

Fließfazetten – ein karsthydrographisch wichtiges Merkzeichen des Fließverhaltens von Karstwasser

Von Alfred Bögli, (Pfeffikon, Schweiz)

Meinem Freund Hubert Trimmel zu seinem 60. Geburtstag gewidmet

1. Einleitung

Diese Studie über Fließfazetten ist im wesentlichen in alpinen Höhlen, besonders im Hölloch (Muotatal, Schweiz) entstanden. Sie dürfte für die Kalkalpen repräsentativ sein. Ob sie auf andere Gebiete übertragbar ist, wäre noch zu untersuchen.

Fließfazetten (franz. *vagues d'érosion*, *cupules*; engl. *scallops*, *flutes*) findet man in vielen Höhlen, seltener an der Erdoberfläche auf Kalk und Dolomit, in den Kristallinalpen auch auf Granit und Gneis. Lange Zeit besaßen sie keinen eigenen Fachbegriff. Kraus schrieb 1894: „... kann man *Erosionsspuren* finden, welche die Richtungen andeuten, die einst das Wasser genommen hat.“ Kyrle schrieb 1923: „... daß sich *feine und seichte Erosions- und Korrosionshohlformen* in den bergwärts liegenden Höhlenräumen ...“ (S. 62), O. Lehmann verwendet das Wort *Auswaschungen*, Bock (1926) und Biese (1933) *Erosionsnapf*, was nicht der flachschaligen Form entspricht. Da die *Fließfazetten* große Flächen überdecken, in denen sich die einzelnen Schalen als Fazette darbieten, ist der heutige Begriff berechtigt.

Zum wissenschaftlichen Problem wurden die Fließfazetten erst durch den Grazer Ingenieur Hermann Bock, der 1952 die Abhängigkeit der Fazettengröße von der Fließgeschwindigkeit erkannt und in eine mathematische Formel gefaßt hatte. In Frankreich behandelte Renault (1961, 1967/68) das Problem der „*vagues d'érosion*“ und erklärte sie durch die Wirkung unlöslicher Gerölle (Flint, Quarzite).

1942 begann mit Bretz die Ära der amerikanischen wissenschaftlichen Höhlenforschung, der auch schon auf die „*scallops*“ eingeht. Coleman (1941) veröffentlichte eine erste Spezialarbeit zu diesem Thema. 1959 berichtet Curl über „*flutes*“, der 1966 eine weitere folgt über Experimente dazu, in der Annahme, sie entstanden durch Korrosion.

2. Morphographie der in fließendem Wasser in Höhlen entstehenden Fließmarken

In fließendem Wasser entstehen Kleinformen der Abtragung, die man als Fließmarken zusammenfaßt. Sie werden durch Wasserwirbel verursacht, die am Kontakt zur Felsoberfläche entstehen (Blumberg 1970). Sie treten meist in geschlossenen Feldern auf.

Im Hölloch, wo die Fließmarken Zehntausende von Quadratmeter Boden, Wände und Decken bedecken, lassen sich vier Typen unterscheiden:

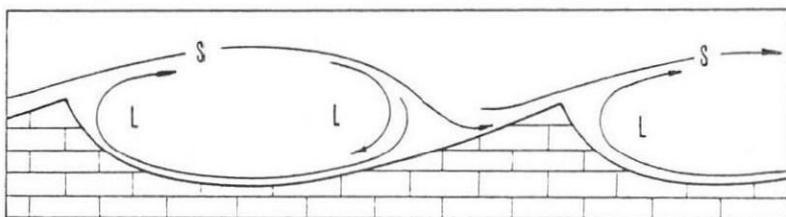


Abb. 1: Wasserbewegung über Fließfazetten nach Blumberg (1970). S: Scherfläche L: Lee wirbel.

