Hydrologie der Riesending-Schachthöhle

ZUSAMMENFASSUNG

Die Riesending-Schachthöhle im Untersberg bei Salzburg war über mehrere Jahre Ziel hydrologischer Messungen. An drei Fließgewässern in der Höhle wurden alle 5 Minuten Wasser- und Luftdruck sowie Wassertemperatur gemessen. Ergänzend erfolgten Abflussmessungen am *Auenbach*. Darüber hinaus wurden in der vadosen Zone die Temperaturgradienten von Wasser und Luft bestimmt. Die Daten aus dem Riesending werden mit Beobachtungen aus der Fürstenbrunner Quellhöhle und der Kolowrathöhle verglichen. Der in diesen beiden Höhlen bereits nachgewiesene einheitliche Karstwasserspiegel korreliert mit dem Endsiphon des *Krakencanyons* im Riesending, dessen Tiefe um 6 m auf –1155 m korrigiert wird. Die Wassertemperatur am Karstwasserspiegel liegt etwas höher als die der Zuflüsse. Die Temperaturdifferenz wird auf den Einfluss der Erdwärme zurückgeführt. Aus der raschen Reaktion des Wasserspiegels des *Unheimlichen Sees* in der *Fürstenbrunner Quellhöhle* auf Niederschlagsereignisse lässt sich schließen, dass Steigungsregen am Nordhang des Bergs einen wesentlichen und unmittelbaren Einfluss auf den Wasserstand hat.

ABSTRACT

Hydrology of Riesending-Schachthöhle

The hydrology of this cave located in the Untersberg near Salzburg has been studied over the course of several years. Water and air pressure as well as water temperature were logged every five minutes at three cave streams. In addition, the discharge of the *Auenbach* stream as well as the air and water temperature gradients in the vadose zone of the cave were also measured. The data from this study are compared to those from Fürstenbrunner Quellhöhle and Kolowrathöhle. The uniform karst water table, previously identified in Quellhöhle and Kolowrathöhle, correlates with the final sump of *Krakencanyon* in Riesending, whose depth is adjusted by 6 m to –1155 m. The water temperature at the karst water table is slightly higher than that of the monitored in-feeders. This difference can be attributed to geothermal heat. The fast reaction of the water level of *Unheimlicher See* in Fürstenbrunner Quellhöhle indicates that relief rainfall on the northern slope of the mountain has a major and immediate impact on the water table.

Ulrich Meyer
Schlossmatte 17, 3110 Münsingen, Schweiz
ulrich.meyer@aiub.unibe.ch

Georg Zagler
König-Ludwig-Str. 20, 5020 Salzburg
gzagler@yahoo.de

Giorgio Höfer-Öllinger
Geoconsult ZT GmbH, Hölzlstr. 5, 5071 Wals bei Salzburg
giorgio.hoefer-oellinger@geoconsult.eu

Eingelangt: 13.3.2017
Angenommen: 30.5.2017

EINLEITUNG

Im Spätherbst 2009 wurden im Untersberg in der Riesending-Schachthöhle (1339/336) am Endsiphon des *Sammlers* in 987 m Tiefe und an der wahrscheinlichen Wiederaustrittstelle der Wässer, am *Talsiphon* der Fürstenbrunner Quellhöhle (1339/10), Messsonden installiert, die hochaufgelöst Wasserdruck und Wassertemperatur aufzeichnen. Aus diesen bescheidenen Anfängen entstand in den Folgejahren ein in seinem Umfang wohl einmaliges hydrologisches Messprogramm, in dessen Rahmen nicht nur weitere Sonden in Riesending und Quellhöhle, sondern auch im Mausloch (1339/40) und sukzessive, immer am Puls der aktuellen Höhlenforschung, an zahlreichen Bachläufen und Siphonen in der Kolowrathöhle (Teil des Gamslöcher-Kolowrat-Salzburgerschacht-Systems, 1339/1) platziert wurden. Flankiert wurden die Druckmessungen im Berg von Abflussmessungen einzelner Höhlenbäche und hydrochemischen und isotopischen Quellbeprobungen rund um den Berg (Bichler & Reischer, 2013; Reischer et al., 2015).

Dabei ist es gelungen, im Berg einen zusammenhängenden Karstwasserkörper vom *Unheimlichen See* in der Quellhöhle, über die Siphonseen *Neue Heimat* und *Tiefsee*, bis zur *Orkträne* in der Kolowrathöhle fast 2 km weit in den Berg hinein nachzuweisen (Gruber, 2014). Darüber hinaus konnte anhand der Isotopenanalyse eine mittlere Höhe des Einzugsgebiets zwischen 1650 m und 1700 m Seehöhe und eine mittlere Verweildauer des Wassers der Fürstenbrunner Quellhöhle von 4-5 Monaten bestimmt werden (Reischer et al., 2015). Die errechnete Verweildauer steht im Einklang mit geringen Abstandsgeschwindigkeiten von Tracern bei Färbeversuchen, die 1967–1982 durchgeführt wurden (Haseke-Knapczyk, 1989).

Im Riesending stellte sich der ursprünglich beobachtete Siphon des *Sammlers* als hängend und von der Quelle weitgehend entkoppelt heraus. In den Schwankungsbereich des mit Quellhöhle und Kolowrathöhle gemeinsamen Karstwasserspiegels gelang es erst im November 2013, im *Krakencanyon* abzusteigen. Bei dieser Tour wurde 1148 m unter dem Einstieg eine Drucksonde im Bachlauf des *Krakenbachs* installiert, deren Bergung sich jedoch durch den Unfall im Riesending im Juni 2014 (Steinmassl, 2014) verzögerte. Mittlerweile ist der Zugang zur Höhle geregelt und die Forschung wieder angelaufen. Im Oktober 2016 wurde wenige Meter jenseits des Loggerstandorts und nur 1 m tiefer der Endsiphon des *Krakencanyons* entdeckt und der Logger geborgen, der neben den Schüttungsschwankungen des *Krakenbachs* auch beträchtliche Schwankungen des Karstwasserspiegels aufgezeichnet hat. Die bislang unveröffentlichten Messungen aus dem Riesending werden ausgewertet und mit den von Gruber (2014) diskutierten Messungen aus Quellhöhle und Kolowrathöhle verglichen.

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Der Untersberg ist ein isoliert stehendes Massiv der Nördlichen Kalkalpen und der Hausberg Salzburgs (Zagler, 2016). Seine Gipfelregion wird von einem 11 km² großen verkarsteten Plateau ohne oberirdischen Abfluss eingenommen, dessen höchste Gipfel der Berchtesgadener (1973 m) und der Salzburger Hochthron (1853 m) sind. Hydrologisch bildet der Untersberg eine ca. 70 km² große Einheit einschließlich seiner südöstlich vorgelagerten Vorgebirge; das eigentliche Bergmassiv nimmt noch etwa 40 km² ein. Während die ostgerichteten Flanken aus Dolomit bestehen und Niederschlag oberirdisch der Berchtesgadener Ache zuleiten, entwässert der Rest des Berges im Wesentlichen unterirdisch über die Fürstenbrunner

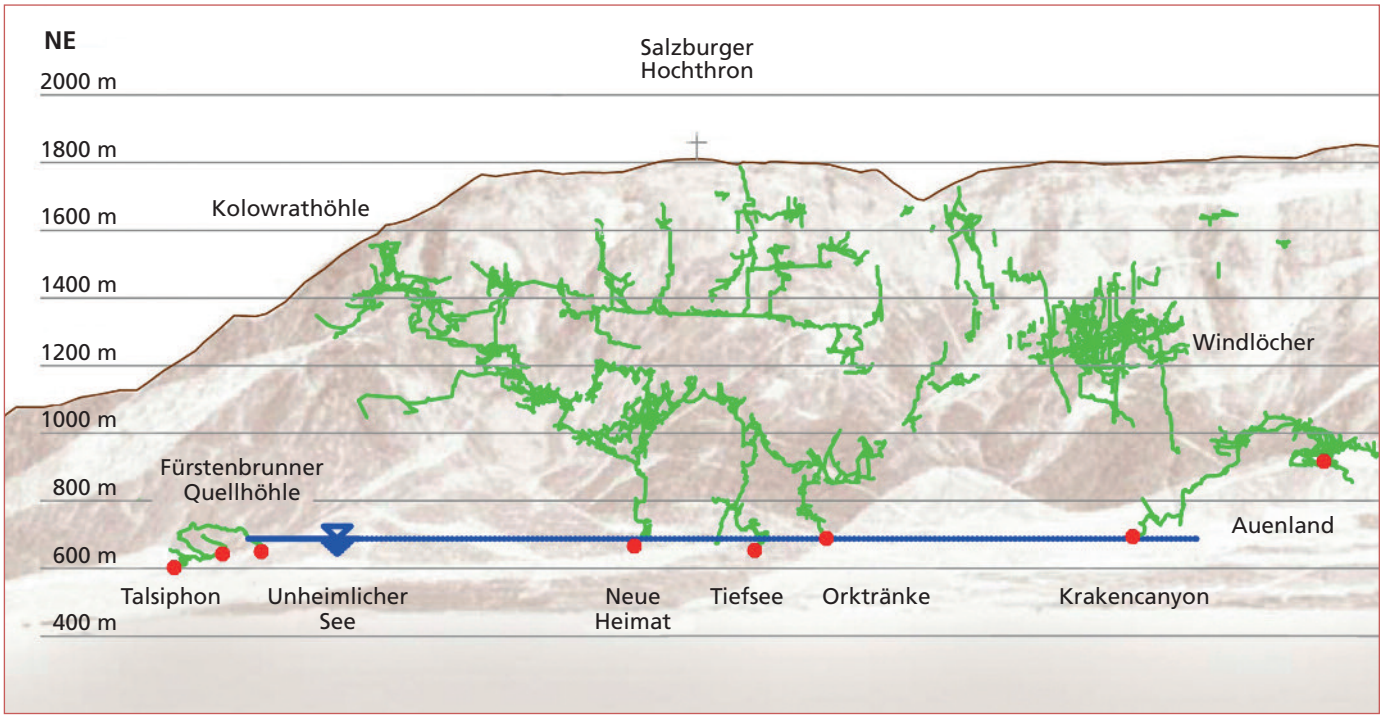


Abb. 1: Aufriss des Untersbergs mit Polygonzügen der vermessenen Höhlen. Standorte von Drucksonden sind rot markiert, der Sommerüberlauf des Unheimlichen Sees blau (verändert nach Zagler, 2016).

Quelle am Nordrand, die kleinere Karstquelle Mausloch am Westfuß und untergeordnet über den Quellbezirk Kühlbach/Veitlbruch, ebenfalls am Nordrand des Bergs. Das Einzugsgebiet der Fürstenbrunner Quelle wird mit 15 bis 20 km² angenommen (je nachdem wie weit hinab die Flanken des Bergs noch zum Einzugsgebiet zu zählen sind). Vom Plateau liegen auch Markierungsversuche von 1967–1982 vor (Haseke-Knapczyk, 1989), die Laufzeiten bis zum Erstnachweis von 6 (von der Kolowrathöhle) bis zu 157 Tagen (vom Hirschanger) ergeben haben.

Die Fürstenbrunner Quelle ist für die Versorgung der Stadt Salzburg gefasst, ihr Wasser wird heute im Vorfeld des Bergs versickert und speist den Tiefbrunnen Glanegg. Die mittlere Schüttung wird von Haseke-Knapczyk (1989) mit 660 l/s (10-jähriges Mittel, bestimmt während der internationalen hydrologischen Dekade 1966–1975) angegeben, die Maximalschüttung mit 10 m³/s. Gruber (2014) berechnete aus Schüttungs- und Wasserstandsmessungen in der Höhle während der Messperiode von 2010 bis 2014 jährliche Mittel zwischen 684 und 1127 l/s und ein 4-jähriges Mittel von 870 l/s, also deutlich mehr als das von Haseke-Knapczyk angegebene 10-jährige Mittel von 660 l/s (1966–1975). Bei einem Jahrhunderthochwasser Anfang Juni 2013 wurden bei abklingender Schüttung in der Quellhöhle 14,6 m³/s gemessen, die Schüttungsspitze aus Extrapolation der Schüttungskurve und vergleichender Beobachtung mit dem Glanbach auf 31–33 m³/s geschätzt (Höfer-Öllinger et al., 2016). Die mittlere Verweildauer des Wassers im Berg wurde von Reischer et al. (2015) anhand von Isotopenanalysen auf 4–5 Monate bestimmt, die mittlere Höhe des Einzugsgebiets auf 1650 bis 1700 m.

Schon von Haseke-Knapczyk (1989) wurde ein von der Quellhöhle weit unter das Plateau reichender, zusammenhängender Karstwasserspiegel postuliert, der durch die gemessenen Wasserstände im *Unheimlichen See* der Fürstenbrunner Quellhöhle und den Siphonseen *Neue Heimat*, *Tiefsee* und *Orktränke* der Kolowrathöhle nun auf über 1,9 km Horizontalerstreckung nachgewiesen werden konnte (Gruber, 2014). Auch der 2016 entdeckte Endsiphon des *Krakencanyons*, knapp 2,7 km von der Quellhöhle entfernt, scheint zum gleichen Wasserkörper zu gehören (Abb. 1). Die Fürstenbrunner Quelle reagiert schnell auf Niederschlagsereignisse, doch ist diese Reaktion rein hydraulisch (über kommunizierende Röhren). Das Wasser der Quelle ist durch die lange Verweilzeit gut durchmischt und zeigt weder in der Temperatur noch in den hydrochemischen Parametern eine deutliche Reaktion auf Niederschlagsereignisse, jedoch einen Jahresgang, wobei die tiefsten Temperaturen im Juni erreicht werden (als Folge der meist Mitte März einsetzenden Schneeschmelze).

