

Erosion – Korrosion – Abfluss: Beobachtungen und Messungen am Beispiel des Höllochs (Zentralschweiz)

ZUSAMMENFASSUNG

Am Beispiel des Höllochs (Zentralschweiz) wird versucht, die erosiven (mechanischen) Höhlenbildungsprozesse von den korrosiven (chemischen) zu trennen. Dabei sind morphologische Phänomene (Fließfacetten, Gangquerschnitts-Vermessungen, Mikrometer-Messungen) und hydrogeologische Abflussmodelle analysiert worden. Abgeleitet aus den Fließfacetten ergibt sich eine dominante Abflussgeschwindigkeit von 15 bis 46 cm/s. Die Mikrometer-Messungen zeigen einen Abtrag von 10 bis 36 μm pro Jahr an. Die Auswertungen der Beobachtungen zeigen, dass sowohl erosive wie auch korrosive Prozesse auftreten, wobei die Prozesse entsprechend den Fließgeschwindigkeiten und der Hydrochemie örtlich und zeitlich variabel sind. Eine klare Trennung von Erosion und Korrosion bei der Höhlenbildung scheint uns nicht möglich.

ABSTRACT

Erosion – corrosion – discharge: Observations and measurements using the example of Hölloch (Central Switzerland)
This study attempts to discriminate erosive (mechanical) and corrosive (dissolutional) processes in the speleogenesis of Hölloch, a large and hydrologically highly active cave in central Switzerland. The data are based on morphological features (scallops, surveys of gallery cross sections, micrometre measurements) as well as modelling of cave stream discharge. Scallops indicate a dominant flow velocity of 15–46 cm/s, while micrometre measurements yielded denudation rates between 10 and 36 μm per year. The results of this multi-annual monitoring show that both erosive and corrosive processes occur and that they are variable both in space and time depending on stream velocity and hydrochemistry. A clear-cut separation of their role in cave formation appears not to be possible in Hölloch.

Andres Wildberger

Arbeitsgemeinschaft Höllochforschung
AGH
Im Tiergarten 49
CH-8055 Zürich
wildberger@geovm.ch

Eingelangt: 4.3.2015
Angenommen: 1.5.2015

EINLEITUNG

Bei der Entstehung von Karsthöhlen spielen neben korrosiven auch erosive Prozesse eine wichtige Rolle. Erstere betreffen die chemische Lösung von Gestein durch säurehaltiges Wasser; letztere umfassen jene Prozesse, bei denen eine Gangerweiterung durch mechanische Erosion (auch Abrasion) erfolgt. Während in Höhlen, die heute vollständig über dem Karstwasserspiegel liegen, diese ehemaligen Prozesse

nur indirekt z.B. über Gangformen oder Fließfacetten, rekonstruiert werden können, erlauben wasseraktive Höhlen direkte physikalische Messungen durchzuführen, wenn auch unter oftmals großen logistischen Schwierigkeiten. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse solcher Messungen am Hölloch im Muotatal vorgestellt, die zu den längsten Messreihen dieser Art in Alpenhöhlen zählen.

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Das Hölloch befindet sich im zentralschweizer Kanton Schwyz (Abb. 1). Tektonisch gehört das Gebiet zur helvetischen Axen-Decke, welche hier eine Schichtreihe von der Unterkreide bis zum Alttertiär umfasst. Die wichtigsten verkarsteten Formationen sind – vom Liegenden zum Hangenden – der Öhrlikalk, der Schrattenkalk (ein feinspätiger Kalkstein,

Mächtigkeit ca. 150 m), der Seewer Kalk (ein dichter Kalkstein) und der Brisikalk (ein grobspätiger Kalkstein).

Die verkarsteten Gesteine der Axen-Decke sind in ihrem frontalen Teil verschuppt, mehrfach repetiert und erreichen eine Gesamtmächtigkeit bis über 500 m (Hantke, 1961, 2013; Hantke et al., 2013).

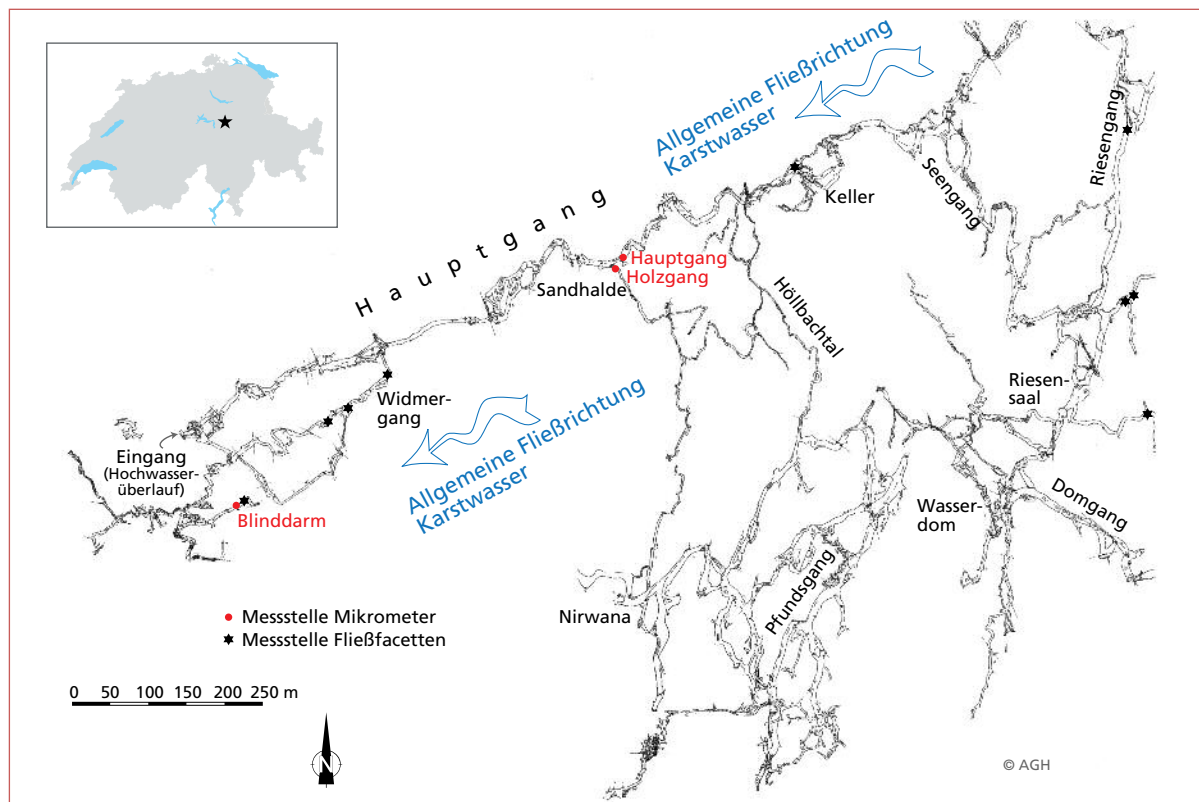


Abb. 1: Lage des Höllochs in der Zentralschweiz sowie Plan des westlichen Basissystems mit der Lage der Fließfacetten- und der Mikrometer-Messungen (die gesamte West-Ost-Ausdehnung des Höllochs beträgt rund 5 km).
 Fig. 1: Location of Hölloch in Central Switzerland and map of the western Basissystem showing the sites where scallop and micrometre measurements were made (the entire West-East extension of Hölloch in approximately 5 km).