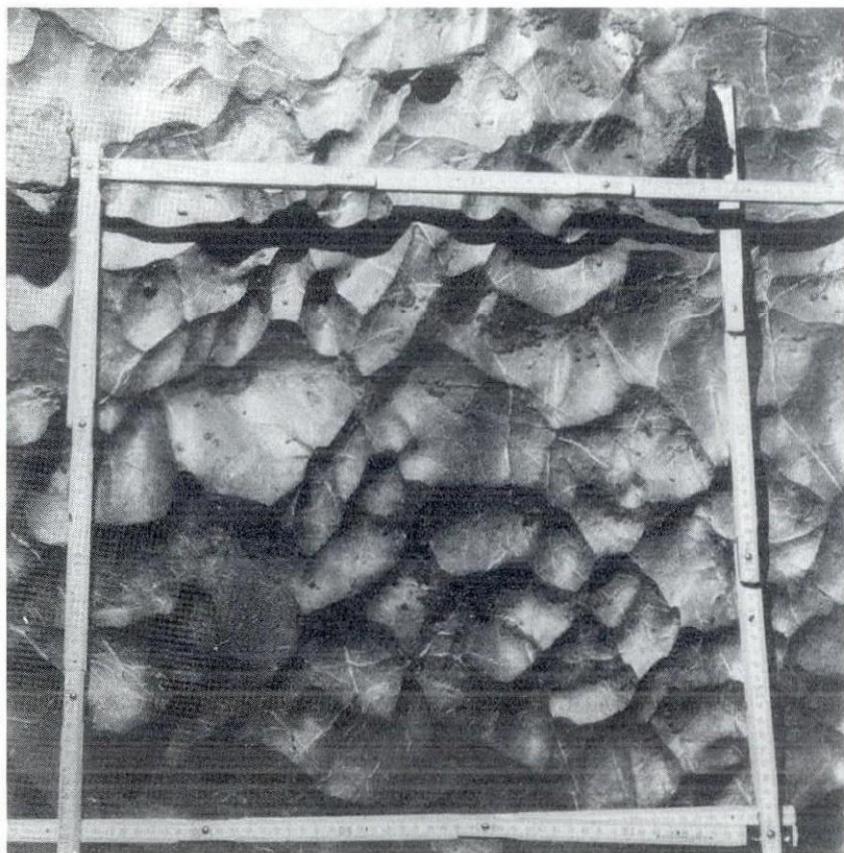


Abb.2: Fließfazetten auf der Sohle des Hallenganges im Hölloch; umramte Fläche 0,25 m². Fließrichtung von oben nach unten.

1. Fließfazetten – normalerweise auf Gangsohlen auftretend,
2. Wellenfurchen – am Übergang von der Seitenwand zur Gangsohle,
3. Deckenmulden – häufig durch Deckensturz zerstört,
4. kleine Deckenmarken.

2.1 Fließfazetten, „scallops“ (Bögli 1976: S. 73; 1978: T. 6.4, 9.3)

Muschelförmige, asymmetrische, flache Schalen (scallops = Muschel). Sie bestehen aus einer schmalen, steilwandigen Seite, die in die Richtung der Wasserbewegung zielt, und einer flachen Schale, zwischen 5 und 25 cm breit. Die Länge kann ausnahmsweise bis zum 10-fachen der Breite ausmachen. In den Alpen treten sie fast immer auf der Gangsohle auf (s. auch Kap. 4.2).

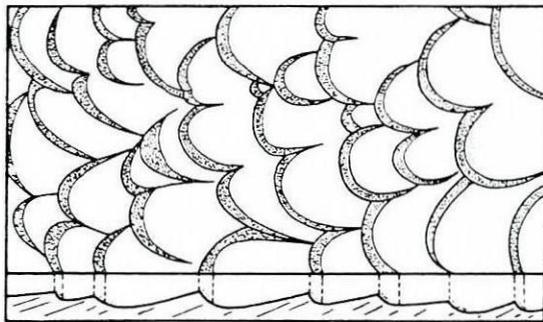


Abb. 3: Aufsicht und Längsschnitt eines Fließfazettenfeldes im Hölloch. Punktiert: Lehmbeleg auf der Steilseite beim Leewirbel. (Bögli 1978, S. 165).

2.2 Wellenfurchen, „flutes“ (s. Kap. 4.3)

Man findet sie normalerweise nur am Übergang von der Gangwand zur Gangsohle. Unter den besonderen Bedingungen des Standortes verwachsen die Fließfazetten seitlich so, daß sie eine Furche bilden, die senkrecht zur Fließrichtung liegt. Wegen der Konstanz der Furchenbreite hat Curl (1947) die „flutes“ für die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit ausgewählt (s. Kap. 3).

