

Interpretation von kurzzeitigen Druck- und Temperaturschwankungen eines Höhlenbaches: Kreuzloch (Unteriberg, SZ)

Martin Lüthi¹

Zusammenfassung: Wir beobachteten kurzzeitige Veränderungen von Druck und Temperatur eines Höhlenbaches während Winter und Frühjahr. Daraus lassen sich deutlich verschiedene Phasen der Bewetterung und des Wärmeaustausches ablesen. Im Winter kühlt durch den Kamin-effekt kalte, von aussen angesogene Luft das System aus. Bei kleinen Hochwasser-Pulsen steigt die Wassertemperatur zuerst an, bevor sie sich merklich abkühlt. Vermutlich wird dabei geotherm erwärmtes Kluftwasser aktiviert. Bei starker Schneeschmelze kühlt sich der Höhlenbach um 1.5 Grad ab. Der Wärmehaushalt in einer aktiven Wasserhöhle ist also durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Prozesse bestimmt.

Abstract: We observed short-term variations of pressure and temperature of a cave stream during the winter and spring season. Different phases of air and water circulation and heat exchange can be clearly delimited. During winter the chimney effect cools the cave through aspiration of cold air from outside. During short high-water pulses the water temperature first rises, before it cools markedly. Presumably, geothermally tempered interstitial water is activated. During strong snow melt the cave river cools by 1.5 degrees. Heat exchange within an active water cave is thus a complex interplay between different competing processes.

Lage und hydrologische Charakteristik

Das Kreuzloch im hintersten Waagtal (Gemeinde Unteriberg) ist eine aktive Wasserhöhle im Schrattekalk (untere Kreide), die auf einer mit 10 Grad Neigung nach W einfallenden Schicht aus Drusbergmergeln als Basis-System liegt (z.B. HANTKE & KURIGER, 2003). Der Eingang, der schnell zum untersten Ende des ganzjährig aktiven Höhlenbaches absteigt, liegt auf 1310 m ü. M. Der Höhlenbach wird aus drei Zubringern gespeist, die alle eine permanente Wasserführung aufweisen: Der Hauptgang kann auf 800 Metern Länge bis zu einem grossen Siphon verfolgt werden, der Leschterigang als nördlicher Zubringer ist ebenfalls permanent aktiv. Die Breite des Gangzuges beträgt durchwegs um 2 Meter, mit Höhen von typischerweise 4-10 Metern. An einigen Stellen erweitert er sich zu Hallen, deren grösste die Ybrigerhalle mit 30x10x10 m ist. Die Ganganlage ist kluftgebunden und zum grossen Teil vados, wobei oft ein typisches Schlüssellochprofil beobachtet werden kann.

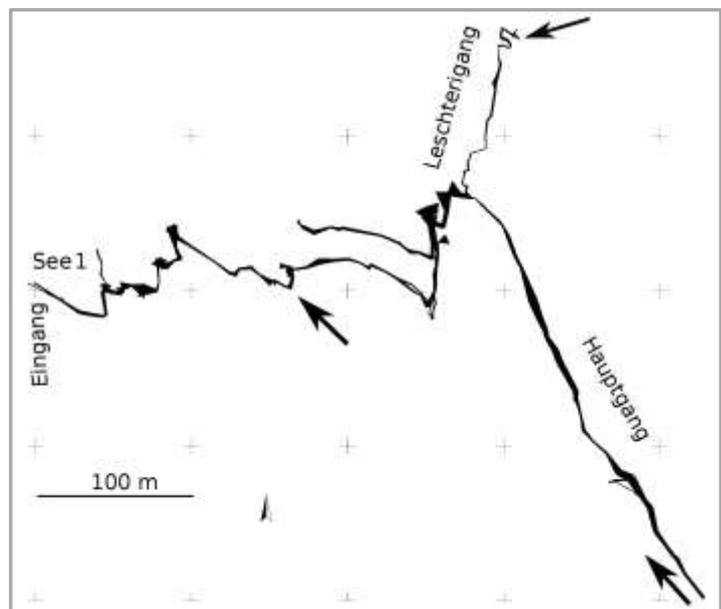


Fig. 1: Übersichtsplan des Kreuzlochs. Die Zubringer sind mit Pfeilen markiert. Wasserdruck und Temperatur wurden beim See 1 unweit des Eingangs gemessen.