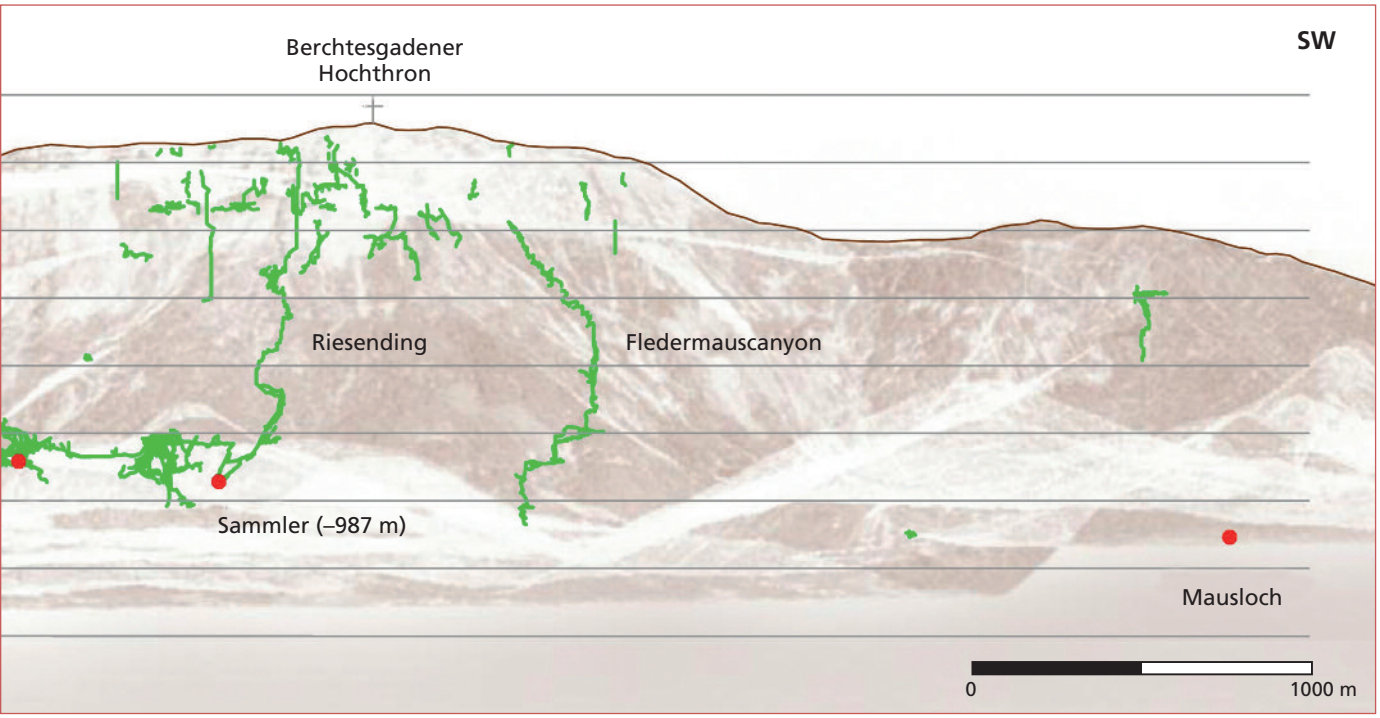


Fig. 1: Vertical section of Untersberg with centre line plots of all major caves. Pressure gauges are indicated by red dots and the water table of the sump Unheimlicher See by a blue line (modified after Zagler, 2016).

RIESENDING-SCHACHTHÖHLE

Die Riesending-Schachthöhle (im Folgenden kurz Riesending) ist mit 20 km Länge und 1149 m Tiefe die längste und tiefste Höhle Deutschlands. Ihr Einstieg öffnet sich auf 1843 m Seehöhe unweit des Berchtesgadener Hochthrons. Die ersten 300 m führen in senkrechten Schächten in die Tiefe, worauf Canyonpassagen, unterbrochen von kürzeren Schachtstufen, folgen. In 350-400 m Tiefe (1440–1490 m Seehöhe) und auf 870 m Tiefe (970 m Seehöhe) werden ausgeprägte Horizontalniveaus angetroffen (Abb. 2). Das untere Horizontalniveau folgt bis unter das zentrale Plateau im Bereich des Mitterbergs einer Nordwest streichenden Störung, bevor es nach Nordosten in Richtung von Kolowrathöhle und Fürstenbrunner Quellhöhle umschwenkt. Es beeindruckt durch großvolumige, unter phreatischen Bedingungen entstandene Gänge. Im Bereich der *Krakenhalle* vereinigt sich der Hauptgang des Riesendings mit einem nicht minder mächtigen, heute inaktiven Zubringer. Eine Fortsetzung auf gleicher Höhe jenseits der *Krake* konnte noch nicht gefunden bzw. erreicht werden, dafür zieht der unter der Halle ansetzende *Krakencanyon* steil bis zum Karstwasserspiegel hinab, wobei er sich der Kolowrathöhle bis auf etwa 900 m nähert. Im Oktober 2016 wurde hier am Grunde eines ausgedehnten Überflutungsbereichs in 1149 m Tiefe (694 m Seehöhe) ein Siphon erreicht. Die Forschungsgeschichte der Höhle sowie detailliertere Raumbeschreibungen finden sich in Meyer & Matthalm (2007, 2009, 2011). In Meyer (2012) wird das Riesending in Relation zu den anderen Großhöhlen des Berges gestellt.

Das untere Horizontalniveau wurde ehemals von einem zusammenhängenden Gerinne durchflossen, das sich von der *Ersten Senke* am Grund der *Großen Schräge* über die *Lange Gerade*, den *Seengang* und den *Maulwurfstunnel* bis ins *Auenland* verfolgen lässt. Wahrscheinlich findet es seine Fortsetzung nach einer längeren Siphonzone im *Wassergang*, der schließlich in die *Krake* mündet. Bedeutende, heute über weite Teile trockene Zubringer sind der *Schöne Canyon* und

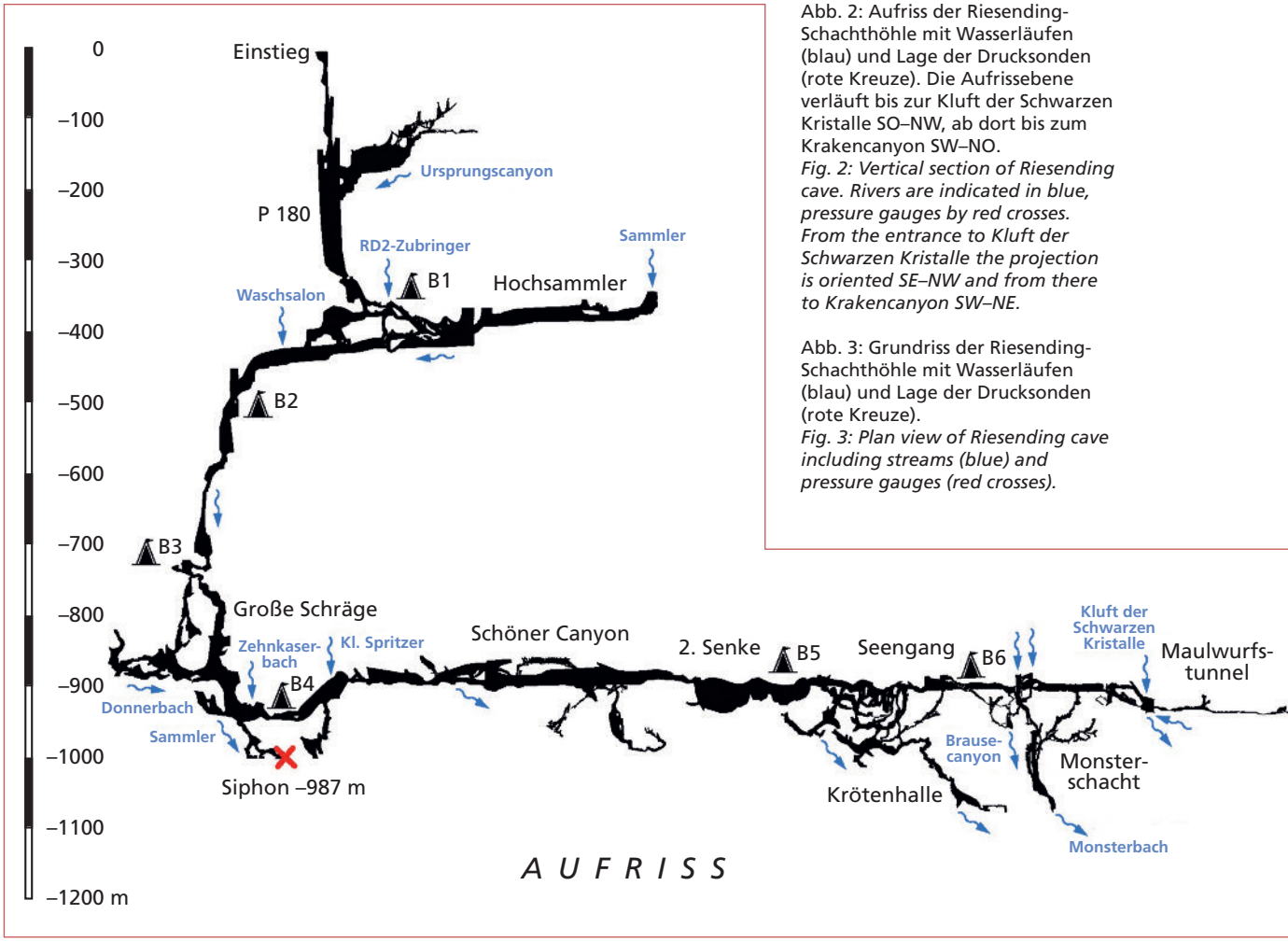
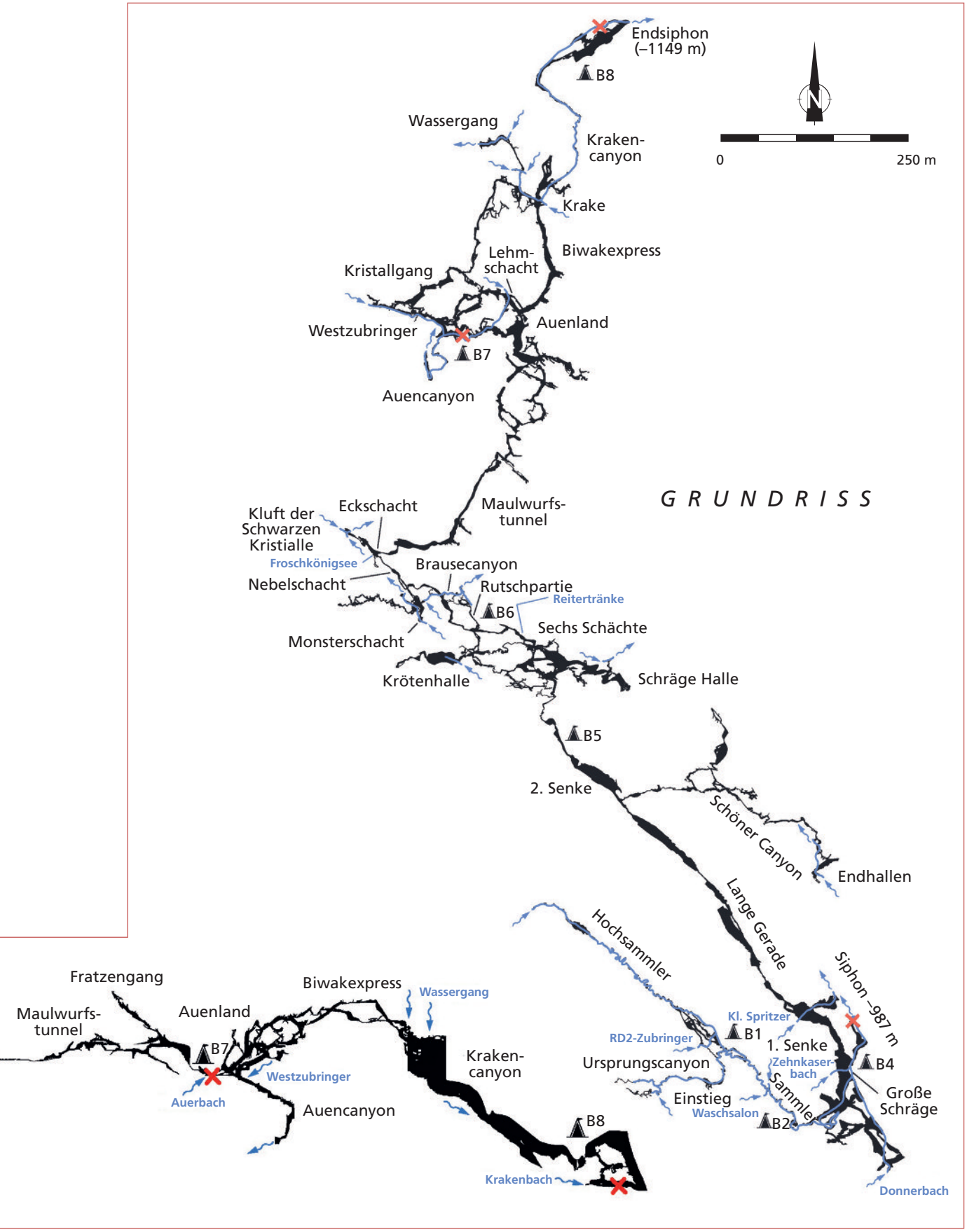


Abb. 2: Aufriss der Riesending-Schachthöhle mit Wasserläufen (blau) und Lage der Drucksonden (rote Kreuze). Die Aufrissebene verläuft bis zur Kluft der Schwarzen Kristalle SO–NW, ab dort bis zum Krakencanyon SW–NO.
Fig. 2: Vertical section of Riesending cave. Rivers are indicated in blue, pressure gauges by red crosses. From the entrance to Kluft der Schwarzen Kristalle the projection is oriented SE–NW and from there to Krakencanyon SW–NE.

Abb. 3: Grundriss der Riesending-Schachthöhle mit Wasserläufen (blau) und Lage der Drucksonden (rote Kreuze).
Fig. 3: Plan view of Riesending cave including streams (blue) and pressure gauges (red crosses).


Endsiphon
(–1149 m)
B8
Wassergang
Kraken-
canyon
0
250 m
Krake
Lehm-
schacht
Biwakexpress
Kristallgang
Auenland
Westzubringer
B7
Auencanyon
GRUNDRISS
Kluft der
Schwarzen
Kristialle
Eckschacht
Maulwurfs-
tunnel
Froschkönigsee
Brausecanyon
Nebelschacht
Rutschpartie
Reiteträнke
B6
Sechs Schächte
Monsterschacht
Krötenhalle
Schräge Halle
B5
2. Senke
Schöner Canyon
Endhallen
Lange Gerade
Hochsammler
Siphon –987 m
Fratzengang
Biwakexpress
Wassergang
Maulwurfs-
tunnel
Auenland
B7
Kl. Spritzer
B1
RD2-Zubringer
1. Senke
Zehnkaser-
bach
B4
Kraken-
canyon
Ursprungscanyon
Westzubringer
Auerbach
Auencanyon
Einstieg
Waschsalon
Sammler
B2
Große
Schräge
B8
Krakenbach
Donnerbach

der *Westzubringer*, welcher nun direkt ins *Auenland* mündet, ursprünglich über *Kristallgang* und *Biwakexpress* aber der *Krake* zufloss (Abb. 3). Die Schüttung des Hauptbachs muss bedeutend gewesen sein, wie durch ein sortiertes Gerölllager mit Korngrößen bis zu mehreren Zentimetern hinter einer düsenartigen Verengung am Knie eines ehemaligen Siphons im Bereich *Maulwurfstunnel* und durch allochthone Gerölle ebenfalls beträchtlicher Größe ebenda belegt ist. Während die obere Horizontaletage heute noch von einem Bach, dem *Sammler*, durchflossen wird, wird die untere Horizontaletage nur noch abschnittsweise von Gerinnen benutzt, die sie aus Schloten oder einmündenden Canyons anschneiden, aber durchwegs nach kurzem Lauf auf direkterem Wege dem aktuellen Karstwasserspiegel zueilen (Ausnahmen bilden der *Auenbach* und ein kleines Gerinne in der *Kluft der Schwarzen Kristalle*, die aus Siphonen austreten). Dabei konzentrieren sich die Wassereintritte auf klar abgrenzbare Bereiche, während dazwischen lange Strecken der Höhle trocken liegen. Konkret trifft man auf folgende Bachläufe im Riesending:

