

# DIE HÖHLE

## ZEITSCHRIFT FÜR KARST- UND HÖHLENKUNDE

Jahresbezugspreis: Österreich S 60,-  
Bundesrepublik Deutschland: DM 10,-  
Schweiz: sfr 10,-  
Übriges Ausland: S 70,-

Gefördert vom Bundesministerium für Wissenschaft  
und Forschung, Wien

Organ des Verbandes österreichischer Höhlenforscher /  
Organ des Verbandes Deutscher Höhlen- und Karst-  
forscher e. V.

AU ISSN 0018-3091

AUS DEM INHALT:

Berechnungen zur Formentwicklung von Höhlen-  
profilen (Henne) / Eine weitere pliozäne Höhlenfauna  
aus Bad Deutsch-Altenburg (Mais-Rabeder) / Höhlen in  
südthailändischen Provinzen (Kusch) / Kurzberichte /  
Schriftenschau

28. JAHRGANG

OKTOBER 1977

HEFT 3

### Berechnungen zur Formentwicklung von Höhlenprofilen

*Von Peter Henne (Bad Honnef, BRD)*

Wird eine Diskontinuität im verkarstungsfähigen Gestein von aggressivem Wasser durchflossen, so ändert sich ihr Querschnitt. Mit dieser Feststellung ist das Grundprinzip der Höhlenbildung umfassend beschrieben. Im Detail ist man jedoch bei der Deutung der Entwicklung eines speziellen Hohlraumprofiles auf sehr unsichere Vermutungen angewiesen. Es stellt sich damit die Frage, ob es nicht möglich ist, die Entwicklung eines Hohlraumprofiles theoretisch zu berechnen.

Dazu kann man sich die Begrenzungslinie eines Ausgangsprofiles in viele differentiell kleine Randelemente zerlegt denken. Ist ein Randelement nicht vom Wasser benetzt, so ändert es seine Lage nicht. Wirkt hingegen auf ein Randelement aggressives Wasser ein, so wird es gelöst. Man kann sich die Lösung auch so vorstellen, daß das Randelement während einer sehr kurzen Zeit nach außen geschoben wird (vom Wasser weg), und zwar auf der Richtung seiner Normalen.

Nachdem alle Randelemente diese Bewegung nach außen gemacht haben, ist das Profil in seinen vom Wasser benetzten Teilen ein wenig größer geworden. Damit muß der Wasserspiegel im Profil absinken, wenn die Wassermenge konstant ist. Somit werden oberhalb des Wasserspiegels Randelemente frei und sind konserviert. Nun lassen wir die nächste Zeitphase ablaufen; das Profil vergrößert sich wieder ein wenig, der Wasserspiegel sinkt usw. Nach dieser Vorstellung ist noch ein Problem zu lösen: Die Umrandungslänge eines großen Profiles ist naturgemäß länger als die eines kleinen Profiles. Es müssen also bei einer Bewegung der Randelemente nach außen neue Randelemente entste-

hen, wenn sich benachbarte Randelemente voneinander entfernen, es müssen umgekehrt Randelemente verschwinden, wenn sich benachbarte Randelemente einander nähern. Das Verschwinden von Randelementen ist einfach: Es können nicht zwei Randelemente die gleiche Lage haben, aus zwei Elementen wird eines. Bewegen sich zwei benachbarte Randelemente auf divergenten Normalen voneinander weg, so kann man sich vorstellen, daß zwischen ihnen ein Randelement auf der Winkelhalbierenden der beiden Normalen entsteht, das ebenfalls nach außen wandert.

Wenn wir nun noch in der Lage sind, ortsabhängige unterschiedliche Bewegungsbeträge der Randelemente einzuführen, etwa durch das Vorliegen anisotroper Gesteinslöslichkeit oder durch die Existenz von Klüften und Schichtfugen, so wäre damit die Profilentwicklung erfaßt.

Man könnte die oben genannten Vorstellungen in eine Gleichungsform bringen und versuchen, die so entstehende partielle Differentialgleichung zu lösen. Ohne näher darauf einzugehen, ist wohl einsichtig, daß eine Lösung einer derart komplexen Gleichung außer für einfachste Spezialfälle (Kreisprofil mit Druckgerinne) kaum möglich ist.

