Zur Speläogenese der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle

ZUSAMMENFASSUNG

Die Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle als einzige touristisch erschlossene Eishöhle Westösterreichs weist ein interessantes Formeninventar auf, das Deckenkarren, -zapfen und -kanäle umfasst. Im Verein mit weit verbreiteten Resten dunkelroter bis rotbrauner, tonreicher, karbonatarmer Silte sprechen diese Strukturen für eine ehemals ausgedehnte Verfüllung der Höhlenräume durch Feinsedimente und eine damit zusammenhängende paragenetische Überprägung unter phreatischen Bedingungen. Die spätere weitreichende Erosion dieser Sedimente muss vor mehr als 700.000 Jahren stattgefunden haben, wie Datierungen an Tropfsteinen belegen, welche in diesen freigeräumten Höhlenbereichen wuchsen. Somit müssen die Sedimentverfüllung und die Paragenese noch deutlich älter sein und dürften vermutlich im ausgehenden Miozän oder Pliozän stattgefunden haben.

Diese Studie zeigt, dass Paragenese in Höhlen der westlichen Kalkalpen lokal bedeutend ist und dass mit moderner Uran-Thorium-Analytik dokumentiert werden kann, dass diese Höhlenbildungsprozesse älter als 700.000 Jahre sind.

ABSTRACT

Speleogenesis of the Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle

This cave, the only ice cave in western Austria that is open to tourists, has an interesting inventory of morphologies that includes ceiling half tubes, pendants and ceiling channels. Together with widespread remains of dark red to reddish brown, clay-rich, carbonate-poor silts, these structures indicate a former extensive filling of the cave by fine sediments and a related paragenetic overprinting under phreatic conditions. The later extensive erosion of these sediments must have taken place more than 700,000 years ago, as dates on dripstones, which grew in these cleared cave areas, prove. Thus, the sedimentary filling and paragenesis must be much older and probably took place in the late Miocene or Pliocene.

This study shows that paragenesis in caves of the western Calcareous Alps is locally significant and that with modern uranium-thorium analysis it can be documented that these cave formation processes are older than 700,000 years.

Christoph Spötl
Institut für Geologie, Universität Innsbruck,
Innrain 52, 6020 Innsbruck
christoph.spoetl@uibk.ac.at

Haiwei Zhang
Institute of Global Environmental Change,
Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710054, China
zhanghaiwei@xjtu.edu.cn

Eingelangt: 11.5.2021
Angenommen: 17.5.2021

EINLEITUNG

Die Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle (hier abgekürzt HETH, 1266/1) ist eine bekannte Höhle in den Brandenberger Alpen Nordtirols, die ob ihrer schachtförmigen Geometrie ganzjährig Eis führt. Sie wurde vor 100 Jahren im Juli 1921 entdeckt und wird seit 1967 als Schauhöhle betrieben. Über das Höhleneis liegen Untersuchungen vor (Spötl et al., 2014; Spötl, 2018), ebenso über die Höhlenmeteorologie (Obleitner et al., 2021), Mikrobiologie (Reitschuler et al., 2012, 2015; Sattler et al., 2013) sowie die Sinterbildungen (Spötl, 2005; Spötl & Moseley, 2014). Jüngst wurde der gesamte Schauteil der Höhle auch mittels Laserscanning erfasst und ein 3D Modell erstellt (Pfeiffer et al., 2021; https://vimeo.com/477199897). Die Entstehung dieser und benachbarter meist kleinerer Höhlen, von denen es rund 20 gibt (Rittig, 2013), wurde hingegen bisher kaum untersucht. Dieser Beitrag soll diese Lücke schließen helfen und insbesondere auf die ehemals weitverbreitete Verfüllung dieser Höhlen durch feinkörnige Sedimente hinweisen.

LAGE UND GEOLOGIE

Die HETH liegt westlich an die gleichnamige Alm angrenzend (Gemeinde Angerberg). Sie besitzt zwei schachtförmige Eingänge: Den *Unteren Einstieg* auf 1520 m Seehöhe, der mit einer Steiganlage ausgestattet ist, sowie den einige Meter höher und etwa 20 m südlich davon gelegenen *Oberen Einstieg*, ein Schacht mit 29 m Tiefe (Abb. 1). Die zur Schauhöhle ausgebaute Eishöhle wurde 1984 durch Erweitern eines engen Spaltes um ein tieferes, eisfreies Stockwerk (*Neuteil* genannt) vergrößert und umfasst 264 m Länge bei einer Vertikalerstreckung von 55 m.

Die Höhle liegt in dickbankigem Wettersteinkalk, der mit 64° nach NW einfällt. Die Anlage der Höhle, besonders des oberen Stockwerks, folgt einer Störung, die NNW–SSE streicht, mit 70-75° nach E einfällt und in Form von Harnischen und einer tektonisch brekziierten Zone (Kataklasit) im Hauptraum der Höhle aufgeschlossen ist.