Die ausgedehnten Kalkformationen weisen eine weiträumige Verkarstung auf, die von den bewaldeten und als Alpweiden (Almen) genutzten Talflanken bis zu den Karrenfeldern oberhalb der Waldgrenze reicht. Das Einzugsgebiet der Höhlenwässer erreicht im Chratzenrengrat mit 2350 m die größte Höhe, während der tiefstgelegene bekannte Höhlengang auf 550 m und ständig unter Wasser liegt. Die *Schlichenden Brünnen*, die Hauptquelle des Systems, entspringen auf ca. 636 m in den Talschottern. Diese Quellgruppe entwässert, zusammen mit episodischen Nebenquellen, ein Einzugsgebiet von rund 32 km² und weisen im Mittel einen Schüttung von 2 m³/s auf; bei außerordentlichen Hochwässern sind Schüttungsspitzen von mehr als 20 m³/s beobachtet respektive gemessen worden. Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im Einzugsgebiet beträgt etwa 2600 mm, wovon ein großer Anteil in Form von Schnee fällt, welcher in den Monaten Mai

und Juni weitgehend abgeschmolzen ist. Charakteristisch für das Karstwassersystem des Höllochs sind die großen Schwankungen des Karstwasserspiegels. Beim extremen Hochwasser im August 2005 wurde beispielsweise ein maximaler Karstwasserspiegel von rund 320 m über dem Niedrigwasserniveau beobachtet (Bättig & Wildberger, 2007).

Im Einzugsgebiet der *Schlichenden Brünnen* sind viele, zum Teil sehr lange und tiefe Höhlen bekannt, so insbesondere das Hölloch (labyrinthisches Höhlensystem von 202 km Länge und 940 m Höhendifferenz) sowie das Silbernen-System (L 39 km, H –890 m). Zusammen mit weiteren Höhlen sind im Einzugsgebiet der *Schlichenden Brünnen* insgesamt ca. 260 Höhlenkilometer vermessen (Stand 2014). Knapp zwei Drittel des Hölloch-Höhlensystems sind temporär oder ständig überflutet, d.h. als epiphreatisch bzw. phreatisch anzusprechen (Bättig & Wildberger, 2007).

FLIESSFACETTEN

Seit Bock (1953) und Curl (1974) erkannten, dass aus den in Höhlen weitverbreiteten Fließfacetten auf die Geschwindigkeit und Richtung der Strömung und –

bei Kenntnis der Größe des Gangquerschnitts – auch auf die Durchflussmenge geschlossen werden kann, sind weltweit viele Arbeiten erschienen, welche sich

mit den Interaktionen von strömendem Wasser und Fels befassen. Es handelt sich dabei um Untersuchungen in phreatischen oder epiphreatischen Abflusssystemen (z.B. Allen, 1972; Lauritzen et al. 1985; Lismonde & Ligmani, 1987) wie auch in Flüssen, an der Erdoberfläche (Cailhol, 2011). Ausführlich werden die Messungen, die physikalische Prinzipien und die Interpretationsmöglichkeiten von White (1988), Palmer (2007) sowie Ford & Williams (2007) behandelt.

Die Entstehungsweise von Fließfacetten in turbulenter Wasserströmung ist unbestritten (White, 1988; Lauritzen & Lundberg, 2000; Ford & Williams, 2007). Weniger klar ist, ob neben korrosiver Lösung auch erosive Kräfte eine Rolle spielen. Während etwa im Englischen von *dissolutional scallops* gesprochen wird (z.B. Ford & Williams, 2007) wird im Französischen mehr von Erosion gesprochen (*vagues d'érosion* – z.B. Lismonde & Ligmani, 1987; Cailhol, 2011), wobei dazugesagt werden muss, dass die französischen Begriffe *érosion* und *corrosion* häufig

synonym verwendet werden (siehe Krause, 1999). Mit der sich im Laufe der Zeit wandelnden Nomenklatur sowie der Entstehungsweise von Fließfacetten befasste sich u.a. Bögli (1980, 1981, 1984). Er vertrat die Ansicht, dass der Großteil der Facetten korrosiv gebildet wird. Er hielt jedoch auch eine erosive Komponente für wahrscheinlich und machte dafür die mitgeschleppten Sand- und Siltkörner verantwortlich. Er mutmaßte, dass das Absinken dieser Fraktion dazu führt, dass erosive Marken vorwiegend nahe dem Höhlenboden entstehen, während die Korrosion allseitig in Gangprofilen wirkt. Morphologisch den Fließfacetten ähnliche Marken treten auch in nicht-verkarstungsfähigen Gesteinen auf und belegen so deren rein erosive Entstehung. Beispiele sind auf Gneisen und Graniten in Flüssen der Südschweiz (Bögli, 1981) und aus dem Millerton Lake Cave System in Kalifornien bekannt (siehe: www.goodearthgraphics.com/Millerton und <http://tinyurl.com/navfybr>).

MESSTMETHODEN

Die Messstandorte der vorliegenden Untersuchung liegen im epiphreatischen, also dem bei Hochwässern gefluteten Abschnitt des Westteils des Höllochs

(Abb. 1). Die Messstellen wurden generell in Gangabschnitten mit von unten nach oben ansteigender Fließrichtung installiert (ansteigender Ast eines

Typ	Messprinzip	Anzahl Messstellen	Ergebnis
Fließfacetten	Statistik der Facettenlängen	ca. 15	Fließgeschwindigkeit
Gangquerschnitt	Fotografische querschnittsvermessung des Ganges	ca. 15	Querschnittsfläche
Transportierter (gerollter) Kies	Gerölldurchmesser	1	Fließgeschwindigkeit
Mikrometer	Abtragsmessungen	8 Messpunkte in 3 Profilen	Felsabtrag
Abflussmessungen	Hydrologisches Modell Westteil Hölloch Basissystem	Röhrenmodell mit 8 Knoten	Druckverteilung bei unterschiedlichen Zuständen des hydrologischen Systems
Überflutungsdauer	Druckmessungen und Datenübermittlung	2 Limnigraphen und bis zu 11 Drucksonden	Abfluss als Funktion des Druckspiegels

Tabelle 1: Übersicht der Messmethoden.
Table 1: Overview of the measurement techniques.

