© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Eiszeitliche Klimadynamik im Spiegel eines Stalagmiten aus dem Hölloch (Bayern/Vorarlberg)

ZUSAMMENFASSUNG

Aus dem grenzüberschreitenden Hölloch im Kleinwalsertal wurde ein Tropfstein geborgen, der während des letzten Glazials gewachsen ist und Episoden großer Höhlenüberflutungen in der Gestalt von Silt/Ton-Einlagerungen dokumentiert. Solch große Überflutungen sind im heutigen Höhlensystem nicht bekannt, obwohl weite Bereiche des Höllochs im epiphreatischen Bereich liegen. Uran-Thorium-Altersdatierungen von 13 Kalzitproben des Stalagmiten belegen, dass sein Wachstum vor etwa 62 kyr (= 62.000 Jahren) einsetzte und vor etwa 40 kyr endete. Der nur 41 cm lange Stalagmit umfasst somit einen Zeitraum von ca. 20 kyr während und trotz der Würm-Eiszeit. Flossenartige Fortsätze im basalen Teil dokumentieren, dass der Stalagmit mehrfach von Grobsand umspült und zugeschüttet wurde und sich zwischenzeitlich dünne Sinterlagen bildeten. Die Altersdatierungen in Kombination mit der Internstruktur des Tropfsteins grenzen das Alter der Sinterfortsätze auf ca. 46 kyr ein, d.h. zwischen 62 und 46 kyr vor heute wurde er immer wieder von Sediment des Höhlenbaches zugeschüttet. Vor allem im jüngeren Teil des Stalagmiten finden sich weiters Einschaltungen von siltigem Lehm, d.h. das Tropfsteinwachstum wurde mehrmals unterbrochen. Diese Sedimentlagen sind auf Hochwasserereignisse zurückzuführen, die den Höhlenraum zeitweise vollständig geflutet haben. Eine hoch aufgelöste Sauerstoff-Isotopenkurve des Stalagmiten zeigt mehrmalige abrupte Wechsel von wärmeren und kälteren Klimaperioden und belegt eindrucksvoll, dass die Hochwasserereignisse bevorzugt am Ende der kurzfristigen Warmphasen der Würm-Eiszeit bzw. am Beginn der darauf folgenden, sehr kalten Phasen stattfanden.

ABSTRACT

Climate dynamics during the last glacial period recorded by a stalagmite from Hölloch (Bavaria/Vorarlberg)

A speleothem recovered from Hölloch Cave located at the border between Germany and Austria that was deposited during the Last Glacial shows prominent layers of silt and clay documenting episodes of extensive cave flooding. Such intermittent flooding events are not known from the modern cave system, although some galleries are situated in the epiphreatic zone. According to Uranium-Thorium age determinations of 13 calcite subsamples, stalagmite growth started around 62 kyr (= 62,000 years) before present and ended 40 kyr ago, i.e. the only 41 cm-tall stalagmite comprises a time interval of ca. 20 kyr during the Last Glacial. Fin-like extensions in the lower part of the stalagmite document calcite deposition competing with the aggradation of coarse-grained sand. U-Th dates in combination with the internal structure of the stalagmite constrain the age of this period of clastic sedimentation by the cave stream to between 62 and 46 kyr. In addition, the stalagmite also reveals several layers of silty clay documenting growth interruptions as a result of prolonged flood events. High-resolution oxygen isotope measurements along the stalagmite growth axis highlight abrupt alternations of warmer and colder climate conditions during the Last Glacial period. The flooding events occurred preferentially at the end of the relatively short warm phases (interstadials) and at the onset of the subsequent cooling episodes (stadials).

Christoph Spötl
Institut für Geologie und Paläontologie,
Universität Innsbruck,
Innrain 52, 6020 Innsbruck

Ronny Boch
Institut für Geologie und Paläontologie,
Universität Innsbruck,
Innrain 52, 6020 Innsbruck

Andreas Wolf
Elisenstraße 24, D-82152 Krailling

Eingelangt: 22.5.2011
Angenommen: 25.6.2011

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

EINLEITUNG

Eiszeiten nahmen etwa 85 % der Zeit im Quartär (der letzten ca. 2,6 Millionen Jahre) ein und haben durch die erosive Tätigkeit des fließenden Eises das Antlitz der Alpen sowie vieler anderer Regionen der Erde geprägt. Ein Blick auf lange globale Klimadatenreihen, die aus Tiefseesedimenten und polarem Eis gewonnen wurden, zeigt, dass die aus historischen Überlieferungen bekannten Vorstellungen von Klimaänderungen völlig unzureichend sind; der eiszeitliche Klimaverlauf war wesentlich dramatischer, sowohl die Magnitude, als auch die Geschwindigkeit der Änderungen betreffend. So sind allein aus der letzten Eiszeit, die im Alpenraum als „Würm-Glazial“ bezeichnet wird, gut zwei Dutzend mehr oder weniger kurze Warmphasen (Interstadiale) bekannt, die mit sibirisch kalttrockenen Intervallen (Stadialen) abwechselten (z.B. Wolff et al., 2010).

So sicher sich die Wissenschaft mittlerweile über den generellen Verlauf des Klimas während der letzten Eiszeiten ist, so dürftig ist unsere Kenntnis von den konkreten Auswirkungen auf regionaler Ebene. In detektivischer Kleinarbeit haben Quartärgeologen in den vergangenen ca. 150 Jahren manches Puzzlestück gefunden und so etwa die Ausdehnung des Eisstromnetzes zum Höhepunkt der letzen Eiszeit rekonstruiert (van Husen, 1987 für die Ostalpen und Burkhalter, 2009 für die Westalpen). Ablagerungen in Seen und Mooren können zudem wichtige indirekte Information zu früheren Umwelt-, Klima- und Vegetationsverhältnissen liefern; die allermeisten dieser Vorkommen wurden jedoch durch den letzten Eisvorstoß – den größten der vergangenen 135.000 Jahre – vernichtet.