Diese und andere Höhlen im Gebiet der Hundsalm liegen nahe einer wichtigen stratigrafischen Grenzfläche, die den Wettersteinkalk diskordant schneidet. Diese entstand, als in der Kreidezeit Teile der Kalkalpen aus

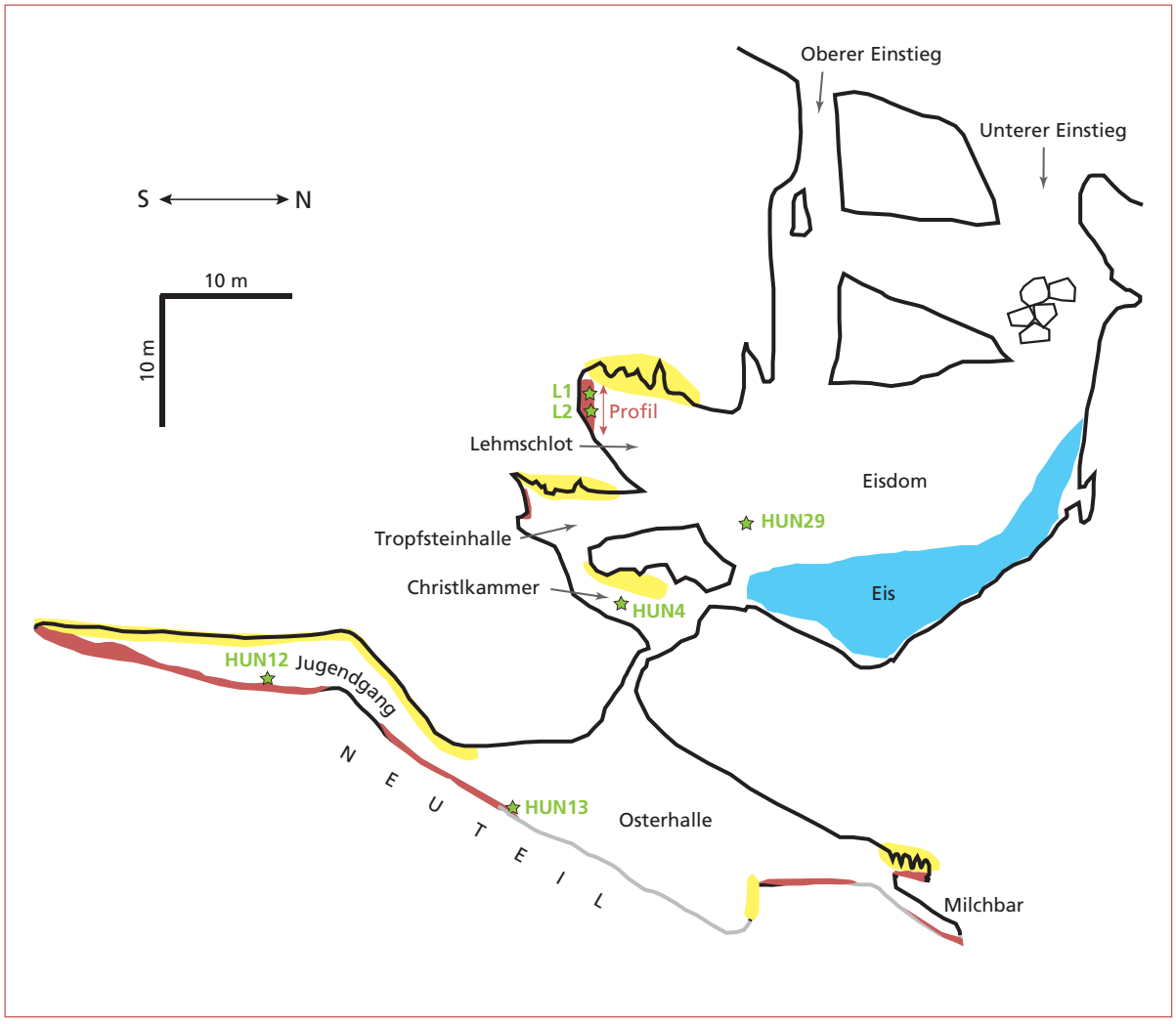

Abb. 1: Vereinfachter Schnitt der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle (nach G. Krejci) mit der gegenwärtigen Ausdehnung des Eiskörpers (blau), dem Vorkommen feinkörniger Sedimente (rotbraun), grobkörniger Sedimente und Blockwerk (hellgrau, im Neuteil) und der Verbreitung von paragenetischen Deckenstrukturen (Deckenkarren, -kanäle, und -zapfen, gelb hinterlegt). Das untersuchte Sedimentprofil im Lehmschlot ist durch einen roten Doppelpfeil markiert. Grüne Sternchen mit Nummern zeigen die Herkunft der datierten Speläothemproben.
Fig. 1: Simplified section of the Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle (after G. Krejci) showing the present extent of the ice body (blue), the erosion relicts of fine-grained sediment (reddish-brown), coarse grained sediments and rubble (light grey, Neuteil), and the distribution of paragenetic ceiling structures (ceiling half tubes, channels and pendants, yellow). The investigated sediment profile in the Lehmschlot is marked by a red double arrow. Green asterisks with numbers show the origin of the dated speleothem samples.