Andererseits kann man nun die Vorstellung differentieller Randelemente und differentiell kleiner Zeitphasen verlassen und die Vorgänge durch eine Diskretisierung einer maschinellen Berechnung zuführen. Es wird von einer großen, aber endlichen Zahl von Randelementen und zwar kleinen, jedoch nicht differentiell kleinen Zeitphasen ausgegangen. Ein ausreichend schneller Computer simuliert nun die Profilentwicklung derart, daß zuerst alle benetzten Randelemente um ein kleines Stück verschoben werden und danach der neue Wasserspiegel durch „Auffüllen“ des neuen Profiles mit der konstanten oder veränderlichen Wassermenge bestimmt wird.

Die hier vorgestellten Berechnungen wurden auf diese Weise durchgeführt. Das Programm berücksichtigt bis zu 256 Randelemente. Es können weiterhin die Wassermenge, die Lösbarkeit des Gesteins in beiden Flächenrichtungen und davon abweichende Lösbarkeiten in bis zu sechs Schichtfugen und einer Kluffuge berücksichtigt werden. Löslichkeit des Gesteins, Aggressivität des Wassers, mechanische Gesteinsfestigkeit und Erosivität des Wassers werden nicht getrennt betrachtet, sondern im oben genannten Parameter „Lösbarkeit“ zusammengefaßt. Der Rechner zeichnet zu jeder Zeitphase das Profil auf einem Bildschirm, die angefügten Abbildungen sind direkte Bildschirmfotos oder daraus erstellte Umzeichnungen. Es ist klar, daß aus Platzgründen nur die interessantesten Simulationen bildlich angefügt werden können. Für die in der Untersuchung gewonnenen Ergebnisse wurden einige hundert Einzelfälle berechnet.

#### *Zu den Abbildungen:*

Als Ausgangsprofil wurde in allen Fällen ein sehr kleines Kastenprofil gewählt. In der Realität ist festzustellen, daß der Gerinnespiegel Schwankungen zeigt, die durch Strömungseffekte hervorgerufen werden. Diese und andere Einwirkungen führen in der Realität zu stetigen Verläufen der Profil-

ränder, während in der vorliegenden Simulation im Bereich des Gerinnespiegels Knicke in der Profilumrandung auftreten. Für diesen Effekt ist zudem die starke rechnerische Diskretisierung der Abläufe verantwortlich. Die Unstetigkeitsstellen in den Abbildungen sind also in der Natur als abgerundet anzunehmen. Für die aus der Simulation gezogenen Schlußfolgerungen ist diese Vereinfachung gegenüber der Realität jedoch unerheblich.

Eine Eingabe eines realitätsnäheren Ausgangsprofils in das Rechenprogramm führt zu optisch sehr viel besseren Profilberechnungen, erfordert jedoch einen erheblich höheren Aufwand und ändert an den Schlußfolgerungen nichts.

In den Abbildungen ist die Höhle des jeweiligen Wasserspiegels durch eine Marke angezeigt, die von der Profilmittle nach links oder nach rechts läuft. Die senkrechte Mittelachse der Profile bedeutet nicht (!) das Vorliegen einer Kluffuge. Beim Vorliegen von Schichtfugen werden diese vom Rechner als waagerechte, von der Mittelachse nach außen laufende Linien gezeichnet (etwa Abb. 7 und 8).

