

Luftbewegungen in Höhlen

Eine Engstelle, die bläst: Soll man sie aufweiten?

Marco Filipponi

Seiten 121 bis 128, 4 Abbildungen

Welcher Höhlenforscher kennt nicht die langen Diskussionen, wenn es darum geht, einen Höhleneingang oder eine Engstelle aufzuweiten. Vor allem dann, wenn aus dem „Loch“ ein Luftzug zu spüren ist. Jedoch, was steckt dahinter, wenn Luft durch einen Höhleneingang oder eine Engstelle bläst? Führt der Luftzug stets zum vermeintlichen Großhöhlensystem oder ist dies nur eine „speläologische Bauernregel“?

In diesem Artikel wird gezeigt, wie aus höhlenklimatischen Beobachtungen an einem Höhleneingang das „Höhlenpotential“ abgeschätzt werden kann, sowie die Notwendigkeit für den Einbau einer Klimatüre nach dem Aufweiten des Höhleneingangs/der Engstelle diskutiert.



Abb. 1: Wird es hier weitergehen? (Foto: mf)

Die Luftbewegung in Höhlen – der Höhlenwind

Vorerst müssen wir uns bewusst sein, dass das, was wir „Höhle/Eingang/Engstelle ... die bläst“ nennen, vor allem eine Situation ist, in der sich die generelle Bewegung der (Außen-) Atmosphäre bis unter Tag widerspiegelt.

Die Luftbewegung in einer Höhle wird im Allgemeinen als Höhlenwind bezeichnet, wobei im Wesentlichen zwischen drei unterschiedlichen Mechanismen unterschieden werden kann, die die Höhlenluft in Bewegung bringen können: *Konvektiv* (Temperaturdifferenz), *barometrisch* (Druckdifferenz) und durch *Impuls* (Mechanisch). Diese drei Mechanismen können einzeln vorkommen, jedoch treten sie oft gemeinsam auf, wobei sich ihre Wirkungen addieren oder subtrahieren.

Die konvektive Luftbewegung

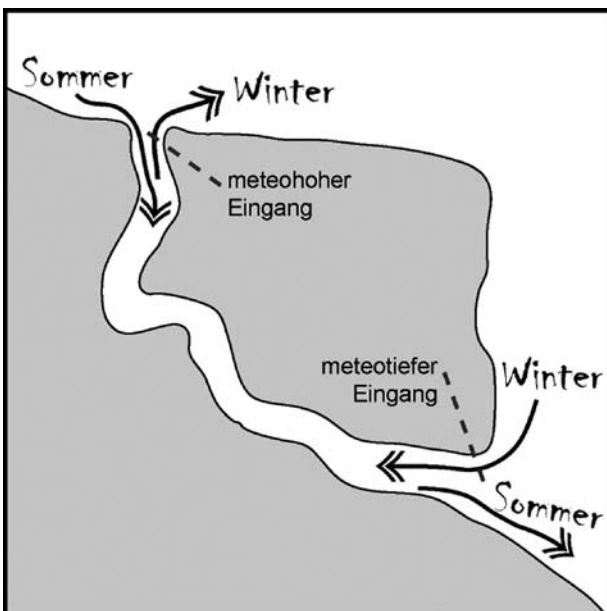


Abb. 2: Konzept der konvektiven Luftbewegung zwischen zwei Höhleneingängen.

Die Dichte der Höhlenluft (vereinfacht die Lufttemperatur) ist im Allgemeinen über das Jahr hinweg mehr oder weniger konstant (meist

zwischen 0 und $\pm 0,5$ °C). Hingegen weist die Luft der freien Atmosphäre große tägliche und jahreszeitliche Schwankungen auf. Die Dichte der Luft hängt vom vorherrschenden Luftdruck (meist als konstant angenommen) und von der Lufttemperatur ab.

