

Der Einfluss der Einzugsgebietshöhe auf das Abflussverhalten beim Hochwasser vom Juni 2013, aufgezeichnet in Höhlen und Karstquellen im Land Salzburg

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von fünf Salzburger Karstsystemen wird der Einfluss der Einzugsgebietshöhe auf das Abflussverhalten im Zuge des Hochwasserereignisses vom 2.6.2013 analysiert. Dieses Hochwasser überschritt im Land Salzburg in mehreren Einzugsgebieten das 100-jährige Ereignis. Dabei zeigte sich, dass die Ereignisintensität von der Höhe des Einzugsgebietes abhängt. Überraschenderweise überschritt ein weniger bedeutendes Niederschlagsereignis (31.8.2014) in drei der Systeme (Kitzsteinhorn/Kesselfallquellen, Leoganger Steinberge/Lamprechtsofen, Tennengebirge/Winnerfallhöhle) das Ereignis vom 2.6.2013 deutlich. An der Fürstenbrunner Quellschneise (Untersberg) und der Bärenhöhle im Bluntauental (Hagengebirge) wurde hingegen am 2.6.2013 der bisher höchste Abfluss bzw. Wasserstand gemessen. Da die Nullgradgrenze während des Ereignisses zwischen 1600 m und 2000 m lag, kam es in höheren Einzugsgebieten aufgrund des Schneefalls zu keinen extremen Abflussspitzen. Eine nur wenige 100 m höher liegende Nullgradgrenze hätte zu deutlich höheren Abflusswerten geführt.

EINFÜHRUNG

Die Dokumentation von Hochwasserereignissen in Höhlen liegt für den Forscher in einer Sphäre zwischen Bedrohung und Faszination. Spuren des Hochwassers von 2002 in der Hirlatzhöhle im Dachstein überraschten hinsichtlich der Wassermengen und der erreichten Stauhöhen (Greger et al., 2004). Drucksonden-Messreihen im Höllloch in der Schweiz zeigten, dass bei Wassereinbruch manche Rückzugswegen der Forscher neu einzuschätzen sind (Ziegler, 2013).

Die Entwicklung einfach zu handhabender Drucksonden ermöglicht es, das Abflussgeschehen des Karstwassers nicht nur – wie bisher – an den Quellaustritten

ABSTRACT

The role of the catchment elevation on the discharge behaviour during the flood event of June 2013, recorded in caves and by karst springs in the province of Salzburg.

This flood exceeded the 100-year flood mark in many catchments of the province. Monitoring data show a strong link between the magnitude of the flood and the elevation of the karst catchment. Surprisingly, a less intensive local precipitation event of August 31, 2014 exceeded the June 2013 event significantly at Kesselfallquellen (Kitzsteinhorn), Lamprechtsofen (Leoganger Steinberge) and Winnerfallhöhle (Tennengebirge). At Fürstenbrunner Quellschneise (Untersberg) and Bärenhöhle (Hagengebirge), however, the highest runoff was recorded during the June 2013 flood. No extreme runoff occurred in high-lying catchments, because the zero degree line stayed between 1600 m and 2000 m during this strong precipitation event. A zero degree line only a few 100 m higher would have resulted in much higher runoff.

Giorgio Höfer-Öllinger

Geoconsult ZT GmbH, Hölzlstraße 5
5071 Wals bei Salzburg
giorgio.hoefer-oellinger@geoconsult.eu

Wolfgang Gadermayr

geo² zt ges.m.b.h.
Almuferweg 8, 5400 Hallein
gadermayr@salzburg.co.at

Georg Zagler

König Ludwig Straße 20, 5020 Salzburg
gzagler@yahoo.de

Michael Butschek

Zentralanstalt für Meteorologie
und Geodynamik
Freisaalweg 16, 5020 Salzburg
michael.butschek@zamg.ac.at

Eingelangt: 23.4.2016

Angenommen: 8.7.2016

und die Winnerfallhöhle (1511/4, Tennengebirge) liegen Aufzeichnungen der Druckhöhe vor. Für die Fürstenbrunner Quellhöhle (1339/11, Untersberg) und die Kesselfallquellen (Kitzsteinhorn) liegen anhand von Abflussmessungen erstellte Schlüsselkurven und damit Abflussganglinien vor.

Die Aufzeichnungen ergaben, dass am 2.6. bei zwei Messstellen (Bärenhöhle, Fürstenbrunner Quellhöhle) das stärkste jemals dort aufgezeichnete Ereignis stattfand. Zwei Messstellen (Lamprechtssofen und Winnerfallhöhle) zeigten jedoch am 31.7.2014 ein größeres Hochwasser.

METEOROLOGISCHE SITUATION

Starkniederschlag Ende Mai bis Anfang Juni 2013

Ende Mai und Anfang Juni 2013 führte die ungünstige Abfolge mehrerer Tiefdrucksysteme am Alpennordrand zu intensiven Niederschlägen. Abbildung 1 zeigt die Niederschlagssumme des Kurzfristvorhersage- und Analysesystems INCA aus der Phase mit den stärksten Niederschlägen. INCA ist das automatische Analyse- und Kurzfristvorhersagesystem der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Es liefert auf einem 1-km-Raster für ganz Österreich alle 15 bzw. 60 Minuten aktualisierte Prognosen verschiedenster meteorologischer Parameter wie z.B. Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Bewölkung und Niederschlag. Prognosen numerischer Wettervorhersagemodelle (ALADIN, ECMWF) werden durch Kombination mit aktuellen Messwerten (Wetterstationen, Niederschlagsradar, Satellit) verbessert und mit Hilfe hochauflösender Geländeinformation verfeinert (Haiden et al., 2011). Ausgangspunkt war in den letzten Junitagen eine Tiefdruckrinne über Westeuropa bzw. ein zum Monatswechsel quasi ortsfestes Tief in höheren Luftschichten, an dessen Vorderseite sich ein Adriatief rasch intensivierte und die Alpen über den Balkan und Ungarn um-

rundete (in der Meteorologie spricht man von einer sogenannten Vb-Wetterlage). Zum Höhepunkt der Niederschläge am Abend des 1.6.2013 wurden von Norden extrem feuchte und warme Luftmassen gegen die Alpen gestaut. Das durch die Strömung an der Alpennordseite erzwungene Aufsteigen der Luft (synoptische und orographische Hebung) sorgte für intensive Regenfälle. Die Wetterstation Salzburg-Freisaal registrierte in der Periode vom 30.5. bis 2.6. rund 260 mm Niederschlag, wovon am 1.6. alleine zwischen 20 und 23 Uhr rund 45 mm fielen.

Am Alpennordrand stieg die Frostgrenze am 31.5. auf 1600 m. Die intensivsten Niederschläge waren von einer weiteren markanten Erwärmung begleitet, sodass am Abend des 1.6. in 1600 m Höhe kurzzeitig Temperaturen um +4 °C gemessen wurden und die Schneefallgrenze zumindest vorübergehend gegen 2000 m anstieg.

Die Abflusssituation wurde zusätzlich dadurch verschärft, dass der vorangegangene Mai bereits sehr niederschlagsreich war und somit schon eine erhebliche Vorbefeuchtung der Böden bestand. Bereits zur Monatsmitte waren beispielsweise im Bereich der Stadt Salzburg die langjährig durchschnittlichen Niederschlagssummen erreicht worden.

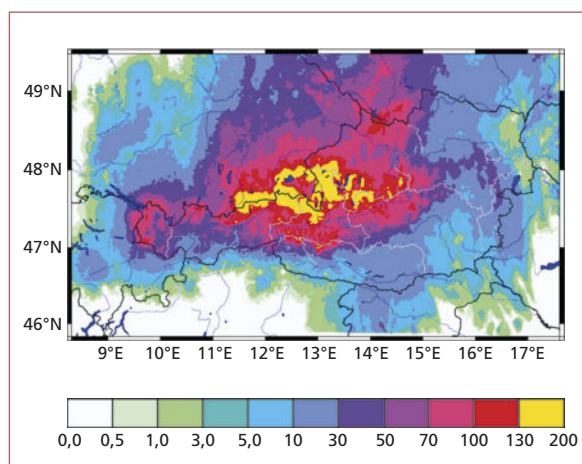


Abb. 1: Niederschlagssumme (in mm) zwischen 1.6.2013 17:00 und 2.6.2013 19:00 (INCA Auswertung).
Fig. 1: Sum of precipitation (in mm) between June 1, 5:00 pm and June 2, 2013 7:00 pm (INCA data).

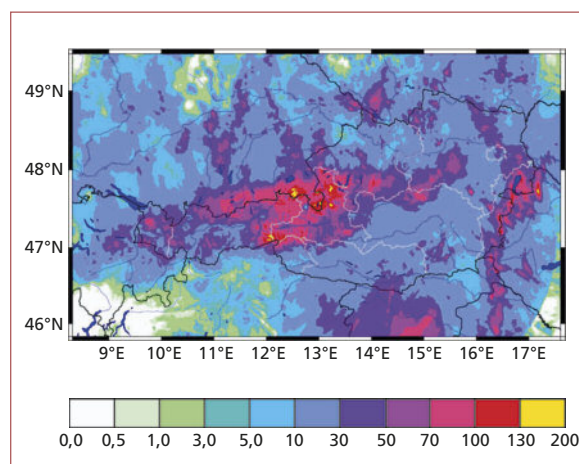


Abb. 2: Niederschlagssumme (in mm) zwischen 29.7.2014 22:00 und 31.7.2014 15:00 (INCA Auswertung).
Fig. 2: Sum of precipitation (in mm) between July 29, 10:00 pm and July 31, 2014 3:00 pm (INCA data).

Starkniederschlag Ende Juli 2014

In den letzten Tagen des Juli 2014 zog ein Tief in höheren Luftschichten von Frankreich über den Golf von Genua Richtung Balkan. Die Hebung durch das Tiefdrucksystem über Oberitalien im Zusammenwirken mit feuchter und labil geschichteter Luft im Alpenbereich sorgte für intensive, konvektiv durchsetzte und teils anhaltende Niederschläge (Abb. 2). Durch eine Verschärfung der Luftdruckgegensätze an der Alpen-nordseite am 30. und 31.7. wurde die Luft zudem von Norden gegen die Alpen gestaut und dadurch zusätzlich gehoben. Aufgrund des vorwiegend konvektiven Charakters der Niederschläge ergaben sich insbeson-

dere im Tauernbereich auf engem Raum zum Teil große Unterschiede in den Niederschlagssummen (vgl. Tab. 1, Krimml und Enzingerboden).