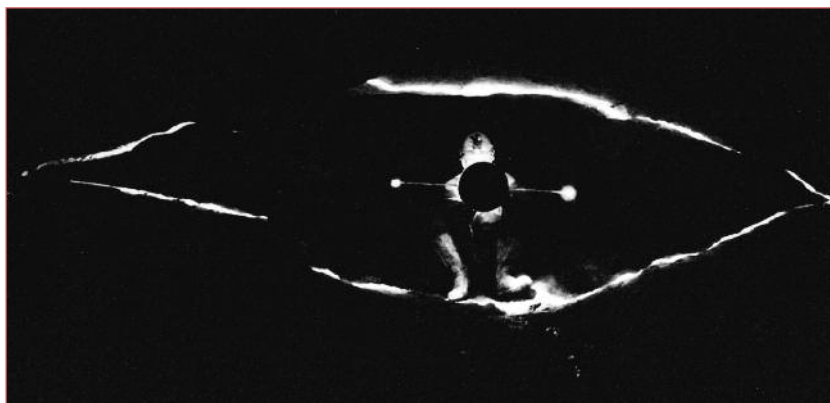
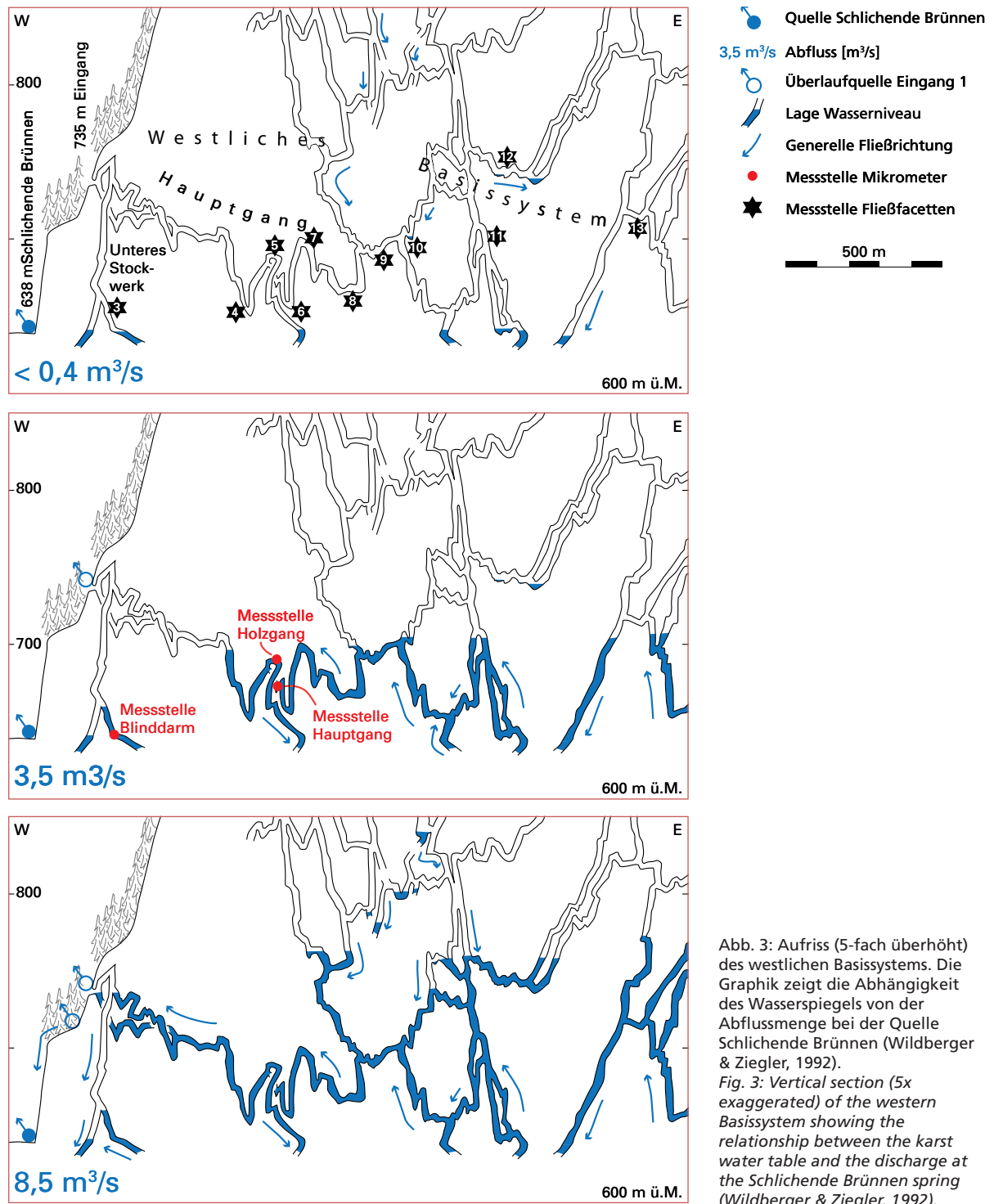


Abb. 2: Gangquerschnittsvermessung am Beispiel des *Widmergangs*. Die Lichtpunkte links und rechts des Höhlenforschers markieren den Referenzmaßstab von 1 m Länge.

Fig. 2: Survey of the passage cross section (*Widmergang*). The light spots on both sides of the caver mark the reference scale of 1 m.

Siphons). So kann angenommen werden, dass die Messstellen bei Hochwasserereignissen vollständig überflutet sind. Die Methodik der Datenübertragung mittels Drucksonden und Höhlenfunk ins Internet (CaveLink) wurde von Höhn & Ziegler (2007) vorgestellt. An den Messstellen wurden folgende Parameter erfaßt (Tab. 1):

- Fotografische Querschnittsvermessung des Ganges (Abb. 2).
- Aufzeichnung des Wasserdrucks (während Überflutungen) und Berechnung der Durchflussmenge (Abb. 3 und 4).
- Messung des punktuellen Gesteinsabtrags mittels Mikrometer.



– Vermessung von Fließfacetten und Berechnung der Fließgeschwindigkeit und des Durchflusses.

An rund einem Dutzend Stellen im westlichen Teil des Hölloch-Basissystems wurden zwischen 1993 und 2005 facettierte Flächen vermessen und ausgewertet (Methodik nach White, 1988; Ford & Williams, 1989, 2007) und daraus der dominante Abfluss abgeleitet (Lauritzen, 1989; Lauritzen et al., 1985). Den dominanten Abfluss bestimmten die erwähnten Autoren in aktiven, hydrologischen Systemen auf 85 bis 98 % des Maximalwertes der Summenkurve des Abflusses, d.h., dass die Fließfacetten vorwiegend während Hochwässern gebildet werden.

