zu einem maximalen Alter von grob gesagt 50.000 Jahren bestimmt werden können.

Die Radiokarbon-Methode

Mit dieser wohl bekanntesten Altersbestimmungsmethode – mit der z.B. das Alter des „Eismanns Ötzi“ bestimmt wurde – hat seinerzeit Herbert W. Franke weitweit die ersten Altersbestimmungen an Höhlensintern versucht. Heute wird diese Methode kaum noch zu diesem Zweck eingesetzt. Der Grund dafür liegt in der Art und Weise, wie das Element Kohlenstoff (C) seinen Weg in das Kristallgitter des Minerals Kalzit (CaCO_3) findet: Die ^{14}C -Methode funktioniert nämlich nur in den Fällen einwandfrei, in denen der gesamte C aus dem biologischen Kreislauf stammt (^{14}C wird in der höheren Atmosphäre gebildet und über die Pflanzen in selbigen aufgenommen). In Karstgebieten gelangt jedoch viel C in das Wasser, der aus dem Lösung von Kalk- oder Dolomitgestein stammt. Der Anteil dieses ^{14}C -freien, „toten“ C in Karstwässern ist variabel und täuscht im daraus entstehenden Höhlensinter ein zu hohes Alter vor. Ein weiteres Problem bei der Datierung mittels ^{14}C ist die Tatsache, dass in der Vergangenheit nicht immer gleich viel ^{14}C in der Atmosphäre gebildet wurde, die „Uhr“ also einmal schneller, dann wieder langsamer „ging“. Für den Zeitraum der letzten 12.000 Jahre hat man die Korrektur zwar im Griff; davor sind jedoch alle ^{14}C Messungen mit einem nicht unerheblichen Korrekturfehler behaftet.

Die Thorium-Uran-Methode

Die Methode der Wahl für die Altersbestimmung von Höhlensintern heißt ^{230}Th - ^{234}U -Ungleichgewichtsmethode, oder kurz Thorium-Uran-Methode (auch Uran-Thorium-Methode genannt). Sie beruht auf dem radioaktiven Zerfall des Isotops ^{234}U zu ^{230}Th , welches in einem nachfolgenden Schritt ebenfalls zerfällt. Das Prinzip ist folgendes: Tropfwasser enthält sehr geringe Mengen an U; in kalkalpinen Karstwässern kaum mehr als wenige hundert Millionstel eines Prozents. Diese Spuren an U werden in den sich bildenden Kalzit des Tropfsteins eingebaut, und zwar nicht als Verunreinigung, sondern fest im Kristallgitter verankert. Ab diesem Zeitpunkt „tickt“ die „Uhr“: Aus ^{234}U entsteht das Isotop ^{230}Th , das anfänglich im Kalzit nicht vorhanden war. Je älter ein Tropfstein, desto größer wird das Verhältnis von ^{230}Th zu ^{234}U . Da ^{230}Th auch radioaktiv ist, lassen sich mit dieser Methode nicht beliebig alte Höhlensinter datieren. Die obere Messgrenze liegt bei etwa einer halben Million Jahre, das ist etwa zehn Mal so viel wie bei der Radiokarbon-Methode.

Für eine Thorium-Uran-Altersbestimmung werden zwischen 0,02 und 0,2 g Material benötigt (im Vergleich dazu wiegt ein Stück Würfelzucker ca. 3 g). Die genaue Einwaage richtet sich nach dem Gehalt des Spurenelements U in der Probe. Je weniger U in der Probe, desto mehr Material wird für eine gute Messung benötigt. Die Probe wird im Labor unter Reinstraumbedingungen aufgelöst, die beiden Spurenelemente U und Th chemisch abgetrennt und anschließend die entsprechenden Isotopenverhältnisse massenspektrometrisch gemessen.

Probenauswahl und Probennahme

Die Beprobung von Höhlensintern richtet sich nach der Fragestellung und muss selbstverständlich dem Höhlenschutz Rechnung tragen. Als ideale Objekte für die Datierung haben sich Stalagmite erwiesen. Der Grund dafür ist ihr meist gut erkennbarer interner Aufbau entlang der vertikalen Wachstumsrichtung. Gut eignen sich auch Wandsinter (siehe Bild), während Bodensinter und Stalaktite nur selten benützt werden.

Bei der Beprobung ist auf optisch sauberes Material zu achten; durch Verunreinigung mit organischer Substanz bzw. Tonmineralen braun oder grau gefärbtes Sintermaterial ist meist ungeeignet, da diese Verunreinigungen Th enthalten und die Messung verfälschen (zu hohe Alter vortäuschen). Bodensinter, der mit Höhlenlehm wechsellagert, ist meist nicht geeignet, da sich durch die hohe Bodenfeuchtigkeit bzw. Überschwemmungen der Höhle (Ablagerung des Lehms) das Sintermaterial nachträglich in seiner Zusammensetzung verändern kann und so die radioaktive „Uhr“ verfälscht wird. Vorsicht ist ebenfalls vor porösen Sinterproben angebracht, da diese nachweislich angelöst wurden und so deren chemische Zusammensetzung verändert wurde.

Die Beprobung geschieht, wenn möglich, an Hand von Bruchstücken oder optisch kaum störenden Kernbohrungen. Für eine umfassende wissenschaftliche Untersuchung werden hingegen ganze Stalagmite entnommen, der zentrale Abschnitt herausgeschnitten und daraus zahlreiche Einzelproben für die Datierung entnommen.

Die Grenzen der Thorium-Uran-Methode

Mit dieser Methode kann der gesamte Zeitbereich von heute bis vor etwa 400.000 Jahre vor heute abgedeckt werden. Die obere Grenze ist variabel und hängt unter anderem von der genauen Zusammensetzung der untersuchten Probe ab. Im Idealfall können sogar Proben mit einem Alter von etwa 500.000 bis 600.000 Jahren noch datiert werden, wenn auch mit einem großen Messfehler.

Wie genau kann datiert werden?

Im Zeitbereich bis etwa 100.000 Jahren überschreitet der Messfehler bei gutem Material 1 bis 2% nicht, d.h. eine 52.000 Jahre alte Probe hätte einen Fehler von z.B. ± 400 Jahren. Im Klartext heißt das, dass bei Nachmessungen ein und derselben Probe 95% aller Messwerte innerhalb von 51.600 und 52.400 Jahren liegen. Der Fehler nimmt mit zunehmendem Alter zu; eine 300.000 Jahre alte Probe kann kaum besser als auf ± 6.000 Jahre datiert werden. Im Schrifttum finden sich Analysen, deren Fehler oft deutlich höher sind, z.B. 105.000 ± 12.000 Jahre. Fast alle dieser älteren Daten wurden mit einer Vorläufer-Methode der heutigen (massenspektrometrischen) Thorium-Uran-Methode bestimmt, die weniger genaue Werte lieferte: die so genannte alpha-Spektrometrie. Die Werte sind zwar (meist) richtig, aber weniger präzise.



Entnahme eines Sinterbohrkerns.

Interpretation von Thorium-Uran-Messungen

Die Auswertung von Altersmessungen an Sinterproben erfordert Erfahrung und insbesondere eine gute Kenntnis der Fundsituation und des Materials. Vorsicht ist bei Einzelwerten angebracht, d.h. wenn nur eine einzelne Messung einer größeren Tropfsteinprobe vorliegt. Erst die Datierung eines zusammenhängenden Sinterprofils, etwa von der Basis zum Top eines mächtigeren Wandsinter-Profils, kann Klarheit über die Altersstruktur schaffen. Aus solchen Daten lassen sich dann auch interessante Rückschlüsse auf die Wachstumsgeschwindigkeit ziehen.

Was kosten Sinterdatierungen?

Im Gegensatz zur bekannten Radiokarbon-Methode gibt es für die Thorium-Uran-Methode zur Zeit keine kommerzielle Schiene. Das dürfte sich auch in naher Zukunft kaum ändern. Der theoretische Kostensatz einer Messung liegt bei etwa € 500.

Alternative Methoden

Leider gibt es zurzeit keine Methode, um das Alter einer Höhlensinterprobe zerstörungsfrei oder gar vor Ort in der Höhle zu bestimmen. Neben der Thorium-Uran-Methode kann auch – mit großen Vorbehalten – die etwas günstigere Radiokarbon-Methode eingesetzt werden, vor allem für geologisch junge Proben. Für sehr alte Proben steht die Uran-Blei-Methode zur Verfügung; allerdings eignen sich nur sehr wenige Proben für deren Anwendung.

Weiterführende Literatur

Dorale, J.A., Edwards, R.L., Alexander, E.C., Shen, C.C., Richards, D.A. & Cheng, H. (2004): Uranium-series dating of speleothems: current techniques, limits, and applications. – In: Studies of Cave Sediments (Hrsg. Sasowsky, I.D. & Mylroie, J.), S. 177-197, New York (Kluwer).

Eisenhauer, A. & Hennig, G. (1999): Methoden zur Altersbestimmung von Tropfsteinen. – In: Höhlen. Welt voller Geheimnisse (Hrsg. S. Kempe), S. 62-69, Hamburg (HB Verlags- und Vertriebs-Gesellschaft).

Ford, D.C. (1997): Dating and paleo-environmental studies of speleothems. – In: Cave Minerals of the World (Hrsg. Hill, C. & Forti, P.), S. 271-284, Huntsville/Alabama (National Speleological Society).

Franke, H.W. (2001): Höhlensinter und Vorzeitklima. – Naturwissenschaftliche Rundschau, 54. Jg., S. 233-239.

Häuselmann, Ph. & Granger, D.E. (2005): Dating of caves by cosmogenic nuclides: method, possibilities, and the Siebenhengste example (Switzerland). – Acta Carsologica 34(1): 43-50.

Richards, D.A. & Dorale, J.A. (2003): Uranium-series chronology and environmental applications to speleothems. – In: Uranium-Series Geochemistry (Hrsg. Bourdon, B., Henderson, G.M., Lundstrom, C.C. & Turner, S.), Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Bd. 52, S. 407-460, Washington, D.C. (Mineralogical Society of America).

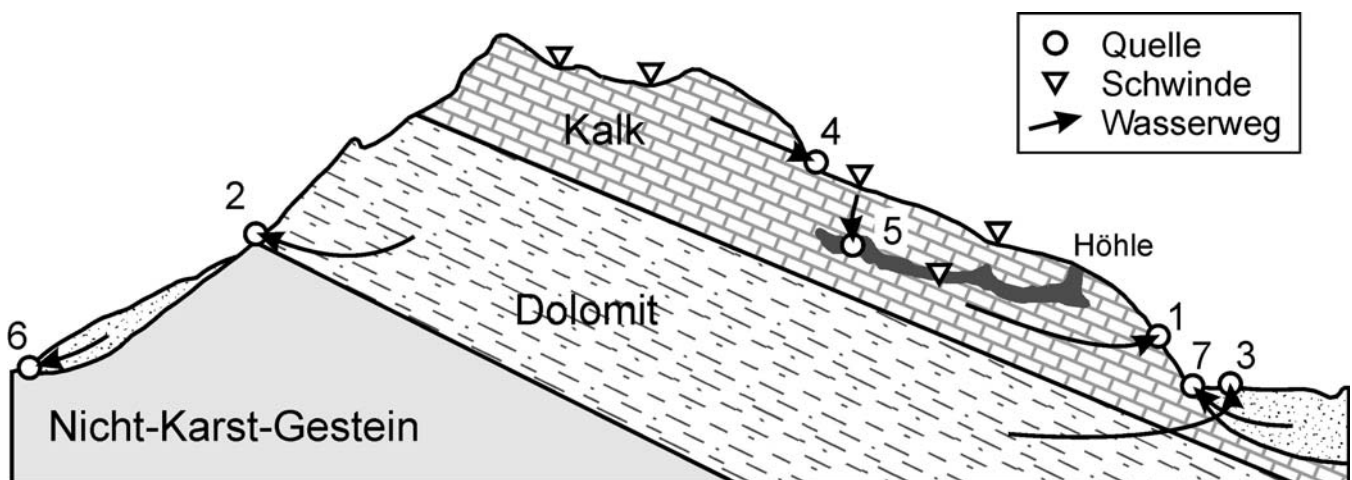
Kontaktadresse

Dr. Christoph Spötl, Universität Innsbruck, Institut für Geologie und Paläontologie, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Email: christoph.spoetl@uibk.ac.at

Typen von Karstquellen

- 1 **Stark schwankende Karstquellen** Diese Quellen entspringen aus Karstgefäßen oder Höhlengängen mit rascher Durchflutung. Sie reagieren schnell, oft innerhalb weniger Stunden auf Niederschlag und Schneeschmelze. Die Schüttungen können auf die 10 – 1000 fache Niederschlagsmenge ansteigen. Bei längerer Trockenheit können manche völlig versiegen. Temperatur und Chemismus schwanken in geringerem Maß gegenläufig zur Schüttung (bei hoher Schüttung niedrige Temperatur und Härte).
- 2 **Ausgeglichene Karstquellen** Sie zeigen keine, oder nur geringe Reaktion auf Niederschlag und Schneeschmelze und weisen einen ausgeglicheneren Jahresgang von Schüttung, Temperatur und Härte auf. Die unverminderte Schüttung nach längerer Trockenheit weist auf ein großes Wasserreservoir (Karstwasserkörper) hin, das den schwankenden Zufluss von Niederschlags- und Schneeschmelzwasser ausgleicht. Das Wasserreservoir darf man sich freilich nicht als den sprichwörtlichen großen See im Berg vorstellen, vielmehr ist das Wasser in einem dichten, feinen Kluftnetz gespeichert. Dieser Quelltyp kommt häufig in Dolomitgebieten, seltener im Kalk vor.
- 3 **Verdeckte Karstquellen** Liegt das Einzugsgebiet der Quelle im verkarstungsfähigen Gestein, der eigentliche Quellaustritt aus dem Festgestein ist aber von Schutt oder Blockwerk verdeckt, so spricht man von einer verdeckten Karstquelle.
- 4 **Plateauquelle** Meist kleinere Spalten oder Schichtfugenquellen im Hochbereich des Gebirges, deren Wasser nach einer gewissen oberirdischen Fließstrecke durch eine Schwinde wieder in den verkarsteten Gebirgskörper eintritt. Diese Quellen haben keinen oberirdischen Abfluss zum hydrographischen Gewässernetz.
- 5 **Untertagequellen** Bergwasseraustritte in natürliche (Höhlen) oder künstliche (Stollen) Hohlräume des Festgesteines. Die grundlegende Definition einer Quelle: „Austritt von unterirdischem Wasser an die Erdoberfläche“ ist nur soweit erfüllt, als man begehbare Höhlen und Stollen als verlängerte Erdoberfläche ansieht.
- 6 **Schwemmkegel- und Hangschuttquellen** Diese Quellen haben ihr Einzugsgebiet in lokalen Lockersedimenten und beziehen kein Karstwasser. Wenn der Hangschutt aus Kalk oder Dolomit besteht, ist die Unterscheidung nach dem Chemismus oft schwierig.
- 7 **Talgrundwasserauftriebe** Aufstoßendes Grundwasser aus Begleitgrundwasserströmen der Flüsse, kein Karstwasser.

Zwischen diesen Grundtypen gibt es natürlich eine Vielzahl von Mischformen.



Quellentypen aus Dissertation von G. Völkl, 1974, verändert.

Die wichtigsten Untersuchungsmethoden von Karstwässern

Messungen an Ort und Stelle

- **Schüttung** Diverse Methoden (siehe unten)
- **Temperatur** Schöpfthermometer (Wasserthermometer)
Elektronischer Temperaturfühler
- **Elektrische Leitfähigkeit** Elektrische Widerstandsmessung

Laboruntersuchungen

Chemische Analyse:

- **Gesamthärte**
- **Karbonathärte**
- **Kalziumhärte**
- **Umweltisotope**
- **Bakteriologisch-hygienische Untersuchungen**

Methoden zur Bestimmung der Schüttung

Die Durchflussmenge oder Schüttung, ausgedrückt in Liter/Sekunde (l/s) ist die wichtigste Kenngröße die es bei einem Höhlengerinne oder einer Karstquelle zu bestimmen gilt. Die Methoden der "Hydrometrie" sind sehr vielfältig. Im Folgenden soll auf einige Methoden näher eingegangen werden, die es dem Höhlenforscher ermöglichen, Angaben über die Wasserführung von Höhlengerinnen oder Karstquellen zu machen.

Gefäßmessung

Geräte: Stoppuhr, Messgefäß

Mit dieser einfachen Methode können sehr genaue Werte ermittelt werden. Es wird die Zeit gemessen, in der ein Gefäß bestimmten Inhalts vollläuft. Für Messungen der Größenordnung 1–10 l/s genügt ein 10-Liter-Kübel. Bei höheren Schüttungen muss entweder ein größeres Gefäß verwendet, oder das Gerinne auf mehrere Stränge aufgeteilt werden. Voraussetzung für eine Gefäßmessung ist ein Überfall, unter den das Messgefäß gestellt oder gehalten werden kann. Ein solcher kann auch durch den Einbau von Blechrinnen oder einer Überfallwehr künstlich erzielt werden. Der Rauminhalt der verwendeten Messgefäße muss immer genau bestimmt (ausgelitert) werden.