Die Berechnungen haben im einzelnen folgende Resultate:

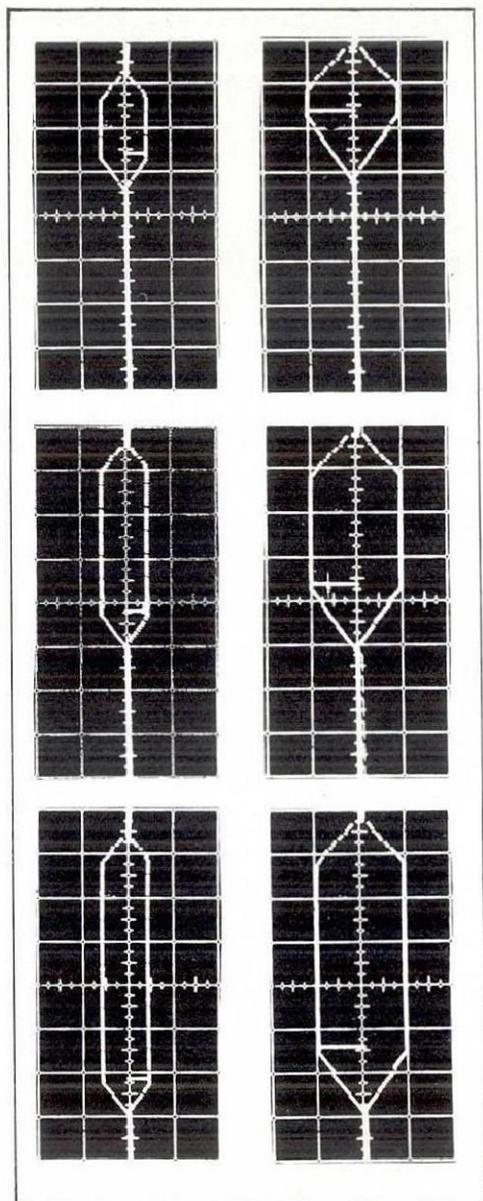
1. Profilentwicklung im homogenen, tektonisch ungestörten Gestein (a) und bei vervierfachter Wassermenge (b) zu gleichen Zeitpunkten (Abb. 1). Das Ergebnis zeigt: Im homogenen Gestein ist die Profilbreite abhängig von der Wassermenge und die Eintiefungsgeschwindigkeit davon unabhängig.

2. Profilentwicklung im homogenen Gestein entlang einer Kluffuge mit gegenüber dem Umgebungsgestein verdoppelter Lösbarkeit (a) und bei vervierfachter Wassermenge (b). Das Ergebnis zeigt: Bei Hohlraumbildung im homogenen Gestein entlang einer Kluffuge ist die Profilbreite von der Wassermenge abhängig und die Eintiefungsgeschwindigkeit davon unabhängig.

3. Profilentwicklung im homogenen Gestein entlang einer Kluffuge mit gegenüber dem Umgebungsgestein verdoppelter Lösbarkeit (a) und bei gegenüber (a) verdoppelter Gesteinslöslichkeit zu gleichen Zeitpunkten (b). Daraus kann abgeleitet werden: Bei Hohlraumbildung im homogenen Gestein entlang einer Kluffuge ist die Eintiefungsgeschwindigkeit von der Lösbarkeit abhängig, die Profilbreite aber davon unabhängig.

Aus diesen und weiteren Berechnungen kann folgende allgemeine Aussage abgeleitet werden:

Bei Höhlenbildungen im homogenen Gestein ohne Schichtfugen sind sowohl mit als auch ohne genetische Kluffuge die Profilbreite von der Lösbarkeit unabhängig und die Eintiefungsgeschwindigkeit von der Wassermenge unabhängig. Die Profilbreite ist in diesem Fall ausschließlich eine Funktion der Wassermenge, die Eintiefungsgeschwindigkeit eine Funktion der Gesteinslösbarkeit, solange das Verhältnis der Lösbarkeit in der Kluffuge zur Lösbarkeit des Umgebungsgesteins konstant ist.