Morphographisch lassen sich Fließfazetten und Wellenfurchen gut auseinanderhalten; genetisch sind sie jedoch eine Einheit. Wegen des Fehlens schön ausgebildeter Wellenfurchen im Hölloch, muß ich auf ein Foto verzichten (In Bögli, 1978, gibt Taf. 9.3 einen Eindruck von einer wellenfurchen-ähnlichen Form aus dem Hölloch).

2.3 Deckenmulden

Deckenmulden gibt es nur an der Gangdecke, wo sie unter phreatischen Bedingungen entstanden. Sie sind ziemlich flach und deutlich größer als Fließfazetten im gleichen Gangquerschnitt. Die Längs- und Querschnitte sind muldenförmig und im Gegensatz zu der ausgeprägten Asymmetrie der Fließfazetten nahezu symmetrisch.

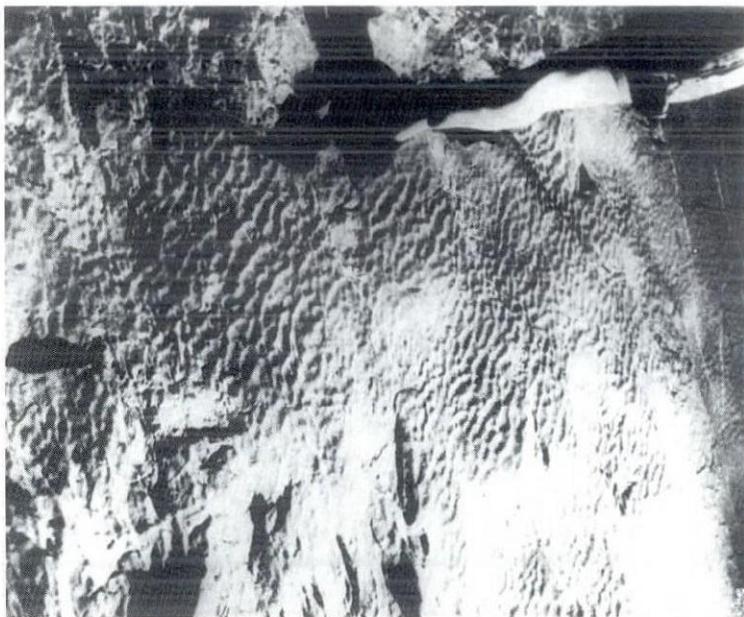


Abb. 5: Deckenmarken im Rabengang, Höllloch (Hand als Größenvergleich).

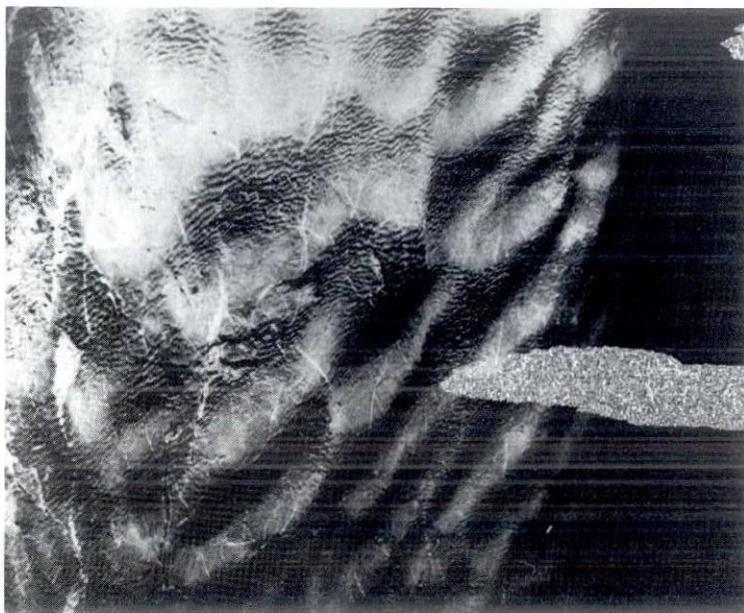


Abb. 4: Deckenmulden kombiniert mit Deckenmarken (kleine Formen), Etapak I, Höllloch.

2.4 Deckenmarken

Deckenmarken sind kleine Hohlformen von 1 bis 3 cm Breite. Sie gleichen winzigen Fließfazetten und sind wahrscheinlich unter Hochwasserbedingungen umgewandelte Kondenswassergrübchen, die im fließenden Wasser kleine Wirbel hervorrufen und durch diese umgeformt werden. Deckenmarken werden wegen ihrer Lage, Kondenswassergrübchen wegen ihrer geringen Größe oft übersehen.

