

Zerbrochene Höhlensinter und Kryocalcite als Indikatoren für eiszeitlichen Permafrost im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid-Erdbach (N-Hessen)

ZUSAMMENFASSUNG

Zerbrochene Sinter und Calcit-Kristallsande markieren das spektakuläre Bruchmuster des zentralen Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid-Erdbach (N-Hessen). Die vertikal und parallel bis subparallel zum Sinterlagenbau orientierten Brüche entstanden durch Frostsprengung. Die Calcite der Sande kristallisierten aufgrund von Spurenelementanreicherungen sowie C/O-Isotopenzusammensetzung unter kaltzeitlichen Bedingungen.

Die jüngste Kryocalcitgeneration spiegelt mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von -1.0 bis -3.1 ‰ und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von -13.7 bis -17.3 ‰ und einem U/Th-Alter von 23–24 ka ein langsames Ausfrieren von Höhlenwässern nach dem Interstadial 3 der Weichsel-Eiszeit wider. Aufgrund der Dominanz des Rhomboederkristalltyps dürften die Kristallsande unter einem sich vertiefenden Permafrostboden entstanden sein. Eine Mehrphasigkeit von Sinterbruch und Kryocalcitwachstum deutet auf eine längere weichselzeitliche Entstehung im jüngeren Teil des untersuchten Stalagmiten hin (U/Th-Datierung des jüngsten Abschnitts vor Permafrostzeiten: 75,8 ka). Die wiederholte Kombination von durch Frostsprengung zerbrochenen Sintern und Kryocalcitwachstum stellt einen neuen Indikator zur Entschlüsselung der Übergänge von Interstadialen zu Stadialen während der Weichselkaltzeit im Periglazialraum Mitteleuropas dar.

ABSTRACT

Fractured speleothems and cryogenic cave calcites as indicators of glacial permafrost in the Herbstlabyrinth-Advent Cave system (N' Hesse)

Speleothem fragments and calcite crystal sands are indicative of the spectacular fragmentation pattern of the central stalagmite of the „Weihnachtsbaum-Halle“ in the Herbstlabyrinth-Advent cave system near Breitscheid-Erdbach (northern Hesse). The fractures are oriented perpendicular and parallel to subparallel to the speleothem layering and were caused by freeze-thaw weathering. According to the trace-element and stable isotope composition the calcite crystal sands formed under cold conditions. The youngest generation of cryogenic calcites, dated to 23–24 ka by U/Th, is indicative of slow freezing of cave waters after the Weichselian Interstadial no. 3 and shows $\delta^{13}\text{C}$ values from -1.0 to -3.1 ‰ and $\delta^{18}\text{O}$ values from -13.7 to -17.3 ‰. Based on the dominant occurrence of the rhombohedral crystal type in the crystal sands we introduce a genetic model of a deepening permafrost soil. The multiphase speleothem fracturing and occurrence of cryogenic calcite suggest an extended period of formation during the Weichselian of the studied stalagmite (the age of the top of stalagmite below the oldest cryogenic calcites is 75.8 ka).

The repeated combination of freeze-thaw weathering of speleothems and the formation of cryogenic calcites represents a new indicator for the decoding of the interstadial/stadial transitions during the Weichselian ice age in the periglacial area of central Europe.

Detlev K. Richter

Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität-Bochum
44801 Bochum
detlev.richter@rub.de

Simon Mischel

Institut für Geowissenschaften, Universität Mainz, Johann-Joachim-Becher-Weg 21,
44128 Mainz
simon.mischel@googlemail.com

Ingo Dorsten

Am Schleidt 9, 35745 Herborn
ingo.dorsten@hoko-data.de

Augusto Mangini

Forschungsstelle Radiometrie, Heidelberger Akademie der Wissenschaften
Im Neuenheimer Feld 229,
69120 Heidelberg
augusto.mangini@iup.uni-heidelberg.de

Rolf D. Neuser

Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität-Bochum
44801 Bochum
rolf.neuser@rub.de

Adrian Immenhauser

Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität-Bochum
44801 Bochum
adrian.immenhauser@rub.de

Eingelangt: 08.06.2011
Angenommen: 18.07.2011

EINLEITUNG

Zerbrochene Stalagmiten und Bodensinter sind in mitteleuropäischen eisfreien Höhlen ein weitverbreitetes Phänomen und sind bis in neuere Zeit kontrovers diskutiert worden. Sie wurden entweder auf die fließende Tätigkeit von ehemals vorhandenem Höhleneis oder auf Erdbebeneinwirkung zurückgeführt (u.a. Kempe 1989). Spöcker (1981) deutete z.B. die Sinterzerstörung im Geisloch (Fränkische Schweiz) als Folge von Eisdruck, während Moser & Geyer (1981) dort Erdbeben als Ursache sahen. Insgesamt können natürliche Speläothemschäden nach Kempe & Henschel (2004) durch punktuelle (Inkasion, Sedimentrutschung, -kompaktion oder -erosion), lokale (Frostspaltung, Überschwemmung oder Austrocknung) oder regionale (Eisfüllung oder Erdbeben) Ereignisse entstehen. Aufgrund der weiten Verbreitung von Sinterschäden in mitteleuropäischen Höhlen dürfte jedoch die Genese vorrangig überregionale oder verschiedene lokale Ursachen haben. Erst die erneute Interpretation von fest-

gesinterten Gesteins- und Speläothemfragmenten an Höhlenwänden – teilweise weit oberhalb des heutigen Höhlenbodens – als Eishaftungen durch Pielsticker (1998) hat zu klareren Genesevorstellungen geführt. Schließlich verhalfen Modellrechnungen für den Temperaturverlauf in Höhlen zwischen Kalt- und Warmzeiten (Pielsticker 2000) der Eis- bzw. Frostursache zur Erklärung zerbrochener Sinter in mitteleuropäischen Höhlen zum Durchbruch. So werden die weit verbreiteten natürlichen Sinterschäden Mitteleuropas nach Kempe (2008) vorrangig „mit dem wiederholten Tauen und Frieren von Eis und der kleinen Bewegung der Eismasse beim weiteren Abkühlen in den Permafrostperioden während der Hochglaziale“ erklärt. Sicherlich ist diese Erklärung äußerst schlüssig, aber ein Eisbeleg ist allein aufgrund der Bruchbeobachtung nicht gegeben.