1 a

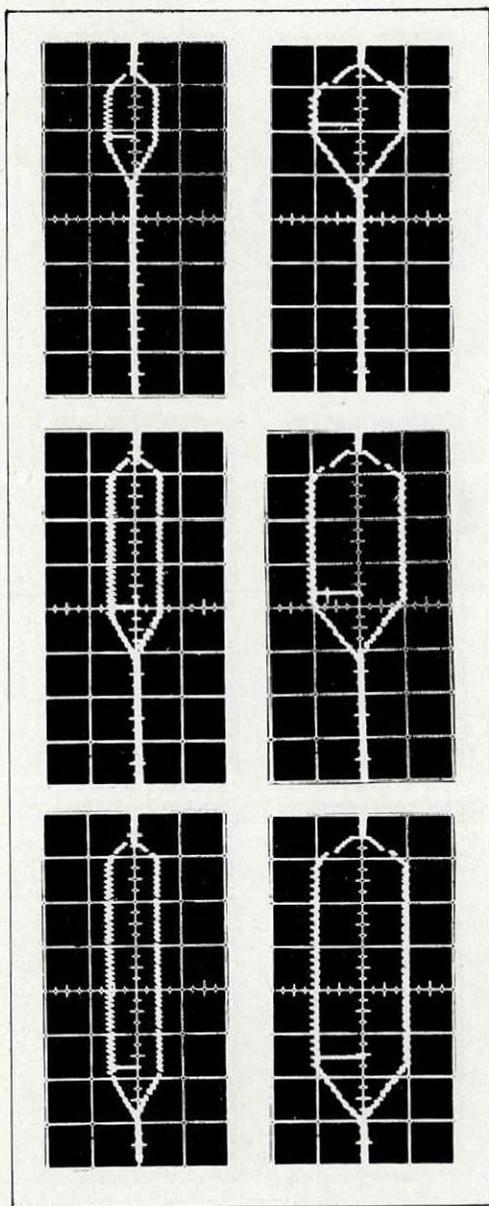
1 b

*Abb. 1: Abhängigkeit der Profilform von der Wassermenge.*

Entwicklung im homogenen Gestein von oben nach unten zu gleichen Zeitpunkten, rechts mit vierfacher Wassermenge.

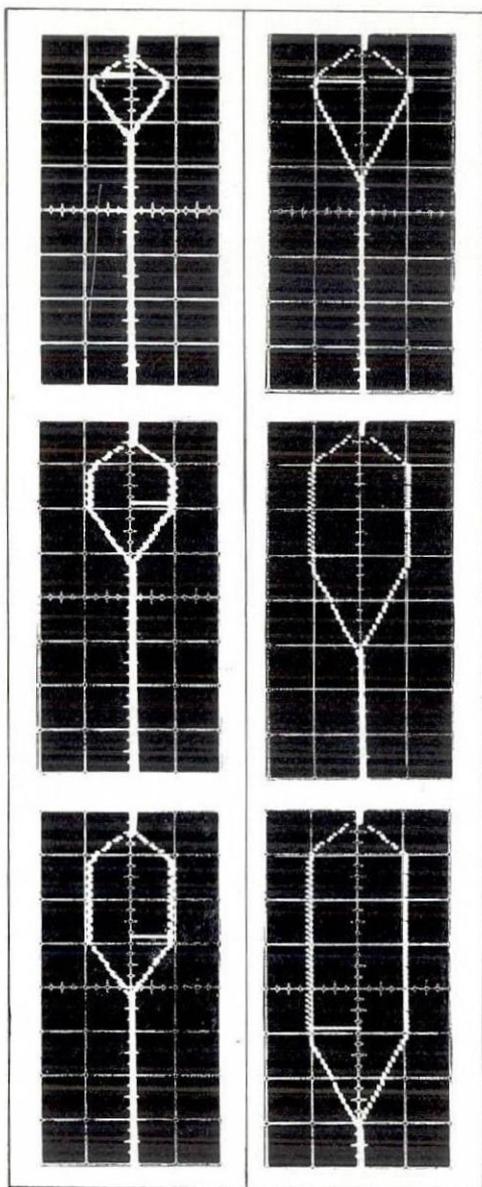
Abb. 2: *Abhängigkeit der Profilform von der Wassermenge.*

Entwicklung im homogenen Gestein entlang einer Klüftung, von oben nach unten zu jeweils gleichen Zeitpunkten, rechts bei vierfacher Wassermenge.



2 a

2 b



3 a

3 b

*Abb. 3: Abhängigkeit der Profilentwicklung von der Lösbarkeit.*

Entwicklung im homogenen Gestein entlang einer Kluffuge, von oben nach unten zu gleichen Zeitpunkten, rechts bei verdoppelter Lösbarkeit.