3. Die Entstehung der Fließmarken

In den vorausgehenden Kapiteln wurden Erosion und/oder Korrosion als Entstehungsursache ausgeklammert. Bis 1966 galt die erosive Entstehung der Fließfazetten als Lehrmeinung. Dann aber brachte die Veröffentlichung von Curl die Wende zur Korrosion, allerdings mit Vorbehalt: „... or of combined solution and erosion.“ (S. 124). Später (1974) schreibt er nur noch von Korrosion. Allen (1971) war früher der Meinung „scallops“ und „flutes“ wären erosiv entstanden, änderte sie dann unter Curl's Einfluß: „These marks, now recognized to be of solutional origin, ...“.

Das für uns wichtigste Ereignis aus Curl's Forschungen ist die Formel zur Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m mit Hilfe des Abstandes L der Kämme der Wellenfurchen (flutes).

$$v_m = Re \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\eta}{\rho} \text{ (cm sec}^{-1}\text{) bzw. } = Re \cdot \frac{v}{L} \text{ (cm sec}^{-1}\text{), da } v = \frac{\eta}{\rho}$$

Re: Reynold's Zahl ρ : Dichte

η : Viskositätskoeffizient v : kinematische Viskosität

Die Reynold's Zahl kann sehr verschiedene Werte annehmen (s. Abb. 6).

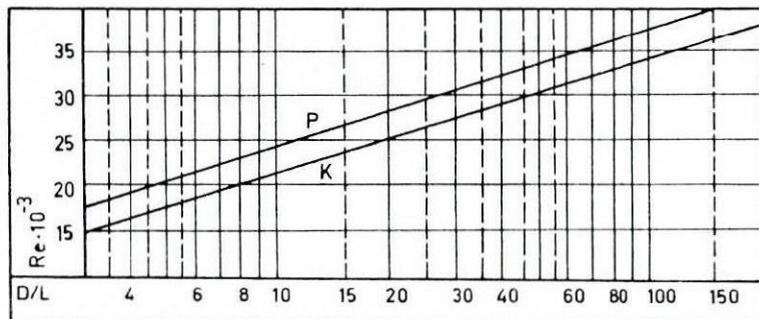


Abb. 6.: Beziehung zwischen Reynold's Zahl Re und D/L nach Curl (1974). D : Gangdurchmesser (cm); L : Breite der Wellenfurche, (Bögli 1978, S. 167).

Für reines Wasser gilt: $\rho = 1$ und v zahlenmäßig gleich $\eta \cdot v$ ist stark temperaturabhängig (Tab. 1).

Tab. 1: Kinematische Viskosität des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur (Bögli 1978, S. 167, bzw. 1980, S. 163)

T in °C	0	5	10	15	20	25	30
ν	0,0179	0,0152	0,0131	0,0114	0,0100	0,0090	0,0080

Im wassererfüllten Gangquerschnitt nimmt ρ mit zunehmendem Gehalt an mineralischen Beimengungen von oben nach unten zu:

Tab. 2: Abhängigkeit der Dichte ρ einer Wasser-Sand-Mischung vom Volumenanteil der Sandkörner (Kalksand)

Wasservolumen: cm ³	1000	900	800	700	600
Masse des Wassers: g	1000	900	800	700	600
Vol. Sandkörner: cm ³	0	100	200	300	400
Masse des Sandes: g ($\rho = 2,75 \text{ g/cm}^3$)	0	275	550	825	1100
Dichte der Mischung: $1/\rho \text{ cm}^3/\text{g}$	1,000	1,175	1,350	1,525	1,700
	1,000	0,851	0,740	0,656	0,588

Hohe Sandbelastungen treten im Gangquerschnitt nur in den unteren felsnahen Wasseranteilen auf. Aus dem Vorausgegangenen läßt sich ableiten, daß L umgekehrt proportional der Dichte ist, bzw. je größer die Dichte, um so kleiner L bei gleicher Geschwindigkeit.