Den Beleg für ehemaliges Eis in heute eisfreien Höhlen Mitteleuropas haben schließlich Žák et al. (2004) und

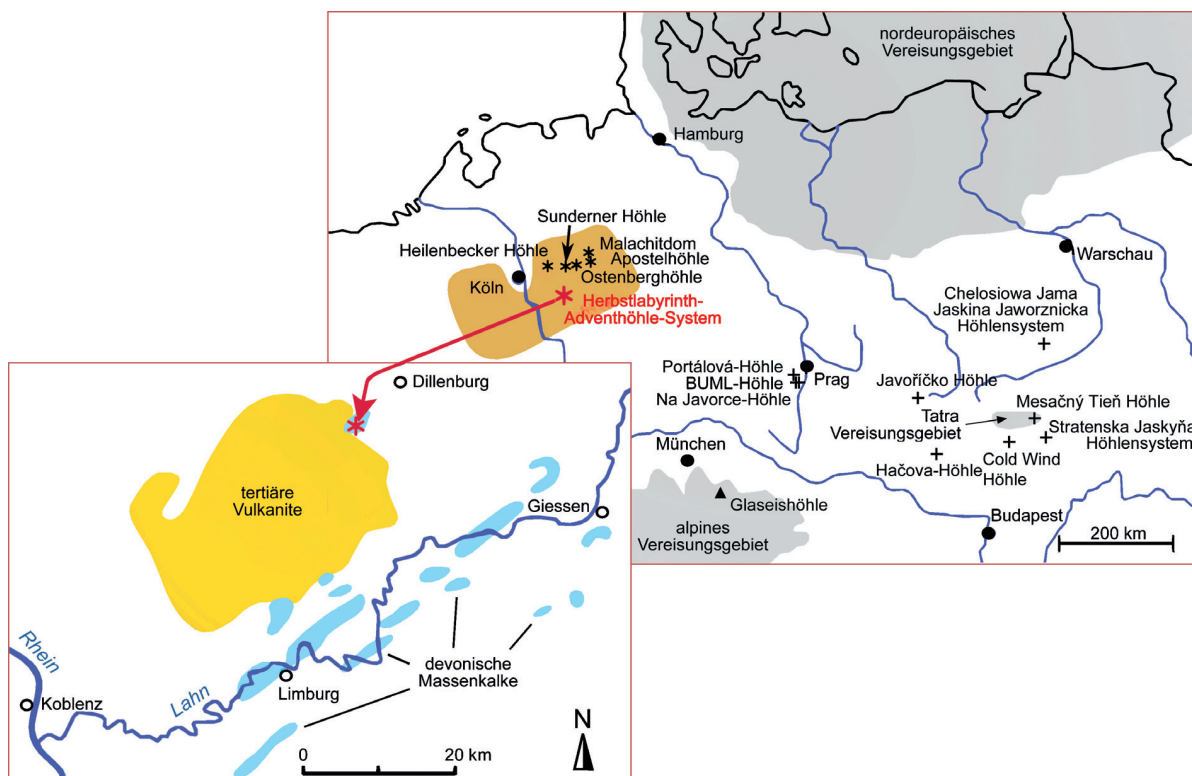


Abb. 1: Übersichtsskizzen zur Lage der bislang bekannten von der Bochumer Arbeitsgruppe bearbeiteten Höhlen mit Kryocalciten im Rheinischen Schiefergebirge (oben rechts, braun unterlegt) und zur geologischen Positionierung des Herbstlabyrinth-Adventhöhle-Systems im Breitscheider Massenkalk südwestlich von Dillenburg (unten links). In der Übersichtsskizze sind zusätzlich die Vorkommen grobkörniger Kryocalcite des östlichen Mitteleuropa nach Žák et al. (2004, 2009, 2011b) (+) und der Alpen nach Richter et al. (2009) (▲) vermerkt.

Locations of previously known caves containing cryogenic calcite in the Rhenish Slate Mountains (studied by the Bochum working group; brown area in top right panel) and simplified geological map of the Herbstlabyrinth-Advent Cave system developed in the Breitscheid Massenkalk southwest of Dillenburg (lower left panel). The upper right panel also shows occurrences of coarsely crystalline cryogenic calcite in eastern Central Europe (Žák et al., 2004, 2009, 2011b) (+) and in the Alps (Richter et al. (2009)) (▲).

Richter & Niggemann (2005) erbracht, indem sie auf Höhlenböden Calcitpartikel mit anormal leichter O-Isotopenzusammensetzung (bis -20‰) gefunden haben. Die Genese derartiger Partikel ist in Höhlen ohne Thermaleinfluss durch langsames Ausfrieren karbonathaltiger Wässer zu erklären, wobei das schwerere ^{18}O -Isotop ins Eis eingebaut wird, sodass sich sehr negative O-Isotopenwerte für die kryogenen Calcite ergeben. In den letzten Jahren konnten somit ehemalige Eisbildungen für sechs Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges belegt werden (vgl. Abb. 1): Osterberghöhle (Richter & Niggemann 2005), Malachitdom (Richter & Riechelmann 2008), Heilenbecker Höhle (Richter et al. 2008, Richter et al. 2009 a), Sun-

derner Höhle (Richter et al. 2009 b), Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System (Rätselhalle) (Richter et al. 2010 a), Apostelhöhle (Richter et al. 2010 b). Wenn es nun – wie in Permafrostzeiten – längere Zeiten mit Temperaturbedingungen unter 0°C für Höhlenbereiche fernab von Eingängen gab, ist die Genese von zerbrochenen Sinterformationen leicht verständlich, da das gefrierende Wasser an Kristall- sowie Spaltflächen als auch an Trennflächen für Expansion sorgt.

In der vorliegenden Studie wird die Wechselbeziehung von kryogenen und nichtkryogenen Ereignissen am Beispiel des zentralen Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System von Breitscheid diskutiert.

GEOLOGISCH-GEOGRAPHISCHER ÜBERBLICK

Das 8 km südwestlich von Dillenburg und direkt nordwestlich des tertiären Basaltgebiets des Westerwalds gelegene Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System (vgl. Abb. 1) wurde im Winter 1993/94 bei Steinbrucharbeiten in oberdevonischem Massenkalk entdeckt (Grubert 1996). Die Fazies des hier dickbankigen Iberger Kalksteins entspricht nach Krebs (1966) dem Übergang von einem Stromatoporen-Korallen-Riff zur mikritbetonten Lagunenfazies des oberdevonischen Atolls von Breitscheid/Langenaubach. Der Riffkomplex stellt ein isoliertes Kalkvorkommen auf einem Diabasvulkan im rhenohertzynischen Becken dar (Krebs 1971).

Das flachphreatisch gebildete Höhlensystem (Dorsten et al. 2005) spiegelt mehrere langfristig wirksame Grundwasserspiegel wider. Kaiser et al. (1998) und Kaiser & Keller (1999) konnten vier Karstniveaus

rekonstruieren, die heute in der vadosen Zone mit einem temporär aktiven Flusssystem zum östlich gelegenen Vorfluter Dill liegen. Von den mindestens drei warmzeitlichen Sintergenerationen konnten bislang nur die beiden jüngsten Sequenzen durch U/Th-Datierungen belegt werden (Generation 1 älter als 65 ka (1 ka = Tausend Jahre) vor heute – frühwürmzeitliche Warmphase, Generation 2 jünger als 13,3 ka vor heute – überwiegend Holozän) (Mischel 2010).