Die Niederschläge fielen selbst im Hochgebirge größtenteils als Regen. Das Minimum der Lufttemperatur am Sonnblick wurde am Morgen des 3.8. mit rund +2 °C gemessen. Zur Zeit der stärksten Niederschläge am 30.7. und 31.7. lag die Temperatur in 3100 m meist zwischen +3 und +4 °C. In schattigen Lagen oberhalb von ca. 2300 m, insbesondere in Rinne und Mulden, lag Ende Juli zum Teil noch Schnee. Aus hochalpinen Einzugsgebieten (insbesondere im Tauernbereich) trug somit auch die Schneeschmelze zum Abfluss bei.

BEOBACHTETE MESSSTELLEN

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Messstellen sind ein Teil eines Netzes von Instrumenten zur Messung von Druck, Temperatur und – teilweise – elektrischer Leitfähigkeit in Karstquellen bzw. Höhlen des Landes Salzburg (Abb. 3, Tab. 2). Dieses Netz wird teils von Höhlenforschern aus privatem Interesse unterhalten und teils durch den Hydrographischen

Dienst des Landes Salzburg unterstützt. Die Messstellen im Lamprechtsofen wurden im Auftrag des Hydrographischen Dienstes eingerichtet, jene in den Kesselfallquellen im Zuge des Forschungsprojektes „morexpert“ am Kitzsteinhorn.

Die Beschreibung der Messstellen erfolgt mit absteigender Höhe des mittleren Einzugsgebietes.

Tabelle 1: Übersicht der Tagesniederschlagssummen (in mm) ausgewählter Wetterstationen.
Table 1: Precipitation sums (in mm) of selected weather stations.

Datum	Enzinger Boden	Golling	Salzburg-Freisaal	Krimml	Loferer Alm
28.7.2014	14,6	0,2	0,2	0,3	0,8
29.7.2014	27,3	60,9	38,3	8,5	20,2
30.7.2014	93,8	45,9	52,7	54,5	60,5
31.7.2014	35,8	31,8	19,9	4,2	20,9
1.8.2014	9,4	2,0		1,4	1,7
2.8.2014	2,3	4,6	10,4	0,6	2,5
3.8.2014	7,6	14,0	80,7	3,9	26,5
4.8.2014		17,0	7,5	17,4	14,3
Summe	190,8	176,4	209,7	90,8	147,4

Tabelle 2: Eckdaten der Messstellen.

EZG: Einzugsgebietshöhe, p: Druckhöhe, T: Wassertemperatur, k: elektrische Leitfähigkeit, V: Abflussmenge.

Table 2: Key data of monitoring stations and catchments.

EZG: catchment elevation, p: head, k: electrical conductivity, V: discharge.

Karstsystem	Messstelle	Höhe (m)	EZG max. (m)	EZG min. (m)	Parameter
Kitzsteinhorn	Kesselfallquellen	1000	3200	1000	p, T, k, V
Leoganger Steinberge (Lamprechtsofen)	Grüntopf	886	2600	1500	p, T, k
	Kneippklamm	875	2400	1500	p, T, k
Tennengebirge	Winnerfallhöhle	652	2410	950	p, T
Hagengebirge	Bärenhöhle	580	2230	810	p, T
Untersberg	Fürstenbrunner Quellhöhle	620	1970	750	p, T, V

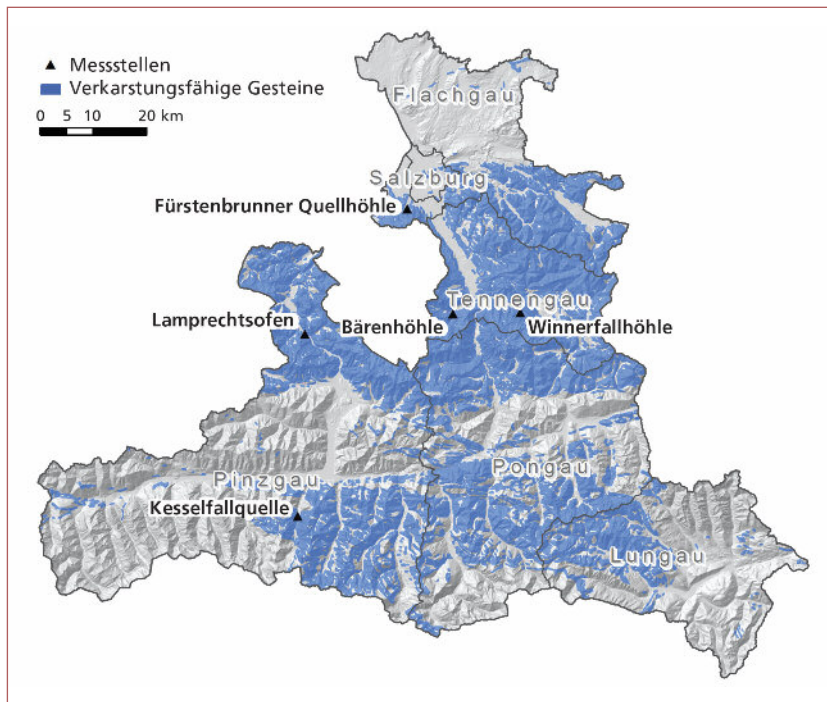


Abb. 3: Lage der Messstellen. Verbreitung verkarstungsfähiger Gesteine zusammengefasst nach Braunstingl (2005).
 Fig. 3: Location of monitoring stations. Distribution of karstifiable rocks based on Braunstingl (2005).

KESSELFALLQUELLEN

Kurzbeschreibung

Das Karstgebiet des Kitzsteinhorns liegt 15 km SSW von Zell am See im Bereich der Nordabdachung der Hohen Tauern. Es wird im Osten vom Tal der Kapruner Ache und im Westen durch das Stubachtal begrenzt. Südlich und nördlich sind es nicht verkarstungsfähige Gesteine, insbesondere Amphibolite und Prasinite, aber auch Gneise, Schiefer und Phyllite, die das Karstvorkommen begrenzen, welches Marmor, Glimmermarmor und Kalkglimmerschiefer umfasst. Amphibolite gliedern diese in Teilschollen.

Der höchste Punkt ist durch den pyramidenartigen Aufbau des Kitzsteinhorns (3205 m) gekennzeichnet. Die Kesselfallquellen treten auf einer Höhe von etwa 950 bis 1010 m aus. Die stärksten Karstentwicklungen finden sich in der Zone zwischen 2400 und 2600 m. Beschreibungen dieses hochalpinen Karstgebietes geben Audra (2004), Audra et al. (2004) und Lechner et al. (2016). In den Jahren 1980–1981 wurde der hydrologische Zusammenhang des Karstgebietes am Nordrand des Schmiedingerkees mit bis zu 1145 m tiefen Höhlen und den Kesselfallquellen mittels Markierungsversuchen nachgewiesen (Ciszewski, 2013; Klappacher, 1992).

Messstelle Kesselfallquellen

Lechner (2015) kartierte 12 Austritte auf einer Länge von 400 m entlang der Kapruner Ache. Über ein Jahr

wurden monatlich Abflussmessungen der Quellschüttung durchgeführt, wobei der Abfluss indirekt als Differenz zweier Messungen der Kapruner Ache unter- und oberhalb der Quellgruppe ermittelt wurde. Der durchschnittliche Abfluss der Kesselfallquellen beträgt etwa 360 l/s. Die geringsten Winterschüttungen betragen 105 l/s, die stärkste Schüttung im Beobachtungszeitraum trat am 11.6.2014 auf, wobei der Abfluss an diesem Tag 1,5 m³/s deutlich überschritt. Bei diesem Ereignis wurde der Querschnitt des Abflusses der Quellen verändert. Spätere Werte

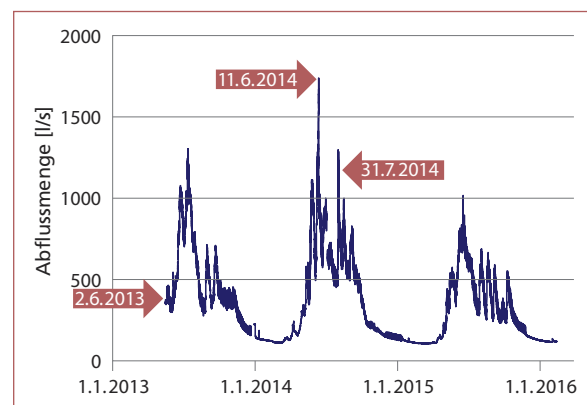


Abb. 4: Ungefäher Gesamtabfluss der Kesselfallquellen zwischen Mai 2013 und Februar 2016. Niederschlagsereignisse sind mit Pfeilen markiert.
 Fig. 4: Approximate runoff of Kesselfallquellen between May 2013 and February 2016. Precipitation events are labelled.

mussten anhand von überschlägigen Wasserbilanzen korrigiert werden und sind daher als orientierende Werte zu verstehen. Die Abflussganglinie (Abb. 4) ist neben dieser Unsicherheit durch einen zusätzlichen anthropogenen Eintrag von Fremdwasser gekennzeichnet, der maximal etwa 60 l/s beträgt und der sich neben der Schüttung auch in der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit widerspiegelt. Vermutlich handelt es sich dabei um Verluste aus dem nahen Druckstollen der Kraftwerksgruppe der Verbund AG.

Ereignisse vom 2.6.2013 und 31.7.2014

Trotz der Tatsache, dass der Pinzgau sehr stark von den Niederschlagsereignissen Ende Mai bis Anfang Juni 2013 betroffen war (Godina & Müller, 2014; Wiesen-

egger, 2014), zeigten die Kesselfallquellen keine Reaktion. Grund dafür ist deren hohe mittlere Einzugsgebietshöhe von rund 2500 m (Lechner et al., 2016). Im Beobachtungszeitraum lag die Nullgradgrenze zwischen 1600 und 2000 m. Diese Beobachtung passt zur allgemeinen hydrographischen Analyse des Ereignisses: Während die Salzach und ihre Zubringer im Oberpinzgau HQ_1 bis HQ_{10} (d.h. ein ein- bis zehnjähriges Ereignis) zeigten, stieg flussabwärts die Jährlichkeit auf deutlich über HQ_{100} an.

Das Niederschlagsereignis vom 31.7.2014 spiegelt sich mit einem Abflusswert von 1285 l/s auch in den Kesselfallquellen wider, wurde aber sowohl am 11.7.2013 (1,3 m³/s) und noch deutlicher am 11.6.2014 (1,7 m³/s) übertroffen. Letzterer stellt den größten bisher aufgezeichneten Schüttungswert der Kesselfallquellen dar.