4. Der Gesteinsabtrag bei den Fließmarken

Die Gesteinsoberfläche wird durch Erosion und Korrosion angegriffen. Korrosion ist die Auflösung des Gesteines durch aggressives Wasser, Erosion – in Höhlen – das Abschleifen der Felsoberfläche durch bewegtes, sandbeladenes Wasser. Korrosion wirkt auf Kalk immer, vorausgesetzt es ist aggressiv, also auch bei kleinsten Geschwindigkeiten, während Erosion fließendes Wasser von mindestens ca. 10 cm/s Geschwindigkeit (Hjulström 1935 in Bögli 1978, S. 172) voraussetzt. Fließendes, mit Kalksand beladenes Wasser steht meist im chemischen Gleichgewicht mit dem Gestein, weil die große relative Oberfläche der kleinen Körner die Auflösung fördert, wodurch das CO₂ aufgebraucht wird. Ausnahmen: 1. Karstflüsse bringen aggressives Wasser weit in die Höhle hinein, 2. Mischungskorrosion bildet zuerst neues CO₂ und macht sich überall da bemerkbar, wo sich zwei Wässer von verschiedenem Kalkgehalt mischen, sei es tief in der phreatischen Zone oder nahe der Oberfläche.

Anmerkung: reines Wasser erodiert nicht; somit können Deckenmulden und Deckenmarken nur korrosiv entstanden sein. Bei Anwesenheit von Sand erodiert das bewegte Wasser und bald, mit steigender Fließgeschwindigkeit, übersteigt der Erosionsabtrag jenen der Korrosion. Deckenmulden und Deckenmarken verschwinden.

Nachfolgend einige weitere Bemerkungen zum Thema Erosion oder Korrosion.

4.1 Sand ist schwerer als Wasser und sinkt nach unten. In der oberen Hälfte eines Gangquerschnittes wirkt er daher nur dann, wenn er durch Turbulenz hochgewirbelt wird, z.B. wenn die Stromlinien gegen die Wände oder die Decke gerichtet sind, also in Kurven und Engstellen.

4.2 Wellenfurchen entstehen am Übergang von der Gangwand zur Gangsohle. In den langsamer fließenden, felsnahen Wasserschichten erzeugt die Schwere des Sandes eine abwärtsgerichtete Bewegungskomponente, die senkrecht zur allgemeinen Fließrichtung steht. Außerdem erhöht sich die Wasserdichte durch den Sand, was eine zweite Abwärtskomponente im Wasser selbst bewirkt. Beide Komponenten erlahmen beim Erreichen der Gangsohle; die Wellenfurchen werden durch die Fließfazetten ersetzt.

4.3 Korrosion wirkt immer senkrecht zur Gesteinsoberfläche, weist aber sonst keine bevorzugte Richtung auf, auch nicht die der Schwere. Deshalb ist jeder Angriffspunkt an der Peripherie eines Gangquerschnittes morphologisch gleichwertig. Entständen die Fließfazetten und Wellenfurchen durch Korrosion, dann müßten sie rundum zu finden sein. Das ist nicht der Fall, da sie, abgesehen von Sonderfällen (s. 4.1), auf die tieferen Teile des Querschnittes konzentriert sind.

Im riesigen Mammoth-Cave-System in Kentucky (USA) mit seinem durchwegs geringen Gefälle ist der Boden der meisten Gänge von Inkasionsschutt und/oder Feinmaterial bedeckt. Deshalb sind dort, im Gegensatz zu den alpinen Höhlen, Fließfazetten selten auf der Gangsohle zu finden, sondern an den Seitenwänden neben den dort nicht seltenen Wellenfurchen.

4.4 Maxson (1940) hat Fließfazetten auf hartem und unlöslichem Gestein gefunden und Allen schreibt 1971, daß „... flutes are widely known from rock surfaces affected by powerful currents of sandladen water“ (S. 182). Im Bett des Maggiaflusses bei Ponte Brolla (bei Locarno, Schweiz) habe ich mehrere Fließfazettenfelder auf Orthogneis gefunden, zudem auch vereinzelt im Bett der Aare bei Handegg (Nordseite Grimselpaß) (Bögli 1981). Das bestätigt das große Erosionsvermögen sandbeladenen Wassers, besonders, wenn es sich um Quarzsand handelt (Bearbeitung von Granit und Orthogneis).