Das Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System liegt zwischen den Ortschaften Erdbach und Breitscheid (Abb. 2) und umfasst eine Gesamtlänge von 5800 m (Kataster-Nr. 5315/51). Der untersuchte Stalagmit stellt die zentrale Sinterformation der „Weihnachtsbaum“-Nebenhalle des Herbstlabyrinth-Bereichs des Höhlensystems dar (Abb. 3). Die nördlich oberhalb des

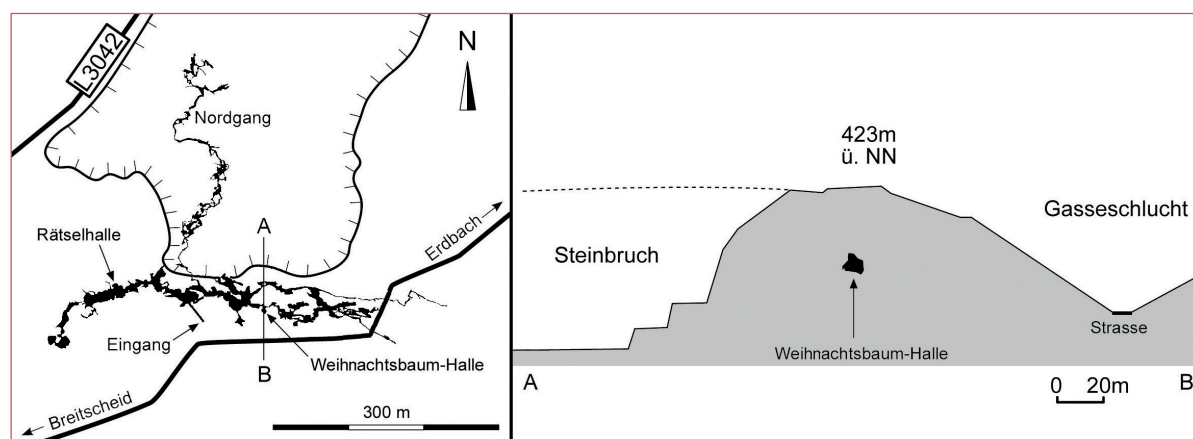


Abb. 2: Vereinfachte Skizze zur Lage der Weihnachtsbaum-Halle im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System (links; westlicher Teil = Herbstlabyrinth, östlicher Teil = Adventhöhle) und Profilschnitt (A/B) zur Verdeutlichung der Lage der Weihnachtsbaum-Halle zur Geländeoberfläche (rechts).

Sketch showing the location of the „Weihnachtsbaum-Halle“ in the Herbstlabyrinth-Advent cave system (left panel; western part = Herbstlabyrinth, eastern part = Advent Cave) and cross section illustrating the position of the „Weihnachtsbaum-Halle“ relative to the ground surface (A/B; right panel).

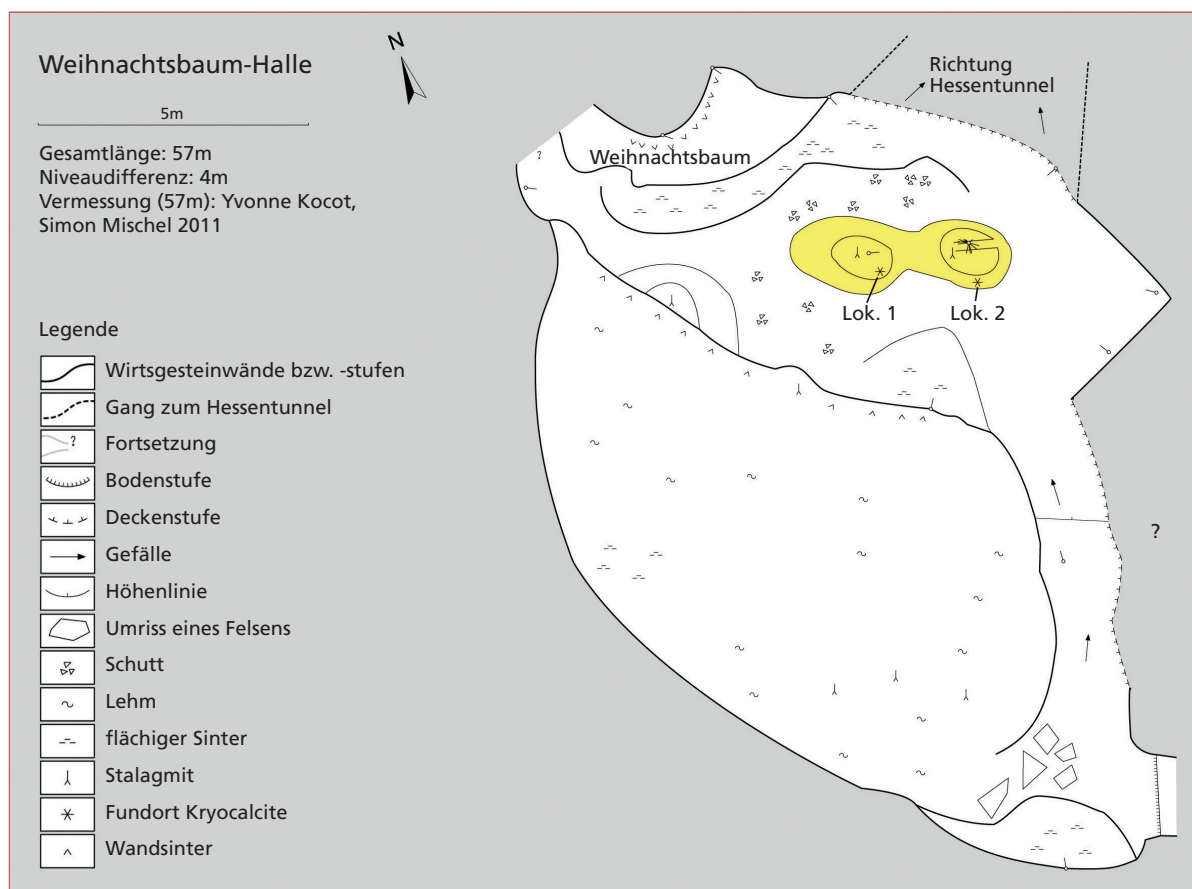


Abb. 3: Grundriss der Weihnachtsbaum-Halle (Nebenhalle der Adventhöhle) mit dem untersuchten zentralen Stalagmitenensemble (gelb).

Plan view of the „Weihnachtsbaum-Halle“ (side chamber of the Advent Cave) and the location of the studied stalagmite ensemble (yellow).

Hauptgangs „Hessentunnel“ gelegene Nebenhalle liegt bei 390 m über dem Meeresspiegel und weist eine Felsüberdeckung von etwa 30 m auf (Abb. 2 rechts). Die

durchschnittliche Jahrestemperatur der Luft beträgt etwa 9 °C und die Bewetterung der Nebenhalle ist als gering zu bezeichnen.