Das Prinzip der konvektiven Luftbewegung ist einfach: Dichtere (kältere) Luft fällt, während die weniger dichte (wärmere) steigt (Abb. 2). Im Sommer „fällt“ normalerweise die Luft in der Höhle, die kälter ist als die Außenluft, während sie im Winter steigt. Daraus können Höhleneingänge anhand ihrer klimatischen Funktionsweise als *meteohoch* oder *meteotief* bezeichnet werden

- Der meteohohe Eingang saugt im Sommer Luft an und stößt im Winter Luft aus (im Winter ein „Blasloch“).
- Der meteotiefe Eingang stößt im Sommer Luft aus und saugt im Winter Luft an.

(Für eine tiefere Auseinandersetzung mit dem Konzept der konvektiven Luftbewegung wird auf die Literaturangaben am Ende des Artikels verwiesen.)

Die barometrische Luftbewegung

Die barometrische Luftbewegung unterliegt der Gesetzmäßigkeit, dass Luft von einem Ort höheren Drucks zu einem niedrigeren fließt (Abb. 3). Zwar ist der Luftdruck in und außerhalb der Höhle in der Regel gleich hoch, aber es kann dennoch passieren, dass bei schnellen Luftdruckänderungen der Außenatmosphäre (zum Beispiel beim Heranziehen einer Schlechtwetterfront) vor der Höhle ein anderer Luftdruck herrscht als drinnen. Die Höhle reagiert, indem sie Luft „ansaugt“ oder „ausstößt“. Wie viel Luft angesaugt wird, hängt vom

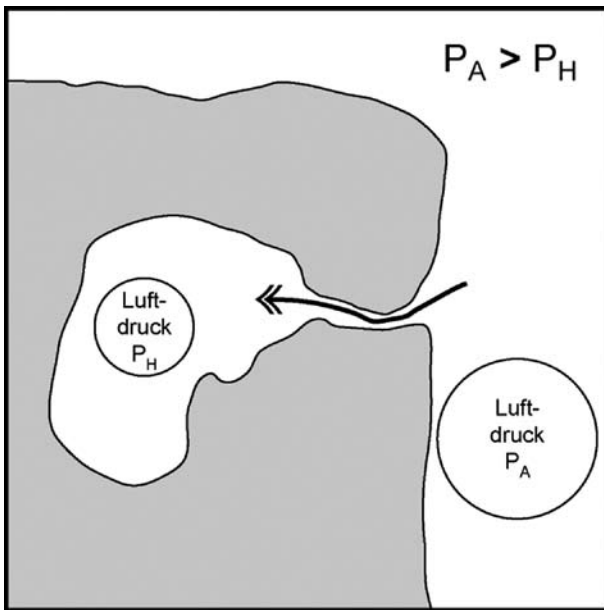


Abb. 3: Konzept der barometrischen Luftbewegung.

Volumen der Höhle sowie vom Druckunterschied ab. Die barometrische Luftzirkulation kann in einigen Höhlen sehr heftig sein, doch ist sie meist nur von kurzer Dauer (einige Minuten bis Stunden).

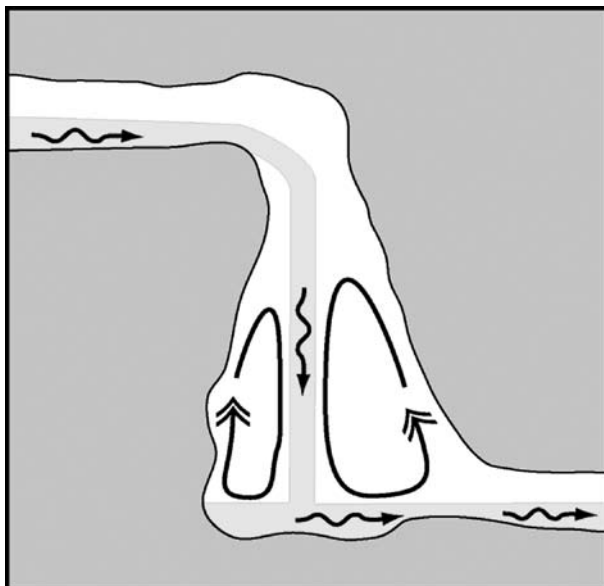


Abb. 4: Beispiel einer Luftbewegung durch Impuls um einen Wasserfall.