LAMPRECHTSOFEN (1324/1)

Kurzbeschreibung

Die Leoganger Steinberge liegen zwischen dem Saalachtal im Nordosten, dem Tal der Leoganger Ache im Süden und dem Schüttachgraben im Nordwesten. Die Talorte sind Weißbach bei Lofer und Leogang. Das stark verkarstete Haupteinzugsgebiet der Leoganger Steinberge liegt zwischen 1700 und 2400 m, die höchste Erhebung ist das Birnhorn mit 2634 m.

Der Lamprechtsofen ist mit 51 km Ganglänge nicht nur die mit Abstand größte Höhle der Leoganger Steinberge (Abb. 5, Ciszewski, 2011; Gadermayr, 1996; Klappacher, 1996); mit einer Höhendifferenz von 1632 m stellt er die Durchgangshöhle mit dem weltweit größten Höhenunterschied dar. Anders als in den Höhlensystemen des Untersbergs, Tennengebirges, Hagengebirges oder des Kitzsteinhorngebietes kann man im Lamprechtsofen die Sickerwässer vom Plateau, dem Bachlauf folgend, bis zum Talniveau der Saalach verfolgen (Völkl, 2011). Die Funktion des Lamprechtsofens als Hauptentwässerung ist unbestritten, wenn gleich die Hydrogeologie dieses Gebirgsstocks überraschend komplex ist (Völkl, 1974). Markierungsversuche zeigten, dass bei relativ geringer horizontaler Abweichung der Einspeisung Abflüsse in alle Himmelsrichtungen möglich sind (Völkl, 2011).

Messstellen im Lamprechtsofen

Seit 2007 sind im Lamprechtsofen zwei Messstellen etwa 1,5 km vom Höhleneingang eingerichtet, die oberhalb des Dolomitdoms je einen Zubringer

repräsentieren. Die Messstelle Kneippklamm liegt in einem Höhlengang, der dem Forscher die Verbindung in die südlichen Teile bietet. Hydrogeologisch handelt es sich beim Kneippbach aber um einen Nebenbach, der sein Einzugsgebiet im Raum um den Riesenkogel haben dürfte (Klappacher & Knapczyk, 1977). Der Hauptbach, auch Steinbach genannt, entspringt dem Grüntopf, einem Siphon, wo sich die zweite Messstelle befindet. Jenseits des Grüntopfs konnte im Zuge der Forschungen der Bachlauf wieder gefunden und schlussendlich bis zum Karstplateau verfolgt werden (Abb. 5).

Ereignisse vom 2.6.2013 und 31.7.2014

Alle Vorfluter im Raum Lofer zeigten am 2.6.2013 ein hundertjähriges Ereignis oder knapp darüber an und das höchste Ereignis seit dem jeweiligen Aufzeichnungsbeginn (Godina & Müller, 2014). Gemäß INCA Analysen (Haiden et al., 2011) fielen im Zeitraum von 30.5. bis 4.6.2013 im Bereich der Leoganger Steinberge 225 bis 250 mm Niederschlag (Abb. 7). Umso überraschender ist die Tatsache, dass die zwei Zubringer im Lamprechtsofen mit 113 cm in der Kneippklamm und 127 cm im Grüntopf noch im selben Jahr nicht weniger als 10 Mal einen höheren Abfluss zeigten (Abb. 6). Demzufolge dürfte auch im Einzugsgebiet des Lamprechtsofens der Großteil des Niederschlags als Schnee gefallen sein und nicht zum Abfluss beigetragen haben.

Die Situation am 31.7.2014 stellte sich am Lamprechtsofen – trotz des wesentlich niedrigeren Gesamt-

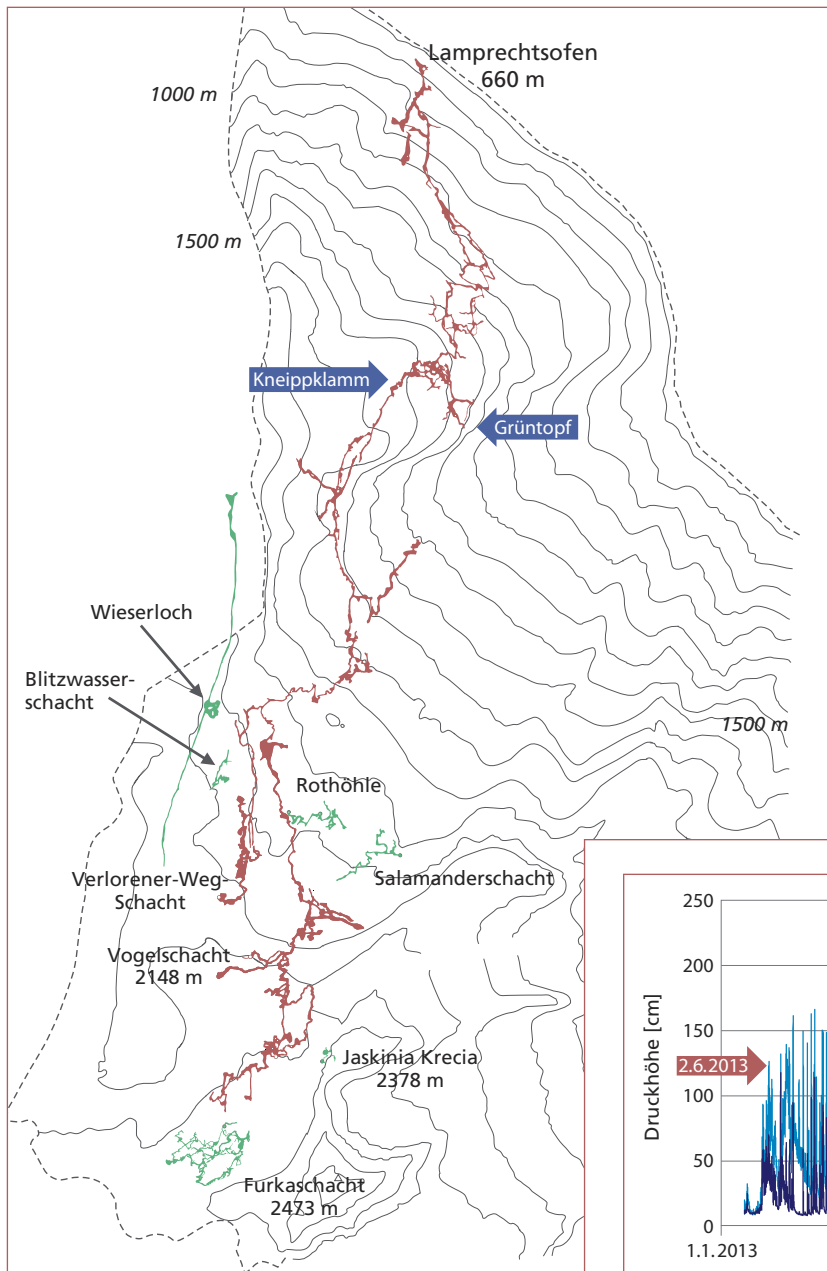
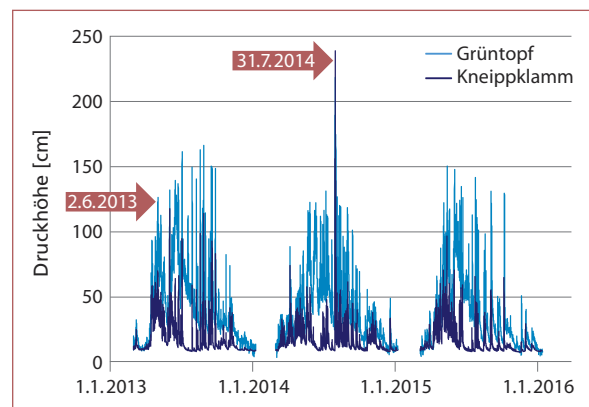


Abb. 5: Lage der Messstellen im Lamprechtsofen. Lageplan nach Ciszewski (2003).

Fig. 5: Location of monitoring points in Lamprechtsofen. Cave map after Ciszewski (2003).

Abb. 6: Druckhöhe an den zwei Messstellen im Lamprechtsofen im Zeitraum März 2013 bis Jänner 2016.

Fig. 6: Head at the two monitoring stations in Lamprechtsofen between March 2013 and January 2016.



niederschlags in seinem Einzugsgebiet – im Vergleich zum 1.6.2013 wesentlich dramatischer dar. In der Woche von 28.7. bis 4.8.2014 fielen bei der Wetterstation Lofer 135 mm, davon am 30.7. 45,0 und am 31.7. 55 mm. Die INCA Auswertung zeigt für diese zwei Tage im Einzugsgebiet Niederschläge zwischen 75 und 100 mm an (Abb. 8), also tendenziell weniger bzw. etwa gleich viel wie unten im Tal aufgezeichnet wurde.

Die zwei Messeinrichtungen im Lamprechtsofen zeichneten im Vergleich zum Ereignis 2013 einen um 1 m höheren Wasserstand auf. Dabei zeigt sich, dass die Kneippklamm etwas früher ansprang und an-

schließend rascher abklang als der Grüntopf, was sich auch bei kleineren Ereignissen zeigte (Abb. 9). Der Unterschied ist durch das größere und weiter verzweigte Einzugsgebiet des Steinbachs erklärbar.

Das aus einem Dolomit-dominierten Einzugsgebiet stammende Wasser des Grüntopfsystems zeigte unmittelbar nach dem Einsetzen der Niederschläge einen sprunghaften Anstieg, wobei nach mehreren kurzfristigen weiteren Anstiegen das Abflussmaximum am 31.7.2014 um 4:00 erreicht wurde (Abb. 9). Dabei sank die elektrische Leitfähigkeit zunächst kurzfristig ab, um danach mit dem Erreichen des Abflussmaximums wieder geringfügig anzusteigen. Die Wassertemperatur

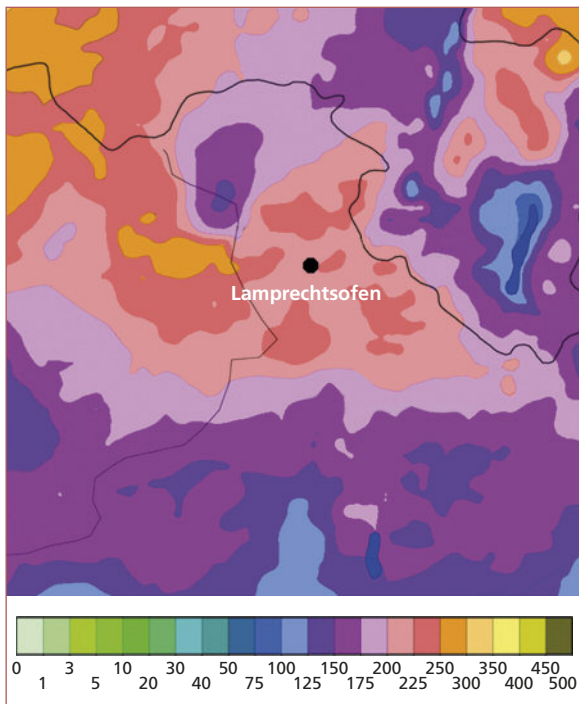


Abb. 7: Niederschlagssumme (in mm) zwischen 30.5. und 4.6.2013 (INCA Auswertung nach Haiden et al., 2011).
 Fig. 7: Sum of precipitation (in mm) between May 30 and June 4, 2013 (INCA data after Haiden et al., 2011).

