# Altersdaten von Höhlensintern aus dem Raum Mühlbach (Südliche Frankenalb, Bayern)

Stefan Glaser, Max Wisshak & Jan Fietzke

### **Einleitung**

Bei Mühlbach im Altmühltal liegen zwei bedeutende Höhlen, die überwiegend während der vergangenen Jahrzehnte von der Karstgruppe Mühlbach erforscht wurden: der Sommerleitenschacht und die Mühlbachquellhöhle. Eine begehbare Verbindung zwischen den Höhlen wurde bislang nicht gefunden, obwohl eine nachgewiesene Luftzugverbindung besteht. Die Höhlen liegen in unterschiedlichen Höhenniveaus und Gesteinshorizonten und zeigen einen sehr unterschiedlichen Raumcharakter.

Der Sommerleitenschacht ist überwiegend im dickbankigen bis massigen Dolomit des Malm (Frankenalb-Formation, mittleren Formationsnamen nach NIEBUHR & PÜRNER 2014) entwickelt. In seinen höchsten Teilen reicht er bis in die kieseligen Plattenkalke des oberen Malm (Tangrintel-Formation). Teilweise stehen dickbankige Kalke an (Treuchtlingen-Formation). Die mehrere hundert Meter lange und 67 m tiefe Höhle verläuft zu einem großen Teil in Resthohlräumen zwischen großen Verbruchblöcken. die sich überwiegend an den Rändern eines etwa 100 m langen, 70 m breiten und 40 m hohen Bereichs verteilen. Hohlräume im anstehenden Fels finden sich nur in den Randbereichen dieses "Verbruchdoms". Es wurden größere rezente Bewegungen innerhalb des Verbruchs beobachtet, die eine Begehung oder Weiterforschung in einzelnen Höhlenteilen unmöglich machen.

Die Mühlbachquellhöhle ist eine gut 8 km lange aktive Wasserhöhle mit überwiegend horizontalen Gängen, die oft von Bächen durchflossen werden (KARSTGRUPPE MÜHLBACH 2002, GLASER 2005). Der Großteil der Gänge verläuft in den gebankten Kalken und Mergeln des mittleren Malm (Arzberg-Formation). In den tiefsten Teilen sind die gebankten Kalke des unteren Malm (Dietfurt-Formation) aufgeschlossen, manche Schlote erreichen dickbankige Kalke und massige Dolomite des mittleren Malm (Treuchtlingen-Formation und Frankenalb-Formation).

Ob und inwiefern die Höhlen eine gemeinsame Entstehungsgeschichte haben, ist bislang ungeklärt. Beide Höhlen weisen ein umfangreiches Inventar an Speleothemen auf, deren Altersbestimmung mithilfe von radiometrischen Datierungsmethoden ermöglicht, einzelne Ereignisse während des jüngeren Quartärs zeitlich einzuordnen und zu interpretieren.

#### **Material und Methoden**

Nach Inventarisierung und Fotodokumentation des Sinterinventars erfolgte eine gezielte Probennahme mit Fokus auf Erfassung möglichst vieler bereits makroskopisch unterscheidbarer Sintergenerationen. Auf die Beschaffenheit des jeweiligen Probematerials wird im jeweiligen Ergebniskapitel detaillierter Auskunft gegeben. Die Datierung erfolgte mit Hilfe der U/Th Methode im Datierungslabor des GEOMAR in Kiel.

Anschriften der Verfasser: Dr. STEFAN GLASER, Albrecht-Dürer-Str. 29, 82152 Krailling, bglaser@gmx.de, Dr. MAX WISSHAK, Senckenberg am Meer, Abteilung Meeresforschung, Südstrand 40, 26382 Wilhelmshaven, max.wisshak@senckenberg.de, Dr. JAN FIETZKE, GE-OMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Wischhofstr. 1-3, 24148 Kiel, jfietzke@geomar.de.

Nach der Probennahme mit Hammer und Meißel wurden die Proben mit einer Steinsäge weiter formatiert und mittels Ultraschallbad von jeglichen Verunreinigungen gereinigt, um sicherzustellen, dass möglichst nur das Karbonat der Speleotheme in die Datierung einging. Die radiometrischen U/Th Datierungen am GEOMAR erfolgten

mittels der multiple ion counting inductively coupled plasma mass spectrometry (MIC-ICP-MS) Methode, dem Protokoll in FIETZKE et al. (2005) folgend. Für die Korrektur des detritischen <sup>230</sup>Th wurde ein <sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th Verhältnis von 0,6±0,2 angesetzt.

Tab. 1: Messwerte der U/Th-Altersdatierungen. Abkürzungen: SLS = Sommerleitenschacht, MBQH = Mühlbachquellhöhle. Messungen im Jahr 2009 am GEOMAR in Kiel