Es lohnt daher ein Blick unter die Erdoberfläche. Höhlen stellen nicht nur unschätzbar wertvolle Archive der Menschheitsgeschichte dar; dank ihres oft hohen (geologischen) Alters können auch Spuren früherer großer Umweltveränderungen erhalten bleiben, sofern diese in den Höhlensedimenten dokumentiert wurden. Leider ist der Großteil dieser Ablagerungen klastischen Ursprungs und birgt daher nur wenige auswertbare Informationen. Dazu kommt, dass die Höhlenlehme, -silte und -sande nur in seltenen Fällen datiert werden können (vgl. Wagner, 2011 in diesem Band).

Wie sieht es aber mit den auf chemischem Wege gebildeten Sedimenten aus? Tropfsteine aus Karbonat und andere Höhlensinterformen sind ohne Zweifel wertvolle Informationsquellen. Die zu ihrer Bildung nötigen Umweltbedingungen sind aber bei vielen heutigen alpinen Höhlen nicht gegeben, insbesondere das Vorhandensein einer Vegetationsdecke im Einzugsgebiet der Sickerwässer über der Höhle. Zudem haben Studien an norwegischen Marmorhöhlen gezeigt, dass dort eiszeitliche Schmelzwässer – das Gebiet lag unter dem mächtigen Fennoskandischen Eisschild – die Höhlen geflutet haben und somit keine Tropfsteinbildung möglich war (Lauritzen, 1993). Solche Wechselspiele von Sinterbildung, Höhlenüberflutung, Ablagerung feinkörniger Stausedimente und lokaler Erosion haben auch in ehemals vergletscherten Gebieten der Alpen vielerorts stattgefunden. Dieser Artikel berichtet über Forschungsergebnisse an einem eiszeitlichen Stalagmiten aus dem Hölloch, der eine unerwartete Fülle an Umweltdetails dokumentiert und es erlaubt, in die weit zurückliegende Zeit vor dem letzten Eishochstand zu blicken.

DAS HÖLLOCH

Diese Höhle im Allgäu ist zwar um vieles kleiner als ihr Namensvetter im Schweizer Muotatal, aber mit 11 km Gesamtganglänge (Stand März 2011) immerhin Deutschlands zweitlängste Höhle. Der altbekannte Haupteingang – der namensgebende *Höllochschacht* (E1, 1127/03) mit 77 m Tiefe – liegt in 1438 m Seehöhe unweit der Mahdtal-Alm, Gemeinde Oberstdorf. Von dort verläuft die Höhle in ESE-Richtung bis zum Nordende der *Fußgängerzone* und biegt dann nach Süden ab. Etwas nördlich des heutigen Südendes der Höhle gelang es Höhlenforschern, einen zweiten Eingang (E2, *Plattenalpschacht*, ehemals 1127/62, 1240 m Seehöhe) zu orten und freizulegen. Dieser liegt im Gebiet der österreichischen Gemeinde Mittelberg. Das Hölloch bildete sich im Schrattenkalk des Helvetikums, welches im Gebiet nördlich des Hohen Ifens (2230 m) in NW/SE-streichende und nach SE (Richtung Schwarzwassertal) abtauchende Großfalten gelegt ist. Das Mahdtal und der NW-SE verlaufende Ast des Höhlensystems folgen einer Synklinale. Die Grenze des Schrattenkalks zu den liegenden Drusberg-Schichten mit ihren nur gering wasserdurchlässigen Mergeln und Tonsteinen bildet die Untergrenze des Karstaquifers und des Höhlensystems.

Der NW-SE verlaufende Abschnitt des Höllochs ist eine aktive Wasserhöhle mit fünf Siphonen. Die Schüttung des Höhlenbachs schwankt jahreszeitlich und reagiert rasch auf Starkniederschläge, sodass die Exploration nur bei sicheren (Niedrig-)Wasserverhältnissen im Hochwinter durchgeführt werden kann

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

(Stautz & Wolf, 2006). Weite Bereiche des alten Teils liegen im epiphreatischen Bereich, werden also temporär überflutet, wobei Rückstauhöhen von mindestens 100 m belegt sind. Der Höhlenverlauf steigt am markanten Knick in Richtung E2 an; dieser erst in den letzten Jahren entdeckte Abschnitt ist hydrologisch nicht mehr aktiv.

Das Einzugsgebiet der Wässer im aktiven Teil der Höhle entspricht recht genau den topographischen Grenzen des Mahdtales. Färbeversuche haben gezeigt, dass das Hölloch beinahe ausschließlich zur Sägebachquelle hin entwässert (Goldscheider & Hötzl, 2000; Goldscheider, 2005; Goldscheider & Göppert, 2006).