dem Meer herausgehoben und der festländischen Verwitterung ausgesetzt wurden. An dieser Grenze treten Paläokarst-Erscheinungen auf, z.B. im nahe gelegenen Brandenberg (Sanders, 1998), zusammen mit Bauxit, einem Produkt subtropischer Verwitterung. Über dieser Erosionsdiskordanz wurden die Sedimente der Gosau-Gruppe abgelagert, beginnend mit kontinentalen, z.T. kohleführenden Sedimenten, die mit zunehmender Absenkung in fossilreiche marine Karbonatgesteine übergehen. Im Gebiet der Hundsalm treten Konglomerate und fossilführende Kalke der basalen Gosau-Gruppe auf (Spötl & Gruber, 2015). Hinweise auf Paläokarst wurden von dort bislang nicht berichtet. Allerdings finden sich im *Jugendgang* der HETH aufgearbeitete Gosau-Konglomerate, erkennbar an den charakteristischen, gut gerundeten Vulkanit-Klasten und kieseligen Geröllen aus der Nördlichen Grauwackenzone. Anstehend finden sich diese Gesteine in der Höhle nirgends. Die jüngsten bedeutenden geologischen Prozesse fanden im Quartär statt. Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit lag die Eisoberfläche im Untersuchungsgebiet auf rund 1750 m, d.h. gut 200 m über der Eishöhle (van Husen, 1987), und zentralalpines Ferneis floss quer über diesen Teil der Kalkalpen Richtung Alpenvorland, belegt u.a. durch das Vorkommen von Kristallin-Erratika.

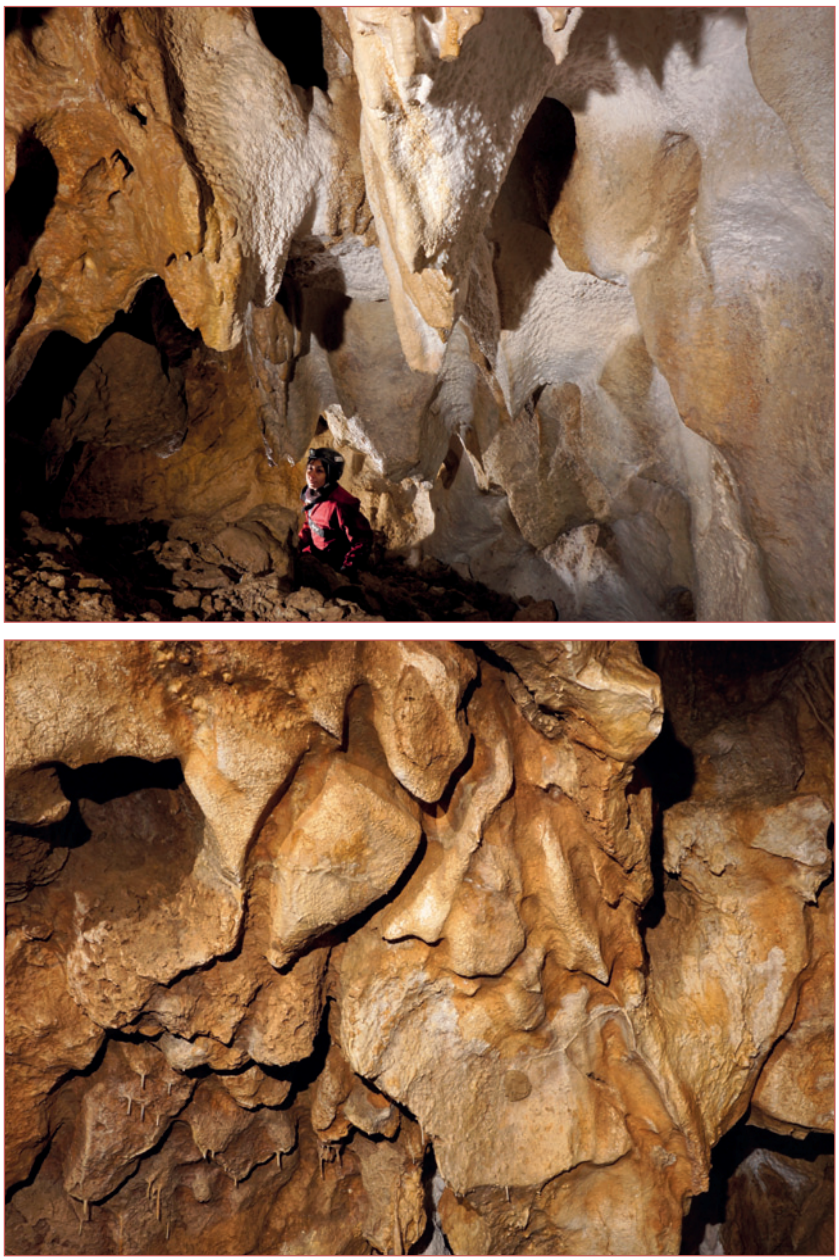

Abb. 2: Paragenetische Deckenformen im Neuteil der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle.
Oben: Deckenzapfen, die bis gut 1 m Länge erreichen, am nördlichen Ende des Neuteils; der Boden des Raums ist nach wie vor mit Höhlenlehm bedeckt.
Unten: Deckenkanäle im südlichen Neuteil. Bildbreite ca. 4 m.
Fig. 2: Paragenetic ceiling forms in the Neuteil of the Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle.
Top: Pendants reaching a good 1 m in length at the northern end of the Neuteil; the floor of the room is still covered by cave loam.
Below: Ceiling channels in the southern part of the Neuteil. Image width approximately 4 m.
Fotos: Christoph Spötl

RAUMFORMEN

Während die eingangsnahen Höhlenabschnitte sowie Teile des *Eisdoms* durch Frostsprengung gekennzeichnet sind, haben sich in anderen Bereichen noch alte Gangformen erhalten, die Einblicke in die Genese der Höhle erlauben. Diese Formen finden sich u.a. in der *Christlkammer* und im *Lehmschlot*, hauptsächlich aber im *Neuteil* und umfassen Deckenzapfen (im Englischen *pendants* genannt) bzw. Deckenkarren und -kanäle. Deckenzapfen sind meist 1 bis 1,5 m lang und weisen z.T. scharfe Kanten und eine Spitze am unteren Ende auf (Abb. 2). Deckenkanäle sind meist 5-10 cm breit, können über etliche Meter verfolgt werden und gabeln sich lokal (Abb. 2). Hinweise auf vadose Speläogenese, wie Canyons oder Schlüssellochprofile, fehlen. Sieht man von Rinnsalen ab, die zeitweise im *Neuteil* auftreten, fehlen Höhlenbäche.