– Der *Sammler*, der seinen Ursprung in einer noch nicht abschließend erforschten hohen Schlucht unter dem zentralen Plateau nimmt und die obere Horizontaletage auf ganzer Länge, bis auf einen kurzen Siphon frei spiegelnd, durchströmt. Der *Sammler* nimmt mehrere Bäche aus Schloten oder steilen Canyons auf, deren wasserreichste der *RD2-Zubringer* nahe *Biwak 1*, der Zubringer aus dem *Ursprungscanyon*, und zwei Wasserfälle aus der Höhe des Canyons im *Waschsalon* (auf –430 m) sind. Der *Sammler* weist auch zu Trockenzeiten zumindest wenige l/s Schüttung auf und erreicht nach Niederschlägen einige 10er l/s; auch deutlich größere Wassermengen wurden schon beobachtet. Die Höhle bietet zu solchen Anlässen ein sehr beeindruckendes, wenn nicht verstörendes Bild. Erst in 920 m Tiefe am Grund der *Großen Schräge* vereinigt sich der *Sammler* mit weiteren Bächen, nämlich dem *Donnerbach*, der eine annähernd vergleichbare Schüttung aufweist, und dem *Zehnkaserbach*, der als mächtiger Wasserfall die *Große Schräge* hinabgischtet und zumindest die 2- bis 3-fache Wassermenge des *Sammlers* liefert (und zumindest einige Male pro Jahr auch 1–2 m^3/s erreichen dürfte). Unterhalb *Biwak 4* versinken die vereinigten Bäche am Grund der *Ersten Senke* in engen Spalten in 987 m Tiefe in einem kleinräumigen Siphon, an dem die erste Drucksonde im Riesending angebracht wurde. Zu diesem hydrologischen System ist auch noch der *Kleine Spritzer* zu zählen, welcher wenig jenseits *Biwak 4* über die schräg einfallende Begrenzungswand herabfließt und bei Normalwasser wenige l/s liefert. Er lässt sich ebenfalls in engen Spalten am Grund der *Ersten Senke* bis zu einem Siphon auf –987 m verfolgen.
– Kurz vor der *Zweiten Senke* mündet der *Schöne Canyon* in den Hauptgang der unteren Horizontaletage. Der *Schöne Canyon* verläuft ebenfalls nahezu horizontal und ist heute auf fast seiner gesamten Länge trocken, erst kurz vor seinen *Endhallen* trifft man ein Gerinne, welches den ursprünglichen Gang und die *Endhallen* in einem engen Canyon unterlagert und seinen Ursprung in einem noch nicht erkundeten Schlot jenseits der *Endhallen* nimmt. Bachab wurde der Wasserlauf bis zu einer Verengung im Mäander verfolgt, bei deren Überwindung eine Durchnässung in Kauf genommen werden müsste. Auch weiter vorne im *Schönen Canyon* kann man den Bachlauf bei Hochwasser ab und zu hören. Über seine Schüttung ist wenig bekannt, doch dürfte sie im Bereich von wenigen l/s bis zu einigen 10er l/s liegen.
– Eine Reihe von Bächen passiert im und rund um den *Monsterschacht* die untere Horizontaletage des Riesendings und versinkt in hängenden Siphonen. Der wasserreichste ist der *Monsterbach*, der aus der Höhe des *Monsterschachts* herabdonnert, diesen die meiste Zeit des Jahres unbefahrbar macht und bei Hochwasser auch im mehr als 100 m entfernten *Biwak 6* noch den Boden erzittern lässt. Er versinkt in 1059 m Tiefe in einem wahrscheinlich hängenden Siphon ohne erkennbare Rückstauzone. Seine Schüttung dürfte von wenigen l/s bis zu deutlich über 100 l/s variieren. Kurz vor dem *Monsterschacht* tritt ein weiteres Gerinne als Dusche in den Raum ein, welches durch den *Brausecanyon* einem Siphon in 930 m Tiefe zuströmt. In denselben Siphon mündet ein Bach, der unterhalb von *Biwak 6* am Grund der *Rutschpartie* aus einem Schlot fällt und vom Endraum des *Brausecanyons* nur durch einen weiteren kurzen Siphon getrennt ist. Beide Bäche variieren von weniger als 1 l/s bis zu einigen 10er l/s. Im ganzen Höhlenteil rund um den *Monsterschacht* ist es etwas kälter als in den trockenen Höhlenteilen rundum, und meist steigen aus dem *Nebelschacht*, der mit dem *Monsterschacht* zusammenhängt, Nebelschwaden, welche die Sicht zum Ärger der Fotografen im ganzen Höhlenteil einschränken.
– Während sich der Hauptgang beim *Eckschacht* nach Nordosten wendet, liegt in der Verlängerung der bislang raumbestimmenden, nach Nordwest streichenden Störung die *Kluft der Schwarzen Kristalle*. In diese mündet aus der Höhe der Kluft eine Dusche mit einem knappen bis zu wenigen l/s, während am

Grund der Kluft aus einem kleinen Quellsiphon ein stark bräunlich gefärbtes Gerinne mit ebenfalls wenigen l/s eintritt. Der Ursprung der dunklen Farbe ist bisher noch nicht untersucht, Haseke-Knapczyk (1989) erwähnt jedoch eine erhebliche Belastung der Quelle durch Huminsäuren. Beide Gerinne versinken in einem Versturz am Grund der Kluft. An den Wänden der Kluft finden sich Kalzitkristalle mit bis zu 3-4 cm Kantenlänge, deren Oberflächen ebenfalls dunkel verfärbt sind.

– Durch das *Auenland* fließt der wasserreiche *Auenbach*. Dieser wird zum ersten Mal am Fuß des *Lehmschachts* angetroffen, wo er aus tiefen Siphonspalten aufsteigt. Nach kurzem horizontalem Lauf versinkt er in einem Siphon, um im *Auenland* wieder aufzutauchen. Dort mäandriert er zwischen Lehmdünen, bevor er nahe *Biwak 7* in einem Versturz versickert, unter dem Blockboden einer Halle hindurch fließt, und sich schließlich in den *Auencanyon* ergießt, der bislang bis in 1070 m Tiefe verfolgt wurde (Ende offen). In den *Auenbach* mündet am Ende der erwähnten versturzerfüllten Halle der *Westzubringer*, welcher bachauf bis in großdimensionierte und stark bewetterte überlagernde Gänge verfolgt wurde (Ende ebenfalls offen, ein Zusammenhang mit den 700 m entfernten Windlöchern ist denkbar). Während der *Westzubringer* meist nur wenige l/s bis zu einigen 10er l/s schüttet, beeindruckt der *Auenbach* mit wenigen 10er l/s bis zu einigen 100 l/s, die durch Schüttungsmessungen mittels Salzverdünnungsmethode auch nachgewiesen wurden. Bei starken Hochwasserereignissen sind Schüttungsspitzen im Bereich von 1–2 m^3/s wahrscheinlich. Im *Auenbach* war bei der Wasserstelle von *Biwak 7* die zweite Drucksonde im Riesending installiert (siehe Markierungen in Abb. 2 und 3).

– Im Bereich von *Wassergang* und *Krake* treten auf engem Raum mehrere Gerinne ein. Es ist dies einerseits zuhinterst im *Wassergang* ein kleiner Bach, der nach Westen fließt und einen großräumigen Siphon speist. Etwas weiter bilden bei einer Kluftkreuzung zwei Zubringer aus noch unerforschten Canyons mit jeweils wenigen l/s bis zu zumindest einigen 10er l/s den Ursprung des *Krakenbachs*. Sie folgen dem Verlauf des *Wassergangs* nach Südosten bis in die *Krake*, wo ein weiterer Bach mit ähnlicher Schüttung aus einem Schlot einmündet. Die gesammelten Bäche fließen durch den *Krakencanyon* einem Siphon im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels in 1149 m Tiefe (694 m Seehöhe) zu. Kurz vor dem Siphon, und von diesem durch eine Schotterbank und mehrere Versturzblöcke getrennt, war im Bachlauf des *Krakenbachs* die dritte Drucksonde im Riesending angebracht. Die Wände sind bis hoch über dem Bachbett mit einer dicken Schicht dunkler Sedimente überzogen und zeigen einen Rückstaubereich an, der durch die gemessenen Wasserstände auch bestätigt werden konnte.

MESSPROGRAMM UND TEMPERATURREGIME

Wasserdruck und -temperatur

Gemessen wurden im Riesending Wasserdruck und -temperatur mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten im Endsiphon des *Sammlers* (–987 m, 856 m Seehöhe) von 11/2009 bis 09/2013, im *Auenbach* (–940 m, 903 m Seehöhe) von 09/2011 bis 10/2016 und im *Krakencanyon* (–1148 m, 695 m Seehöhe) von 11/2013 bis 10/2016. Zur Korrektur der Luftdruckschwankungen wurde von 07/2012 bis 10/2016 beim *Biwak 7* (–930 m) im *Auenland* parallel der Luftdruck gemessen (Abb. 4). Durch den Ausfall einer Messsonde liegen zuvor keine Luftdruckdaten aus dem Riesending vor.

Verglichen werden die Daten aus dem Riesending mit Druck- und Temperaturmessungen vom *Talsiphon* und *Unheimlichen See* (beobachtet 02/2010 bis 01/2014) in der Fürstenbrunner Quellhöhle, und von 02/2012 bis 01/2014 mit Daten von der *Orktränke* in der Kolowrathöhle (Abb. 4). Die letzten beiden Messstellen liegen im Schwankungsbereich eines einheitlichen Karstwasserspiegels im Untersberg. Da es keine sinnvolle zeitliche Überlappung zwischen den Messungen in Quellhöhle und Kolowrathöhle mit den Messungen im *Krakencanyon* gibt, liegt ein Schwerpunkt der Auswertung im Versuch, mittels statistischer Methoden die Höhe der Sonde im *Krakencanyon* möglichst genau relativ zur *Orktränke* zu bestimmen, um die weitere Ausdehnung des gemeinsamen Karstwasserspiegels bis zum Riesending zu untermauern und gleichzeitig die Tiefenmessung der Riesending-Schachthöhle zu kontrollieren.

Die absolute Genauigkeit der verwendeten Drucksonden (Ingenieurbüro Ziegler, Hütten, Schweiz) wird mit ±10 mbar (entspricht 10 cm Wasserhöhe) angegeben. Für die Dauer eines Hochwasserereignisses darf die relative Genauigkeit jedoch im sub-mbar-Bereich angenommen werden. Um langfristige Instrumentendrift zu berücksichtigen wurden die verschiedenen Drucksonden, wenn immer möglich, vor und nach

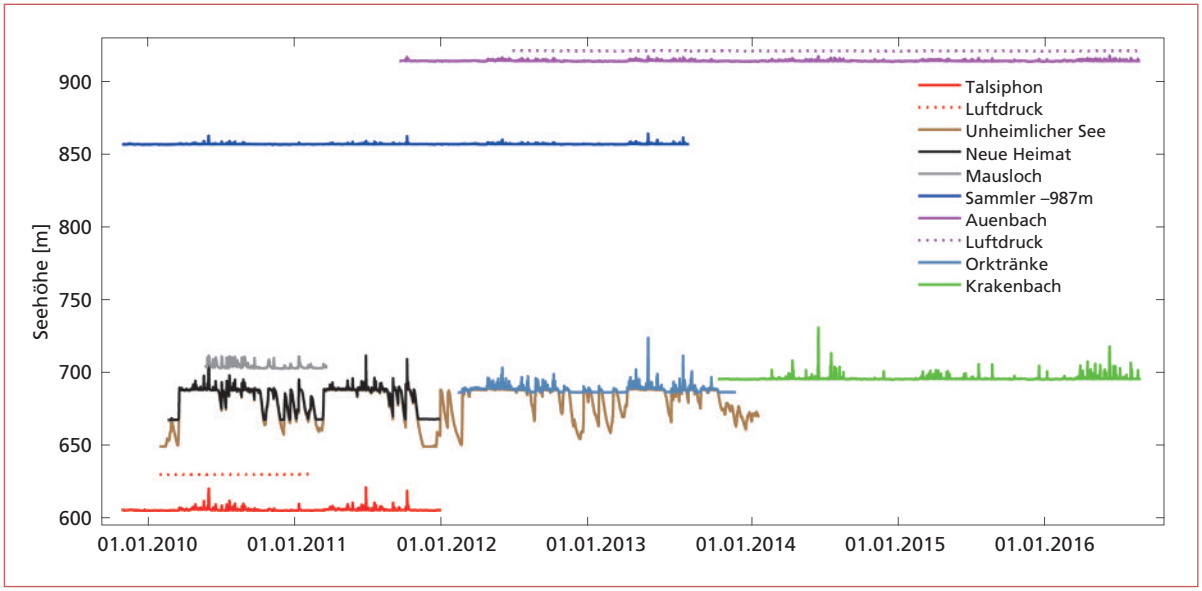


Abb. 4: Messzeiträume und Einbauhöhen der Drucksonden im Untersberg.
Fig. 4: Observation periods and altitudes of pressure gauges in Untersberg.

Tabelle 1: Temperatur und elektrische Leitfähigkeit des Sammlers und seiner Zuflüsse am 15.8.2007.
Table 1: Temperature and electric conductivity along the Sammler stream in Riesending, as observed on 15 August 2007

	Tiefe (m)	Schüttung (l/s)	Temperatur (°C)	El. Leitfähigkeit (µS/cm; 25 °C)
Zubringer Ursprungscanyon	–350	< 0,5	2,3	210
Sammler	–410	< 5	2,6	228
Zufluss links	–420	< 0,5	2,7	218
Zufluss Waschsalon (rechts)	–430	< 0,5	2,7	224
Sammler	–500	ca. 5	3,0	224
Sammler	–600	ca. 5	3,3	227
Sammler	–720	ca. 5	3,6	231
Sammler	–910	ca. 5	4,2	222
Zehnkaserbach	–910	ca. 25	4,7	250
Donnerbach	–910	ca. 10	4,6	254
Sammler (inkl. Zuflüsse)	–960	ca. 40	4,7	246
Kleiner Spritzer	–900	ca. 3	4,3	230

dem Einbau eine kurze Zeit gemeinsam in der Höhle gelagert und die relative Drift durch ein lineares Modell korrigiert. Die Ableitung absoluter Wasserstände wird durch die deutlich weniger genau bekannten Einbauhöhen der Logger eingeschränkt. Es werden deshalb nur Druckvariationen relativ zum jeweils gemessenen Druckminimum pro Sonde analysiert. Die Zeitmessung in der Sonde wurde bereits beim Auslesen der Daten mit der aktuell gehaltenen Computerzeit korrigiert und wird im Folgenden als fehlerfrei angenommen. Wasser- und Luftdruck wurden jeweils linear auf gemeinsame Messepochen interpoliert und der Wasserdruck um die Luftdruckvariationen, welche Wasserschwankungen von mehr als ±10 cm entsprechen, korrigiert. Dazu wurden jeweils Luftdrucklogger auf vergleichbarer Seehöhe verwendet.