STALAGMIT HÖL7

Tropfsteinbildungen dieser Höhle werden seit einigen Jahren von unserer Arbeitsgruppe untersucht, nachdem eine Pilotstudie an einem Stalagmiten aus dem alten Teil (Herkulessaal) durch Bochumer Kollegen gezeigt hat, dass sich das Sintermaterial gut für paläoklimatische Fragestellungen eignet (Wurth et al., 2000, 2004; Niggemann, 2006). Das Hölloch ist streckenweise mäßig bis stark versintert, was für Höhlen in den Alpen eher die Ausnahme darstellt. Allerdings liegen sowohl die Höhle wie auch ein Teil des Einzugsgebiets der Tropfwässer noch unterhalb der Baumgrenze (ca. 1800 m, Veit, 2002). Die im N-S verlaufenden Abschnitt gemessene Höhlenlufttemperatur ist über das Jahr konstant und beträgt 5,6 ±0,1 °C, was gut mit der Wassertemperatur der Karstquellen im Schwarzwassertal übereinstimmt (Goldscheider & Hötzl, 2000). HÖL7 wurde vom westlichen oberen Rand des *Schwarzen Lochs* geborgen, einer ganzjährig wasser-

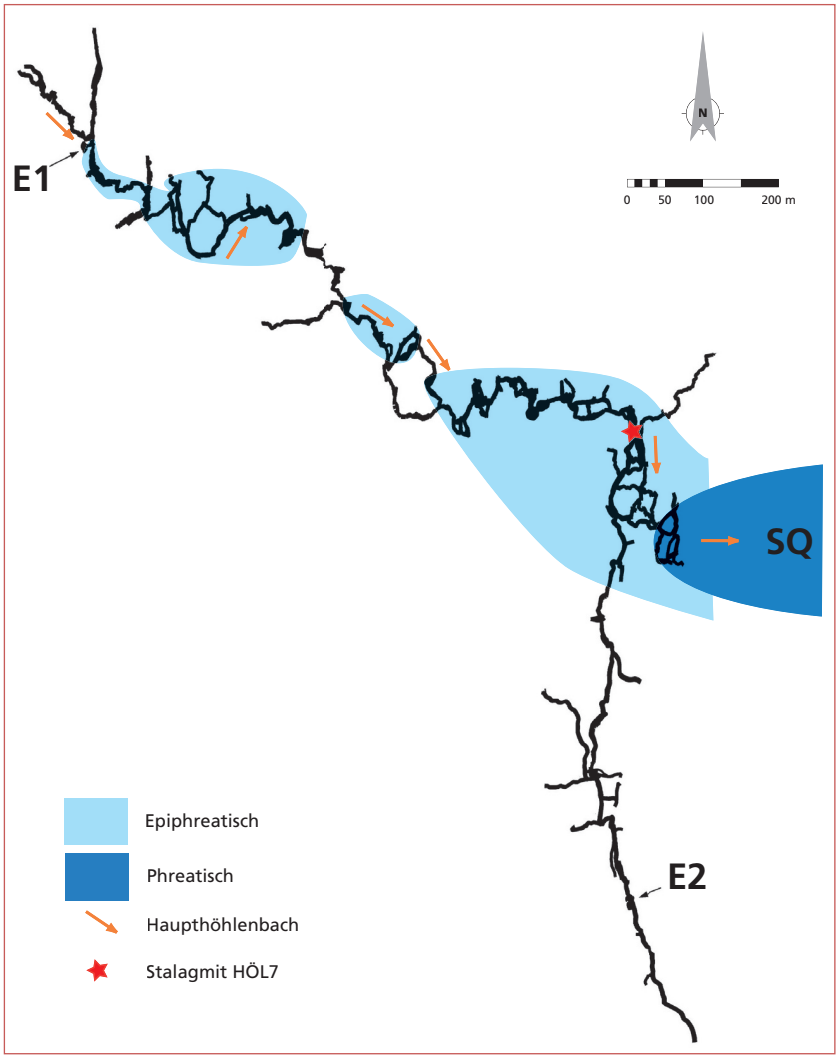

Abb. 1: Übersichtsplan des Höllochs mit den beiden Eingängen Höllochschacht (E1) und Plattenalpschacht (E2) sowie dem Fundort des untersuchten Tropfsteins. Die orangen Pfeile markieren die Hauptfließrichtung im hydrologisch aktiven Teil der Höhle, welcher zur Sägebachquelle (SQ) hin entwässert. Seitliche Zuflüsse zum Haupthöhlenbach wurden weggelassen, ebenso der Bach im N-S verlaufenden neuen Teil (den man hört, aber nicht zu Gesicht bekommt). Große Teile des NW-SE-verlaufenden Höhlenteils liegen innerhalb des Schwankungsbereichs des Karstwasserspiegels (hellblau). Aktualisiert und vereinfacht nach Wolf (2006). *Simplified plan view of Hölloch Cave with its two entrances, Höllochschacht (E1) and Plattenalpschacht (E2) and the location of the studied speleothem. Orange arrows indicate the main flow direction in the hydrologically active part which drains towards the Sägebach spring (SQ). Tributaries of the main cave stream were omitted for clarity, as was the small stream in the N-S trending gallery (which can be heard but not reached). Large parts of the NW-SE trending cave part are located within the fluctuating karst water table (light blue). Updated figure after Wolf (2006).*

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

führenden, schluchtartigen Strecke im zentralen Abschnitt der Höhle (Abb. 1). Der heutige perennierende Wasserlauf liegt ca. 20 m tiefer als der Fundpunkt des Stalagmiten (nahe Vermessungspunkt 600). Dieser Punkt liegt in 1139 m Seehöhe und damit etwa 86 m über dem heutigen Karstwasserspiegel (ca. 1053 m im Bereich des *Vadose Zone* genannten Höhlenabschnitts). Der Stalagmit ist 41 cm lang, war bei seiner Entnahme inaktiv und besitzt im basalen Teil flossenartige Fortsätze (Abb. 2). Letztere belegen, dass der Stalagmit mehrfach von Sediment umspült wurde und sich in den ruhigen Intervallen zwischen den Sedimentschüttungen dünne Sinterlagen bilden konnten. Später wurden die umgebenden Sedimente erodiert, wobei der Stalagmit selbst aber nicht in Mitleidenschaft gezogen wurde. Die Oberfläche des Tropfsteins weist zudem keine markanten Erosions- bzw. Korrosionsspuren auf, welche man bei längerfristiger Überflutung durch einen turbulenten Höhlenbach erwarten würde.