FUNDSITUATION

Der zentrale Stalagmit der Weihnachtsbaum-Halle stellt ein klobiges Sinterensemble mit über 3 m Basisdurchmesser dar, der nach Südseitenansicht einem Kalkstein (Versturzblock?) aufsitzt. Der Stalagmit ist durchgängig von Trennfugen bis zu über 3 cm Öffnungsweite durchzogen (Abb. 4a). Spaltenfüllungen aus Kristallsanden zeichnen das Netzwerk nach. Die lockeren weißbeigen Füllungen werden vornehmlich aus 0,2 bis 3,5 mm großen Rhomboedern und untergeordnet Rhomboederaggregaten calcitischer Zusammensetzung aufgebaut (Abb. 4b). Teilweise überdecken diese Formen auch die Stalagmitenoberkante. Diesem Bereich ist die Probe 1 entnommen. Im Fußbereich des Stalagmiten, wo Probe 2 entnommen wurde, kommen auch beigefarbene Rhomboeder und

besonders Rhomboederskelette bis über 10 mm vor. Selten konnten hier auch beigefarbene zopf- sowie schnabelförmige Calcitpartikel beobachtet werden. Weiterhin konnte bereits im Gelände im unteren Stalagmiten an Spaltenrändern eine mehrphasige Sinterabfolge ausgemacht werden:

1. Stalagmitensinter
2. Flowstone nach Sinterbruch
3. Einlagerung von Kristallsanden
4. Verfestigung der Kristallsande

Für die genauere Interpretation über Dünnschliffuntersuchungen wurden zwei Proben entnommen, ohne das Gesamtbild des Stalagmitenensembles der Weihnachtsbaum-Halle zu zerstören.

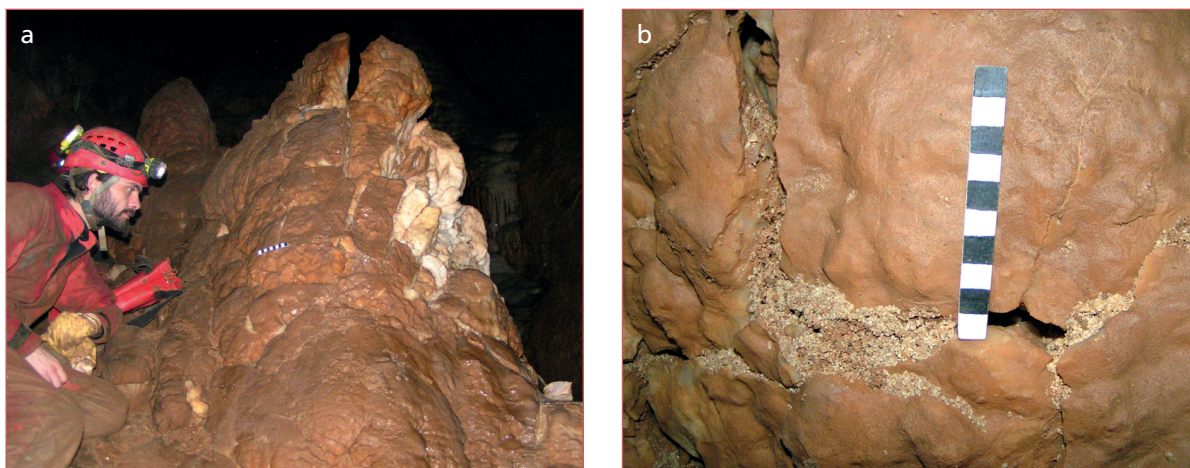


Abb. 4: Geländefotos des zerbrochenen Stalagmiten in der Weihnachtsbaum-Halle: a) Übersichtsaufnahme des Rissmusters, b) Detailaufnahme zur Verfüllung der Spalten mit Kristallsanden; Länge der Messlatte 10 cm.
Fractured stalagmite in the „Weihnachtsbaum-Halle“: a) overview of the fracture pattern, b) close-up of the fractures filled by calcite crystal sand. Length of scale bar 10 cm.

METHODIK

Eine erste Charakterisierung des Partikelbestands der Kristallsande erfolgte nach Ultraschall-Reinigung unter einem binokularen Auflichtmikroskop. Zur Dokumentation der äußeren Konturen der Kleinsinterformen wurden goldbesputterte Präparate an einem hochauflösenden Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (HR-FEM) vom Typ LEO/Zeiss 1530 Gemini untersucht.

Die genaue mineralogische Zusammensetzung der Karbonatphasen wurde mit einem Philips-Zählrohrdiffraktometer PW 1050/25 mit AMR Monochromator unter Einsatz von CuK_α -Strahlung (40 kV, 35 mA) ermittelt (Details siehe Füchtbauer & Richter 1988). Die Kathodolumineszenz-Untersuchung wurde am (KL)-Mikroskop vom Typ Lumic HC1-LM (Neuser et al. 1996) an beidseitig polierten, mit Gold besputterten

Dünnschliffen von Sinterproben sowie von kunstharzgetränkten Kristallsanden durchgeführt. Dabei lassen sich mit einem angeschlossenen hochauflösenden Spektroskop Mn^{2+} sowie Sm/Dy-Anteile bis in den einstelligen ppm-Gehalt nachweisen (Richter et al. 2003). Die Isotopenzusammensetzung ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) der Calcite wurde nach herkömmlicher Aufbereitung mit einer Gasbench mit einem Delta S Massenspektrometer (Finnigan MAT) ermittelt und gegen VPDB geeicht. Die 1σ -Reproduzierbarkeit der Messwerte lag bei der Analytik im Labor der Isotopengeochemie der Ruhr-Universität Bochum für $\delta^{13}\text{C}$ bei 0.04 ‰ und für $\delta^{18}\text{O}$ bei 0.08 ‰ (vgl. Richter et al. 2010 a).

Die Alterdatierungen wurden mittels TIMS (Thermoionen-Massenspektrometrie)-U/Th-Methodik an der Forschungsstelle der Heidelberger Akademie der



Abb. 5: Kristallsand aus rhomboedrischen Calcitkristallen von Lokalität 1.
Crystal sand consisting of rhombohedral calcite crystals from Location 1.

Wissenschaften durchgeführt (Methodik siehe Scholz & Hoffmann 2008). Die Isotopenmessungen von Th und U wurde über ein Feststoffmassenspektrometer

der Firma Finnigan, Modell MAT 262 RPQ, ermittelt. Mess- und Arbeitsroutine für die Uran-Thorium-Datierungen erfolgten in Reinstraumlaboren.

ERGEBNISSE

Petrographie

Die meisten Partikel der Kristallsande des Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle (Abb. 4 und 5) zeichnen sich durch Kristalle mit rhomboedrischem Habitus aus. Diese Rhomboederkristallsinter sensu Richter et al. (2008) machen bei den weißen bis hellbeigen Ablagerungen der Lokalität 1 über 90% des Partikelspektrums aus (Rest: klare Einzelkristalle und Kristallaggregate sowie nicht genauer bestimmter kalkiger und nichtkarbonatischer Detritus). Leicht gewölbte sowie stufenförmig ausgebildete Kristallflächen zeichnen die Einzelkristalle (Abb. 6a) und Kristallaggregate aus.