SEDIMENTFÜLLUNG

Beim Rundgang durch den touristischen Teil der Höhle können leicht die nur mehr reliktisch erhaltenen, feinkörnigen Sedimente übersehen werden, die einst weite Teile der Höhle erfüllten. In der *Tropfsteinhalle* sieht man an der südlichen Wand zementierte Sedimentreste, in denen Fragmente von Wand- bzw. Bodensinter eingebettet sind (Abb. 3). Diese reliktischen Sedimente belegen, dass der Raum einst bis

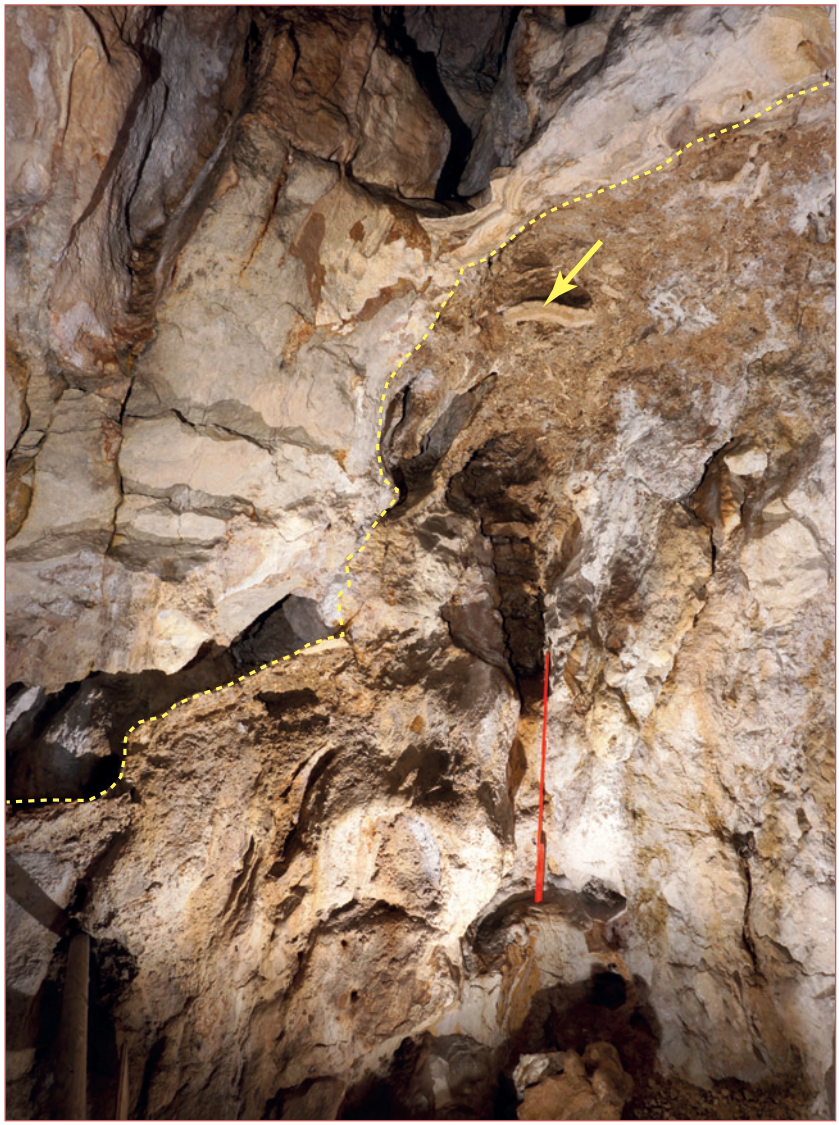

Abb. 3: An der Südseite der Tropfsteinhalle sind Reste einer ehemaligen Sedimentfüllung erhalten geblieben, in denen Sinterfragmente (gelber Pfeil) eingebettet sind. Die gelb strichlierte Linie markiert die Obergrenze der erhaltenen Sedimente. Der rote Maßstab ist 1 m lang.
Fig. 3: On the southern side of the Tropfsteinhalle, remains of a former sedimentary fill are preserved, in which speleothem fragments (yellow arrow) are embedded. The yellow dashed line marks the upper limit of the sediments. The red scale is 1 m. Foto: Christoph Spötl

mindestens etwa 4 m Höhe mit Sediment verfüllt war. In der Tat dürfte diese Füllung aber bis zur Decke gereicht haben (ca. 5 m hoch), denn diese weist paragenetische Formen auf.

Im *Neuteil* liegt viel Sediment unter der Gangsohle, ist aber nur an wenigen Stellen aufgeschlossen. Am nördlichen Ende des *Neuteils*, nahe der *Milchbar*, sieht man deutlich den Zusammenhang von rötlichem Höhlenlehm und prominenten Deckenzapfen (Abb. 2), die im untersten Teil noch teilweise im Lehm stecken.