In den selben Gangabschnitten wie die Fließfacetten wurden auch die Gangquerschnittsflächen bestimmt, was die Ermittlung der Durchflussmenge erlaubt.

Hierzu wurden zu fotografischen Zwecken entwickelte Blitzwürfel zwischen mit Alufolien verklebten Platten montiert. Die Platten wurden auf ein Stativ montiert. Beim Zünden der Blitzlampen wird das linienförmige Abbild des Höhlenquerschnitts fotografisch erfasst und kann graphisch ausgewertet werden, wobei punktförmige Reflektoren im Abstand von 1 m als Referenz dienen. Unser von C. Probst konstruiertes System ist vergleichbar mit dem Apparat von Trüssel & Trüssel (1980; Abb. 2) bzw. mit heute üblichen Lasergeräten.

Abgeleitet aus den mittleren Längen der Facetten in Form der Mittelwerte nach Sauter kann auf die dominante Wassergeschwindigkeit des Durchflusses und – zusammen mit dem Gangquerschnitt, der Reynolds-Ziffer und der kinematischen Viskosität – auf die

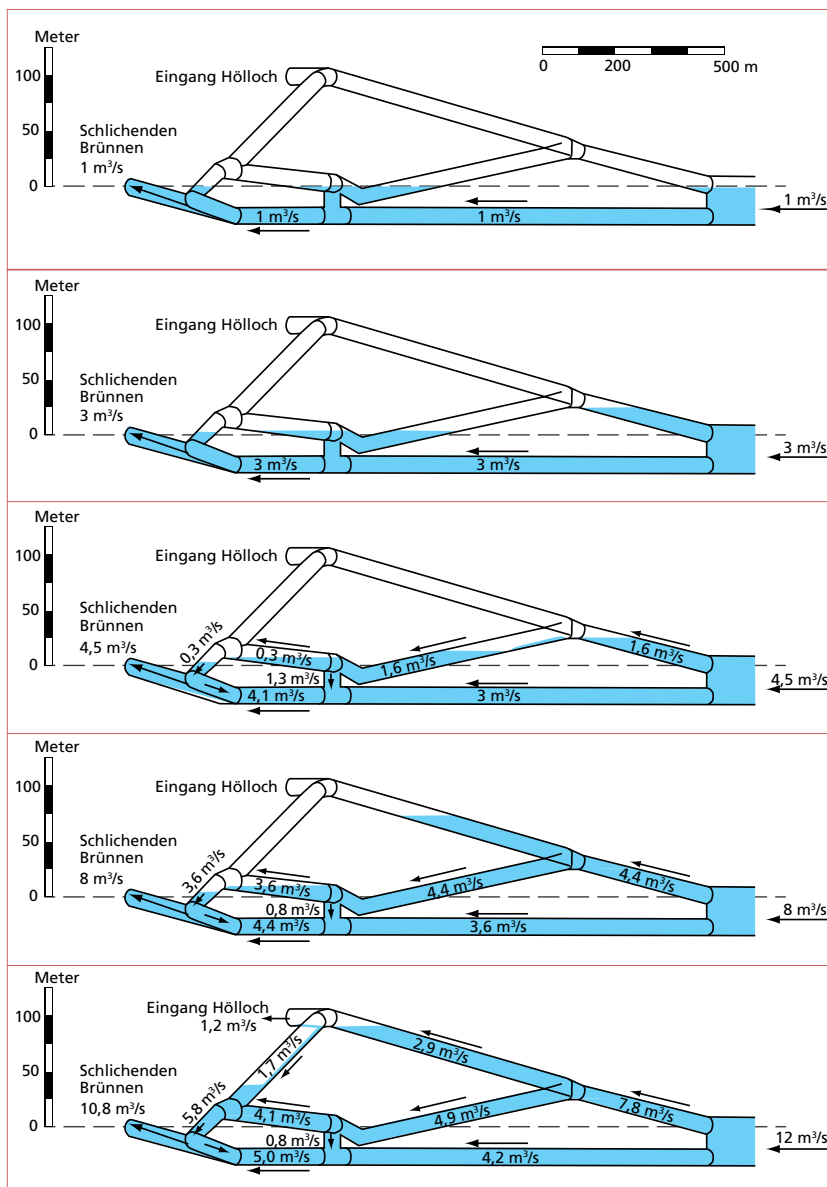


Abb. 4: Modell des westlichen Hölloch-Basissystems mit Durchflussmengen als Funktion von Druckspiegel und Rauigkeit (Jeannin, 2001).

Fig. 4: Schematic model of the western Basissystem illustrating discharge as a function of the karst water table and roughness (Jeannin, 2001).

Durchflussmenge geschlossen werden (vgl. Jeannin & Wildberger, 1997). Das Sauter-Mittel gewichtet die kleinen Werte weniger als das arithmetische Mittel. Die Querschnitte der Gänge können als Kreise oder als Quadrate normiert werden, wobei Kreise um circa 10 % kleinere Werte liefern als Quadrate. In der vorliegenden Studie wurden Kreise als Modellform verwendet.

Mikrometer-Messungen

Punktuelle Abtragsmessungen wurden mit Mikrometern durchgeführt (vgl. Gunn, 2004). Dafür wurden Stahlstifte in den Fels der Höhlensohle, -wand und gelegentlich auch in die Höhlendecke eingebohrt und zementiert. Eine Ausnahme bildete eine Messstelle im *Blinddarm*, bei welcher die Stifte auf einem Block installiert wurden. An den Stahlstiften wird seit 1999 einmal jährlich der zentrale Abstand zwischen der Felsoberfläche und dem Nonius des von der Firma Mitutoyo (Japan) hergestellten mechanischen Mikrometers abgelesen. Die Ablesegenauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Messwerte beträgt ca. 10 µm. In der Regel erfolgten 10 Messungen an jedem Messpunkt, welche arithmetisch gemittelt wurden. Bei jeder Messstelle wurde mit zwei Instrumenten gemessen (C01 und C02), damit die Messungen in gewissem Umfang redundant sind. Auswertemethoden und Variabilität von Messwerten wurden von Ford & Williams (2007) sowie Gunn (2004) diskutiert. Die Messstellen im *Blinddarm* und im *Hauptgang* liegen im Schrattenkalk, jene im *Holzgang* im Brisikalk.

Bei der Bestimmung des Abtrags anhand von Mikrometermessungen muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Messstellen nur bei Hochwasser oder bei mittlerem Abfluss überflutet werden. Aus den Abflussmessungen und der zugehörigen Druckhöhe im Höhlensystem lässt sich abschätzen, wie lange diese Abschnitte überflutet sind (Lage Schwellenhöhe in Funktion des Abflusses an der Quelle *Schlichende Brünnen*).

