
Höhlenentstehung entlang Schichtfugen

Marco Filipponi

Zusammenfassung

Karsthöhlen entwickeln sich weitgehend entlang von Trennflächen, wobei Schichtfugen eine bedeutende Rolle einnehmen. In der Regel ist nur eine geringe Anzahl von Schichtfugen im regionalen Massstab bevorzugt verkarstet (in der Regel drei bis fünf), die so genannten stratigraphischen Initialfugen (Englisch „inception horizon“). Verbunden mit den stratigraphischen Initialfugen können verschiedene speläomorphologische Erscheinungen beobachtet werden, die es ermöglichen, diese Schichtfugen im Feld zu erkennen und ihre speläogenetische Rolle verdeutlichen.

Das Erkennen, Lokalisieren und Kartieren der stratigraphischen Initialfugen (respektive die Position von Karsthohlräumen) ist eine wesentliche Voraussetzung um die Entstehung und Geometrie einer Höhle zu verstehen.

Einleitung

Karbonatgebirge sind von einem Netz von tektonischen (Klüfte, Verwerfungen) und stratigraphischen Trennflächen (Schichtfugen, Schichtgrenzen) durchtrennt. Diese stellen die ersten Fließwege für das Grundwasser dar (u.a. KIRALY 1975, KLIMCHOUK & FORD 2000). Wir haben heute ein gutes Verständnis der grundsätzlichen speläogenetischen Prozesse während der Entwicklung einer Karströhre (-Höhle) entlang dieser Trennflächen (z.B. KLIMCHOUK et al. 2000, DREYBRODT et al. 2005). Die Herausforderung, zu verstehen, weshalb nur gewisse Trennflächen verkarstet werden, bleibt allerdings noch bestehen.

In den letzten Jahrzehnten beschäftigten sich verschiedene Autoren vorwiegend mit der Entwicklung von Karströhren/-höhlen entlang von tektonischen Trennflächen. So stellte zum Beispiel ERASO (1985) fest, dass bevorzugt Klüfte verkarstet werden, die sich parallel zum Hauptspannungsfeld des Gebirges entwickelten (parallel zu σ_1 streichende Klüfte); PALMER (2002) schätzte die Zeit ab, die für die Entstehung einer Karströhre entlang einer Kluft nötig ist. Dabei schienen die stratigraphischen Trennflächen eine untergeordnete Rolle einzunehmen. Erst die Arbeiten von LOWE (1992, 2000) lenkten das Interesse erneut auf die Schichtfugen und führten die „inception horizons hypothesis“ ein. Lowe erkannte, wie bereits andere vor ihm (z.B. RAUCH & WHITE 1970; WALTHAM 1971; PALMER 1975, 1989), dass sich Höhlen bevorzugt entlang weniger bestimmter Schichtfugen entwickelten, den so genannten stratigraphischen Initialfugen

(auf englisch „inception horizons“). Diese stratigraphischen Initialfugen unterscheiden sich von „normalen Schichtfugen“ dadurch, dass sie bevorzugt verkarstet werden. Der deutsche Begriff stratigraphische Initialfuge kann irreführend sein, da es sich nicht nur um Schichtfugen im engeren Sinne handelt sondern auch um Zwischenlagen von einigen Zentimetern bis Dezimetern. Jedoch werden auch diese in Höhlenforscherkreisen oft als Schichtfugen bezeichnet.

Dieser Artikel möchte das **Konzept der stratigraphischen Initialfugen** (engl. **Inception horizon hypothesis**) vorstellen und zeigen, wie man diese Initialfugen mittels Höhlenvermessungsdaten lokalisieren oder in der Höhle anhand von speläomorphologischen Erscheinungen erkennen kann. Dieser Artikel ist eine Zusammenfassung einiger Kapitel meiner Dissertation, die vollständig zum runterladen bereit steht unter:

<http://library.epfl.ch/theses/?nr=4376>

Erkennen von stratigraphischen Initialfugen mittels 3D-Analyse von Höhlenvermessungsdaten

Lowe's Inception Horizon Hypothese (1992) beruht weitgehend auf Feldbeobachtungen und theoretischen Überlegungen. Eine quantitative Analyse, in der die Rolle der stratigraphischen Initialfugen aufgezeigt wird, fehlte bis anhin weitgehend. Um statistisch den Zusammenhang zwischen der Schichtlagerung und der räumliche Anordnung der Höhlengänge herzustellen, wurde im Rahmen meiner Dissertation die Software CaSuDaAn (**Cave Survey Data Analyzer**) entwickelt. Das Programm erlaubt es, Höhlenvermessungsdaten sowie ein 3D geologisches Modell einzulesen und statistisch zu verarbeiten (Filipponi et al., 2009).

Mit CaSuDaAn wurden über 1500 km Höhlengänge aus mehr als 18 Höhlen ausgewertet. (FILIPPONI & JEANNIN 2006, FILIPPONI & DICKERT 2007, FILIPPONI et al. 2009). Die Analyse zeigte, dass sich rund 70% der phreatischen Höhlengänge entlang von Schichtfugen entwickelt haben, wobei nur eine geringe Anzahl von Schichtfugen (in der Regel drei bis fünf stratigraphische Initialfugen) bevorzugt verkarstet wurden [Abb. 1]. Dadurch konnte die Inception Horizon Hypothese erstmals quantitativ bestätigt werden.

