

Ein ausgeprägter negativer Temperaturgradient in der Pomeranzenhöhle, Schweiz

Vortrag von **Hans Stünzi** am Internationalen Kongress für Höhlenforschung in Brno, 27.6.2013:

„A Pronounced Extended Negative Temperature Gradient In The Pomeranzen Cave, Switzerland“,
Proceedings of the 16th International Congress of Speleology, June 2013, 458-463.

Übersetzung: Anita Kurz

Das Klima der Pomeranzenhöhle (O91/92) in den Schweizerischen Churfürsten auf 1'746 m ü. M. wurde während 2.5 Jahren mittels 25 Temperaturloggern untersucht. Ein schmaler Schlot im obersten Teil der Höhle führt wenige Meter unter die Oberfläche und hat eine ziemlich konstante Wintertemperatur von 4.7 °C, was 3.0 °C wärmer ist als die Jahresdurchschnittstemperatur von 1.7 °C. Im Gegensatz dazu beträgt die Temperatur in einer nahegelegenen Höhle auf gleicher Höhenlage wie zu erwarten 2.2 °C. Auch die grosse ElySION-Halle ist oben ziemlich warm (durchschnittlich 4.2 °C auf -34 m), während sie unten deutlich kühler ist (3.4 °C auf -90 m). Im Winter, unter einer mächtigen Schneedecke ist der negative Gradient in der Halle sogar noch ausgeprägter (4.4 °C auf -34 m vs. 3.3 °C auf -90 m). Der negative Gradient setzt sich in der folgenden Schachtzone fort (3.2 °C auf -120 m im Durchschnitt, 2.9 °C im Winter 2011). Ab hier ist der Temperaturgradient leicht positiv (0.1°C/100 m) bis zum tiefsten Teil der Höhle auf -340 m, wo die Temperatur von 3.5 °C der erwarteten durchschnittlichen Aussentemperatur in dieser Höhenlage entspricht.

Der Eingang der Höhle befindet sich in einem flachen, offenen Karrenfeld, ca. 100 m von der Flanke des Chäserruggs entfernt, welcher eine 70 m mächtige, schlecht durchlässige Gesteinsschicht gerade oberhalb der Höhenlage des Höhleneingangs aufweist. Die ungewöhnlich hohe Temperatur im oberen Teil der Höhle könnte von der höheren Temperatur unter dem Chäserrugg herrühren. Zusätzlich könnte sich die Gesteinsdecke im oberen Teil der Höhle (ca. -20 m) während der Sommermonate erhitzen und im Winter unter einer isolierenden Schneedecke als Wärmequelle dienen.

1. Einleitung

Wir beschreiben das Klima der Pomeranzenhöhle O91/92 in den Churfürsten, im Osten der Schweiz (Abb. 1). Es handelt sich um eine Region mit einer hohen jährlichen Niederschlagsrate von 1'640 mm und ausgeprägter Verkarstung.

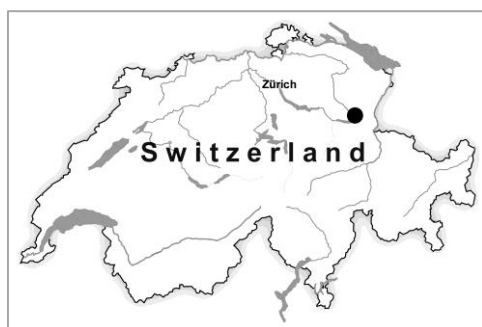


Abb. 1: Geografische Lage von O91/O92

Die Höhle öffnet sich in einem ehemaligen Kar (Gletschertal) zwischen Chäserrugg und Gamser Rugg auf 1'746 m ü. M. und ist momentan 2.2 km lang und 369 m tief. Sie besteht aus zwei Teilen, O91 und O92 (Abb. 2), welche durch eine enge Passage miteinander verbunden sind. Beide Teile sind zurzeit noch nicht vollständig erforscht. Beschreibungen und Pläne sind in Stünzi (2006) für O91 und Stünzi (2009) für O92 bis zum Ende der ElySION-Halle zu finden.

In diesem Artikel konzentrieren wir uns auf das O92. Unter den Eingängen steigt ein Mäander leicht nach Südosten an, dann folgt der untere Hades-Mäander, der in die grosse ElySION-Halle im Norden mündet. Die darauf folgende Schachtzone ist bis auf -369 m erforscht (Abb. 2).

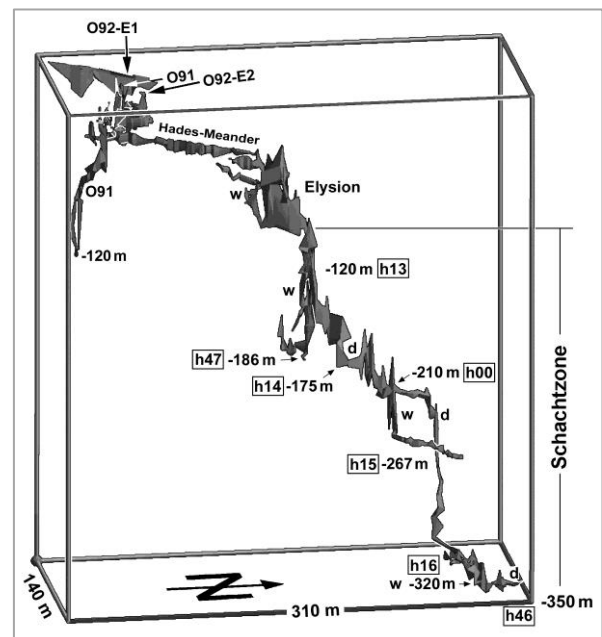


Abb. 2: 3D-Skizze von O91/O92 (nach Franz, 2011) und Position der Logger in der Schachtzone. „d“: trockene Teile, „w“: nasse Teile

Diese Studie mit Temperaturloggern wurde begonnen, um die variierenden Luftströmungen im Eingangsbereich der Höhle zu erklären. Dann entdeckten wir eine ausgeprägte Temperaturinversion in der ElySION-Halle bis hinunter auf -120 m. Diese Temperaturanomalie ist Gegenstand dieser Arbeit.