Probenpunkt	Alter	Min	Max	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>230</sup> Th	<sup>230</sup> Th/	<sup>238</sup> U/	<sup>230</sup> Th <sub>ex</sub> /	<sup>234</sup> U/
							<sup>232</sup> Th	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	<sup>238</sup> U
	[a]	[a]	[a]	[ppm]	[ppb]	[ppt]	[dpm/	[dpm/	[dpm/	[dpm/
Otalaldit OLO Zantonia	C00 CCE	500,000		0.0500	4 4700	00.054	dpm]	dpm]	dpm]	dpm]
Stalaktit SLS, Zentrum	680.665	522.639	n.d.	3,6503	1,4733	60,854	7711,7	7669	1,005	1,0052
0/11/1/2010 5	444.050	004.050	570 505	± 0,0046	± 0,0052	± 0,141	± 32,4	± 29	± 0,004	± 0,0017
Stalaktit SLS, Basis der	441.353	384.958	570.535	0,1567	1,7864	2,613	273,1	271,5	1,004	1,0156
2. Generation Stalaktit SLS, Basis der	± 92.788 425.504	395.433	407 700	± 0,0005	± 0,0060	± 0,010	± 1,4 16391,2	± 1,3 16489	± 0,005 0,994	± 0,0056
	± 36.180	395.433	467.792	5,1181 ± 0,0089	0,9608 ± 0,0027	84,349 ± 0,150	± 55,2	± 55	± 0,003	1,0106 ± 0,0025
3. Generation (Aragonit)		501.38	500.54							
Stalaktit SLS, Top der 3.	529.800	501.38	568.54	4,3432	0,1919	71,989	70025,2	70041,5	0,99976	1,0054
Generation (Aragonit)	± 33.580			± 0,0023	± 0,0005	± 0,061	± 202,6	± 197,1	± 0,00129	± 0,0008
Stalaktit SLS, dunkle	224.108	191.266	271.151	0,2714	199,8541	4,984	4,66	4,20	0,965	1,0852
Lage über dem Top der	± 39.943			$\pm 0,0005$	± 0,7835	± 0,018	± 0,02	$\pm 0.02$	± 0,048	± 0,0040
3. Generation										
Stalaktit SLS, Top der 4.	45.180	44.576	45.792	0,1770	0,7657	1,346	328,2	716	0,458	1,3305
Generation	± 0.608			$\pm 0,0005$	± 0,0029	$\pm 0,007$	± 2,1	± 3	± 0,003	± 0,0059
Stalagmit SLS, Zentrum	441.412	391.505	539.711	0,3194	15,4169	5,286	64,0	64,1	0,989	1,0047
-	± 74.103			$\pm 0,0006$	± 0,0434	± 0,016	± 0,3	± 0,2	$\pm 0,005$	$\pm 0,0039$
Stalagmit SLS, äußere	523.652	444.518	n.d.	0,3543	6,7451	6,012	166,4	162,6	1,020	1,0202
Lage				± 0,0006	± 0,0189	± 0,017	± 0,7	± 0,5	± 0,004	± 0,0038
Zaubermantel MBQH,	106.017	104.164	107.918	0,1944	12,7825	3,321	48,5	47,1	1,018	1,5606
älteste Lage	± 1.877			± 0,0006	± 0,0385	± 0,011	± 0,2	± 0,2	± 0,006	$\pm 0,0073$
Zauberberg MBQH,	67.504	47.052	92.366	0,2807	675,0420	5,144	1,42	1,287	0,639	1,3540
Basis	± 22.657			± 0,0005	± 3,0607	± 0,023	± 0,01	± 0,006	± 0,156	± 0,0045
Calcit-Aggregate SLS,	28.754	28.220	29.293	1,1951	80,1002	6,656	15,5	46,2	0,323	1,3798
scharfkantig rhombo-	± 0.537			± 0,0017	± 0,3169	± 0,019	± 0,1	± 0,2	± 0,005	± 0,0029
edrisch										
Calcit-Aggregate SLS,	27.529	26.964	28.100	1,1041	74,9044	5,984	14,9	45,6	0,314	1,3930
runde Formen	± 0.568			± 0,0020	± 0,3994	± 0,024	± 0,1	± 0,3	± 0,005	± 0,0037
Lagenförmiger Bodens-	3.200	0.029	6.479	0,0657	67,3244	0,289	0,802	3,020	0,067	2,3156
inter MBQH, unterste	± 3.225			± 0,0002	± 0,2114	± 0,006	± 0,016	± 0,012	± 0,066	± 0,0107
Lage										
Lagenförmiger Bodens-	0.147	-3.561	4.005	0,0827	95,2265	0,310	0,608	2,688	0,003	2,1549
inter MBQH, 4älteste	± 3.783			± 0,0002	± 0,2870	± 0,005	± 0,011	± 0,011	± 0,075	± 0,0116
Lage										
Lagenförmiger Bodens-	0.606	-1.463	2.731	0,0789	50,8963	0,179	0,658	4,800	0,012	2,1931
inter MBQH, 814	± 2.097			± 0,0002	± 0,1381	$\pm 0,005$	± 0,018	± 0,019	± 0,042	± 0,0114
älteste Lage (teilweise										
Schichtlücke!)										

### Stalaktit aus dem Sommerleitenschacht

Im stark versturzgeprägten Sommerleitenschacht ist es schwierig, geeignetes Material für eine Altersbestimmung zu erhalten. In einem Fall wurde daher auf einen am Boden liegenden Stalaktiten zurückgegriffen. Die Probenahmestelle liegt in einer Kammer am Ostrand des Versturzbereichs unter einer anstehenden Dolomitwand, die durchgehend einen dünnen, leicht knolligen Sinterüberzug sowie zahlreiche kleine Stalaktiten aufweist – nur an der Abbruchstelle ei-

ner ca. 60x40 cm großen Sinterscholle tritt der anstehende Dolomit hervor (Abb. 1). Die auf natürliche Weise von der Wand abgebrochene Sinterscholle liegt gut 1 m senkrecht unter der Abbruchstelle auf Lehmboden und ist stellenweise von augenscheinlich jüngerem Sinter überzogen. Einer der ehemals an der Scholle hängenden Stalaktiten war wohl beim Sturz auf den Lehmboden abgebrochen und lag nun lose aber mit eindeutigem Zusammenhang und in nur 2 cm Abstand zur passenden Bruchfläche neben der Scholle (Abb. 2). Das entnommene Stück ist die Spitze eines ca.