5. Zusammenfassung

Anlaß zum erneuten Aufgreifen des Fließfazettenproblems war die kontroverse Auffassung von der Abtragsursache – Korrosion (Curl 1966, 1974) oder Erosion (frühere Autoren, Bögli 1981). Standortanalysen ergaben als Resultate

einerseits Erosion als Entstehungsursache für Fließfazetten (scallops, engl.) und Wellenfurchen (flutes, engl.), andererseits aber das Bestehen zweier weiteren Abtragshohlformen an der Decke: Deckenmulden und Deckenmarken (neue Begriffe), die auf Korrosion zurückzuführen sind. Genauere Untersuchungen über diese beiden Formen stehen noch aus.

Literatur:

- Allen, J. R. L.* (1971): Transverse erosional marks of mud and rock, their basis and geological significance. In: *Sedimentary Geology. Intern. J. of applied and regional sedimentology*, pp. 165–385.
- Allen, J. R. L.* (1972): On the origin of cave flutes and scallops by the enlargement of inhomogeneities. *Atti Rass. Speleol. Ital.*, 3–19.
- Biese, W.* (1933): Über Höhlenbildung, II. Teil: Entstehung der Kalkhöhlen. *Abh. Preuss. Geol. Landesanst., N.F. H.* 146.
- Blumberg, P. N.* (1970): Flutes, a study of stable periodic dissolution profiles. Ph. D. thesis (Dpt. Chem. Ing.), Univ. Michigan.
- Bock, H.* (1928): Das Lurloch in der Steiermark. *Mitt. Höhlen- und Karstf.*, Berlin.
- Bock, H.* (1952): Spuren ehemaliger Höhlenflüsse. *Mitt. Höhlenkomm.*, Wien, S. 40–43.
- Bögli, A.* (1972): Gips in Höhlen. *Uerner Mineralienfreund* 10, H. 6.
- Bögli, A.* (1976): *Zauber der Höhlen*. Silva-Verlag, Zürich.
- Bögli, A.* (1978): *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Springer, Heidelberg.
- Bögli, A.* (1980): *Karsthydrology and physical speleology*. Springer, New York.
- Bögli, A.* (1981): Scallops. 8. Intern. Kongress Speleol., Bd. I, Bowling Green, USA.
- Bretz, J. H.* (1942): Vadose and phreatic features of limestone caverns. *J. Geol.* 50, S. 675–811.
- Coleman, J. C.*, (1947): An indicator of water flow in caves. *Proc. Speleol. Soc.* 6, S. 57–67.
- Curl, R. I.* (1959): Flutes – geometry and propagation. *NSS News* 17.
- Curl, R. I.* (1966): Scallops and flutes. *Transa. Cave Res. Group, G. B. S.* 121 ff.
- Curl, R. I.* (1974): Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. *NSS-Bull.* 36/2. S. 1–5.
- Curl, R. I.* (1975): Ableitung der Fließgeschwindigkeit in Höhlen aus den Fließfazetten. *Verb. Dtsch. Höhlen- und Karstforscher* 21/3
- Hjulström, F.* (1935): Studies on the morphological activities of rivers. *Bull. Geol. Inst. Uppsala* 25, 221–527.
- de Joly, R.* (1933): Notes spéléologiques II. Quelques phénomènes nouveaux observés. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* 66.
- Kraus, F.* (1894): *Höhlenkunde*. Carl Gerold's Sohn, Wien.
- Kyrle, G.* (1923): *Theoretische Speläologie*. Oesterr. Staatsdruckerei, Wien.
- Lehmann, O.* (1936): *Die Hydrographie des Karstes*. Franz Deutike, Wien
- Maxson, J. H.* (1940): Fluting and faceting of rock fragments. *J. Geol.* 48, 717–751.
- Renault, Ph.* (1961): Une microforme spéléologique: Les vagues d'érosion. *Spelunca* I, 15–25.
- Renault, Ph.* (1968): Contribution à l'étude des actions mécaniques ... dans la spéléogénèse. *Ann. de Spéléol.*, tome 23, 563–566.

Anschrift des Verfassers: Univ.-Prof. Dr. Alfred Bögli, Unterdorfstraße 141, CH-5735 Pfeffikon.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 1984

Band/Volume: [035](#)

Autor(en)/Author(s): Bögli Alfred

Artikel/Article: [Fließfazetten - ein karshydrographisch wichtiges Merkzeichen des Fließverhaltens von Karstwasser 119-126](#)