2. Geologie

Die Churfirten bestehen vollständig aus mesozoischen Sedimenten. Der Einstieg zur Höhle O91/92 befindet sich am oberen Ende einer 200 m mächtigen kreidezeitlichen Kalkschicht (Schrattenkalk), welche mit ca. 10 Grad nach Norden abfällt. Die darunterliegende Drusberg-Formation (Mergel und Kalke) ist erstmals auf -210 m anzutreffen, doch setzt sich die Höhle bis zu ihrem Ende in Kalk fort. Dies deutet auf einen Bruch mit signifikanter vertikaler Verschiebung, dessen Natur bisher noch nicht aufgeklärt werden konnte. Auf -320 m ist man in einer Bruchzone.

3. Datenkollektion

3.1 Temperaturlogger

Die Temperaturmessung mit drei verschiedenen Loggertypen startete im Februar 2010 und dauerte bis zum Oktober 2012:

Im Eingangsbereich wurden vor allem i-buttons DS1921Z verwendet (Genauigkeit ± 1 °C, Auflösung ± 0.12 °C)¹.

Die meisten hier präsentierten Resultate stammen von Hobo Loggern, im Folgenden mit einem „h“ bezeichnet. Die einstelligen Nummern (z.B. h6) stehen für Hobo-Pendants (Genauigkeit ± 0.5 °C, Auflösung ± 0.11 °C); die zweistelligen Nummern (z.B. h06) für Hobo Water-Temp-Pro v2 (Genauigkeit ± 0.2 °C, Auflösung ± 0.027 °C), in Gebrauch seit 2011. Grundsätzlich wurden die Daten in stündlichen Intervallen gesammelt.

Alle Ablesungen wurden aufgrund der Kalibrierung in Eiswasser korrigiert. Rekalibrierungen zeigten, dass die Reproduzierbarkeit um ein Vielfaches besser ist als die Genauigkeit.¹

3.2 Andere meteorologische Daten

Temperaturdaten von drei Messstationen in der Nähe stammen von MeteoSchweiz.

¹ Genauigkeit: Richtigkeit der angegebenen Temperatur; Auflösung: Ablesungs-„Genauigkeit“ der Temperatur; Reproduzierbarkeit: Temperaturangabe bei Wiederholmessungen.

Wenn ein Logger in Eiswasser immer zwischen 0.3° und 0.5° statt 0.0° anzeigt, und dessen Temperaturangaben um 0.4° korrigiert werden, dann „stimmen“ die Temperaturen auf ± 0.1 °.

Die Mittelwerte dieser drei Temperaturmessreihen, korrigiert um 0.5 °C pro 100 m, geben eine grobe Näherung der Umgebungstemperatur für den Zeitraum in dem der ausserhalb der Höhle platzierte Logger mit Schnee bedeckt war.

Für die Angaben von atmosphärischem Druck und Regen benutzten wir die Daten der Messstation vom Säntis (9 km nördlich, 2500 m ü. M.).

4. Der obere Teil der Höhle

4.1 Beschreibung

Für eine detaillierte Beschreibung siehe Stünzi (2009). Der Eingang E1 von O92 ist eine grosse Spalte, die normalerweise mit Schnee gefüllt ist (Abb. 3). Eine Öffnung in 27 m Tiefe gewährt Zugang zu einer hohen Galerie von etwa 3 m Breite. Ein Mäander, der 9 m über dem Boden beginnt, besitzt eine hübsch dekorierte Initialellipse. Aus dieser wurden zwei Stalagmiten datiert: Sie hörten vor 420'000 Jahren auf zu wachsen (Luetscher, pers. Mitt.).

Der Eingang E2 wurde als kleiner Lichtfleck aus dem Inneren der Höhle entdeckt und musste vergrössert werden. Er ist mittlerweile der Haupteingang zur Höhle. Der zuvor erwähnte Mäander setzt sich fort, dreht dann südwärts ab und endet in einer Versturzone. Ein enger Schlot (Σ in Abb. 3) endet wenige Meter unter der Oberfläche.

Eine abfallender, 5 m langer Gang von ca. 0.8 m Breite und 1.5 m Höhe („Verbindungsellipse“) führt in die Decke des Hades-Mäanders.

4.2 Resultate vom oberen Teil der Höhle

Die Position der Logger ist in Abb. 3 ersichtlich. Für die aktuelle Präsentation genügen zusammengefasste Resultate. Detaillierte Ergebnisse sind in Stünzi (2010) zu finden.

Im Winter, wenn der Eingang E1 mit Schnee verschlossen ist, sind die Temperaturen der Logger-Gruppe L1 ≥ 0 °C. Dasselbe gilt für die Gruppe L2 bezüglich des Eingangs E2.

Die ziemlich konstante Temperatur der Logger-Gruppe L3 zeigt, dass an dieser Stelle trotz der nahen Oberfläche keine Aussenluft in die Höhle einfließt.

Der Logger L4 (h3) in der Verbindungsellipse zeigte im Winter 2012, während der Eingang der Höhle mit Schnee bedeckt war, eine konstante Temperatur von 3.9 °C. Über die ganze Messperiode variierte die Temperatur zwischen 2.0 und 4.0 °C (3.73 ± 0.15 °C) wobei 0.5 % der Ablesungen unter 3.2 °C lagen. Letzteres zeigt, dass manchmal kalte Luft vom Eingang diesen Punkt erreicht. Interessanterweise ist der Wind in der Verbindungsellipse normalerweise auswärts gerichtet (zum Eingang).