Luftbewegung durch Impuls

Unter der Luftbewegung durch Impuls werden alle Luftbewegungen zusammengefasst, bei denen die Höhlenluft durch die Bewegung

eines anderen Körpers angetrieben wird. So zum Beispiel durch das Fließen eines Höhlenbachs oder durch Höhlenbesucher, die sich in der Höhle bewegen (Abb. 4).

Was lässt sich aus Höhlenwind-Beobachtungen an einem Höhleneingang aussagen?

Theoretisch ist es möglich, aus höhlenklimatischen Beobachtungen an einem Höhleneingang, respektive an einer Engstelle, eine Idee über das, was dahinter kommt, zu erhalten (höhlenklimatisch wirksame Volumen, Lage der Höhleneingänge ...).

Ein Höhleneingang, der NICHT bläst – ist er unwichtig?

Ein Höhleneingang, an dem ein Luftzug zu beobachten ist, sagt uns, dass der Höhleneingang mit weiteren Gängen im Bergesinnern verbunden ist und dass dies für den Höhlenwind der widerstandsärmste Weg ist. Fehlt jedoch der Höhlenwind, kann es daran liegen, dass die Höhle „blind“ endet oder dass der Höhlenwind einen anderen Höhleneingang bevorzugt. Daher ist es nicht möglich, das „Potential“ eines nicht blasenden Höhleneinganges abzuschätzen. Hingegen ist das Vorhandensein eines Luftzuges ein Aufhorchen wert.

Welches ist der vorherrschende Mechanismus?

Welches der vorherrschende Mechanismus eines Höhlenwinds ist, lässt sich meistens einfach herausfinden:

Die *konvektive Luftbewegung* hängt vom Temperaturunterschied zwischen innen und außen ab und hält meist über Tage bis Monate an; während die *barometrische Luftbewegung* durch die Druckdifferenz bestimmt wird. Diese hält

nur kurze Zeit (einige Minuten bis Stunden) an und ist daher eher eine „höhlenmeteorologische“ Erscheinung.

Luftbewegungen durch Impuls sind meist kleinräumig (z. B. unmittelbar um einen Wasserfall) und lassen sich nicht mit Veränderungen des Außenklimas in Verbindung setzen.

Es kommt oft vor, dass sich die Mechanismen überlagern. **Deshalb ist es notwendig, den Luftzug bei verschiedenen Wetterlagen zu beobachten!**

Aus speläoexplorativer Sicht sind wir vor allem an der konvektiven und barometrischen Luftzirkulation interessiert. Das Vorhandensein konvektiver Luftzirkulation sagt uns, dass der Höhleneingang mit anderen Zonen des Berges verbunden ist. Hingegen sagt uns eine barometrische Luftzirkulation, dass ein großes Luftvolumen bei großen Gangdimensionen vorhanden ist.

Ist der Eingang/die Engstelle dominant?

Interessant wäre es zu wissen, ob es noch weitere meteotiefe/meteohohe Eingänge gibt. Oder im Falle einer Engstelle, ob es diejenige ist, welche die Luftbewegung zwischen zwei Höhleneingängen steuert. Oder eben, ob der Eingang/die Engstelle „dominant“ ist.

Hierfür führen wir einen kleinen Feldversuch durch, indem wir die luftdurchlässige Querschnittsfläche des Eingangs/der Engstelle verkleinern und beobachten das Verhalten des Höhlenwindes.

Im Falle einer **dominanten Engstelle** verkleinert sich der Luftfluss [m^3/s] beinahe blitzartig. Im Falle einer **NICHT dominanten Engstelle** bleibt der Luftfluss [m^3/s] konstant.