Aus der Abflussmenge an den *Schlichenden Brünnen* kann auf das Druckniveau an den Messstellen in der Höhle geschlossen werden. Die Werte erlauben eine Korrelation zur langjährigen Dauerkurve (d.h. nach der Größe geordnete, tägliche Abflusswerte) dieser Quelle (Wildberger & Ziegler, 1992; Höhn & Ziegler, 2007; Bafu, 2013). Das Trockenfallen der Messstellen beim *Blinddarm*, *Hauptgang* bzw. *Holzgang* entspricht dem Versiegen des Karstwassers bei den erwähnten Messstellen. Ein solcher Abfluss (langjähriger Mittelwert) wird an ca. 75 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten. Dementsprechend spielen korrosive bzw.

erosive Prozesse an den genannten Messstellen nur während ca. 20 % des Jahresabflusses eine Rolle. Ein Abfluss von ca. 3,5 m³/s oder weniger bei den *Schlichenden Brünnen* entspricht dem Trockenfallen dieser drei Messstellen.

Bei einem Abfluss an den *Schlichenden Brünnen* von mehr als etwa 8,5 m³/s wird der ungefähr 80 m höhergelegene Haupteingang des Höllochs aktiv (Wildberger & Ziegler, 1992; Bafu, 2013). Solche Hochwasserereignisse traten in 25 Jahren 1 bis 15 mal jährlich auf. Entsprechend erreicht oder überschreitet der Karstwasserspiegel die stauende Felsschwelle beim Haupteingang der Höhle während ungefähr 3 Tagen pro Jahr.

Ermittlung des korrosiven und erosiven Felsabtrags

Bei der Trennung von korrosivem und erosivem Abtrag wird davon ausgegangen, dass Erosion bei Transport von sandigem und siltigem (abrasivem) Material auftritt, Korrosion (chemischer Abtrag) hingegen bei aggressivem Wasser. Das feinkiesige, sandige und siltige Sediment wird größtenteils entlang der Gangsohle transportiert, während die chemische Lösung auf der gesamten benetzten Felsfläche wirkt. Im idealen Fall ergibt sich eine Differenzierung zwischen Stellen mit Korrosion und solchen, bei denen sowohl Korrosion als auch Erosion wirken.

Eine Rolle spielt auch das Phänomen, dass die chemische Lösung von Karbonatgestein bis zur 90 %-Sättigung relativ rasch erfolgt, die restlichen 10 % hingegen langsam (Dreybrodt & Eisenlohr, 2000; Dreybrodt, 2004). Die genannten Werte gelten für Laborbedingungen (25 °C); unter Hölloch-Bedingungen (6 °C) ist der Knickpunkt der Lösungskurve eher bei 65 % zu erwarten anstatt 90 % (pers. Mitt. A. Palmer; vgl. Plummer et al., 1978). Das führt dazu, dass Karstwasser über weite Fließstrecken schwach aggressiv ist und die vollständige Sättigung erst nach langer Zeit erreicht wird.

Maximale Wassergeschwindigkeit und Kiestransport

Im *Blinddarm* des Hölloch Basissystems finden sich auf aufsteigender Gangsohle abgelagerte, gerollte Kieskomponenten bis 9 cm Durchmesser. White (1988: 246) schlug eine Methode vor, die Fließgeschwindigkeit eines sphärischen Körpers mit demselben Volumen wie das Kieskorn abzuschätzen. Die berechneten Fließgeschwindigkeiten liegen zwischen 130 und 200 cm/s, während bei den unmittelbar benachbarten Fließfacetten eine Geschwindigkeit um 46 cm/s berechnet wur-

de. Bei einer Querschnittsfläche des Ganges von 3,6 m² ergibt sich somit eine Wassermenge von 4,6 bis 7,0 m³/s (abgeleitet aus geroltem Kies) bzw. 1,6 m³/s (abgeleitet aus Facetten). Die Geschwindigkeit der bei großen Hochwassern transportierten Kieskomponenten liegt damit nur wenig über den mittels Facetten ermittelten Fließgeschwindigkeiten des Karstwassers (Tabelle 2). Einige Fragen sind in diesem Zusammenhang aber noch offen und weitere Untersuchungen könnten Abhilfe schaffen. So sollten bei der Ermittlung der Transportkapazität von Fließgewässern die Grenzwertkurven von Hjulström (1935) berücksichtigt werden (Abb. 5).

Das extreme Hochwasser vom August 2005 hat mehrere hundert Kubikmeter Silt, Sand und Feinkies mobilisiert. Seit 2005 wird dieses Material im Zuge von Hochwassern im Basissystem verteilt. Die bisher zurückgelegte Transportdistanz beträgt über 2 km (Abb. 6). Eine Auswertung dieses Extremereignisses steht noch aus.

Fließfacetten und Gangquerschnittsvermessungen

Die Fließfacetten-Messungen und die Berechnung der Gang-Querschnitte erfolgten im gleichen Gangabschnitt. Die Gangquerschnitte an den Messstellen variieren zwischen 0,8 und 17 m² (Tabelle 2). Die berechneten Abflussgeschwindigkeit liegen zwischen 15 und 46 cm/s (Tabelle 2). Der „dominante Abfluss“

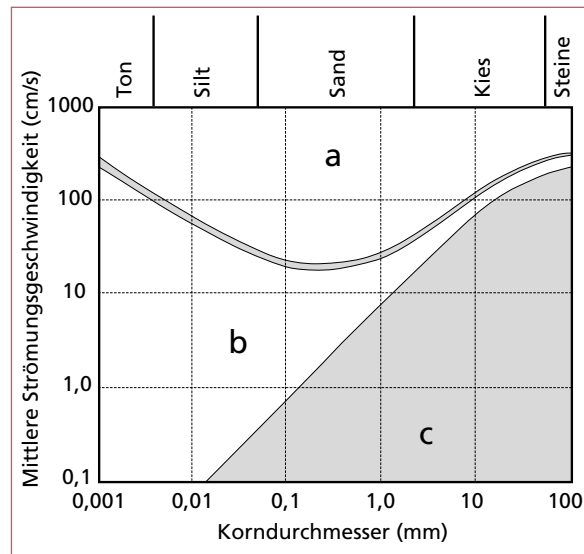


Abb. 5: Sedimenttransport als Funktion von Korndurchmesser und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit (Hjulström, 1935; Palmer, 2007). a: Erosion, b: Transport, aber keine Erosion, c: kein Sedimenttransport.

Fig. 5: Sediment transport as a function of grain size and mean stream velocity (Hjulström, 1935; Palmer, 2007). a: Erosion b: transport but no erosion, c: no sediment transport.