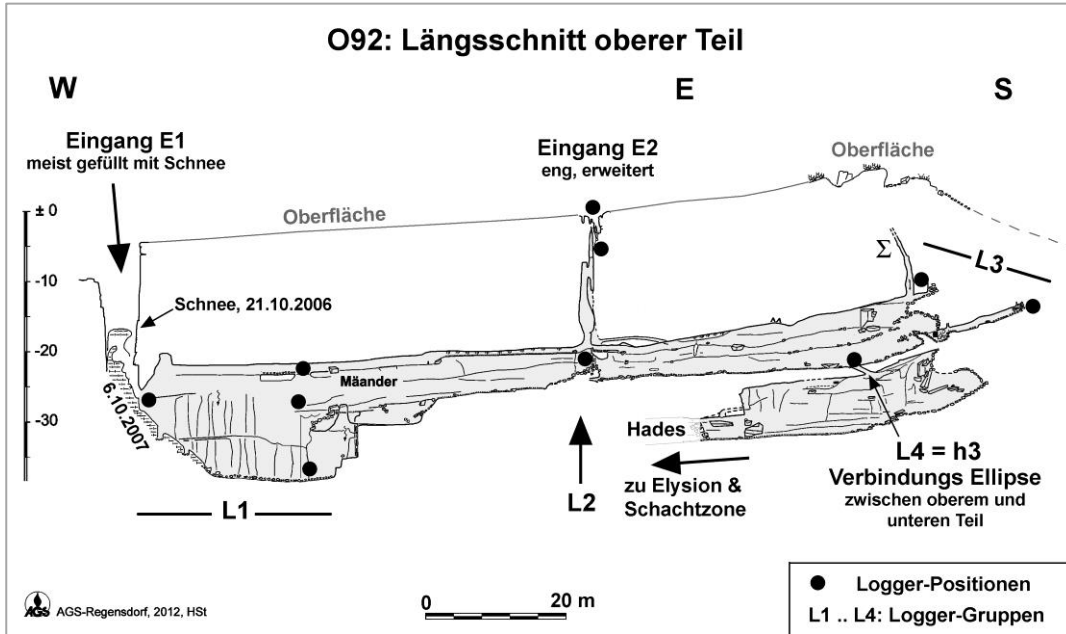


Abb. 3. Position der Temperaturlogger im oberen Teil der Höhle.

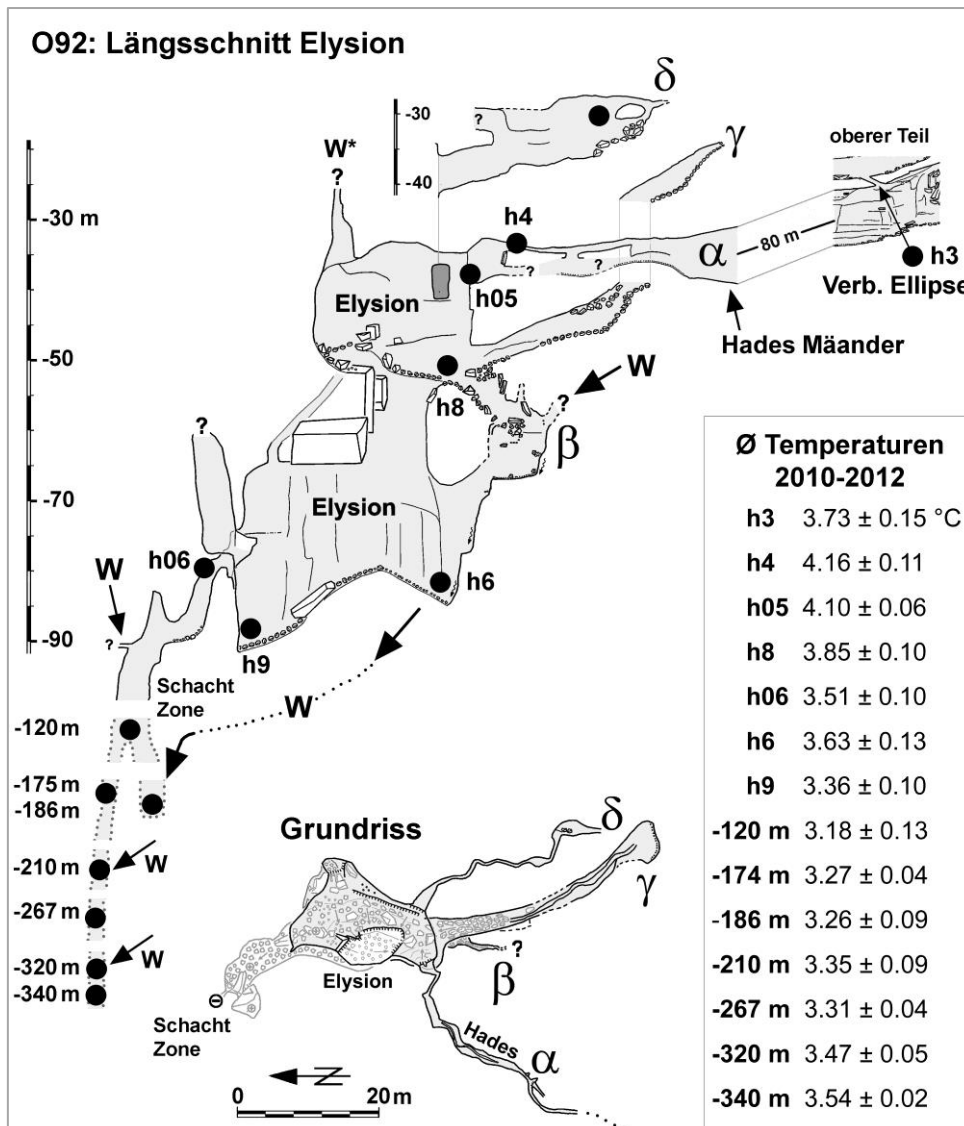


Abb. 4.

Plan der ElySION-Halle. Die Positionen der Temperaturlogger sind im Längsschnitt eingezeichnet.

Die Schachtzone (< -90 m) ist nur angedeutet.

Griechische Buchstaben bezeichnen je gleiche Stellen in beiden Ansichten.

„W“: Wasserwege, meist nur Rinnsale. Während starken Regenfällen kann Wasser auch bei W* eintreten.

Die Oberfläche befindet sich ca. 20 m über der Decke des ElySIONs.

5. Der untere Teil der Höhle

5.1 Beschreibung und Hydrologie

Der Hades-Mäander ist ziemlich eng und hat ein Rinnsal am Boden. In den letzten 60 m vor dem Erreichen der ElySION-Halle wird der untere Teil des Mäanders unpassierbar eng und die Befahrung setzt sich in der Initialellipse fort (Abb. 4 und Stünzi, 2009).

In der ElySION-Halle steigen zwei Mäander (γ und δ in Abb. 4) auf, bis zum Fuss einer Felswand in einem kleinen Tal im Osten der Höhle. Eine Laser-Distanzmessung in einem unerforschten Schlot (W^* in Abb. 4) endete ca. 10 m unter der Oberfläche. Etwa 20 m von diesem Punkt entfernt befindet sich eine kleine Senke in der Oberfläche, gefüllt mit Erde und Felsblöcken, einige davon mit Überresten von Tropfsteinen.