Schwimmermessung

Geräte: Stoppuhr, Maßstab

Für diese Messung muss man eine Fließstrecke auswählen, an der über eine bestimmte Strecke der benetzte Querschnitt des Gerinnes möglichst gleich bleibt. Der Querschnitt wird an mehreren Stellen so genau wie möglich ausgemessen. Oberhalb der Messstrecke werden Triftkörper (Holzstücke, Papierkugeln etc.) ins Wasser geworfen und die Durchgangszeit auf der Teststrecke mit der Stoppuhr gemessen. Es sind unbedingt mehrere Messungen zu machen, aus denen ein Mittelwert zu bilden ist. Das Profil des Gerinnes kann durch Einbauten (Bretter) idealisiert werden. Die Methode bringt nur Näherungswerte.

Beispiel: Länge der Messstrecke 3m; mittlere Breite des Gerinnequerschnittes 1 m; mittlere Tiefe 10 cm; gestoppte Zeiten 3,9 s / 4,1 s / 4,0 s;

$$Q = 300 \text{ l} / 4 \text{ s} = 75 \text{ l/s}$$

Indikatorverdünnungsmethode mit Momentaner Eingabe (= Salzverdünnungsmethode)

Geräte: (wenn Kochsalz als Indikator verwendet wird) Leitfähigkeitsmessgerät, Stoppuhr, Kochsalz (die im Lebensmittelhandel erhältlichen Packungen sind erfahrungsgemäß ausreichend genau eingewogen)

Die Methode ist vom Prinzip her einfach, weist eine hohe Messgenauigkeit auf, bedarf aber einer Grundausrüstung relativ kostspieliger Messgeräte. Sie eignet sich besonders bei stark turbulenten Gerinnen. Bei der Verwendung entsprechend empfindlicher Messgeräte genügt für Schüttungen bis 500 l/s ein kg Salz.

An der Messstelle werden zunächst die Grundleitfähigkeit und die Temperatur des Gerinnes gemessen. Die Einspeisung des Salzes muss soweit oberhalb der Messstelle durchgeführt werden, dass bei dieser eine vollkommene Durchmischung gewährleistet ist und die Messung an nur einem Punkt des Gerinnequerschnittes erfolgen muss. In bestimmten Zeitintervallen wird nun an der Messstelle die Leitfähigkeit abgelesen oder automatisch registriert. Von den nach der Salzeinspeisung ansteigenden Leitfähigkeitswerten muss jeweils die Grundleitfähigkeit abgezogen und die Summe dieser Werte mit dem Zeitintervall und dem Temperaturfaktor multipliziert werden. Wird nun die eingegebene Salzmenge durch diesen Wert geteilt, so erhält man die Abflussmenge pro Zeiteinheit (= Schüttung).

$$Q = \frac{M}{\int_{t_0}^{t_E} c \cdot f \cdot dt}$$

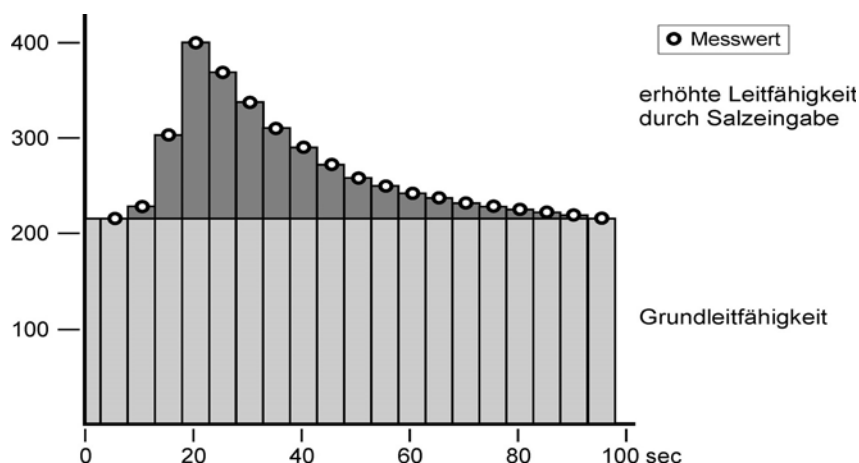
Q = Schüttung [l/s]
 M = eingegebene Salzmenge [g]
 c = abgelesene Leitfähigkeit – Grundleitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
 f = Umrechnungsfaktor LF in Konzentration [g/l], (liegt für NaCl bei etwa 0,00055)
 dt = Messintervall (z.B. 5 sec.)

Zur Berechnung müssen alle c -Werte (erhöhte LF) aufsummiert werden und mit den anderen Faktoren multipliziert bzw. dividiert werden.

Einige hilfreiche Faustregeln:

- Salzbedarf [g] $\sim$ geschätzter Durchfluss [l/s] $\cdot$ 3
- Lösungswasser [l] $\sim$ Salzmenge [kg] $\cdot$ 4
- Fließstrecke $\sim$ Querschnitt $\cdot$ 25 (bei turbulent fließenden Gewässern)
- Max. Erhöhung der LF [$\mu\text{S}/\text{cm}$] $\sim M$ [kg] / (Schüttung [l/s] $\cdot$ 100)

Für Höhlenforscher ist die Methode insofern interessant, weil nur mit einem kleinen Leitfähigkeitsmessgerät (etwa so groß wie eine Taschenlampe für Flachbatterie), einer Stoppuhr und einigen Sackerln zu 100 g Salz gearbeitet werden kann. Für die Durchführung sind dann ein bis drei Leute notwendig, die vorher aber an einem gemütlichen Bächlein bei Tageslicht üben sollten.



Literatur

Benischke, R., Harum, T. (1984): Computergesteuerte Abflussmessungen in offenen Gerinnen nach der Tracerverdünnungsmethode (Integrationsverfahren); Steirische Beiträge zur Hydrogeologie; Bd. 36; Graz.

Interpretation hydrochemischer Parameter des Karstwassers

Die an Karstwässern gemessenen chemischen und physikalischen Parameter hängen vom Aufbau des Karstwasserkörpers ab und können unter anderem Aussagen über die Seehöhe des Einzugsgebietes oder über die am Aufbau beteiligten Gesteine liefern. Dazu müssen wir aber wissen, welche Faktoren sich wie auf die Menge und Art der gelösten Stoffe im Karstwasser sowie die Variation innerhalb des Karstkörpers auswirken.

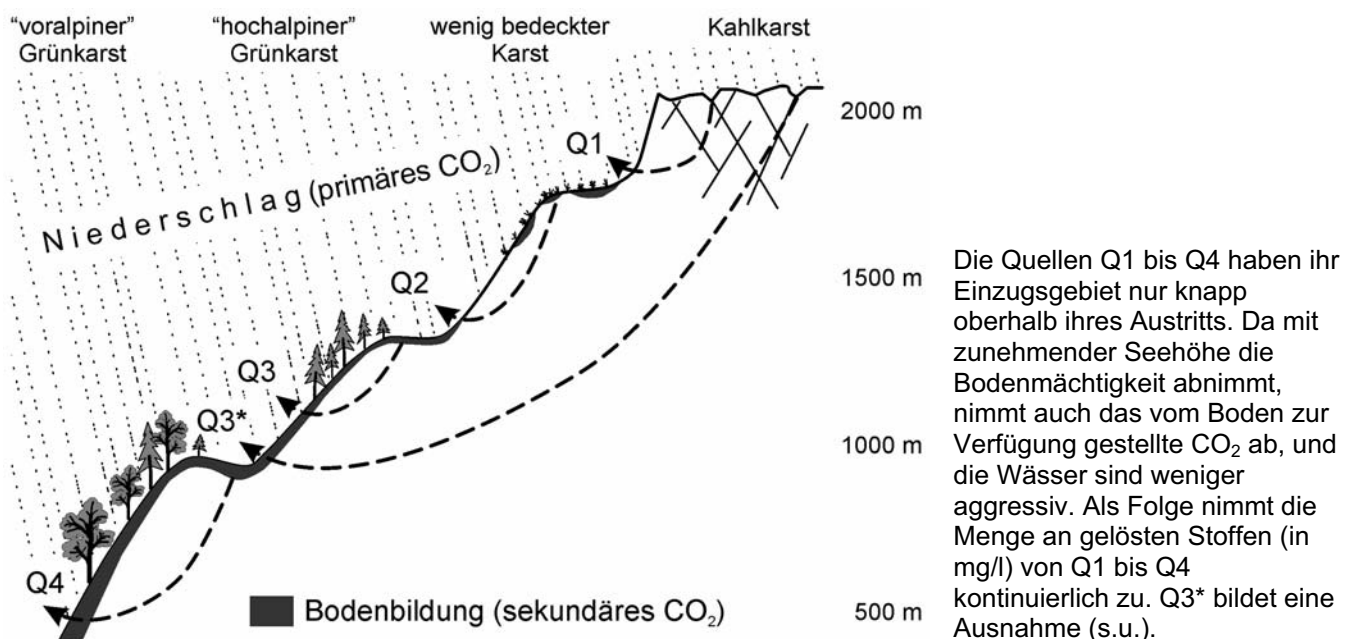
Chemisch-physikalische Parameter von Karstwässern

- **Mineralisation:** Einheit: mg/l. Für Karstwässer relevante Stoffe:
Ca (Calcium)
Mg (Magnesium) – u.a. in Dolomit
HCO₃ (Hydrogencarbonat)
SO₄ (Sulfat) – deutet auf Gips hin
NO₃ (Nitrat) – aus dem Boden; Überhöht: durch Düngung
Im Bereich von Salzlagerstätten: Na (Natrium), K (Kalium), Cl (Chlorid).
- **Elektrische Leitfähigkeit:** Ist mit der Summe der gelösten Stoffe, also mit dem Gesamtmineralgehalt korrelierbar. Einheit: $\mu\text{S}/\text{cm}$ (μS = Mikrosiemens); Karstwässern haben zumeist einige 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
(Faustregel: Gesamtgehalt an gelösten Stoffen [mg/l] = LF [μS] * 0,8)
- **Gesamthärte:** Gibt die Summe an gelöstem Ca und Mg an. Ist, wenn nicht durch Salzlagerstätten beeinflusst, proportional zum Gesamtgehalt an gelösten Stoffen (Faustregel: Gesamthärte = Gesamtgehalt [in mg/l] / 30).
- **pH-Wert:** Gibt an wie „sauer“ oder wie „basisch (=alkalisch)“ ein Wasser ist. (pH 7 = neutral, <7 = sauer, >7 = basisch). Somit lassen sich z.B. Rückschlüsse auf vorhandenes aggressives CO₂ ziehen.

Wichtige Faktoren für die Hydrochemie von Karstwässern

1 Vegetation und Bodenbedingungen

Diese Faktoren haben in hydrochemischer Hinsicht vor allem auf den Gehalt an aggressivem CO₂ im Sickerwasser und damit auf die Menge der gelösten Stoffe im Karstwasser Einfluss. Da die Bodenbedingungen klimabedingt von der Seehöhe abhängig sind, kann dieser Parameter Aufschluss über die Seehöhe des Einzugsgebietes einer Quelle geben.



Aus einer großen Zahl an Serienuntersuchungen und Einzelmessungen in alpinen Höhlen wurde die in nebenstehender Abb. dargestellte Kurve ermittelt, die den Zusammenhang zwischen Seehöhe des Einzugsgebietes und Gesamtmineralisation zeigt.

Man sieht auch, dass die Variabilität innerhalb der Karsttypen umso größer ist, je mächtiger die Boden- bzw. Vegetationsbedeckung ist. Dort sind lokal sehr unterschiedliche Verhältnisse festzustellen, was eine große Spannweite im CO_2 -Angebot und damit letztlich auch in der Gesamtmineralisation mit sich bringt. Deshalb wirken sich Niederschlagsereignisse im Grünkarst besonders stark auf die Mineralisation aus.

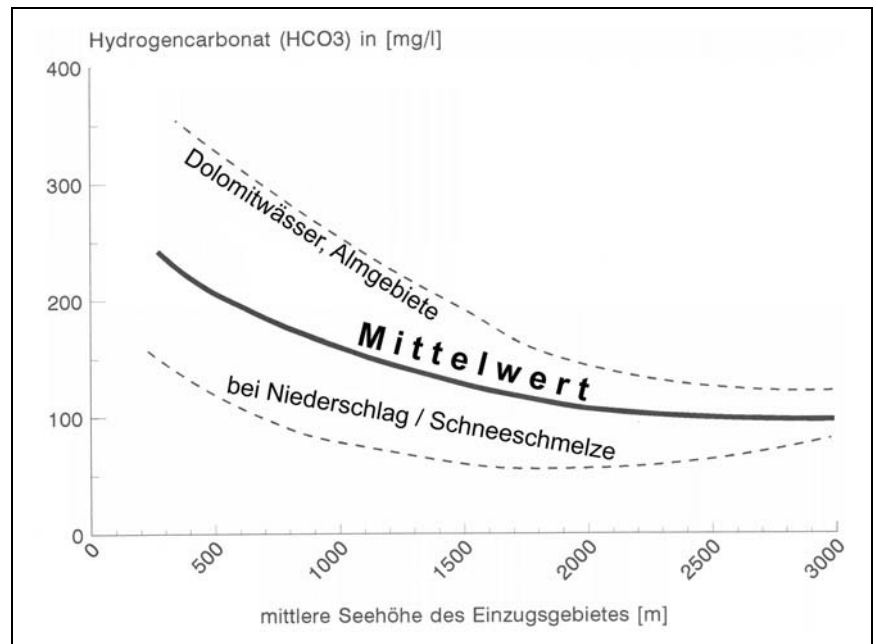
Es gibt aber viele Fälle, wo Karstwasser aus hochgelegenen Kalkkarstbereichen Quellen im Talniveau (Grünkarstgebiet)

anspeisen, die sich dann durch eine scheinbar abnorm niedrige Mineralisation auszeichnen. In der vorseitigen Abbildung ist dies die Quelle Q3*. Die Mineralisation der Quelle Q3* entspricht jener der Quelle Q1 da im Einzugsgebiet die selben Bodenbedingungen vorherrschen. Die Mineralisation der Quelle Q3* ist somit deutlich geringer als die der Quelle Q3.

Derartige Möglichkeiten gibt es natürlich für alle 4 Bereiche, in allen Übergangsstufen. Dies zeigt, dass die hydrochemische Systemanalyse eines Karstgebietes durchaus komplexe Formen annehmen kann.

Beispiele: zwei Quellen (beprobt im Aug. 1985) aus dem Bereich des Toten Gebirges:

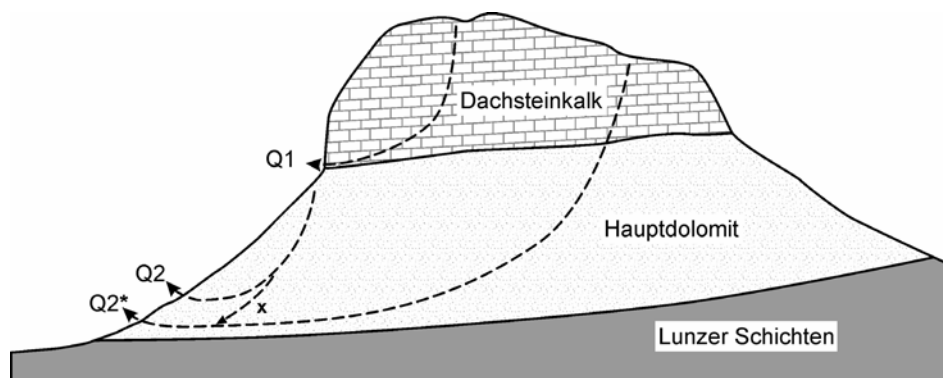
- Steyrerseequelle (Tauplitz, 1510 m Sh.): 236 mg/l Gesamtgehalt (entspricht Typ Q2)
- Steyr-Ursprung (Stodertal, 750 m Sh.): 134 mg/t Gesamtgehalt (Typ Q3*)



Abhängigkeit der Mineralisation von der Seehöhe des Einzugsgebietes. Rund 1500 Wasseranalysen aus alpinen Höhlen, dargestellt als Mittelwert und Streubereich (strichlierte Linie). Daten der Spelaqua-Datenbank der Karst- und höhlenkundlichen Abteilung am NHM-Wien. Aus dem Diagramm lassen sich *ungefähre Angaben* über das Einzugsgebiet von Quellen ableiten.

2 Geochemische Verhältnisse im Karstaquifer

Für das Verhältnis der verschiedenen gelösten Stoffe im Karstwasser (Ca , Mg , HCO_3 , ...) zueinander ist von Bedeutung, welche Gesteine (Kalke, Dolomite, Mischgesteine, gipsführende $[\text{SO}_4]$ Gesteine) vorliegen und wie sie zueinander in Beziehung stehen. Dies soll durch das folgende Beispiel verdeutlicht werden:



Q1 Kalkwasser: $\text{Ca} \gg \text{Mg}$
 Q2 Dolomitwasser: $\text{Ca} / \text{Mg} \sim 2$
 Q2* Kalkwasser im Dolomitgebiet: $\text{Ca} / \text{Mg} > 2$
 (Jeweils ausgehend von den Gehalten in mg/l)

Da das kohlensäurehaltige Wasser sehr rasch *nahezu* vollständig mit Ca und Mg gesättigt ist findet die hydrogeochemische Prägung hauptsächlich in den oberflächennahen Schichten des Einzugsgebietes statt. Dies können wir bei Quelle Q2* sehen, wo die Lösungskapazitäten bereits im Kalkaquifer verbraucht wurden. Der festzustellende geringe Magnesiumgehalt kann durch lokal aus dem Dolomit zutretende Wässer (in der Abb. mit x markiert) bedingt sein.