Abb. 2: Stalagmit HÖL7 vor der Entnahme (links vom Handschuh). Man erkennt deutlich, dass er ursprünglich von Sediment umgeben war, auf welchem sich einst Sinter etwas oberhalb der Basis des Stalagmiten abgelagert hat.
Stalagmite HÖL7 prior to removal (left of glove). Note that this speleothem was initially surrounded by clastic sediment on which calcite was deposited (lateral fins above the base).

WACHSTUMSDYNAMIK VON HÖL7

Der Stalagmit wurde mittels Diamantsäge der Länge nach geschnitten und poliert, um die Internstrukturen zu studieren. Abb. 3 zeigt, dass der Tropfstein eine bewegte Geschichte aufgezeichnet hat. Anfänglich konkurrierte die Sinterbildung mit Anschwemmungen von gut gerundetem Grobsand bis Feinkies, dessen Korngröße meist 0,5-1,0 mm (in Einzelfällen bis 5 mm) beträgt. Dies hat zeitweise dazu geführt, dass der junge Tropfstein fast vollständig mit Sediment zugeschüttet wurde. Ein solches Bild passt zu den flossenartigen Sinterfortsätzen, die der Stalagmit äußerlich zeigt. Später, als der Stalagmit eine Höhe von ca. 15 cm erreicht hatte, ließ die Sedimentzufuhr nach. Das Sintermaterial besteht zumeist aus bräunlichem Kalzit, der eine durchgängige Feinschichtung erkennen lässt. Zwei auffallende Wachstumsintervalle bestehen aus sauberem, weißlich-gelbem Kalzit. An mehreren Stellen und insbesondere im jüngeren Abschnitt finden sich Einschaltungen von graubraunem siltigem Lehm, der auf dem Stalagmiten abgelagert wurde und zu vorübergehenden Wachstumsstopps führte. An einigen Stellen erkennt man deutlich, dass durch die wieder einsetzende Tropftätigkeit dieser Lehm von der damaligen Spitze des Stalagmiten (dort wo der Tropfen auftraf) weggespült bzw. seitlich verdrängt wurde (z.B. 8,6 cm unterhalb der jetzigen Stalagmitenspitze, siehe Abb. 3). An anderen Stellen wurde der Lehm vollständig weggespült; nur an den Flanken kann man gelegentlich noch mm-dünne Lagen erkennen und anhand der Feinschichtung des Kalzits zur zentralen Tropfstein-Wachstumsachse zurück verfolgen. Die Lehmverunreinigungen nehmen tendenziell nach oben hin zu, was sich auch in der Qualität der radiometrischen Altersdaten (siehe unten) niederschlägt.

ALTERSBESTIMMUNG

Entlang der Wachstumsachse wurden mittels Zahnarztbohrer kleine Mengen (60-100 mg) möglichst reinen Kalzits entnommen und mittels der Uran-Thorium-Ungleichgewichtsmethode im Labor der University of Minnesota in Minneapolis, USA datiert. Da über diese Messungen an anderer Stelle detailliert berichtet wird, werden hier nur die wesentlichen Ergebnisse wiedergegeben (Details zur Methodik siehe Boch et al., 2011). Die Altersangaben werden, wie international üblich, in Tausenden Jahren (kyr) angegeben. 15,6 kyr entsprechen demnach einem Alter von 15.600 Jahren vor heute (genau genommen, vor dem Jahr 1950). Die unterste Probe zeigt an, dass der Tropfstein vor etwa 62 kyr zu wachsen begann. Die anderen 12 Altersdatierungen weisen in Richtung Spitze des Tropfsteins zunehmend jüngere Alter auf (Abb. 3). Dies ist ein wichtiger interner Qualitätscheck, welcher belegt, dass es zu keinen nachträglichen Veränderungen