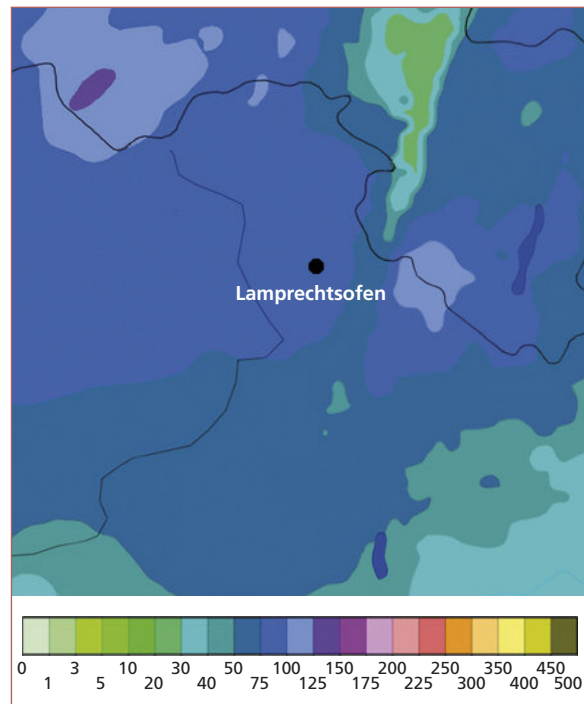


Abb. 8: Niederschlagssumme (in mm) zwischen 31.7. und 1.8.2014 (INCA Auswertung nach Haiden et al., 2011).
 Fig. 8: Sum of precipitation (in mm) between June 31 and August 1, 2014 (INCA data after Haiden et al., 2011).

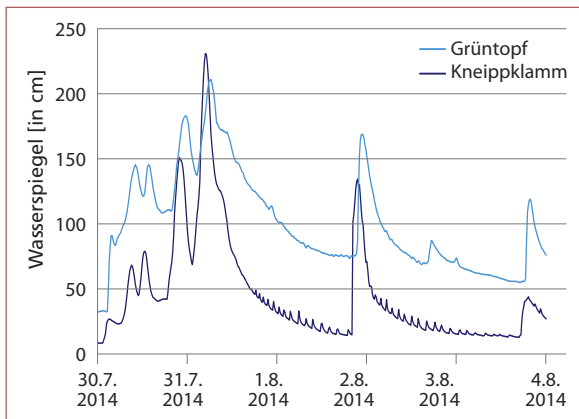


Abb. 9: Schüttungsverlauf an den beiden Messstationen im Lamprechtsofen während des Ereignisses vom 31.7.2014.
 Fig. 9: Discharge at the two measurement stations in Lamprechtsofen during the event of July 31, 2014.

stieg ebenfalls mit dem Anstieg der Schüttung an und verlief parallel zum Abfluss. Die weiteren Schüttungsspitzen am 1.8.2014 um 20:00, am 3.8. um 18:00 und am 5.8. um 3:00 zeigten hinsichtlich der qualitativen Parameter einen vergleichbaren Verlauf (Abb. 10). Die aus einem tiefergelegenen Einzugsgebiet stammenden Wässer des Kneippklammensystems zeigen ein dem Grüntopfsystem ähnliches Abflussmuster, wobei hier die Abflussspitzen um etwa zwei Stunden ver-

spätet auftraten (Abb. 9). Die Wassertemperatur reagierte bei kurzfristigem Schüttungsanstieg mit einem sprunghaften Abfall und stieg in weiterer Folge mit zunehmender Schüttung wieder an. Die elektrische Leitfähigkeit verläuft gegensinnig zum Abfluss und unterscheidet sich somit deutlich vom benachbarten Grüntopfsystem.

Auffallend beim Kneippklammensystem ist ein ausgeprägter wellenförmiger Verlauf bei einem Wasserstand zwischen ca. 11 und 50 cm. Die Wellenlänge beträgt 90 bis 180 Minuten und nimmt mit zunehmender Abflusshöhe ab. Grund für diese Undulation des Abflusses sowie der weiteren Messparameter dürfte ein Hebersystem analog zu dem von Bögli (1978: 129) beschriebenen sein. Das Wasser sammelt sich dabei in Hohlraumbecken, von dem ein abfallendes Röhrensystem ausgeht. Beim Überlaufen dieses Hohlraumbeckens füllt sich die ablaufende Röhre vollständig an und baut eine Wassersäule auf, welche durch ihre „Saugkraft“ Wasser aus dem Becken absaugen kann, bis der Wasserspiegel soweit abgesunken ist, dass Luft angesaugt wird, was dann zu einer Reduktion des Abflusses führt. Diese Undulation zeigt sich auch in der elektrischen Leitfähigkeit und in der Wassertemperatur (Abb. 11) und wird als Hinweis gewertet, dass sich unterhalb des Hebersystems ein im Vergleich etwas stärker mineralisierter Zubringer befindet.

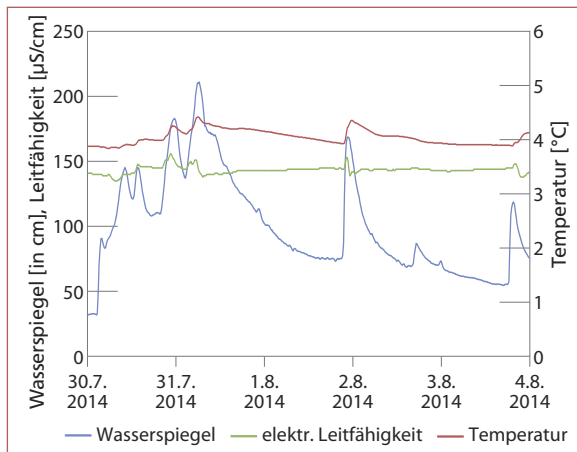


Abb. 10: Schüttung, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit (25°C) an der Messstelle Grüntopf zwischen 30.7. und 4.8.2014.

Fig. 10: Discharge, temperature and electrical conductivity (25°C) at the Grüntopf monitoring station between July 30 and August 4, 2014.

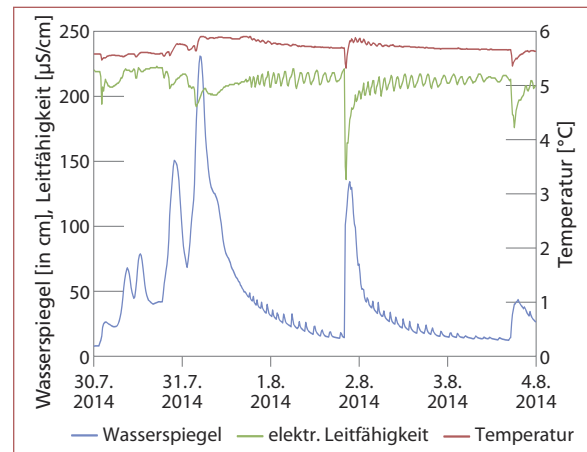


Abb. 11: Schüttung, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit (25°C) an der Messstelle Kneippklamm zwischen 30.7. und 4.8.2014.

Fig. 11: Discharge, temperature and electrical conductivity (25°C) at the Kneippklamm monitoring station between July 30 and August 4, 2014.

WINNERFALLHÖHLE (1511/4)

Kurzbeschreibung

Das Tennengebirge wird im Westen vom Salzachtal begrenzt. Von ihrem Ursprung bei der Aualm im Süden umfließt die Lammer das Gebirge im Gegenuhrzeigersinn. Das Tennengebirge ist ein Karstplateau mit einer Höhe von etwa 1900 bis 2200 m (höchste Erhebung Raucheck, 2411 m), das seinen Nachbarn in vielen Eigenschaften ähnelt: Auf einen permotriassischen Sockel aus Reichenhaller und Werfener Schiefen lagern erst dolomitische und darüber Kalkabfolgen der Mittel- und Obertrias, die stellenweise von jurassischen, paläogenen oder quartären Ablagerungen überlagert sind. Die Schichtung sowie der Gebirgsstock selbst tauchen gegen Nord ab. Die Hauptentwässerung folgt diesem Schichteinfallen, und die Karstriesenquellen liegen daher durchwegs am Nordrand des Gebirges zwischen Pass Lueg und Abtenau: Brunnecker-Petrefakten-System, Winnerfall-Schwarzbach-System und die Quellsysteme um den Trickl- und den Dachserfall. Zu diesen Karstriesenquellen gesellen sich mehrere hundert kleinere Austritte, die sich kranzförmig um das Gebirge anordnen.

Das Tennengebirge ist mit über 1000 im Kataster registrierten Höhlen eine der am stärksten verkarsteten Landschaften Österreichs. Die Dichte an Höhlen mit Tiefen größer als 1000 m und Längen über 5 km ist außerordentlich hoch, und es kommen laufend neue Objekte mit diesen Dimensionen hinzu (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985; Pointner & Klappacher, 2016). Die Hydrogeologie des Tennengebirges wurde ausführlich von Touissant (1971) dargestellt und zuletzt

von Audra (1994) behandelt. Eine Zusammenfassung der früheren Ergebnisse findet sich in Dachs et al. (2006). Moderne hydrogeologische Forschungen erfolgten im Zuge der Höhlenforschung sowie im Zuge eines unveröffentlichten Gutachtens für eine Trassenvariante der Tauerngasleitung (Gadermayr, 2010). Dabei wurde eine unter das heutige Talniveau reichende Verkarstung des Tennengebirges angenommen. Automatische Messeinrichtungen für wissenschaftliche Zwecke gibt es in der Brunneckerhöhle (seit 2010, Höfer-Öllinger, 2011), am Dachserfall (Land Salzburg, Hydrographischer Dienst) und seit 2011 in der Winnerfallhöhle.

Messstelle Winnerfallhöhle

Die Messstelle ist auf einer Höhe von 652 m eingerichtet und misst den Gesamtdruck, d.h. Wasser- und Luftdruck. Überschreitet der Gesamtabfluss die Kapazität des Schwarzbaches (lt. Touissant (1971) etwa 1,5 m³/s), so steigt der Wasserspiegel in der Winnerfallhöhle an. Der Höhleneingang liegt gemäß Klappacher & Haseke-Knapczyk (1985) auf 702 m und fungiert nach einem Anstieg von 50 m als Überlauf.