Der dominante Fall ist für uns als Höhlenforscher der interessantere, denn wir können

annehmen, dass hinter der Engstelle nur größere Gangdimensionen anzutreffen sind. Doch besagt er auch, dass das Höhlenklima durch die Erweiterung der Passage erheblich verändert wird. Der Einbau einer dauerhaften und effektiven Klimatür, die den ursprünglichen Luftfluss gewährleistet, sollte bei einer Erweiterung der Engstelle ins Auge gefasst werden (vgl. weiter unten).

Der nicht dominante Fall lässt uns erahnen, dass weitere Engstellen folgen werden, oder dass noch weitere höhlenklimatisch aktive Gänge/Eingänge vorhanden sind. Das Letztere ist der Grund, weshalb meteotiefe Eingänge meist dominant sind, während meteohohe meist als nicht dominant eingestuft werden.

Abschätzen des höhlenklimatisch wirksamen Volumens des Höhlensystems

Für die Abschätzung des höhlenklimatisch wirksamen Volumens des Höhlensystems führen wir in einer Periode, in der die konvektive Luftzirkulation vorherrschend ist (d. h. Atmosphärendruck stabil), erneut einen kleinen Feldversuch durch. Als höhlenklimatisch wirksames Höhlenvolumen wird das Volumen des Höhlensystems bezeichnet, das an der Luftzirkulation teilnimmt (bei der barometrischen Luftbewegung entspricht sie in etwa dem ganzen Höhlenvolumen; bei der konvektiven Luftbewegung ist das höhlenklimatisch wirksame Volumen kleiner als das ganze Höhlenvolumen).

Wir messen zuerst einmal den Druck der Höhlenluft (P_0) sowie den Volumenfluss des Höhlenwindes (v_0). Nun verengen wir den Höhlengang (z. B. mit einem Schleifsack) und messen, wie der Luftdruck (P_1) hinter dem Schleifsack steigt, bis der Volumenfluss des Höhlenwindes (v_1) sich erneut einpendelt. Mit

Hilfe der gemessenen Zeit (t), bis der Luftdruck wieder stabil ist, können wir das Volumen des Hohlraumes, der an der Luftbewegung teilnimmt, abschätzen.

Das **höhlenklimatisch wirksame Höhlenvolumen** berechnen wir mit der Formel:

$$V = \Delta t * \frac{v_0 + v_1}{2} * \frac{P_0}{P_1 - P_0}$$

(I) [Herleitung vgl. Badino, 1995 oder Filipponi, 2000]

Abschätzen der Lage der Höhleneingänge

Als nächstes versuchen wir, die Lage der Höhleneingänge zu suchen: Wir nehmen an, dass es sich um eine Höhle mit einer einfachen konvektiven Luftbewegung zwischen zwei Höhleneingängen handelt, auch wenn größere Höhlensysteme meist eine komplexere Struktur aufweisen (Filipponi, 2003). Die generelle Windrichtung zeigt uns bereits, ob es sich beim bekannten (respektive unbekanntem) Höhleneingang um den meteohohen oder meteotiefen handelt (vgl. oben Abschnitt „Die konvektive Luftbewegung“). Beobachten wir z. B. an einem sonnigen Tag (Atmosphärendruck stabil), an dem die Lufttemperatur vor dem Höhleneingang höher ist als die der Höhlenluft, dass aus dem Eingang der Wind bläst, so handelt es sich um einen meteotiefen Höhleneingang, dies bedeutet, dass vor dem anderen Höhleneingang die Luft kühler ist.

