

PHILIPP HÄUSELMANN<sup>1</sup> UND ROLF SIEGENTHALER<sup>1</sup>

## Erde von unten – Karsteinblicke

### Zusammenfassung des Vortrages vom 14. Oktober 2014

*Fast alle wissen, dass es Höhlen gibt – die St. Beatus-Höhlen sind vor allem im Kanton Bern gut bekannt. Schon weniger Leute wissen, dass Höhlen vor allem in kalkigen, verkarsteten Regionen entstehen und dass deshalb die Schweiz (mit ca. 20% Kalkgesteinen der Landoberfläche) ein recht höhlenreiches Land ist. Dass aber Höhlen auch für verschiedene Richtungen der Wissenschaft eine Fundgrube darstellen, ist den wenigsten bekannt. Höhlen und Karstregionen liefern wissenschaftliche Informationen, wie und wann unsere Täler entstanden sind, sie enthalten auch Tropfsteine, welche für die Rekonstruktion des Paläoklimas herangezogen werden können, und sie sind letztendlich wertvolle Archive, die verborgen im Untergrund die Zeit überdauerten, während ähnliche Informationen an der Oberfläche von den Eiszeiten abgetragen und verwischt wurden. Der folgende Text ist eine Zusammenfassung von bereits publizierten Forschungsergebnissen.*

### Was ist Karst?

Regenwasser nimmt aus der Luft und aus dem Boden Kohlensäure auf. Diese vermag in kleinsten Anteilen Kalk zu lösen. Kleine Fugen und Klüfte werden so im Laufe der Jahrtausende zu tiefen Schächten und langen Gängen ausgewaschen.

Doch auch wenn der Kalk an der Oberfläche liegt, wird er gelöst. Dies führt zu bizarr-schönen Steinwüsten, die interessante Lösungsformen zeigen und Karrenfelder genannt werden. In den Berner Alpen bilden die Sieben Hengste das beste Beispiel hierzu (*Abb. 1*). Die Gesamtheit der Formen und der unterirdisch erfolgten Entwässerung wird «Karst» genannt, nach der gleichnamigen Region in Slowenien, wo das Phänomen erstmals detailliert beschrieben wurde.

<sup>1</sup> PD Dr. Philipp Häuselmann & Rolf Siegenthaler; Schweiz. Gesellschaft für Höhlenforschung Sektion Bern und Höhlenforschergemeinschaft Region Hohgant



Abbildung 1: Das Karrenfeld der Siebenhengste ist karg und steinig, aber doch spannend und schön.

### Kalklösung an der Oberfläche

Das Innerbergli ist mit 0.5 km<sup>2</sup> eines der kleineren Karrenfelder am Hohgant. Durch den grossen Kontrast des nackten Karrenfeldes mit dem umgebenden, grünbewachsenen Sandstein ist es optisch sehr auffällig, aber die spezielle Schönheit der Karrenformen machen es zu einem ganz besonderen Bijou. Die starke Korrosion ist auch Grund für eine grosse Höhlendichte. Deshalb musste das Karrenfeld in Sektoren eingeteilt werden, denn erst so war eine systematische Höhlenforschung möglich. Um die Sektorgrenzen wiederzufinden, wurden sie 1977 mit gelber Farbe direkt auf das Karrenfeld gepinselt. Diese Farbe verhinderte in der Folge die Korrosion des darunterliegenden Kalkes, und heutzutage ragen die durch Farbe geschützten Stellen über die umgebenden Bereiche hervor. Die Höhe des überstehenden Reliefs konnte mit einem Mikrometer gemessen und so die jährliche Abtragung ermittelt werden (HÄUSELMANN 2008).

Messungen an verschiedenen Teilen des Karrenfeldes ergaben einen durchschnittlichen Korrosionsabtrag von  $0.014 \pm 0.007$  mm. Ein Vergleich mit der Literatur ergab, dass diese Werte durchaus vergleichbar sind mit anderen Messwerten rund um den Globus.