Die Kurve in Abbildung 12 zeigt die Summe von Luft- und Wasserdruck, bereits umgerechnet in Meter und hinsichtlich des Luftdrucks korrigiert.

Ereignisse vom 2.6.2013 und 31.7.2014

Das Niederschlagsereignis vom 2.6.2013 zeigte, dass die Wassersäule bei der Drucksonde gut 10 m über

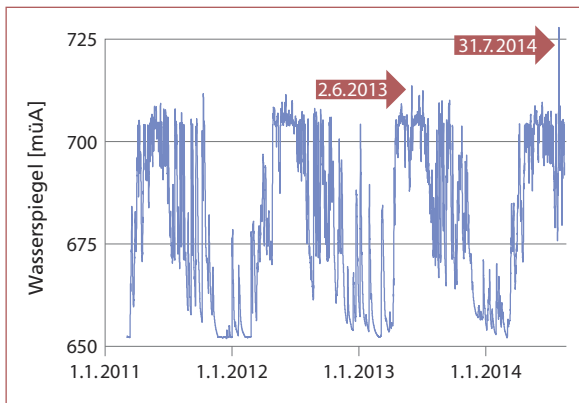


Abb. 12: Wasserspiegelhöhe in der Winnerfallhöhle, Beobachtungszeitraum März 2011 bis August 2014.
 Fig. 12: Water level at Winnerfallhöhle between March 2011 and August 2014.

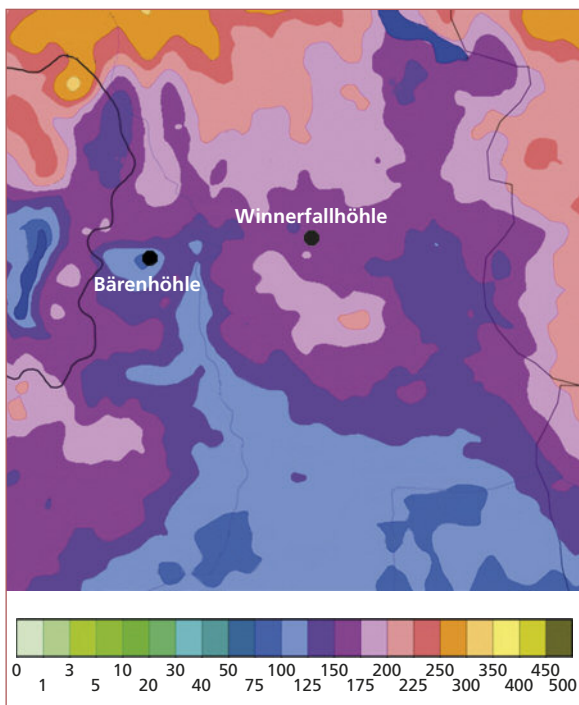


Abb. 13: Niederschlagssumme (in mm) zwischen 30.5. und 4.6.2013 (INCA Auswertung nach Haiden et al., 2011).
 Fig. 13: Sum of precipitation (in mm) between May 30 and June 4, 2013 (INCA data after Haiden et al., 2011).

dem Eingang des Höhlenportals liegt. Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass in der Winnerfallhöhle am 2.6.2013 ein mehrjähriges Ereignis stattfand, das weder 2011 noch 2012 auftrat (Abb. 14). Die Station Golling zeichnete in diesem Zeitraum 146 mm auf, das INCA Modell auf dem Tennengebirgsplateau zwischen 150 und über 200 mm (Abb. 13). Sowohl am 1.6. als auch am 2.6. überschritt die Tagessumme in Golling 50 mm, wobei der Großteil des Niederschlags in der Nacht von 1.6. auf 2.6. fiel (70 mm zwischen 18:00 und

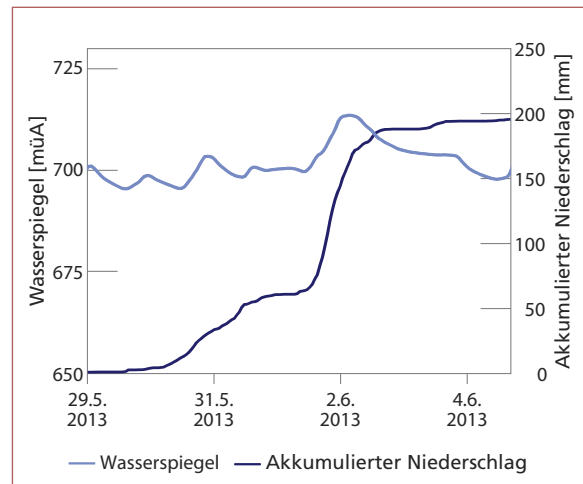


Abb. 14: Wasserspiegelhöhe in der Winnerfallhöhle und kumulativer Starkniederschlag zwischen Ende Mai und Anfang Juni 2013 nach INCA-Daten.
 Fig. 14: Water level at Winnerfallhöhle and cumulative precipitation during the heavy precipitation event between end of May and beginning of June 2013 according to INCA data.

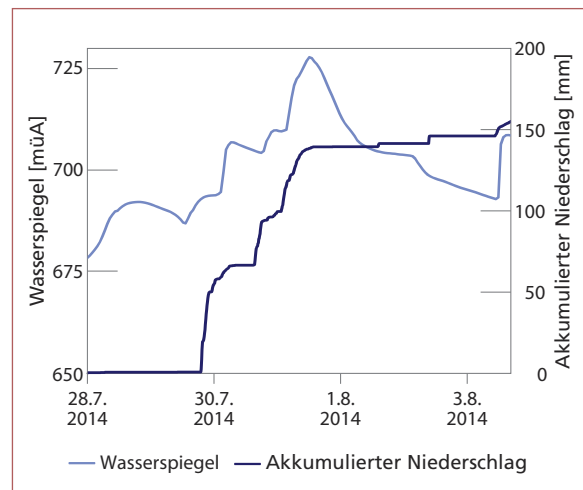


Abb. 15: Wasserspiegelhöhe in der Winnerfallhöhle und kumulativer Niederschlag an der Wetterstation Golling während des Starkniederschlags Ende Juli und Anfang August 2014.
 Fig. 15: Water level at Winnerfallhöhle and cumulative precipitation during the heavy precipitation event between end of July and beginning of August 2014.

6:00 morgens). Im INCA-Stundenmodell fielen auf dem Tennengebirgsplateau in diesem Zeitraum über 82 mm.

Das Ereignis vom 31.7.2014 hingegen zeigt ein völlig anderes Bild (Abb. 12, Detail in Abb. 15). Die Druckhöhe bei der Sonde zeigt ein Niveau, das etwa 25 m über dem Eingang lag. Die Engstellen zwischen der Drucksonde und dem Höhleneingang verursachten diesen beachtlichen Rückstau. Die Niederschlagsverteilung dürfte zu dem starken Anstieg geführt



Abb. 16: Drucksonde mit integriertem Datenlogger beim Endsiphon der Bärenhöhle.
Fig. 16: Pressure data logger at the final siphon of Bärenhöhle.

haben: Am 30.7. fielen an der Station Golling zwischen 18:00 und 24:00 29 mm (23 mm lt. INCA Auswertung). Am nächsten Vormittag, zwischen 6:00 und 12:00, fielen erneut 25 mm (43 mm lt. INCA Auswertung), was vermutlich zu einer Überlagerung des Abflusses vom Plateau und des lokalen Niederschlags und damit zur außerordentlichen Abflussspitze führte.

haben: Am 30.7. fielen an der Station Golling zwischen 18:00 und 24:00 29 mm (23 mm lt. INCA Auswertung). Am nächsten Vormittag, zwischen 6:00 und 12:00, fielen erneut 25 mm (43 mm lt. INCA Auswertung), was vermutlich zu einer Überlagerung des Abflusses vom Plateau und des lokalen Niederschlags und damit zur außerordentlichen Abflussspitze führte.

BÄRENHÖHLE IM BLUNTAUTAL (1335/1)

Kurzbeschreibung

Das Hagengebirge liegt zwischen dem Königssee im Westen und dem hier Süd-Nord verlaufenden Salzachtal im Osten. Im Süden bilden das Blühnbachtal und im Norden das Bluntautal die Begrenzungen. Der geologische Aufbau des Hagengebirges ist dem des Tennenengebirges in vielerlei Hinsicht vergleichbar: Die permomesozoische Schichtfolge und das generelle Nordfallen der Schichtfolgen sind beiderseits der Salzach nahezu spiegelgleich. Wie am Nordrand des Tennenengebirges tauchen die Dachsteinkalke auch am Hagengebirgsnordrand unter die heutige Talsohle ab, womit ein direkter Kontakt von Karstwasser mit dem Grundwasser in den Lockersedimenten (Porengrundwasser) ermöglicht ist. Das Karstplateau liegt über weite Bereiche auf 1900 bis 2000 m, die höchsten Erhebungen sind der Kahlersberg (2350 m) und das Große Teufelsorn (2363 m). Die Höhlensysteme erreichen im Niveau der Riesenhöhlen erstaunliche Ausmaße (Klappacher & Knapczyk, 1979). Über Canyons und Mäander gelangt man auch hier in große Tiefen, das einzige bislang bekannte Höhlenobjekt, das die 1000-Meter-Tiefenmarke überschreitet, ist das Jägerbrunntrög-Höhlensystem.

Die hydrogeologische Situation stellt sich auf den ersten Blick relativ einfach dar. Karstwasser, das westlich einer Nordost-Südwest durch das Gebirge streichenden Störung („Torschartenstörung“) versickert, tritt im Torrener Quellbezirk zu Tage. Wässer, die östlich dieser Störung zur Versickerung kommen, dürften hingegen direkt in das nahe Salzachtal entwässern (Klappacher & Knapczyk, 1979). Ein kleiner Anteil dürfte parallel zur Torschartenstörung in größere Tiefen gelangen und entwässert gegen Nordost bei Golling direkt in das Porengrundwasser der Talfüllung. Eine unbedeutende Quelle – im Volksmund „Jodquelle“ genannt – markiert die ungefähre Stelle dieses Übertritts am Talrand. Bei genauer Betrachtung ist die hydrogeologische Situation jedoch deutlich komplexer als bisher angenommen. Für die Austritte im Torrener Quellbezirk müssen aufgrund des Verlaufs von Temperatur und Leitfähigkeit mehrere Komponenten angenommen werden, deren Herkunft noch nicht geklärt ist.