Je höher man im nach Süden hinaufführenden *Jugendgang* steigt, desto häufiger werden Höhlenlehm-Reste. In den obersten Teilen dieses Bereiches ist der Lehm noch kaum ausgeräumt und reicht stellenweise bis zur Decke.

DAS SEDIMENTPROFIL IM LEHMSCHLOT

Das am besten aufgeschlossene Sedimentprofil der Höhle findet sich im Lehmschlot, einem kurzen, ansteigenden Gang, der etwa 4 m über der Sohle des Eisdoms ansetzt (Abb. 1). An seinem südlichen Ende bietet sich dem Betrachter ein 2,5 m hoher und 4,5 m breiter Aufschluss, der einen ausgezeichneten Einblick in die unterschiedlichen Sedimentlagen erlaubt (Abb. 4). Dieser Aufschluss wurde dokumentiert und beprobt, um die Frage zu beantworten, wann diese Sedimente in die Höhle eingetragen bzw. später

Abb. 4: Am oberen Ende des Lehmschlots sind die Reste einer ehemals weit verbreiteten feinkörnigen Sedimentverfüllung erhalten geblieben. Beachte die komplexe Deckenstruktur, meist von weißer Bergmilch überzogen. Roter Maßstab 1 m.
Fig. 4: At the upper end of Lehmschlot, the remains of a formerly widespread fine-grained sediment filling are preserved. Note the complex ceiling structure, mostly covered by white moonmilk. Red scale 1 m.
Foto: Christoph Spötl

Abb. 5: Sedimentaufschluss im Lehmschlot mit der stratigrafischen Gliederung (Lagen A bis E) und Einlagerungen von Wettersteinkalkblöcken (grau), in-situ-Bodensinter (orange) und umgelagerten Sinterfragmenten (gelb). Die Sinterproben für die Datierung sind mit blauen Sternen markiert (L1 und L2). Der rote Maßstab misst 1 m.
Fig. 5: Sediment outcrop in Lehmschlot with the stratigraphic division (layers A to E) and intercalations of Wetterstein limestone blocks (grey), in situ flowstone (orange) and redeposited flowstone fragments (yellow). The speleothem samples for dating are marked with blue stars (L1 and L2). The red scale measures 1 m. Foto: Christoph Spötl

wieder erodiert wurden. Die Sedimente reichten ursprünglich wohl bis an die Decke des Lehmschlots, welche auffallend viele Deckenkarren aufweist (Abb. 4). An der westlichen (rechten) Seite grenzen die Sedimente an eine Sinterwand, die teilweise hinter die Sedimente hinein verfolgbar ist (d.h. älter als diese ist). Zusätzlich sitzt dieser Wand aber eine jüngere Sintergeneration auf (Abb. 5), die ziemlich sicher erst nach der teilweisen Ausräumung der Sedimente entstand. Die interne Stratigrafie dieses Aufschlusses lässt mehrere unterschiedliche Sedimentpakete erkennen (Abb. 5). Zuunterst liegt ein ca. 1 m mächtiges Paket aus rotbraunem tonigem Silt, der makroskopisch Feinschichtung (Lamination) aufweist (A). Die Schichtung ist nicht streng horizontal und etwas wellig und in diesem Sediment liegen eckige Blöcke aus hellem Wettersteinkalk, die bis zu 1 m Durchmesser erreichen. Richtung Osten gehen diese Laminite mit scharfer Grenze lateral in hellbraune ungeschichtete Silte über.

Sedimentzusammensetzung

An einer rotbraunen, tonigen Probe der basalen Laminite wurden exemplarisch einige Laborwerte ermittelt. Mit einem Mastersizer wurde mittels Laserbeugung die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Probe bestand im Wesentlichen aus Silt (mittlere Korngröße 16 µm) mit 6 % Tonfraktion (< 2 µm) und 2 % Feinsandfraktion.

Die mineralogische Zusammensetzung wurde mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt. Neben dem Hauptmineral Quarz wurden Kalifeldspat, Muskovit (bzw. Illit), Chlorit und Spuren von Hämatit nachgewiesen. Karbonatminerale wurden nicht detektiert.

Weiters wurde an der gleichen Probe der Karbonatgehalt mittels eines CS-Analysers bestimmt. Er beträgt 2,1 Gew.-% $CaCO_3$, ein Gehalt, der mittels Röntgendiffraktometrie nicht detektiert werden kann. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff ist erwartungsgemäß aufgrund der roten Sedimentfärbung gering und beträgt 0,15 Gew.-%.

Alterseinstufung

Zwei Proben von grobkristallinen, dichten, kalzitischen Sintern wurden aus der Aufschlusswand entnommen (Abb. 5) und mittels der U-Th-Methode altersbestimmt. Die Messungen wurden an der Jiaotong University in Xi'an, China, vorgenommen.

Tabelle 1: Uran-Thorium Altersbestimmungen an Sinterproben aus der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle.
Table 1: Uranium-Thorium dates of speleothem samples from the Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle.