(Unter „Lösbarkeit“ sind Gesteinslöslichkeiten und Aggressivität des Wassers zusammengefaßt.)

Abbildung 4 behandelt die Hohlraumbildung im homogenen Gestein mit Kluffuge, deren Lösbarkeit gegenüber dem Umgebungsgestein ein veränderliches Verhältnis aufweist. Ergebnis: In Bereichen der genetischen Kluffuge mit vergrößertem Lösbarkeitsverhältnis zum Umgebungsgestein verringert sich die Profildbreite. Die Eintiefungsgeschwindigkeit nimmt auch zu, wenn Wassermenge und Gesteinslösbarkeit konstant sind.

Den Einfluß, den eine Kluffuge bei sonst konstanten Bedingungen auf ein Hohlraumprofil ausübt, soll die Entwicklung in Abbildung 5 zeigen. Folgende Phasen sind abgebildet:

- 5 a) Profilentwicklung entlang einer Kluft mit konstantem Lösbarkeitsverhältnis gegenüber dem Umgebungsgestein.
- 5 b) Die Kluft ist durch unlösbare Ablagerungen plombiert, das Profil weitet sich aus.
- 5 c) Die Kluft ist wieder wirksam geworden, das Profil verengt sich wieder.

Das führt uns zur Konstruktion eines Schlüssellochprofils in Abbildung 6. In homogenem Gestein mit schwach wirksamer genetischer Kluffuge hat sich ein breites Ausgangsprofil gebildet. Mit anhaltender Entwicklung ist die Kluffuge „durchgebrochen“, also stark wirksam geworden – ein Schlüssellochprofil und weitergehend ein Cañon tiefen sich ein. Ausschließlich durch den Lösbarkeitseinfluß der genetischen Kluft ist bei konstanter Wassermenge ein Schlüssellochprofil entstanden!

Schlüssellochprofile können also nicht als Beleg dafür dienen, daß sich im Laufe der Höhlenentstehung das Wasserangebot verringert hat. Ein solcher Grund ist möglich, genauso jedoch, und meiner Meinung nach wahrscheinlicher, ist der durchgreifende Einfluß der wechselnden Lösbarkeiten in den tektonischen Leitklüften.

Diese Schlußfolgerung wird noch deutlicher, wenn der Einfluß von Schichtfugen hinzugenommen wird. Abbildung 7a zeigt einen Gesteinsbereich, in dem einander eine Schichtfuge und eine Kluffuge schneiden. Im Schnittbereich fließt ein Initialgerinne.

In Abbildung 7b hat eine erhebliche Erweiterung in beiden Fugenrichtungen stattgefunden.

In Abbildung 7c hat sich das Gerinne aus dem Einflußbereich der Schichtfuge abgetieft.

In Abbildung 7d haben wir bei zeitlich konstanter Wassermenge, konstanter Gesteinslösbarkeit, konstantem Lösbarkeitsverhältnis in den tektonischen Leitfugen ein Schlüssellochprofil erhalten, das bei weiterer Entwicklung einen Hohlraum mit anschließendem Cañon darstellt!

Abbildung 8 zeigt ein Profil, das bei gleichen Voraussetzungen entstanden ist, die genetische Kluft hat jedoch den Charakter einer Verwerfung, die Schichtfugen weisen einen vertikalen Versatz auf – der generelle Einfluß der tektonischen Verhältnisse auf die Formentwicklung eines Höhlenprofils erscheint mir damit gegenüber den Einflüssen von Gesteinslösbarkeit und Wasserangebot ausreichend dokumentiert.