Aus einer unpassierbaren Spalte am südlichen Ende eines weiteren Ganges (β in Abb. 4) tritt ein Rinnsal hervor, fließt hinunter in die ElySION-Halle und versickert dort im Schotterboden.

Die Schachtzone beginnt 15 m oberhalb des nördlichen Endes der Halle. Nach einer Engstelle (bei h06 in Abb. 4) werden die Dimensionen wieder komfortabler, jedoch rinnt Tropfwasser von der Decke des zweiten Schachts. Auf -120 m führt ein Schacht mit Tropfwasser bis auf -186 m, gefolgt von einem Schlot in Richtung ElySION-Halle (noch nicht vollständig erforscht). Ein zweiter Schacht ist ziemlich trocken und verzweigt sich auf -210 m erneut. Hier kann sich während der Schneeschmelze ein Rinnsal zu einem gefährlichen Fluss entwickeln. Das Wasser fließt in einen Schacht, auf welchen ein schmaler Mäander folgt, der auf -262 m endet. Von der Verzweigung auf -210 m führt eine kurze, fossile Galerie zu

weiteren Schächten, wo auf -320 m ein Bächlein mit ca. 5-10 L/s eintritt, das nur schwach auf die oben erwähnte Schneeschmelze reagierte. Im tiefsten Teil (-369 m) warten verschiedene Gänge – einige fossil – auf ihre Erforschung.

5.2 Temperaturen in der ElySION-Halle

In der ElySION-Halle wird es mit zunehmender Tiefe deutlich kühler (Abb. 4). Um diesen ungewohnten, negativen Temperaturgradienten zu interpretieren, konzentrieren wir uns zwei Perioden mit einer mächtigen Schneedecke, d.h. Sommer 2011 und Winter 2012 (Tabelle 1, Abb. 5).

In den tieferen Teilen verspätet sich der „Sommer“ bis zum Ende des Novembers. Deshalb werden die Temperaturen von August und September als Sommerwerte verwendet. Während dieser Zeit zeigen sich in der Verbindungsellipse aufgrund des Einflusses vom Eingang kleine Variationen. Die ebenfalls grössere Standardabweichung bei h6 (Abb. 4) könnte durch einen variablen Wasserzufluss aus Mäander β erklärt werden. Die restlichen Temperaturen waren ziemlich konstant. Der Gradient in der ElySION-Halle war $-1.2 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ($R^2 = 0.97$).

Im Februar 2012 waren alle Temperaturen in der ElySION-Halle sehr konstant mit einem Gradienten von $-1.8 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ($R^2 = 0.94$). Auch unter den Eingangsschächten waren die Temperaturen in diesem Monat konstant (E2: $3.51 \pm 0.04 \text{ }^\circ\text{C}$, E1: $1.2 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$), was vermuten lässt, dass die Höhle mit Schnee bedeckt war. Der oberste Teil von ElySION bis Verbindungsellipse) war wärmer als im Sommer. Dies gilt auch für den schmalen Schlot im obersten Teil der Höhle (Σ in Abb. 3), wo die Temperatur im Winter ($4.67 \text{ }^\circ\text{C}$) höher war als im Sommer ($4.12 \text{ }^\circ\text{C}$).

Logger	Tiefe m	Sommer 10.8.-6.10.11		Winter 21.1.-21.2.12		Differenz So-Wi
		$\bar{\varnothing}$	σ	$\bar{\varnothing}$	σ	
Verbindungsellipse						
h3	-22	3.82	± 0.05	3.88	± 0.00	-0.06
ElySION-Halle						
h4	-34	4.18	± 0.03	4.41	± 0.00	-0.22
h05	-38	4.11	± 0.01	4.15	± 0.01	-0.04
h8	-51	3.93	± 0.04	3.77	± 0.00	0.16
h06	-79	3.57	± 0.01	3.41	± 0.02	0.14
h6	-82	3.64	± 0.06	3.47	± 0.00	0.17
h9	-90	3.47	± 0.01	3.26	± 0.00	0.21
Schachtzone						
h13	-120	3.18	± 0.06	3.18	± 0.03	0.02
h14	-175	3.30	± 0.01	3.21	± 0.01	0.09
h47	-186	3.24	± 0.03	3.19	± 0.01	0.05
h00	-210	3.36	± 0.02	3.23	± 0.01	0.13
h15	-267	3.37	± 0.02	3.25	± 0.01	0.12
h16	-320	3.49	± 0.01	3.46	± 0.01	0.03
h46	-340	3.56	± 0.02	3.52	± 0.01	0.04

Tabelle 1

Sommer- und Wintertemperaturen ($^\circ\text{C}$):
Mittelwerte ($\bar{\varnothing}$)
und Standardabweichung (σ)
von stündlichen Ablesungen.

Eine Ausnahme bildet die kleine Kammer am Ende des Gangs δ (Abb. 4), welche deutliche saisonale Temperaturunterschiede von 3 °C im Winter bis zu 8 °C im Sommer zeigt (Durchschnitt 4.9 °C). Obwohl die Kammer sehr nahe an der Oberfläche liegt, zeigten die konstanten Temperaturen an den Positionen h8 und h05 keine signifikante Einströmung von Luft ins ElySION an.

5.3 Temperaturen in der Schachtzone

Der negative Gradient setzt sich in der Schachtzone fort, welche auf -120 m noch kälter ist als der Boden der ElySION-Halle (Abb. 4 und Tabelle 1). Die Temperaturen in der Schachtzone sind ziemlich stabil, bis auf eine grössere Streuung (± 0.13 °C) auf -120 m, wahrscheinlich aufgrund von variabler Tropfwassermenge aus dem darüber liegenden Schacht.

Die Temperaturen bei -210 m und -267 m sind beinahe gleich und erst darunter entwickelt sich ein positiver Gradient von 0.3 °C/100 m.

5.4 Regen am 10. Oktober 2011

Am 10. Oktober 2011 setzte um Mitternacht ein grossflächiger, starker Regen ein. Er belief sich auf 107 mm beim Säntis (9 km nördlich, 2'500 m ü. M.) und verursachte dort einen plötzlichen Temperaturanstieg von -5 ° auf +5 °C. Dieser Regen führte zu einer plötzlichen Erhöhung der Temperaturen in der Höhle (Tabelle 2, Abb. 5), vor allem im südlichen Grund der ElySION-Halle, auf -120 m und -186 m (Tropfwasser) und bei den Wassereintritten auf -210 m und -320 m.