Probe	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppt)	$^{230}Th/^{232}Th$ ($x10^{-6}$)	$\delta^{234}U$ (gemessen)	$^{230}Th/^{238}U$ (Aktivität)	^{230}Th Alter (ka)
L1	39,9 ± 0,1	1848 ± 37	360 ± 7	5,6 ± 2,2	1,0106 ± 0,0038	>700
L2	52,4 ± 0,1	1013 ± 21	868 ± 18	3,3 ± 1,7	1,0179 ± 0,0047	>700
HUN4	59,9 ± 0,1	1064 ± 22	936 ± 20	6,8 ± 1,7	1,0092 ± 0,0053	>700
HUN29	50,7 ± 0,0	2301 ± 46	369 ± 8	7,6 ± 2,2	1,0147 ± 0,0069	>700
HUN12	237,4 ± 0,2	408 ± 9	11373 ± 239	130,3 ± 1,7	1,18474 ± 0,00172	>700
HUN13	128,6 ± 0,1	64 ± 3	33778 ± 3	12,5 ± 1,8	1,02311 ± 0,00242	>700

Die Ergebnisse zeigen, dass diese Sinterproben älter als 700 ka sind (ka steht für Tausend Jahre; Tab. 1). Während es sich bei Probe L1 um eine in Lage D eingebettete Sinterplatte handelt (Abb. 5), stammt Probe L2 aus einem teilweise kristallinen Sinter, der nahe der Basis von Lage B in situ entstanden ist (Abb. 5). Somit ergibt sich aus diesen beiden Proben, dass die gesamte Abfolge an feinklastischen Sedimenten im *Lehmschlot* älter als 700 ka sein muss. Wie alt diese Sedimente tatsächlich sind, lässt sich derzeit nicht sagen. Es existiert keine gängige Methode, um diese Frage zu beantworten.

WEITERE ALTERSDATEN ZU SINTERBILDUNGEN

Auch außerhalb des *Lehmschlots* ergaben Sinterproben meist sehr hohe Alter, häufig jenseits der Datierungsgrenze der U-Th-Methode, welche je nach Probenbeschaffenheit und Qualität des Labors bei etwa 500-700 ka liegt. Da diese Sinter aus Höhlenteilen stammen, die nachweislich einst mit feinklastischen Sedimenten verfüllt (und paragenetisch verändert) wurden, stellen diese Daten weitere wichtige chronologische Anhaltspunkte (Mindestalter) für die Ausräumung dieser feinkörnigen Sedimente dar.

Am Boden des *Eisdoms*, in den der *Lehmschlot* südlich einmündet, kamen in den letzten Jahren durch den Eisrückgang in situ Stalagmitenstümpfe zum Vorschein sowie das Fragment einer Stalagmitenkappe (Probe HUN29). Diese wurde auf >700 ka datiert (Tab. 1). Auch wenn die exakte Stelle, an der dieser Stalagmit einst stand, nicht eruiert werden konnte, gehen wir davon aus, dass dieses Bruchstück von der besagten Stalagmitengruppe stammt, denn es gibt im *Eisdom* keine weiteren Stalagmiten(stümpfe). Die Datierung belegt, dass bereits vor mindestens 700 ka der Boden des *Eisdoms* sedimentfrei gewesen sein muss, d.h. dass die Ausräumung der feinklastischen Verfüllung (von der das Profil im *Lehmschlot* ein Erosionsrelikt darstellt) noch älter sein muss. Damit ist klar, dass die eigentliche Sedimentation (und die einhergehende Paragenese) früher erfolgte. Das Datum >700 ka ist somit mit den Minimalaltern des Lehmschlotprofils kompatibel und unterstützt die Vermutung, dass die feinklastische Sedimentation in der Tat ein hohes Alter haben dürfte.

Eine weitere Sinterprobe, ein Fragment eines Bodensinters (Probe HUN4), wurde in der *Christlkammer* geborgen und seinerzeit auf >350 ka datiert (Spötl, 2005). Eine Neudatierung ergab nun ein wesentlich höheres Alter von >700 ka (Tab. 1). Die *Christlkammer* liegt rund 4 m unter der *Tropfsteinhalle*, welche ihrerseits nachweislich bis auf mindestens 4 m Höhe mit Sediment verfüllt und später ausgeräumt wurde (Abb. 3). Somit belegt auch dieses Sinterfragment, dass in dem südlich an den *Eisdom* anschließenden Höhlenbereich die einstige feinklastische Verfüllung schon vor mindestens 700 ka großteils ausgeräumt war.

Zwei weitere Datenpunkte aus dem *Neuteil* fügen sich in dieses Bild ein. Im oberen *Jugendgang* sind Stalagmiten auf dem Lehm aufgewachsen und erlauben so ein Minimalalter dieser feinkörnigen Sedimente zu bestimmen. Ein solcher Stalagmit (HUN12) ergab an seiner Basis ein Alter >700 ka (Spötl & Moseley, 2014; Tab. 1). Ein weiterer Stalagmit (HUN13) lag im Schutt am Beginn des *Jugendgangs* und ergab knapp unterhalb seiner Spitze bereits ein Alter jenseits der Datierungsgrenze, d.h. größer als ca. 700 ka (Spötl & Moseley, 2014; Tab. 1). Somit belegen diese beiden Tropfsteine, dass die weitgehende Ausräumung der feinklastischen Verfüllung auch im unteren Stockwerk der Höhle schon vor mindestens 700 ka stattgefunden hat; die prominenten paragenetischen Deckenkarren und -kanäle im *Jugendgang* (Abb. 2) müssen somit noch älter sein.

DISKUSSION

Die Beobachtungen und Labordaten erlauben neue Einblicke in die Speläogenese der HETH, deren Werdegang im Folgenden zusammengefasst wird.