Die Temperaturmessungen weisen eine sehr hohe Auflösung von hundertstel Grad auf. In Einzelfällen scheinen Temperaturvariationen eine geringe sonden- und temperaturabhängige Dämpfung zu erfahren, was absolute Genauigkeitsangaben erschwert. Zur Kalibrierung der Sonden wurden aus den Zeiten gemeinsamer Lagerung relative Abweichungen bestimmt, die aber nur für einen engen Temperaturbereich als repräsentativ angenommen werden dürfen (weshalb für die Kalibrierung eine gemeinsame Lagerung der Sonden bei Höhlenbedingungen wichtig ist). Die Temperatur der

Sonde am Endsiphon des *Sammlers*, für den Messungen mit einem kalibrierten Thermometer vorliegen (siehe unten), wurde auf diese korrigiert. *Talsiphon* und *Unheimlicher See* wurden in der Folge relativ zum *Sammler* korrigiert. Die Temperaturen von *Auenbach* und *Krakenbach* sind nur relativ zueinander kalibriert. Im Rahmen dieser Arbeit werden im Wesentlichen Temperaturunterschiede über kurze Zeiträume von wenigen Stunden interpretiert, die deutlich über der Wiederholgenauigkeit der Messungen liegen; die in Einzelfällen ungenaue absolute Kalibrierung ist daher zu vernachlässigen.

Vertikale Temperaturgradienten (Luft und Wasser)

Dem Monitoring der Wasserstände vorausgehend wurden am 15.8.2007 Temperatur und Leitfähigkeit des *Sammlers* und seiner Zubringer zwischen –350 m und –930 m mit einem kalibrierten Instrument gemessen (Tab. 1). Alle Werte wurden bei sommerlichem Niedrigwasser bestimmt, die Schüttungsangaben sind konservative Schätzwerte. Entlang des *Sammlers* wurde eine gleichmäßige Temperaturzunahme auf der von Zuflüssen unbeeinflussten Strecke von –500 m bis –910 m von 3,0 °C auf 4,2 °C beobachtet, was einem Gradienten der Wassertemperatur von etwa –0,3 K/100 Höhenmetern entspricht.

Bereits im Vorfeld der hydrologischen Untersuchungen fanden automatische Messungen der Lufttemperatur von 11/2004 bis 05/2005 im *Biwak 1* (–350 m), von 06/2005 bis 09/2005 in 115 m Tiefe im Eingangsschacht, von 10/2005 bis 01/2006 im *Biwak 3* (–700 m) und von 08/2006 bis 11/2006 im *Biwak 4* (–930 m) statt. Ziel dieser Messungen war es, das Dämpfungsverhalten von oberirdischen Temperaturvariationen in Abhängigkeit von der Entfernung zum Eingang zu untersuchen (mit der Motivation, mittels Temperaturmessungen in der Höhle weitere Eingänge zu finden). Es wurden deutliche Korrelationen zwischen Außen- und Innentemperatur in 115 m, 350 m und 930 m Tiefe, nicht aber beim *Biwak 3* in 700 m Tiefe festgestellt, gleichzeitig aber eine deutliche Abhängigkeit der Dämpfung der Temperaturvariationen vom Zustand des Schneekegels im Eingangsschacht, was eine Interpretation im Sinne der ursprünglichen Zielsetzung vereitelte.

Die Temperatur in *Biwak 1* schwankt im Messzeitraum zwischen 2,05 °C und 1,65 °C und liegt im Mittel bei 1,9 °C, die Temperatur in *Biwak 3* sinkt von Oktober bis Januar kontinuierlich von 3,25 °C auf 3,05 °C, und in *Biwak 4* wurden Temperaturen zwischen 4,35 °C bis 4,05 °C beobachtet, bei einem Mittel um 4,2 °C. An allen drei Messpunkten nimmt die Temperatur im jeweiligen Beobachtungszeitraum tendenziell leicht ab, da die Höhle im Herbst/Winter abkühlt. Der Temperaturgradient der Höhlenluft zwischen 350 und 900 m Tiefe, berechnet aus den mittleren Temperaturen in Biwak 1 und 4, liegt bei –0,4 K/100 m. Vergleicht man nur Novembermessungen, so findet man –0,36 K/100 m, wobei der Temperaturgradient zwischen 350 und 700 m Tiefe etwas flacher als zwischen 750 und 930 m Tiefe ist. Die Horizontalniveaus in 400 und 900 m Tiefe sind stark bewettert. Die im Vergleich zu den anderen, auch tiefer gelegenen Messungen deutlich geringere Variabilität der Lufttemperatur auf –700 m deutet darauf hin, dass die bekannten Passagen entlang des *Sammlers* zwischen 400 und 900 m Tiefe für die beachtliche Bewetterung der unteren Horizontaletage nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Interpretation der Temperaturgradienten

Zur Interpretation der beobachteten Temperaturen sind folgende Erklärungen hilfreich (siehe z.B. Filipponi, 2000; Luetscher & Jeannin, 2004):

- Der feucht-adiabatische Temperaturgradient von Luft liegt bei –0,5 K/100 m; dieser Gradient ist für die Lufttemperatur im homothermischen (vom Temperaturgeschehen außerhalb der Höhle weitgehend entkoppelten), aber stark bewetterten Bereich einer Höhle maßgeblich.
- Trockene Luft hat je nach Feuchtegehalt einen steileren Temperaturgradienten; für die Außenatmosphäre sind –0,5 bis –0,7 K/100 m typisch.
- Die theoretische Temperaturzunahme von schnell fließendem Wasser durch Umwandlung von potentieller Energie in Wärme beträgt –0,23 K/100 m; in gering bewetterten Höhlenbereichen (bei Luetscher und Jeannin (2004) als tiefe vadose Zone bezeichnet) liegt der Temperaturgradient von Bachläufen bei etwa –0,3 K/100 m.
- Die Temperatur der Höhlenwände wird im vadosen Bereich langfristig durch die Wassertemperatur in der Höhle bestimmt; Wasser und Fels befinden sich daher im thermischen Gleichgewicht, und Energieaustausch findet im Wesentlichen zwischen Wasser und Luft in der Höhle statt.
- Der Einfluss der Erdwärme wird durch die wassergesättigte Zone unterhalb des Karstwasserspiegels weitgehend abgeschirmt; deshalb wird in Höhlen keine deutlich erhöhte Temperatur wie z.B. in Bergwerken oder auf Tunnelbaustellen gemessen.

Der im Riesending gemessene Gradient der Wassertemperatur passt gut zu den Angaben von Luetscher &

Jeannin (2004) für die tiefe vadose Zone. Der von –0,5 K/100 m abweichende Gradient der Lufttemperatur ist auf Energieaustausch mit dem wasserreichen kälteren *Sammlerbach* zurückzuführen. Auch im Bereich des *Monsterschachts* lässt sich eine mit dem *Monsterbach* zusammenhängende negative Temperaturanomalie der Höhlenluft feststellen, wie bei Temperaturmessungen im Rahmen einer mikrobiologischen Studie der Bakterienpopulation im *Froschkönigsee* und weiteren Höhlengewässern beobachtet wurde (Shabarova et al., 2013).

Aus der Temperaturdifferenz unterschiedlicher Bäche in gleicher Tiefe lässt sich, wenn man den Temperaturgradienten des Wassers in der Höhle kennt, näherungsweise der Unterschied der mittleren Höhe der Einzugsgebiete berechnen, da der Niederschlag beim Eintritt in die homothermische Zone die mittlere Jahrestemperatur der Außenatmosphäre auf der entsprechenden Höhe hat. Für die folgende Überschlagsrechnung wird für die Außenatmosphäre ein Gradient von –0,6 K/100 m, für die Höhlenbäche der gemessene Gradient aus der tiefen vadosen Zone von –0,3 K/100 m angenommen. Aus der Temperaturdifferenz von 0,3 K vom *Sammler* zum Zubringer aus dem *Ursprungscanyon* lässt sich (unter Berücksichtigung der Höhendifferenz der Messstellen von 60 m) auf eine Höhendifferenz der Einzugsgebiete von 40 m, aus der Temperaturdifferenz des *Zehnkaserbachs* zum *Sammler* in 900 m Tiefe von 0,5 K auf eine Höhendifferenz von 166 m schließen. Das Plateau fällt über dem bekannten Verlauf der oberen Horizontaletage vom Eingang zum Ursprung des *Ursprungscancyons* und des *Sammlers* leicht ab. Nimmt man das mittlere Einzugsgebiet des *Ursprungscanyons* bei etwa 1800 m, das des *Sammlers* am Fuße des Mitterbergs bei 1760 m an, so kommt jenes des *Zehnkaserbachs* auf knapp 1600 m zu liegen, was der Dolomit-Terrasse der Zehnkaseralm entspricht. Der Ursprung des *Donnerbachs* wird im Bereich des nur wenig höher liegenden Wandfußes der Süd- und Südostwände, die den Übergang zum unterlagernden Dolomit markieren, vermutet. Auf dem stark zerklüfteten Plateau dürfte es schwerfallen, die Einzugsgebiete einzelner Bachläufe gegeneinander abzugrenzen, und die folgende Überschlagsrechnung soll nur der Veranschaulichung dienen: ein kräftiger Regenschauer von 5 mm/h = 5 l/m²/h, der über dem bekannten Verlauf des *Sammlers* von seinem Ursprung bis *Biwak 2* auf einer Fläche von 600 m × 60 m niedergeht, führt zu einem Gesamtabfluss von 50 l/s. Aufgrund von unterschiedlich langen und steilen Zuflussstrecken der einzelnen Zubringer zum *Sammler* wird die resultierende Schüttung in der Regel etwas geringer ausfallen. Da aber vergleichbare Schüttungen im *Biwak 2* in 500 m Tiefe schon öfters beobachtet worden sind, können wir damit rechnen, dass sich der *Sammler* bachauf noch etwas weiter unter das Plateau fortsetzt. Die Zeitverzögerung zwischen dem Einsetzen des Regens und dem Anschwellen des *Sammlers* liegt dabei nach eigenen Beobachtungen deutlich unter einer Stunde.

Einfluss der Erdwärme

Da im Folgenden Wassertemperaturen in Siphonen und am Karstwasserspiegel zur Interpretation herangezogen werden, soll auf Basis der bislang zusammengetragenen Kenndaten der Fürstenbrunner Quelle in einer letzten Überschlagsrechnung die resultierende Erwärmung des Wassers im Bereich der phreatischen Zone abgeschätzt werden. Bei einer mittleren Quellschüttung von 800 l/s und einer Austauschrate des Wassers im Berg von 150 Tagen (knapp 5 Monate), beträgt das Volumen des Karstreservoirs 800 l/s × 150 × 86400 s = 10,37 × 10^9 l = 10,37 × 10^6 m³. Um einen Liter Wasser um 1 K zu erwärmen, bedarf es 4,18 kJ. Für das Einzugsgebiet nehmen wir 16 km² an (was einer als typisch geltenden mittleren Abflussspende von 50 l/s/km² entspricht), und für den Energiefluss durch Erdwärme geben Luetscher und Jeannin (2004) 40 bis 140 mW/m² an. Die Erwärmung des unterhalb des Karstwasserspiegels gespeicherten Wassers im Berg durch Erdwärme ergibt sich wie folgt:

Erwärmung [K] = Einzugsgebiet [m²] × Zeit [s] × Wärmefluss [W/m²] / (Wasservolumen [l] × 4,18 kJ/l/K)

Je nach Annahme für den Energiefluss durch Erdwärme ergibt sich für das Einzugsgebiet der Fürstenbrunner Quelle eine Erwärmung von 0,19 bis 0,67 K.

Im Untersberg wurden Temperaturunterschiede zwischen hydraulisch reagierendem Siphonwasser (*Auenbach*, *Krakenbach*) und offen fließendem Ereigniswasser von ca. 0,25 K beobachtet, allerdings auch Temperaturunterschiede am Zusammenfluss mehrerer Bäche mit unterschiedlich hoch gelegenen Einzugsgebieten von bis zu 0,5 K (*Sammler*, *Zehnkaserbach*). Die berechnete Erwärmung langsam ausgetauschten Siphonwassers durch Erdwärme kann die gemessenen Temperaturunterschiede erklären. Allerdings ist der Effekt der Erwärmung durch Erdwärme von dem der Durchmischung unterschiedlich warmer Zubringer in Siphonbereichen ohne eine sorgfältige Wasserbilanz über das gesamte Einzugsgebiet und ohne genaue Kenntnis der Infiltrationshöhenlagen des Niederschlags nicht zu trennen.

Schüttungsmessungen

Flankierend zu den Druck- und Temperaturmessungen fanden in mehreren Bachläufen im Untersberg Schüttungsmessungen mit der Salzverdünnungsmethode statt. Im *Auenbach* wurden acht Einzelmessungen durchgeführt. Ausreichende Messungen für eine Schlüsselkurve liegen allerdings nur für niedere Wasserstände vor, für die sich folgender linearer Zusammenhang zu den gemessenen Wasserständen angeben lässt:

$$\text{Schüttung [l/s]} = 2{,}71 \times \text{Wasserstand [cm]} - 0{,}06$$

(für Wasserstände bis ca. 20 cm)

Eine Messung wurde während eines Hochwasserdurchgangs durchgeführt und ergab eine Schüttung von 460 l/s. Diese Messung fand jedoch unter ungünstigen Bedingungen (während der Messung deutlich nachlassende Schüttung und steigende Grundleitfähigkeit) statt und kann daher nicht zur Extrapolation der Schlüsselkurve dienen.

Die Schüttung des Bachs in der Quellhöhle wurde zwischen *Unheimlichem See* und *Talsiphon* ebenfalls mittels Salzverdünnungsmethode bestimmt (Gruber, 2014). Die Schlüsselkurven für *Unheimlichen See* und *Auenbach* werden im Folgenden benutzt, um den Anteil des *Auenbachs* an der Gesamtschüttung der Quelle bei niedrigen Wasserständen abzuschätzen.

INTERPRETATION DER GEMESSENEN WASSERHÖHEN UND WASSERTEMPERATUREN AM ENDSIPHON DES SAMMLERS (–987 M) UND IN DER FÜRSTENBRUNNER QUELLHÖHLE

Der *Sammler* stürzt nach der Vereinigung mit dem *Donnerbach* und dem *Zehnkaserbach* durch schmale Spalten am Grund der *Großen Schräge* bis in 987 m Tiefe hinab, wo er in einem kleinräumigen Siphon versinkt. Stausedimente zeigen einen lokalen Rückstau von wenigen Metern an, und auf dem Siphonsee schwimmen meist größere Mengen Schaum, der auf Huminsäuren zurückzuführen sein könnte. Die Sonde war am Rand des Siphonbeckens knapp über dem Wasserspiegel bei Normalwasserstand angebracht. Die aufgezeichneten Schüttungsspitzen belegen eine Überstauung von bis zu 7 m.