Beispiele aus dem Toten Gebirge (Aug. 1985):		Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Ca / Mg
Q1	Tropfwasser Bärenhöhle (Brieglersberg)	40	2	20,0
Q2	Wildenseequelle	27	13	2,1
Q2*	Steyr-Ursprung	29	3	9,7

3 Tektonische Verhältnisse

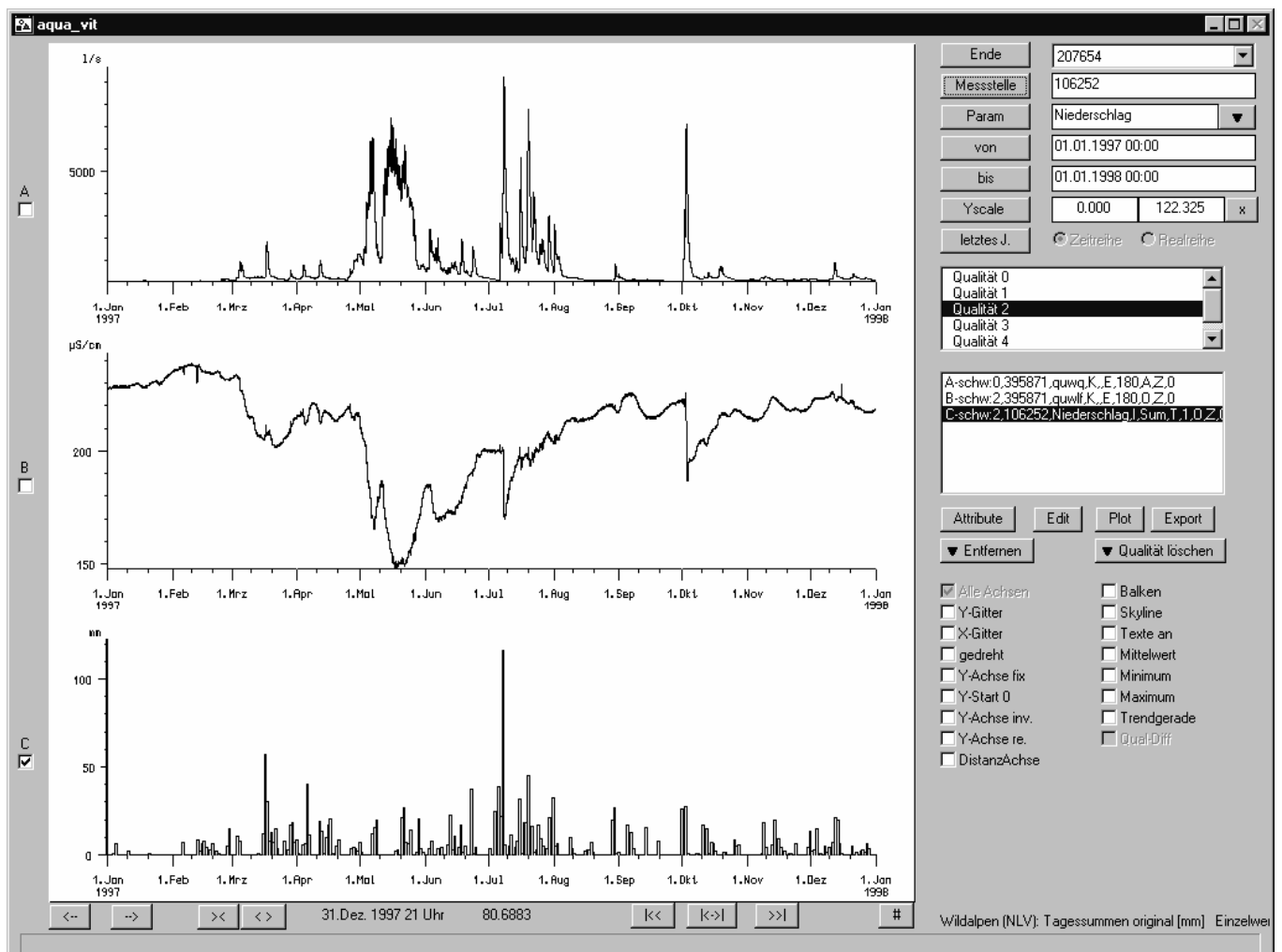
Beim Vorliegen weniger, jedoch stärker ausgeprägter Trennflächen können die aggressiven Sickerwässer im Vergleich zu feinklüftigen Gesteinen rascher in größere Tiefen gelangen. Das bedeutet, dass auch in den Tiefen des Karstkörpers noch nennenswerte Lösungskapazität vorhanden ist, auch wenn sich diese im Chemismus der Wässer nur sehr schwach auswirkt. Diese Phänomene bedingen auch den Unterschied zwischen Kalk und Dolomitzkarstgebieten in speläologischer Hinsicht: die im Allgemeinen wesentlich feinklüftigeren Dolomite sind ärmer an Höhlen.

Auch der Charakter von Quellen hängt maßgeblich vom Aufbau des Aquifers ab: Dolomitquellen sind wesentlich konstanter sowohl in ihrem Schüttungsverhalten, als auch in den chemischen Parametern. Da die Fließgeschwindigkeiten im feinklüftigen Dolomit geringer sind, ist auch die Verweilzeit des Wassers unter Tag größer und Schadstoffe (z.B. Nitrat) oder Bakterien werden eher abgebaut und gefiltert als in Kalkaquiferen. Aus diesen Gründen sind Dolomitquellen besser für die Wasserversorgung nutzbar.

Elektronische Datensammlermess-Systeme

Die elektronischen Messgeräte und Datensammler haben die hydrographische Beobachtung tiefgreifend verändert. Die Messgeräte sind noch kleiner, leistungstärker, preisgünstiger und teilweise sogar robuster geworden, haben aber auch ihre Tücken. Die Temperatur lässt sich nun auf ein Hundertstel Grad ablesen, aber im Vergleich liegen verschiedene Geräte oft um ganze Grade auseinander. Der Vergleich mit guten alten Quecksilberthermometern ist immer wieder notwendig.

In der Hydrographie werden bei Quellmessstellen die Schüttung, Leitfähigkeit, Temperatur und Trübung registriert. Bei Forschungs- oder Beweissicherungsprojekten wird gelegentlich auch der pH-Wert und gelöster Sauerstoff gemessen. Aber Achtung: Die Geräte funktionieren unter erschwerten Bedingungen wie sie in freier Natur oder gar in der Höhle gegeben sind, nicht immer so wie vom Verkäufer angepriesen. Außerdem haben sie eine New Generation Zivilisationskrankheit mit sich gebracht: die **Messwertgläubigkeit**. Es ist sehr einfach digitale Daten in einen PC zu spielen und mit irgendwelchen Softwarepaketen auf verschiedenste Weise zu verknüpfen und darzustellen. Rohdaten müssen aber immer erst einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden, oder weniger geschwollen: nicht nur den PC, auch das Hirn einschalten!



Schüttung (A), Elektrische Leitfähigkeit (B) einer Karstquelle und Niederschlag (C) einer nahegelegenen Station parallel aufgetragen.



Die Quellschüttung ist natürlich die wichtigste Angabe, aber gerade dabei ist es mit einer Messsonde und einem Datensammler nicht getan. Man kann auf verschiedene Weise den Wasserstand oder die Fließgeschwindigkeit registrieren, aber es ist notwendig den Querschnitt des Gerinnes genau zu bestimmen und eine Schlüsselkurve zur Umrechnung von Wasserstand auf Durchfluss zu erstellen. Bei Regelprofilen wie Rechtecks- oder Dreiecksüberfall, gibt es auch feste Formeln.

Die Leitfähigkeit ist gerade für den Höhlenforscher eigentlich der Schlüsselparameter. Kann man doch aus der Schüttung und der Menge der im Wasser gelösten Stoffe auf den Rauminhalt schließen, der etwa in einem Jahr aus dem Gebirge herausgelöst wird – also auf die Höhlenbildung! Die Leitfähigkeit erlaubt aber noch andere interessante Rückschlüsse auf die Verweilzeit des Wassers im Untergrund und auf die Gesteine mit denen das Wasser im Gebirge in Kontakt gekommen ist.

Die Temperatur ist ein unproblematischer Messwert, es sollte aber die Messgenauigkeit immer auf 1/100 Grad eingestellt werden, weil die Schwankungsbreite innerhalb eines Jahres häufig nur wenige 1/10 Grade ausmacht.

Ganglinien verschiedener Parameter über einen gewissen Zeitraum sagen viel mehr aus, als Einzelmessungen. Nach Möglichkeit sollte zumindest eine Jahresganglinie erhoben werden. Bei Quellen ist vor allem die Reaktion auf Niederschläge und Schneeschmelze interessant. Letztere zeigt oft interessante Tagesgänge etwa mit der Spitze schon um 18 Uhr oder erst um 3 Uhr nachts. Zum Vergleich können die Daten hydrographischer Niederschlagsstationen aus der Umgebung herangezogen werden.

Die ausdrückstärkste Darstellung der Werte ist nach wie vor die einfache Ganglinie, die Werte auf der Zeitachse aufgetragen. Ein grober EDV-Unfug sind diese Bandwürmer, räumlichen Blockdiagramme und Torten. Dabei werden automatisiert Dimensionen dazugespielt, die keinen Sinn ergeben, für den der sich wirklich dafür interessiert, sogar sehr störend wirken. Eine dreidimensionale Darstellung kann nur erfolgen, wenn ich auch tatsächlich drei Werte einbringe. Man muss nur einmal versuchen aus einer Bandwurmganglinie einen Wert anzulesen. Den muss man unter Augen verrenken erst schräg nach hinten auf eine imaginäre Fläche und dann nach links und unten projizieren...

Ein wichtiger Aspekt sind auch die Extremwerte, vor allem minimale und maximale Wasserstände oder Schüttungen. Bei extremen Hochwasserführungen können natürlich kaum Messungen durchgeführt werden – obwohl vom Hydrographischen Dienst in Tirol schon Durchflüsse bis zu 64.000 l/s mit der Salzmethode (Eingabe von 50 kg Salz) gemessen wurden. Wichtig ist es Wasserstandsmarken zu dokumentieren, dass eventuell die Hochwasserdurchflüsse nachträglich näherungsweise berechnet werden können.

Höhlen und Paläoklimaforschung

Paläoklimatologie – eine kurze Einleitung

Spätestens seitdem Begriffe wie Klimawandel und Global Change Eingang in das Vokabular von Politik und Medien gefunden haben ist allgemein klar geworden, dass es so etwas wie ein stationäres Klima nicht gibt. Klima, also der mittlere Zustand der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum ausgedrückt in Messgrößen wie Lufttemperatur, Niederschlagsmenge, Windrichtung, Strahlung, usf., ist Veränderungen unterworfen, die auf Zeitskalen von wenigen Jahren bis Millionen von Jahren passieren. Die Wissenschaft, die sich mit der Dynamik des Klimas beschäftigt, die Klimatologie, begann sich erst im Laufe des 20. Jahrhunderts aus der Meteorologie herauszuentwickeln. Die Jugendlichkeit dieser Forschung wird verständlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass es erst etwa seit 100 Jahren ein einigermaßen erdumspannendes Netz an Messstationen gibt. Ein solches ist Voraussetzung, will man die enorme Dynamik der Atmosphäre, die ja keine politischen Grenzen kennt, erfassen.

Für einzelne Gebiete reichen die Klima-Aufzeichnungen mittels Instrumenten etwas weiter zurück, für Österreich z.B. bis 1767 (Station Kremsmünster). Für den gesamten Zeitraum davor – und dieser umfasst den allergrößten Abschnitt der Erdgeschichte (eindrucksvolle 99,99999%, wenn man es ganz genau nimmt) – gibt es keine "exakten" Klimadaten, sprich solche, die mit physikalischen Instrumenten gemessen wurden: Wir haben das Feld der Paläoklimatologie betreten (vom Griechischen *palaios* für alt). Auch sie ist eine junge Zunft, wenngleich sich Geologen schon seit vielen Jahrzehnten mit dem wechsellvollen Gang des Klimas während der 4,5 Milliarden Jahre langen Erdgeschichte beschäftigen. Naturgemäß ist der Mensch aber mehr an dem interessiert, was sich während der jüngsten Erdgeschichte getan hat, als an dem, was sich vor Hunderten Millionen Jahren ereignet haben mag. Das Gros der Paläoklimatologen erforscht deshalb den Gang des Klimas während des Quartärs (siehe Merkblatt C27), und ein Gutteil derselben beschäftigen sich vornehmlich mit dessen jüngerem Abschnitt, grob gesprochen den letzten paar Hunderttausenden von Jahren, welche die Eiszeiten und die aktuelle Warmzeit (seit 11.500 Jahren) umfassen. Nachdem Thermometer, Barometer und andere Messinstrumente damals nicht existierten stehen die Paläoklimatologen vor einer nicht-trivialen Aufgabe: Wie kann man das Klima und seine Änderungen vor Tausenden und Abertausenden von Jahren verlässlich rekonstruieren? Der allergrößte Teil der Information aus der Vorzeit ist ja unweigerlich verloren (da nicht aufgezeichnet) und jene fragmentarische Information, die sich findet, ist von Natur aus eine indirekte, d.h. sie gestattet meist nur qualitative Angaben zum damaligen Klima. Die Kür der Paläoklimaforschung besteht jedoch darin, im Idealfall quantitative, also in Zahlen ausgedrückte Klimainformation lange vergangener Zeiten zu erhalten. Die Arbeit der Wissenschaftler gleicht dabei der detektivischen Spurensuche von Kriminalisten, die sich in Ermangelung an Kronzeugen von Indiz zu Indiz vortasten, um eine möglichst wahrheitsgetreue Rekonstruktion des Geschehens zu erstellen, und wo fallweise auch hochentwickelte "Spurensuchgeräte" zum Einsatz kommen. Wenn der Paläoklimatologe z.B. die Temperatur des Atlantiks während des Höhepunkts der letzten Eiszeit zu rekonstruieren versucht (eine wichtige Größe, die das Klima in Europa ganz maßgeblich diktiert), so verwendet er u.a. die Häufigkeit und die Isotopenzusammensetzung (Isotope sind physikalisch unterschiedliche Varianten eines chemischen Elements) bestimmter Einzeller-Arten (Foraminiferen), deren winzige kalkige Gehäuse er aus den Ablagerungen am Grund des Atlantiks mittels Bohrkernen entnimmt. Diese Messwerte wären wertlos, bestünde nicht ein systematischer Zusammenhang zwischen der Häufigkeit und der Isotopen-Zusammensetzung dieser Einzeller und der Wassertemperatur, bei der diese Organismen lebten bzw. leben (bekannt aus Messungen des heutigen Ozeans). Man spricht im Fachjargon von "Proxy Daten" (proxy heisst wörtlich aus dem Englischen übersetzt soviel wie (Stell)Vertreter, gemeint: für Messdaten der Meteorologie, aber auch anderer Disziplinen, im gegenständlichen Fall der Ozeanographie). Auch die Ausdehnung und Masse eines Gletschers – um ein Beispiel aus den Alpen zu verwenden – stellen Proxy Daten dar; eine einfache Umrechnung z.B. von Gletscherrückzug in Grad Celsius Lufttemperaturänderung existiert allerdings nicht. Alte Moränenrücken oder Gletscherschliffe in heute eisfreien Tälern sind zwar unumstößliche Klimazeugen, lassen aber in erster Linie nur qualitative Aussagen über das damalige Klima zu.

Die Paläoklimatologie hat mittlerweile eine stattliche Liste solcher Proxies in ihrem Repertoire; dass dennoch den Forschern nicht so bald langweilig werden wird kann man spätestens dann feststellen wenn man z.B. eine Rekonstruktion der Temperatur in den Alpen seit dem Ende der letzten Eiszeit sucht oder genau wissen will, wie warm es im Mittelalter oder zu Ötzi Zeiten in den Ostalpen war. Man wird zwar schematische "Fieberkurven" finden (z.B. in Merkblatt C27), aber kaum welche, die echte meteorologische Messgrößen zeigen. Abschnitte solcher Kurven für einzelne Gebiete der Erde und Zeitfenster des Quartärs existieren bereits in der Fachliteratur; die Lücken bzw. Unsicherheiten sind jedoch noch beträchtlich, und für manche Gebiete der Erde wird es aufgrund fehlender geeigneter Klima-Archive schlichtweg nicht möglich sein, solche Rekonstruktionen zu erstellen.

Höhlen und Paläoklima

Es ist noch nicht lange her, da war, wenn von Paläoklima-Forschung gesprochen wurde, nur die Rede von Baumringen, vom Eis Grönlands und der Antarktis und von Ablagerungen der Tiefsee. Höhlen wurden in diesem Zusammenhang kaum erwähnt. Diese genießen zwar seit jeher einen ausgezeichneten Ruf unter den Paläoanthropologen und Archäologen, stammen doch die allermeisten Funde früher Menschen aus Höhlen; allein, diese Fossilien sagen nur bedingt etwas über das damalige Klima aus. Deutlich aufschlussreicher – aus paläoklimatologischer Sicht – ist oft die Analyse der begleitenden pflanzlichen und tierischen Überreste, sowie der Höhlensedimente, in denen diese gefunden wurden. Besonders interessant sind fossile Pollen (Blütenstaub) und Sporen, die die Vegetation lang vergangener Zeiten rekonstruieren lassen, welche ihrerseits - Stichwort Proxy Daten - Rückschlüsse auf das damalige Klima zulassen können. Allerdings sind Pollen und Sporen in den meisten Höhlensedimenten rar. Zum einen ist die feuchte Höhlenluft gerade eingangsferner Bereiche sehr rein, d.h. arm an Partikeln. Zum anderen werden Sporen und Pollen, obwohl sie aus widerstandsfähiger organischer Substanz aufgebaut sind, im sauerstoffhaltigen Milieu langsam oxidiert (d.h. zerstört). Gute Chancen zur Erhaltung von Pollen und Sporen bieten nur dunkle, feinkörnige Sedimente, die z.B. bei Überflutungsereignissen in Höhlen zur Ablagerung gelangen. Auch Sedimente im eingangsnahen Bereich bzw. in Halbhöhlen weisen mitunter ein erhöhtes Erhaltungspotential für organische Überreste auf.