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

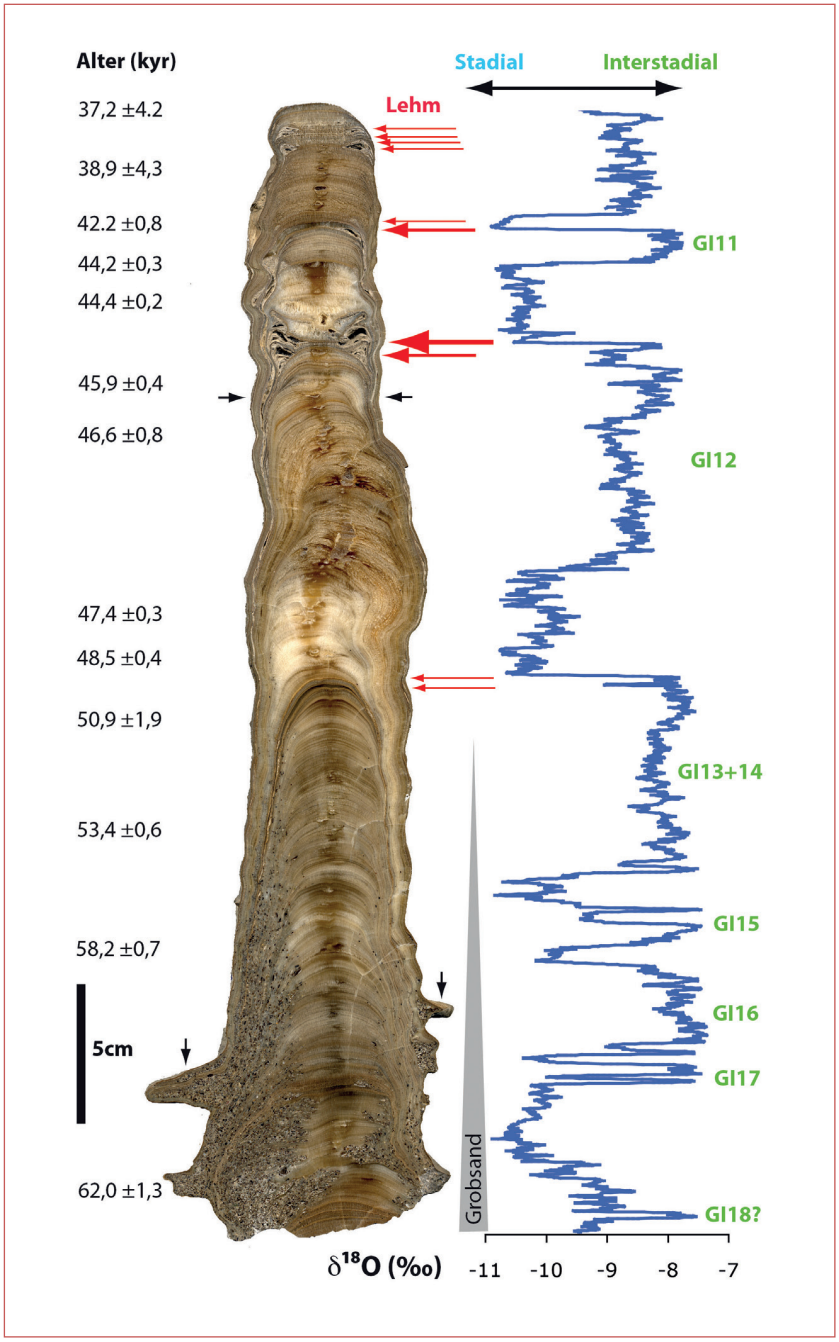

Abb. 3: Polierter Längsschnitt von Stalagmit HÖL7 und wissenschaftliche Auswertung. Die linke Spalte gibt das Alter (in Tausenden von Jahren) in unterschiedlichen Lagen der Zentralachse des Tropfsteines wieder (inklusive Messfehler). Die roten horizontalen Pfeile markieren siltig/tonige Einlagerungen, die teilweise erst an den Flanken sichtbar werden. Die kleinen schwarzen Pfeile zeigen an, wo zeitgleich Kalzit im Tropfsteinzentrum und an den markanten flossenartigen Sinterrändern oberhalb der Basis abgelagert wurde. Der graue Pfeil symbolisiert die abnehmende Beimischung von Grobsand. Rechts des Stalagmiten ist die Sauerstoff-Isotopenkurve (ca. 1600 Einzelmessungen) und eine qualitative Interpretation der großen Änderungen geplottet. Einzelne Warmphasen (GI – Grönland Interstadial) können mit jenen im grönländischen Eis gleichgesetzt werden.
Polished section of stalagmite HÖL7 and its scientific analysis. Ages (in thousands of years, including analytical uncertainties) of individual layers along the central growth axis of the stalagmite are given in the left column. Silty-clayey impurities, which are partly only visible along the flanks, are marked by red horizontal arrows. Small black arrows highlight calcite simultaneously deposited along the central axis and on the fins just above the base of this speleothem. The vertical gray arrow illustrates the decrease in coarse-grained sand upsection. The oxygen isotope curve (based on ca. 1600 individual measurements) and a qualitative climate interpretation are plotted on the right side. Individual warm phases in the stalagmite (GI – Greenland Interstadial) can be correlated to those in ice from Greenland.

des Kalzits gekommen ist, dass also die „Uran-Thorium-Uhr“ vertrauenswürdige Daten anzeigt. Betrachtet man die analytischen Fehler der einzelnen Messungen (Abb. 3) so fällt auf, dass es einige Proben gibt, deren Unsicherheitsbereich (2-Sigma bzw. 95% Wahrscheinlichkeitsintervall) recht groß ist. Diese weniger präzisen Messungen resultieren aus dem horizontweise beträchtlichen Eintrag an siltig/tonigen Verunreinigungen im Kalzit. Die Alter wurden zwar einer standardmäßigen Korrektur für detritisches Thorium unterzogen, wobei diese aber mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet ist und die jüngsten gemessenen Werte deshalb mit Vorsicht betrachtet werden müssen. Das Ende des Tropfsteinwachstums von HÖL7 kann folglich nur ungefähr mit 40 kyr angegeben werden. Insgesamt umfasst dieser kleine Stalagmit einen Zeitraum von etwa 20 kyr und zwar mitten in der Würm-Eiszeit.

Die Altersbestimmungen erlauben es zusammen mit der Internstruktur des Tropfsteins, das Alter der flossenartigen Sinterfortsätze einzugrenzen, wenn auch diese Fortsätze nicht direkt beprobt wurden.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Verfolgt man die Kalzitlagen an den Flanken des Tropfsteins hinauf, so stellt man fest, dass die Sinterfortsätze gleich alt sein müssen wie jener Kalzit, der vor etwa 46 kyr gebildet wurde (kleine schwarze Pfeile in Abb. 3). Vom Beginn des Stalagmitenwachstums vor ca. 62 kyr bis etwa 46 kyr vor heute wurde also immer wieder Sediment an den Stalagmiten angelagert. Anders formuliert: Die vollständige Auswaschung des den Stalagmiten umgebenden Sediments erfolgte erst nach 46 kyr.