16 cm langen, ovalen Stalaktiten der an der Bruchfläche einen Querschnitt von etwa 6x8 cm hat. An der Bruchfläche ist etwas neben der Mitte ein Bereich von etwa 2 cm Durchmesser mit schmalen konzentrischen Anwachsstreifen zu erkennen. Die Mitte dieses Bereichs bildet ein dünner hohler Kanal – das initiale Sinterröhrchen. Rund um den konzentrisch geschichteten Bereich liegt eine ca. 1-4 cm dicke Umhüllung aus weißlichem, nicht offensichtlich geschichtetem Sinter. Die augenscheinlich gleiche Art von Sinter überzieht die anstehende Wand der Kammer vollständig in einer etwa 1-3 cm starken, knolligen Schicht (erkennbar im Bereich der Bruchfläche um die Scholle, an der der Stalaktit ehemals hing) und ist wohl unter Wasserbedeckung gewachsen. Um den weißlichen Bereich herum liegt noch ein weiterer schmaler Bereich mit konzentrischen Anwachsstreifen, der von außen her bräunlich verfärbt ist. An einer Seite setzt über diesem noch ein heller Sinter an, der vermutlich auf den bereits am Boden liegenden Stalaktiten aufgewachsen ist (Abb. 3 und 4).



Abb. 1: Probenahmestelle mit Abbruchstelle der Sinterscholle und deren Lage auf Lehm (Foto: RALPH SCHOBERTH, KGM e.V.)



Abb. 2: Situation vor Entnahme des Stalaktiten (Foto: RALPH SCHOBERTH, KGM e.V.)



Abb. 3 und 4: Bruchfläche und Längsansicht der Probe (Fotos: DIETER GEBELEIN, KGM e.V.)

Im Labor bestätigte sich die Vermutung, dass es sich bei der hellen, ungebänderten und grob strukturierten Sinterlage um Aragonit handelt (Nachweis durch Feigl-Lösung), während die deutlich gebänderten inneren und äußeren Sinterlagen aus Calcit aufgebaut sind. Aus den verschiedenen Sinterlagen wurden insgesamt 6 Proben für die Altersdatierung entnommen.

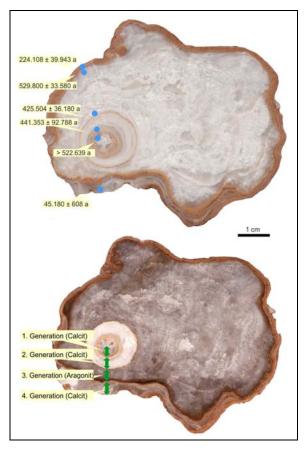


Abb. 5: Schnittfläche des Stalaktiten aus dem Sommerleitenschacht: oben Schnitt mit Probennahmestellen; unten nach Färbung mit Feigl-Lösung zur Kenntlichmachung des Aragonits

Die innerste beprobte Sinterlage erbrachte überraschenderweise ein sehr hohes Alter im Grenzbereich der Methodik (Tab. 1). Obwohl bei der Interpretation der Daten Vorsicht angebracht ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Wachstum des kleinen Stalaktiten vor über 500.000 Jahren begonnen hat. Auch die nach außen hin folgenden drei Sinterlagen bis zum Ende der Aragonitbildung erbrachten sehr hohe Alter in der Größenordnung 350.000-560.000 Jahre. Allerdings zeigt die äußere der Lagen ein älteres Datum als die inneren, was darauf hinweist, dass hier wohl zeitweise kein geschlossenes System

vorlag, was eine Grundvoraussetzung für eine exakte Altersbestimmung wäre. Die bräunliche Calcitsintergeneration über dem Aragonit weist ein Alter in der Größenordnung über 200.000 Jahre auf. Die jüngste Sinterlage, die nur einseitig vorhanden ist, wuchs relativ sicher vor rund 45.000 Jahren.

Schlussfolgerungen: Vor circa 500.000 Jahren oder noch früher (evtl. jenseits der Nachweisalter der U/Th Methode) existierte auf (heute) ca. 430 m ü. NN bereits eine von Luft erfüllte Kammer, in der das Wachstum des Stalaktiten beginnen konnte. Später - vermutlich vor ca. 400.000-500.000 Jahren - erfüllte ein stehendes Gewässer mit erheblicher Karbonat- und Magnesiumübersättigung den Raum, was zur Bildung eines Aragonitüberzuges der Wände und Sinterbildungen führte. Vor gut 200.000 Jahren setzte erneut Sinterbildung im nun wieder lufterfüllten Raum ein. In der Folgezeit, spätestens vor 45.000 Jahren, brach die Scholle von der Wand ab und wurde am Boden liegend von der jüngsten nachgewiesenen Sinterkruste überzogen.

### Stalagmit aus dem Sommerleitenschacht

Auch bei der zweiten Probenahmestelle im Sommerleitenschacht handelt es sich nicht um Material vom originalen Entstehungsort. Am Endpunkt eines Schlufes im Versturz liegen zwischen Versturzblöcken aus Dolomitgestein verkeilt drei große Bruchstücke eines großen Stalagmiten, die darauf schließen lassen, dass dieser ursprünglich mindestens drei Meter hoch war. Die Unterseite des größten Bruchstücks ist gut zugänglich und weist einen Querschnitt von etwa 80x60 cm auf (Abb. 6 und 7). Entnommen wurden kleine Proben der innersten und der äußersten zugänglichen Lagen.

Beide Proben ergaben sehr hohe Alter in der Größenordnung 400.000–500.000 Jahre. Auch in diesem Fall sind die Daten mit großen Unsicherheiten verbunden und wieder zeigt die äußerste Lage ein scheinbar höheres Alter als die innerste. Offenbar liegen auch hier die Voraussetzungen für eine exakte Altersbestimmung nicht vor.



Abb. 6: Probenahmesituation im Versturzschluf in Sommerleitenschacht



Abb. 7: Unterseite des größten Stalagmiten-Bruchstücks mit den Probennahmestellen

Schlussfolgerungen: Der Zeitraum des Wachstums vor ca. 400.000-500.000 Jahren oder älter (evtl. jenseits der Nachweisalter der U/Th Methode) deckt sich etwa mit jenem des Aragonitwachstums im oben beschriebenen Stalaktiten. Allerdings handelt es sich hier um Calcitsinter, der offensichtlich in einem lufterfüllten Raum gebildet wurde. Ein überlagernder Raum, der groß genug ist um ein Stalagmitenwachstum von 3 m Höhe zu erlauben, ist entweder der fortschreitenden Inkasion zum Opfer gefallen oder bislang unentdeckt. Der Probenahmeort liegt auf ca. 445 ü. NN, der Bil-Sinters vor dem Verdungsort des sturzereignis sicher noch höher. Der Einstau, der den Stalaktiten betroffen hatte (siehe oben), reichte demnach nicht bis in diese Höhe, falls sich die Bildungszeiträume tatsächlich überschnitten haben sollten.