Neben mikroskopischen Überresten können auch größere, d.h. makroskopische Fossilien wichtige Informationen zum Paläoklima liefern. Voraussetzung ist, dass diese bei Höhlengrabungen horizontbezogen aufgesammelt werden, was bei früheren Grabungen aus verschiedenen Gründen leider oft nicht der Fall war. Bekanntes Beispiel sind die zahllosen Knochenfunde aus der Drachenhöhle bei Mixnitz (Stmk.), die im Zuge des Phosphatabbaues in den 1920er Jahren getätigt wurden, deren genaue Stratigraphie (d.h. Zuordnung zu bestimmten Schichten im Sediment) jedoch nicht oder nur sehr ungenau bekannt ist (Döppes & Rabeder, 1997). Auch die Bergung der Fossilien im Zuge der Freilegung der Griffener Grotte in den 1950er Jahren geschah unsystematisch; dennoch konnte aus der Analyse dieser Fauna Einiges zum (Eiszeit)Klima Unterkärntens abgeleitet werden (Gleirscher & Pacher, 2005).

Schließlich sind auch Höhlensedimente selbst Träger von Paläoklima-Informationen. Dazu zählen klastische Sedimente (Höhlenlehm bis Blöcke), chemische Sedimente (Höhlensinter) und – wenn man den Begriff Sediment weit fasst – auch Höhleneis. Klastische Sedimente in Höhlen erweisen sich meist als harte Nuss, zeichnen sie doch primär hochenergetische Ereignisse auf, die nur bedingt Aussagen zum Klima der Vorzeit gestatten. Auch muss damit gerechnet werden, dass Sedimentabfolgen in Höhlen große Lücken beinhalten können, in denen über lange Zeit keine Ablagerung erfolgte bzw. lokal Sediment auch wegerodiert wurde (Ablagerungslücke bzw. Hiatus). Aus diesen Gründen existiert auch weltweit nur eine begrenzte Anzahl an detaillierten Untersuchungen zur Sedimentologie von klastischen Höhlenablagerungen. Beispiele sind eine Studie über Höhlensedimente der Hermannshöhle (Seemann, 1987), Sedimente in Höhlen der Berchtesgadener Alpen (Langenscheidt, 1992), klastische Sedimente in Wechsellagerung mit Höhlensintern im Siebenhengste-Hohgant System in der Schweiz (Häuselmann, 2002), sowie eine Übersichtsarbeit über Sedimente in belgischen Höhlen (Quinif, 2006). Eine gute aktuelle internationale Zusammenschau findet sich im Buch von Sasowsky & Mylroie (2004 bzw. 2007). Im Übrigen sei auf die Merkblätter C30 (Höhleninhalt) bzw. C35 (Höhleneis) verwiesen.

Höhlensinter und Paläoklima

Im letzten Kapitel war davon die Rede, dass Höhlen in der Paläoklimaforschung früher kaum Beachtung gefunden haben. Nicht zuletzt angekurbelt durch die laufende Diskussion über Klimawandel bzw. Global Change haben sich Forscher auf die Suche nach weiteren Klima-Archiven gemacht und sind u.a. in Tropfsteinhöhlen fündig geworden. Der Schlüssel zum Durchbruch und zur weltweiten Anerkennung dieser Forschung liegt zum einen in der Möglichkeit, das Alter unterschiedlicher Schichten in Tropfsteinen genau zu bestimmen (siehe Merkblatt C34). Zum anderen konnte gezeigt werden, dass Tropfsteine sensibel auf Klimaänderungen außerhalb der Höhle reagieren, und, da sie bekanntermaßen über lange Zeiträume hinweg wachsen, gewissermaßen als unterirdische "tape recorders" fungieren.

Tropfsteine und Niederschlag

Die Erkenntnis, dass Tropfsteine Änderungen an der Erdoberfläche "spüren", ist nicht neu und ergibt sich aus der Karsthydrologie: Tropfwasser, für das Wachstum von Höhlensinter per se unabdingbar, stammt vom Niederschlag, der oberhalb der Höhle fällt (Regen, Schnee) und mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung, sowie angereichert an gelösten Stoffen, in der Höhle ankommt. Dieses Sickerwasser ist somit der direkte "Draht" zur Außenwelt bzw. dem Klima, das es zu erforschen gilt. Nimmt der Niederschlag längerfristig ab, so wird man auch in den Höhlen eine Verlangsamung der Tropftätigkeit feststellen. In diesem Fall bleibt der Tropfen länger an der Spitze des Stalaktiten bzw. des Sintertröhrchens hängen, entgast dort stärker, was in weiterer Folge dazu führt, dass weniger Kalzit am darunter befindlichen Stalagmiten zur Ablagerung kommt: Die Wachstumsgeschwindigkeit des Stalagmiten verlangsamt sich. Im Extremfall kommt es zu einem Wachstumsstopp, welcher sich durch eine Datierung der einzelnen Tropfsteinlagen nachweisen lässt bzw. oft auch als mehr oder weniger markante interne Grenzfläche im Sinter (in aufgeschnittenem Zustand) erkenntlich ist. Dass Tropfsteine sehr gute Paläoklima-Archive in Bezug auf Niederschlag sind zeigen aktuelle Untersuchungen in Trockengebieten. Sowohl in israelischen als auch in arabischen Höhlen setzte das Tropfsteinwachstum immer dann ein, wenn das Klima feuchter wurde (z.B. Fleitmann et al., 2007; Vaks et al., 2006; heute sind die allermeisten Höhlen in diesen Gebieten trocken und das Tropfsteinwachstum steht still). Spannende Daten kommen seit einigen Jahren auch aus chinesischen Höhlen; die dortigen Stalagmiten haben sich als Kronzeugen des Monsuns herausgestellt. Ganze Kulturen sind in der Vergangenheit in diesem Land ausgelöscht worden, als die Monsunregen über längere Zeit aussetzten. Aufgezeichnet sind diese Klimaschwankungen in Tropfsteinen (z.B. Wang et al., 2005).

Tropfsteine und Temperatur

Neben dem Niederschlag ist die Temperatur ein wichtiger Parameter, der das Tropfsteinwachstum steuert und indirekt auch in den Tropfsteinen aufgezeichnet wird. Aufgrund des Gefrierpunktes von Wasser ergibt sich, dass Tropfsteine nur bei positiven Temperaturen entstehen können. Da Höhlen annähernd die gleiche Temperatur aufweisen wie das langfristige Mittel der Lufttemperatur in der entsprechenden Höhlenlage ist sowohl in hohen Breiten, als auch in Seehöhen ab ca. 2000-2500 m (in unseren Breiten) keine Sinterbildung zu erwarten. Tropfsteinhöhlen, die heute knapp an dieser natürlichen Grenze liegen, sind deshalb hochsensible Klima-Archive, denn bereits eine geringe Klimaverschlechterung kühlt die Höhle unter den Gefrierpunkt ab und stoppt das Sinterwachstum. Durch Proben aus solchen kalten Höhlen kann man eine lange Aufzeichnung früherer Warmzeiten erhalten, denn nur während dieser sprang die Verkarstung und damit die Sinterausscheidung an.

Neben diesem "Ein/Aus Schalter" gibt es mittlerweile auch Methoden, um direkt Paläotemperaturen aus einzelnen Tropfsteinlagen zu bestimmen (Näheres dazu z.B. in Spötl et al., 2007).

Erwähnt werden sollte noch, dass die Klima-Parameter Temperatur und Niederschlag ihrerseits auch die Vegetation und damit die Intensität der Verkarstung steuern. Verkarstung ist ja eine Folge des Eintrages von Kohlendioxid bzw. Kohlensäure in das Grundwasser und der Ursprung dieser Säure ist in den

allermeisten Fällen Kohlendioxid, das im Boden durch Wurzelatmung und bakteriellen Abbau organischer Substanz entsteht. Eine Zunahme des Niederschlages wird also einerseits die Tropftätigkeit in der Höhle erhöhen, andererseits auch eine dichtere Vegetation und eine höhere Bodenaktivität fördern, was ihrerseits die Verkarstung ankurbeln und so zu einem schnelleren Wachstum von Stalagmiten und anderen Sinterformen führt.

Tropfsteine und Meeresspiegel

Dass neben dem Klima auch die (absolute) Höhe des Meeresniveaus keine Konstante darstellt ist seit Beginn der Klima Diskussion allgemein bekannt. Die Höhe des Meeresspiegels ist zwar keine eigentliche Klima-Messgröße; sie gibt aber wesentliche Aufschlüsse über die Menge des am Festland in Form von Eisschilden und Gebirgsgletschern gespeicherten Eises. Schmilzt letzteres, dann steigt der Meeresspiegel und flach liegende Küstenbereiche werden überflutet. Im Quartär stieg und fiel der Meeresspiegel dutzende Mal im Rhythmus der Eiszeiten und Tropfsteine haben sich als verlässliches Instrument herausgestellt, diesen Gang nachzuzeichnen. Untersuchungsobjekte sind Höhlen in Küstengebieten des Mittelmeerraumes und der Karibik. Das Prinzip ist einfach: Fällt der Meeresspiegel am Beginn einer Eiszeit, so werden ehemals geflutete Höhlenräume luftefüllt, mit dem Niederschlag setzt Verkarstung ein und Tropfsteine beginnen zu wachsen. Am Ende einer Eiszeit schmelzen große Mengen an festländischem Eis ab, der Meeresspiegel steigt (im Maximum bis zu 130 m), die Küstenlinie verschiebt sich landeinwärts und tiefer gelegene Höhlensysteme werden unter Wasser gesetzt. Tropfsteine können im Meerwasser nicht "gedeihen"; sie werden aber auch nicht aufgelöst. Oftmals kann man den Bewuchs von kalkabscheidenden Organismen (z.B. Würmern) auf Unterwasser-Tropfsteinen beobachten. Aus den Untersuchungen solcher Tropfsteine z.B. aus den bekannten *Blue Holes* auf den Bahamas konnte man die Chronologie früherer (eiszeitlicher) Meeresspiegel-Tiefstände präzise erfassen.

Literatur:

- Döppes, D. & Rabeder, G. (1997): Pliozäne und pleistozäne Faunen Österreichs. – Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Bd. 10, 411 S.
- Gleirscher, P. & Pacher, M. (2005): Griffen und die Altsteinzeit im Südostalpenraum. - *Rudolfinum Jahrbuch des Landesmuseums Kärnten*, 2004: 65-107.
- Häuselmann, P. (2002): Cave genesis and its relationship to surface processes: investigations in the Siebenhengste region (BE, Switzerland). - *Höhlenforschung im Gebiet Sieben Hengste-Hohgant* No. 6, 166 S.
- Langenscheidt, E. (1992): Höhlen und ihre Sedimente in den Berchtesgadener Alpen. - *Nationalpark Berchtesgaden Forschungsbericht*, 10, 95 S.
- Sasowsky, I.D. & Mylroie, J. (2004): *Studies of Cave Sediments. Physical and Chemical Records of Paleoclimate*.- 329 S. New York (Kluwer; Nachdruck Springer 2007).
- Seemann, R. (1997): Sediment- und Mineralinhalt der Hermannshöhle. - In: *Die Hermannshöhle in Niederösterreich* (Red. Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H.), *Wissenschaftliche Beihefte Die Höhle*, 50: 107-132.
- Spötl, C., Offenbecher, K.-H., Boch, R., Meyer, M., Mangini, A., Kramers, J. & Pavuza, R. (2007): Tropfstein-Forschung in österreichischen Höhlen – ein Überblick. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 147: 117-167. Download unter www.geologie.ac.at/ (unter Geomarkt – Publikationen – Jahrbuch).

Bemerkung: Die übrige, in diesem Merkblatt zitierte Fachliteratur ist leider nur über Universitäten bzw. kostenpflichtig über Fachverlage erhältlich. Interessierte HöhlenforscherInnen können sich jedoch an den Autor wenden (christoph.spoetl@uibk.ac.at).

Wirbellose Tiere in österreichischen Höhlen

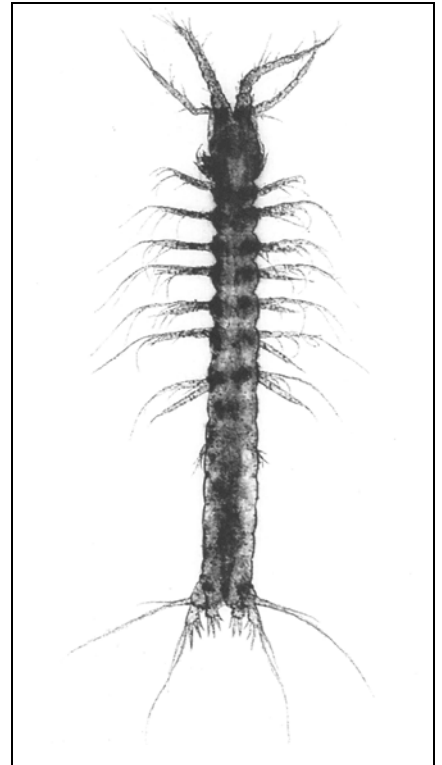
Von den Tieren unserer Höhlengewässer bekommt der Höhlenforscher am ehesten die Brunnenkrebse der Gattung *Niphargus* zu Gesicht. Die blinden, weißen Tiere können über zehn Millimeter lang werden. Sie gehören zu den Flohkrebse, die mit ihrem seitlich flachgedrückten Körper (und einiger Fantasie) an einen Floh erinnern. In charakteristischer Seitenlage bewegen sie sich ruckartig auf der Sedimentoberfläche. Dort findet man gelegentlich auch schneeweiße Strudelwürmer, die ebenfalls nur von Spezialisten mit großem Aufwand zu bestimmen sind. Die winzigen Gehäuse der Brunnenschnecken sind mit freiem Auge kaum von Sandkörnern zu unterscheiden. Alle übrigen, oft noch kleineren aquatischen Tiere können mit engmaschigen Netzen und Sieben aus dem Höhlenwasser und feuchten Sedimenten geborgen werden. Sie leben auch (oder sogar hauptsächlich) im unzugänglichen Spaltensystem und im Grundwasser. Tritt eine Art nur in subterranean Gewässern auf, so bezeichnet man sie als **stygobiont**. Exemplarisch seien die Krebschen der Gattung *Bathynella* erwähnt.

Auf der Oberfläche stehender Höhlengewässer tummeln sich oft millimetergroße Tierchen. Es sind luftatmende Gliederfüßer, die zufällig hierher gelangt sind und nur schwer wieder an Land kommen. Meistens handelt es sich um Springschwänze, aber auch Milben und die extrem seltenen Palpenläufer (Gattung *Eukoenenia*) wurden in solchen natürlichen Fallen erbeutet.

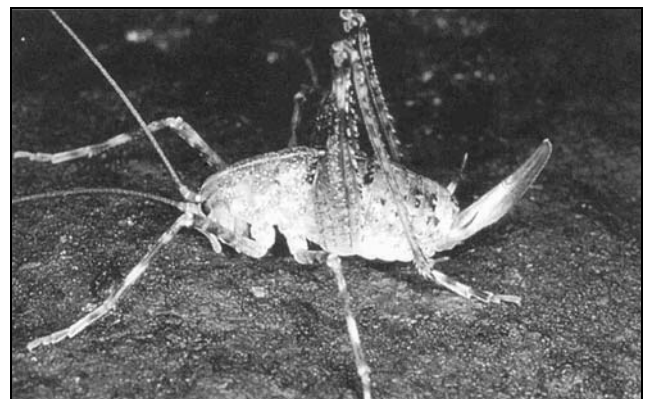
Die Landtiere der Höhlen werden nach ihrer Beziehung zum unterirdischen Lebensraum in vier ökologische Gruppen eingeteilt.

Die **Trogloxenen** (*trog* = Höhle, *xenos* = fremd) sind Zufallsgäste aus oberirdischen Biotopen und daher aus biospeläologischer Sicht belanglos.

Tiere, die nur zu einer bestimmten Jahreszeit oder in einem individuellen Lebensabschnitt in der Höhle erscheinen, werden manchmal ebenfalls als trogloden bezeichnet (weil *xenos* auch Gast bedeutet). Um diese Höhlengäste von den wirklichen Fremdlingen zu unterscheiden, spricht man besser von **Subtroglodophilen** (*philos* = Freund). Sie verbringen in der Höhle oder in anderen dunklen, feuchtkühlen Räumen eine genetisch festgeschriebene Ruhezeit: die meisten im Winterhalbjahr, einige auch im Sommer (z.B. gewisse Köcherfliegen). Von ihnen führt kein Weg zum „echten“ Höhlentier, weil ein Abschnitt ihres Lebens an oberirdische Lebensräume gebunden ist. Unsere subtroglodophilen Schmetterlinge etwa brauchen als Raupen ganz bestimmte Futterpflanzen, die nur ober Tag wachsen. Neben den allgemein bekannten Schmetterlingen *Inachis io* (Tagpfauenauge), *Scoliopteryx libatrix* (Zackeneule) und *Triphosa dubitata* (Wegdomspanner) überwintern in unseren Höhlen u.a. auch Hautflügler (Schlupfwespen der Gattung *Amblyteles*), die bienenähnliche Schwebfliege *Eristalis tenax* und die Gelse *Culex pipiens* – bei den Schmetterlingen beide Geschlechter, bei den anderen nur besamte Weibchen. Schlupfwespen und Schwebfliegen zwängen sich gern in enge Spalten. Die flügellosen Höhlenheuschrecken (*Troglophilus cavicola*, im Süden Österreichs auch *Troglophilus neglectus*) vereinen lebensgeschichtliche Züge der Sub- und Eutroglophilien.