Von -38 m bis -186 m wurden die Temperaturmaxima um 10:00 Uhr erreicht und darunter eine Stunde später. Der deutlich frühere Anstieg bei h8 im Zentrum des ElySIONs deutet darauf, dass Wasser durch den Schlot W* in Abb. 4 einfluss.

Nach 2-4 Tagen kehrten die Temperaturen wieder beinahe auf ihre ursprünglichen Werte zurück, d.h. unter 20% des jeweiligen Temperatursprunges.

Die Höchstwerte der Temperaturerhöhungen bei den Eingängen (Gruppen L1 und L2 in Abb. 3) wurden zwei Stunden später registriert als in der ElySION-Halle. Das zeigt, dass die Eingangsregion der Höhle nicht zur Hydrologie in der ElySION-Halle und Schachtzone beiträgt. Das Wasser, welches durch E2 in die Höhle eintritt, fliesst durch den Mäander in den Gang unter dem E1 (Abb. 3) und verschwindet dort im Schotterboden.

Die Verbindungsellipse reagierte einiges später, weil das Wasser nicht hier durch fliesst. Dies gilt ebenso für den tiefsten Punkt im Norden des ElySIONs (h9). Auch der Logger bei h4 zeigte keinen deutlichen Temperaturanstieg, sondern nur zwei kurze Impulse von -0.1 °C auf +0.1 °C und kehrte um 13:00 Uhr auf seinen Normalwert zurück.

Ein ähnlicher plötzlicher Temperaturanstieg wurde am 27. Juli 2012 um 15:00 Uhr zeitgleich bei allen Stationen unterhalb -51 m beobachtet (Abb. 5). Dabei muss es sich um ein lokales Gewitter gehandelt haben, da weder auf dem Säntis noch bei zwei weiteren Wetterstationen in der Region zu dieser Zeit Regen registriert wurde.

Logger	Tiefe m	9.10.11 Ø °C	10.10.11 10-12 h °C	Diff. °C	Beginn [#] Zeit
Verbindungsellipse					
h3	-22	3.77	3.88	0.11	07:00
ElySION-Halle					
h4	-34	4.20	4.31 [@]	0.11	04:00
h05	-38	4.12	4.27	0.15	02:00*
h8	-51	3.88	4.50	0.62	01:00
h06	-79	3.55	3.81	0.26	03:00
h6	-82	3.58	4.63	1.05	03:00
h9	-90	3.47	3.69	0.22	08:00
Schachtzone					
h13	-120	3.21	4.26	1.05	03:00
h14	-175	3.25	3.41	0.16	03:00
h47	-186	3.23	3.83	0.60	03:00
h00	-210	3.33	4.14	0.81	04:00
h15	-267	3.30	3.30	0.00	
h16	-320	3.47	3.94	0.47	05:00
h46	-340	3.54	3.60	0.05	05:00
Eingang	-4 m	3.4	5.25		
Logger ausserhalb		1.1	4.41		

Tabelle 2.

Einfluss des starken Regens am 10. Okt. 2011 auf die Höhlentemperaturen (Durchschnitt stündlicher Ablesungen)

#: 10% des totalen Temperaturanstiegs

@: Nur eine einzige Messung > 4.2 °C

**: zuerst eine Temperaturemniedrigung auf 4.07 °C. Der Anstieg begann um 06:00 Uhr*

5.5 Schneeschmelze 2012

Am 25. April 2012 begannen die Temperaturen an den meisten Orten deutlich und ziemlich zeitgleich anzusteigen (Abb. 5).

Auf -210 m, in der Nähe des Wassereintritts, stiegen die Temperaturen während drei Tagen von 3.2 auf 3.6 °C und brauchten anschliessend ca. zwei Monate um wieder auf ihre Sommer-temperatur von 3.4 °C zu fallen. Ein ähnliches Bild präsentierte sich auch an anderen „nassen“ Stellen, d.h. h6 (Anstieg von +0.4 °C), auf -120 m (+0.3 °C), -186 m (+0.5 °C). Der Logger h8 zeigte einen geringeren Temperaturanstieg von 0.2 °C.

Dieser Temperaturanstieg zeigt offensichtlich das Einsetzen der Schmelze der mächtigen Schneedecke (>3 m oberhalb der Höhle). Die fallenden Temperaturen in der Verbindungsellipse deuten auf einflussende Kaltluft vom Eingang E2 nach dem Schmelzen der Schneedecke. Auch am oberen Ende des Elysiens (h4 und h5) sanken die Temperaturen um 0.2 °C. Wasserinduzierte Luftzirkulationen könnten kältere Luft vom Boden der Halle hinaufgebracht haben.

Im Winter 2011 gab es viel weniger Schnee und dementsprechend hatte die Schneeschmelze einen viel kleineren Effekt auf die Temperaturen in der Höhle (Abb. 5).