### "Zauberberg" und "Zaubermantel" in der Mühlbachquellhöhle

"Zauberberg" und "Zaubermantel" sind zwei eng benachbarte, große Sinterbildungen im "Nordostgang" der Mühlbachquellhöhle. Der "Zauberberg" ist eine der größten Sinterbildungen der Höhle: Ein Sinterdom von etwa 5 m Höhe und einer Grundfläche von über 20 m² (Abb. 8). Die Basis des Sinterdoms ist durch den Höhlenbach untergraben worden und daher sehr gut zugänglich. Von unten sieht man an der Basis eingesinterte Gerölle mit schwarzen Eisen-Mangan-Hydroxidkrusten sowie Verbruchblöcke.

Beim "Zaubermantel" handelt es sich um eine etwa 0,8 m dicke, 5,5 m breite und etwa 3,5 m hohe Wandsinterbildung etwa 12 m bachaufwärts des "Zauberbergs". Auch hier hat sich der Bach etwa 1,4 m tief unter die Basis der Sinterbildung eingeschnitten, so dass eingesinterte Gerölle und Versturzbruchstücke sichtbar sind. Entnommen wurden bei beiden Sinterbildungen kleine Stücke der – soweit erkennbar – ältesten Sinterlagen (Abb. 9 und 10).

Die Probe vom "Zaubermantel" ergab ein relativ sicheres Alter von knapp über 100.000 Jahren. Für den "Zauberberg" ergab sich ein Alter mit großer Unsicherheit von vermutlich über 60.000 Jahren.

Schlussfolgerungen: Vor gut 100.000 Jahren, zum Ende des Riß-Würm-Interglazials, war der "Nordostgang" weitgehend im heutigen Zustand entwickelt. Der Höhlenbach führte auch bereits zahlreiche Gerölle mit schwarzem Biofilmüberzug. Der Bach hat sich seitdem rund 2 m tief eingeschnitten und dabei die beiden Sinterformationen untergraben. Dass der Sinter im Bereich des Bachbetts auf Geröllen zu wachsen beginnen konnte, weist auf eine relativ geringe Schüttung des Baches hin, die nicht wesentlich über der heutigen gelegen haben kann (durchschnittlich etwa 30 l/s).

Eine weiter interessante Sedimentabfolge findet sich etwa 10 m bachabwärts des Zauberbergs: Ein etwa 50 cm dicker, hori-



Abb. 8: Der "Zauberberg" (Foto: GERHARD WINTERSTEIN, KGM e.V.)



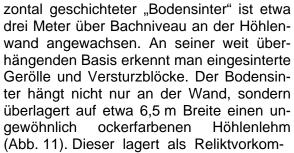




Abb. 9 (links): Probenahmestelle an der Basis des "Zauberbergs"

Abb. 10 (rechts): Probenahmestelle an der Basis des "Zaubermantels"

men trichterförmig und bis über 1,2 m mächtig in einer Nische. Das tonige bis schluffige Material weist eine Schichtung auf, die im Zentrum der Nische dicker, zu den Rändern hin dünner ist. Bei den "Schichtflächen" im Lehm handelt es sich eventuell um dünne Sinterlagen, die teilweise durch schwarze Biofilme dunkel erscheinen (Abb. 12). Bei dem ockerfarbenen

Lehm handelt es sich offensichtlich um ein im weitgehend stagnierenden Wasser gebildetes Residuum der Kalklösung, dem Komponenten ab Sandkorngröße fast vollständig fehlen (Ausnahme: aus der Wand herausgelöste Stielglieder von Crinoiden).



Abb. 11: Ehemaliger Bodensinter mit darunter eingesinterten Blöcken und Geröllen über ockerfarbenem Höhlenlehm



Abb. 12: Ockerfarbener Lehm mit "Schichtflächen" (mit dunklem Biofilm überzogen) und teilweise überdeckt durch rezenten, bräunlichen Lehm

Unter der Voraussetzung, dass der ehemalige Bodensinter etwa zeitgleich mit dem Zaubermantel zu wachsen begonnen hat, lässt sich aufgrund der an dieser Stelle vorhandenen Sedimentabfolge (Residuallehm, Versturz und Schotter, Bodensinter) eine Ereignisabfolge für diesen Höhlenteil aufstellen: Zunächst muss ein Höhlengang vorhanden gewesen sein, dessen Sohle etwas über der heutigen lag. Später füllte sich der Hohlraum über "lange Zeit" mehrfach mit nahezu stagnierendem Wasser, in dem

sich die ockerfarbenen Feinsedimente ablagern konnten. Möglicherweise trocknete der Bereich zeitweise aus und es entstanden dünne Sinterlagen. Später endete diese ruhige, energiearme Sedimentation abrupt: Es kam zu einem Versturzereignis, das kantige Kalkblöcke zurückließ (bis 60 cm Kantenlänge) sowie zu einer – möglicherweise nur einmaligen - massiven Durchströmung der Höhle (zahlreiche Gerölle bis über 10 cm Größe wurden transportiert, was im heutigen Bach selbst bei extremen Hochwassern höchstens in Einzelfällen passieren dürfte). Noch später, vor ca. 100.000 Jahren, war die Durchströmung des Bereichs höchstens gering, so dass enorme Sintergebilde auf den Geröllen zu wachsen beginnen konnten. Und schließlich schnitt sich der Höhlenbach bis heute 1,5 bis 3 m tief in die älteren Sedimente oder die Felssohle ein (möglicherweise im Zusammenhang mit einem stärkeren Gefälle im Unterlauf).