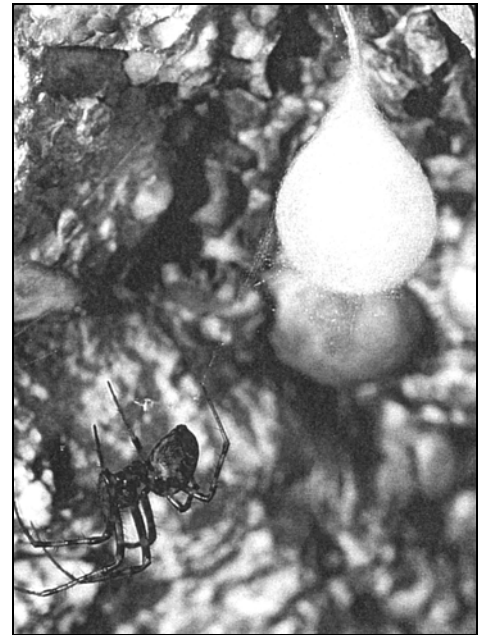


Kaum 1,5 mm lang: Eine *Bathynella* aus dem „Teich“ der Hermannshöhle



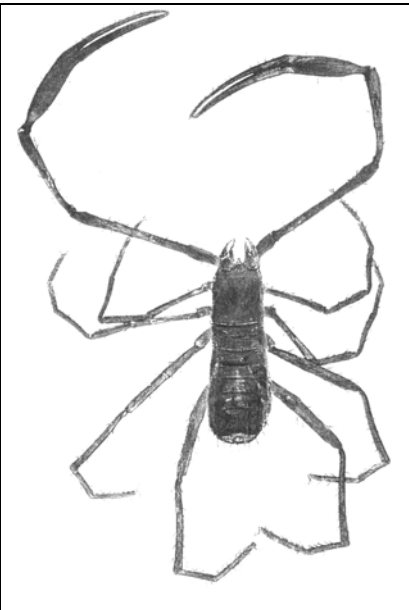
Das reife Weibchen der Höhlenheuschrecke trägt einen schwertförmigen Ei-Legeapparat

Die **Eutroglophilen** können prinzipiell ober- und unterirdisch auf Dauer existieren. Manche Arten sind in subterranean Lebensräumen wesentlich häufiger. Sie zeigen oft eine Tendenz zur Rückbildung der Augen und der Hautpigmente und sind offenbar auf dem Weg zur obligat unterirdischen (troglobionten) Lebensweise. Höhlenpopulationen ein und derselben Art können auf diesem Weg unterschiedliche Strecken zurückgelegt haben: Der in Ostösterreich häufige Springschwanz *Bonetogastrura cavicola* präsentiert in einigen Höhlen das Erscheinungsbild eines gewöhnlichen Bodenbewohners, in anderen das Bild eines Höhlentieres. Nicht selten haben Kleintiere schon vor der Besiedlung der Unterwelt so genannte Höhlentiermerkmale erworben. In diesen Fällen ist die Entscheidung schwierig, ob es sich um eutroglophile oder „schon“ um troglobionte Arten handelt. Der Übergang ist fließend und erfolgt nicht unbedingt gleichzeitig in allen Teilen des Verbreitungsgebietes einer Art. Zu den wichtigsten Gruppen, die eutroglophile Arten hervorgebracht haben, gehören Asseln (z.B. *Mesoniscus alpicola*), Spinnen (z.B. die Höhlenspinne *Meta menardi*, die ihr Eigelege in schneeweißen Wattebällchen schützt), Milben, Tausendfüßer, Springschwänze, Käfer und Fliegen.

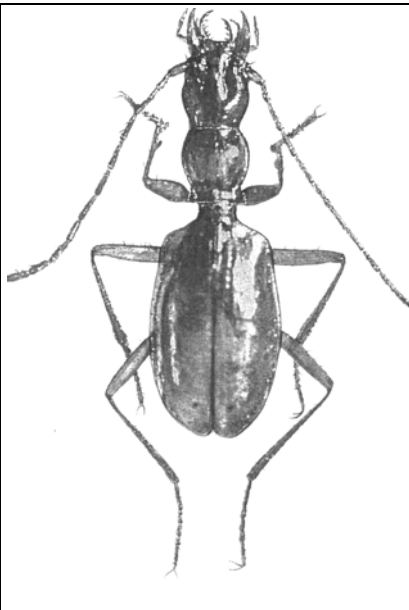


Die weibliche Höhlenspinne bewacht ihren Eikokon

Troglobionten – „echte“, hoch angepasste Höhlentiere, die in oberirdischen Biotopen nicht lebensfähig sind – zeigen in Österreich nur südlich der Drau eine größere Artenvielfalt (z.B. die blinden Laufkäfer der Gattung *Anophthalmus*). In den Nordalpen wurde die Subterranafauna in den Eiszeiten arg dezimiert. Umso interessanter sind die wenigen Arten, die vermutlich an Ort und Stelle überlebt haben. Neben dem bizarr langbeinigen Pseudoskorpion *Neobisium aueri*, der nur in Höhlen des Toten Gebirges und des Warschenecks lebt (und erst 1960 entdeckt wurde), sind die blinden Laufkäfer der Gattung *Arctaphaenops* Prunkstücke der nordostalpinen Höhlenfauna. Das Verbreitungsgebiet dieser Gattung reicht vom Schafberg im Salzkammergut bis zu den Türitzer Alpen. Von den zehn Arten, die seit 1925 beschrieben wurden, hielten nur drei einer kritischen Überprüfung stand: *Arctaphaenops angulipennis*



Ein Höhlentier wie aus dem Bilderbuch: der troglobionte Pseudoskorpion (*Neobisium aueri*) des Toten Gebirges



Arctaphaenops angulipennis, ein nordostalpinen Höhlenlaufkäfer



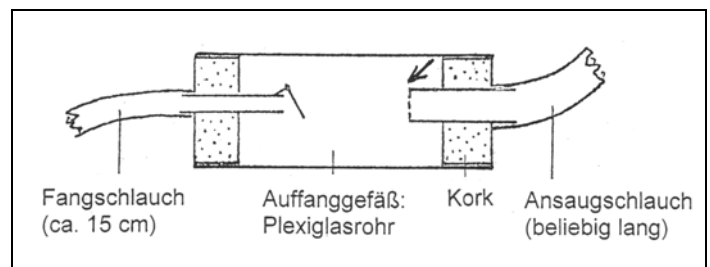
Der Springschwanz *Pseudosinella vornatscheri* ist nach einem Pionier der österreichischen Biospeläologie, Dr. Josef VORNATSCHER, benannt

(mit der Unterart *angulipennis* im Dachstein und im Toten Gebirge und mit der Unterart *styriacus* in den Ennstaler Alpen und den Niederösterreichisch-Steirischen Kalkalpen), *A. gaisbergeri* (Schafberg, Hölleengebirge, Gasslkogel) und *A. muellneri* (Sengsen- und Reichraminger Hintergebirge). Als troglobiont gelten auch einige Doppelschwänze (*Plusiocampa*-Arten), Springschwänze (u.a. Arten der Gattung *Pseudosinella* und mehrere nicht sprungfähige Onychiuridae) und Milben (z.B. *Troglocheles vornatscheri*).

Das Sammeln von Höhlentieren

Entnahme und Tötung höhlenbewohnender Tiere sind nur zu rechtfertigen, wenn folgende Fragen positiv beantwortet sind: Steht die geplante Aufsammlung im Einklang mit den gültigen Rechtsvorschriften? Liegen gegebenenfalls die erforderlichen Bewilligungen vor? Dient die Aufsammlung der wissenschaftlichen Forschung? Beschränkt sie sich auf das unbedingt nötige Maß? Ist auszuschließen, dass schonende Methoden denselben Zweck erfüllen (Fotodokumentation, Bestimmung lebender Tiere)?

Mit einer Federpinzette oder einem Exhaustor können Kleintiere selektiv gefangen werden. Ausgelegte Köder verbessern die Erfolgsaussicht. In einem Gefäß mit feuchtem Gipsboden überleben Höhlentiere eine Zeit lang. Die meisten werden in Ethanol (70%) befriedigend konserviert, für Käfer sollten jedoch trockene Tötungsgläser (Essigäther-Röhrchen) verwendet werden. Jede Probe muss einen Zettel enthalten, auf dem mit Bleistift folgende Daten notiert sind: Fundort (Name und Lage der Höhle, Höhlenabschnitt); Fundumstände oder Substrat (auf Holz, im Guano, an Käseköder, ...); Datum; Name des Sammlers.



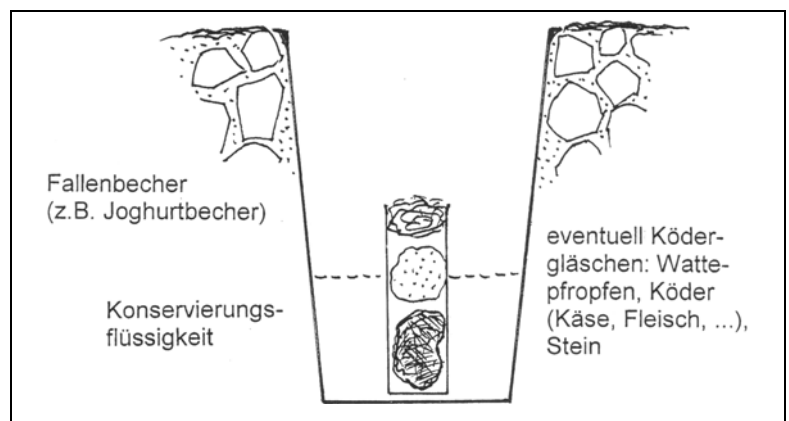
Exhaustor

Fundumstände oder Substrat (auf Holz, im Guano, an Käseköder, ...); Datum; Name des Sammlers.

Exhaustoren beruhen auf dem Staubsaugerprinzip. Wichtig ist der Verschluss des Ansaugschlauches durch feinmaschiges Gewebe (Pfeil). Das gesundheitsgefährdende orale Ansaugen kann durch die Verwendung eines Zerstäuberballes umgangen werden.

Unselektive, automatische Fangmethoden wie die Becher- oder Barberfalle dürfen nur in gut begründeten Fällen für speläofaunistische Untersuchungen eingesetzt werden.

Schon bei der Projektplanung ist die wissenschaftliche Verwertung des "Tiermaterials" sicherzustellen: Spezialisten sind immer überlastet und nur selten bereit, unverlangt zugesandte Tiere zu bestimmen.



Becherfalle

Literaturhinweise

Die Monographie „Die Hermannshöhle in Niederösterreich“ (Red.: H. u. W. Hartmann & H. Mrkos; Wien 1997) enthält auch zoologische Beiträge.

Der „Katalog der rezenten Höhlentiere Österreichs“ ist eine ergiebige Datenquelle, erfordert aber zoologische Vorkenntnisse (Strouhal, H. & Vornatscher, J., 1975: Ann. Naturhist. Mus. Wien 79, 401-542; unveränderter Abdruck als Band 24 der Reihe „Wissenschaftliche Beihefte zur Zeitschrift Die Höhle“).

Fledermäuse in Höhlen

Fledermäuse unterscheiden sich deutlich von den übrigen Säugetieren in zweierlei Hinsicht:



aktiver Flug: Umbildung der Hände zu Flügeln; zwischen den stark verlängerten Fingern hat sich eine so genannte Flughaut gebildet, die bis zu den Füßen und dem Schwanz reicht



Orientierung im Dunkeln mittels Ultraschall

Durch den Erwerb dieser speziellen Eigenschaften ist es ihnen möglich, als so genannte Troglaxene [griech. trōglē = Höhle, Loch und griech. xenos = Gast] lichtlose Höhlen zu bewohnen. Je nach vorherrschender Jahresdurchschnittstemperatur verbringen sie nur einen Teil ihres Jahreszyklus in Höhlen (z.B.: Mitteleuropa) oder übertagen auch im Sommer im lichtleeren Raum (z.B.: Mittelmeerraum).

Winterschlaf

In Europa sind Fledermäuse in den Wintermonaten darauf angewiesen, aufgrund des eingeschränkt vorhandenen Nahrungsspektrums, wie Insekten, einen trockenen frostsicheren Ort aufzusuchen und Winterschlaf zu halten. Viele Arten bedienen sich dabei den natürlich entstandenen Höhlen, aber auch menschengemachten Stollen oder Kellern. Sie passen ihre Körpertemperatur meist 1-2°C über der Umgebungstemperatur an und verringern dadurch ihren Energieverbrauch. Die Herz- und Atemfrequenz sinken auf wenige Schläge pro Minute bzw. bis auf wenige Atemzüge pro Stunde. Der Stoffwechsel sinkt, die Gefäße verengen sich und im Extremfall wird über längere Zeit nur mehr die Versorgung der wichtigsten Organe gewährleistet.

Fledermäuse fressen sich im Herbst große Fettreserven an, um den Winter zu überleben (+ 20 – 30 % des Körpergewichts). Die Fettreserven halten nicht ewig und jeder Aufwachvorgang (z.B.: durch Störung) bringt einen hohen Energieverlust mit sich. Es ist daher äußerst wichtig winterschlafende Fledermäuse nicht zu stören (NICHT direkt anleuchten, NICHT berühren), sondern unbedingt in Ruhe lassen!

Fledermausschutz

Schutzstatus in Ö

Von den in Österreich vorkommenden 27 Fledermausarten stehen alle auf der Roten Liste gefährdeter Tierarten, wobei die meisten als gefährdet und einige sogar als „vom Aussterben bedroht“ (z.B.: Kleines Mausohr, Große Hufeisennase) eingestuft sind.

Schutzstatus in der EU

Alle Fledermausarten genießen außerdem EU-weiten Schutz (Anhang IV der FFH-Richtlinien) und für 10 Arten (Kleine Hufeisennase, Große Hufeisennase, Großes Mausohr, Kleines Mausohr, Mopsfledermaus, Bechsteinfledermaus, Langflügelfledermaus, Langfußfledermaus, Teichfledermaus, Wimperfledermaus) müssen laut Anhang II der FFH-Richtlinie, um deren Erhaltung zu sichern, besondere Schutzgebiete ausgewiesen werden. (siehe auch <http://eur-lex.europa.eu/de/index.htm>)

White-Nose Syndrom (WNS)

Seit 2006 ist eine Krankheit aus dem nordöstlichen Teil der USA bekannt, die den dort überwinterten Fledermäusen stark zusetzt und oft zu hohen Todesraten innerhalb eines Quartiers führt. Sie wird nach dem Erscheinungsbild WNS (White-Nose Syndrome) genannt und von einem Pilz (*Geomyces destructans*) verursacht, der als weißes pelzartiges Gebilde vorwiegend auf der Schnauze und der Flughaut sichtbar ist. Veränderungen an der Haut, Bildung von

Geschwüren und Gewebsanomalien an der Flughaut kennzeichnen das Krankheitsbild und führen aufgrund des erhöhten Verbrauchs an Fettreserven im Winter zum Hungertod.

In Europa wurde der Pilz erstmals in Frankreich entdeckt, wobei Nachweise aus Deutschland, der Schweiz und Ungarn auf eine größere Verbreitung hindeuten. Im Gegensatz zu den amerikanischen Fledermausarten sind die europäischen aus noch unerklärlichen Gründen gegen diesen Pilz immun und überleben die Infektion ohne Probleme. Da das Wissen über diesen Pilz und dessen Auswirkungen aber erst seit kurzem bekannt sind, ist jede Beobachtung eine wertvolle Unterstützung.

→ Jeder Höhlenbesucher, der eine entsprechende Beobachtung macht, wird dringend gebeten, diese einem Fledermausverein (z.B.: KFFÖ, batlife) oder persönlich bei Katharina Bürger (Landesverein für Höhlenkunde in Wien und Niederösterreich) zu melden! (im Idealfall bitte mit Fotobeleg)

Danke!

Simone Pysarczuk für die hilfreichen Kommentare und Korrekturen!

Literatur

- KFFÖ homepage (www.fledermausschutz.at)

- Spitzenberger F. (2005): Rote Listen der in Österreich gefährdeten Säugetierarten (Mammalia). In: Zulka K.P. (Hrsg.): Rote Listen gefährdeter Tiere Österreichs. Grüne Reihe des Lebensministeriums Band 14/1: 45 – 62.