Jedoch können wir noch mehr aussagen, zum Beispiel lässt sich die Lufttemperatur der Außenluft am anderen Höhleneingang abschätzen. Hierfür messen wir am Höhleneingang den Luftfluss aus dem Höhleneingang (Windgeschwindigkeit mal Profilfläche). Aus dem oben abgeschätzten höhlenklimatisch wirk-

samen Höhlenvolumen lässt sich grob die Ganglänge des Höhlensystems (L) abschätzen. D ist die Profilfläche der „dominanten“ Engstelle (vgl. oben), also die *engste* Engstelle, die vom Höhlenwind durchflossen wird.

$$(II) \quad \Delta T = 0.00174 \frac{L}{D} * v^2$$

Damit erhalten wir eine Idee des Temperaturunterschiedes zwischen den Höhleneingängen. Machen wir unsere Beobachtungen am meteotiefen Eingang, ist die Außentemperatur am meteohohen Eingang um ΔT kleiner als beim meteotiefen, resp. umgekehrt.

In den meisten Fällen stellt sich eine konvektive Luftbewegung zwischen Höhlengängen in verschiedenen Höhenlagen ein. Dadurch lässt sich die Höhenlage des zweiten Einganges bestimmen. Dazu verwenden wir den Temperaturgradienten der Außenluft, das heißt, um wie viel °C sich die Außenluft pro 1000 Höhenmeter abkühlt (Standardatmosphäre -6.5 °C pro km). Berechnen wir z. B. ein ΔT von 5 °C, liegen die beiden Eingänge rund 750 Höhenmeter auseinander. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich eine konvektive Luftbewegung auch zwischen Höhlengängen auf derselben Höhenlage einstellen kann, wenn sich z. B. ein Höhengang in einer kühlen Schattenlage befindet, in der noch Schnee liegt, und der andere an der prallen Sonne (derselbe Effekt ist dafür verantwortlich, dass wir im Sommer bei offenen Fenstern und Türen Durchzug haben).

Bemerkung:

Auch in der Höhlenklimatologie gilt, wie so oft, einmal ist keinmal. Daher sollte die obige Abschätzung bei verschiedenen klimatischen

Situationen gemacht werden. Die Resultate der ersten Versuche werden sicherlich noch weit streuen, jedoch sollte sich mit der Zeit ein immer konkreteres Bild der Situation geben. Allerdings ist einmal besser als keinmal, doch sollte dies eine Ausnahme darstellen und die Interpretation dann mit Vorsicht genossen werden.

Die obigen Berechnungen können für eine theoretisch konstruierte, röhrenförmige Höhle angewendet werden. Der Normalfall mit verzweigten Höhlengängen ist einiges komplexer, jedoch lassen sich erste Abschätzungen über das Höhlenpotential machen, was ja auch schon nicht schlecht ist .

Kleines Rechenbeispiel:

Seit längerem ist das Blasloch am Fuße der Felswand bekannt. Ob es der untere Eingang eines größeren Höhlensystems sein könnte, das das darüber liegende Karstplateau entwässert? An einem sonnigen, wolkenlosen Tag steigen wir ausgerüstet mit Thermometer, Anemometer (Messen der Windgeschwindigkeit) und Barometer (Messen des Luftdrucks) zum Höhleneingang.

> Wir beobachten, wie aus dem Höhleneingang ein kräftiger Luftzug bläst.

* Da es Sommer ist, befinden wir uns vermutlich am **meteotiefen Eingang** des Höhlensystems.

> Wir messen die Temperatur der Außenluft

$$T_A = 20 \text{ °C}$$

die Temperatur der herausströmenden Luft

$$T_A = 10 \text{ °C}$$

* Wir schließen daraus, dass es sich um einen **meteotiefen Höhleneingang** handelt, und dass die Temperatur der Außenluft am meteohohen Höhleneingang weniger als 20 °C beträgt.

> Als nächstes messen wir den Luftdruck im Höhlengang $P_0 = 101.325 \text{ Pa}$

den Luftfluss $v_0 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$

> Wir verstopfen den Höhleneingang mit einem Schleifsack und messen die Zeit bis sich der Luftdruck stabilisiert hat $\Delta t = 10 \text{ s}$

den neuen Luftdruck im Höhlengang

$$P_1 = 101.515 \text{ Pa}$$

den neuen Luftfluss $v_1 = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$

* Das Verringern des Luftflusses durch das Verengen der Engstelle bedeutet, dass es sich um eine dominante Engstelle handelt, die das ganze Höhlenklima beeinflusst.