Die eigentliche Höhlenbildung dürfte wie bei den meisten kalkhochalpinen Höhlen unter phreatischen Bedingungen stattgefunden haben, unter fundamental anderen topografischen und hydrologischen Rahmenbedingungen als sie heute existieren. Über den Zeitpunkt dieser Phase ist nichts Konkretes bekannt. Zieht man einen vorsichtigen Vergleich zu anderen Höhlen in den Nördlichen Kalkalpen, so erscheint die Bildung im ausgehenden Miozän oder Pliozän wahrscheinlich. Auf diese phreatische Phase folgten – wohl mit großem zeitlichem Abstand – die ersten Sinterbildungen, die eine Heraushebung und damit ein Trockenfallen zumindest der höheren Abschnitte der Höhle belegen. Anschließend wurden beträchtliche Mengen an karbonatarmen, siltig-tonigen Sedimenten in die Höhle eingeschwemmt, wie die heute noch vorhandenen Reste z.T. etliche Meter über dem heutigen Höhlenboden dokumentieren. Deren Strukturen belegen eine sehr ruhige Sedimentation aus suspensionsreichem Wasser. Immer wieder kam es zu Unterbrechungen dieser Einschwemmungen, in denen eine schwache Zementation mancher Lehmlagen stattfand (z.B. Lage B im Lehmschlotprofil). Längere Phasen ohne siltig-tonigen Eintrag gab es offenbar nicht, denn ansonsten wären dickere Bodensinterlagen zu erwarten. Auf diese Sedimentverfüllungsphase folgte(n) eine oder mehrere weitere phreatische Phase(n), in denen das Wasser nur nach oben lösen konnte. Diese Prozesse, die zur Ausbildung von Deckenkanälen und -zapfen führten, sind als Paragenese bekannt und ein weit verbreitetes speläogenetisches Phänomen in Höhlen der Alpen (siehe Plan, 2013, für einen Überblick) und weltweit (z.B. Palmer, 2007). Anhand der in den Sedimenten eingeschlossenen Sinter lässt sich bestimmen, dass der Sedimenteintrag vor mehr als 700 ka begann; sehr wahrscheinlich fand die Einschwemmung jedoch deutlich früher statt. Dafür spricht auch die Beschaffenheit und die Farbe dieser rotbraunen karbonatarmen tonigen Silte. Solche Sedimente existieren in der näheren Umgebung der Höhle nicht (mehr). Das Einzugsgebiet der Wässer, die diese Sedimenttrübe in die Höhle eingebracht haben, muss völlig anders ausgesehen haben. Es ist anzunehmen, dass diese Feinklastika verwitterte und erodierte Sedimente der basalen Gosau-Gruppe darstellen, die im weiteren Gebiet um die Hundsalm, nicht aber in der Nähe der Eishöhle, noch heute anstehen. Solche tiefgreifenden Landschaftsänderungen und die Tatsache, dass in der Höhle damals phreatische Bedingungen geherrscht haben, sprechen dafür, dass diese Prozesse einige Jahrmillionen zurückliegen, als die Höhle deutlich tiefer lag, die Topografie eine andere war und noch deutlich mehr Gestein über den heute bekannten Höhlengängen lag.

In weiterer Folge kam es zu einer großräumigen Erosion der feinkörnigen Sedimente in der Höhle, wohl durch hochenergetische Wässer, denn zur Erosion von tonreichen Sedimenten bedarf es aufgrund ihrer Kohäsion einer ähnlich hohen Strömungsenergie wie zur Erosion von kiesigen Sedimenten. Vermutlich spielte zum einen die weitere Öffnung der Höhle zur Oberfläche hin eine Rolle. Zum anderen könnte diese Erosionsphase möglicherweise mit dem Beginn der großen Vereisungen in zeitlichen Zusammenhang gebracht werden. Glaziale Schmelzwässer zählen zu jenen mit der höchsten Strömungsenergie. Große Vereisungen, in denen das Eis aus den Zentralalpen bis in das nördliche Alpenvorland (und damit über die Täler und manche Berge der Brandenberger Alpen) vorgestoßen ist, begannen in den Alpen spätestens vor etwa 870 ka (Muttoni et al., 2003), nach anderen Daten möglicherweise schon vor rund 1 Million Jahren (Knudsen et al., 2020). Diese Hypothese einer Ausräumung der Sedimente durch eiszeitliche Schmelzwässer passt gut zu den Mindestaltern, die von U-Th-datierten Speläothemen der HETH nunmehr vorliegen und zeigen, dass viele davon >700 ka sind. Somit waren damals bereits große Teile der Sedimente im *Eisdom*, der *Tropfsteinhalle* und Teilen des *Jugendgangs* erosiv entfernt.

Mit dieser großen Erosionsphase bzw. deren Umlagerung in tiefere, bislang nicht bekannte Höhlenbereiche endete im Wesentlichen die Speläogenese der Höhle, sieht man von lokaler Inkasion ab. Offenbar bildete sich zu keiner Zeit ein größeres Höhlengerinne, und auch andere Hinweise auf eine vadose Höhlenbildung fehlen.