Betrachten wir nun über die Flächenrichtung des Profils hinaus noch die

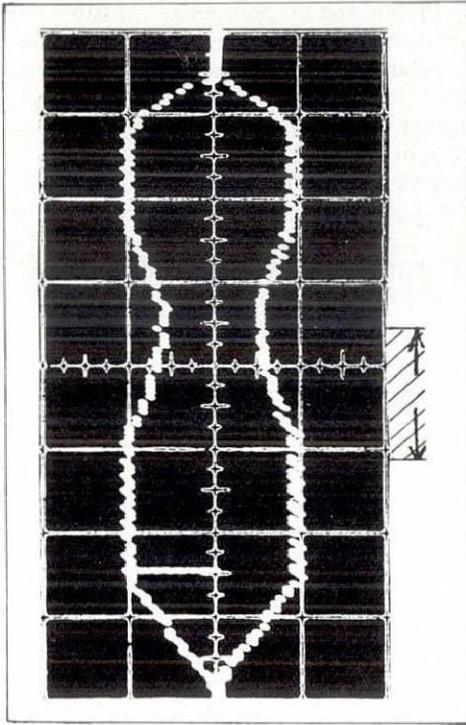


Abb. 4: Profilentwicklung bei veränderlicher Lösbarkeit in der genetischen Kluftfuge.

Entwicklung im homogenen Gestein entlang einer Kluftfuge, im rechts markierten Bereich war die Lösbarkeit in der Fuge größer als in den anderen Bereichen. Die Wassermenge ist während der gesamten Zeit konstant!

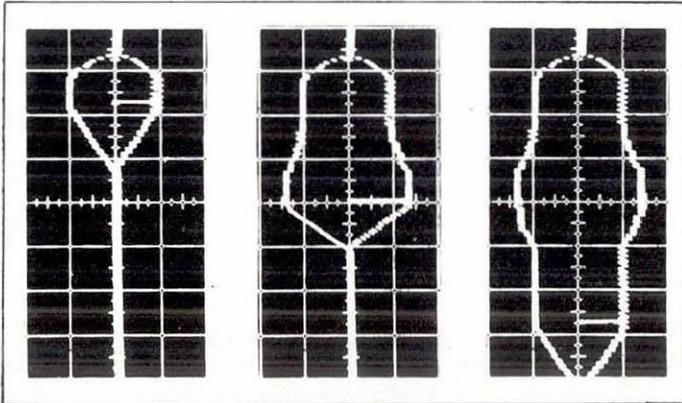


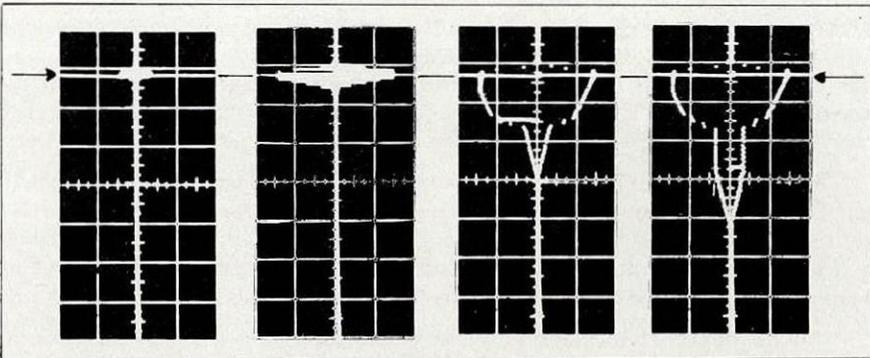
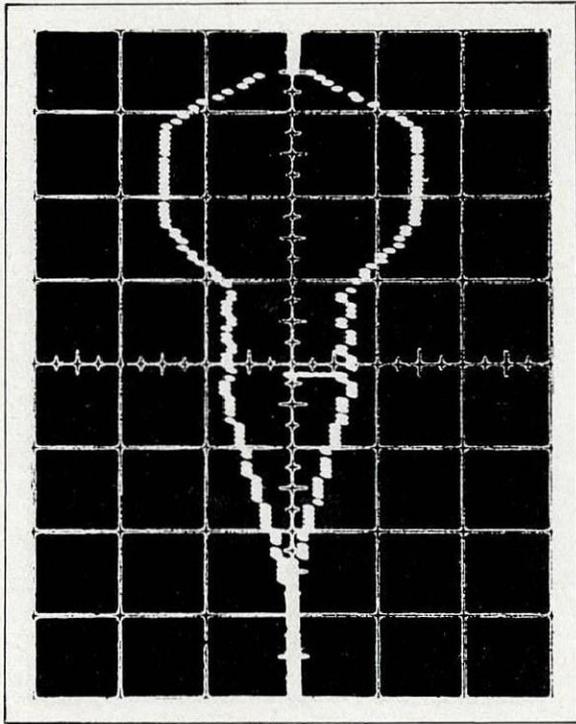
Abb. 5: Drei Entwicklungsstadien eines Profils.