Anhand der Formel (I) lässt sich ein **höhlenklimatisch wirksames Höhlenvolumen von rund 4.000 m³** abschätzen. Jedoch wissen wir nicht, ob es sich um eine große Halle oder ein längeres Gangnetz handelt.

>Als Nächstes schätzen wir die Lage des **zweiten Höhleneinganges**.

Hierfür nehmen wir den Luftfluss des obigen Feldversuches $v_0 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$

da wir wissen, dass die Engstelle den Luftfluss dominiert, können wir die Profilfläche der Engstelle für D nehmen $D = 0.5 \text{ m}^2$

die mögliche Höhlenganglänge schätzen wir durch das berechnete höhlenklimatisch wirksame Höhlenvolumen (4.000 m³), indem wir es durch die mittlere Gangprofilfläche teilen, die wir aus anderen Höhlen der Umgebung kennen (4 m^2) $L = 1.000 \text{ m}$.

* Mit der Formel (II) erhalten wir ein **ΔT von rund 3.5°C**. Da wir uns am meteotiefen Eingang befinden, wissen wir, dass die Außenlufttemperatur vor dem meteotiefen Eingang rund 3.5 °C tiefer sein sollte. Können wir annehmen, dass dieser Temperaturunterschied nicht durch eine spezielle mikroklimatische Lage begründet ist und der Temperaturgradient der Außenluft -6.5°C/km beträgt, wird der meteohohe Eingang **rund 550 Höhenmeter** höher liegen.

Wann muss eine Klimatür eingebaut werden?

Das Öffnen eines Höhlenganges oder das Aufweiten einer Engstelle kann die höhlenklimatischen Verhältnisse in einer Höhle drastisch verändern. Die Folge davon sind z. B. das Austrocknen von Tropfsteinen, Wegschmelzen von Höhleneis, Zerstören von Fledermauswinterquartieren ... *Schäden, die irreversibel sind!* Daher sollte man sich bereits zu Beginn einer Grabaktion überlegen, ob es nötig sein wird, eine Klimatür einzubauen.

Eine Klimatür ist eine dauerhafte Tür, die die ursprüngliche höhlenklimatisch wirksame Profilfläche wieder herstellt.

Der Einfluss einer Grabaktion auf das Höhlenklima hängt vom Ausmaß der Grabaktion ab: Wird ein Höhlengang um einige Dezimeter aufgeweitet, oder wird entlang einer unbegehbaren Spalte ein Stollen vorangetrieben? Des Weiteren kommt es auf die Klimawirksamkeit der Engstelle an. Handelt es sich um eine dominante Engstelle (siehe oben)? Eine Über-den-Daumen-Empfindlichkeits-Analyse des Einflusses der Aufweitung der Engstelle auf den Höhlenwind kann mit der Formel II gemacht werden. Jedoch sollte diese Abschätzung nur richtungweisend sein, der endgültige Entscheid über die Notwendigkeit des Einbaus einer Klimatür soll mit Daten einer entsprechenden Messreihe nach dem Durchbruch gemacht werden.

Messtechnik oder die Sache mit der Auswahl der Messgeräte

Zur Beschreibung eines Klimas werden jeweils mehrere Klimazustände (z. B. Sommer und Winter, Regenperiode und Trockenperiode, ...) beobachtet, wozu üblicherweise Messstationen aufgestellt werden, die in regelmäßigen

Zeitabständen die Zustände der Klimaelemente messen. Gemessen wird meist mit Dataloggern. Datalogger sind Einheiten, die selbständig Messungen steuern und die Werte speichern. Datalogger können mit verschiedenen Fühlern ausgerüstet werden (Temperatur, Druck, Feuchtigkeit ...), die die Art und Genauigkeit der Messung bestimmen.