### Feinkristalline Calcit-Aggregate aus dem Sommerleitenschacht

Im östlichen Versturzbereich des Sommerleitenschachts, unweit der Probenahmestelle des oben beschriebenen Stalaktits, finden sich an mehreren Stellen Ansammlungen von feinkristallinen Calcit-Aggregaten und Plättchen (Abb. 13 und 14). Die vor Ort aufgestellte Hypothese, dass es sich um kryogene Calcite handeln könnte, wird durch die charakteristischen Kristallformen und die Altersbestimmungen gestützt: Die beiden Alter liegen mit 27.000 bis 29.000 Jahren exakt im Zeitraum des Maximums der letzten Eiszeit. Eines der Alter stimmt überraschend genau mit jenem der kryogenen Sinter aus der Zoolithenhöhle überein (RICHTER et al. 2014). Ihre Entstehung kann darauf zurückgeführt werden, dass sich während der Kaltzeiten im Periglazialbereich tiefreichender Permafrost ausbildet. In Höhlen können sich dann Eisseen bilden, deren Restwasser zunehmend übersättigt ist, weshalb Calcit ausfällt. Die so entstandenen Krvolithe sammeln sich beim Abtauen des Eises in Tropflöchern und bleiben letztlich als kleine Häufchen am Boden des Raumes zurück.





Abb. 13 und 14: Fundstellen der feinkristallinen Kalzitaggregate

Schlussfolgerungen: Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit herrschte im Altmühltal tiefreichender Permafrost. Dieser Permafrost, oder eisiger Höhlenwind, führte im Sommerleitenschacht, 55 m unter der Geländeoberfläche zur Ausbildung eines Eissees, auf dessen Oberfläche es zur Bildung kryogener Calcite kam.

# Knochenfragment aus der Mühlbachquellhöhle

Der "Augentropfenschlot" zieht im Nordgang der Mühlbachquellhöhle 20 m senkrecht vom Bachbett in die Höhe. An seinem oberen Ende erreicht man durch einen Schluf einen Horizontalgang. Im Bereich des Durchstiegs ist von dem Gang nur ein niedriger Resthohlraum in Deckennähe erhalten. Die unteren 1,4 m des Gangs sind mit Sediment gefüllt, das nur im Bereich des Durchstiegs vollständig ausgeräumt ist und zur Seite hin in senkrechten Anschnitten ansteht (Abb. 15).

Die oberen 35 cm des Sediments weisen mit undeutlichen Schichtflächen Anzeichen einer mehrphasigen Bildung oder Umlagerung auf. Bei dem darunter folgenden Sediment handelt es sich augenscheinlich um eine Fließerde. Deren obere Hälfte besteht überwiegend aus lehmigem Feinmaterial, während in der unteren Hälfte zunehmend gröbere Komponenten bis etwa 10 cm Kantenlänge eingeschalten sind.

Nahe der Felssohle des Gangs fanden sich im untersten Teil des Sediments eingeschlossene Knochenfragmente (Abb. 16 und 17). Von den gereinigten Bruchstücken ließen sich zwei zusammensetzen. Es handelt sich um Teilstücke eines Wirbels (evtl. Hals- oder Lendenwirbel) eines Pflanzenfressers Größengruppe der hirsch/Rind/Pferd (freundliche Mitteilung Dr. BRIGITTE HILPERT, Nürnberg). Eine nähere Bestimmung der Art war nicht möglich. Auch eine Altersbestimmung scheiterte, da kein extrahierbares Kollagen mehr vorhanden war, was möglicherweise auf eine langandauernde Durchfeuchtung des Knochens zurückzuführen ist (freundliche Mitteilung Dr. JENS FOHLMEISTER, Heidelberg).



Abb. 15: Sedimentprofil im Durchstieg oberhalb des "Augentropfenschlots" in der Mühlbachquellhöhle



Abb. 16: Fundsituation der im Sediment eingelagerten Knochenfragmente



Abb. 17: Vom Sediment gereinigte Knochenfragmente (Foto: Dr. BRIGITTE HILPERT, Länge des Maßstabs: 5 cm)

Schlussfolgerungen: Der Probenahmeort liegt 75 m unter der Geländeoberfläche; das 50 m entfernte Ende des leicht ansteigenden Gangs noch immer unter 50 m Gesteinsüberdeckung. Der Knochenfund zeigt eindrucksvoll, wie tief im Untergrund eiszeitliche Fließerden zu einer weitgehenden Verfüllung der vorher vorhandenen Hohlräume geführt haben. Die Vermutung liegt nahe, dass es sich um eine Fließerde aus der letzten Kaltzeit handelt, da jedoch keine Datierung vorliegt, könnte es sich auch um

Ablagerungen aus einer älteren Kaltzeit handeln. Sicher ist, dass bei Entstehung periglaziale Verhältnisse geherrscht haben müssen.

## Stalagmit auf Kiesbank der Mühlbachquellhöhle

Erste Altersdatierungen aus der Mühlbachquellhöhle wurden in NORDHOFF (2005) publiziert und betreffen einen ca. 30 cm hohen Stalagmiten mit ca. 15 cm Durchmesser. Dieser war am Rand des unterirdischen Flussbetts auf einer Kiesbank aufgewachsen (Abb. 18). Die Basis des Stalagmiten wurde auf 11.278±282 a datiert, das Top auf 2.512±139 a (<sup>234</sup>U/<sup>230</sup>Th TIMS Daten). Allerdings ist hierbei unklar, ob das Alter auf die <sup>232</sup>Th-Gehalte korrigiert wurde. Falls dies nicht der Fall ist, wäre die Basis etwa 10.800 Jahre alt.