## Wann entstehen Höhlen?

Da CO<sub>2</sub> in kaltem Wasser besser löslich ist, gab es früher Theorien, wonach Höhlen vor allem rund um die Eiszeiten entstehen. Heutzutage weiss man, dass die Bodenaktivität, die Bakterien und die Wurzelatmung ein Vielfaches mehr an CO<sub>2</sub> erzeugen als tiefere Temperaturen (AUDRA ET AL. 2006). Zudem zeigten Sedimentanalysen sowie Datierungen, dass die Mehrzahl an Höhlen während der Interglaziale (oder vor den Eiszeiten) entstanden ist und dass die Anhebung des Wasserspiegels durch Dämmung der Höhlenquellen durch den Gletscher viel eher ein Absaufen des Hohlraumes und dessen Verfüllung mit Silten (Gletschermilch) zur Folge hat (BINI ET AL. 1998).

Gletscher helfen allerdings der Höhlenbildung auf eine andere Weise: Da sie oftmals das Tal, wo sich die Quelle befindet, tieferlegen (Entwässerungsbasis des Systems), ändern sie die hydrogeologischen Bedingungen. Als Folge davon passen sich die Höhlen diesen neuen Bedingungen an und erschaffen ein tieferliegendes Höhlensystem:

## Wo entstehen Höhlen?

Alle Karsthöhlen haben eine Quelle. Diese liegt in der Regel am tiefsten Punkt, den die Wässer erreichen können. Dies ist entweder (wie im Beispiel der St. Beatus-Höhlen) eine undurchlässige Schicht (mergliche Drusbergsschichten), entlang der das Wasser an die Oberfläche tritt, oder aber es ist in aller Regel der Talboden. So befinden sich die zwei Quellen der Region Siebenhengste-Hohgant-Schratentfluh am resp. 9 m unterhalb des Thunerseespiegels zwischen Unterseen und Sundlauenen. Auch wenn die Quelle im Talboden liegt, so kann sich die Höhle dahinter doch unter diesem Spiegel entwickeln. Der Normalfall ist sogar, dass sich die Höhlen zwischen Hochwasserspiegel und in der Regel bis zu 100 m unter dem Niederwasserspiegel bilden. Alle diese Höhlen haben eine «phreatische», das heisst «Unterwasser»-Morphologie: es sind runde bis elliptische Röhren, die zeigen,

dass die Korrosion auf Boden, Wand und Decke gleichermaßen einwirkte: eben unter Wasser (Abb. 2).



Abbildung 2: Das Labyrinth des Bärenschachtes ist eine typische phreatische Höhle; eine Ellipse, bei deren Entstehung das Wasser den Felsen überall lösen konnte. Photo D. Burkhalter

Höhlen oberhalb dieses Spiegels zeigen eine vadose Morphologie, es sind dies Schächte und enge, gewundene, aber hohe Schluchten, wie sie entstehen, wenn der Bach sich frei fließend eintieft (*Abb. 3*).



*Abbildung 3:* Der Mäander der St. Beatus-Höhlen ist eine enge, hohe Schlucht, in der sich ein frei fließender Bach eintiefen konnte. Der Bach fließt auch heute noch. Photo D. Burkhalter

Wenn sich nun ein Tal durch Flusserosion langsam und stetig eintieft, so hat die Quelle mitsamt ihrer dahinterliegenden Höhle Zeit, sich auf die Änderung einzustellen: wir erwarten eine schluchtartige Höhle, in der das Wasser frei nach unten fließt. Wird das Tal aber vor allem durch Eiszeiten eingetieft, so induziert diese rasche Änderung eine komplette Neuausrichtung der Entwässerung im Berg, und es entsteht ein neues Höhlenniveau. Die Zeitdauer des Wachsens einer Kleinst- röhre bis hin zu begehbaren Gängen geschieht geologisch gesehen rasch, innerhalb einiger 10 000 Jahre (PALMER 2000).