¹ Höhlengruppe Ybrig (HGY), Unteriberg SZ,
Adresse: Wäni 4, 8840 Trachslau
luethi@vaw.baug.ethz.ch

Wasserstands-Messungen

An der im Höhlenplan (Fig. 1) bezeichneten Mess-Stelle See1 wurde ein autonomer Daten-Logger mit Drucksensor, Temperatursensor und Beschleunigungssensor beweglich installiert. Der Logger vom Typ MSR-145 kann 1.2 Mio. Messwerte speichern, was für ein halbes Jahr Aufzeichnung von Druck und Temperatur (jede Minute), und der 3D-Lage alle 5 Minuten reicht. Der Logger wurde in einem 20 cm langen 2-Zoll Rohrstück eingebaut, das an einem Drahtkabel frei hängend an einem Bohrhaken befestigt wurde. Die Idee dabei ist, dass bei starker Strömung das Rohr mitgezogen wird und schräg steht, und man somit zwischen fließendem und stehendem Wasser unterscheiden kann. Die unterschiedlich starke Auslenkung bei verschiedenen Geschwindigkeiten ist damit ein Mass für die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers. Allerdings schwankt diese Auslenkung stark, und muss in einer bekannten Strömung kalibriert werden.

Figur 2 zeigt die Schwankungen des Wasserspiegels im See1, die aus den gemessenen Wasserdruckschwankungen berechnet, und mit dem oberflächlich gemessenen Luftdruck korrigiert wurden. Der Seespiegel schwankt bei kleinen Niederschlags- und Schneeschmelz-Ereignissen um etwa einen Meter. Der Basisabfluss im Winter beträgt etwa 100 Liter/Minute. Bei einem sehr grossen Sommerhochwasser (nicht gezeigt) wurde der Eingang als Überfluss aktiviert, was zu einem Anstieg des Wasserspiegels um 8 Meter in 20 Minuten führte. Dabei werden die vordersten 100 Meter des Gangzuges vollständig geflutet. Der geschätzte Maximalabfluss beträgt dann 5-10 Kubikmeter/Sekunde (basierend auf Gangquerschnitt, Neigung und Tab. 1 in JEANNIN, 2001).

Die Variationen des Wasserspiegels im See1 zeigen grosse Unterschiede: bis zum Wassereinbruch am 21. März verändert sich der Abfluss nur langsam mit langen Phasen von kontinuierlichem Absinken des Wasserspiegels. Der Wassereinbruch am 21. März wurde von einem Niederschlagsereignis bei abrupt steigender Temperatur verursacht. Ab dem 21. März sieht man tageszeitliche Wasserschwankungen sobald die Aussen-temperatur 5 Grad übersteigt, die mit der fortschreitenden Schneeschmelze zusammenhängen. Dazwischen (um den 1. April und um den 13. April) gibt es Kaltphasen während derer der Wasserspiegel ohne Schwankungen wieder langsam absinkt.

Wassertemperatur

Episodische Messungen der Wassertemperatur während Höhlenbefahrungen im Winter ergaben, dass alle Zubringer des Höhlenbaches eine Temperatur um 5.5 ± 0.3 °C aufweisen. Bis Mitte April folgt die Wassertemperatur beim See1 ziemlich genau der Lufttemperatur, wie Figur 2 schön zeigt. Dies ist eine Folge des Höhlenwindes: wenn die Aussenluft deutlich kälter ist als 5 °C, kühlt die höhleneinwärts strömende Luft das Wasser des See1 und des eingangsnahen Teils des Baches erheblich ab. Bei auswärts ziehendem oder stagnierendem Luftzug sind Wasser- und Lufttemperatur in etwa gleich, nämlich bei 5.4 °C.

Besonders interessant ist die Wassertemperatur im Mai. Trotz steigender Aussen-temperaturen nimmt die Wassertemperatur um ein Grad ab. Die grossen Wassermengen (hoher Wasserspiegel) mit starken täglichen Schwankungen stammen aus der Schneeschmelze. Das eindringende Schmelzwasser hat eine Temperatur von 0 °C und erwärmt sich in der Höhle auf 4.5 °C. Wegen des grossen Wasser-volumens und des schnellen Fließens erreicht das Wasser nicht die Höhlentemperatur von 5.4 °C.

Bewetterungs-Phasen

In der Messperiode lassen sich verschiedene Phasen der Bewetterung und der Wassertemperatur unterscheiden, die in Figur 2 farbig dargestellt sind:

- passive Phase P (grün): Der Wasserfluss ist gering oder nimmt ab, kein Zufluss von aussen. Die Wassertemperatur pendelt sich zwischen 5.3 °C und 5.4 °C ein.
- aktive Phase A (rot): plötzliches Ansteigen des Wasserflusses, Wassereinbruch. Die Wassertemperatur steigt leicht an, auf etwa 5.5 °C.
- Kaminphase K (hellblau): Das Höhlensystem wird durch den Kamineffekt im vorderen Bereich stark abgekühlt. Die vom Höhlenwind angesogene kalte Aussenluft kühlt den See1 und den eingangsnahen Bereich des Baches aus. Die Wassertemperatur fällt sehr stark (um bis zu 2 °C), und in Abhängigkeit von der Aussen-temperatur.
- Schmelzwasser-Phase S (dunkelblau): Eindringendes Schmelzwasser kühlt die Höhle aus, und senkt die Temperatur des Baches um bis zu 1.5 °C (Mitte April bis Mai).