- Wibbelt G., Kurth A., Hellmann D., Weishaar M., Barlow A., Veith M., Prüger J., Görföl T., Grosche L., Bontadina F., Zöphel U., Seidl H.-P., Cryan P. M. and D. S. Blehert (2010) White-Nose Syndrome Fungus (*Geomyces destructans*) in Bats, Europe. Emerging Infectious Diseases (www.cdc.gov/eid) Vol 16 (8): 1237 – 1243

- Reichard J. D. & T. H. Kunz (2009) White-nose syndrome inflicts lasting injuries to the wings of little brown myotis (*Myotis lucifugus*). Acta Chiropterologica 11 (2): 457 – 464

Fledermausbeobachtungen

Fledermausfotos zur Artbestimmung

verändert; nach Dr. A. Zahn, Koordinationsstelle für Fledermausschutz Südbayern

Anhand guter Fotos lassen sich viele Fledermäuse bestimmen. Oft ist es für ein Tier weniger belastend, fotografiert zu werden, als langwierige Bestimmungsversuche zu erdulden. Die folgenden Punkte sollten beim Fotografieren von Fledermäusen in Höhlen berücksichtigt werden:

- ✎ am Beginn und am Ende der Wintersaison ist die Gefahr, Fledermäuse aus dem tiefen Winterschlaf zu reißen, geringer, als im Tiefwinter, d.h. während oder unmittelbar nach einer langen Kälteperiode
- ✎ Stress oder Aufwachen vermeiden (kleinere Arten sind weniger robust als große)
- ✎ zu nahes Rangehen, zu nahes Blitzen und Atmen auf das Tier vermeiden (durch die abgestrahlte Wärme können Tiere aufwachen)
- ✎ Öffnen von Klettverschlüssen (Kamerahülle, Schlaz, ...) in der Nähe der Fledermaus vermeiden (sie reagieren extrem empfindlich auf das Geräusch)
- ✎ die Anzahl der Fotos auf ein Minimum reduzieren (effiziente Einstellungen und Winkel vorher überlegen) und
- ✎ Fotos möglichst vermeiden, wenn die Art bekannt ist (z.B. Kleine Hufeisennasen, siehe Bild 2) und Sichtung nur notieren

Welche Merkmale werden zur Bestimmung benötigt?

Entscheidende Bestimmungsmerkmale sind:

- ✎ Fellfärbung (Gesicht, Ober- und Unterseite, Ohren)
- ✎ Ohrform und Tragus (= der Hautlappen im Ohr)
- ✎ Größe (am besten ein Lineal oder ein anderes Objekt mit definierter Größe von einem Kollegen hinhalten lassen): wichtig für Körperlänge, Unterarmlänge, eventuell Fußlänge



Bild 1 Lineal neben dem Unterarm



Bild 2 Kleine Hufeisennase

Brauchbare und unbrauchbare Fotos



Bild 3

Kleiner Abendsegler

erkennbar: Ohrform, Tragus (roter Pfeil), breiter Ohrinnenrand, Färbung der Schnauze, Fell auf Ober- und Unterseite



Bild 4

Nicht erkennbar: Tragus, Schnauze, Färbung der Unterseite; schwer erkennbar: Ohrform; auch bei Vergrößerung schwer bestimmbar



Bild 5

Wasserfledermaus

erkennbar: Ohrform (Tragus bei Vergrößerung), Färbung der Schnauze, Fell auf Ober- und Unterseite



Bild 6

Kein Bestimmungsmerkmal sicher erkennbar



Bild 7

Mausohr

erkennbar: Ohrform, Tragus bei Vergrößerung, Färbung der Schnauze, Fell auf Ober- und Unterseite; Angabe der Körpergröße (große Art) notwendig



Bild 8

Mausohr

schlecht erkennbar: Tragus, Färbung der Unterseite; bei Größenangabe und aufgrund von Ohrform und Schnauze dennoch bestimmbar



Übersicht der Arten

Auf den folgenden zwei Seiten werden die Merkmale der 14 häufigsten höhlenbesuchenden Fledermausarten am Beispiel der Hermannshöhle (NÖ) beschrieben. Zwei zusätzliche Arten sind die Nordfledermaus, die vorwiegend in Eishöhlen zu finden ist und die Langflügelfledermaus, die nur im Süden Europas vorkommt (v.a. in wärmeren Gebieten), dort aber das ganze Jahr über in Höhlen übertagt und überwintert. Die Beschreibungen in der auf der nächsten Seite folgenden Tabelle stammen hauptsächlich aus Dietz et al. (2007).

Eine genaue Bestimmung erfordert viel Kenntnis über die Arten und deren Verbreitung, daher ist dies anhand der Merkmale in der Tabelle nur eingeschränkt möglich und ein Experte zusätzlich zu Rate zu ziehen. Fellfärbung variiert oft sehr stark innerhalb einer Art; eine genaue Bestimmung ist daher nur anhand von den übrigen angeführten Merkmalen möglich. (Beim Fotografieren darauf achten!)



Knochenfunde werden gerne entgegengenommen, wobei beim Schädel darauf zu achten ist, dass Ober- und Unterkiefer vollständig sind, da diese entscheidende Bestimmungsmerkmale darstellen.

Kontakt

Katharina Bürger

email: kathi_buerger@hotmail.com

Glück Flaus!

Danke!

Simone Pysarczuk für die hilfreichen Kommentare und Korrekturen!

Literatur

- Dietz Ch., Helversen O. v. & D. Nill (2007) Handbuch der Fledermäuse Europas und Nordwestafrikas. Kosmos Verlag, 399 pp.
- Bild 1, 3, 5, 6, 8 aus Merkblatt Fledermausfotos (nach A. Zahn, Koordinationsstelle für Fledermausschutz Südbayern)
- Bild 4: © K. Bürger
- Bild 2, 7: © M. Schröder



Art	Größe Unterarm- länge	Ohren	Tragus	Fellfarbe		weitere Merkmale
				Oberseite	Unterseite	
Große Hufeisennase (<i>Rhinolophus ferrum- equinum</i>)	groß 53 – 63 mm	leicht von übrigen Fledermäusen zu unterscheiden: Flügel umhüllen beim Hängen den Körper gänzlich; hufeisenförmiges Nasenblatt, weiß behaarte Füße				
Kleine Hufeisennase (<i>Rhinolophus hipposideros</i>)	klein 36 – 40 mm			leicht von übrigen Fledermäusen zu unterscheiden: Flügel umhüllen beim Hängen den Körper gänzlich; hufeisenförmiges Nasenblatt		
Großes Mausohr (<i>Myotis myotis</i>)	groß 55 – 67 mm	lang, breit	lang an Spitze ± schwarzer Fleck	braun – rötlich	schmutzig weiß	lange breite Schnauze
Kleines Mausohr (<i>Myotis oxygnathus</i>)	groß 50 – 62 mm	kürzer und im Vergleich zum Großen Mausohr schmäler	lang ohne schwarzen Fleck	bräunlich	weißlich grau	Gesicht etwas kürzer, ± weißer Stirnfleck
Breitflügelfledermaus (<i>Eptesicus serotinus</i>)	groß, robust 48 – 58 mm	mittellang derbhäutig Enden abgerundet	kurz	mittel- bis dunkelbraun, rötlich	heller braun – gelblich braun wenig abgesetzt	breite Schnauze
Fransenfledermaus (<i>Myotis nattereri</i>)	mittelgroß 34 – 44 mm	lang mit Querfalten	lang	braungrau scharf abgegrenzt	grauweiß - weiß	schlanke Schnauze, S-förmiger Sporn, Schwanzflughautrand mit gekrümmten Borsten
Wimperfledermaus (<i>Myotis emarginatus</i>)	mittelgroß 36 – 45 mm	braun am Außenrand mit rechtwinkliger Stufe	lang Spitze erreicht Stufe am Ohrrand nicht	rötlich	hell, wenig deutlich abgesetzt	äußere Ohrmuschel mit Warzen; dünne, kurze Härchen am Rand der Schwanzflughaut
Bechsteinfledermaus (<i>Myotis bechsteinii</i>)	mittelgroß 39 – 47 mm	auffällig lang, voneinander getrennt + 9-11 Querfalten	lang	braun – rötlichbraun	hell beige oder grau, deutlich abgesetzt	breite Flügel
Mopsfledermaus (<i>Barbastella barbastellus</i>)	mittelgroß 36 – 44 mm	an Basis verbunden, am Rand mit gelben / orangenen Parasiten	lang	dunkel – schwarzbraun ± weiße Spitzen	dunkel	gut erkennbar, kurze gedrungene Schnauze



Art	Größe Unterarm- länge	Ohren	Tragus	Fellfarbe		weitere Merkmale
				Oberseite	Unterseite	
Braunes Langohr (<i>Plecotus auritus</i>)	mittelgroß 35 – 43 mm	lang, zart, hell hängend nach hinten geklappt	lanzettförmig, hell wird mit Ohren verwechselt, da diese unter Flügel geklemt werden	lang & locker braun ± rötlichem Stich	langsam übergehend in cremefarben – gelblich grau	Gesicht hell und wirkt durch aufgeblasenes Drüsenfeld kurz
Graues Langohr (<i>Plecotus austriacus</i>)	mittelgroß 36 – 44 mm	auffallend lang dunkelgrau	lang, breit eher dunkel	lang, grau selten braun	hellgrau bis weißlich, scharf abgegrenzt	längere Schnauze, dunkelgrau pigmentiert, klemmt ebenfalls Ohren unter Flügel
Wasserfledermaus (<i>Myotis daubentonii</i>)	klein 33 – 42 mm	kurz, braun Innenohr meist aufgehellt	kurz nach vorne gebogen	braun – braungrau	hell- bis weißlich grau	große borstige Füße
Bartfledermaus (<i>Myotis mystacinus</i>)	klein 32 – 36 mm	an Spitze nicht stark verschmälert	lang	nuss – dunkelbraun ± goldene Haarspitzen	meist gräulich	Gesicht meistens dunkel/schwarz
Brandtfledermaus (<i>Myotis brandtii</i>)	klein 33 – 38 mm	Basis aufgehellt	lang Basis aufgehellt	lang, hellbraun, mit goldglänzende Spitzen	hellgrau	genaue Bestimmung nur anhand von Zähnen
Nordfledermaus (<i>Eptesicus nilsonii</i>)	mittelgroß 37 – 44 mm	kurz	kurz	dunkel, mit goldenen Haarspitzen	gelblich braun oder beige, am Hals scharfe Grenze	vorwiegend in Eishöhlen zu finden
Langflügel-fledermaus (<i>Miniopterus schreibersi</i>)	mittelgroß 42 – 48 mm	kurz, dreieckig	kurz, gebogen	graubraun – dunkelgrau	leicht heller als Oberseite	kurze Schnauze, eher südliches Verbreitungsgebiet

Paläontologie – Fossile Wirbeltierreste in Höhlen

Höhlen spielen als Fundstellen von fossilen Tierresten, besonders von Wirbeltierresten eine sehr wichtige Rolle. Mehr als die Hälfte aller Fundstellen von jungtertiären und pleistozänen Säugetieren dürften in Höhlen oder Karstspalten gelegen sein. Die Überlieferung von Knochen und Zähnen wird von den klimatischen und chemischen Bedingungen in Höhlenräumen extrem begünstigt. Die gleich bleibende Temperatur und die hohe Feuchtigkeit verzögern den Abbau organischer Substanz (z.B. Eiweißverbindungen) sowie die Zerstörung der mineralisierten Hartteile, die aus Bioapatit, einem aus Kalzium, Phosphat und Karbonat aufgebauten Mineral, bestehen. Wenn nicht chemisch ungünstige Bedingungen herrschen (z.B. saures Milieu) erhalten sich in den Knochen die Eiweißverbindungen wie z.B. das Kollagen oder Bausteine des Erbgutes (DNA-Stränge) viel länger als in sogenannten „Freilandfundstellen“.

Höhlen kann man daher auch als „natürliche paläontologische Museen“ bezeichnen, weil hier die Reste längst ausgestorbener Tiere überliefert sein können – manchmal in erstaunlich guter Erhaltung.

Massenvorkommen von fossilen Wirbeltierresten

Für die Wissenschaft von hohem Interesse sind die manchmal riesigen Mengen von Knochen und Zähnen, die z.T. frei am Höhlenboden liegen oder in dichter Lage im Lehm oder Sand eingebettet sind.

Wie kam es zu den Massenanhäufungen von Schädeln und Knochen in manchen Höhlen? Phantastische Begründungen wurden geäußert: Die Höhlenbären hätten in großen Herden gelebt, Epidemien hätten sie hingerafft oder der steinzeitliche Jäger hätte hier die Bären in Massen hingeschlachtet. So kann man in der Drachenhöhle bei Mixnitz nach einer Schätzung der geborgenen Reste mit über 30.000 Individuen rechnen, die in der Höhle gestorben sind.

Durch viele Altersbestimmungen wissen wir heute, dass die Anhäufungen von Höhlenbärenresten viele Jahrtausende hindurch andauert haben. In der besonders gut datierten Ramesch-Knochenhöhle im Toten Gebirge (Oberösterreich) hatte sich die zwei Meter dicke Höhlenbärenschicht in der Zeit von ca. 64.000 bis 34.000 gebildet. In den Knochenanhäufungen stecken 30.000 Jahre! Selbst wenn nur alle zehn Jahre ein Bär in der Höhle stirbt, ergibt sich eine Zahl von 3000 Individuen mit über 900.000 Einzelknochen!

Damit wird auch die zweite falsche Annahme, dass die vielen Knochen von der Jagdbeute des Menschen stammen, ad absurdum geführt. Der natürliche Tod im Winterschlaf genügt völlig, um die Massenansammlungen zu erklären. Zudem fehlen die menschlichen Spuren, etwa Schnitte und Kratzer, wie sie bei der Zerlegung des Wildbrets entstanden sein müssten, fast immer.

Das Massenvorkommen von Höhlenbärenresten lässt sich zwanglos aus der Lebensweise dieser Tiere sowie aus den günstigen Erhaltungsbedingungen in Höhlen (gleichbleibende Temperatur und Feuchtigkeit) erklären.

Wie gelangen Wirbeltierreste in die Höhle und ihre Sedimente?

1. Die Tiere suchten die Höhle auf zum Überwintern: Im Eiszeitalter waren es z.B. Höhlenbären, Braunbären, Murmeltiere und Fledermäuse, welche die Höhlen aufsuchten um hier bei gleichbleibender Temperatur und Feuchtigkeit den Winter zu verbringen. Heute halten nur die Fledermäuse einen echten Winterschlaf in unseren Höhlen; der Braunbär hält nur Winterruhe, Murmeltiere leben heute nicht in Höhlen und der Höhlenbär ist vor ca. 15.000 Jahren ausgestorben.
2. Die Höhle diene als Raubtierhorst von Hyänen, Katzen, Mardern und Füchsen: viele Raubtierarten zogen im Schutz der Höhle ihre Jungen auf und brachten die erbeuteten Wirbeltiere in die Höhle. Hyänen und Füchse vergruben ihre Mahlzeitreste im Höhlenboden, was dazu geführt hat, dass sie besonders gut erhalten wurden.
3. Die Höhle diene als Vogelhorst: Beim heutigen Klima nisten nur wenige Vögel im Inneren von Höhlen, z.B. die Bergdohlen im Hochgebirge. In den kalten Phasen des Eiszeitalters, als es kaum Bäume gab, nisteten vor allem auch Eulen im geschützten Bereich der Höhlen und hinterließen uns riesige Mengen von Gewöllen mit Tausenden von Kleinsäugerkiefern und Schneehuhnknöcheln.

4. Die Höhle war eine sogenannte „Jagdstation“ des eiszeitlichen Jägers. Die Anhäufung von Knochen- und Zahnresten geht auf die Aktivität der steinzeitlichen Jäger zurück, auf die wir durch Funde von typischen Steingeräten und durch die Überlieferung von Schnitt- und Hackspuren an den Knochen schließen können.
5. Die Höhle als Tierfalle. Schachthöhlen und tiefe Karstspalten können als Tierfallen gewirkt haben. Am Boden solcher Schächte wurden oft ganze Skelette von Großsäugern gefunden z.B. von Elchen (Dachstein, Hochschwab), Nashörnern (Hundsheimer Spalte in den Hainburger Bergen) und Braunbären (Wolfshöhle im Toten Gebirge). Heute sind es vor allen Haustiere (Almvieh), die in derartige Schächte stürzen. Oder der Mensch benutzt die Schächte als bequeme Entsorgungsstation von Tierkadavern.
6. Einschwemmung von außen. Tier- und Pflanzenreste können auch von außen in den Höhlenraum gelangt sein. Das gilt besonders für Karstspalten, in die durch das Niederschlagswasser Bodensedimente samt ihrer Kleinfafa (z.B. Wühlmäuse, Maulwürfe, Schnecken) eingeschwemmt wurden.

Taphonomische Bedingungen

Zur Beurteilung diverser Fragen können die taphonomischen Bedingungen (wie kam es zur Fossilisation?) die entscheidenden Hinweise liefern. Das ist aber nur dann möglich, wenn die Fundschichten in Originallage angetroffen werden. Unbefugte Grabungen zerstören den Schichtverband und damit die meisten taphonomischen Befunde.

Andererseits verdanken wir die Kenntnis vieler Fossilfundstellen den Höhlenforschern. Im Folgenden soll daher versucht werden einige wichtige Verhaltensregeln aufzulisten, die Höhlen-„Forscher“ im Sinne des Wortes einhalten sollten, wenn sie in neu entdeckten Höhlenteilen Knochen, Zähne oder Schneckengehäuse finden.

1. Anfertigung von Fotos der Fundsituation und der Einzelstücke
2. Einzeichnen des Fundpunktes im Höhlenplan
3. Eventuell Anfertigung einer Lageskizze der Fundsituation
4. Entnahme von Proben: Von frei am Höhlenboden liegenden Wirbeltierresten oder Schneckengehäusen sollen nur wenige charakteristische Stücke entnommen werden, die eine Bestimmung zulassen; das sind vor allem Zähne und kleine ganze Knochen wie Hand- und Fuß-Wurzelknochen oder Mittelhand- und Mittelfußknochen. Weniger gut geeignet für die artliche Bestimmung sind Wirbel, Rippen und stark zerbrochene Langknochen.