Zur Ausscheidung der Initialfugen mittels der 3D-Analyse von Höhlengängen (FILIPPONI & JEANNIN 2006, FILIPPONI et al. 2009) sind Vermessungsdaten von mehreren Kilometern Höhlengängen

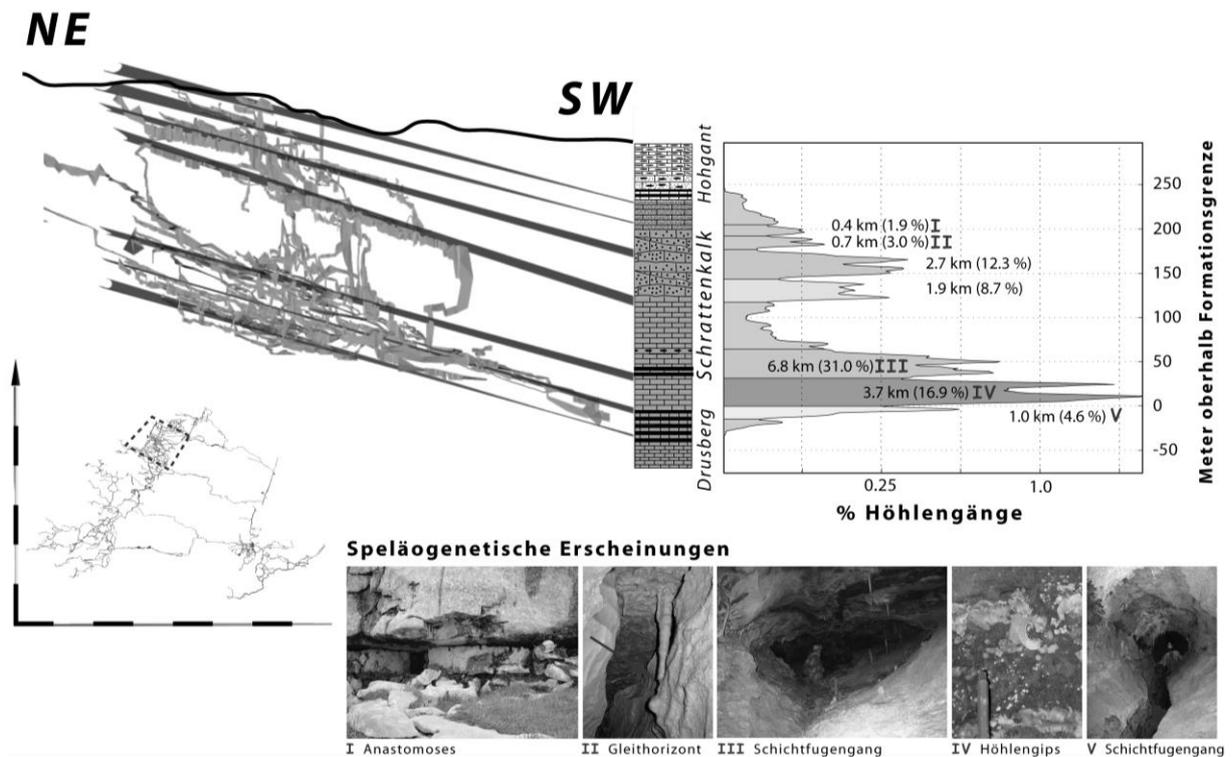


Abb. 1: Histogramm der Abstände der Höhlengänge von der Formationsbasis. Die Peaks stellen stratigraphische Bereiche dar, die bevorzugt verkarstet sind (stratigraphische Initialfugen). Der Feldnachweis der statistisch identifizierten Initialfugen zeigte, dass entlang dieser Horizonte verschiedene typische speläomorphologische Erscheinungen festgestellt werden können.

nötig. Zwar ist es möglich, die Messdaten von einem nicht zusammenhängenden Netz von Höhlengängen (resp. Kleinhöhlen) auszuwerten, doch können dabei lokal wichtige Schichtfugen überbewertet werden. Es zeigte sich jedoch, dass diese lokalen Schichtfugen nur bedingt speläomorphologische Erscheinungen aufweisen, die auf eine stratigraphische Initialfuge hindeuten.

Erkennen von stratigraphischen Initialfugen durch speläomorphologische Beobachtungen

Die im Folgenden beschriebenen speläomorphologischen Erscheinungen wurden unter anderem herangezogen, um den Feldnachweis der Existenz der stratigraphischen Initialfugen zu erbringen, die durch die 3D-Analyse der Geometrie der Höhlensysteme identifiziert wurden (FILIPPONI et al. 2009). Es ist zu beachten, dass nicht alle Erscheinungen entlang einer bestimmten Initialfuge vorkommen und dass einige Erscheinungen durch verschiedene Prozesse entstehen können.