Verglichen werden die am Endsiphon des *Sammlers* gemessenen Wasserstands- und Temperaturschwankungen mit jenen im *Unheimlichen See* und am *Talsiphon* in der Fürstenbrunner Quellhöhle, 4,2 km vom *Sammler* entfernt und etwa 200 m bzw. 250 m tiefer gelegen. Der *Unheimliche See* stellt den Quellsiphon des Bachs in der Fürstenbrunner Quellhöhle dar, der *Talsiphon* die letzte Höhlenstrecke vor dem Austritt des Wassers an der gefassten Quelle. Der *Unheimliche See* markiert das talseitige Ende des über weite Strecken einheitlichen Karstwasserspiegels im Berg und weist Spiegelschwankungen von über 40 m auf. Die Sonde wurde bei außergewöhnlicher Trockenheit dort auf 650 m Seehöhe angebracht, der Sommerüberlauf befindet sich etwa 38,5 m über der Sonde. Der *Talsiphon* ist vom *Unheimlichen See* durch etwa 600 m teils unbekannte Siphon- und Klammstrecken getrennt. Die Sonde am *Talsiphon* ist am bergseitigen Ende im Niederwasserbereich angebracht. Vor dem *Talsiphon* kommt es durch eine geringfügige Reduktion des Gangquerschnitts zu einem gewissen Rückstau, der jedoch nicht mit den beträchtlichen Spiegelschwankungen des *Unheimlichen Sees* zu vergleichen ist.

Betrachtet werden beispielhaft zwei Regenereignisse. Das erste nach längerer Trockenheit bei sommerlichem Niedrigwasser in der Nacht vom 15. auf den 16.7.2010 (Abb. 5), das andere bei aufgefüllten Speichern drei Tage später (Abb. 6). In beiden Fällen reagiert der *Unheimliche See* vor dem *Sammler*, muss also noch bedeutende andere Zuflüsse mit kürzeren Fließstrecken haben. Das erste Regenereignis führt im *Sammler* des Riesendings zu zwei Hochwasserspitzen von wenigen Dezimetern, wovon die erste Spitze ausgeprägter ist. Im *Unheimlichen See* kommt es zu einem Anstieg des Wasserspiegels um knapp 10 m, jedoch wird der Sommerüberlauf nicht erreicht. Am *Talsiphon* kommt es daher zu keiner signifikanten Erhöhung des Wasserstandes.

Bei der Interpretation helfen auch die Temperaturmessungen. Im *Unheimlichen See* und im *Talsiphon* ist keine Temperaturänderung sichtbar (Abb. 5, unten). Offensichtlich erreicht anders temperiertes Ereigniswasser diese Messstellen erst später (oder nach gründlicher Durchmischung). Die Reaktion auf das Niederschlagsereignis ist daher vermutlich rein hydraulisch. Am *Sammler* im Riesending fällt die Temperatur erst markant ab, um dann nach kurzer Stagnation über ihren ursprünglichen Wert anzusteigen. Dies ist durch die unterschiedlich warmen Zubringer erklärbar, die sich erst kurz vor der Messung vereinigen. Offensichtlich springt der kalte *Sammlerbach*, der dem bekannten Abstieg durch die Höhle folgt, zuerst an. Seine Schüttung ist bereits am Abklingen, wenn einer oder beide wärmeren Zubringer, also *Donnerbach* und

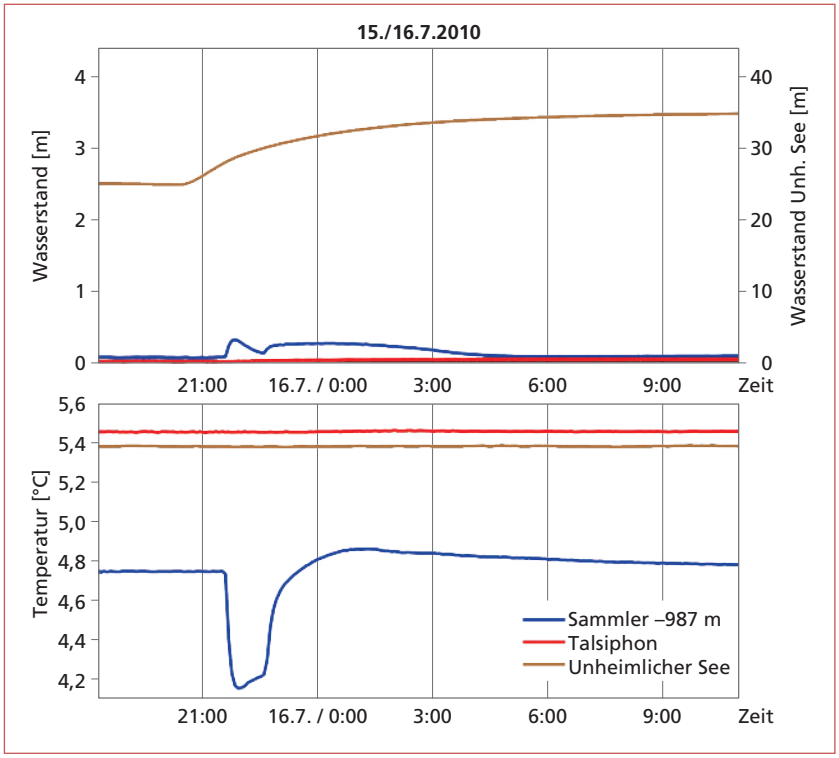


Abb. 5: Wasserstand (oben) und Temperatur (unten), aufgezeichnet von den drei Drucksonden im Unheimlichen See und im Talsiphon der Quellhöhle, sowie im Riesending am Endsiphon des Sammlers, während eines moderaten Regenereignisses bei niedrigem Wasserstand in der Nacht vom 15. auf den 16.7.2010. Die Wasserstände von Talsiphon und Sammler beziehen sich auf die Y-Achse links, der des Unheimlichen Sees auf die Y-Achse rechts.
Fig. 5: Water-level (top) and temperature (bottom) at Unheimlicher See (right y-axis), Talsiphon and Sammler (both left y-axes) after a moderate rainfall event during the night of 15 July, 2010.

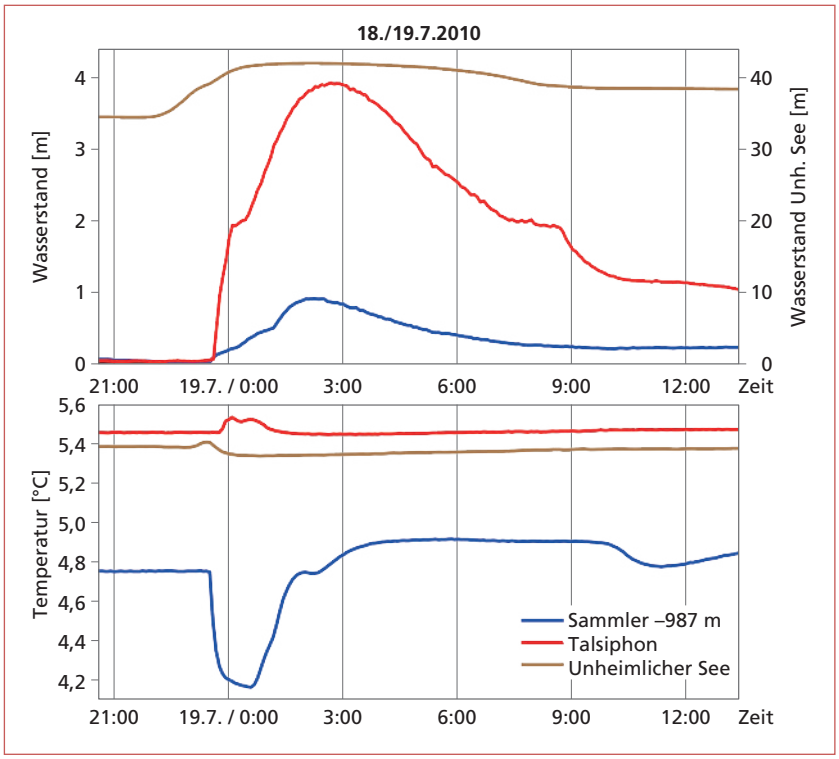


Abb. 6: Wasserstand (oben) und Temperatur (unten), aufgezeichnet von den drei Drucksonden im Unheimlichem See und im Talsiphon der Quellhöhle, sowie im Riesending am Endsiphon des Sammlers, während eines ergiebigen Regenereignisses bei aufgefüllten Speichern in der Nacht vom 18. auf den 19.7.2010. Die Wasserstände von Talsiphon und Sammler beziehen sich auf die Y-Achse links, der des Unheimlichen Sees auf die Y-Achse rechts.
Fig. 6: Water-level (top) and temperature (bottom) at Unheimlicher See (right y-axis), Talsiphon and Sammler (both left y-axes) after a heavy rainfall event during the night of 18 July, 2010.

Zehnkaserbach, anspringen. Diese zeitverzögerte Ankunft des wärmeren Wassers geht mit einem zweiten Druckanstieg und einer raschen Temperaturzunahme des gemischten Wassers am Sammler-Siphon einher. Während die erste Hochwasserspitze schnell wieder abfällt, ist die Reaktion zumindest eines warmen Baches deutlich gedämpft, was auf längere Fließstrekken mit geringem Gefälle schließen lässt.

Das zweite Niederschlagsereignis drei Tage später findet bei nahezu vollen Speichern im Berg statt. Der Wasserstand im *Unheimlichen See* reagiert wieder vor dem *Sammler* und steigt bis zum Sommerüberlauf an,

verharrt dort kurze Zeit, um dann weitere 3 m zu steigen (Abb. 6). Das Überlaufen des *Unheimlichen Sees* führt zu einem rasanten Wasseranstieg am *Talsiphon* um insgesamt fast 4 m. Bei etwa 2 m Stauhöhe ist der Ansatz eines Plateaus im Druckpeak sichtbar, was auf eine Geometrieänderung im Ausfluss in dieser Höhe hindeutet.

Der *Sammler* im Riesending lässt einen dreigegliederten Druckanstieg erkennen, was auf das nicht gleichzeitige Anspringen der drei Zubringer zurückzuführen sein dürfte. Wieder ist das kalte Wasser des eigentlichen *Sammlers* schneller als die wärmeren Zubringer *Donnerbach* und *Zehnkaserbach*, und der *Sammler* bereits am Abklingen, bevor das Hauptwasser, wahrscheinlich des wasserreichen *Zehnkaserbaches*, eintrifft. Die Temperatur des *Unheimlichen Sees* und in der Folge des *Talsiphons* steigt mit dem Überlaufen erst leicht an, bevor zumindest im *Unheimlichen See* ein Abfall der Temperatur unter das ursprüngliche Niveau sichtbar wird. Eine mögliche Erklärung wäre ein kurzfristig erhöhter Anteil an Ereigniswasser aus relativ niedrig gelegenen Einzugsgebieten vom Nordhang des Untersbergs, die nach kurzen Fließwegen den Karstwasserspiegel vor kälteren Zuflüssen aus höher gelegenen Einzugsgebieten am Plateau des Bergs erreichen. Dazu passt auch die Beobachtung, dass der *Unheimliche See* deutlich (in den obigen Beispielen 1 bis 1,5 Stunden) schneller reagiert als der Druckpegel am Endsiphon des *Sammlers*, der oberstromig gelegen ist. Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass der einheitliche Karstwasserspiegel im Berg schnellen Zufluss, wahrscheinlich von der Nordflanke des Untersbergs, hat.

INTERPRETATION DER GEMESSENEN WASSERHÖHEN UND WASSERTEMPERATUREN VON AUENBACH UND KRAKENBACH

Der *Auenbach* entströmt im Gegensatz zum *Sammler* einem Siphonbereich. Die Sonde im *Auenbach* war am Ende einer ruhigen Fließstrecke durchs *Auenland* angebracht, kurz bevor der Bach im Versturz an der Gangsohle versickert. Der Versturz stellt eine Verengung des Querschnittes dar und führt bei erhöhtem Wasserangebot zu Rückstau. Mit zunehmender Wasserhöhe nimmt der Bereich, über den das Wasser in den Versturz eintritt, deutlich zu, bis er in wenigen Metern Höhe frei überströmt würde. Da keine genaue Messung der Höhe des Versturzes vorliegt, ist nicht bekannt, ob es tatsächlich zu einer Überströmung kommt.

Die Sonde im *Krakenbach* war hingegen an der Sohle eines mit geringem Gefälle frei fließenden Bachlaufs angebracht, der nach knapp 30 m durch eine Schotterbank sickert, welche offensichtlich bei erhöhtem Wasserstand ebenfalls zu einem Rückstau von wenigen Dezimetern führt. Auf der Schotterbank bilden mehrere große Blöcke ein Hindernis, das im November 2013 nicht überklettert werden konnte, hinter dem im Oktober 2016 aber nur noch ein großer Siphonsee entdeckt wurde, dessen Spiegel zur Zeit seiner Entdeckung etwa 1 m unterhalb des Bachlaufs und der Drucksonde lag. Der ganze Höhlenbereich liegt im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels, wie durch dicke, dunkel gefärbte Stausedimente an den Höhlenwänden bis in beträchtliche Höhe über dem Bachlauf ersichtlich ist. Die aufgezeichneten Druckdaten belegen Stauhöhen bis 35 m, was gut zu den bei der *Orktränke* in der Kolowrathöhle aufgezeichneten Wasserstandsvariationen des Karstwasserspiegels passt.

Auenbach und *Krakenbach* zeigen bis zu Wasserständen von etwa 0,5 m ein sehr ähnliches Verhalten, das durch Abbildung 7 mit ausgeprägten Schneeschmelz-Tagesgängen im März 2014 veranschaulicht wird. Die Reaktion auf die tageszeitliche Erwärmung und die resultierende Schneeschmelze setzt jeweils bereits in den Abendstunden ein, wobei der *Krakenbach* mini-

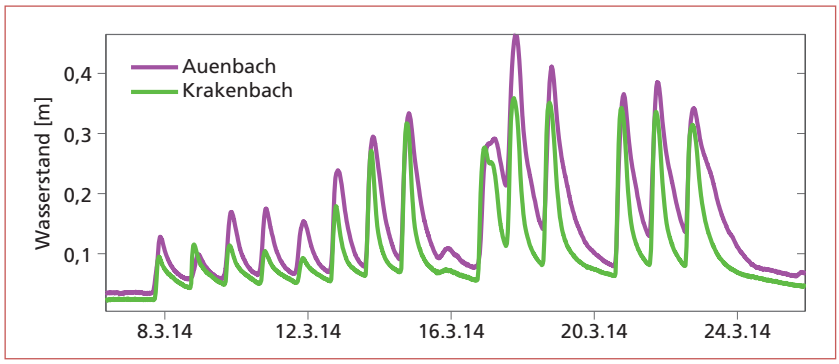


Abb. 7: Wasserstände, aufgezeichnet von den Drucksensoren am Auenbach und Krakenbach, während der Schneeschmelze im März 2014.
Fig. 7: Water-levels at Auenbach and Krakenbach during snowmelt in March 2014.