GEOCHEMISCHE SPUREN DES KLIMAS

Es gibt verschiedene Methoden, um anhand der chemischen Zusammensetzung des Tropfsteinmaterials qualitative und mitunter quantitative Rückschlüsse auf die einst herrschenden Umweltbedingungen zu ziehen. Hier wird ein Parameter angewandt, der in der Klimaforschung und der Hydrogeologie eine wichtige Rolle spielt, nämlich die Sauerstoffisotopen-Zusammensetzung des Kalzits – ausgedrückt im Verhältnis der beiden Isotope ^{18}O und ^{16}O bzw. dem sogenannten $\delta^{18}O$ Wert. Solche Werte wurden an etwa 1600 Einzelproben im Abstand von 0,25 mm entlang der zentralen Wachstumsachse des Stalagmiten bestimmt, die Gesamtkurve ist in Abb. 3 zu sehen. Diese zeigt Intervalle mit relativ hohen $\delta^{18}O$ Werten zwischen –8,0 und –7,5 ‰, die mit solchen zwischen –11,0 und –10,0 ‰ alternieren. Ohne hier auf die Details der Interpretation dieser Isotopenwerte einzugehen (interessierte Leser seien z.B. auf Spötl et al., 2007, als Einstieg in die Fachliteratur verwiesen): In alpinen Speläothemen hängt der $\delta^{18}O$ Wert des Kalzits und damit der Wert des Tropfwassers von der Lufttemperatur im Herkunftsgebiet ab, d.h. niedere (negativere) Werte indizieren, dass das Klima zur betreffenden Zeit kälter war als zu Zeiten höherer $\delta^{18}O$ Werte des Kalzits. Eine quantitative Temperaturbestimmung ist ohne zusätzliche Informationen nicht möglich. Ein augenscheinliches Merkmal der HÖL7-Kurve ist der abrupte Wechsel von wärmeren und kälteren Klimaperioden. Solche Wechsel sind aus Interglazialen (längeren Warmzeiten) wie dem seit 11,7 kyr währenden Holozän gänzlich unbekannt; sie sind folglich ein Wesensmerkmal von Glazialzeiten, was mit den Altersbestimmungen im Einklang steht.

INTERPRETATION

Trotz seiner bescheidenen Länge von etwa 40 cm umfasst Stalagmit HÖL7 einen beachtlichen Zeitumfang von ca. 20 kyr, wenn auch nicht vollständig, denn das Tropfsteinwachstum wurde mehrere Male unterbrochen. Diese Stopps sind speläogenetisch sehr interessant, da sie durch Silt- und Tonablagerungen markiert sind. Solche mm-dicken Sedimentlagen können nur durch große Hochwasserereignisse erklärt werden, die den betreffenden Höhlenraum vollständig geflutet haben (der Stalagmit wuchs knapp unterhalb der Decke des dortigen großen Höhlenraumes) und zudem schwebstoffreiches Wasser über längere Zeit in diesen Rückstaubereich eingespeist haben. Weiters muss dieser Rückstau so lange gedauert haben, dass sich bei abnehmender Strömungsenergie die Feinteile absetzen und mm-dicke Lagen bilden konnten. Auch im heutigen Höhlensystem wird der Bereich des *Schwarzen Lochs* bei Hochwasserereignissen geflutet, allerdings wird nachweislich kein Sand oder Lehm angelagert, sondern diese vergleichsweise kurzfristigen (Sommer-)Hochwässer „waschen“ die Gänge (und Sinterformationen) „sauber“, bewirken also das Gegenteil.

Die Sauerstoff-Isotopenkurve erlaubt es, die vergangenen gewaltigen Überflutungsereignisse klimatisch einzuordnen. Es fällt dabei auf, dass diese bevorzugt am Ende einer der zahlreichen kurzfristigen Warmphasen (Interstadiale) während der Würm-Eiszeit stattfanden bzw. am Beginn der darauf folgenden sehr kalten Phasen (Stadiale, Abb. 4). Das Stadial vor etwa 48 kyr ist ein besonderer Fall, denn aus Tiefsee-Sedimentbohrkernen des Nordatlantiks ist bekannt, dass zu dieser Zeit der große, heute nicht mehr existente Kanadische Eisschild gewaltige Mengen an Eisbergen in den Atlantik geliefert hat, die bis auf Höhe der Biskaya gedriftet sind (das sogenannte „Heinrich 5 Ereignis“). Zudem sind gewaltige Mengen an Schmelzwasser in den Ozean geströmt und haben dessen Zirkulation (inklusive Golfstrom) beinahe zum Erliegen gebracht. Die Folge war ein sibirisch kalttrockenes Klima in Europa. Umso erstaunlicher ist die Tatsache, dass Stalagmit HÖL7 dieses Stadial aufgezeichnet hat (stark negative Isotopenwerte, siehe Abb. 3), d.h. die Höhlentemperatur muss knapp über dem Gefrierpunkt gelegen sein.