Schichtfugengänge

In der deutschsprachigen Höhlenliteratur hat sich schon früh der Begriff „Schichtfugengang“ resp. „Schichtfugenhöhle“ durchgesetzt (KYRLE 1923, BÖGLI 1978, TRIMMEL 1968). Er wird für Höhlen verwendet, die entlang von Schichtfugen entstanden sind.

Die Gangprofile können einen Durchmesser von wenigen Dezimetern (darunter werden sie nicht mehr als Höhlengänge bezeichnet, da für Höhlenforscher nicht befahrbar, sondern als Karströhren; vergleiche auch Abschnitt Anastomosen), bis hin zu mehreren Metern aufweisen.

Typischerweise weisen Schichtfugengänge ein elliptisches oder linsenförmiges Gangprofil auf, während sich das Profil in die Schichtfuge hinein erweitert [Abb. 2]. Es war möglich zu zeigen, dass es sich bei diesen Schichtfugen um stratigraphische Initialfugen handelt.

Die klassische, elliptische Profilform entstand unter phreatischen Bedingungen, jedoch kann sie in einer späteren vadosen Phase überprägt werden. Dabei wird die Gangsohle allmählich tiefer gesetzt,

bis ein so genanntes **Schlüssellochprofil** entsteht [Abb. 2]. In manchen Fällen ist der eingetiefte, vadose Mäander (Bart des Schlüssellochprofils) bedeutender als die Initialellipse.

Die Schichtfugengänge müssen klar von Schichtgrenzgängen unterschieden werden: Die letzteren haben sich entlang einer Schichtgrenze entwickelt, also am Kontakt einer verkarstungsfähigen Gesteinsformation mit einer nicht verkarstungsfähigen. Als Beispiel hierfür sei das Seichbergloch (Länge 2.2 km / Höhenunterschied -560 m; Wildhaus, SG) erwähnt, das weitgehend entlang der Schichtgrenze zwischen der verkarstungsfähigen Seewerkalk- und der nicht verkarstungsfähigen Garschella-Formation entstand (Dickert 1995).

Anastomosen

Als Anastomosen wird ein Netz von Karströhren bezeichnet, das häufig in einen Höhlengang mündet oder an der Decke eines Höhlenganges aufgeschlossen ist [Abb. 3]. Die Karströhren weisen einen Durchmesser von wenigen Zentimetern bis Dezimetern auf.

Anastomosen werden von einigen Autoren als „Proto-Höhlen“ betrachtet (u.a. Ewers 1966, WHITE 1988). Dabei wird davon ausgegangen, dass das Grundwasser zu Beginn der Höhlenentstehung durch eine Vielzahl von Karströhren entlang der stratigraphischen Initialfuge fließt. Nur allmählich gewinnt eine der Karströhren an Bedeutung, bevorzugt den Durchfluss und erweitert sich stärker als die umgebenden Karströhren. Unter Situationen, bei denen es relativ lange dauert, bis sich eine klar bevorzugte Entwässerungsröhre entwickelt, wachsen mehrere Röhren gleichzeitig zu Höhlengängen heran, was zu labyrinthischen Höhlenpartien führt (z.B. Hölloch, Muotathal, Sz).

In einem vollständig mit Sedimenten gefüllten Höhlengang kann Wasser, das zwischen Sediment und Gangdecke fließt, Strukturen verursachen, die Anastomosen gleichen (SLABE 1995). Sie lassen sich von echten Anastomosen dadurch unterscheiden, dass sie keinen Zusammenhang mit einer stratigraphischen Initialfuge aufweisen, respektive keine Fortsetzung der Kanäle in den Fels erkannt werden können.

Höhlenkarren

Höhlenkarren sind wie Karren an der Oberfläche, rinnen- oder rillenförmige, korrosive Kleinformen [Abb. 4]. Sie entstehen durch eine flächenhafte Benetzung der Felsoberfläche und können sowohl an der Gangsohle als auch an der Höhlenwand angetroffen werden (SLABE 1995).

Karrenähnliche Strukturen können ebenfalls unter Sedimentablagerungen entstehen (SLABE 1995). Diese unterscheiden sich von Höhlenwandkarren

durch eine weniger regelmässige Rillenstruktur sowie eine weniger klare Obergrenze, die zudem nicht an einer Schichtfuge liegt.



Abb. 2: Schlüssellochprofil im 092 (Gamsalp, SG)
[Foto: F. Franz]

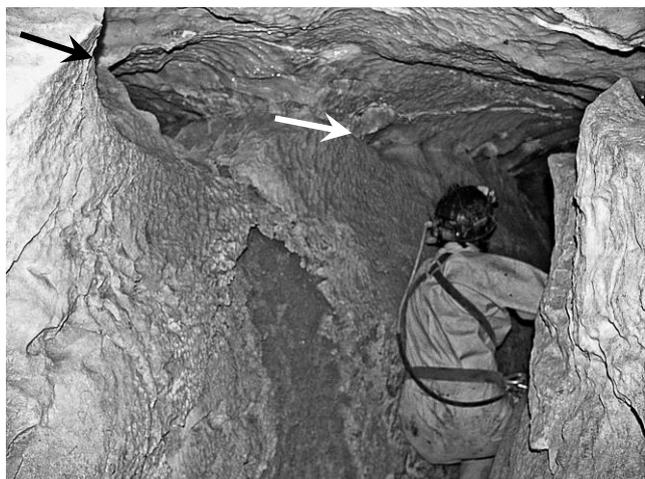


Abb. 3: Anastomosen, die in den Höhlengang münden (O80, Gamsalp, SG).