Offensichtlich setzen sich die Rhomboeder aus einer Vielzahl subparallel orientierter Kristallindividuen zusammen, was auch die durchlichtmikroskopisch zu beobachtende Undulosität der Rhomboeder ausmacht. Häufig sind an den Kanten und Ecken der Kristalle Anwächse ausgebildet (Abb. 6b), wodurch sich Übergänge zu Skelettkristallsintern andeuten. Bei der Lokalität 2 (unterer Flankenbereich des untersuchten Stalagmiten) treten die zuvor skizzierten, 0,2–3,5 mm großen Rhomboeder ebenfalls auf, aber hier dominieren bis über 10 mm große hell- bis dunkelbeige Rhomboeder mit starkem Kantenwachstum und domänenartiger Ausbildung von Subindividuen

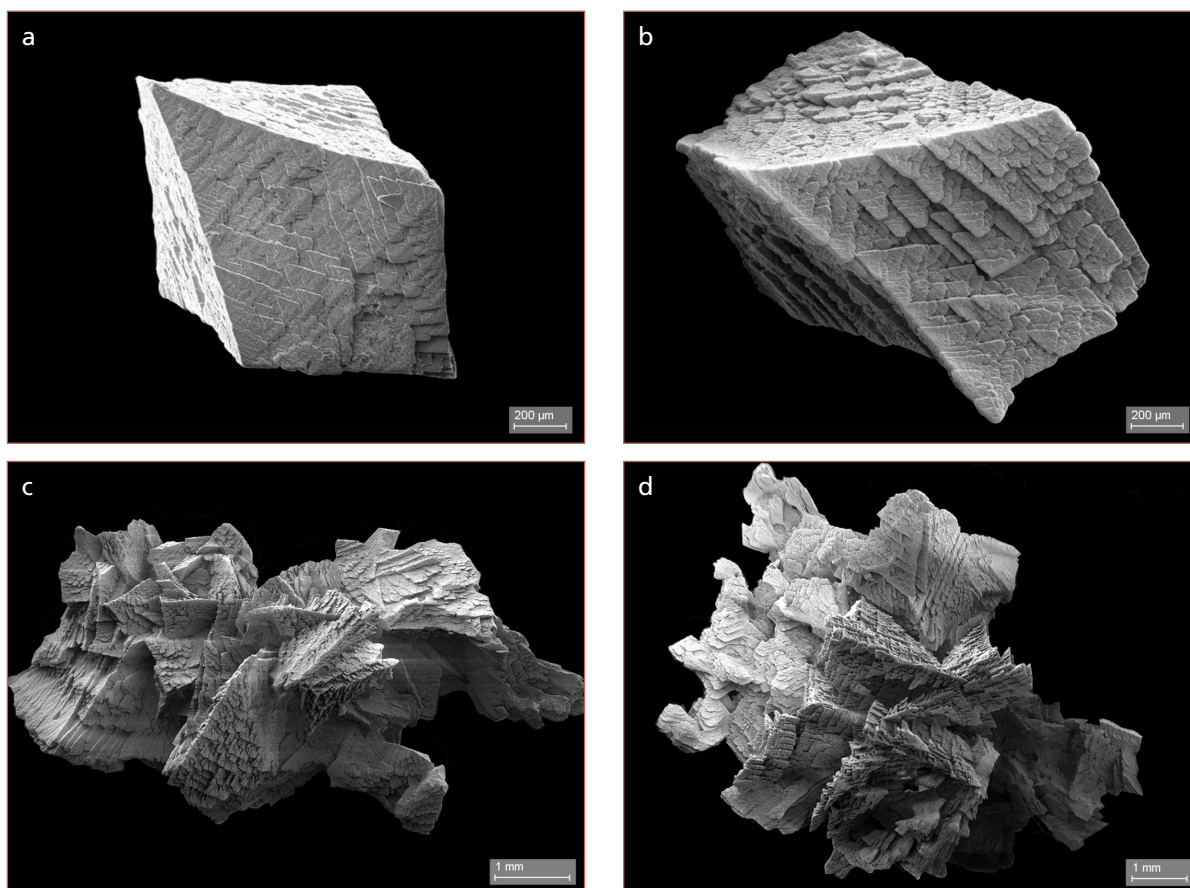


Abb. 6: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von weißen bis hellbeigen Kryocalciten der Lokalität 1 (a–b) und von hell- bis dunkelbeigen Kryocalciten der Lokalität 2 (c–d): a. Rhomboederkristallsinter mit gestuften und leicht gewölbten Kristallflächen. b. Rhomboeder mit Kantenanwüchsen, c. Aggregat von Rhomboederskelettkristallen mit domänenartiger Ausbildung von Subkristallen, d. Aggregat von Rhomboederskelettkristallen mit hahnenkammartiger Peripherie (links). Scanning electron microscopy images of white and light-beige cryogenic calcite from Location 1 (a–b) and light- to dark-beige samples from Location 2 (c–d): a) rhombohedral calcite crystals with stepped and slightly saddle-shaped faces. b) rhombohedra with preferred growth along crystal edges, c) aggregate of rhombohedral crystals showing domain-like subcrystals, d) aggregate of rhombohedral crystals with cockscomb-like shape (left).

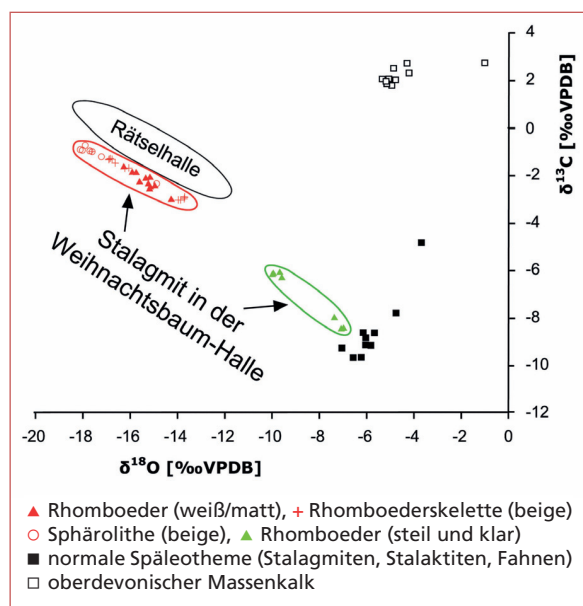


Abb. 7: C/O-isotopische Zusammensetzung der kryogenen Calcite des zentralen Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle im Vergleich zur C/O-Isotopie von Kryocalciten der Rätzelhalle desselben Höhlensystems nach Richter et al. (2010a). Zusätzlich ist die C/O-isotopische Zusammensetzung klarer Calcitkristallaggregate der Kristallsande des Weihnachtsbaum-Stalagmiten und die entsprechende Isotopie normaler Speläotheme (Stalagmiten, Stalaktiten, Fahnen) desselben Höhlensystems nach Richter et al. (2010a) eingetragen worden.

C/O-isotope composition of cryogenic (orange symbols) and cold water (green symbols) calcites of the central stalagmite from the "Weihnachtsbaum-Halle" compared to cryogenic samples from the Rätzelhalle (same cave; Richter et al., 2010a). Also shown is the composition of normal speleothems (stalagmites, stalactites, draperies) of the same cave system (Richter et al., 2010a).