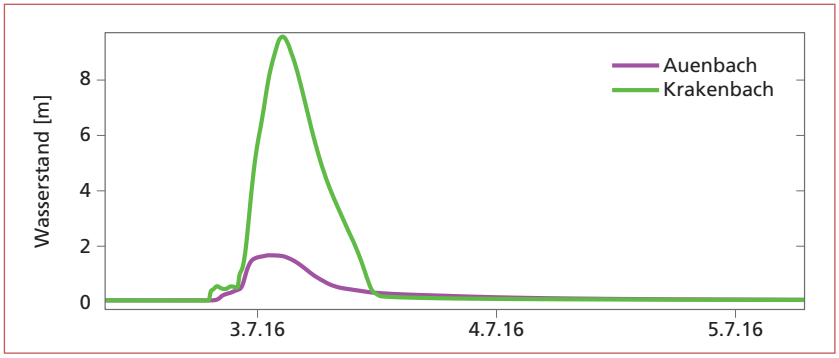


Abb. 8: Wasserstand, aufgezeichnet von den Drucksensoren am Auenbach und Krakenbach, während eines ergiebigen Regenereignisses in der Nacht vom 2. zum 3.7.2016.
Fig. 8: Water-levels at Auenbach and Krakenbach after heavy rain during the night of 2 July, 2016.

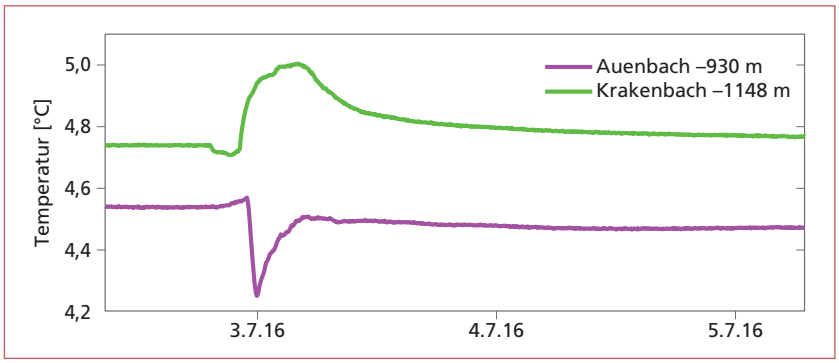


Abb. 9: Wassertemperatur des Auenbachs und Krakenbachs während des Hochwassers am 2./3.7.2016.
Fig. 9: Temperatures of Auenbach and Krakenbach during the flood pulse after heavy rain on 2 July, 2016.

mal früher reagiert. Auf einen rasanten Anstieg mit einem Peak zwischen 18 und 19 Uhr folgt ein langsameres Abklingen bis zum Abend des folgenden Tages. Die um 1–2 Stunden verzögerte Reaktion des *Auenbachs*, die zudem eine etwas geringere Steigung des Wasserstands aufweist, wird durch eine offensichtlich längere Fließstrecke und ein geringeres Gefälle des Bachlaufs erklärt, während der *Krakenbach* auf der bekannten Strecke bis in den Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels mit starkem Gefälle fließt.

Bei stärkeren Hochwasserereignissen, so z.B. in Folge eines beliebig herausgegriffenen Niederschlagsereignisses am 3.7.2016, zeigen beide Messstellen ein sehr unterschiedliches Verhalten (Abb. 8). Wieder erreicht die Flutwelle die eigentlich tiefer gelegene Sonde im *Krakencanyon* etwas früher. Während der Wasserstand im *Krakenbach* sofort um etwa einen halben Meter ansteigt, was wahrscheinlich der Rückstauhöhe durch die Schotterbank vor dem Endsiphon entspricht, steigt der *Auenbach* erst verhalten an. Gut drei Stunden nach dem ersten Anspringen nimmt der Anstieg plötzlich stark zu, was beim *Auenbach* durch eine Intensivierung der Schüttung zu erklären ist. Bei knapp 2 m Stauhöhe ist durch eine massive Vergrößerung des durchströmten Querschnitts die Spitze des Flutpulses beim *Auenbach* gekappt. Nach weiteren 3 Stunden lässt die Schüttung deutlich nach, klingt aber noch über den ganzen folgenden Tag langsam ab. Dem gegenüber zeigt der *Krakenbach* einen plötzlichen, massiven Anstieg mit einem ausgeprägten Peak bei knapp 10 m Wasserhöhe und ein ebenfalls rasantes Abfallen des Wasserspiegels bis unter die Höhe der Schotterbank, worauf ein sehr viel langsameres Nachlaufen folgt.

Ein Blick auf die gemessenen Temperaturen (Abb. 9) hilft das unterschiedliche Verhalten zu interpretieren. Der *Auenbach* zeigt erst einen leichten Temperaturanstieg, welcher der hydraulischen Reaktion des Wassers aus der Siphonzone im Oberlauf zugeordnet werden kann, worauf das kalte Ereigniswasser eintrifft. Wie auch beim Sammler scheint zuerst kalter Zufluss zu dominieren, worauf wärmerer Zufluss einsetzt. Nach dem Hochwasserereignis wird die zuvor registrierte Temperatur nicht mehr ganz erreicht, der Siphonbereich wird erst sehr langsam wieder auf das vorherige Niveau erwärmt.

Ganz anders der *Krakenbach*: aufgrund seines steilen Gefälles und mangels bekannter Siphonbereiche mit hydraulischer Reaktion trifft sofort kühleres Ereigniswasser ein. Aus dem gleichen Grund ist aber auch der Temperaturabfall deutlich weniger ausgeprägt, da er nur auf leicht verminderten Energieaustausch mit der Höhlenluft zurückzuführen ist. Mit dem plötzlichen massiven Wasseranstieg steigt die Wassertemperatur erheblich an. Wir vermuten, dass der Endsiphon bis zur Höhe der Schotterbank angestiegen ist und der gesamte Bereich durch erwärmtes Siphonwasser geflutet wird, welches als hydraulische Reaktion eines zusam-

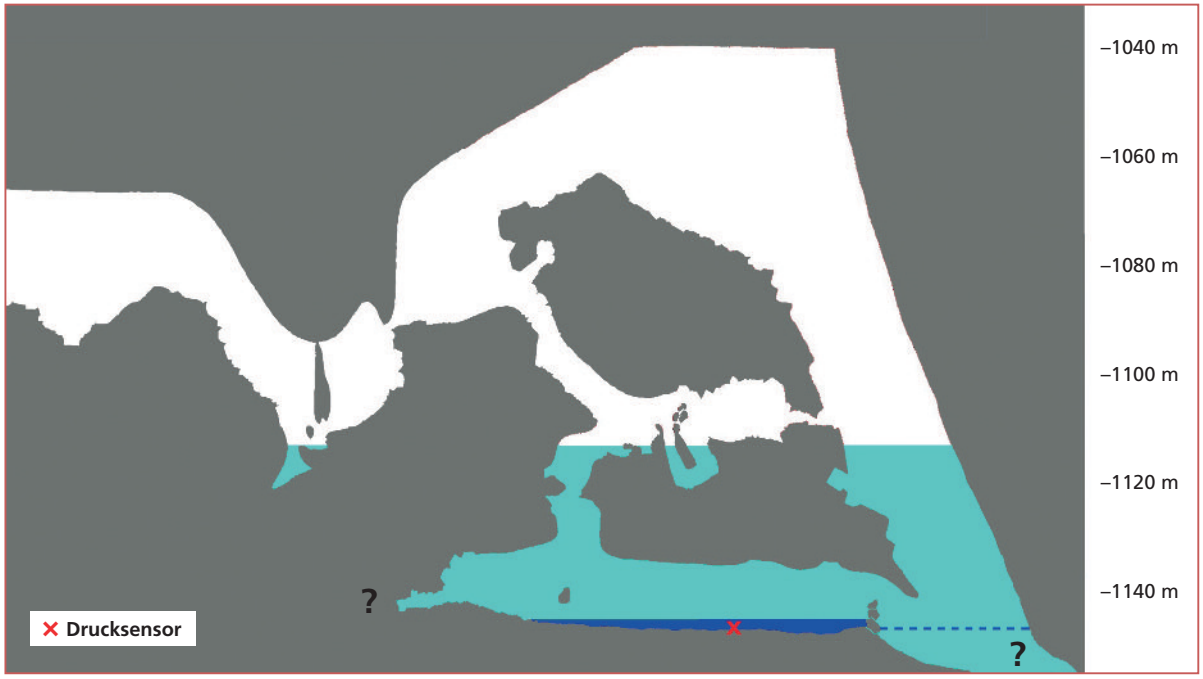


Abb. 10: Aufriss des Endbereiches des Krakencanyons mit gemessenem Maximalwasserstand (hellblau), Normalwasserstand im Endsiphon (dunkelblau gestrichelt), und Rückstau des Krakenbaches an der sperrenden Schotterbank (dunkelblau).
Fig. 10: Vertical section of Krakencanyon near the final sump. Light blue indicates the highest observed water-level, the dashed line marks the normal water-level in the sump and dark blue the water-level related to gravel partly blocking Krakenbach.

menhängenden Karstwasserspiegels aus dem Endsiphon aufsteigt (ein ähnliches Verhalten ist bei allen Hochwasserereignissen mit Stauhöhen größer 0,5 m zu beobachten). Weitere Hinweise auf den hier postulierten zusammenhängenden Karstwasserspiegel ergeben sich aus der statistischen Auswertung der Hochwasserereignisse (siehe folgender Abschnitt). Erst mit dem Nachfließen des kalten *Krakenbachs* und der resultierenden Durchmischung mit kaltem Ereigniswasser nimmt die Temperatur allmählich wieder ab. In Abbildung 10 ist die Messstelle im *Krakencanyon* bis zum Endsiphon im Aufriss dargestellt. Das an der Schotterbank einen halben Meter aufgestaute kalte Wasser des *Krakenbaches* ist dunkelblau eingezeichnet, der hellblaue Wasserstand entspricht der Situation, wenn warmes Wasser aus dem Endsiphon den Höhlenbereich flutet (bis zur maximal gemessenen Wasserhöhe von 35 m).

STATISTISCHE AUSWERTUNG ZUM NACHWEIS EINES EINHEITLICHEN KARSTWASSERSPIEGELS IN RIESENDING UND KOLOWRATHÖHLE

Ist die Interpretation des Temperaturverhaltens richtig, so stellen die Drucksonden in *Krakencanyon* und *Orkträнke* ab einer gewissen Stauhöhe die Schwankungen eines gemeinsamen Karstwasserspiegels dar. Während der kurzen Überlappungszeit der Messungen von 11/2013 bis 02/2014 kam es jedoch zu keinem solchen Hochwasserereignis. Die einzige Messstelle im Berg, von der sowohl während der Messungen in der *Orkträнke*, als auch während der Messungen im *Krakencanyon* Daten vorliegen, ist der *Auenbach*. Es soll deshalb untersucht werden, ob über die Korrelation der Wasserstände mit dem *Auenbach* auch *Orkträнke* und *Krakenbach* miteinander in ein Verhältnis gesetzt werden können. In Abbildung 11 sind die gleichzeitig gemessenen Wasserstände von *Auenbach* und *Krakenbach* gegeneinander aufgetragen, wobei links der in der rechten Graphik markierte Bereich vergrößert dargestellt ist. Die Ereignishäufigkeit lässt sich an der Farbskala ablesen. Bis 30 cm Wasserhöhe im *Auenbach* und 20 cm Wasserhöhe im *Krakenbach* liegt eine deutlich erkennbare Korrelation vor, bis knapp 50 und 35 cm Wasserhöhe lässt sich diese zumindest noch erahnen (als schwarze Linie manuell markiert). Die Variationsbreite in diesem Bereich lässt sich zwanglos durch eine unterschiedliche Zugrichtung von Regengebieten über den Untersberg erklären. Mal springt der *Auenbach* zuerst an, mal reagiert der *Krakenbach* schneller auf Niederschlagsereignisse. Bei mehr als

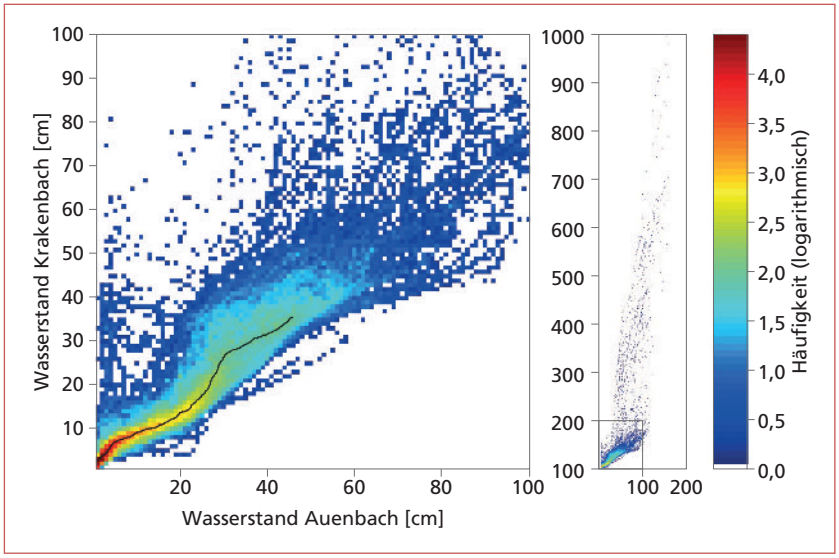


Abb. 11: Verteilung der während der gemeinsamen Messperiode gemessenen Wasserstände von Auenbach und Krakenbach im Zentimeterraster. Links eine Detailansicht des in der Graphik rechts markierten Ausschnittes.
Fig. 11: Distribution of water-levels observed simultaneously at Auenbach and Krakenbach, gridded in centimetre classes. The left part of the figure is a close-up of the right part.

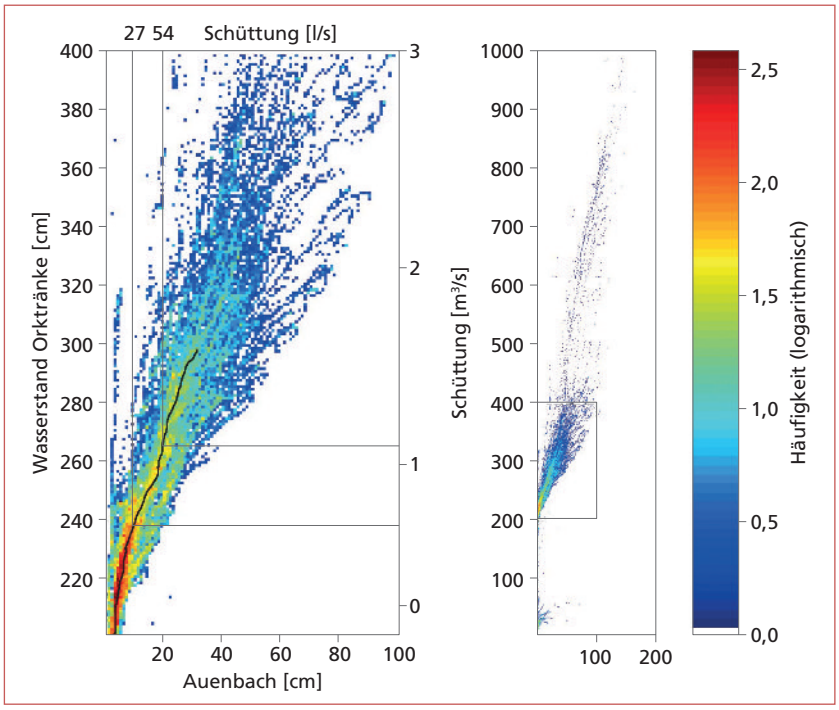


Abb. 12: Verteilung der während der gemeinsamen Messperiode gemessenen Wasserstände von Auenbach und Orktränke im Zentimeterraster. Links eine Detailansicht des in der Graphik rechts markierten Ausschnitts.
Fig. 12: Distribution of water-levels observed simultaneously at Auenbach and Orktränke, gridded in centimetre classes. The left part of the figure is a close-up of the right part.