Abb. 4: Höhlenwandkarren: Das obere Ende der Karren liegt an einer stratigraphischen Initialfuge. (Hirlatzhöhle, Österreich; Foto: Lukas Plan).

Höhlensinter

Während bei den Höhlenwandkarren das Wasser aus den stratigraphischen Initialfugen genügend Lösungskraft besitzt, um Karren zu bilden, kommt es auch vor, dass das Sickerwasser in den Schichtfugen mit Calcium gesättigt ist und es beim Eintritt in den Höhlengang zur Ausfällung von Höhlensinter entlang der Schichtfuge kommt [Abb. 5].

Gebirge. Daher liegen Quellaustritte an der Oberfläche oder in einem Höhlengang oft entlang stratigraphischer Initialfugen. Diese Quellen können Höhleneingänge mit einer Schüttung bis zu mehreren Kubikmeter Wasser pro Sekunde sein [Abb. 6.1], oder nur diffuse Quellhorizonte mit vielen kleinen Wasseraustritten [Abb. 6.2].

Dies erlaubt es, relativ einfach Initialfugen in einem Oberflächenaufschluss zu erkennen; zum Beispiel im Winter durch Eiswasserfälle (KNEZ 1998) oder im Sommer durch eine üppige, feuchtliebende Vegetationsvergesellschaftung [Abb 6.2]. In der Höhle sind zum Teil Wandkarren oder Höhlensinter mit Quellaustritten entlang der Initialfuge assoziiert.



Abb. 5: Sinterablagerung entlang einer stratigraphischen Initialfuge (Lauiloch, Sz).

Quellenaustritte

Stratigraphische Initialfugen wurden nicht nur während der Initialisierung (phreatischer Bereich) oder später während der Höhlenbildung durchflossen, sondern sind meist auch im vadosen Bereich Fließwege des Sickerwassers durch das



Abb. 6: Quellhorizont entlang stratigraphischer Initialfugen:
6.1 - Karstquelle der Réseau de Covatannaz (Schweiz): 6.2 - Quellhorizont entlang einer Initialfuge mit üppiger, feuchtliebender Vegetationsvergesellschaftung.

Höhlenruinen

Höhlenruinen (engl. unroofed caves) sind Höhlen oder Höhlenteile, deren Überdeckung durch Oberflächenerosion abgetragen wurde, und dadurch an der Oberfläche aufgeschlossen sind (KNEZ & SLABE 2002). Bei den Höhlenruinen handelt es sich vorwiegend um horizontale Höhlenpassagen, die, wie ŠUŠTERŠIČ (1998) feststellte, oft entlang einer stratigraphischen Initialfuge angelegt sind (vgl. auch Abschnitt Schichtfugengänge).

Höhlengips

Im Zusammenhang mit stratigraphischen Initialfugen stehen oft auch Höhlengipsausblühungen [Abb. 7]. Die Herkunft des Gipses kann durch $\delta^{34}\text{S}$ -Isotopenmessungen bestimmt werden und Anhand der Herkunft können verschiedene Arten und speläogenetische Bedeutungen von Höhlengips ermittelt werden (FILIPPONI & JEANNIN 2007):

- **Gips aus der Wiederausfällung von sedimentärem Gips**

Besteht der Höhlengips aus erneut ausgefallenem sedimentärem Gips, weist dies auf die Möglichkeit hin, dass die Initialfuge mindestens teilweise aus Gips bestand. Da Gips rund 10 bis 30 mal besser löslich als Calcit ist (BÖGLI 1978), wird die Verkarstung entlang der gipsreichen Schichtfuge begünstigt (z.B. Moggerenschacht, Deutschland).

- **Gips aus der Verwitterung von Pyrit**

Die Oxidation von Pyrit (FeS_2 „Katzengold“) kann zur Bildung von stark korrosiver Schwefelsäure führen, die lokal die Initialisierung der

Verkarstung entlang einer pyritreichen Schichtfuge begünstigen kann [Abb. 12] (BÖGLI 1978, WHITE & WHITE 2003). Als „Nebenprodukt“ wird teilweise Gips ausgeschieden. Eine solche zusätzliche Erhöhung der Lösungskapazität hat eine geringe Bedeutung für die Entwicklung der Karströhren nach dem „Durchbruch“ [vgl. Abb. 6], jedoch kann zu einem frühen Zeitpunkt die primäre Gebirgsdurchlässigkeit lokal erhöht und dadurch die Entwicklung von Karsthohlräumen begünstigt werden (FILIPPONI & JEANNIN 2007).

- **Gips aus hydrothermaletem Schwefel**

Einige Höhlen entstanden unter dem Einfluss von sulfatreichen hydrothermalen Wässern (hypogene Höhlen - GALDENZI & MENICETTI 1995, HILL 1995), was zur Ausfällung von zum Teil spektakulären Gipsablagerungen führte (z.B. Grotte di Frasassi, Italien, oder Lechuguilla Cave, USA). Diese Art von Höhlengips hat keinen direkten Zusammenhang mit einer stratigraphischen Initialfuge.