Wenn wir also Höhlen sehen, deren Morphologien auf unterschiedliche Entstehungsniveaus hindeuten, dann können wir daraus auf die Höhe früherer Talböden schliessen. Selbstverständlich muss vor verfrühten Schlüssen die Plausibilität abgeklärt werden, um sicher zu sein, dass nicht geologische Faktoren die Morphologie beeinflussten und den Eindruck von Höhlenniveaus erwecken, die es aber in Wahrheit gar nicht gibt.

Bald fünfzig Jahre intensiver Erforschung der Höhlensysteme in der Region zwischen Thunersee und Hohgant führten zur Erkenntnis, dass dieses riesige System durch 14 einzelne Entstehungsphasen gebildet wurde, jede wiederum mit ihrer eigenen Quelle, ihrem eigenen Talboden (HÄUSELMANN ET AL. 2002). Die obersten, ältesten Phasen hatten ihre Quelle gar nicht im Aaretal, sondern im Eriz! Zu dieser Zeit existierte das Aaretal also noch gar nicht!

Kann denn das sein? Sind diese Höhlen so uralte, dass sie noch vor der Haupt-Taleintiefung entstanden sind? Nun denn, heute können wir diese Frage mit einem klaren Ja beantworten:

### Seltsame Gerölle

Wer auf den Sieben Hengsten wandern geht, kann rund um das Wagenmoos ab und zu seltsame Gerölle finden, die nicht zu den hier vorkommenden Gesteinen passen (Abb. 4). Eine Doktorarbeit (GNÄGI & SCHLÜCHTER 2012) hat diese und auch weitere Gerölle, die in die Höhlen geschwemmt wurden, untersucht und Erstaunliches festgestellt: Diese Gerölle stammen aus dem südlichen Wallis und wurden durch Süd-Nord verlaufende Gletscher hierher verfrachtet, als es weder das Aaretal noch das querverlaufende Rhonetal gab! Ähnliche Sedimente aus dem mittleren Südwallis fand Christian Gnägi auch noch am Stockhorn. Es handelt sich hier also nicht um einen Zufallsfund – und nur dank des Karstes (kaum Oberflächenerosion) waren die Gerölle erhalten geblieben! In beiden Fällen deutet die Art der Ablagerung (chaotisch, nur kantengerundete Gerölle, siltig-sandige Matrix) auf einen Gletschertransport und nicht auf eine präglaziale fluviale Ablagerung hin.



Abbildung 4: Seltsame Gerölle am Wagenmoos, Herkunft: Südliches Wallis!

Die Frage des Alters stellt sich nun natürlich sofort. Diese Gerölle sind an der Oberfläche aber schwierig zu datieren. Einige von

ihnen wurden aber in eine Höhle eingeschwemmt – und dann kann die Methode der kosmogenen Isotope (GRANGER & MUZIKAR 2001) angewandt werden. Diese Gerölle wurden vor  $1.87 \pm 0.21$  Mio. Jahren in die Höhlen verfrachtet; dementsprechend sind sie seit mindestens dieser Zeit auf den Siebenhengsten. Der Beginn der Vergletscherungen lässt sich nun mit 2.5 Ma angeben, somit muss die Ablagerung zwischen 1.87 und 2.5 Ma erfolgt sein.

### Von diversen Datierungen ...

Altersbestimmungen an Höhlen sind grundsätzlich zum Scheitern verurteilt: eine Höhle ist wie der Name sagt, hohl, und wie soll man etwas «Abwesendes» chronologisch einordnen? Zum Glück gibt es die Sedimente, die sich **nach** der Höhlenentstehung im Hohlraum ablagern. Diese geben aber immer nur ein Mindestalter des sie umgebenden Hohlraums an. Will man aber alles, Sedimente UND Hohlraum, datieren, so kommt man nicht darum herum, eine relative Chronologie zu erstellen.