Messstelle Bärenhöhle

Die Messstelle wurde im Siphon am unteren Ende des trockenen Fußes begehbaren Teiles installiert (Abb. 16). Dieser Punkt liegt etwa 230 m unter dem

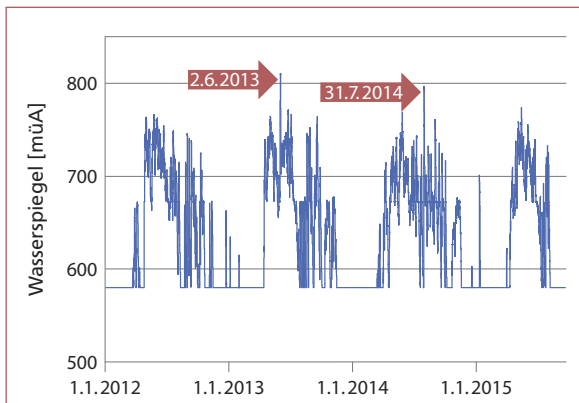


Abb. 17: Wasserspiegelhöhe in der Bärenhöhle zwischen Jänner 2012 und August 2015.

Fig. 17: Water level at Bärenhöhle between January 2012 and August 2015.

Eingang auf 810 m (Klappacher & Knapczyk, 1979). Eine Betrachtung der Anstiege durch Regen- oder Schneeschmelze sowie der Trockenwetterfalllinie zeigt, dass es sich beim Siphon auf 580 m nur um ein lokales Phänomen handelt (Abb. 17). Es ist davon auszugehen, dass das untere Ende dieses hydraulischen Systems bei Niederwasser mit dem Quellaustritt der Schwarzen Torren korrespondiert.

Die Aufzeichnung von Druck und Temperatur erfolgt seit 4.1.2012 kontinuierlich im 5-Minuten-Abstand (Höfer-Öllinger, 2015).

Ereignisse vom 2.6.2013 und 31.7.2014

Am 2.6.2013 kam es zu einem mehrjährigen Maximum: Das Wasser erreichte das Niveau des Höhleneingangs. Das Ereignis vom 31.7.2014 erreichte diese Abflussspitze nicht.

Gemäß Berichten von Forschern, dokumentiert im Kataster des Landesvereins für Höhlenkunde in Salzburg, floss zuletzt 1959 Wasser aus dem Eingang. Laut Wiesenegger (2014) handelte es sich damals im Stadtgebiet von

Salzburg um ein 60-jähriges Ereignis. Im Eingangsbereich der Höhle muss damals eine stärkere Schüttung vorhanden gewesen sein, da es zu starken Erosionen des Feinmaterials im Eingangssiphon kam. Dieses Phänomen blieb 2013 aus. 2013 dürfte es aber dennoch zu einer – deutlich höhlenauswärts gerichteten – Schüttung gekommen sein, da Pflanzen im Portal teilweise entwurzelt und gegen den Eingang transportiert wurden.

Die INCA-Auswertung zeigt für das Hagengebirge im Zeitraum von 30.5. bis 4.6.2013 Niederschläge zwischen 125 und 175 mm (Abb. 13). Die Station Golling zeichnete in diesem Zeitraum 146 mm auf. Sowohl am 1.6. als auch am 2.6. überschritt die Tagessumme in Golling 50 mm, wobei der Großteil des Niederschlags in der Nacht von 1.6. auf den 2.6. fiel (70 mm zwischen 18:00 und 6:00 morgens). Dementsprechend stieg der Wasserspiegel in der Bärenhöhle am 1.6. ab etwa 20:00 stark an. Über einen Zeitraum von 5 h unterschritt der Anstieg nicht 1 m pro 5 min und erreichte um 21:00 auf etwa 720 m maximal 3,6 m pro 5 min. Diese Anstiegsrate wird in der Bärenhöhle häufig überschritten; der schnellste im 4-jährigen Beobachtungszeitraum aufgezeichnete Anstieg des Wasserspiegels beträgt 9 m innerhalb 5 min (20.7.2014 von 629 auf 638 m – damals lief die Höhle vom Endsiphon auf 580 m erst in 1,5 Stunden auf 670 m voll, woraufhin sich der Anstieg deutlich verlangsamte).

Der Anstieg der Schüttung des Torrener Baches erfolgte anfangs zeitgleich. Der Wasserstand der Bärenhöhle überschritt am 2.6. um 01:35 800 m, ein äußerst seltenes Ereignis. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Schüttung des Torrener Baches beim Pegel Golling (Messstelle des Hydrographischen Dienstes unterhalb des Talausgangs des Bluntautals) 45 m³/s. Der höchste Wasserstand erstreckte sich über mehrere Stunden. Dabei wurde der Eingangsbereich geflutet und es strömte Wasser aus dem Höhleneingang. Zwischen 6:15 und 12:15 wies der Torrener Bach Abflüsse von etwas mehr als 80 m³/s auf (Abb. 18).

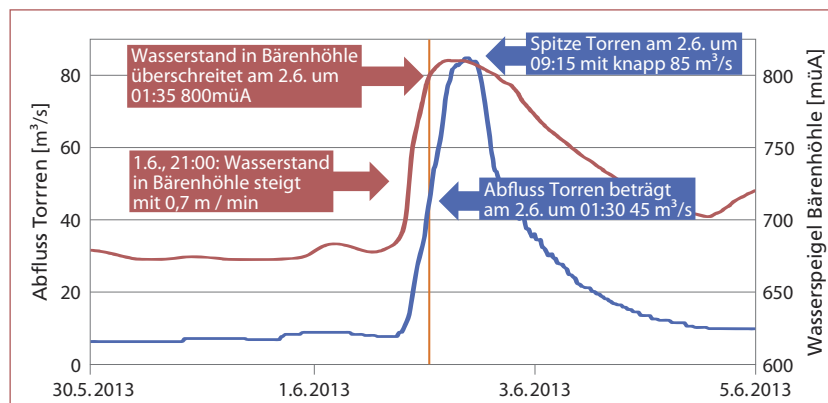


Abb. 18: Abflussganglinie des Torrener Baches beim Pegel in Golling (blaue Linie) und Verlauf des Wasserstands in der Bärenhöhle (rote Linie).
Fig. 18: Runoff hydrograph of Torrener Bach at the Golling gauge (blue curve) and water level in Bärenhöhle (red curve).

FÜRSTENBRUNNER QUELLHÖHLE (1339/11)

Kurzbeschreibung

Der Untersberg liegt zwischen den Städten Berchtesgaden (Bayern) im Süden und Salzburg im Norden; die Staatsgrenze verläuft quer über das Karstplateau. Die Hauptentwässerung erfolgt über die Glan am Nordrand des Massivs. Im Süden und Osten erfolgt die oberflächennahe Entwässerung zur Königsseeache (in Bayern: Berchtesgadener Ache), im Westen zur Bischofswieser Ache und – untergeordnet – in kleineren Bächen Richtung Saalach.

Das Karstsystem ist durch ein ausgedehntes Hochplateau charakterisiert, das mit einer Höhe von 1700 m bis 1900 m deutlich tiefer als die bisher betrachteten Gebirgsstöcke liegt. Die höchste Erhebung ist der Berchtesgadener Hochthron mit 1972 m.

Aus geologischer Sicht liegen die obertriassischen Kalke des Untersbergs auf einem mächtigen Sockel aus Ramsaudolomit, der die östlich und südlich angrenzenden Vorberge um Markt Schellenberg und die Almbachklamm aufbaut. Am Nordrand treten oberjurassischer Plassenkalk und Gesteine der Gosau-Gruppe (Kreide, „Untersberger Marmor“) auf. Auf allen Seiten kommt im talnahen Bereich Haselgebirge vor, was darauf hinweist, dass der komplette Gebirgsstock eine ortsfremde Decke darstellt (Reiteralmdecke).

Die Hydrogeologie wurde erstmalig umfassend im Zuge der Bearbeitung des Karstes durch Knapczyk (1984) behandelt. Im Zeitraum 2010–2015 erfolgten weitere hydrogeologische Forschungen (u.a. Gruber, 2014; Reischer et al., 2015), in deren Zuge u.a. die in Abbildung 19 dargestellte Kurve erstellt wurde.

Messstellen

Im Zeitraum 2010 bis 2014 waren in der Fürstenbrunner Quellhöhle und im Gamslöcher-Kolowrat-Salzburgerschacht-System (1339/1) bis zu elf Drucksonden gleichzeitig im Einsatz (Abb. 20). In der Fürstenbrunner Quellhöhle gab es Sonden im Unheimlichen See, im Kesselsiphon und im Talsiphon. Eine vierte Sonde kam in den trockenen Teilen zum Luftdruckausgleich zum Einsatz.

Auf Basis von Abflussmessungen unterhalb des Kesselsiphons wurde eine Multikomponenten-Schlüsselkurve erstellt. Die erste Komponente erfolgte auf Basis der Messungen im Talsiphon und gilt für niedrige Schüttungen bis $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$, solange der Sommerüberlauf (Hauptüberlauf, Nr. 2 in der Skizze in Abb. 20) nicht

aktiv ist. Die zweite Komponente repräsentiert Schüttungen im unteren Kubikmeterbereich. Die dritte Komponente wird selten benötigt – erst wenn der Hochwasserüberlauf aktiv wird. Für die Berechnung der Schüttung werden Wasserstände zweier unterschiedlicher Siphone verwendet. Zu- und Abflüsse entlang der Strecke können weitgehend ausgeschlossen werden.

Ereignis vom 2.6.2013

Gemäß dem INCA-Modell betrug der Niederschlag im Beobachtungszeitraum vom 30.5. bis 4.6.2013 auf dem Plateau des Untersbergs flächig 200 bis 250 mm, mit lokalen Spitzen bis zu über 300 mm (Abb. 21). Zwischen 1.6. 18:00 und 2.6.2013 6:00 fielen gemäß diesem Modell auf einer repräsentativen Fläche des Plateaus ($1 \times 1 \text{ km}$, Lage entspricht dem Kreuz in der Mitte von Abb. 21) 115 mm.

In der Fürstenbrunner Quellhöhle wurde am 2.6.2013 der höchste Wert im gesamten Beobachtungszeitraum (2/2010-3/2014) aufgezeichnet. In der Nacht vom 1.6. auf 2.6.2013 waren fünf Forscher in der Höhle, um bei einer möglichst hohen Schüttung den Abfluss mittels Salzverdünnung zu messen. Da einige Gangteile komplett geflutet waren, konnte die Messung erst bei bereits sinkendem Wasserstand am 2.6. um 18:00 durchgeführt werden. Dabei wurde ein Abfluss von $14,6 \text{ m}^3/\text{s}$ gemessen. Durch Vergleich mit dem Abfluss der Glan und eine funktionale Kombination der Schlüsselkurven mit drei Komponenten wurde für den 2.6. um 10:30 eine Hochwasserspitze von 31 bis $33 \text{ m}^3/\text{s}$ abgeschätzt (Abb. 22). Dabei zeichnete sich eine Doppelspitze ab.