Eine Entnahme größerer Mengen von Knochen und anderer tierischer Reste sollte nur dann erfolgen, wenn diese bei der weiteren Erforschung so im Wege sind, dass sie zerstört werden könnten. Entdeckt man fossilführende Sedimente z.B. Knochen und Zähne im Höhlenlehm, im Schutt oder im Sand, sollen Sedimentproben samt der darin enthaltenen Fossilien entnommen werden. Der Umfang der Probe soll nicht größer als 500 Gramm sein.

5. **Wichtig!** Beschriftung der Proben: Höhle, Katasternummer, Fundort, Datum, Name der Probennehmer
6. Übermittlung der Proben an ein wissenschaftliches Institut: an das zuständige Landesmuseum, an das Naturhistorische Museum in Wien oder an das Institut für Paläontologie der Universität Wien (1090 Wien, Althanstr. 14, Tel. 01-4277-53502).

Keine Grabungen!

Keine Grabungen!

Keine Grabungen!

Unbefugte Grabungen zerstören den Sedimentverband und verhindern damit unter Umständen wesentliche Befunde über die Entstehung und das geologische Alter der Fossilien. Viele österreichische Bärenhöhlen wurden durch Raubgrabungen so weit zerstört, dass sie für die Wissenschaft nur mehr von geringer Bedeutung sind (z.B. Gr. Badlhöhle im Grazer Bergland, Arzberghöhle im Hochschwab, Brieglersberghöhle im Toten Gebirge usw.).

Da fast alle Höhlen – auch die noch nicht entdeckten – unter Schutz stehen, ist das Graben nur mit Genehmigung der zuständigen Behörden (Bezirkshauptmannschaften und Naturschutzbehörden der Landesregierungen) gestattet.

Grüne Pflanzen und Pilze in Höhlen

Es werden folgende Schwerpunkte behandelt:

1. Höhleneingangsflora: Grüne, photoaktive, autotrophe (selbsternährende) Pflanzen der Höhleneingänge.
2. Lampenflora: Die Gesamtheit aller autotrophen Pflanzen im Bereich fest installierter künstlicher Lichtquellen in Höhlen und Stollen.
3. Höhlenpilzflora: Alle heterotroph (fremdernährend) wachsenden Pilze im Bereich von Höhlen und Stollen.

Grüne Pflanzen im Eingangsbereich von Höhlen

Die zu dieser Pflanzengruppe gehörenden Blütenpflanzen, Farne, Moose und Algen benötigen unverzichtbar Licht zum Leben. Sie nehmen bei der Photosynthese Lichtenergie auf und bilden mit dem Kohlendioxyd der Luft und Mineralien aus dem Boden organische Verbindungen wie Zucker, Stärke, Lignin etc. Organische Verbindungen sind also gespeicherte Sonnenenergie und enthalten immer Kohlenstoff.

Im Eingangsbereich von Höhlen finden grüne Pflanzen also nur so lange Lebensbedingungen vor, als genügend Licht vorhanden ist sie dringen bis zu ihrem spezifischen Lichtminimum in die Höhle ein.

Dieses Minimum ist bei den vier erwähnten Pflanzengruppen unterschiedlich.

Blütenpflanzen sind dabei am bedürftigsten und erreichen ihre Grenze bei 1/200 des Tageslichtes. Mit abnehmendem Licht reagieren sie mit Veränderungen:

- Die Fähigkeit der Blütenbildung geht verloren.
- Laubblätter werden dünner, es werden weniger Zellagen angelegt, da das wenige Licht nicht mehr so tief in das Blatt eindringen kann.
- Die Blattstiele werden dünn und lang und wachsen zum Licht hin (Etiolierung)
- Die Blätter stellen sich senkrecht zum einfallenden Licht, ein maximaler Lichtgenuss wird angestrebt.

Für Höhleneingänge besonders geeignet erscheinen präadaptierte Pflanzen, die bereits an wenig Licht angepasst sind, wie Schatten- oder Waldrandpflanzen.

L. Lämmermayer (1912), F. Morton, (1922) W. Gams (1922) u.a. erforschten am Beginn des 20. Jahrhunderts die Eingangsflora verschiedener österreichischer Höhlen. Als eine der typischen Blütenpflanzen zeigte sich der „Stinkende Storchenschnabel“ (*Geranium robertianum*).

Farne sind in der Lage bei bis zu 1/300 des Tageslichtes zu gedeihen. Mit Abnahme des Lichtes bleiben die Farnwedel kleiner und Vorkeime bleiben länger erhalten und sind stärker entwickelt als im Freien.

Der „Schwarzstielige Streifenfarn“ (*Asplenium trichomanes*) kann als der typische Eingangsfarn der Höhlen bezeichnet werden. Man findet aber auch andere *Asplenium*-Arten wie die „Mauerraute“ und den „Grünstieligen Streifenfarn“ im Gebirge.

Laub- und Lebermoose können als sehr genügsame Organismen die Lichtgrenze noch weiter hinausschieben und **Algen** gedeihen noch bei der geringen Lichtmenge von 1/2000 des Tageslichtes.

Lampenflora

Klaus Dobat aus Tübingen bezeichnete 1963 die Gesamtheit der autotrophen Pflanzen im Bereich fest installierter Beleuchtungskörper in natürlichen und künstlichen Höhlen als „Lampenflora“.

Voraussetzung für deren Entstehung und Entwicklung ist genügend Licht und Feuchte und die entsprechenden Keime, Samen oder Sporen. Keime gelangen durch Wasser-, Lufttransport, durch Tiere oder Menschen (Besucher) in die Höhle.

Erstbewuchs erfolgt durch verschiedene Algen (Blau-, Grün-, Kieselalgen), die blauschwarze, grüne oder braune Überzüge bilden können. Im fortgeschrittenen Stadium bilden sich Moose und Farne mit ähnlichem Artenspektrum wie im Eingangsbereich. Blütenpflanzen wurde bis jetzt erst einmal beschrieben und zwar aus der Lurgrotte in den 90er Jahren.

Eine kleinräumige Lampenflora ist eine interessante Bereicherung für eine Schauhöhle. Bei sinnlos hoher Beleuchtungsstärke oder großem Besucherstrom kann sie jedoch einerseits zu einer negativen Veränderung des Eindrucks Höhle führen, wenn Sintervorhänge und Tropfsteine großflächig überwachsen werden, andererseits ist sie absolut unerwünscht, wenn Kunstwerke wie Höhlenmalerei beschädigt bis zerstört werden.

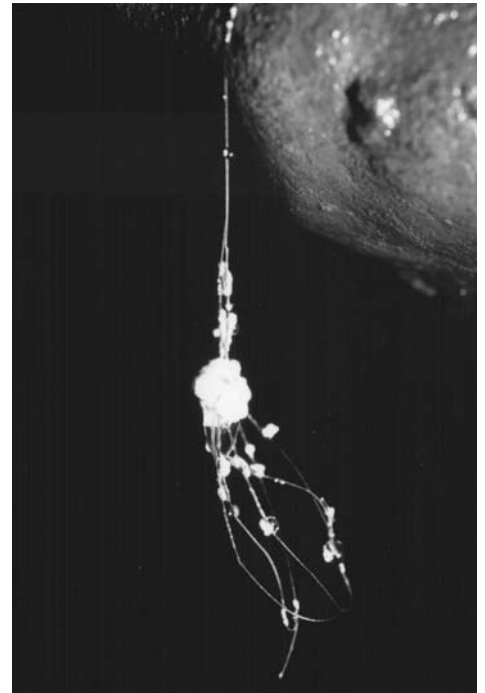
Kurzzeitig findet man vereinzelt grüne Pflanzen auch im aphotischen (lichtlosen) Teil von Höhlen, wenn deren Samen dorthin gelangen und aufgrund des im Samen vorhandenen Nahrungsdepots ein beschränktes Wachstum möglich ist. Nachdem es aufgezehrt ist, stirbt jedoch die Pflanze.



Durch die Höhlensituation modifizierter Hutpilz (Helming / *Mycena* sp.) mit überlangem Stiel, starker Behaarung und geotrop orientiertem Hut.



Steriles Pilzgeflecht (Luftmycel) auf Holzpölung wachsend und von dieser herabhängend.



Weberknecht (*Amilenus aurantiacus*) vom Schimmelpilz *Beauveria bassiana* infiziert und abgetötet.

Pilze in Höhlen

Pilze werden separat angeführt, da sie nach heutiger Ansicht neben dem Pflanzen- und Tierreich als drittes Reich zusammengefasst werden.

Pilze beziehen im Gegensatz zu grünen Pflanzen ihren Kohlenstoff aus organischen Substanzen und nicht aus dem Kohlendioxyd der Luft. Ihre Ernährung ist vom Licht unabhängig, sie besitzen keine photoaktiven Substanzen wie Chlorophyll und produzieren daher auch keine Glucose als Zucker.

Da sie lichtunabhängig sind, kann man Pilze bis in die tagfernsten Bereiche der unterirdischen Welt finden, soweit sie dort organische Nährstoffe wie Holz, Blätter, Tierleichen, Rückstände von Höhlenforschern etc. vorfinden.



In der Höhlensituation leben die meisten Pilze dauernd als Pilzgeflecht (Mycelium). In dieser Form sind sie für das Ökosystem von großer Bedeutung, da sie verschiedenen Höhlentieren wie Spinnen, Tausendfüßern, Höhlenkäfern, Springschwänzen etc. als Behausung, Jagdplatz oder Nahrung dienen.

Wenn sie fruktifizieren, d.h. Schwammerln bilden, zeigen diese Pilzfruchtkörper meist abnormes Wachstum, morphologische Modifikationen. Einige dieser Veränderungen sind:

1. Übermäßig langer Stiel
2. Starke, ungewöhnliche Behaarung des Stieles
3. Verlust der Pigmentation des Fruchtkörpers.
4. Verlust fertiler Strukturen wie Sporen, Basidien etc.

In vielen Fällen gelangen die Pilze im Finsternen nicht zu einem Vollreifestadium sondern bleiben in ihrer Entwicklung in einem Jugendstadium stehen oder steril. Sie bilden dann meist lange dünne Stiele mit einem winzigen Hütchen. Durch einen Lichtimpuls kann diese Entwicklung zum reifen Pilzfruchtkörper fortgesetzt werden.

Pilze besitzen auch die Fähigkeit zum Licht hin zu wachsen (positiver Phototropismus) und reife Pilzhüte reagieren auf die Erdanziehungskraft und positionieren ihre Hüte danach entsprechend (positiver Geotropismus) um ihre Sporen ausschleudern zu können.

In Höhlen findet man so gut wie alle systematischen Gruppen von Pilzen, vorausgesetzt, das entsprechende Substrat steht zur Verfügung. Grundsätzlich findet man in Höhlen keine anderen Pilzarten als im Freien.

Das Interesse an Pilzen in Höhlen und Bergwerken geht bis weit in das 17. Jh. zurück (Aldrovandi). Im 18. Jh. beschrieb Scopoli (1772) und Humboldt (1793) Pilze in Bergwerken. Es handelte sich dabei meist um Holz bewohnende Arten, die als Zerstörer der Bergwerkseinbauten auftraten (z.B. Anissägeblättling, *Lentinus lepideus*). Durch die Bergwerkssituation bildeten sie ungewöhnliche Formen oder Monstrositäten, die fälschlich als neue Arten beschrieben wurden, obwohl es sich nur um Modifikationen handelte.

In den letzten Jahrzehnten wurde den Schimmelpilzen größere Aufmerksamkeit zuteil. Sie befallen meist lebende Gliederfüßer (Insekten, Spinnentiere, u.ä.) durchwachsen den Körper des Tieres und töten es ab. Unter den Opfern befinden sich z.B.: Große Höhlenspinne (*Meta menardi*), Scherenkanker (*Ischiropsalis collari*), Höhlenheuschrecke (*Troglophilus cavicola*), Zackeneule (*Scoliopterix libatrix*), Wegdornspanner (*Triphos dubitata*), u.ä.

In den meisten Fällen erfolgt die Infektion durch *Beauveria bassiana*, einen Schimmelpilz aus der Verwandtschaft des Penicillins.

Prähistorische Funde in Höhlen

Bei der Befahrung von bekannten oder auch neuentdeckten Höhlen kann es vorkommen, dass man auf historische oder prähistorische Funde stößt. Die Fundsituation ist in den meisten Fällen nicht immer gleich klar zu erkennen, weil auch nicht in jeder Höhle mit einem archäologischen Fund zu rechnen ist. Aus diesem Grund kann es vorkommen, dass, nicht mit Absicht aber durch Unwissenheit, für die Wissenschaft ein unwiederbringlicher Schaden entsteht. Auch das „Buddeln“ in Höhlen, also die Suche nach archäologischen Funden vernichtet für immer wertvolle Informationen über unsere eigene Vergangenheit bzw. Landesgeschichte. Sollte jemand bei der Erforschung einer Höhle auf einen nachstehend aufgezählten Fund oder Hinweis stoßen, so ist es unbedingt notwendig eine Meldung an eine der zuständigen Stellen weiter zu leiten, damit diese gesichert werden können und so der Nachwelt erhalten bleiben. Über den Fundverbleib gibt es eigene Richtlinien. Ein geborgenes Fundstück soll auf jeden Fall Fachleuten (z.B. Bundesdenkmalamt) zur Bestimmung und Bearbeitung übergeben werden.

Welche Funde aus dem prähistorischen Zeitraum können in Höhlen vorkommen?

1. Menschliche Überreste: Schädel, Zähne und Knochen des menschlichen Skeletts
2. Menschliche Hinterlassenschaften: Hier kann es sich um nachfolgend angeführte Gegenstände handeln: Stein- und Knochenwerkzeuge, Keramik als ganze Gefäße oder auch in Form von Topfscherben, Kunstwerke wie beispielsweise Schmuckgegenstände, Tier- und Menschenfigurinen, Götterstatuen, Jagdwaffen, Bestattungen, Geräte des Alltags z.B. Mahlsteine, Kultgegenstände u.v.m. handeln.
3. Kunstäußerungen in Form von Höhlenmalereien, Fingerlinien, Gravuren oder Reliefe auf dem Boden, der Wand und der Decke von Höhlenräumen. Auch Farbspuren auf dem Fels, Tropfsteinen oder Wandabsplitterungen können Hinweise auf einstige Malereien sein.
4. Inschriften: Speziell für den jungpaläolithischen Abschnitt können im weiteren Sinne auch einfache Zeichen wie beispielsweise Abfolgen von Punkten und Strichen oder anderen Darstellungen als mögliche frühe Informationsträger interpretiert werden.
5. Künstliche Veränderungen des Höhlenraumes. Hier sind vor allem auffällige Abweichungen von der natürlichen Raumbildung bzw. dem Höhleninhalt gemeint wie beispielsweise: Einebnung des Bodens z.B. für kurzfristigen Lagerplatz, Mauern, Erweiterung von Gangpassagen oder Räumen, Stufen, Reliefwände, Vorratsgruben, Beleuchtungsnischen, Ausnehmungen für Bestattungen, Steinsetzungen, u.ä.
6. Stein-, Sinter- oder Lehmabbau, fällt auch unter künstliche Veränderungen des Rauminhalts.
7. Veränderungen an Tropfstein- und Sinterbildungen durch den prähistorischen Menschen. Dazu zählen beispielsweise abgeschlagene und auch in Felsspalten oder Lehm gesteckte Tropfsteine. Beschädigungen von Tropfsteinbildungen beispielsweise durch das Anschlagen von Sinterfahnen, Stalagmiten oder Stalaktiten zur Klangerzeugung usw.
8. Depots von Pflanzensamen in Gefäßen, Knochen, Stein- oder Knochenwerkzeuge und Metallgegenstände aus dem pragmatischen und kultischen Bereich der stein-, bronze- und eisenzeitlichen Kulturen.
9. Spuren des Menschen: Handabdrücke auf dem Boden, an der Wand oder der Decke, Fußabdrücke in lehmigen oder sandigen oder mit Sinter überzogenen Sedimenten, alte Feuerstellen (Asche und Holzkohlereste), Speisereste, artifiziell veränderte Knochen, die gesondert in Höhlenräumen gelagert wurden, Stein- oder Knochenklingen, die in Fugen oder Spalten hineingeklemmt wurden, Fackel- oder andere Beleuchtungsreste, Russ-Spuren an den Wänden u.v.a.m.
10. Fossiles Knochenmaterial: Mensch und Tier (!). Speziell bei fossilen Überresten von ausgestorbenen Tierarten oder vom frühen Menschen sollte man bei der Sichtung eines solchen Fundkomplexes seine angeborene Sammelleidenschaft zügeln und die Beurteilung und Bergung den zuständigen Fachleuten überlassen.

Welche Nutzungsarten des prähistorischen Menschen sind in Höhlen nachweisbar?

1. Zufluchtsort (kurz- oder längerfristiger Aufenthaltsort)
2. Wohnbereich (nur in klimatisch günstigen Regionen selten im Hochgebirge!)
3. Bestattungsort (seit dem Paläolithikum – Altsteinzeit – bis zur Gegenwart)
4. Kultplatz für Gottheiten, Geister, Dämonen (seit der Altsteinzeit bis zur Gegenwart)
5. Opferstätte für Tier- und Menschenopfer (derzeit in Europa ab dem Neolithikum – Jungsteinzeit – belegt)
6. Depotraum für Alltags-, Wertgegenstände und Nahrung
7. Trinkwasserdepot (derzeit in Europa ab der Jungsteinzeit belegt)
8. Bergbau (in Europa seit der Altsteinzeit)

Welche sichtbaren Fundsituationen können in Höhlen vorkommen?