(Lauritzen, 1989) wurde nicht speziell berücksichtigt, da der Unterschied zwischen Abfluss mit und ohne Würdigung der Dominanz mit 2 bis 15 % als wenig bedeutend betrachtet werden kann. Die Berechnungsmethode von Palmer (2007: 149) ergab ähnliche Resultate.

Querschnittsfläche	Gangdurchmesser	Geschwindigkeit	Abfluss	Hölloch Teilsystem	Messstelle	Lokalität
[m ²]	[cm]	[cm/s]	[m ³ /s]			
4,5	240	36	1,7	Unteres Stockwerk	Widmergang	40 m Otterkamin
3,2	200	43	1,4	Unteres Stockwerk	Widmergang	beim Schlauch
0,8	100	33	0,3	Unteres Stockwerk	Widmergang	beim Saxergang
3,6	215	46	1,6	Unteres Stockwerk	Blinddarm	vor Siphon
1,4	135	34	0,5	Unteres Stockwerk	Schlauch	bergseits Umlauf
3,1	200	22	0,7	Hochsystem	Glasgang	beim Windgang
5,3	260	19	1,0	Basissystem	Jochgang	zw. Styx u. Briefkasten
16,7	460	28	4,7	Basissystem	Riesengang	beim Schlossgang
17,4	470	23	4,0	Basissystem	Keller	bei 1. Leiter
9,2	340	41	3,7	Basissystem	Oase	beim Anubissee
3,0	195	39	1,2	Basissystem	Oase	vor Umlauf
5,6	265	27	1,5	Basissystem	Äolsgang	150 m vor Riesensaal
4,3	235	15	0,7	Basissystem	Jochgang	beim Briefkasten

Tabelle 2: Auswertung der Fließfacetten, Gangquerschnitte und Abflüsse auf der Grundlage von Kreisprofilen (Gangdurchmesser, Geschwindigkeit, Abflussmenge) nach den Methoden von White (1988), Ford & Williams (1989, 2007) sowie Lauritzen (1989). Kinematische Viskosität bei 6 °C = 0,01472 cm²/s. Lage der Messstellen siehe Abb. 1.

Table 2: Measurements of scallops, passage cross sections and discharge based on circular profiles (passage diameter, flow velocity, discharge) following methods described by White (1988), Ford & Williams (1989, 2007) and Lauritzen (1989). Kinematic viscosity at 6 °C = 0.01472 cm²/s. See Fig. 1 for location of sites.



Abb. 6: Feinkörnige rippelgeschichtete Ablagerungen wurden im August 2005 während des Hochwassers im (a) Seengang und (b) im Chorgang (Bildbreite ca. 1 m bei einer Gesamtmächtigkeit des Sediments von ca. 5 m) abgelagert, Westteil des Hölloch Basissystems. (c) Schotterdüse hinter einem Siphonknie („Kiesburg“) im SAC-Gang im Ostteil des Hölloch-Basissystems. *Fig. 6: Fine-grained ripple-marked deposits as a result of the flooding in August 2005 in a) Seengang and (b) Chorgang (width of image approximately 1 m, thickness of the sediment package approximately 5 m). (c) Gravel deposit behind a siphon (Kiesburg) in the SAC-Gang, eastern part of the Hölloch-Basissystem.* Fotos: Beat Niederberger (a und b), Lukas Plan (c).

Abflussmodellierung

Zur Auswertung der Fließfacetten und der Mikrometer-Messungen sind die Lage des Druckspiegels, die zugehörige Durchflussmenge sowie die jährliche Benetzungsdauer respektive die Dauerkurven von Bedeutung (Tabelle 3). Zu diesem Zweck wurden im Westteil des Hölloch-Basissystems komplexe Modelle des Karstwassersystems entwickelt und validiert (Wildberger & Ziegler, 1992; Jeannin & Wildberger, 1997; Jeannin, 2001; Wildberger et al. 2001; siehe auch Abb. 3 und 4). Abflussdaten von den *Schlichenden Brünnen* und vom Hochwasseraustritt Hölloch sind verfügbar (BAFU, 2013).

Die Karstmodelle umfassen ein Gebirgsvolumen von ungefähr 1,5 km in W-E-Richtung, ca. 0,3 km N-S und rund 0,2 km vertikal (0,09 Mio m³), also nur einen kleinen Ausschnitt der geschätzten Gesamtausdehnung des Höllochs von 5,5 km W-E respektive 2 km N-S und 1 km vertikal (11 Mio m³). Die maximale Größe dieses Modellvolumens beträgt um 1.500.000 m³, wovon bis circa 970.000 m³ überschwemmt werden können.

Immersiondauer Blinddarm / Holzgang / Hauptgang	Immersiondauer	Abfluss
[Tage pro Jahr]	[%]	[m ³ /s]
75	20	3,5
3	1	8,5

Tabelle 3: Immersiondauer der Höhlenwände als Funktion der Abflussmenge (Immersion ist die jährliche Dauer der Benetzung).

Table 3: Duration of submergence of the cave wall as a function of discharge.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Fließfacetten

Die Auswertung der in der epiphreatischen Zone auftretenden Fließfacetten deutet zum einen auf eine recht große Variabilität der Wassergeschwindigkeit (dominanter Abfluss zwischen 15 und 46 cm/s) hin, zum anderen auf eine wechselhafte Durchflussmenge (in den erfassten Querschnitten 0,27 bis 4,7 m³/s entsprechend Querschnittsflächen zwischen 0,8 und 17 m²).

Mikromettermessungen

Trägt man typische Mikromettermesswerte als Funktion der Zeit auf, so zeigt sich, dass die Messwerte recht variabel sind, insbesondere treten bei diversen Messpunkten temporär „Hebungen“ der Felslage als Funk-

tion der Zeit auf (Abb. 8). So nimmt beispielsweise die Distanz bei der Messstelle Blinddarm Boden zwischen den Jahresmessungen 2013 und 2014 ab statt zu. Gut erklärbar sind die Streuungen der Messwerte beim Messstandort «Blinddarm Block» (Block von ca. 0,4 x 0,5 x 0,6 m³ zwischen Decke und Gangsohle verkeilt): Hier ist der Messpunkt möglicherweise nicht vollständig stabil und die Messunterlage kann zwischen den Messungen in Folge von Hochwässern leicht rotieren. Bei den Messstellen im Holzgang liegt die eine in der Hochwasserströmung («Holzgang rechts»), die andere («Holzgang links») im Strömungsschatten.