Die Kaminphase beginnt ungefähr dann, wenn die Aussen-temperatur (in Einsiedeln) unter den Nullpunkt fällt. Interessant ist, dass jedes Mal bei steigendem Seespiegel (höherem Wasserfluss) die Wassertemperatur ansteigt, besonders deutlich am Ende der Kaminphasen. Dann wird „warmes“ Wasser aus dem Innern des Berges aktiviert, das zum grossen Teil Kluftwasser sein dürfte. Dieses Wasser wird wohl wegen des kleinen Durchflusses vom geothermen Wärmefluss aufgewärmt.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Temperaturmessungen in Höhlenbächen erlauben es, Rückschlüsse über die Geometrie und die hydrologischen Eigenschaften von Karstaquiferen zu gewinnen (z.B. BIRK et al., 2004). Dabei lassen sich verschiedene Muster der Temperatur-Reaktion klassifizieren (LUHMANN et al., 2011).

Die Temperatur des Höhlenbaches im Kreuzloch zeigt starke Änderungen, die von den vorherrschenden Bewetterungs-Phasen und damit von der Aussen-temperatur, abhängen. Während die generelle Auskühlung im Winter zu erwarten ist, erstaunt die anfängliche Erwärmung beim Ansteigen des Wasserflusses bei einem kleinen Hochwasser. Eine naheliegende Interpretation dafür ist die Aktivierung von relativ warmem Kluftwasser, das vom geothermen Wärmefluss aufgewärmt wird. Dies ist

analog zu dem in LUHMANN et al. (2011) beschriebenen Muster 4 (langsam durchsickerndes Wasser das sich längere Zeit aufwärmen kann). Schmelzwasser von der Oberfläche kühlt hingegen das System um etwa ein Grad ab. Dies ist vergleichbar mit Muster 1 (schnelles Ereignis).

Der Wärmehaushalt einer aktiven Karsthöhle hängt stark von sich schnell ändernden Größen wie Winter-Bewetterung, Einbruch von Schmelzwasser und Niederschlägen

im Sommer ab, die viel Kälte oder Wärme in die Höhle führen, wie weitere Messungen im Jahr 2011 ergeben haben. Durch systematisches Monitoring von Wasserdruck- und Temperaturschwankungen entlang eines Höhlenbaches können Wärmeaustausch und Aquifergeometrie durch inverse Modellierung quantitativ interpretiert werden (LONG & GILCREASE, 2009; COVINGTON et al., 2011). Ein solches Messprogramm ist zurzeit entlang des Kreuzloch-Baches im Aufbau.