Die links offene Fuge, entlang der sich das Profil eintieft, ist in der Mitte plombiert (Lehmablagerungen!), rechts wurde die Kluftfuge durch Ausräumen wieder wirksam. Die gesamte Entwicklung erfolgte bei konstanter Wassermenge.

*Abb. 6: Entstehung eines Schlüssellochprofils bei konstanter Wasserführung.*

Im Zuge der Ausbildung des oberen Rundprofils ist durch Anchnitt oder Freiräumung eine Kluftfuge stark wirksam geworden. Es entsteht der sich schnell eintiefende schmale Klamm-Teil, das Rundprofil fällt trocken.

Die Wassermenge und die Gesteinslöslichkeit sind während der gesamten Entwicklung unverändert geblieben!



*Abb. 7: Vier Stadien der Bildung eines schlüssellochartigen Profils an der Kreuzungsstelle einer Schicht- und einer Kluffuge. Wassermenge und Lösbarkeitsparameter sind während der gesamten Entwicklung konstant.*

(Das Profil-Innere ist in den beiden linken Stadien zur höheren Deutlichkeit ausgefüllt dargestellt.)

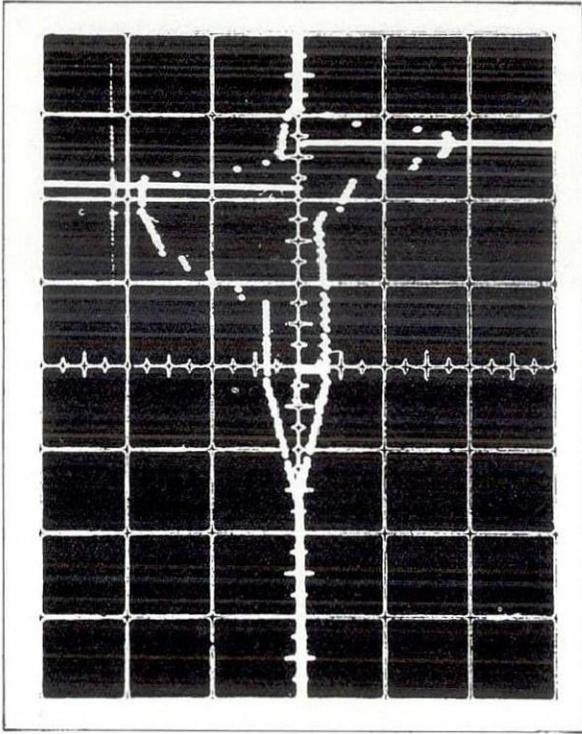


Abb. 8: Komplexes Profil an einer Verwerfung in der Zone von zwei versetzten Schichtfugen.

Wassermenge und Lösbarkeit sind während der Profilbildung konstant geblieben.

Richtung des Wasserfließens (z-Achse), so erhalten wir bei veränderlicher Lösbarkeit in dieser Richtung der genetischen Kluffuge weitere interessante Effekte: Nimmt die Lösbarkeit gerinneabwärts sprunghaft zu, so tieft sich hier das Gerinne plötzlich schneller ein und bildet einen engeren Querschnitt als gerinneaufwärts. Bei längerer Entwicklungszeit kann sich im Grenzbereich eine typische Wasserfallstufe herausbilden.

Eine Spekulation über den umgekehrten Fall ist vielleicht noch interessanter: Die Lösbarkeit der Kluft wird gerinneabwärts kleiner. Die Eintiefung vollzieht sich gerinneaufwärts schneller als gerinneabwärts, es entsteht ein aufsteigender Teil im Gerinnebett. Damit entsteht ein Staubereich, vor dem weite Teile der Cañonsole überflutet sind.