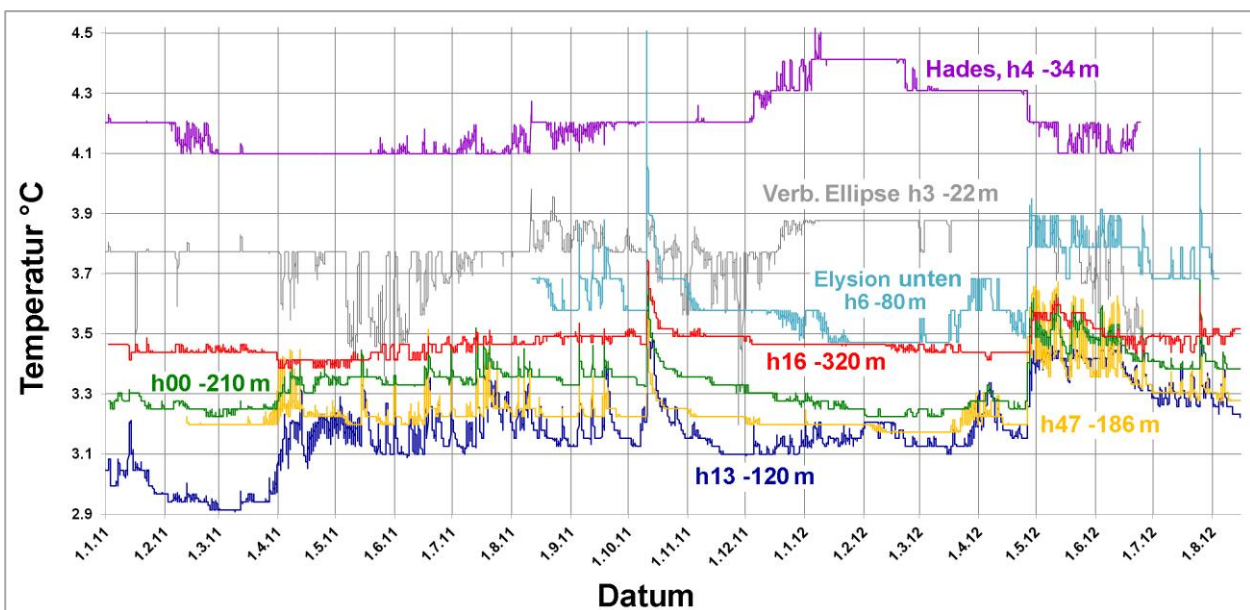


Abb. 5. Ausgesuchte Temperaturkurven von Januar 2011 bis August 2012

6. Interpretation und Diskussion

6.1 Hydrologie

Wie bereits erwähnt, fliesst kein Regenwasser von der Eingangsregion ins Elysiun und die Schachtzone.

Die unter 5.4 und 5.5 beschriebenen Ereignisse zeigen klar auf, dass das Wasser die Elysiun-Halle bei Position h6 (Abb. 4) verlässt. An dieser Stelle fliesst normalerweise Wasser von Mäander β (Abb. 4) hinunter. Die grosse Ausmasse des Schachts zwischen diesen beiden Stellen, lassen einen zeitweise signifikanten Wasserfluss vermuten. Daher ist β wahrscheinlich einer der Hauptzubringer für das Wasser in der Schachtzone.

Die zweite signifikante Wassereintrittsstelle befindet sich oben in der Schachtzone (Abb. 4).

Die zeitgleichen, schnellen Temperaturspitzen an allen Positionen zeigen dass

- sich das Einzugsgebiet in der Nähe der Höhle befindet;
- der Verlauf vom Einzugsgebiet zur Höhle ziemlich gradlinig ist.

Möglichkeiten für das Einzugsgebiet sind die Karrenfelder zwischen der Höhle und dem Chäserugg, das kleine Tal und der flache Bergrücken östlich der Höhle (Abb. 6). 100 m westlich vom Elysiun gibt es 3 Schachthöhlen, von welchen die tiefste bis auf 1670 m ü. M. hinunterreicht. Diese Höhlen könnten den obersten Teil der Schachtzone auf 1655 m ü. M. (-90 m) nähren. Vier kleine Schachthöhlen 150 bis 300 m östlich des Elysiuns lassen eine weit fortgeschrittene Verkarstung mit möglicher Verbindung zu Mäander β vermuten (Abb. 4).

Die Funktion des Rinnsals im Hades-Mäander bleibt schleierhaft. Wir haben dort nie einen erhöhten Wasserfluss beobachtet und es gibt keinen offensichtlichen Zufluss des Hades-Wassers in das ElySION. Die Temperaturspitzen von Regen und Schneeschmelze im oberen Teil des ElySIONs (h05) sind viel geringer als diejenigen direkt unter Mäander β (h6). Daher scheint der Wasserzufluss aus dem Schlot ins ElySION von untergeordneter Bedeutung zu sein.

6.2 Die Höhle ist zu warm

Normalerweise entspricht die Höhlentemperatur in Karstregionen der durchschnittlichen jährlichen Aussentemperatur (Luetscher & Jeannin, 2004). Dies konnte in der nahe gelegenen Höhle O17, 900 m südöstlich vom O92 auf 1870 m ü. M. beobachtet werden (Filipponi, 2004). In dieser Höhle betrug die Temperatur auf 1746 m ü. M. 2.0 °C, was gut zur berechneten Aussentemperatur von 1.7 °C passt (Alpha-Innotec, 2012). Der obere Teil von O92 weist hingegen Temperaturen von bis zu 4.7 °C auf und bleibt bis -267 m zu warm.

Erst auf -340 m (1400 m ü. M.) korrespondiert die Temperatur der Höhle (3.5 °C) mit der mittleren jährlichen Aussentemperatur in dieser Höhenlage (3.7 °C, Alpha-Innotec, 2012). Vergleichsweise liegt die Temperatur des Seichberglochs (1.3 km nördlich) auf 1300 m ü. M. bei ca. 4 °C (Dickert, 1995).

Das Schmelzwasser weist bei seinem Eintritt in das Gestein eine Temperatur von 0 °C auf und erwärmt sich anschliessend, wie am Anstieg der Höhlentemperatur zu erkennen ist, grundsätzlich von 3.5 °C auf 4.0 °C bei -82 m in der ElySION-Halle (h6 in Abb. 4). Dies lässt vermuten, dass ein signifikanter Teil des Gesteins warm ist und diese Hitze auf das Schmelzwasser überträgt.

Als Erklärung für die zu hohe Temperatur und den negativen Gradienten können einige Gründe ausgeschlossen werden: (1) Soweit wir wissen existiert kein erhöhter geothermischer Fluss in den Churfirten, welche vollständig aus mesozoischen Sedimenten bestehen. (2) Da sich die beiden Eingänge oben an der Höhle befinden, kann es keinen Zufluss warmer Sommerluft von ausserhalb geben, was eine Warmluftfalle verursachen könnte.

Die Messresultate in der ElySION-Halle lassen eine konvektive Situation vermuten – weniger dichte, warme Luft oben – besonders im Winter, wenn die Eingänge schneebedeckt sind.

Aber woher kommt diese Wärmequelle?

6.3 Exposition und isolierende Schneedecke

Die mittlere jährliche Temperatur des Loggers ausserhalb der Höhle betrug 4.7 °C (im Jahr ab Juli 2010) und 4.6 °C (ab Juni 2011). Dies ist viel höher als die erwartete durchschnittliche jährliche Aussentemperatur (1.7 °C), weil die Temperatur unter der Schneedecke um 0 °C beträgt, anstelle der negativen winterlichen Aussenlufttemperatur. Eine ähnliche Durchschnittstemperatur wurde in der Kammer am Ende von Gang δ registriert, welche sich in der Nähe eines östlich gelegenen, freistehenden Abhangs befindet.