#### *Die relative Chronologie*

Die relative Chronologie setzt die einzelnen Ereignisse in einen zeitlichen Zusammenhang. Beispielsweise entsteht eine phreatische Röhre unter Wasser, Sinterablagerungen in solchen Röhren aber ganz generell über Wasser. Sehen wir also Sinter in einer Röhre, so haben wir zwei klar unterscheidbare Bildungszeiten. Ist dieser Sinter wieder korrodiert und haben wir eine Flusseintiefung am Boden des Ganges, so ist diese später als der Sinter entstanden. Wenn wir diesen Sinter datieren können, haben wir also gleichzeitig ein Minimalalter für die phreatische Röhre sowie ein Maximalalter für die Mäandereintiefung. Geht dieser Mäander talwärts in eine phreatische Röhre über, so heisst das, dass an dieser Stelle einmal ein alter Wasserspiegel (ein altes Talniveau?) war – und so haben wir auch gleich ein Maximalalter für dieses alte Talniveau! Und wenn wir in der unteren phreatischen Röhre wieder Sinter vorfinden, auch ein Minimalalter (*Abb. 5*)! So können wir unter Zuhilfenahme der Sedimente und der Morphologie den Hohlraum und seine hydrogeologischen Randbedingungen zeitlich einordnen (HÄUSELMANN 2010).

#### *Die absolute Chronologie*

Die relative Chronologie ist zwar für eine zeitliche Einordnung unabdingbar, aber sie ist halt doch relativ – um das genaue Alter zu wissen, müssen wir absolut datieren. Wie andernorts in den Erdwissenschaften nehmen wir auch hier radioaktive Elemente hierzu. Die Standardmethode zur Höhlendatierung beruht darauf, dass beim Entstehen eines Tropfsteins nur wasserlösliches  $^{238}\text{Uran}$ , aber nicht sein unlösliches Tochterprodukt  $^{230}\text{Thorium}$ , eingelagert wird. Im Laufe der Zeit zerfällt dieses  $^{238}\text{U}$  zu  $^{230}\text{Th}$ ; die Messung beider Isotope erlaubt es, das Alter des Tropf-

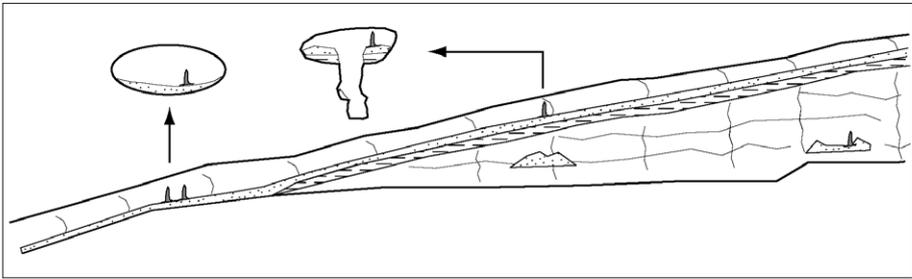


Abbildung 5: Die relative Chronologie am Beispiel der St. Beatus-Höhlen. Am Ende des touristischen Teiles steht man in einer Schlucht, die gegen den Eingang zu in eine phreatische Röhre übergeht. Hier war mal ein alter Karstwasserspiegel. Der Bodensinter von rechts oben ist älter, die Tropfsteine aber jünger als dieser Spiegel.

steins zu bestimmen. Nach ca. 500 000 Jahren funktioniert diese Uhr aber nicht mehr, da ab diesem Zeitpunkt ungefähr gleichviel Thorium, das ebenfalls radioaktiv ist, zerfällt, wie neues gebildet wird.

Wesentlich aufwendiger ist die Datierung von quarzhaltigem Sediment mit kosmogenen Isotopen. Sediment an der Oberfläche ist der kosmischen Strahlung ausgesetzt, und es bilden sich diverse Isotopen, unter anderem radioaktives  $^{26}\text{Al}$  und  $^{10}\text{Be}$  im Verhältnis 7:1. Wird das Sediment in eine über 10–15 m tiefe Höhle gespült, so endet die Bestrahlung, und beide Isotopen zerfallen wieder. Da Beryllium die doppelt so grosse Halbwertszeit wie Aluminium aufweist, erniedrigt sich das Verhältnis von 7:1 abhängig von der Zeit, seit der das Sediment in der Höhle liegt (GRANGER & MUZIKAR 2001). Nach ca. 5 Mio. Jahren ist soviel Aluminium zerfallen, dass eine Altersbestimmung kaum mehr möglich ist. Die Untergrenze von ca. 100 000 Jahren wird durch die schwierige Messung und zahlreichen Unsicherheitsfaktoren vorgegeben.