Abb. 18: Standort des von NORDHOFF (2005) untersuchten Stalagmiten (Foto: KGM e.V.)

Der Standort des Stalagmiten liegt nahe einer Gangverzweigung und eines Gefälleknicks des Hauptbachs. Oberhalb dieser Stelle fließt der Höhlenbach weitgehend ruhig mit geringem Gefälle, während sich unterhalb eine Serie kleinerer und größerer Kaskaden anschließt. Direkt nordwestlich

des Standorts zweigt der "Jenseitsgang" ab, der einen höher gelegenen ehemaligen Abfluss darstellt (Nachweis der Fließrichtung durch Fließfacetten), dessen an sich großer Gangquerschnitt bis auf einen Resthohlraum unter der Decke mit Sedimenten verfüllt ist (Abb. 19). Da auch die Felssohle des "Jenseitsgangs" höher liegt als die Probenahmestelle (Nachweis durch zwei Bohrungen; TRAPPE 2011), konnte der Stalagmit erst zu wachsen beginnen, nachdem der heutige steilere Abfluss aktiv und bis auf das heutige Niveau eingetieft war.

Schlussfolgerungen: Zum Beginn des Holozäns hatte die Mühlbachquellhöhle zumindest in diesem Bereich bereits weit-

gehend ihre heutige Gestalt angenommen: Der Abfluss erfolgte bereits auf dem Weg, aktuellen steilen während "Jenseitsgang" nur noch bei seltenen Extremhochwassern geflutet werden konnte. Die schwach konglomerierte Kiesbank aus Geröllen mit einem schwarzen Überzug aus Eisen-Mangan-Hydroxiden und Biofilm, auf der der Stalagmit gewachsen war, liegt mindestens seit dem frühen Holozän stabil an ihrem Ort. Dass das Wachstum des Stalagmiten vor 2.500 Jahren endete, kann durch eine Verlagerung der Tropfstelle begründet sein.

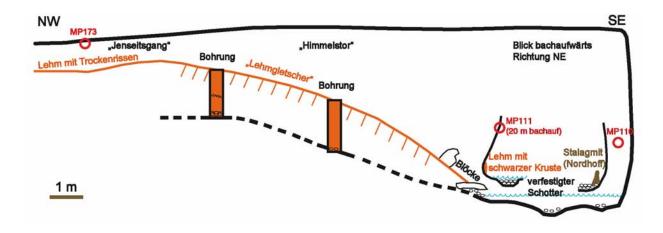


Abb. 19: Schnitt durch die Abzweigung des "Jenseitsgang" vom Hauptgang, wenige Meter unterhalb der Probenahmestelle des von NORDHOFF (2005) bearbeiteten Stalagmiten

# Lagenförmiger Bodensinter aus der Mühlbachquellhöhle

Der künstliche Stollenzugang zur Mühlbachquellhöhle wurde im Bereich einer markanten Mulde im Hang angelegt, die während großer Hochwasserereignisse als Hochwasserüberlauf fungiert. Zuletzt war dieser "Hungerbrunnen" 1909 aktiv, zuvor auch 1809 (HARTMANN 1914). Zu älteren Ereignissen liegen keine Überlieferungen vor. Die extremen Hochwasserereignisse in Mühlbach stehen in Zusammenhang mit dem Rückstau von Wassermassen in Poljen auf der Hochfläche und dem zeitweiligen Verschluss der Ponordolinen, beispielsweise durch Eisbildungen in den Wintermona-

ten. Die Hochwasser erreichen den "Hungerbrunnen" von der Höhle her durch einen engen, etwa 50 m langen Horizontalgang, der etwa 5 m hoch über dem normalen Wasserspiegel des Baches ansetzt. In dem Gang findet sich ein etwa 50 cm hohes Sedimentgebilde, das aus einer vielfachen Wechsellagerung von Lehm und dünnen Sinterlagen besteht und auf dem kleine Sintersäulen aufsitzen (Abb. 20).

Als Entstehungsursache des Sediments wird angenommen, dass sich die Lehmlagen während der relativ kurzen Zeitspannen der abklingenden extremen Hochwasser ablagern, während die Sinterlagen in den langen Zeiten dazwischen

entstehen. Über eine Datierung der Sinterlagen sollte festgestellt werden, wie viele extreme Hochwasser sich in einem bestimmten Zeitraum mindestens ereignet haben. Es wurden drei Proben entnommen: eine aus der tiefsten erkennbaren Sinterlage, zwei von relativ dicken Sinterlagen aus dem mittleren Teil des Sedimentstapels.

Alle drei Datierungen ergaben sehr junge Werte mit großem Unsicherheitsbereich (Tab. 1). Relativ sicher ist, dass die älteste Sinterlage jünger als 6.500 Jahre ist.



Abb. 20: Sedimentgebilde im Eingangsbereich der Mühlbachquellhöhle mit Kennzeichnung der beprobten Lagen: 1 = älteste Sinterlage, 2 = viertälteste Sinterlage, 3 = acht- bis vierzehnt-älteste Sinterlage (an einer Erosionsdiskordanz gelegen)

Eine zusätzliche Datierung der viertältesten Sinterlage, die am Institut für Umweltphysik im Heidelberg erfolgte, ergab ein Alter von 4,08±0,66 ka und bestätigt damit generell das Alter dieser Lage. Durch spezielle chemische Aufbereitung wurde der Detritusanteil minimiert und somit auch der Altersfehler. Der Messfehler ist untergeordnet dem Fehler, der durch die detritische Korrektur bei diesen Proben eingebracht wird. Für weitere Untersuchungen, die zum Ziel haben die Alters-Auflösung des Lagen-Pakets zu erhöhen, sollte versucht werden

den Detritus-Anteil im Karbonat zu minimieren.