Gleithorizont

In manchen Fällen beobachtet man, wie das Gangprofil entlang einer Schichtfuge verschoben wurde [Abb. 8], wobei es sich oft um die stratigraphische Initialfuge handelt. Die Bewegungsbeträge sind oft im Bereich von wenigen Zentimetern bis Dezimetern.

Leider ist es nicht einfach Aussagen zu machen, ob bereits vor der Initialisierung Bewegung entlang der Schichtfuge stattgefunden hat, oder ob diese erst nach dem Beginn der Verkarstung eingesetzt hat.

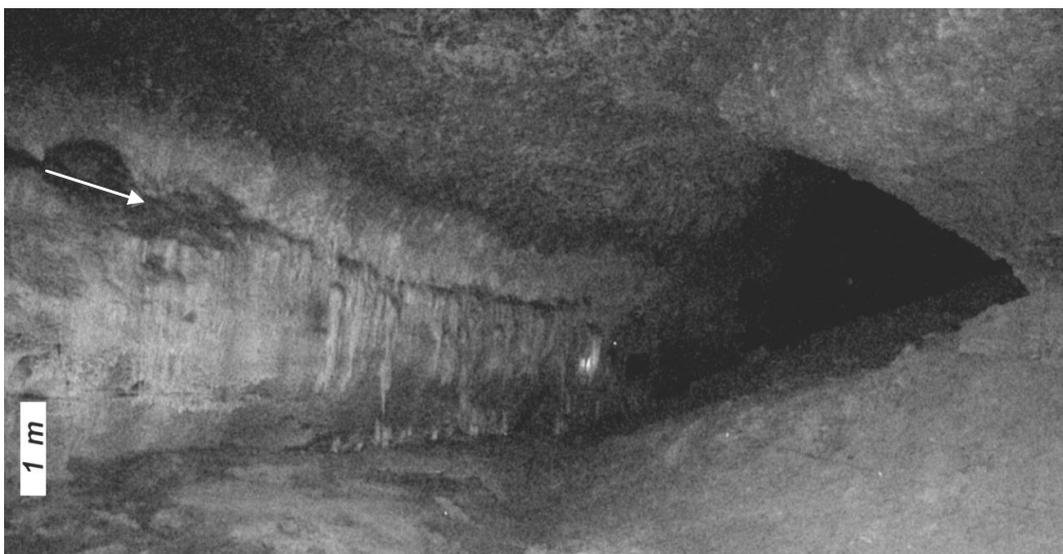


Abb. 7: Höhlenpassage in der Grotte Saint-Marcel (Ardèche, Frankreich). Die Höhlenwand ist mit Höhlengips bedeckt (der Pfeil zeigt auf die stratigraphische Initialfuge).