60 cm Wasserhöhe im *Auenbach* oder mehr als 50 cm Stauhöhe im *Krakenbach* lässt sich praktisch kein Zusammenhang zwischen den beiden Bächen mehr erkennen. Immer öfter treten nun hohe Überflutungen des *Krakencanyons* auf, die wahrscheinlich nicht mit der Schüttung des *Krakenbachs* alleine erklärt werden können, während die Flutspitzen beim *Auenbach* durch die starke Zunahme des durchströmten Profils mit der Höhe gekappt sind.

Ein ähnliches Bild zeichnet sich beim Vergleich von *Auenbach* und *Orktränke* ab (Abb. 12). Bis knapp 40 cm Wasserhöhe korreliert der *Auenbach* deutlich mit Wasserständen der *Orktränke* zwischen 2 und 3 m. Bei stärkerem Wasserangebot zeigt die *Orktränke* vergleichbar dem *Krakencanyon* starke Variationen des Wasserspiegels, während diese beim *Auenbach* gedämpft sind. Die gefundene Korrelation der drei Messstellen beschreibt also nur niedere Wasserstände. Ein Zusammenhang zwischen den als Schwankungen des Karstwasserspiegels interpretierbaren mittleren bis hohen Wasserstände in *Krakencanyon* und *Orktränke* lässt sich mit Hilfe der Korrelationen zum Auenbach nicht ableiten.

Zum Verhalten der *Orktränke* sind noch einige Erklärungen nötig. Der *Unheimliche See* in der Fürstenbrunner Quellhöhle hat in 688 m Seehöhe seinen Som-

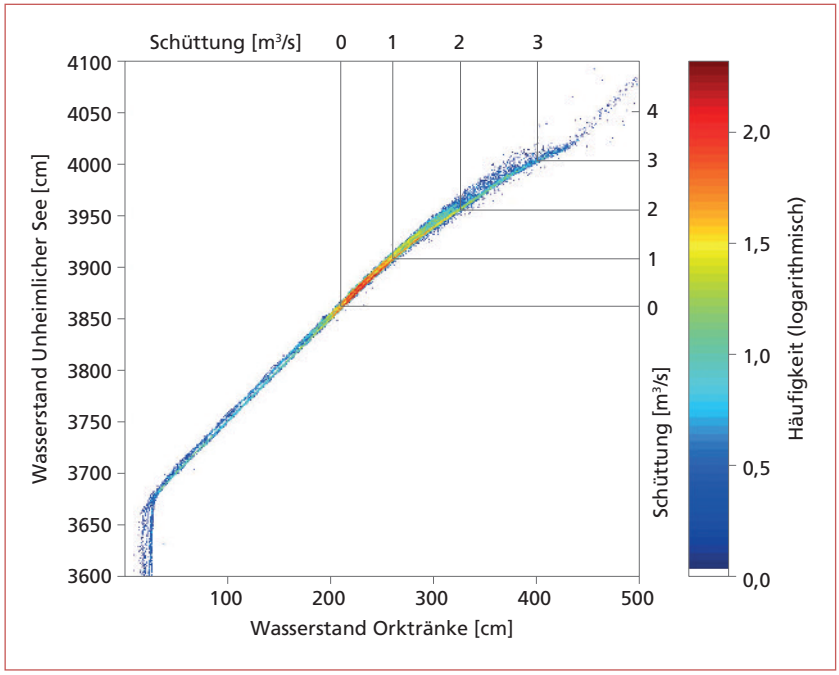


Abb. 13: Verteilung der während der gemeinsamen Messperiode gemessenen Wasserstände des Unheimlichen Sees und der Orktränke im Zentimeterraster.
Fig. 13: Distribution of water-levels observed simultaneously at Orktränke and Unheimlicher See, gridded in centimetre classes.

merüberlauf. Nur bei lang anhaltender Trockenheit sinkt der Wasserspiegel unter diese Schwelle ab. Diese Schwellenhöhe lässt sich bei allen Messsonden am Karstwasserspiegel ablesen und liegt bei der *Orktränke* eben bei 2 m Wasserhöhe. Bei niedrigerem Wasserspiegel hängen die gemessenen Wasserhöhen nach Niederschlagsereignissen vom aktuellen Füllstand des Reservoirs ab und lassen sich nicht im Rahmen der gezeigten Analyse interpretieren, solange die unterschiedlichen Sonden nicht ein zusammenhängendes Reservoir beschreiben.

Anhand der Auslaufkurve des *Unheimlichen Sees* hat Gruber (2014) unterschiedliche Modelle von Reservoir und Abfluss aufgestellt und in Abhängigkeit seiner Annahmen zur Geometrie des Reservoirs und zur Dimensionierung des Ablaufs eine sich aus allen hydraulisch zusammenhängenden unterirdischen Seeflächen zusammensetzende Reservoirfläche von 8500 m² bis zu 10500 m² errechnet, zu der neben dem *Unheimlichen See* auch der See der *Neuen Heimat*, die *Tiefsee*, die *Orktränke* und neben weiteren unbekannten Höhlenseen wahrscheinlich auch der Siphonsee des *Krakencanyons* zählen. Es lässt sich zumindest die Aussage treffen, dass die Drucksonde im *Krakencanyon* noch oberhalb der Überlaufschwelle des *Unheimlichen Sees* liegen muss und nicht bereits im nur bei winterlichem Niedrigwasser zugänglichen Bereich. Da es sich bei der *Orktränke* um einen Siphonsee und kein frei fließendes Gewässer handelt, und da sich die gemessenen Wasserhöhen im Bereich des Sommerüberlaufs des *Unheimlichen Sees* bei allen Sonden am Karstwasserspiegel sehr ähneln, liegt der Schluss nahe, dass die in Abbildung 11 gezeigte Verteilung die Korrelation zwischen dem *Auenbach* und dem Sommerüberlauf des *Unheimlichen Sees* in der Quellhöhle beschreibt. Diese Vermutung wird durch Abbildung 13 bestätigt. *Unheimlicher See* und *Orktränke* korrelieren nahezu perfekt miteinander (Gerade mit 45° Steigung). Der Sommerüberlauf des *Unheimlichen Sees* ist auf dieser Geraden durch eine Häufung der Ereignisse bei 38,5 m im *Unheimlichen See*, bzw. 2 m in der *Orktränke*, sichtbar. Etwa 1 m über dem Sommerüberlauf verflacht die Kurve etwas und fächert auf. Dies wird durch Reibungsverluste in Gangverengungen zwischen *Orktränke* und *Unheimlichem See* verursacht, die zu einem schüttungsabhängigen Rückstau in der *Orktränke* führen (Gruber, 2014). Unterhalb eines Wasserstands von 36,7 m im *Unheimlichen See* fällt der Logger in der *Orktränke* trocken. Die angezeigten Wasserstände von 15 bis 25 cm spiegeln die Unsicherheit der Luftdruckkorrektur wider. Der Offset von etwa 15 cm kommt zustande, da der Wasserstand relativ zum gemessenen Minimaldruck gezeigt wird (in diesem Fall offensichtlich einem Ausreißer).

In Abbildung 13 sind die gemäß Gruber (2014) berechneten Schüttungen des *Unheimlichen Sees* bis 4 m³/s eingezeichnet. Die korrespondierenden Wasserstände der *Orktränke* lassen sich aus der Graphik ablesen. Die mittels des weiter oben abgeleiteten linearen Modells des *Auenbachs* berechneten Schüttungen für 10 und 20 cm Wasserhöhe wurden in Abbildung 12 eingetragen und mit den korrespondierenden Schüttungen der

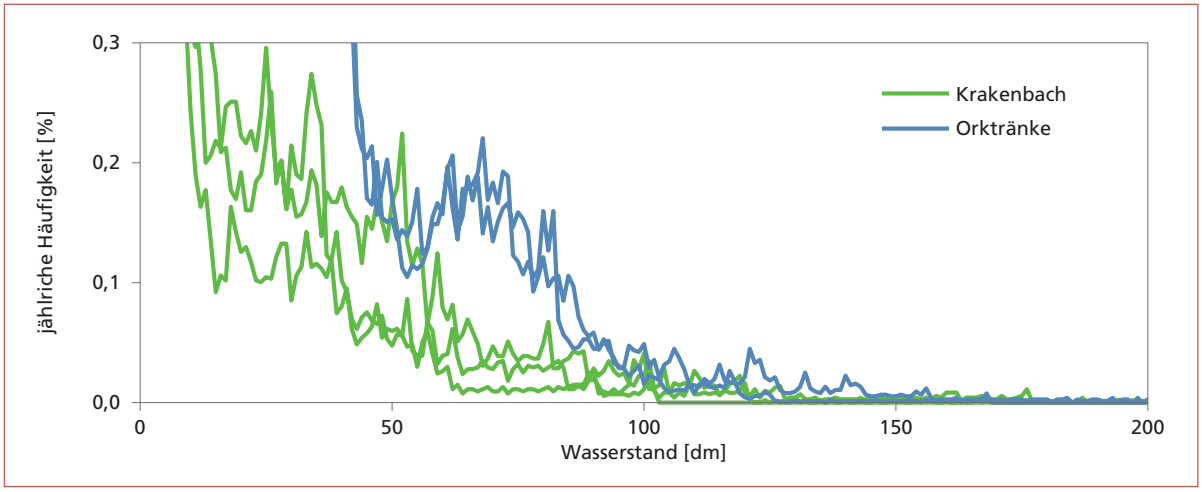


Abb. 14: Verteilung der gemessenen Wasserstände in Dezimeterklassen am Krakenbach in den Jahren 2014, 2015 und 2016, und in der Orktränke 2012 und 2013.
Fig. 14: Distribution of water-levels in decimetre classes of Krakenbach in 2014, 2015 and 2016, and of Orktränke in 2012 and 2013.

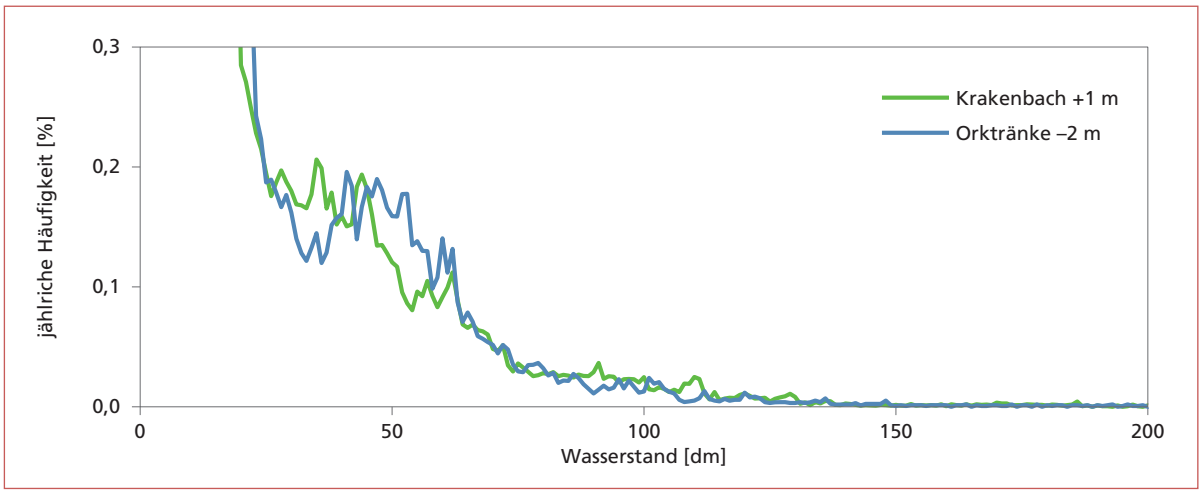


Abb. 15: Über alle Jahre gemittelte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Wasserhöhen in Dezimeterklassen am Krakenbach und in der Orktränke, wobei die Wasserhöhe an der Orktränke um 2 m verringert, die des Krakenbaches um 1 m vergrößert wurde.
Fig. 15: Mean distribution of water-levels at Krakenbach and Orktränke taking all years into account. Water-levels were corrected to refer to the normal water-level at Unheimlicher See.

Orktränke bzw. der Quellhöhle in Relation gesetzt. Für den durch Messungen abgedeckten Schüttungsbereich ergibt sich demnach ein Anteil des *Auenbachs* an der Gesamtschüttung der Quelle von knapp 5 %.
Um die relative Höhendifferenz zwischen den Drucksonden in *Orktränke* und *Krakencanyon* eingrenzen zu können, wird in Abbildung 14 die Häufigkeit der erreichten Wasserstände pro Jahr in Prozent dargestellt. Dafür wurden die Wasserstände in Dezimeterklassen eingeteilt. Für den *Krakenbach* liegen annähernd drei, für die *Orktränke* zwei Kalenderjahre zur statistischen Auswertung vor. Die Variation zwischen den Häufigkeitsverteilungen in unterschiedlichen Jahren am gleichen Ort (in Abb. 14 in gleicher Farbe dargestellt) spiegelt im Wesentlichen die statistische Variabilität der Niederschlagsereignisse pro Jahr wider. Die mit bis zu 7% am häufigsten auftretenden niederen Wasserstände liegen außerhalb des in Abbildung 14 dargestellten Bereichs, auf sie wurde bereits in Abbildungen 11 und 12 fokussiert, für die folgende Interpretation sind sie nicht relevant. Höhere als die dargestellten Wasserstände sind so selten, dass ihre statistische Auswertung nicht aussagekräftig ist.
Abbildung 15 zeigt den interessanten Abschnitt der an der *Orktränke* 2012/2013, bzw. am *Krakenbach* 2014–2016 gemittelten jährlichen Verteilungen. Die Wasserstände der *Orktränke* wurden um 2 m reduziert, die des *Krakenbaches* um 1 m vergrößert (der Wasser-

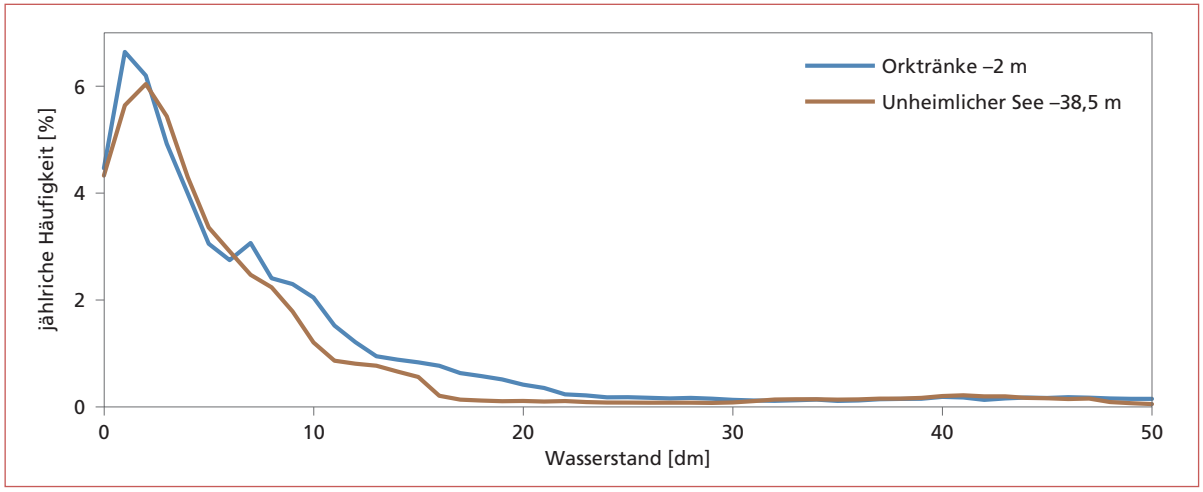


Abb. 16: Über alle Jahre gemittelte Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Wasserhöhen in Dezimeterklassen an der Orktränke (graublau) und im Unheimlichen See (braun), wobei jeweils der Wasserstand über der Überlaufschwelle am Unheimlichen See gezeigt wird.
Fig. 16: Mean distribution of water-levels at Unheimlicher See (brown) and Orktränke (grey blue). Water-levels were corrected to refer to the normal water-level at Unheimlicher See.

stand 0 entspricht nun in beiden Fällen der Überlaufschwelle des *Unheimlichen Sees*). Es fällt die gute Übereinstimmung der beiden Kurven auf, ihre Unterschiede liegen im Bereich der aus der Mittelung abgeleiteten mittleren Fehler, welche aber aufgrund der kleinen Sample-Größen von 3 bzw. 2 nur unsicher bestimmt (und deshalb nicht dargestellt) sind. Wegen dieser Unsicherheit wurde auch darauf verzichtet, den Höhenversatz der Pegel durch Minimierung der Quadratsumme der Unterschiede zwischen beiden Kurven zu bestimmen, die Differenz von 3 m wurde optisch geschätzt.