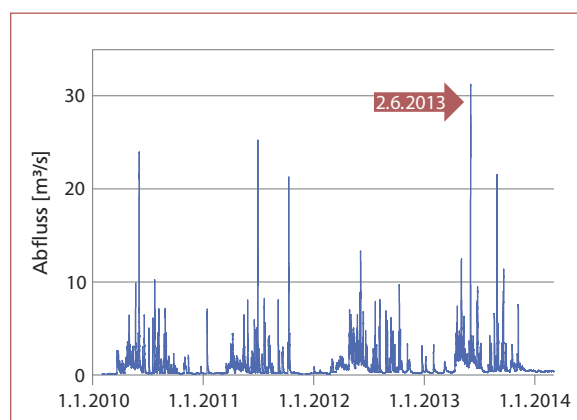


Abb. 19: Gesamtabfluss der Fürstenbrunner Quellhöhle zwischen Februar 2010 und März 2014.

Fig. 19: Total runoff of Fürstenbrunner Quellhöhle between February 2010 and March 2014.

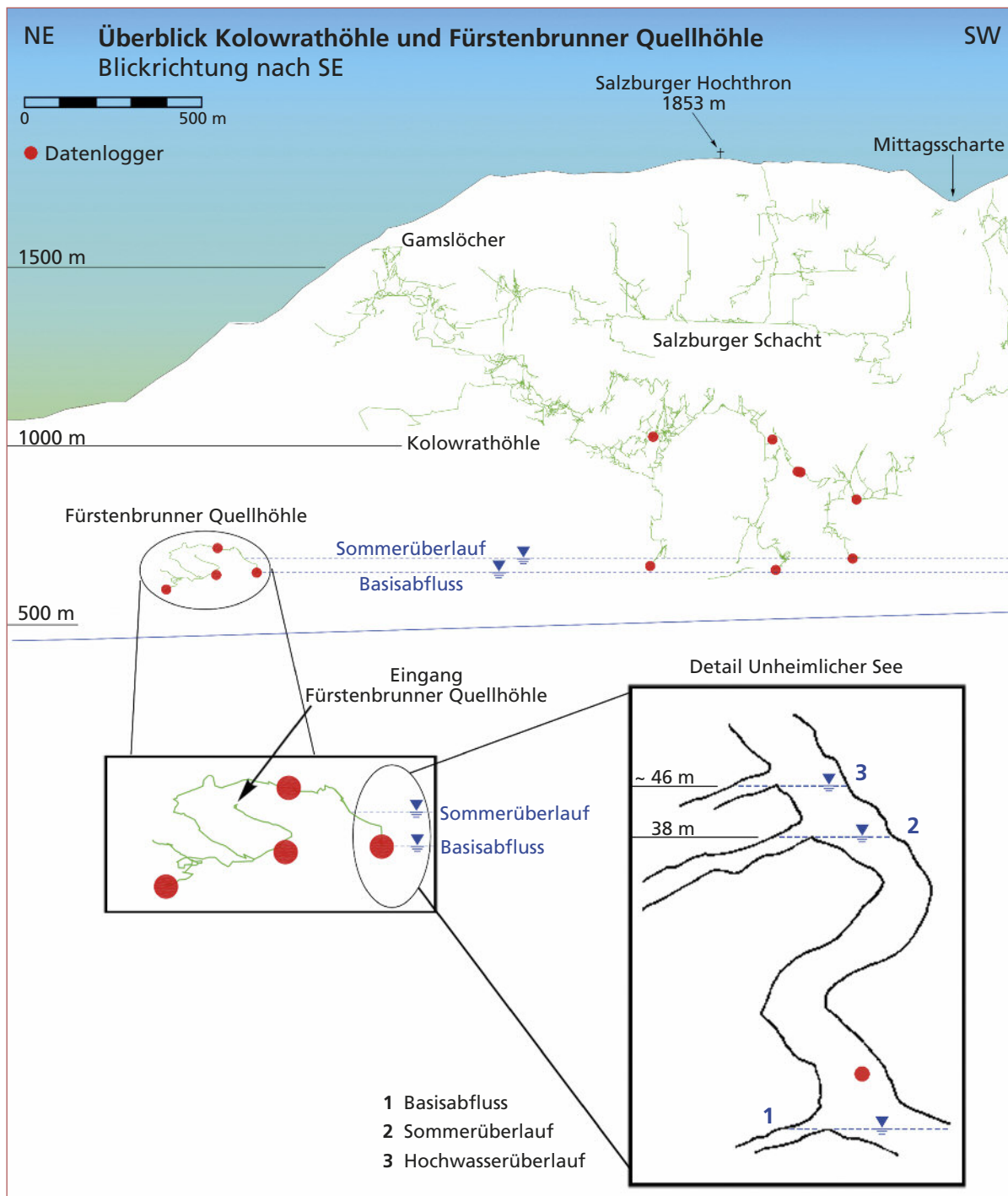


Abb. 20: Verteilung von Drucksonden im Kolowrathhöhle-Salzburger Schacht und in der Fürstenbrunner Quellhöhle.
 Fig. 20: Location of pressure data logger in Kolowrat-Salzburger Schacht and Fürstenbrunner Quellhöhle.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Vergleich der fünf Messstellen zeigt eine klare Abhängigkeit des Abflussverhaltens von der Einzugsgebietshöhe. Am 31.5.2013 stieg die Frostgrenze am Alpennordrand auf 1600 m an. Die intensivsten Niederschläge waren von einer weiteren markanten

Erwärmung begleitet, sodass am Abend des 1.6. in 1600 m Höhe kurzzeitig Temperaturen um +4 °C gemessen wurden und die Schneefallgrenze zumindest vorübergehend gegen 2000 m anstieg. Oberhalb 2000 m fiel Schnee.

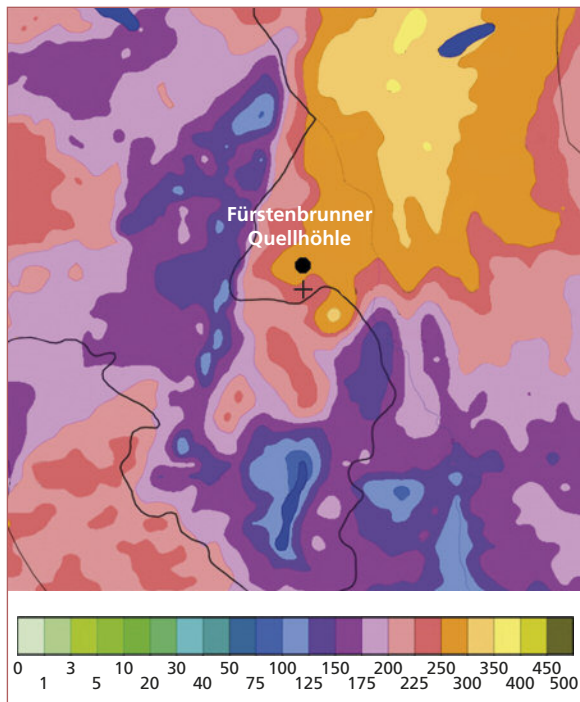


Abb. 21: Niederschlagssumme (in mm) zwischen 30.5. und 4.6.2013 (INCA-Auswertung nach Haiden et al., 2011).
 Fig. 21: Sum of precipitation (in mm) between May 30 and June 4, 2013 (INCA data after Haiden et al., 2011).

Dies hatte zur Folge, dass die Kesselfallquellen am Kitzsteinhorn nicht ansprangen und die Messgeräte im Lamprechtsofen der Leoganger Steinbergen ebenfalls nur ein marginales Ereignis aufzeichneten, das im selben Jahr 10 mal überschritten wurde. Nur in Einzugsgebieten, die zu wesentlichen Teilen um 2000 m

und darunter liegen, kam es zu einem mehrjährigen Hochwasserereignis (Winnerfall im Tennengebirge und Bärenhöhle im Bluntautal). Es ist davon auszugehen, dass der Niederschlag im Tennen- und Hagengebirge in der Nacht vom 1. auf 2.6.2013 zu wesentlichen Teilen in fester Form fiel. Am Untersbergplateau hingegen fiel aufgrund der geringeren Höhe nahezu der komplette Niederschlag als Regen. Ob die dort beobachtete Doppelspitze durch einen kurzfristigen Temperaturabfall in der zweiten Nachthälfte mit anschließendem Temperaturanstieg und zusätzlicher Mobilisierung des inzwischen angefallenen Schnees verursacht wurde, kann anhand der Daten nur vermutet werden.

Die Betrachtung des Hochwassers im Juni 2013 zeigt somit, dass die Nullgradgrenze um ca. 2000 m die niedrigeren Regionen vor einer noch größeren Katastrophe bewahrt hat. Wäre die Nullgradgrenze nur um wenige 100 Meter höher gelegen, hätten die größeren Vorfluter Salzach und Saalach, in weiterer Folge Inn und Donau, im gleichen Zeitraum wesentlich größere Mengen abführen müssen. Unabhängig von der Frage, ob durch den Klimawandel Intensität und Frequenz von Starkniederschlägen zu- oder abnehmen, ist davon auszugehen, dass höhere Temperaturen in hohen Lagen die Pufferwirkung des Schneefalls verhindern. Auswertungen der langfristigen Klimaaufzeichnungen zeigen, dass die höheren Regionen der Alpen in der vergangenen ca. 200 Jahren einen überproportionalen Temperaturanstieg aufwiesen (Auer et al., 2007). Generell gilt für alle hier betrachteten Messstellen, dass sie innerhalb kurzer Zeit – durchwegs wenige



Abb. 22: Kesselsiphon in der Fürstenbrunner Quellhöhle in den frühen Morgenstunden des 2.6.2013.

Fig. 22: Kesselsiphon in Fürstenbrunner Quellhöhle in the early morning of June 2, 2013.