(Abb. 6c). Diese Skelettkristallsinter sind nicht selten blättchenförmig mit hahnenkammartiger Peripherie ausgebildet (Abb. 6d). Skelettkristallsinter wurden bereits von Žák et al. (2004) aus Höhlen des östlichen Mitteleuropa und von Richter et al. (2009b) aus der Großen Sunderner Höhle des Sauerlands beschrieben. Weiterhin treten – allerdings untergeordnet – bei der Lokalität 2 bis über 1 cm große beigefarbenen sphärolithische Kleinsinter auf. Dabei dominieren Zopfsinter und Sphärolithe mit schnabelartiger äußerer Form, wie sie von Richter et al. (2008) aus der Heilenbecker Höhle des Bergischen Landes genauer beschrieben worden sind. Alle zuvor erwähnten, aufgrund ihrer O-Isotopenzusammensetzung (Abb. 7) als kryogen entstanden erkannten Speläopartikel zeichnen sich lichtmikroskopisch durch einen charakteristischen Zonarbau aus. Der innere Teil ist stark (durch Fluideinschlüsse?) pigmentiert, und lediglich die Kantenbereiche erweisen sich als einschlussärmer. Der Einschlussreichtum dürfte die matte Erscheinungsform der weißen bis beigefarbenen Kryocalcite verursachen.

Vereinzelte treten calcitische Kristallaggregate auf, die aus klaren Kristallen mit steilen Rhomboederflächen aufgebaut sind und sich C/O-isotopisch von den Kryocalciten unterscheiden (Abb. 7).

Zusammensetzung der Kristallsande

Die massenspektrometrischen Untersuchungen wurden besonders auf die unverfestigten Partikel mit rhomboedrischem Habitus fokussiert, da hiermit die Hauptpartikeltypen der beiden untersuchten Lokalitäten erfasst worden sind und darüber hinaus eine Vergleichsmöglichkeit zur bereits bekannten Geochemie analoger Partikel der Rätzelhalle (Richter et al. 2010 a) bestand. Wie die rhomboedrischen Partikel der Rätzelhalle bestehen auch diese Kristalle röntgenographisch aus nahezu stöchiometrischem Calcit. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da nach Richter et al. (2010 a) auch das Wirtsgestein (oberdevonischer Massenkalk) aus Mg Calcit besteht.

Die C/O-Isotopenzusammensetzung der rhomboedrischen Partikel der beiden Weihnachtsbaumlokalitäten ist mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werten zwischen $-1,0$ und $-3,1$ ‰ und mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten zwischen $-13,7$ und $-17,3$ ‰ sehr ähnlich (Abb. 7). Lediglich beigefarbene Sphärolithe der Lokalität 2 erreichen schwerere $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (bis $-0,8$ ‰) und leichtere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (bis $-18,1$ ‰). Insgesamt ergibt sich ein Trend zu schwererer C-Isotopie mit leichter O-Isotopie, wie es für Calcitbildungen bei langsamem Ausfrieren kalkgesättigter Höhlenwässer typisch ist (u.a. Richter et al. 2010 a, Richter et al. 2010 b). Die Calcite normaler Speläotheme (Stalagmiten, Stalaktiten, Sinterfahnen) der gleichen Höhle sind mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werten zwischen $-4,9$ bis $-10,0$ ‰ C-isotopisch leichter und mit $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von $-3,7$ bis $-7,0$ ‰ O-isotopisch schwerer zusammengesetzt als die Kryocalcite mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von $-0,8$ bis $-3,1$ ‰ und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von $-13,7$ bis $-18,1$ ‰ (Abb. 7). Eine vermittelnde Position zwischen den Kryocalciten und den normalen Speläothemen nehmen klare Kristallaggregate aus Calciten mit steilen Rhomboederflächen der Lokalität 2 mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von $-6,1$ bis $-8,5$ ‰ und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von $-7,0$ bis $-10,0$ ‰ ein (Abb. 7).

Petrographie des jüngsten Stalagmitenabschnitts

Das spektakuläre, durch weißbeige Kristallsande nachgezeichnete Rißmuster des Stalagmitenensembles der Weihnachtsbaum-Halle (Abb. 4) ist an Vertikalbrüchen ausgebildet, was orientierungsmäßig den langen Kristallgrenzen der kolumnaren Calcite des Stalagmiten entspricht. Neben den Vertikalbrüchen sind

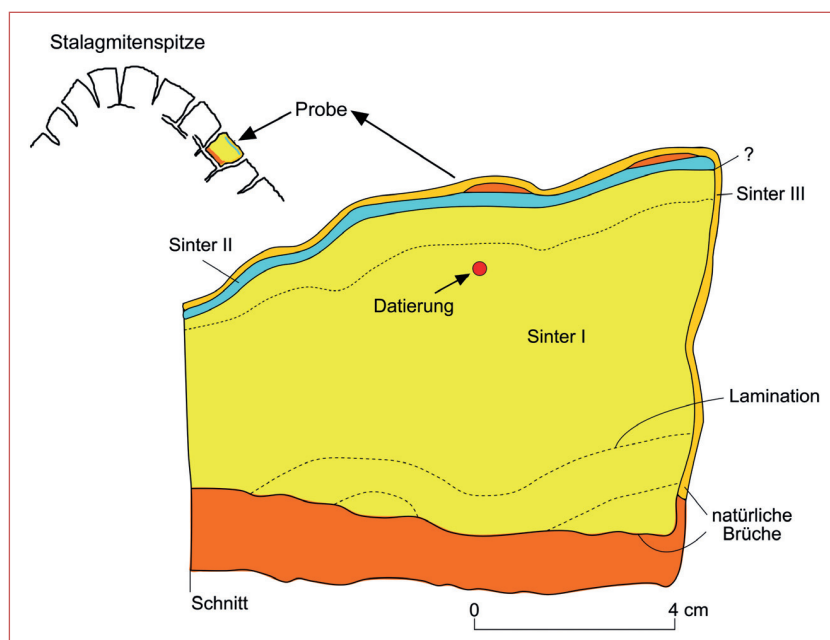


Abb. 8: Zeichnung eines Schnitts durch eine Platte des jüngsten Abschnitts der untersuchten Stalagmitenflanke.

Gelb = Sinter I mit Probenpunkt der U/Th-Datierung, blau = Sinter II, ocker = Sinter III, braun = älteres, verfestigtes Kryocalcitniveau, rechts = Vertikalspalte, unten = subparallel zur Lamination des Stalagmiten angelegte Spalte.

Sketch of a section through the youngest portion of the studied stalagmite flank. Yellow = speleothem generation I with sampling point for U/Th dating, blue = speleothem generation II, ochre = speleothem generation III, brown = older, lithified cryogenic calcite, right = vertical fracture, bottom = fracture oriented sub-parallel to the lamination of the speleothem.

aber auch lagenparallele bis -subparallele Brüche beteiligt. Im jüngsten Stalagmitenabschnitt können drei Sintergenerationen unterschieden werden (Sinter I, II und III; vgl. Abb. 8). Die Brüche sind älter als der Sinter III, der wiederum älter als die in den beiden vorangehenden Kapiteln beschriebenen Kristallsande ist. Der Sinter III überwächst calcitzementierte Calcitpartikel, die aufgrund ihrer starken Pigmentierung sowie ihrer äußerern Form (Rhomboider sowie Rhomboederskelette, vgl. Abb. 6) als kryogene Partikel anzusehen sind. Eine ockerbraune Ton/Siltlage zwischen den Sintern I und II spiegelt möglicherweise ein Analogon einer weiteren Permafrostzeit wider. Insgesamt ergibt sich im jüngsten Stalagmitenabschnitt ein mehrfacher Wechsel von Sinterwachstum und klastischer Sedimentation, ein mindestens zweifaches Kryocalcitwachstum und eine relativ alte Anlage des Bruchsystems.