Mit diesen beiden Methoden können aber Höhlen über eine grosse Altersspanne datiert werden.

### Resultate

Beide Methoden wurden in den Siebenhengsten angewandt. Die Resultate sind recht spektakulär: Einerseits konnten innerhalb der letzten ca. 400 000 Jahre sechs Gletschervorstösse bestimmt und teilweise datiert werden, und zweitens konnten die Taleintiefungsraten sowie die Alter der einzelnen Talbodenstände der letzten ca. 4 Mio. Jahre einigermaßen genau bestimmt werden (Abb. 6)! Es würde an dieser Stelle zu weit führen, alle Resultate, die bereits andernorts beschrieben wurden, nochmals aufzuführen, wir verweisen den interessierten Leser lieber auf die Originalpublikationen, HÄUSELMANN ET AL. (2008) für die Gletschervorstösse, und HÄUSELMANN ET AL. (2007) für die Taleintiefungen.

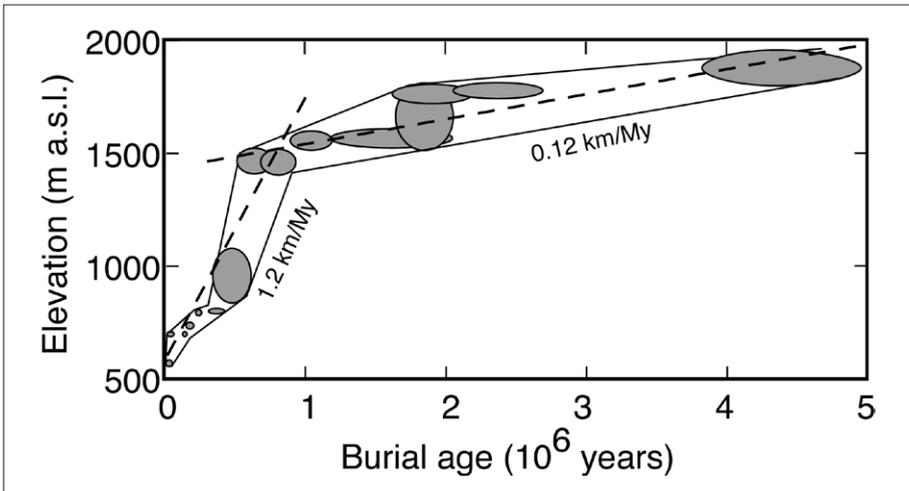


Abbildung 6: Eintiefungsraten des Eriz- und Aaretals innerhalb der letzten 5 Mio. Jahren – Daten, die ohne Höhlen nicht mehr erhoben werden könnten.

## Offene Fragen?

Bei all diesen schönen Resultaten, nicht nur von den Siebenhengsten, sondern auch von intensiver Forschung weltweit, könnte man annehmen, das Wichtigste sei getan, die Fragen geklärt ... aber wie immer, der Teufel steckt im Detail.

Obwohl beispielsweise die Höhlenentstehung recht gut begriffen wird, ist immer noch nicht ganz geklärt, wo in einem Kalkmassiv die Höhlen sich auch befinden. Eine neue Methode für die Praxis wurde vom Schweiz. Institut für Speläologie und Karstforschung SSKA entwickelt, die KarstAlea-Methode, die voraussagen kann, wo sich die Höhlen im Massiv befinden (FILIPPONI ET AL. 2012). Diese Information ist für Tunnelbauer natürlich von eminenter Wichtigkeit. Die Praxisüberprüfung der Methode wird in den nächsten Jahren zeigen, ob sie sich bewährt.