Stunden – auf die Niederschläge reagieren. Zwischen den zwei Ereignissen am 2.6.2013 und 31.7.2014 zeichnet sich dabei ein Unterschied ab: Beim Junihochwasser kam es zwischen 30.5. mittags und dem eigentlichen Starkniederschlag am 1.6.2013 ab ca. 18:00 bereits kumulativ zu starken Niederschlägen (bis zu über 60 mm), bei denen zahlreiche Poren- und Karsthohlräume gesättigt wurden. Der Starkniederschlag ab 18:00 pauste sich dann hydraulisch (d.h. ohne Verzögerung) in einem Anstieg in den Höhlen durch (Abb. 14). Am 31.7.2014 verhielt es sich anders: Auf einem niedrigeren Niveau kam es erst am Abend des 29.7. zu einer um etwa sieben Stunden verzögerten Reaktion der Quellen. Bei jedem der weiteren Niederschlagsereignisse wurde diese Verzögerung geringer.

AUSBLICK

In den kommenden Messperioden soll das Hebermodell im System Kneippklamm im Lamprechtsofen verifiziert werden, wobei mit oberhalb befindlichen Messungen versucht wird, dessen Lage einzugrenzen. Der Oberlauf des Abflusssystemes Kneippklamm ist erforscht und damit für Beobachtungen zugänglich (Gadermayr, 1996; Klappacher, 1996). Als mögliche Orte dieses Hebersystems kommen der Bereich Gruselversturzung oder der Rieselkogelsiphon in Frage. Gegenwärtig wird im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Einbindung der Fürstenbrunner Quellschneise in

Als am 31.7. mittags der Regen abklang, hielt vorerst – bis um rund 16:00 – der Anstieg des Karstwassers noch an, um dann sofort wieder abzufallen (Abb. 15). Eine wichtige Erkenntnis aus diesen Beobachtungen ist die Möglichkeit, Karsthöhlen in ein Netz von Messstellen für ein Frühwarnsystem für Hochwässer einzubinden. Gut dürfte sich dafür die Fürstenbrunner Quellschneise eignen. Die Hochwasserspitzen des Unheimlichen Sees und der Glan (Pegel Moos) lagen zwar nur 2 h 20 min auseinander. Berücksichtigt man aber die Phase des Anstiegs des Wasserstandes vor Aktivierung des zweiten Überlaufs (d.h. die Phase des „Volllaufens“ des Karstaquifers), so könnte man am Stadtrand von Salzburg eine Vorlaufzeit von 6 bis 8 h gegenüber dem Glanpegel erzielen.

das Hochwasser-Frühwarnsystem der Stadt Salzburg erwogen.

Für den Torrener Quellbezirk (Bluntautal/Bärenhöhle) läuft seit 2016 ein Quellmonitoring, das ähnliche Ergebnisse wie die Arbeiten im Untersberg (Gruber, 2014; Reischer et al., 2015) liefern soll. Vorarbeiten erfolgen bereits seit dem Winter 2011/12 (Höfer-Öllinger, 2015). Dabei werden der Abfluss der Schwarzen Torren einer Abflusskomponentenanalyse ähnlich Rank et al. (2006) und das Hagengebirge einer hydrogeologischen Neubewertung unterzogen.

DANK

Dank gilt allen Höhlenforschern, die entweder direkt bei den Touren beim Ein-, Ausbau oder Wechsel bzw. Auslesen der Logger geholfen haben oder davor im Zuge von Erforschung, Vermessung und Wegebau beigetragen haben. Dank gilt den zahlreichen Grundeigentümern, die die Forschertätigkeit unterhalb der Erdoberfläche oft mit einem skeptischen, aber dennoch meist toleranten Auge beobachten. Für besonders zahlreiche Teilnahme an den Touren, Datenaustausch oder die zahlreichen interessanten Diskussionen sei den nachfolgenden Personen gedankt: Steffen

Birk, Rainer Braunstingl, Ludwig Fegerl, Daniel Fliesser, Andreas Glitzner, Karoline Glitzner, Harald Haseke-Knapczyk, Klaus Heimlich, Harald Huemer, Katharina Lechner, Markus Keuschnig, Sandra Nelz, Lukas Plan, Henning Plötz, Markus Reischer, Martin Rothauer, Christoph Spötl, Gerhard Völkl, Johann Westhauser, Johann Wiesenegger, Gerfried Winkler und Felix Ziegler. Für die Überarbeitung der Grafiken sei Elena Öllinger gedankt, ganz besonderer Dank gilt Christoph Spötl sowie den Gutachtern Andreas Wildberger und Maximilian Wimmer.

LITERATUR

- Audra, P. (1994): Karsts alpins. Genèse des grands réseaux souterrains. Exemples : le Tennengebirge (Autriche) l'île de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France). – *Karstologia Mémoires*, 5: 1–279.
- Audra, P. (2004): Kitzsteinhorn high-alpine karst (Salzburg, Austria): Evidence of non-glacial speleogenesis. – *Die Höhle*, 55: 12–18.

- Audra, P., Bigot, J.-Y. & Zibrowius, S. (2004): Kammerhöhle (2573/8) – Hohe Tauern 2002 Expedition (Kitzsteinhorn, Kaprun, Salzburg). – *Die Höhle*, 55: 136–142.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P.D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M.,

- Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. & Nieplova, E. (2007): HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. – Intern. J. of Climatol., 27: 17–46.
- Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – Berlin (Springer).
- Braunstingl, R. (2005): Geologische Karte von Salzburg 1:200.000. – Wien (Geol. B.-A. und Land Salzburg).
- Ciszewski, A. (2003): Höhlen im Nebelsbergkar. – Unveröff. Dokumentation, Archiv LVHK Salzburg.
- Ciszewski, A. (2011): Leoganger Steinberge. – In: Oertel, A., Brendel U. & Hecht, R. (Hrsg.): Festschrift – 100 Jahre Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde): 232–237
- Ciszewski, A. (2013): Feichtnerschachthöhle, Kitzsteinhorn, Hohe Tauern. – Unveröff. Dokumentation, Archiv LVHK Salzburg.
- Dachs, E., Klappacher, W., Pavuza, R. & Peer, B. (2006): Strategisch wichtige Wasserressourcen im Tennengebirge und ihr gesetzlicher Schutz vor Privatisierungen: Geologische, hydrologische und juristische Faktoren. – Die Höhle, 57: 3–16.
- Gadermayr, W. (1996): Durchstiegsbericht vom Verlorenenwegschacht zum Lamprechtsofen im Februar 1992. – In: Klappacher, W. (1996): Salzburger Höhlenbuch, Band 6. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde): 168–171.
- Gadermayr, W. (2010): Karsthydrogeologischer Endbericht der Karstwassermessungen im Tennengebirge. – Unveröff. Bericht GZ 741 vom 1.8.2010, Hallein.
- Godina, R. & Müller, G. (Hrsg.) (2014): Hochwasser im Juni 2013. Die hydrographische Analyse. – Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft., Umwelt und Wasserwirtschaft., Wien.
- Greger, W., Seethaler, P. & Wimmer, M. (2004): Die extreme Hochwassersituation Anfang August 2002 in der Hirlatzhöhle (1546/7), im Vergleich mit hydrographischen Daten des Dachsteingebietes. – Die Höhle, 55: 3–11.
- Gruber, G. (2014): Das Abflussverhalten des Karstwassers am Untersberg bei Salzburg, Österreich. – Unveröff. Diplomarb. Univ. Graz.
- Haiden, T.A., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B. & Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region. – Forecasting, 26: 166–183.
- Höfer-Öllinger, G. (2011): Bergeralpforchung seit 1986. – In: Oertel, A., Brendel U. & Hecht, R. (Hrsg.): Festschrift – 100 Jahre Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde): 135–142.
- Höfer-Öllinger, G. (2015): Hydrogeologische Wanderungen ins Bluntautal 1335/1. – Atlantis, 37: 32–38.
- Klappacher, W. (1992): Salzburger Höhlenbuch Band 5. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde).
- Klappacher, W. (1996): Salzburger Höhlenbuch, Band 6. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde).
- Klappacher, W. & Knapczyk, H. (1977): Salzburger Höhlenbuch, Band 2. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde).
- Klappacher, W. & Knapczyk, H. (1979): Salzburger Höhlenbuch, Band 3. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde).
- Klappacher, W. & Haseke-Knapczyk, H. (1985): Salzburger Höhlenbuch, Band 4. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde).
- Knapczyk, H. (1984): Der Untersberg bei Salzburg. Die ober- und unterirdische Karstentwicklung und ihre Zusammenhänge – Ein Beitrag zur Trinkwasserforschung. – Unveröff. Diss. Univ. Salzburg.
- Lechner, K. (2015): Karstgeomorphologie und Karsthydrogeologie am Kitzsteinhorn (Hohe Tauern, Salzburg). – Masterarbeit, Universität Innsbruck.
- Lechner, K., Spötl, C. & Höfer-Öllinger, G. (2016): Karsthydrogeologie des Kitzsteinhorn Massivs (Hohe Tauern, Salzburg). – Die Höhle, 67: 65–76.
- Pointner, P. & Klappacher, W. (2016): Tennengebirge – In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.), Höhlen und Karst in Österreich, Oberösterreichisches Landesmuseum: 553–568.
- 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 J. of Earth Sci., 108: 68–81.
- Touissant, B. (1971): Hydrogeologie und Karstgenese des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen). – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 23: 5–115.
- Vökl, G. (1974): Karsthydrographische Untersuchungen in den Leoganger Steinbergen. – Unveröff. Diss. Univ. Wien.
- Vökl, G. (2011): Karstwasser, der Schatz in unseren Gebirgen. – In: Oertel, A.; Brendel U. & Hecht, R. (Hrsg.): Festschrift – 100 Jahre Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde): 188–198.
- Rank, D., Wieselthaler, F., Papesch, W. & Kuschnig, G. (2006): Separation of discharge components at a karst spring on the basis of event investigations (Wasseralmquelle, Austria). – Austrian J. of Earth Sci., 99: 18–23.
- Wiesenegger, H. (2014): Das Juni Hochwasser 2013 – Ein seltenes Jahrhundertereignis? – [https://www.sbg.ac.at/zgis/jKg/Wiesenegger_JugendKlimaTag_Hochwasser\[Kompatibilitätsmodus\].pdf](https://www.sbg.ac.at/zgis/jKg/Wiesenegger_JugendKlimaTag_Hochwasser[Kompatibilitätsmodus].pdf), abgerufen am 14.6.2016.
- Ziegler, F. (2013): Das Messstellen Netz der AGH. – Vortrag und Abstract, Karstwasser-Grundwasser-Untersberg, 22.08.2013, Wals bei Salzburg.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 2016

Band/Volume: [67](#)

Autor(en)/Author(s): Höfer-Öllinger Giorgio, Gadermayr Wolfgang, Butschek Michael

Artikel/Article: [Der Einfluss der Einzugsgebietshöhe auf das Abflussverhalten beim Hochwasser vom Juni 2013, aufgezeichnet in Höhlen und Karstquellen im Land Salzburg 49-64](#)