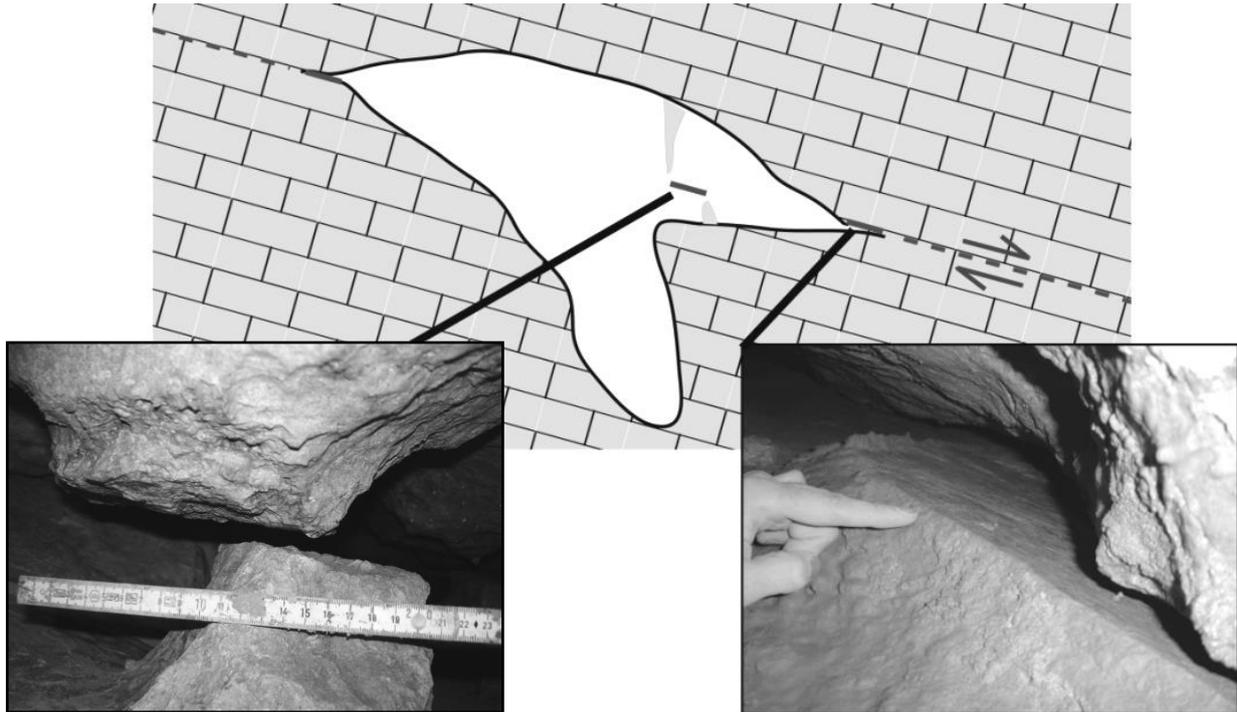


Abb. 8: Neotektonische Bewegung entlang einer stratigraphischen Initialfuge.
 8.1: Zerbrochener und verschobener Gangpfeiler (O92, Gamsalp, SG); 8.2: Deutlich zu erkennen der Versatz von rund 20 cm sowie die Harnischfläche entlang einer stratigraphischen Initialfuge (Nidlenloch, So).

Eigenschaften der stratigraphischen Initialfuge

Im vorhergehenden Abschnitt wurden verschiedene speläomorphologische Erscheinungen vorgestellt, die im Zusammenhang mit stratigraphischen Initialfugen stehen. Das Erkennen dieser Erscheinungen im Feld hilft festzustellen, ob und entlang welcher Schichtfugen bevorzugt verkarstet wurde. Jedoch geben diese Feldbeobachtungen nur relativ geringe Hinweise über das Weshalb diese Schichtfugen bevorzugt verkarstet wurden.

Deshalb wurden 18 stratigraphische Initialfugen, die statistisch identifiziert und durch die typischen speläomorphologischen Erscheinungen bestätigt waren, detailliert untersucht. Zur Analyse wurden mehr als 200 Proben von den Initialfugen sowie dem Umgebungsgestein gebohrt.

Die Proben wurden als Kernbohrungen (Durchmesser 2.5 cm, Länge rund 5 cm) gewonnen, die mit einem speziellen Bohraufsatz mit einer Akku-bohrmaschine „höhlenmässig“ gebohrt wurden.

Bei alle Proben wurde die Permeabilität (Durchlässigkeit), mineralische Zusammensetzung und das Gefüge untersucht. Anhand der Resultate lassen sich drei unterschiedliche Arten von stratigraphischen Initialfugen unterscheiden [Abb. 9].

Die drei Typen von stratigraphischen Initialfugen:

- **Initialisierung innerhalb der Schichtfuge.**
 Diese Horizonte zeichnen sich gegenüber dem Umgebungsgestein aus durch:
 - eine erhöhte primäre Permeabilität,
 - einen erhöhten Karbonatanteil (d.h. reinerer Kalkstein),
 - einen geringeren Matrixanteil,
 - einen erhöhten Anteil an Pyrit,
 - Klüfte, die den Horizont durchqueren oder nur in ihm Vorkommen.
- **Initialisierung am Kontakt zwischen der Schichtfuge und dem angrenzenden Felsen.**
 Diese Horizonte zeichnen sich gegenüber dem Umgebungsgestein aus durch:
 - eine geringere primäre Permeabilität,
 - einen erhöhten Anteil an Tonmineralien (z.T. Mergel),
 - einen erhöhten Anteil an Pyrit,
 - Klüfte, die entlang des Horizontes enden.
- **Initialisierung entlang einer schichtparallelen tektonischen Trennfläche.**
 Diese Horizonte zeichnen sich aus durch eine hohe primäre Permeabilität entlang einer schichtparallelen tektonischen Trennfläche.