Schlussfolgerungen: Die Sinter/Sediment Wechsellagerung begann erst im jüngeren Holozän, vor höchstens 6.500 Jahren, zu wachsen. Da der Sedimentstapel mindestens 18 Sinterlagen enthält, ist davon auszugehen, dass es in höchstens 6.500 Jahren mindestens 17 bedeutende Hochwasserereignisse gegeben hat. Wie die Diskordanzen innerhalb des Sediments sowie das Fehlen von Teilen des Sediments auf der

Südseite zeigen, können aber durch dynamisch abfließende Hochwasser zwischenzeitlich abgelagerte Sedimente immer wieder abgetragen worden sein. Bedeutende Hochwasser, die den Wasserspiegel im Eingangsbereich über 5 m hoch ansteigen lassen, haben sich demnach häufiger als durchschnittlich alle 400 Jahre ereignet. Unter Einbeziehung der Heidelberger Daten ergeben sich durchschnittlich etwa 300 Jahre zwischen den Ereignissen.

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Sinterdatierungen in der Mühlbachquellhöhle und dem Sommerleitenschacht belegen sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen von Untersuchungen mit radiometrischen Datierungsmethoden: Für die meisten Probenpunkte
konnten mithilfe der Daten Ereignisse in der
Höhlengenese zeitlich festgelegt bzw. eingeengt werden. Bei einigen Proben ist nicht
sichergestellt, dass keine Systemöffnung
erfolgte, die zu Verschiebungen in den Uran
und Thorium Konzentrationen führte und
somit Fehler in der Altersbestimmung hervorrief. Diese Daten sind daher mit großer
Unsicherheit behaftet und können nur eingeschränkt interpretiert werden.

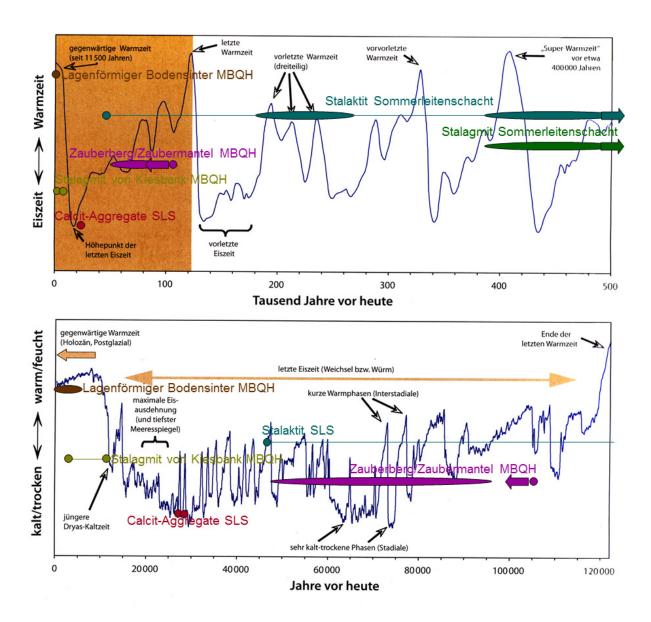


Abb. 21: Zusammenstellung der Altersdaten aus den Höhlen mit Klimakurven (nach KEMPE & ROSENDAHL 2008)

Die ältesten ermittelten Alter liegen am Rand der Anwendbarkeit der U/Th Methodik. Da die Höhlen älter sind als die Sinterbildungen, ist die über 500.000 Jahre hinausreichende Höhlenentwicklung nicht absolut datierbar. Eine relative zeitliche Einordnung kann nur über die relative räumliche Lage und Abfolge von Raumformen und Sedimentinventar erfolgen. Eine Zusammenfassung der zeitlichen Einordnung einzelner Ereignisse in den beiden Höhlen gibt Tabelle 2. Eine Zuordnung der jüngeren Datierungen zu Klimadaten ist in Abb. 21 dargestellt.

Ein interessanter Nebenaspekt der Untersuchungen ist, dass im Sommerleitenschacht nennenswerte Mengen an Aragonitsinter vorhanden sind. Obwohl die Datierungen große Unsicherheiten aufweisen, ist doch davon auszugehen, dass dieser im Quartär entstanden ist und nicht unter tropisch-warmen Bedingungen im Tertiär, wie dies z.B. für die großen Vorkommen am Wolfstein postuliert wurde (TIETZ & GÖTZ 2014). Vermutlich hatte das stehende Gewässer, in dem der Aragonit entstand, ein besonders hohes Mg/Ca-Verhältnis, beispielsweise weil bereits im Zulaufbereich des Sickerwassers Calcitsinter ausgefallen war. Möglicherweise waren die Temperaturen in der Höhle höher als heute, was während der Warmzeiten im Pleistozän durchaus möglich ist. Aus Höhlen der Frankenalb wurden von RIECHELMANN et al. (2014) auch rezente Aragonitbildungen beschrieben, wobei die Lage der Höhlen in Dolomitgestein (die auch beim Sommerleitenschacht gegeben ist) sowie geringe Tropfraten als wichtige Kriterien festgestellt wurden.

Tab. 2: Zeitliche Einordnung einzelner Ereignisse in den beiden Höhlen

Zeitraum [a]	Allgemeines	Sommerleitenschacht	Mühlbachquellhöhle
>500.000	Ältere Kalt- und Warmzei- ten, zunehmende Eintie- fung des Altmühl-	Höhle ist vorhanden, Be- ginn der Sinterbildung in luftgefüllter Höhle	Zumindest einzelne Höhlenteile sind vorhanden.
	Donautals		Die Höhle ist zeitweise mit
500.000- 110.000	Kalt- und Warmzeiten im mehrfachen Wechsel; ma- ximale Eintiefung des Alt- mühl-Donautals	Fortsetzung des Sinter- wachstums in mehreren Phasen, teils als Aragonit unter Wasserbedeckung	weitgehend stagnierendem Wasser gefüllt, Ockerlehm la- gert sich ab.
		?Versturzereignis?	Es folgte ein Ereignis mit Versturz und starke Durchströmung.
110.000- 30.000	Beginn der letzten Kaltzeit mit wechselndem, sich ab- kühlendem Klima; Donau verlässt das Altmühltal	?Versturzereignis?  Zeitweise Fortsetzung des Sinterwachstums	Beginn der Sinterbildung über Bachbett mit großen Geröllen mit schwarzem Überzug
30.000-	Höhepunkt und Ende der	Zeitweise Plombierung	Fließerde mit Knochen-
12.000	letzten Eiszeit	durch Eis bis 55 m unter der heutigen Geländeober- fläche	fragment dringt weit in den Untergrund vor (?)
12.000-0	Aktuelle Warmzeit	Keine Daten	Unterer Höhlenteil hat weitgehend heutige Form;
		Versturz rezent weiter in Bewegung	Sinterwachstum im Zugangsteil von mindestens 17 Hochwasserereignissen unterbrochen