Aus der guten Übereinstimmung der Häufigkeitsverteilungen der Wasserstände in *Orktränke* und *Krakenbach* lässt sich folgern, dass es sich sehr wahrscheinlich um einen zusammenhängenden Wasserspiegel handelt. Unterschiedliche Reservoirs würden aufgrund ihrer unterschiedlichen Geometrien zu deutlich unterschiedlicheren Kurven führen. Weiter lässt sich folgern, dass die Drucksonde im *Krakenbach* 3 m über jener in der *Orktränke* und damit etwa 1 m über dem Sommerüberlauf des *Unheimlichen Sees* in der Fürstenbrunner Quellhöhle angebracht ist. Der von Gruber (2014) beschriebene Effekt des Rückstaus an Gangverengungen durch Reibungsverluste ist dabei vernachlässigt, müsste aber zu einer Längendehnung der Häufigkeitsverteilung der Wasserhöhen im *Krakenbach* führen, die nicht zu erkennen ist. Daraus lässt sich der Umkehrschluss ziehen, dass zwischen *Krakencanyon* und *Orktränke* keine relevante Verengung des Querschnittes zu erwarten ist.

Vergleicht man dagegen die jährliche Häufigkeitsverteilung von *Orktränke* und *Unheimlichem See* (Abb. 16), wobei in diesem Fall die am häufigsten auftretenden und damit statistisch am aussagekräftigsten Wasserstände knapp über der Überlaufschwelle des *Unheimlichen Sees* betrachtet werden, so ist ab 0,6 m Wasserhöhe (über der Überlaufschwelle) die durch Reibungsverluste verursachte Vergrößerung der Wasserhöhen bei der *Orktränke* als Dehnung der Häufigkeitsverteilung zu größeren Wasserhöhen hin ablesbar (*Unheimlicher See* und *Orktränke* wurden zeitlich überlappend gemessen und Einzelereignisse können direkt verglichen werden, die statistische Auswertung wird hier nur zum Vergleich mit Abbildung 15 gezeigt). Der statistisch bestimmte 3-m-Höhenversatz der Drucksonden zwischen *Krakenbach* und *Orktränke* passt zu der Beobachtung, dass im Oktober 2016, als die Drucksonden im Riesending geborgen und der Endsiphon im *Krakencanyon* entdeckt wurde, der Wasserspiegel des Endsiphons 1 m unterhalb der Drucksonde im Bachbett lag. Dies entspricht genau dem Sommerüberlauf des *Unheimlichen Sees*. Vor und während der 6-tägigen Höhlentour schneite es am Untersberg oberhalb etwa 1500 m, was zu trockenen Bedingungen in der Höhle führte. Unterhalb fiel der Niederschlag jedoch als Regen oder taute zumindest schnell auf dem noch warmen Boden, wodurch der Karstwasserspiegel bis zum Überlauf gefüllt gewesen sein dürfte. Damit ist der Spiegel des Endsiphons im *Krakencanyon* auf die Höhe des Sommerüberlaufs des *Unheimlichen Sees* auf 688 m Seehöhe bestimmt. Dies ist 6 m tiefer als durch die Vermessung der Höhle berechnet. Da man bei klassischen Höhlenvermessungstechniken (mit Peilgeräten einseitig gemessener Polygonzug) mit einem Höhen- und Lagefehler

von 1–2 % rechnen muss, der Weg vom Eingang bis zum Endsiphon rund 5 km und die gemessene Tiefe 1149 m beträgt, ist eine Höhenabweichung von 6 m überraschend gering. Die Tiefe der Riesending-Schachthöhle vergrößert sich durch die Korrektur auf 1155 m.

DISKUSSION UND AUSBLICK

Eine Analyse der im Riesending gemessenen Luft- und Wassertemperaturen passt gut zu den in Luetscher und Jeannin (2004) aufgestellten Modellvorstellungen zur Temperaturverteilung in der vadosen Zone tiefer Höhlensysteme. Darüber hinaus lassen sich die vermutlichen Einzugsgebiete verschiedener Höhlenbäche abgrenzen. Aus den zahlreichen am und im Untersberg gesammelten Daten lässt sich außerdem das Volumen des Karstreservoirs unterhalb des Karstwasserspiegels abschätzen und die Erwärmung des gespeicherten Wassers durch Erdwärme berechnen. Die berechneten Werte passen gut zu den Messungen der Wassertemperatur im Rückstaubereich des Karstwasserspiegels im *Krakencanyon* und helfen, diese zu interpretieren.

Durch den Vergleich des Verhaltens des *Sammlers* im Riesending und des *Unheimlichen Sees* und *Talsiphons* in der *Fürstenbrunner Quellhöhle* konnte gezeigt werden, dass auf dem Plateau des Untersbergs auf 1500 bis 2000 m Seehöhe im Einzugsgebiet des *Sammlers* versickerndes Wasser aufgrund seiner längeren Fließstrecken nicht für die schnelle Reaktion des Wasserspiegels im *Unheimlichen See* nach Niederschlagsereignissen verantwortlich ist. Damit wird die Vermutung von Bichler & Reischer (2013) gestützt, dass Steigungsregen an der Nordflanke des Untersbergs einen wesentlichen Einfluss auf den Karstwasserspiegel im Berg und die Schüttung der *Fürstenbrunner Quellhöhle* haben. Gleichzeitig wird die ursprünglich den ersten Sondeneinbau im Riesending motivierende Idee, einen Flutpuls durch den Berg zu verfolgen, zumindest an der Messstelle *Sammler* im Riesending ad absurdum geführt. Das zeitverzögerte Eintreffen des relativ warmen Wassers des *Zehnkaserbachs* an der Messstelle im *Sammler* lässt aber zumindest auf eine bedeutende Fließstrecke mit geringem Gefälle im Oberlauf des *Zehnkaserbaches* schließen und deutet somit auf großes Neulandpotential hin. Somit hat sich der Sondeneinbau am *Sammler* in jedem Falle gelohnt.

Eine statistische Analyse der gleichzeitig beobachteten Wasserstände von *Auenbach*, *Krakenbach* und *Orktränke* zeigt vergleichbares Verhalten bei Wasserständen bis zu etwa 0,5 m in *Auenbach* und *Krakenbach* und zwischen 2 und 3 m in der *Orktränke*. Für eine Korrelation bei höheren Wasserständen ist der *Auenbach* nicht geeignet, da die Spitzen höherer Flutpulse im *Auenbach* durch eine massive Vergrößerung des durchströmten Querschnitts gekappt sind. Da die Wasserschwankungen im gut korrelierenden Bereich der *Orktränke* höchst wahrscheinlich den Sommerüberlauf des *Unheimlichen Sees* in der Quellhöhle charakterisieren und von *Auenbach* und *Unheimlichem See* Schüttungskurven vorliegen, lässt sich der typische Anteil des *Auenbachs* an der Gesamtschüttung der Fürstenbrunner Quellhöhle bei niedrigem bis mittlerem Wasserstand von knapp 5 % abschätzen. Während ein Wiederaustritt einiger zuvor bereits in der Höhle angetroffener Bäche (*Schöner Canyon*, *Brausecanyon*, *Kluft der Schwarzen Kristalle*) im *Auenbach* nicht ausgeschlossen werden kann, so ist aufgrund der Höhenlage gesichert, dass die drei anderen Hauptbäche (*Sammler*, *Monsterbach*, *Krakenbach*) unabhängig vom *Auenbach* sind. Der Anteil der das Riesending durchfließenden Gewässer an der Quellschüttung ist bei Normalwasserständen erheblich.

Über eine statistische Analyse der Häufigkeiten von Hochwasserständen jenseits der bereits angesprochenen Mittelwasserstände in *Krakencanyon* und *Orktränke* lässt sich ablesen, dass die Messsonde im *Krakencanyon* 3 m oberhalb der Messsonde in der *Orktränke* platziert ist. Damit fällt der beobachtete Wasserstand im Endsiphon des *Krakencanyons* genau auf die Höhe des Sommerüberlaufs des *Unheimlichen Sees* auf 688 m Seehöhe in der Quellhöhle und die absolute Tiefe der Riesending-Schachthöhle muss um 6 m auf -1155 m korrigiert werden. Außerdem lässt sich über die gute Übereinstimmung der Form der Häufigkeitsverteilungen ablesen, dass zwischen den beiden Messstellen keine signifikante Verengung des Gangquerschnitts zu erwarten ist. Vergleicht man die Häufigkeitsverteilungen der Wasserstände von *Orktränke* in der Kolowrathöhle und *Unheimlichem See* in der Fürstenbrunner Quellhöhle, so sind die von Gruber (2014) durch eine Verengung des Gangquerschnitts erklärten größeren Hochwasserspitzen bei der *Orktränke* deutlich als Dehnung der Verteilung zu erkennen.

Spannend ist die Frage, wie weit sich der gemeinsame Karstwasserspiegel noch in den Berg hinein verfolgen lässt. Im *Auencanyon*, dem Abfluss des *Auenbaches*, wurden im Oktober 2016 bereits 1070 m Tiefe erreicht, Umkehr auf offener Strecke in 3,4 km Entfernung von der Quellhöhle. Und auch in der *Krötenhalle* unterhalb des Bereiches der *Sechs Schächte*, in der bei der Unfalltour im Juni 2014 auf -1055 m eine stark bewetterte

Fortsetzung entdeckt und ebenfalls bis etwa 1070 m Tiefe eingesehen wurde, besteht noch die Chance, zum Karstwasserspiegel abzusteigen, dort bereits in etwa 3,8 km Entfernung zur Quellhöhle.

DANK

Wir danken Georg Gruber, der luftdruckbereinigte Wasserstandsdaten aus der Kolowrathöhle zur Verfügung gestellt hat, Rotronic für einen Hydrolog Datenlogger, Rudolf Pavuza für die Leihgabe mehrerer Temperaturfühler und eines Leitfähigkeitsmessgerätes, Marc Luetscher und Ralf Benischke für ihre sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und Christoph Spötl für die konstruktive Betreuung des Artikels.

LITERATUR

Bichler, B. & Reischer, M. (2013): Hydrogeologie des Untersberges und des angrenzenden Salzburger Beckens. – Unveröff. Masterarb. Univ. Innsbruck.

Filipponi, M. (2000): Höhlenklima. – Veröff. Manuskript. Arbeitsgem. f. Speläologie Regensdorf.

Gruber, G. (2014): Das Abflussverhalten des Karstwassers am Untersberg bei Salzburg, Österreich. – Unveröff. Masterarb. Karl-Franzens-Univ. Graz.

Haseke-Knapczyk, H. (1989): Der Untersberg bei Salzburg. – Innsbruck (Wagner).

Höfer-Öllinger, G., Gadermayr, W., Zagler, G. & Butschek, M. (2016): Der Einfluss der Einzugsgebietshöhe auf das Abflussverhalten beim Hochwasser vom Juni 2013, aufgezeichnet in Höhlen und Karstquellen im Land Salzburg. – Die Höhle, 67: 49–64.

Luetscher, M. & Jeannin, P.Y. (2004): Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. – Terra Nova, 16: 344–350.

Meyer, U. & Matthalm, T. (2007): Die Riesending-Schachthöhle auf dem Untersberg. – In: Akten des 12. nationalen Kongresses für Höhlenforschung, Vallée du Joux, 15.–17.9.2007, Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung: 220–226.

Meyer, U. & Matthalm, T. (2009): Die Riesending-Schachthöhle im Untersberg. – Die Höhle, 60: 33–43.

Meyer, U. & Matthalm, T. (2011): Die Riesending-Schachthöhle im Untersberg. – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, 57: 36–44.

Meyer, U. (2012): Auf der Suche nach dem Barbarossa-System im Untersberg. – In: Akten des 13. nationalen Kongresses für Höhlenforschung, 68–74, Muotathal 29.9.–1.10.2012, Schweizerische Gesellschaft für Höhlenforschung: 68–74.

Reischer, M., Bichler, B., Spötl, C., Höfer-Öllinger, G. & Wyhlidal, S. (2015): Karst hydrogeology of the Untersberg massif and its interaction with the porous aquifer in the adjacent Salzburg Basin. – Austrian Journal of Earth Sciences, 108: 68–81.

Shabarova, T., Meyer, U. & Pernthaler, J. (2013): Mikrobenin aquatischen Karsthabitaten: Ergebnisse aus dem Riesending im Vergleich zu anderen Karstsystemen. – Tagungsband zu Karstwasser – Grundwasser – Untersberg, 22.8.2013, Salzburg (unpaginiert).

Steinmassl, H. (2014): Höhlenrettungseinsatz im Riesending. – Bergundsteigen, 14(3): 42–53.

Zagler, G. (2016): Untersberg. – In: Spötl C., Plan L., Christian E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz (Oberösterreichisches Landesmuseum): 541–552.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Die Höhle

Jahr/Year: 2017

Band/Volume: 68

Autor(en)/Author(s): Meyer Ulrich, Zagler Georg, Höfer-Öllinger Giorgio

Artikel/Article: Hydrologie der Riesending-Schachthöhle 79-99