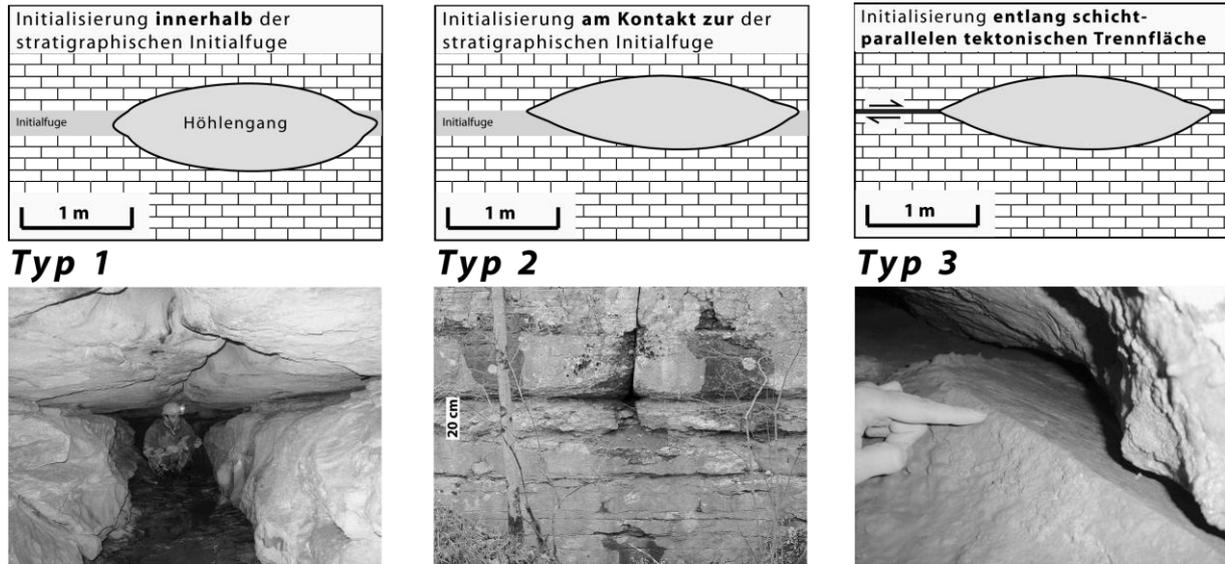


Abb. 9: Es lassen sich 3 Arten von stratigraphischen Initialfugen unterscheiden.

In einer stratigraphischen Abfolge hat es meistens eine Vielzahl von Schichtfugen, die lithologische Voraussetzungen hätten, eine stratigraphische Initialfuge zu sein. Benachbarte Höhlensysteme weisen zum Teil unterschiedlich stark ausgeprägte Initialfugen auf (FILIPPONI et al. 2009). In manchen Fällen sind bei nahe beieinander liegenden Höhlen unterschiedliche Schichtfugen als stratigraphische Initialfuge festzustellen (PLAN et al. 2009). Dies liegt einerseits daran, dass sich die Eigenschaften der Schichtfugen lateral verändern (z.B. kleine Veränderungen in Tonanteil),

andererseits hängt es nicht nur von den lithologischen Eigenschaften ab, ob eine Schichtfuge verkarstet wird oder nicht. Dies weil ausser der Lithologie auch die hydrologischen Rahmenbedingungen die Intensität der Verkarstung einer Trennfläche beeinflussen (KIRALY 1975). So können entlang einer Schichtfuge unter einem weniger günstigen Kontext nur mikroskopisch kleine Lösungshohlräume entstehen, während ein wenig weiter entfernt die Situation günstiger ist und ein sich ausgeprägtes Höhlengangsystem entwickeln kann.

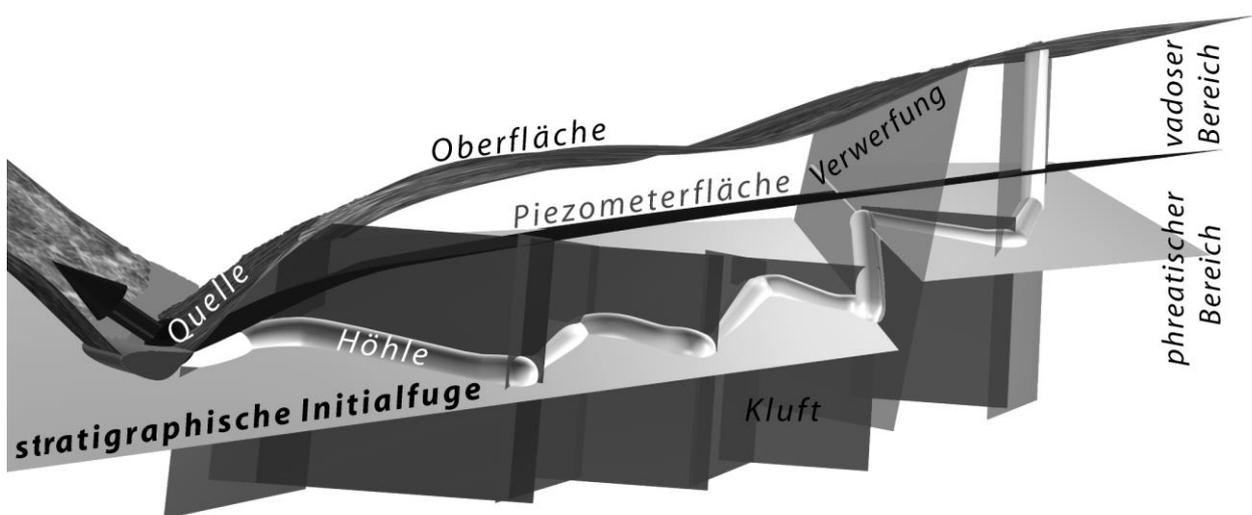


Abb. 10: Schematisches 3D Model eines Höhlensystems: Der Verlauf des phreatischen Höhlenganges wird bestimmt durch die Lage der stratigraphischen Initialfuge, dem Verschnitt mit Klüften sowie dem hydraulischem Gradienten.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen entlang der stratigraphischen Initialfugen führten zu einem konzeptionellen Karstmodell [Abb. 10] (FILIPPONI et al. 2009), in dem sich die Höhlen unter phreatischen Bedingungen bevorzugt am Verschnitt von tektonischen Trennflächen mit einer stratigraphischen Initialfuge entwickeln, während die regionale Gangrichtung durch den hydraulischen Gradienten bestimmt wird. Wobei in einer Gesteinsabfolge nur eine geringe Anzahl von Schichtfugen bevorzugt verkarstet werden (in der Regel drei bis fünf stratigraphische Initialfugen). Diese Schichtfugen

unterscheiden sich geringfügig in lithologischer und geomechanischer Hinsicht von dem umliegenden Gestein.