Ob bei begrenztem Wasserangebot ein solcher Bereich dazu führen kann, daß die weitere Hohlraumentwicklung an diesen Stellen ganz aufhört, läßt sich spekulativ nicht beantworten; hier müssen genauere Überlegungen einsetzen.

Die hier angeführte Untersuchung hat gezeigt, daß ähnliche Profilformen von Höhlenräumen sowohl durch tektonische, als auch durch hydrologische

Effekte entstehen können. Damit ist auch leider klar, daß im allgemeinen Fall aus einer Höhlen-Profilform keine Schlüsse auf hydrologische oder gar darüber hinaus klimatische Verhältnisse zur Zeit der Profilentstehung gezogen werden können. Der überprägende tektonische Einfluß macht eine Isolation der hydrologischen Wirkungsgrößen unmöglich.

Es bleibt in dieser unbefriedigten Situation erfreulicherweise eine Profilform, bei der wechselnde tektonische Einflüsse mit hoher Wahrscheinlichkeit die hydrologischen Einflüsse nicht gestört haben, das ist der Cañon mit im Mittel konstanter Breite. Diese ideale Cañon-Form ist zudem in der Natur durchaus zu finden, besonders häufig im alpinen Bereich. Aus dem Vorliegen einer solchen idealen Form kann mit hoher Wahrscheinlichkeit geschlossen werden, daß bei ihrer Ausbildung weitgehend konstante Bedingungen bezüglich Wasserangebot, Lösbarkeit des Gesteins und Tektonik vorgelegen haben. Wirksame (!) Schichtfugen treten in einem solchen Cañon nicht auf.

Noch einmal: Ein Umkehrschluß ist völlig unzulässig. Verändert sich die Profilbreite, so kann der Grund dafür in der Veränderung der Wasserzufuhr, genauso aber in der Veränderung der Tektonik an dieser Stelle liegen.

Die Frage, ob aus einer idealen Cañon-Form Rückschlüsse auf das Alter seiner verschiedenen vertikalen Bereiche gezogen werden können, kann hier noch nicht beantwortet werden. Wird die Cañon-Sohle noch vom aktiven Gerinne überflutet, so könnte man auf den Gedanken kommen, ob die Eintiefung nicht einer direkten Messung zugänglich ist.

50 Meter tiefe Cañons sind in alpinen Höhlen nicht selten. Gibt man ihnen eine maximale Entstehungszeit von 5000 Jahren, so kommen wir auf Eintiefungsbeträge von 10 Millimeter pro Jahr.

Solche einfache Rechnungen lassen es lohnend erscheinen, für einen aktiven, idealen Cañon ein entsprechendes Meßprogramm zu entwerfen, bei dem der Eintiefungsbetrag größenordnungsmäßig festzustellen wäre. Kennt man diesen Betrag, so könnte das Alter der Firstteile der Cañons berechnet werden.

Andererseits stellt sich durch die vorliegende Untersuchung meiner Meinung nach heraus, daß das Schlüssellochprofil als „Leitform der Höhlenentstehung“ nicht mehr beibehalten werden kann. Es gibt vielfältige Ursachen für die Entstehung einer solchen Form – die klassische Entstehungs-Hypothese kann nur zu Fehlschlüssen führen. Die Beschäftigung mit den idealen Cañons scheint eine lohnenswerte Aufgabe zu sein.

#### Literatur:

- Franke H. W. und Ilming H., 1963: Beobachtungen in der Dachstein-Mammuthöhle. Die Höhle, 14, 2; 36–40.  
Franke H.W., 1975: Bemerkungen zur Höhlenbildung in den Dachsteinhöhlen. Die Höhle, 26, 2/3; 64–66.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 1977

Band/Volume: [028](#)

Autor(en)/Author(s): Henne Peter

Artikel/Article: [Berechnungen zur Formentwicklung von Höhlenprofilen 73-83](#)