Dies könnte die „tatsächliche“ Durchschnittstemperatur der Ebene sein, unter welcher sich der obere Teil der Höhle etwa 20 m unter der Oberfläche erstreckt (Abb. 6). In diesem offenen Karst gibt es kaum Vegetation, welche das Gestein von der Sonneneinstrahlung schützt und keine kühlende Evapotranspiration². Es ist daher denkbar, dass die „Decke“ der Höhle die durchschnittliche jährliche Temperatur „unter Schnee“ angenommen hat.

Die Logger unterhalb den beiden Eingängen zeigten, dass diese im Winter 2011 (20. Februar bis 30. März, Abb. 5) mit Schnee bedeckt waren. Obwohl die Schneedecke weniger dick als im Winter 2012 war, würde man die gleiche Durchschnittstemperatur des Gesteins 20 m unter der Oberfläche erwarten. Aber oben im ElySION (-34 bis -79 m) war es 2011 um 0.1 bis 0.3 °C kühler, ebenso auf -120 m. Dies bedeutet, dass trotz der offensichtlichen Belüftung der Höhle ein starker negativer Temperaturgradient bis auf -120 m besteht. Dies gilt auch für den Sommer. Jedoch sollte die Temperatur in einer belüfteten Schachtzone mit Tropfwasser auf -180 m um 0.5 °C tiefer sein als auf -80 m und nicht um 0.2 °C höher, wie effektiv beobachtet.

6.4 Laterale Verteilung geothermischer Wärme

Eine weitere Energiequelle ist der geothermische Energiefluss, der in Abwesenheit einer Energie-senke einen Gradienten von ca. 3 °C/100 m bewirkt. Die Mergelschichten unter dem Chäserrugg-Rücken, ein bisschen höher gelegen als die Höhle, haben geringe Wärmedurchlässigkeit und dürften den Energiefluss blockieren. Die Wärme könnte sich dann lateral ausbreiten und den oberen Teil der Höhle erwärmen (Abb. 6).

Eine höhere Temperatur unter dem Chäserrugg ist zu erwarten, wenn darunter kein phreatisches Niveau besteht. Dies ist nicht unrealistisch im Hinblick auf die schlecht wasserdurchlässigen

² Evapotranspiration = Verdunstung von Wasser aus Tier- und Pflanzenwelt, sowie der Bodenoberfläche.

Mergel der Garschella-Formation (Abb. 6). Zusätzlich könnte der bedeutende vertikale Bruch mit ca. 30 m Vertikalverschiebung, welcher nord-südlich entlang des Chäserruggs verläuft ("Bruch von Oberplisen", Heim 1917, Becker 2007) in der Tiefe prominenter sein und sogar als Grundwasserleiter fungieren.

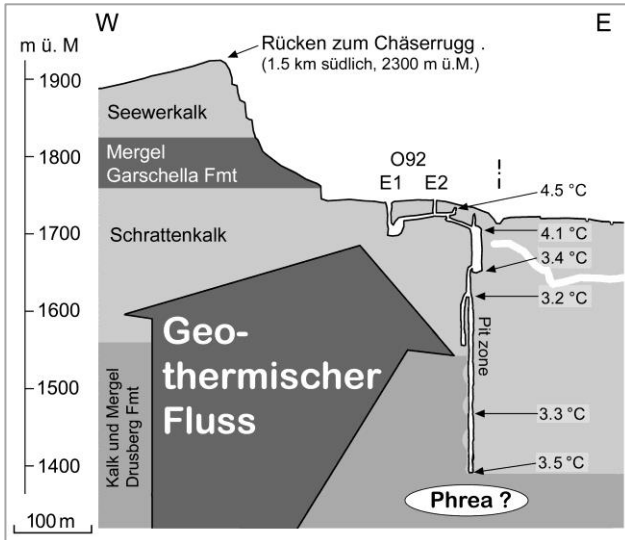


Abb. 6. Geologie von O91/O92 mit einigen mittleren Höhlentemperaturen und dem vermutetem geothermischen Wärmefluss. Die weisse Linie zeigt die Oberfläche über dem tiefsten Punkt der Höhle, welcher sich 280 m nördlich des Eingangs befindet. „-.-“ markiert die Position des „Bruchs von Oberplisen“.

Ein grösserer Gradient als die Höhlen-üblichen ungefähr 0.5 °C/100m und entsprechend höhere Temperaturen sind in gesättigtem, isoliertem Karst unterhalb von wasserundurchlässigen Mergeln zu erwarten. Luetscher & Jeannin (2004) geben ein Beispiel eines Gradienten von 1.5 °C/100 m.

Unter dem Eingangsschacht E2 (Abb. 3) gibt es eine ca. 10 cm geöffnete Schichtfuge. Eine ähnliche Schichtfuge wurde im O91-Teil der Höhle ca. 20 m tiefer gesichtet. Und in der Initialellipse des Mäanders, welcher zum E1 führt, zeigt sich eine neotektonische horizontale Verschiebung um ca. 10 cm. Könnten diese Besonderheiten den lateralen Wärmefluss von unterhalb des Chäserruggs verstärken?

7. Fazit

Die Temperaturen am Grund von O92 (-340 m) sind „normal“, jedoch oberhalb von -267 m zunehmend zu hoch. Um diese Erwärmung des obersten Teils von O92 zu erklären, wurden zwei Hypothesen präsentiert: zum einen die konvektive Situation aufgrund der Isolation der Höhle durch Schnee und zum andern die laterale Ausbreitung

von geothermaler Wärme vom Chäserrugg. Beides könnte zum beobachteten, aussergewöhnlichen negativen Gradienten beitragen.

Dank

Wir danken dem Schweizerischen Institut für Speläologie und Karstforschung (SISKA) und der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) für den Verleih der i-Buttons bzw. Hobo-Pendants und den Kollegen, welche uns einige der Hobo Water-Temp-Pro v2 gesponsert haben, die unser Club-Budget überstiegen hätten. Das Projekt wäre nicht möglich gewesen, ohne die Hilfe der Mitglieder der Arbeitsgemeinschaft für Speläologie Regensdorf (AGSR), bei den häufigen Logger-Touren. Ich danke auch Prof. A. Pflitsch (Ruhr-Universität Bochum), Dr. A. Becker und Ch. Sutter für Ihre wertvollen Kommentare zu diesem Artikel.