Über die Alpengletscher zu dieser Zeit ist de facto kaum Gesichertes bekannt; spätere Vorstöße der Eismassen haben die Spuren fast völlig verwischt. Es ist allerdings sehr wahrscheinlich, dass die Kargletscher der Umrandung des Kleinwalsertales als Reaktion auf die gewaltigen Klimaschwankungen pulsiert haben und während der Stadiale deutlich an Masse und

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

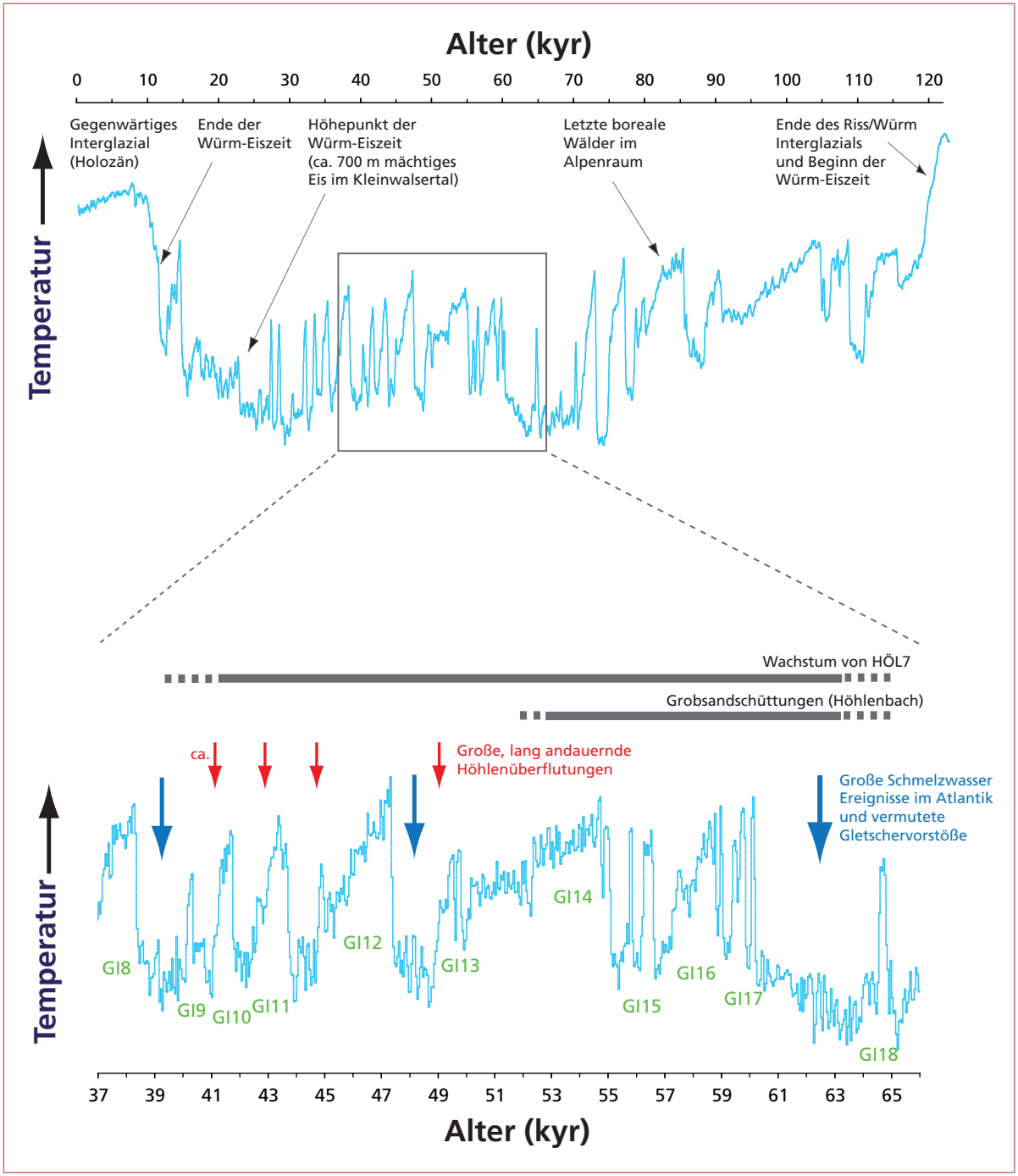

Abb. 4: Die Uran-Thorium-Datierungen erlauben es, die Wachstumsgeschichte des Hölloch-Stalagmiten mit der aus grönländischen Eisbohrungen bekannten Klimageschichte der letzten Eiszeit zu vergleichen. Das obere Diagramm zeigt die Klima(isotopen)kurve des NGRIP Eisbohrkernes aus Grönland (North Greenland Ice Core Project members, 2004) auf einer Zeitskala der letzten 120 kyr. Darunter ein vergrößerter Ausschnitt dieser Kurve gemeinsam mit Ereignissen und Zeitmarken des Stalagmiten HÖL7. Die GI Nummern sind kurzfristige Erwärmungsphasen (Grönland Interstadiale), welche auch im Verlauf der Isotopenwerte von HÖL7 aufgezeichnet sind (vgl. Abb. 3). Die Amplitude der Temperaturschwankungen im unteren Ausschnitt betrug in Grönland 15-20 °C. Für den Alpenraum gibt es zwar noch keine verlässlichen Abschätzungen; die Änderungen dürften aber deutlich geringer gewesen sein.

Uran-Thorium age determinations provide a tool to compare the growth history of the Hölloch stalagmite to the climate history recorded in deep ice drilled in Greenland. The upper panel shows the isotope curve of the NGRIP ice core from Greenland (North Greenland Ice Core Project members, 2004) over the last 120 kyr. The panel below is a close-up of this curve showing some events and time marks dated in stalagmite HÖL7. The GI numbers refer to short-lived warmings (Greenland Interstadials), which are well recorded by the isotope data in HÖL7 (cf. Fig. 3). The amplitude of these temperature swings in the older part reached 15-20°C on Greenland. The amplitude for these climate shifts in the alpine region is not well known but was likely smaller.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Länge gewonnen haben. Möglicherweise vereinigten sich in den Stadialen einige Gletscher zu einem Talgletscher, der sodann in Richtung Oberstdorf floss und die damalige Entwässerung des Höllochs (vgl. die heutige Sägebachquelle) blockierte. Die unmittelbare Folge wäre ein Rückstau innerhalb des Höhlensystems. Vermutlich führten die Klimarückschläge am Ende der Interstadiale weiters zu einem verstärkten Eintrag von Sedimentmaterial in die Höhle, der durch die weitgehende Zerstörung der alpinen Vegetationsdecke und den damit verbundenen Bodenabtrag erklärt werden kann.