Generelle Anforderungen an die Messgeräte

Was für Messgeräte zum Einsatz kommen, hängt im Wesentlichen von der Fragestellung ab. Soll das Langzeitverhalten des Höhlenklimas beobachtet werden? Sollen Klimabeobachtungen während den Vermessungstouren gemacht werden? Soll ein spezielles Klimaelement genauer untersucht werden? Die Art des Einsatzes bestimmt die nötige Genauigkeit der Messgeräte, das Speichervolumen der Daten, das Packmaß/Gewicht, den Energiebedarf ...

Jedoch haben höhlentaugliche Messgeräte einiges gemeinsam:

- hohe Messgenauigkeit (z. B. Temperatur mind. $\pm 0.2^\circ\text{C}$)
- Wasserdichte (Luftfeuchtigkeit, Hochwasser)
- hohe Speicherkapazität (das Gerät muss unter Umständen mehrere Jahre messen, bis der Speicher ausgelesen wird)
- geringen Energiebedarf
- relative Unempfindlichkeit auf mechanische Einwirkungen (Transport, Hochwasser ...)

Die Sache mit der Messgenauigkeit und der Auflösung

Die Begriffe „Genauigkeit“ und „Auflösung“ müssen klar auseinander gehalten werden. Es gibt (billige) Thermometer, die Zehntelgrad anzeigen (Auflösung), doch nur eine

Messgenauigkeit von $\pm 2^\circ$ erreichen. Das heißt: Wird zum Beispiel der Wert von 4.63°C abgelesen, liegt der „wahre“ Wert der Temperatur mit 95% Wahrscheinlichkeit zwischen 2.63 und 6.63°C .

Die mindestens geforderte Genauigkeit der Messgeräte sollte in der Regel rund 10% der erwarteten Varianz des zu untersuchenden Klimaelements sein.

Angenommen, wir wollen z. B. die Veränderung des Höhlenwindes im Verlauf eines Tages messen. Aus Einzelbeobachtungen erwarten wir, dass die Windgeschwindigkeit sich zwischen 0.5 m/s und 2 m/s bewegt. Demzufolge ist der Einsatz eines Messgerätes mit einer Genauigkeit von rund $\pm 0.4\text{ m/s}$ angebracht. *Wobei der Messintervall so gewählt wird, dass pro Zyklus mindestens 10 Messungen zur Interpretation zur Verfügung stehen;* das würde im Fall des Beispiels des „Tages-Windverlaufs“ mindestens alle zwei Stunden eine Messung bedeuten.

(Für eine tiefere Auseinandersetzung der Planung, Durchführung und Auswertung von Höhlenklimauntersuchungen sei auf die einschlägigen Kapitel in Filipponi 2000 und 2003 verwiesen.)

Literatur

- BADINO G. (1995): Fisica del Clima Sotterraneo. Istituto Italiano di Speleologia, Bologna.
- FILIPPONI M. (2003): Das Höhlenklima der Schrattenhöhle (Schweiz) – Auswertung einer 10 jährigen Messreihe. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima, 2003.
<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/cgi-bin/show.pl?type=semarb&nr=45>
- FILIPPONI M. (2000): Höhlenklimaskript. Arbeitsgemeinschaft für Speläologie Regensdorf, p. 1–67, Regensdorf. www.agr.ch

Nützliche Dokumente

- Standard für Langzeitlufttemperaturmessungen in Höhlen (Höhlenklimagruppe der SGH), www.agr.ch/klima
- Messprotokoll Höhlenklimamessungen (Höhlenklimagruppe der SGH), www.agr.ch/klima
- Aufnahmeblatt Höhlenklimabeobachtungen der Arbeitsgemeinschaft für Speläologie Regensdorf, www.agr.ch/klima
- Höhlenklimagruppe der Schweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung (SGH), www.isska.ch/climat

Autor:

Marco Filipponi
Neugrütstrasse 1
CH-5332 Rekingen
info@agr.ch