Ein weiterer Streitpunkt ist nach wie vor, weshalb es sowohl fast flache phreatische Horizontalhöhlen gibt wie auch solche, die bis tief unter den Karstwasserspiegel reichen. Die einen postulieren, dass die Bruchhäufigkeit der wichtigste Faktor ist (FORD & EWERS 1978), die andern tendieren eher auf Variationen im Niederschlag (GABROVSEK ET AL. 2014).

Und zu guter Letzt haben wir oben erwähnt, dass Höhlen in Warmzeiten entstehen sollen. Wir leben in einer solchen Warmzeit. In Slowenien beispielsweise aber, wo grüner Karst mit Wurzeln und Boden existiert, zeigten Korrosionsmessungen, dass die Höhlen sich gar nicht weiterentwickeln! Ja warum denn? – Also: Forschung frei! Es gibt noch zu tun!

## Literatur

- AUDRA, PH., BINI, A., GABROVSEK, F., HÄUSELMANN, PH., HOBLÉA, F., JEANNIN, P.-Y., KUNAVÉR, J., MONBARON, M., SUSTERSIC, F., TOGNINI, P., TRIMMEL, H. & WILDBERGER, A. (2006): Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 20 (2), 153–176.
- BINI, A., TOGNINI, P. & ZUCCOLI, L. (1998): Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du Sud des Alpes. – *Karstologia* 32(2), 7–26.
- FILIPPONI, M., PARRIAUX, A., SCHMASSMANN, S. & JEANNIN, P.-Y. (2012): KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau. – Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, 200 p.
- FORD, D.C. & EWERS, R.O. (1978): The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. – *Can J Earth Sci* 15, 1783–1798.
- GABROVSEK, F., HÄUSELMANN, PH. & AUDRA, PH. (2014): «Looping caves» versus «watertable caves»: The role of base-level changes and recharge variations in cave development. – *Geomorphology* 204, 683–691.
- GNÄGI, CH. & SCHLÜCHTER, CH. (2012): High-altitude erratics in the Bernese Alps (Switzerland). – *Swiss Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s00015-012-0111-7.
- GRANGER, D.E. & MUZIKAR, P.F. (2001): Dating sediment burial with in-situ produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. – *Earth Planet Sci Letters* 188, 269–281.
- HÄUSELMANN, PH., JEANNIN, P.-Y., MONBARON, M. & LAURITZEN, S.E. (2002): Reconstruction of Alpine Cenozoic paleorelief through the analysis of caves at Siebenhengste (BE, Switzerland). – *Geodinamica Acta* 15, 261–276.
- HÄUSELMANN, PH., GRANGER, D.E., LAURITZEN, S.-E. & JEANNIN, P.-Y. (2007): Abrupt glacial valley incision at 0.8 Ma dated from cave deposits in Switzerland. – *Geology* 35(2), 143–146.
- HÄUSELMANN, PH. (2008): Surface corrosion of an Alpine karren field: recent measures at Innerbergli (Siebenhengste, Switzerland). – *Int. Journal of Speleology*, 37 (2), 107–111.
- HÄUSELMANN, PH., LAURITZEN, S.-E., JEANNIN, P.-Y. & MONBARON, M. (2008): Glacier advances during the last 400 ka as evidenced in St. Beatus Cave (BE, Switzerland). – *Quaternary International*, 189, 173–189.
- HÄUSELMANN, PH. (2010): La Chronologie relative. – Réunion AFK, Pierre St-Martin, 2007, *Karstologia Mémoires* 17, 72–75.
- PALMER, A.N. (2000): Digital modeling of individual solution conduits. – In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W., (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*, NSS, 2000, 194–200.



Stimmungsbild der Zone profunde (Tiefe Zone) der Siebenhengste.  
Drei Generationen von Tropfsteinen sind sichtbar (Foto Rolf Siegenthaler).



Vermessung in einem neuentdeckten Gang der Haglättschhöhle (Foto Rolf Siegenthaler).