Kathodolumineszenz-Untersuchungen

Die Kathodolumineszenz-Mikroskopie hat sich in den letzten Jahren auch bei Untersuchungen an Höhlensintern etabliert, da hiermit einerseits primäre Variationen in Karbonatmineralien – entspricht chemischen Veränderungen von Höhlenwässern – und andererseits sekundäre Mineralisationen (Zementation von Restporen sowie von Trennfugen) nachgewiesen werden können (Richter et al. 2003). Dabei fungieren Spektroskopie-Analysen als unerlässlich für die Ursache der KL-Eigenschaft. Die aus kolumnaren Calciten aufgebauten Sinter

weisen vorrangig eine dunkelblaue KL-Farbe auf. Diese intrinsische KL-Eigenschaft (IBB2 in Abb. 9c) belegt in Verbindung mit den Röntgendiffraktometrie-Ergebnissen die kristallchemische Reinheit der Sintercalcite, wie es für Stalagmiten Zentraleuropas typisch ist, da nur in wärmeren, verwitterungsintensiveren Zeiten (z.B. Atlantikum) mehr Fremdionen wie dreiwertige Seltene Erden (REE^{3+}) und Mn^{2+} in die Tropfwasser gelangen und in die Sintercalcite eingebaut werden konnten (Richter et al. 2004). Das gleiche intrinsische KL-Verhalten zeigt der überwiegende Teil der Calcizemente der verfestigten Partikellagen zwischen den Sintern II und III (vgl. Abb. 8 und 9d).

Die kryogenen Calcite zeichnen sich gegenüber den zuvor beschriebenen Calciten durch etwas hellere schmutzigglaue KL-Farben bei den unverfestigten Kristallsanden (Abb. 9a) sowie schmutzig-ockerfarbene KL-Farben bei den verfestigten Kristallsanden (Abb. 9b) aus. Anhand von Spektralanalysen konnten hier Mn^{2+} - und REE^{3+} -Anteile nachgewiesen werden. Die auffällig unruhig verlaufenden Flanken der Mn-Peaks in Abb. 9b und 9d deuten ebenfalls auf geringe Anteile von REE^{3+} hin, die durch eine Dekonvolution der Spektren verdeutlicht werden könnten. Da es sich bei den Bildungszeiten der Kryocalcite nicht um Zeiten intensiver chemischer Verwitterung handelt, kommen nur konzentrierte Restlösungen in Frage, aus denen sich die Kryocalcite bilden (s. Diskussion). Hier sollte das gegenüber warmzeitlichen Sintern anormale intrinsische KL-Verhalten der Kryocalcite (intensive 400–440 nm – Bande, vgl. IBB1 in Abb. 9a, b und d) nicht unerwähnt bleiben, aber zur Klärung fehlt noch

sehr spezielle kristallographische Forschungsarbeit. Intensiv orangefarbene KL-Farben aufgrund erhöhter Anteile des Aktivators Mn^{2+} konnten nur an drei Positionen des jüngsten Stalagmitenabschnitts beobachtet werden:

- A dünne Lage in Restporen der Sinter (Abb. 9c)
- B dünne Lagen in Interkristallinopen der verfestigten Partikellagen (Abb. 9d)
- C calcitverheiltes Zementbruch zwischen den Sintern II und III (Abb. 9e)

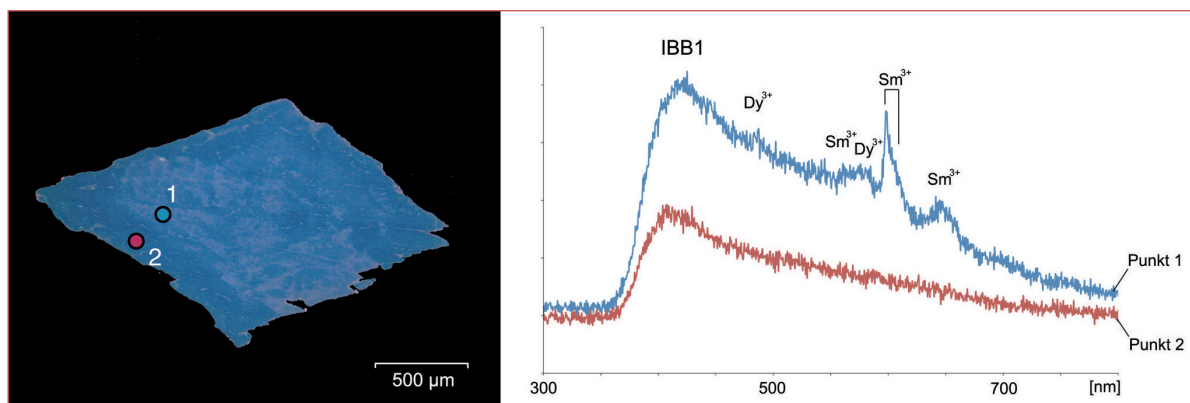


Abb. 9a: KL-Foto (links) und -Spektrum (rechts), schmutzigblaue Rhomboederkristalle der unverfestigten Kristallgeneration. Punkt 1: intrinsische Breitbande IBB1 mit REE3+-Schmalbanden.
Cathodoluminescence image (left panel) and spectrum (right panel) of dirty-blue rhombohedral crystals of the loose crystal generation. Point 1: intrinsically luminescent broad band IBB1 with REE3+-activated narrow bands.

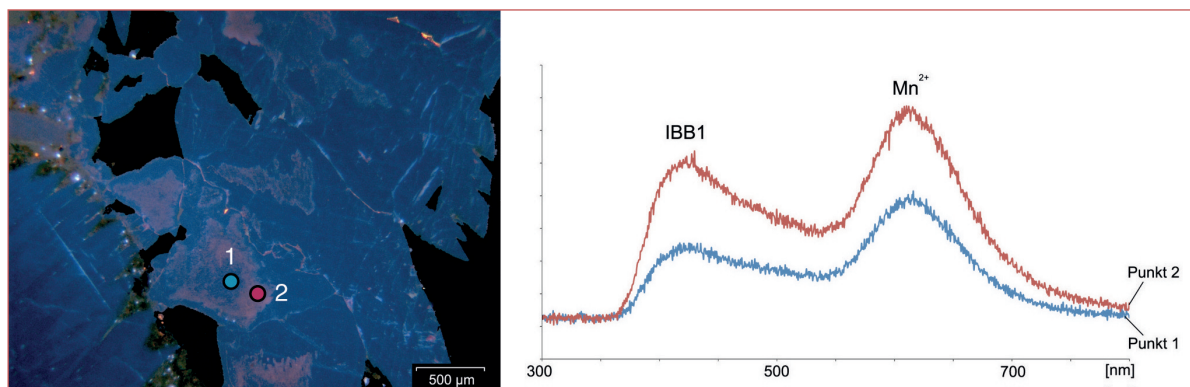


Abb. 9b: KL-Foto (links) und -Spektrum (rechts), schmutzig ockerfarbene Rhomboederkristalle (1-Zentrum 2-Rand eines Kryocalcits) der verfestigten Kristallgeneration. Punkt 2: intrinsische Breitbande IBB1 mit Mn-aktivierter Breitbande.
Cathodoluminescence image (left panel) and spectrum (right panel) of dirty ochre-coloured rhombohedral crystals (1-centre, 2-rim of an individual crystal) of the lithified crystal generation. Point 2: intrinsically luminescent broad band IBB1 with Mn-activated broad band.