Das Erkennen dieser stratigraphischen Initialfugen kann einerseits durch die 3D-Analyse der Höhlenvermessungsdaten als auch anhand speläomorphologischen Beobachtungen erfolgen.

Diese Arbeit befasste sich weitgehend mit Höhlen und Höhlenteilen, die unter phreatischen Bedingungen entstanden, jedoch lassen sich die Resultate auch auf die vadose Zone übertragen. Ein Projekt in diese Richtung ist in Vorbereitung.

Literaturnachweis

- Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. Springer.
- Dickert, A. (1995): Das Seichbergloch. Höhlenpost, Nr. 98: 1-56.
- Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., Romanov, D. (2005): Processes of Speleogenesis: A Modeling Approach. – *Carsologica*, 376 S.
- Eraso, A. (1985): Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst. *KOBIE, Serie Ciencias Naturales*, 15: 15-165.
- Ewers, R (1966): Bedding-plane anastomoses and their relation to cavern passages. *Bulletin of the National Speleological Society of America*. 28(3): 133-140.
- Filipponi, M., Dickert, A. (2007): Verstehen der Speläogenese durch 3D-Analyse – Fallbeispiel des Lachenstock Karstes. 12. Nat. Kongress für Höhlenforschung: 46-55.
- Filipponi, M., Jeannin, P.-Y. (2006): Is it possible to predict karstified horizons in tunneling? *Austrian J. of Earth Sciences*, 99: 24-30.
- Filipponi, M., Jeannin, P.-Y., Tacher, L. (2009): Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology*: 86-99.
- Galdenzi, S., Menichetti, M. (1995): Occurrence of hypogenic caves in a karst region: Examples from central Italy. *Environmental Geology*, 26: 39-47.
- Hill, C. (1995): Sulfur redox reaction: Hydrocarbons, native sulfur, Mississippi Valley-type deposits, and sulfuric acid karst in the Delaware Basin, New Mexico and Texas. *Environmental Geology*, 25(1): 16-23.
- Kiraly, L. (1975): Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. – In: Burger A. & Dubertret L. (eds): *Hydrogeology of karstic terrains*, Internat. Union of Geological Sciences, Series B 3: 53-67.
- Klimchouk, A., Ford, D.C (2000): Lithologic and structural controls of dissolutional cave development. – In : Klimchouk, Ford, Palmer & Dreybrodt (eds): *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*, 54-64.
- Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, D.C., Dreybrodt, W. (2000): *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*. National Speleological Society: 527 S.
- Knez, M. (1998): The influence of bedding-planes on the development of karst caves (a study of Velika Dolina at Škocjanske Jame Caves, Slovenia). *Carbonates and Evaporites*, 13(2): 121-131.
- Knez, M., Slabe, T. (2002): Unroofed caves are an important feature of karst surfaces: examples from the classical karst. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 46(2): 181-191.
- Kyrle, G. (1923): *Theoretische Speläologie*. Speläologisches Institut Bundeshöhlenkommission, 353 S.
- Lowe, D. (1992): The origin of limestone caverns: in inception horizon hypothesis. PhD thesis, Manchester Polytechnic, UK, 511 S.
- Lowe, D. (2000): Role of stratigraphic elements in speleogenesis: the speleoinception concept. – In : Klimchouk, Ford, Palmer & Dreybrodt (eds): *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*, 65-76.
- Palmer, A.N. (1975): The origin of maze caves. *Bulletin of the National Speleological Society of America*. 37(3): 56-76.
- Palmer, A.N. (1989): Stratigraphic and structural control of cave development and groundwater flow in the Mammoth Cave region. – In White W.B. & White E.L. (eds): *Karst Hydrology, Concepts from the Mammoth Cave Area*, Von Nostrand Reinhold, 293-316.
- Palmer, A.N. (2002): Speleogenesis in carbonate rocks. - In Gabrovsek, F. (eds): *Evolution of karst: from prekarst to cessation*. ZRC: 43-60; Postojna-Ljubljana.
- Plan, L., Filipponi, M., Behm, M., Seebacher, R., Jeutter, P (2009): Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology - a case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). *Geomorphology*.
- Rauch, H.W., White, W.B., (1970): Lithologic controls on the development of solution porosity in carbonate aquifers. *Water Resources Research*, 6: 1175-1192.
- Slabe, T. (1995): Cave rocky relief and its speleogenetical significance. *Znanstvenoraziskovalni Center Sazu*, 128 S.
- Šušteršič, F. (1998): Interaction between a cave system and the lowering karst surface – Case Study: Laški Ravniki. *Acta Carsologica*, 27,(2): 115-138.
- Trimmel, H. (1968): *Höhlenkunde*. Vieweg: 300 S.; Braunschweig.
- White, W.B., White, E.L. (2003): Gypsum wedging and cavern breakdown: Studies in the Mammoth cave System, Kentucky. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1): 43-52.
- White, W.B. (1988): *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press: 464 S.
- Waltham, A.C. (1971): Controlling factors in the development of caves. *Transactions of the Cave Research Group of Great Britain*. 13: 73-80.