1. Originalfundplatz: Fundstück liegt „in situ“ (das ist die archäologische Bezeichnung für einen Gegenstand, der sich in der ursprünglichen Lage befindet, wie er im Rahmen von archäologischen Untersuchungen freigelegt oder an der Oberfläche liegend aufgefunden wurde) an der Oberfläche oder steckt im Sediment, im Fels, Eis, Wasser, Sinter etc.
2. Sekundärfundplatz: Fundstück wurde bereits auf Grund von Veränderungen durch Mensch oder Tier, aber auch durch Naturereignisse umgelagert. Dies kann im letzteren Falle durch Wassereinträge infolge von schweren Unwettern oder auch durch Tiere beim Aushub ihres Baues vorkommen. Hierbei können im umgelagerten Sediment vielleicht Steinklingen, Topfscherben oder andere Funde an die Oberfläche gelangen. Auch im Aushubmaterial von Raubgrabungen oder im Rahmen von Erschließungsarbeiten durch Höhlenforscher bzw. beim Freilegen von Höhlenräumen durch Steinbruch-, Straßenarbeiten usw. ist es möglich, dass archäologische und paläontologische Funde zu Tage treten. Bei Einzelfunden kann es sich auch um Streufunde handeln, das sind, wie der Name schon sagt „Einzelfunde“, die ohne weiteren archäologischen Zusammenhang in oder vor Höhlenräume bzw. den Eingangsbereich gelangt sind. Diese unterliegen, gleich wie alle archäologischen Funde, ebenfalls der Meldepflicht!

Welche Sofortmaßnahmen sollten bei Höhlenfunden eingehalten werden?

Wenn ein archäologischer Fund entdeckt wird sollte innerhalb weniger Tage (2-3) bzw. sobald als möglich die Meldung an eine zuständige Stelle (Bundesdenkmalamt, Landesmuseum oder Universität – Institut für Ur- und Frühgeschichte, Archäologie, Alte Geschichte und Altertumskunde, Paläontologie) telefonisch oder schriftlich weitergegeben werden. Auf keinem Fall aber dürfen Funde, wenn sie noch „in situ“ (Originallage) vorgefunden werden, von der Stelle entfernt werden! Dies sollten nur autorisierte Personen durchführen. Und wenn dies bei Oberflächenfunden in gut besuchten Höhlen zur Sicherung des Fundes dennoch geschieht, so sollte die Lage vor Ort protokolliert werden (Foto, Aufzeichnung o.ä.), um die Fundsituation später rekonstruieren zu können. Auf keinem Fall darf an dieser Stelle nachgegraben werden, weil dadurch weitere wertvolle Informationen und auch Funde zerstört werden können. Mit dem Entfernen von weiteren Fundgegenständen gehen wichtige Begleitinformationen verloren, die nur durch Fachleute erkannt und gesichert werden können (z.B. Altersdatierung, Fundanalyse usw.).

Zuständige Stellen für Fundmeldungen

- Bundesdenkmalamt Wien oder die Landeskonservatoren des BDA in den Bundesländern.
- Landesmuseen der Bundesländer oder die zuständigen Gemeindemuseen.
- Universitäten in Wien, Graz, Linz, Salzburg, Innsbruck und Klagenfurt (jeweils zuständigen Institute).
- Karst- und höhlenkundliche Abteilung des Naturhistorischen Museums Wien.

Erdställe

Was sind Erdställe?

Erdställe sind geheimnisvolle Besonderheiten, von denen man außer ihrem Vorhandensein und ihrem heutigen Aussehen nur sehr wenig weiß. Hundertprozentig erwiesen ist eigentlich nur, dass die fast durchwegs kleinräumigen Objekte künstlich hergestellt wurden. Sie befinden sich oft unter Häusern oder sind von Kellern aus zugänglich. Vereinzelt gibt es sie aber auch im freien Gelände.

Mit einem Stall für irgendwelches Vieh haben sie überhaupt nichts zu tun; der Wortteil „stall“ bedeutet soviel wie Ort, Platz, Stelle, wie er z.B. auch im Wort „Burgstall“ mit gleicher Bedeutung vorhanden ist. Erdställe werden in manchen Gegenden auch als „Hauslöcher“ oder „Erdhöhlen“ bezeichnet, in Bayern nennt man sie „Schrazellöcher“, im Waldviertel heißen sie „Graselgänge“.

Verbreitung

Man findet Erdställe von Frankreich bis Osteuropa, vorwiegend in hügeligen Gebieten; gehäuft in Bayern, Mähren und Österreich. Nach Osten setzt sich die Verbreitung ähnlicher unterirdischer Baue (die aber nicht unbedingt „echte“ Erdställe sein müssen) angeblich bis China fort. In Österreich gibt es sie vereinzelt im Alpenvorland von Salzburg bis Niederösterreich, aber auch am Alpenostrand (Burgenland, Bucklige Welt, Südoststeiermark). Äußerst zahlreich sind sie in Oberösterreich (hier auch im Alpenvorland), im Waldviertel und besonders im Weinviertel. Sie wurden sowohl im Löss und Lehm angelegt, wie auch „Flins“ und im harten Fels.

Merkmale

Gänge und Kammern sind meist rundbogig, seltener spitzbogig oder anders profiliert. Im Lehm und Löss sind Wände und Decken fast immer sorgfältig geglättet; es kommt auch vor, dass Spuren der verwendeten Werkzeuge erkennbar sind. Häufig stammen solche von nachträglichen Bearbeitungen. Im Gestein sind die Wände manchmal roh wie in einem Bergwerksstollen; viel häufiger erkennt man aber glättende Meißelspuren, wobei diese manchmal kantig und frisch, manchmal abgerundet und ausgeschliffen aussehen. In seltenen Fällen trifft man sogar Oberflächen an, die wie poliert wirken. Sowohl in den Kammern als auch in den Gängen gibt es Nischen verschiedenster Größen, Formen und Ausführungen in unterschiedlichen Höhen und Abständen.

Erdställe führen bzw. führten manchmal vom Keller, vom Stall oder von einem Raum des Hauses weg. Im letzteren Fall konnte man sie meist nach dem Wegheben einiger Bodenbretter betreten. Ob dies allerdings die ursprünglichen Eingänge waren, lässt sich heute kaum mehr feststellen. Wenn – wie dies besonders oft im Weinviertel vorkommt – ein Erdstall jetzt von einem Weinkeller aus betreten wird, sagt das noch lange nicht, dass er auch von hier aus gegraben wurde. Meist wurden die Keller viel später hergestellt, und die Erdställe wurden beim Kellerbau angeschnitten. Oft wurden auch vorhandene Erdställe auf Kellerausmaße vergrößert und umgebaut.

Alter

Auch das Alter der Erdställe gibt viele Rätsel auf. Als in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts die Erdstallforschung begann, waren einige „Experten“ der Meinung, dass sie maximal 150 bis 200 Jahre alt seien. Andere wieder glaubten, dass sie aus prähistorischer Zeit stammen würden. Mit besonderer Phantasie Begabte schrieben sie sogar einer uralten Zwergenrasse oder Außerirdischen zu, die in lichtlosen Räumen Zuflucht suchten und lebten.

Die spärlichen Fundstücke, die aus Erdställen bisher geborgen wurden, geben meist nur Aufschluss über spätere Benützungen. Die Erdstallforscher meinen heute, dass in Österreich die Herstellung vieler Erdställe in der Phase der Kolonialisierung um 1000 n. Chr. stattgefunden haben könnte. Für zwei Erdställen (einer in Bayern und einer in Oberösterreich) konnten Archäologen eine Erbauung um diese Zeit nachweisen. Besonders in Bayern und Frankreich stellte man in vielen Erdställen systematische Auffüllungen fest, die ab dem 13. Jahrhundert durchgeführt wurden. Zwangsläufig müssen die Erdställe also schon vorher vorhanden gewesen sein.

Bedeutung der Erdställe – wozu wurden sie errichtet?

Wegen Temperatur, Feuchtigkeit und Beengtheit eignen sich Erdställe weder als Lagerräume, noch als Orte für längere Aufenthalte. Auch für die Verwendung als Begräbnisstätten fand man keine Hinweise. Ein Großteil der heutigen Erdstallforscher ist der Meinung, dass es sich um Verstecke für kurzfristige Dauer gehandelt hat, auch wenn manche ihrer Eigenheiten für eine solche Verwendung keineswegs logisch erscheinen. Erwiesen ist, dass die bereits vorhandenen Erdställe im Laufe der Zeit immer wieder als Verstecke benützt wurden.

Das sagt jedoch nichts über den Zweck ihrer Erbauung aus. Wenn man den riesigen Aufwand verschiedenster Kulturen betrachtet, den diese zu Ehren ihrer Gottheiten aufgebracht haben, dann erscheint die Theorie, dass es sich um Kultstätten handelte, nicht mehr so abwegig. Auf diese Weise ließen sich sogar manche absonderliche Bauformen einigermaßen erklären. Um irgendwelche Versammlungsorte kann es sich auf Grund der Beengtheit nicht gehandelt haben, aber zum Beispiel als Wohnungen für Hausgeister oder für die Schattenkörper der Ahnen, die man gnädig stimmen wollte, könnten sie gegraben worden sein. Sie könnten auch als Aufenthaltsort für die über kürzere oder längere Zeiträume erdgebunden bleibenden Seelen der Familienmitglieder gedacht gewesen sein. Manche Erdstallforscher schreiben ihre Herstellung reinigenden Durchschlupfbräuchen zu, andere wieder erklären sie als Initiations- und Meditationsorte.

Erforschung

Im Jahre 1903 hat der Göttweiger Pater Lambert Karner, der auch Pfarrer in einigen Weinviertler Gemeinden war und als einer der ersten und bedeutendsten Erdstallforscher gilt, sein Lebenswerk herausgebracht. Es trägt den Titel „Künstliche Höhlen aus alter Zeit“ und beschreibt Erdställe aus den verschiedensten Ländern Europas. Vorwiegend hat sich Karner natürlich mit Erdställen in Österreich befasst. Der Schwerpunkt davon liegt im Weinviertel. Etwas später als Pater Lambert Karner dokumentierte der vielseitige Heimatforscher Ing. Franz X. unter anderem auch Erdställe, besonders im Raum um Horn und Drosendorf.

Mit der Erforschung der Erdställe befassten und befassen sich meist interessierte Laien. Wissenschaftler befassen sich vereinzelt, meist aber nur „nebenbei“, mit dem interessanten und geheimnisvollen Phänomen Erdstall. Neue Erdställe zu entdecken wird immer seltener, da ein Großteil bereits erfasst und vermessen ist. Deshalb an dieser Stelle eine Bitte: Sollten in Niederösterreich Erdställe bekannt werden, die noch nicht vermessen sind, oder womöglich welche neu entdeckt werden, meldet dies bitte an: Edith Bednarik, Rebengasse 49, 2700 Wiener Neustadt, Tel. 02622/21763.

Gefährdung

Gerade in den letzten fünfzig Jahren sind viele Erdställe dem Straßen- und Hausneubau, dem Einbau von Wasserleitung, Kanal, sanitären Anlagen oder elektrischen Leitungen zum Opfer gefallen, andere wieder sind durch das Drüberfahren mit schweren modernen Fahrzeugen eingestürzt. Noch vorhandene Erdställe sind seltener, gut erhaltene Exemplare dieser uralten, ehrwürdigen und geheimnisvollen geschichtlichen Denkmäler, eine Rarität geworden.

Gott sei Dank beginnt man in letzter Zeit Altehrwürdiges wieder zu schätzen und es wird wieder wertvoll. Deshalb auch an dieser Stelle ein Aufruf, diese wertvollen kulturhistorischen Zeugen längst vergangener Tage in Ehren zu halten, zu schützen und mitzuhelfen, die Zerstörung von Erdställen zu verhindern.

Montanspeläologie

Während sich die meisten Höhlenforscher üblicherweise mit natürlich entstandenen Objekten auseinandersetzen, gibt es auch solche, die sich der von Menschenhand geschaffenen unterirdischen Hohlräume annehmen. Neben der Erdstallforschung (siehe dort) stellt die Montanspeläologie dabei einen eigenen Forschungszweig dar, der sich in manchen Dingen grundlegend von der herkömmlichen Höhlenforschung unterscheidet. Im Folgenden soll ausschließlich auf die **Unterschiede** eingegangen werden, da sich alles andere ohnehin in den entsprechenden Blättern zur allgemeinen Speläologie findet.

Was ist Montanspeläologie?

Montanspeläologie beschäftigt sich mit der Erforschung stillgelegter Bergwerke und Bergwerksteile in historischer, montanistischer, geologischer und mineralogischer Hinsicht.

Unterschiede zur allgemeinen Speläologie:

Rechtliche Grundsätze:

Im Gegensatz zu Naturhöhlen unterstehen alte Grubenbaue meist den **Bergbaubehörden**, es gelten hier in der Regel die entsprechenden Gesetze. Auch können noch **Schürfrechte** in Kraft sein, weshalb natürlich Absperrungen und entsprechende Betretungsverbote unbedingt zu akzeptieren sind. Im Zweifelsfall geben die Behörden über Besitzverhältnisse Auskunft.

Gefahren:

Die Anzahl der Gefahrenquellen sind in künstlich geschaffenen Hohlräumen ungleich höher als in natürlichen:

- **Einsturzgefahr:** besonders dort gegeben, wo alte Holz-Einbauten vorhanden sind. Solche Stellen im Zweifelsfall unbedingt meiden! Ungepöhlte Grubenabschnitte sind in den meisten Fällen sicher.
- **Absturzgefahr:** besteht nicht nur beim Betreten alter Steigbäume, Leitern und Arbeitsbühnen (meist morsch!). Oft sind Schächte im Boden mit Holz abgedeckt, auf dem zusätzlich noch Gesteinsschutt liegt. Das kann zur tödlichen Falle werden.
- **Luftmangel, Gase:** kommt zwar extrem selten vor, dennoch sollte man bedenken, dass Bergbaue meist erheblich schlechter durchlüftet sind als Höhlen!

Schutzkriterien:

Alte Grubenbauten gelten in der Regel als „**technische Denkmäler**“ und unterliegen entsprechenden Schutzkriterien. Besonderen Schutz verdienen Einbauten wie Steigbäume, Arbeitsbühnen, „Wasserkünste“ (etwa hölzerne Wasserräder mit Gestängen u. ä.). Hölzerne Einbauten sollten wegen der latenten Einsturzgefahr ohnehin gemieden werden. Schützenswert sind aber auch sehr alte – etwa handgeschrämte oder durch Feuersetzen entstandene Stollenabschnitte oder solche, in denen sich rezente Sinter gebildet haben. Aufgefundene Gerätschaften (Grubenhunte, Erztröge, Werkzeug, etc.) sollten nach Möglichkeit von Experten begutachtet werden.

Beprobung:

Im Gegensatz zu Naturhöhlen kann die Entnahme von **Mineralproben** aus alten Bergbauen durchaus erwünscht sein. Dies deshalb, weil sich die Möglichkeiten zur Mineralbestimmung im Laufe der Zeit wesentlich verbessert haben. Manches, was die „Alten“ nicht erkannten, kann heute für die Forschung sehr bedeutsam sein. Aber Vorsicht: die Bergleute haben schon gewusst, warum sie einen "Pfeiler" stehengelassen haben, obwohl er noch gutes Erz enthält! Die Probenentnahme sollte also immer sehr sorgsam erfolgen.

Dokumentation:

Die Planaufnahme in Bergbauen heißt "**Markscheiderei**" und verwendet teilweise andere Symbole, als wir sie von der Höhlenvermessung her kennen; etwa für Schacht (in der Bergmannssprache "Gesenk"):  oder für Eingang ("Mundloch"): 

Es wird aber niemanden stören, wenn wir bei der Dokumentation alter Bergwerke die uns bekannten Zeichen verwenden. Wichtig ist aber die zusätzliche Einzeichnung von anstehendem Erz (etwa so: ) und Klüften: 

Spezielle Fachbegriffe:

Aus der Tradition des Bergmannstandes hat sich eine - teilweise recht eigenartige - Nomenklatur für montanistische Gegebenheiten entwickelt. Ein "Alter Mann" ist beispielsweise nicht etwa ein speläologischer Methusalem, sondern der verlassene Abbauort in einer Grube. Länger aktive Abbauorte heißen "Zeche", große Räume "Weitung", Abstiege "Fahrten" u.s.w. - All diese Begriffe hier aufzuführen, würde den Rahmen sprengen. Wer sich dafür interessiert, sei auf einschlägige Lexika verwiesen.

Kontaktadressen:

Mineralbestimmung, Geologie: Naturhistorisches Museum Wien, Burgring 7, Postfach 417, A-1014 Wien, Tel. 01/ 52177264 - www.nhm-wien.ac.at/NHM/Mineral/

Lagerstättenkunde, Montanwesen: Geologische Bundesanstalt Tongasse 10-12 A-1031 Wien, Tel. 01/ 7125674 - www.geolba.ac.at



Alter Blei-Zink-Bergbau Schwarzenberg (Türnitz, NÖ)



Eisbildungen i. d. Silbergrube (Puchenstuben, NÖ)