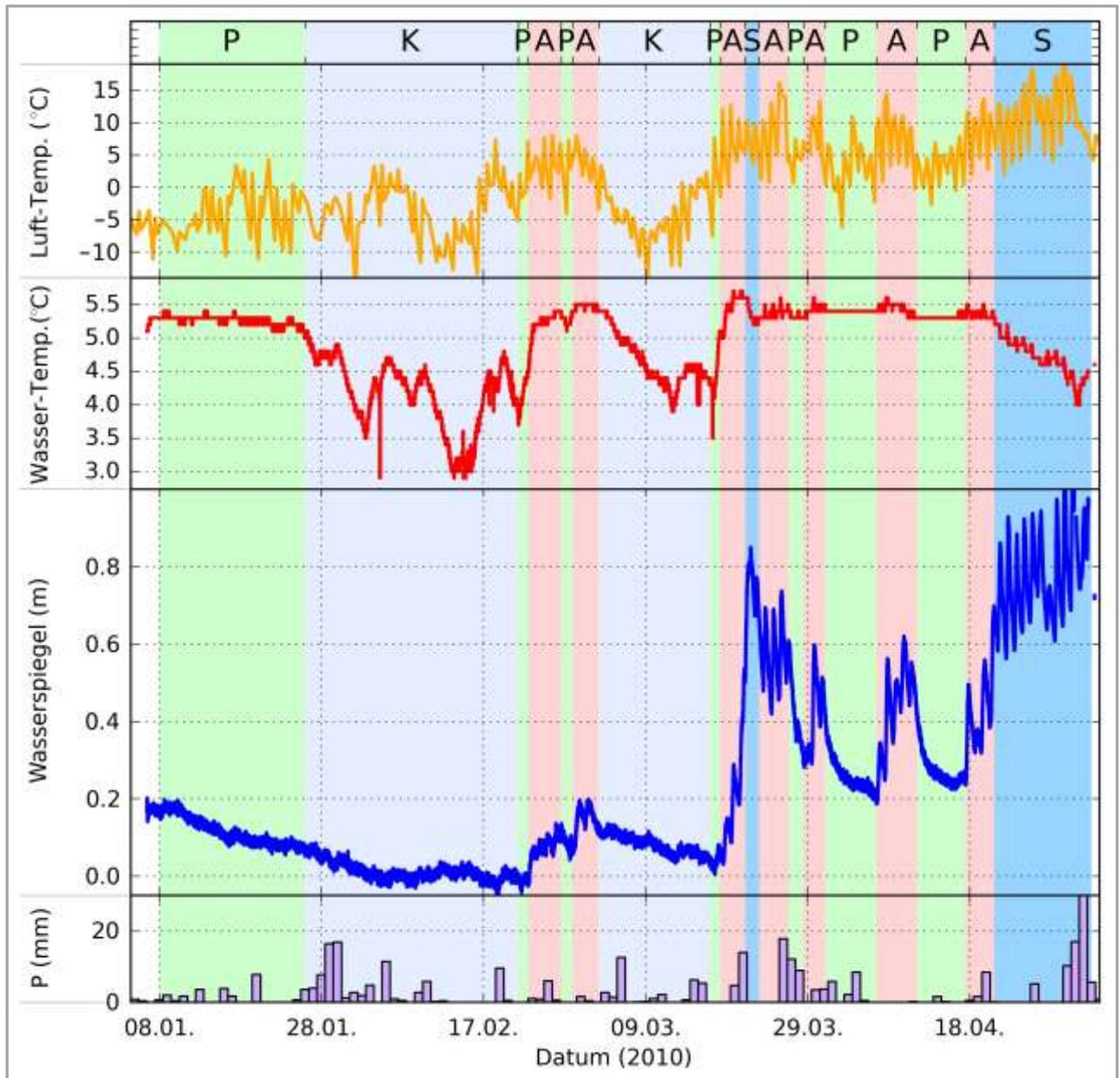


Fig. 2: Die Variation des Seespiegels (blau), der Wassertemperatur (rot), sowie die Lufttemperatur im Kloster Einsiedeln (orange). Niederschläge (P) in Einsiedeln sind mit Balken dargestellt.

Die Hintergrundfarben bezeichnen verschiedene Phasen, die auch zuoberst angegeben werden: passiv (P, grün), der Wasserspiegel sinkt; aktiv (A, rot), der Wasserspiegel steigt und das Wasser wird wärmer; Kamin (K, hellblau), Abkühlung durch die angesogene Aussenluft; Schmelzwasser (S, dunkelblau), Abkühlung durch eindringendes Schnee-Schmelzwasser von der Oberfläche.

Literatur

- BIRK S., LIEDL R., SAUTER M. (2004): Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physicochemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany), *Journal of Hydrology*, 286, 179–193.
- COVINGTON M. D., LUHMANN A. J., GABROVSEK F., SAAR M. O., WICKS C. M. (2011): Mechanisms of heat exchange between water and rock in karst conduits, *Water Resources Research*, vol. 47, W10514, doi:10.1029/2011WR010683.
- HANTKE R., KURIGER E. (2003): Überblick über die Geologie des Kantons Schwyz und seiner Nachbargebiete. In: *Geologie und Geotope im Kt. Schwyz* (S. Lienert, ed.), Ber. Schwyz. Natf. Ges. 14, pp. 9–34.
- JEANNIN P.-Y. (2001): Modelling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the Hölloch Cave (Muotathal, Switzerland). *Wat. Resour. Res.*, 37 (2) (2001), pp. 191–200.
- LONG A.J., GILCREASE P.C. (2009): A one-dimensional heat-transport model for conduit flow in karst aquifers. *Journal of Hydrology* Vol. 378, pp. 230–239, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.024.
- LUHMANN A. J., COVINGTON M. D. COVINGTON, PETERS A. J., ALEXANDER S. C., ANGER C. T. ANGER, GREEN J. A., RUNKEL A. C., ALEXANDER E. C. JR. (2011): Classification of Thermal Patterns at Karst Springs and Cave Streams. *Ground Water*, Vol. 49, No. 3. pp. 324-335.