Mögliche Erklärungen für diese unerwarteten Streuungen sind die Ungenauigkeit bei der Messung, variable Rauigkeit/Spitzen von Calcitkristallen und/oder spröder/brüchiger Fels. Eine Korrelation mit

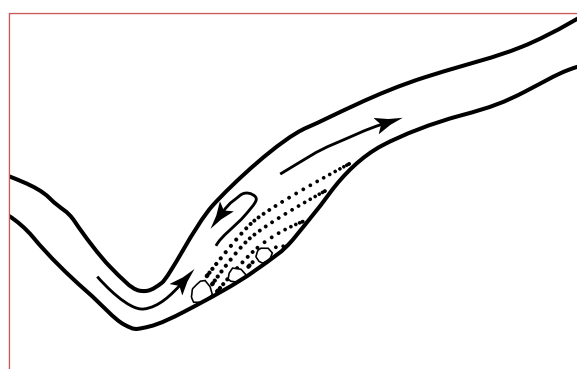


Abb. 7: Schematischer Höhlen-Längsschnitt mit Sedimentablagerungen und Fließrichtung. Im aufsteigenden Höhlenast werden die Lockersedimente rezykliert und führen so zur Verstärkung der Erosion und zur Ablagerung von Sedimenten (vgl. Abb. 6c).

Fig. 7: Schematic longitudinal cross section of a cave passage with sediment deposition and flow direction. Clastic sediments are recycled in the ascending branch leading to enhanced erosion and subsequent deposition of sediments (see Fig. 6c).

Hochwasserereignissen oder deren Fehlen ist nicht zu erkennen. Ein verlässliches Bild ergeben aber die lang-jährigen Messreihen (Abb. 8). Hochgerechnet beträgt der minimale Abtrag ca. 10 µm pro Jahr (*Holzgang links, Hauptgang unten und oben, Blinddarm Boden*), während der maximaler Abtrag bei rund 36 µm pro Jahr liegt (*Holzgang rechts*).

Mihevč (1996) ermittelte durch Mikrometer-Messungen in slowenischen Höhlen den erosiven und den korrosiven Gesteinsabtrag an Höhlenwänden. Mit 110 bis 900 µm pro Jahr (Erosion) respektive 2 bis 3 µm pro Jahr und 5 bis 10 µm pro Jahr (Korrosion) kam der genannte Autor auf vergleichbare, aber tendenziell höhere Werte.

In umfangreichen Studien wurden in einigen slowenischen Flusshöhlen über mehrere Jahre die Abtragsdynamik mittels Kalkplättchen gemessen (Preloševsek, 2012). Auch hier wurden in den meisten Höhlen Perioden mit Abtrag als auch mit Zuwachs (Versinterung)

	2004–2014	2000–2014	Mittelwert
	[µm]	[µm]	[µm pro Jahr]
Holzgang rechts	400		36
Holzgang links	125		11
Hauptgang unten	100		9
Hauptgang oben	200		18
Blinddarm Boden		150	10
Blinddarm Block	–	–	starke Streuung
Blinddarm Decke		175	12

Tabelle 4: Resultate der Mikrometer-Abtragungsmessungen.
Table 4: Denudation rates obtained by micrometre measurements.

	Erosion	Korrosion	Bemerkung
Felsabtrag im Allgemeinen	(X)	X	*
Fließfacetten	X	X	*
Ansteigende Gangabschnitte	X	(X)	Sedimenttransport *
Absteigende Gangabschnitte	(X)	X	Sedimenttransport *
Mikrometermessungen	X	X	*
Abflussmodelle	(X)	(X)	*

Tabelle 5: Versuch den erosiven vom korrosiven Felsabtrag im Hölloch zu unterscheiden.
Table 5: Attempt to differentiate between erosive and corrosive denudation in Hölloch.

* = Differenzierung zwischen erosivem und korrosivem Felsabtrag nicht möglich / Separation of erosive and corrosive denudation not possible
X = vermutete Dominanz der Erosion bzw. Korrosion / Supposed preponderance of erosion or corrosion
(X) = marginales Bedeutung von Erosion bzw. Korrosion / Minor importance of erosion or corrosion

SCHLUSSFOLGERUNGEN

An Hand von Messungen an Fließfacetten, Gangquerschnitten, Mikrometermessungen und Abflussmodellen der epiphreatischen Zone sowie an Beobachtungen betreffend Sedimenttransport wurde im Hölloch

gemessen und in Summe überwog in manchen Höhlen der Zuwachs und in anderen der Abtrag. Dies stimmt mit den Beobachtungen im Hölloch überein.

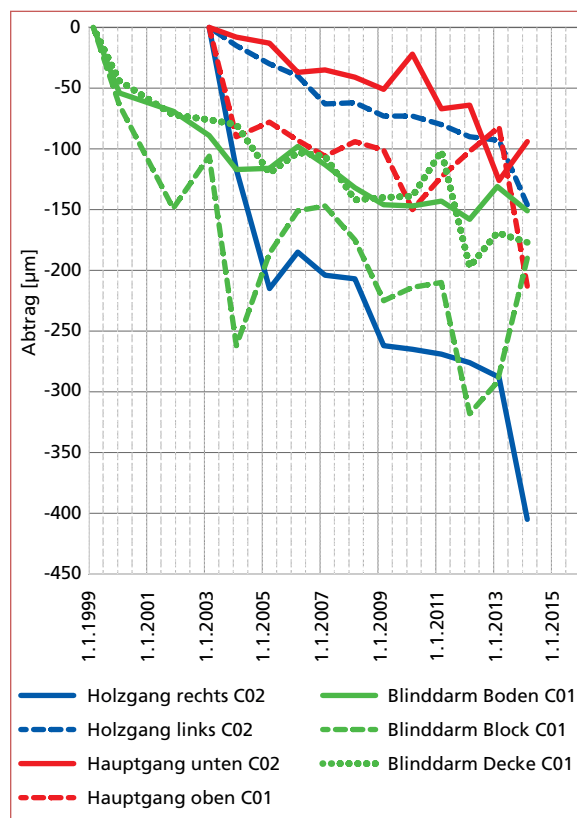


Abb. 8: Mikrometer-Messungen des Felsabtrags im Hölloch als Funktion der Zeit.
Fig. 8: Micrometre measurements of the rock denudation in Hölloch as a function of time.

versucht, die Bedeutung von erosiven und korrosiven Prozessen bei der Höhlenbildung abzuschätzen. Entgegen den Erwartungen lassen sich mit den gewählten Messmethoden diese Prozesse jedoch nicht trennen.

Vielmehr zeigte sich, dass beim Felsabtrag zwar dominante Prozesse zu erkennen sind, eine Abgrenzung von dominanten Prozessen (z.B. Erosion durch Sedimenttransport) oder marginalen Prozessen (z.B. Kor-

rosion in stagnierenden Wasservorkommen in der epiphreatischen Zone) aber nur approximativ möglich ist und diese Prozesse örtlich und zeitlich variabel sind.