Die klimatische Aufzeichnung von HÖL7 endet vor ca. 40 kyr, übrigens zu etwa jenem Zeitpunkt, als der moderne Mensch in Mitteleuropa auftauchte. Aus dem jüngeren Abschnitt der Würm-Eiszeit sind bislang keine Sinterbildungen aus dem Hölloch oder anderen benachbarten Höhlen bekannt. Vielleicht ist dies ein Hinweis auf die zunehmende Klimaverschlechterung verbunden mit dem finalen Eisvorstoß, der um 30 kyr vor heute begann (z.B. Starnberger et al., 2011) und um 25 kyr eine Eishöhe in etwa auf 1700 m Seehöhe erreichte (van Husen, 1987); der Gottesacker selbst wies damals nur eine bescheidene Lokalvergletscherung auf.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Familie Drechsel, Mittelberg, sowie beim Verein für Höhlenkunde in Sonthofen e.V. für logistische Unterstützung im Zuge der Forschungsarbeiten im Hölloch. Prof. Larry Edwards und Dr. Hai Cheng sei für die Betreuung im radiometrischen Labor in Minneapolis gedankt, Manuela Wimmer für die Mitarbeit im Innsbrucker Isotopenlabor und Detlev K. Richter und Nico Goldscheider für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Diese Studie wurde teilweise durch das FWF Projekt P197880 finanziert.

LITERATUR

Boch, R., Cheng, H., Spötl, C., Edwards, R.L., Wang, X. & Häuselmann, P. (2011): NALPS: a precisely dated European climate record 120–60 ka. – Climate of the Past Disc., 7: 1049-1072.

Burkhalter, R. (2009): Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM). – Map 1:500000, Bundesamt fur Landestopographie, Bern.

Goldscheider, N. (2005): Fold structure and underground drainage pattern in the alpine karst system Hochifen-Gottesacker. – Eclogae geol. Helv., 98: 1-17.

Goldscheider, N. & Göppert, N. (2006): Das Wasser im Hölloch – Hydrogeologie. – In: Stautz, G. & Wolf, A. (Hrsg.): Das Hölloch im Mahdtal, 245-253, Sonthofen (Höhlenverein Sonthofen).

Goldscheider, N. & Hötzl, H. (2000): Tektonik und Karstentwässerung. – Karst und Höhle, 2000/2001: 51-82.

Lauritzen, S.E. (1993): Natural environmental change in karst: the Quaternary record. – In: Karst Terrains, Environmental Changes, Human Impact (Hrsg. P.W. Williams), Catena Suppl., 25: 21-40.

Niggemann, S. (2006): Das Hölloch als Archiv des Paläoklimas. – In: Stautz, G. & Wolf, A. (Hrsg.): Das Hölloch im Mahdtal, 254-257, Sonthofen (Höhlenverein Sonthofen).

North Greenland Ice Core Project members (2004): High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. – Nature, 431: 147-151.

Spötl, C., Offenbecher, K.-H., Boch, R., Meyer, M., Mangini, A., Kramers, J. & Pavuza, R. (2007): Tropfstein-Forschung in österreichischen Höhlen – ein Überblick. – Jb. Geol. Bundesanst., 147: 117-167.

Starnberger, R., Rodnight, H. & Spötl, C. (2011): Chronology of the Last Glacial Maximum in the Salzach Palaeoglacier Area (Eastern Alps). – J. Quat. Sci., 26: 502-510.

Stautz, G. & Wolf, A. (2006): Das Hölloch im Mahdtal. – Sonthofen (Höhlenverein Sonthofen).

van Husen, D. (1987): Die Ostalpen und ihr Vorland in der letzten Eiszeit (Würm). – Karte 1 : 500.000, Wien (Geol. Bundesanstalt).

Veit, H. (2002): Die Alpen – Geoökologie und Landschaftsentwicklung. – Stuttgart (Ulmer).

Wagner, T. (2011): Datierung fluviatiler Höhlensedimente mittels kosmogener Nuklide am Beispiel des Grazer Berglandes. – Die Höhle (dieser Band).

Wolf, A. (2006): Vermessung und Dokumentation der Höhle. – In: Stautz, G. & Wolf, A. (Hrsg.): Das Hölloch im Mahdtal, 273-286, Sonthofen (Höhlenverein Sonthofen).

Wolff, E.W., Chappellaz, J., Blunier, T., Rasmussen, S.O. & Svensson, A. (2010): Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record. – Quat. Sci. Rev., 29: 2828-2838.

Wurth, G., Niggemann, S., Frank, N., Mangini, A. & Richter, D.K. (2000): Jungquartäre Stalagmiten aus Höhlen des Gottesackergebietes (Allgäuer Alpen) als Archiv für Paläoumweltbedingungen. – Karst und Höhle, 2000/2001: 183-198.

Wurth, G., Niggemann, S., Richter, D.K. & Mangini, A. (2004): The Younger Dryas and Holocene climate record of a stalagmite from Hölloch Cave (Bavarian Alps, Germany). – J. Quat. Sci., 19: 291-298.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Die Höhle

Jahr/Year: 2011

Band/Volume: 062

Autor(en)/Author(s): Spötl Christoph, Boch Ronny, Wolf Andreas

Artikel/Article: Eiszeitliche Klimadynamik im Spiegel eines Stalagmiten aus dem Hölloch (Bayern/Vorarlberg) 46-53