Referenzen

- Alpha-Innotec, 2012. Erdwärmesondenberechnung nach SIA 384/6. www.alpha-innotec.ch/uploads/SIA384-6_WP-AlphaInnotec_1.xls.
- Becker A, 2007. Geologie der Gamsalp. AGS-Info 2007 Spezial, 4-35.
- Dickert A, 1995. Seichbergloch. Höhlenpost 98, 2-56.
- Filipponi M, 2004. Höhlenklima-Projekt im O17 – Schlussbericht. AGS-Info 2004(1), 31-35.
- Franz F, 2010. Forschungsstand Pomeranzenhöhle O91/92. AGS-Info 2010(2), 7.
- Heim A, 1917. Monographie der Churfürsten-Mattstock-Gruppe. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, N.F. 20(4), Franke, Bern, p. 614.
- Luetscher M, Jeannin P-Y, 2004. Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2004(2), <http://www.speleogenesis.info/directory/karstbase/publication.php?id=4503>.
- MeteoSchweiz, 2012. Standardnormwerte 1961-1990: Niederschlagssumme. http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_schweiz/tabellen.Par.0011.DownloadFile.ext.tml/niederschlagssummen.pdf
- Stünzi H, 2006. Schachthöhle O91. AGS-Info 2006(2), 23-26.
- Stünzi H, 2008. Schachthöhle O17. AGS-Info 2008(2), 10-19.
- Stünzi H, 2009. Pomeranzenhöhle O91/92. AGS-Info 2009(2), 12-23.
- Stünzi H, 2010. Temperaturprojekt O92: Erste Daten. AGS-Info 2010(2), 13-20.

Hans Stünzi:

Anmerkungen zum Artikel „Ein ausgeprägter negativer Temperaturgradient“

Die hier präsentierte Version ist eine ziemlich getreue Übersetzung des Artikels, den ich für den die Klima-Session des internationalen Kongresses eingereicht habe.

Änderungen:

Nach beinahe einem Jahr Abstand zwischen dem Verfassen des Artikels und dem Layouten der Übersetzung von Anita habe ich bemerkt, dass ich ein paar Sätze nicht ganz korrekt oder verständlich formuliert habe. Da ich dies korrigiert habe, ist dieser deutsche Text nicht zu 100% wortgetreu. Zudem habe ich an gewissen Stellen, die ohne Klima-Fachwissen kaum verständlich sind, kleine erklärende Zusätze angebracht.

Zum Vortrag:

Mein Beitrag wurde gut aufgenommen und das Thema zur Weiterverfolgung empfohlen, wie bereits vorher im Klimaworkshop am nationalen Kongress angeregt. Badino, ein Spezialist für Höhlenklima, war Chairman an der Klimasitzung und hat empfohlen die Windverhältnisse im Bereich der Initialellipse genauer zu studieren.

Zur Situation:

Leider war die Forschung im O92 dieses Jahr sistiert, so dass die Weiterverfolgung nicht angegangen werden konnte. Es ist etwas unsicher, ob die Logger wirklich bald wieder in der Schachtzone platziert werden können.

Zurzeit besitzen wir nur noch die neun Präzisionslogger. Da diese eine Lebensdauer von nur sieben Jahren haben, sollten sie baldmöglichst wieder sinnvoll eingesetzt werden.

Weiteres Vorgehen:

1.) O89

Zur Klärung der Hypothesen bietet sich das O89 an. Diese Höhle liegt in der Nähe vom O92 und ist ähnlich aufgebaut: Ein horizontaler Teil wenig unter der Oberfläche gefolgt von einem Schacht. Wenn auch die Tiefe vom O92 nicht erreicht werden kann, sollten durch ein Klimaprojekt im O89 gewisse Fragen geklärt werden können. Die gute Auflösung der Logger (± 0.2 °C) dürfte auch bei bescheidener Tiefe Information zum Gradienten geben.

2.) O91

Diese Höhle hat keinen oberflächennahen horizontalen Teil und häufig einen Schneekegel im Eingangsschacht. Ein Logger in genügend Entfernung vom Eingangsschacht (-65 m) könnte zeigen, ob auch diese Höhle „zu warm“ ist.

3.) O92 Hades-Ende bis ElySION

Der Weg des Baches im Hades ist zurzeit noch nicht erforscht, da in den letzten Metern vom Hades erst die Initialellipse bekannt ist. Zudem hat es einen - ebenso unerforschten - Wassereintritt unterhalb vom „Balkon. Dieser Teil sollte (endlich) auch bearbeitet werden.

4.) O92 - unterer 8er

Gemäss den hier präsentierten Resultaten sollte ein grosser Teil des Wassers im O92 aus dem Ende vom unteren 8er stammen (β im Plan des Artikels. Dieses Wasser dürfte nicht aus dem Hades stammen, da der untere 8er nicht unter dem Hades verläuft. Deshalb sollte die Engstelle am Ende vom unteren 8er erweitert werden, da dahinter ein wesentlicher Höhlenteil stecken könnte.

5.) Verbindungsellipse

Die Beobachtung, dass der Wind aus der Verbindungsellipse üblicherweise (Sommer und Winter) nach oben weht, ist zurzeit unerklärbar. Mit Räucherkerzen sollte die Luftzirkulation unter der Verbindungsellipse in verschiedenen Wettersituationen untersucht werden. Wenn sich hieraus interessante Befunde ergeben, müsste die Anschaffung oder Miete eines Anemometers in Betracht gezogen werden.

Dank und Ausblick

Ich danke Anita für die Übersetzung des englischen Originals, in welchem mir nur beschränkter Platz zur Verfügung stand. Als Autor wäre es mir schwer gefallen, den Artikel selber getreu zu übersetzen, ohne an vielen Stellen Zusätze anzufügen. In eine ausführliche Neufassung, die den Rahmen einer Info sprengen wird, gehören dann auch die Daten (450'000 Messresultate) und die Erkenntnisse, des oben skizzierten weiteren Vorgehens.