DANK

Dank geht an Michel Monbaron und Luc Perritat (Uni Fribourg) für das Ausleihen des Mikrometers und die Geräteinstruktion. Des weiteren danke ich den Höhlenkollegen Gregor Bättig (Buochs), Peter Baumann (Zürich), Chrigel Probst (Flüelen) und Toni Pulfer (Buttikon) für die Beihilfe bei den Messungen. Dank geht auch an Katharina Dubach (Dr. von Moos AG, Zürich),

welche die Abbildungen gestaltete. Nicht zuletzt hat Felix Ziegler (Hütten) mit den elektronischen Datentransfers vieles ermöglicht und erleichtert. Der Redaktion „Die Höhle“ mit Christoph Spötl und Lukas Plan möchte ich für ihre kritische und geduldige Begleitung des Manuskripts herzlich danken und Art Palmer für eine konstruktive Begutachtung.

LITERATUR

- Allen, J.R.L. (1972): On the origin of cave flutes and scallops by the enlargement of inhomogeneities. – *Atti Rassegna Speleologica Italiana*, 24/1: 3–19.
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2013): Abflussdaten Schlichenden Brünnen und Hochwasseraustritt Hölloch – Muotathal (www.bafu.admin.ch).
- Bättig, G. & Wildberger, A. (2007): Ein Vergleich des Hölloch-Hochwassers vom August 2005 mit seinen Vorgängern. – *Stalactite*, 57: 26–34.
- Bock, H. (1953): Spuren ehemaliger Höhlenflüsse. – *Mitt. Höhlenkomm.* Wien, 1952: 40–43.
- Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – Springer (Berlin, Heidelberg).
- Bögli, A. (1980): Karsthydrology and physical speleology. – Springer.
- Bögli, A. (1981): Scallops. – *Proc. 10th Intern. Congr. of Speleology*, 1: 82–83.
- Bögli, A. (1984): Fließfazetten – ein karsthydrographisch wichtiges Merkzeichen des Fließverhaltens von Karstwasser. – *Die Höhle*, 35: 119–126.
- Cailhol, D. (2011): Analyse croisée, débits / vagues d'érosion du moulin de Vogüé (Ardèche). – *Karstologia*, 57: 28–2.
- Curl, R.L. (1974): Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. – *Bull. Natl. Speleol. Soc.*, 36: 1–5.
- Dreybrodt, W. (2004): Erosion rates: theoretical models. – in: Gunn, J. (Hrsg.): *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn (New York): 323–325.
- Dreybrodt, W. & Eisenlohr, L. (2000): Limestone dissolution rates in karst environments. – in: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W. (Hrsg.): *Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers*, Huntsville (National Speleol. Soc.): 136–148.
- Ford, D. & Williams, P. (1989): *Karst geomorphology and hydrology*. – Unwin Hymann (London).
- Ford, D. & Williams, P. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Wiley & Sons (Chichester).
- Gunn, J. (2004): Erosion rates: field measurements. – in: Gunn, J. (Hrsg.): *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, Fitzroy Dearborn (New York): 321–323.
- Hantke, R. (1961): Tektonik der helvetischen Kalkalpen zwischen Obwalden und dem St. Galler Rheintal. – *Vierteljahresschrift Naturforsch. Ges. Zürich*, 106: 1–212.
- Hantke, R. (2013): Blatt Muotathal. – *Geologischer Atlas Schweiz*, 127.
- Hantke, R., Pfiffner, O.A. & Gouffon, Y. (2013): Blatt Muotathal. – *Erläuterungen* 127.
- High, C.J. (1970): Aspects of solutional erosion of limestone, with special consideration of lithological factors. – Unveröff. Dissertation Univ. Bristol.
- Hjulström, F. (1935): Studies on the morphological activities of rivers. – *Bull. Geol. Inst. Uppsala*, 25: 221–527.
- Höhn, R. & Ziegler, F. (2007): Von der automatischen Hochwasserregistrierung zu Echtzeitdaten im Internet. – *Stalactite*, 57: 82–90.
- Jeannin, P.-Y. & Wildberger, A. (1997): Modélisation des écoulements dans le réseau du Hölloch (Muotathal, Schwytz). – *Akten 10. natl. Kongr. Höhlenforschung, Suppl. Stalactite*, 14: 331–339.
- Jeannin, P.-Y. (2001): Modeling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the Hölloch cave (Muotathal, Switzerland). – *Water Resources Research*, 37: 191–200.
- Klimchouk, A., Ford, D., Palmer, A. & Dreybrodt, W. (2000): *Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers*. – National Speleological Society (Huntsville, Alabama).
- Krause, M. (1999): *Lexikon für Höhlenforscher*. – Bielefeld.
- Lauritzen, S.-E. (1989): Scallop dominant discharge. – *Proc. 10th Intern. Congr. of Speleology, Budapest*: 123–124.
- Lauritzen, S.-E., Abbott, J., Arnesen, R., Crossley, G., Grepperud, D., Ive, A. & Johnson, S. (1985): Morphology and hydraulics of an active phreatic conduit. – *Cave Science*, 12: 139–146.
- Lauritzen, S.-L. & Lundberg J. (2000): Solutional and erosional morphology. – in: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W. (Hrsg.): *Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers*, Huntsville (National Speleol. Soc.): 408–426.
- Lismonde, B. & Ligmani, A. (1987): Les vagues d'érosion. – *Karstologia*, 10/2: 31–37.

- Mihevc, A. (1996): Some preliminary results of micrometric measurements in Skocjanske caves, Slovenia. – *Kras i speleologia*, 8: 66–70.
- Palmer, A.N. (2007): *Cave Geology*. – Cave Books (Dayton, Ohio).
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L., Parkhurst, D.L. (1978): The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 to 60 °C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. – *Amer. J. Sci.*, 278: 179–216.
- Prelovsek, M. (2012): *The Dynamics of Present-Day Speleogenetic Processes in the Stream Caves of Slovenia*. – *Carsologica* 15, Karst Research Institute (Postojna).
- Trüssel, C. & Trüssel, M. (1980): *Fotographische Höhlenquerschnittsvermessung*. – *Stalactite*, 30: 12–16.
- White, W.B. (1988): *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. – Oxford University Press (New York).
- Wildberger, A., Jeannin, P.Y. & Pulfer, T. (2001): *Hochwasser 1999 und 2000 im Hölloch (Zentralschweiz): Beobachtungen und Folgerungen*. – *Actes 11e Congr. National de Spéléologie, Stalactite, Suppl.* 15: 81–89.
- Wildberger, A. & Ziegler, F. (1992): *Crues dans un karst alpin: Potentiel dans les drains et débits aux exutoires – exemples provenant de la grotte du Hölloch (Suisse centrale)*. – *Actes du 5e Colloque d'hydrogéologie en pays calcaire et en milieu fissuré*, *Ann. Univ. Besançon, Mém. hors série* 11: 255–262.