Im Grete-Ruth-Schacht (1266/4), einer nahe gelegenen Schachthöhle mit einem etwas größeren Schachtquerschnitt als der des *Oberen Einstiegs* der Eishöhle, finden sich locker gelagerte braune Sedimente, z.T. feingeschichtet, die anders aussehen als die rotbraunen Sedimente z.B. des *Lehmschlots*. Sie überdecken im Grete-Ruth-Schacht Wandsinter, die auf 123 ± 8 ka datiert wurden (Spötl & Moseley, 2014) und als Einschwemmungen im Zuge des Abschmelzens der letzten hochglazialen Vereisung vor rund 19 ka gedeutet werden. Solche Sedimente, die z.B. auch im Nixloch auf der Höhlensteinalm (1266/12) rund 3 km östlich der

Eishöhle vorkommen (Piccolruaz, 2020), fehlen in der Eishöhle und sprechen dafür, dass diese jüngsten Schmelzwässer ihren Weg nicht in die HETH gefunden haben. Möglicherweise fand der Einsturz, der zur Entstehung des *Oberen Einstiegs* führte, erst nacheiszeitlich statt. Dieser jüngste Akt der Inkasion öffnete im wahrsten Sinn des Wortes die Tür zur Entstehung der heutigen Eishöhle in Gestalt einer klassischen Kältefalle.

DANK

Gabriella Koltai führte eine Korngrößen- und C-Bestimmung durch, und Stephan Kempe und Lukas Plan begutachteten das Manuskript.

LITERATUR

Knudsen, M.F., Nørgaard, J., Grischott, R., Kober, F., Egholm, D.L., Hansen, T.M. & Jansen, J.D. (2020): New cosmogenic nuclide burial-dating model indicates onset of major glaciations in the Alps during Middle Pleistocene Transition. – Earth Planet. Sci. Lett., 549: 116491.

Muttoni, G., Carcano, C., Garzanti, E., Ghielmi, M., Piccin, A., Pini, R., Rogledi, S. & Sciunnach, D. (2003): Onset of major Pleistocene glaciations in the Alps. – Geology, 31: 989–992.

Obleitner, F., Spötl, C., Wind, M., Racine, T., Schroeder, M. (2021): Das Höhlenklima-Messprogramm in der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle 2018-2020. – Höhlenkundl. Mitt. Landesver. Höhlenkunde Tirol, 59: 72–78.

Palmer, A. (2007): Cave Geology. – Dayton, Ohio (Cave Books).

Pfeiffer, J., Rutzinger, M. & Spötl, C. (2021): Hochpräzise und vollständige 3D-Aufnahme der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle mithilfe eines terrestrischen Laserscanners. – Höhlenkundl. Mitt. Landesver. Höhlenkunde Tirol, 59: 68–71.

Piccolruaz, M. (2020): Die Untersuchung von laminierten Sedimenten in einer Höhle im Unterinntal. – Unveröff. Bachelorarbeit Univ. Innsbruck.

Plan, L. (2013): Paragenese – ein häufiges Phänomen ostalpiner Höhlen. – Die Höhle, 64: 3–14.

Reitschuler, C., Schwarzenauer, T., Lins, P., Wagner, A.O., Spötl, C. & Illmer, P. (2012): Zur Mikrobiologie von Bergmilch. – Die Höhle, 63: 3–17.

Reitschuler, C., Lins, P., Schwarzenauer, T., Spötl, C., Wagner, A.O. & Illmer, P. (2015): New undescribed lineages of non-extremophilic archaea form a homogeneous and dominant element within alpine moonmilk microbiomes. – Geomicrobiol. J., 32: 890–902.

Rittig, P. (2013): Geologie und Karst-Geomorphologie im Gebiet der Hundsalm – Angerberg/ Tirol. – Höhlenkundl. Mitt. Landesver. Höhlenkunde Tirol, 51: 13–21.

Sanders, D. (1998): Tectonically controlled Late Cretaceous terrestrial to neritic deposition (Northern Calcareous Alps, Tyrol, Austria). – Facies, 39: 139–178.

Sattler, B., Larch, P., Rambacher, J. & Spötl, C. (2013): Das Eis der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle als Lebensraum für mikrobielle Gemeinschaften. – Die Höhle, 64: 15–24.

Spötl, C. (2005): Datierungen von Tropfsteinen aus der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle. – Höhlenkundl. Mitt. Landesver. Höhlenkunde Tirol, 43: 5–9.

Spötl, C. (2011): Das Höhlenklima-Messprogramm in der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle – Zwischenbericht 2010. – Höhlenkundl. Mitt. Landesver. Höhlenkunde Tirol, 49: 18–23.

Spötl, C. (2018): Aktuelle Wachstumsdynamik der Eisstalagmiten in der Hundsalm Eis- und Tropfsteinhöhle (Tirol). – Die Höhle, 69: 84–89.

Spötl, C. & Gruber, A. (2015): Geologisches vom Angerberg. – In Osl, H. & Lechner, P. (Red.): Dorfbuch Angerberg. – Angerberg (Eigenverlag der Gemeinde Angerberg): 16–25.

Spötl, C., Moseley, G. (2014): Neue Datierungen an Höhlensinter aus dem Gebiet der Hundsalm, Angerberg. – Höhlenkundl. Mitt. Landesver. Höhlenkunde Tirol, 52: 4–7.

Spötl, C., Reimer, P.J., Luetscher, M. (2014): Long-term mass balance of perennial firn and ice in an Alpine cave (Austria): Constraints from radiocarbon-dated wood fragments. – The Holocene, 24: 165–175.

van Husen, D. (1987): Die Ostalpen und ihr Vorland in der letzten Eiszeit (Würm). – Wien (Geologische Bundesanstalt).