Überraschend ist, dass Permafrost die Höhlen während der letzten Eiszeit bis in große Tiefen beeinflusste. Größere Eisvorkommen unter über 50 m Überdeckung sind für die Südliche Frankenalb eine wichtige Erkenntnis. Mindestens ebenso wichtig ist der Nachweis, dass kaltzeitliche Fließerden nahezu "beliebig weit" in die Höhlen vordringen konnten. Wo sie auftraten, wurden Höhlen bis auf Resthohlräume verfüllt. Nur aktive Gerinne konnten die Fließerden teilweise wieder ausräumen, wie in der Mühlbachquellhöhle. Die großen Gerölle im Bachbett sind zum großen Teil Überreste dieses Vorgangs: Während das Feinmaterial abtransportiert wurde, blieben die groben Kieskomponenten zurück. Sie bestehen fast ausschließlich aus Hornsteinen und kieseligen Plattenkalken, wie sie im Höhlen-Muttergestein nicht vorkommen, aber typische Verwitterungsrelikte auf der Hochfläche sind.

#### Dank

Die Entstehung dieser Arbeit ist vor allem der Neugier und dem Fleiß der Karstgruppe Mühlbach e.V. zu verdanken, die die Probennahmen angeregt und mit durchgeführt hat, die Messungen finanzierte und mit zahllosen Diskussionen zum Entstehen beitrug. Prof. Dr. CHRISTOPH SPÖTL von der Innsbruck Quarternary Research Group gab wertvolle Hinweise zu den Messwerten. Die weitestmögliche Bestimmung des Knochenfragments übernahm Dr. **BRIGITTE** HILPERT (Nürnberg). Prof. Dr. NORBERT FRANK vom Institut für Umweltphysik in Heidelberg danken wir für die Kooperation bei der weiterer Höhlensinter. Datierung ANDREA SCHRÖDER-RITZRAU (IUP Heidelberg) organisierte diese Arbeiten und gab zahlreiche wertvolle Anregungen. Dr. JENS FOHLMEISTER (IUP Heidelberg) versuchte die Altersdatierung des Knochenfragments.

#### **Schriftenverzeichnis**

- FIETZKE, J., LIEBETRAU, V., EISENHAUER, A. & DULLO, C. (2005): Determination of uranium isotope ratios by multi-static MIC-ICP-MS: method and implementation for precise U- and Th-series isotope measurements. J. Anal. At. Spectrom.: **20**, 395-401.
- GLASER, S. (2005): Geologische und hydrogeologische Erkenntnisse aus der Mühlbachquellhöhle (Südliche Frankenalb, Bayern). Geol. Bl. NO-Bayern, **55**: 1-29; Erlangen.
- HARTMANN, O. (1914): Der Aufbau und Verlauf der Tauflut vom Februar 1909 im Bayer. Donaugebiet. Abh. d. Kgl. Bayer. Hydrotechnischen Bureaus: 31 S.; München.
- KARSTGRUPPE MÜHLBACH [Hrsg.] (2002): Die Mühlbachquellhöhle ein neuentdecktes Naturwunder im Altmühltal. Broschüre: 23 S.; Erlangen.
- KEMPE, S. & ROSENDAHL, W. [Hrsg.] (2008): Höhlen. 168 S.; Darmstadt.
- NIEBUHR, B. & PÜRNER, T. (2014): Plattenkalk und Frankendolomit Lithostratigraphie der Weißjura-Gruppe der Frankenalb (außeralpiner Oberjura, Bayern). Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., **83**: 5-71; Stuttgart.
- NORDHOFF, P. (2005): Stable isotope investigations on speleothems from different cave systems in Germany. Diss. Univ. Göttingen, 135 S.
- RICHTER, D.K., HARDER, M., NIEDERMAYR, A. SCHOLZ, D. (2014): Zopfsinter in der Zoolithenhöhle: Erstfund kryogener Calcite in der Fränkischen Alb. Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **60:** 36-41; München.
- RIECHELMANN, S., SCHRÖDER-RITZRAU, A., WASSENBURG, J.A., RICHTER, D.K., RIECHELMANN, D.F.C., TERENTE, M., CONSTANTIN, S., MANGINI, A. & IMMENHAUSER, A. (2014): Physicochemical characteristics of drip waters: Influence on mineralogy and crystal morphology of recent cave carbonate precipitates. Geochimica et Cosmochimica Acta, 145: 13-29.
- TRAPPE, M. (2011): Sedimentpetrographie, Gliederung und Genese von Karstsedimenten, dargestellt am Beispiel der Südlichen Frankenalb. Relief, Boden, Paläoklima, 25: 195 S.; Stuttgart.
- TIETZ, G. & GÖTZ, H.-J. (2014): Die Kristalle der verlorenen Höhle. Das sensationelle Aragonitvorkommen im Burggraben der Ruine Wolfstein bei Neumarkt in der Oberpfalz. Mitt. Abt. f. Karst- u. Höhlenk. Naturhist. Ges. Nürnberg, 45: 47 S.; Nürnberg.