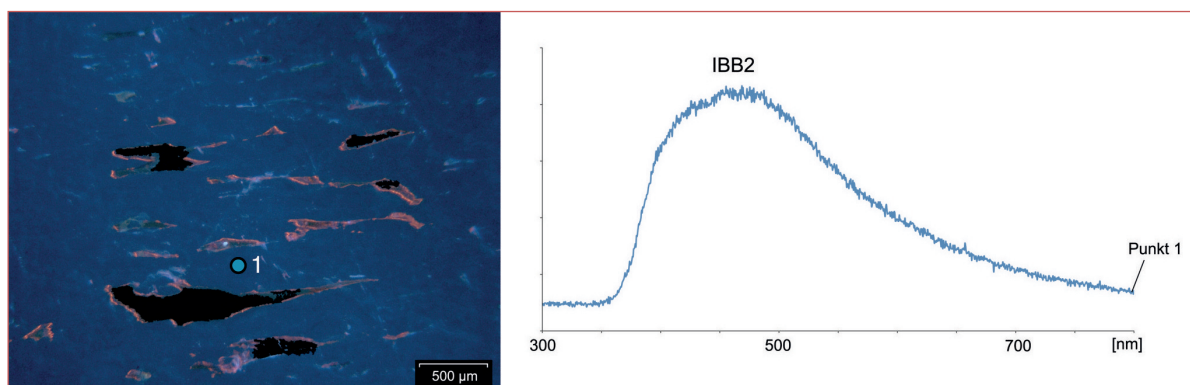


Abb. 9c: KL-Foto (links) und -Spektrum (rechts), Breitbande IBB2 der intrinsisch lumineszierenden kolumnaren Calcite (1) der Sinter; Mn-aktivierte orangene Lagen in Restporen.
Cathodoluminescence image (left panel) and spectrum (right panel) of the intrinsically luminescent columnar calcite (1). Mn-activated orange layers within pores.

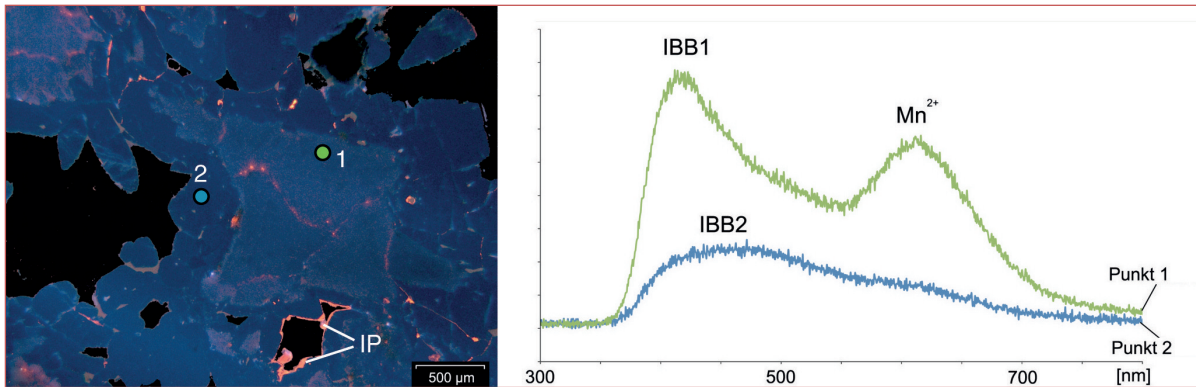


Abb. 9d: KL-Foto (links) und -Spektrum (rechts), Mn-aktivierte orangefarbene Lagen in Interkristallinporen (IP) nach intrinsischer Calcitgeneration (2) der zementierten Kryocalcite (1) der verfestigten Kryocalcitgeneration. IBB1 – intrinsische Breitbande der Kryocalcite; IBB2 – intrinsische Breitbande der warmzeitlichen Calcite.

Cathodoluminescence image (left panel) and spectrum (right panel) of Mn-activated orange-coloured layers in intercrystalline pores (IP) postdating the intrinsically luminescent calcite generation (2) of the cemented cryogenic calcite (1). IBB1 – intrinsic broad bands of cryogenic calcite; IBB2 – intrinsic broad bands calcite formed during a warm climate.

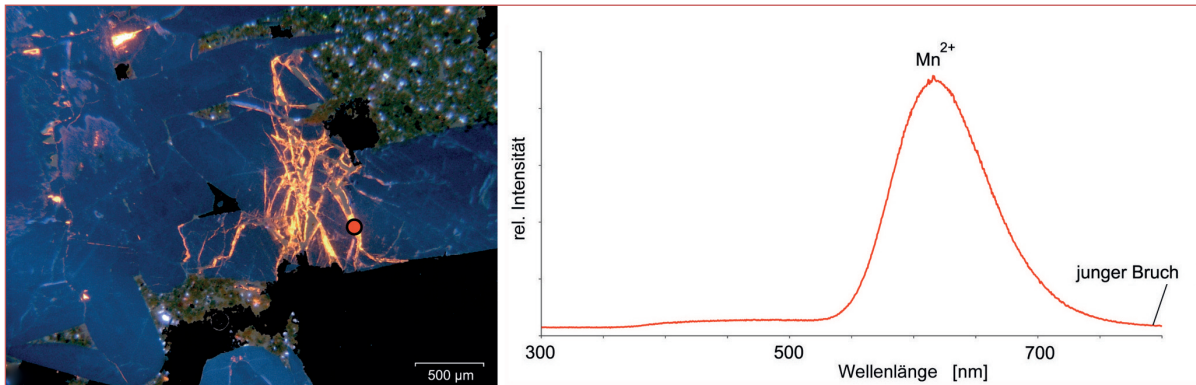


Abb. 9e: KL-Foto (links) und -Spektrum (rechts), Breitbande der Mn-aktivierten orangefarbene Calcitspalten in Zementbruch zwischen den Sintern 2 und 3.

Cathodoluminescence image (left panel) and spectrum (right panel) of Mn-activated calcite veinlets between speleothem generation 2 and 3.

Der Bezug der Mn^{2+} -aktivierten Calcite der drei Positionen untereinander bleibt ohne Zusatzuntersuchung ungeklärt, aber das punktuell auftretende, sehr filigrane Rissmuster von C ist am leichtesten durch Frostsprengung mit anschließender Verheilung der Haarrisse zu erklären.

U/Th-Datierungen

Die U/Th-Datierungen des Stalagmiten und der beiden zuvor differenzierten unverfestigten Rhom-

boederkristallsinter haben jungpleistozäne Alter ergeben (Tab. 1). Die Probe vom Sinter I des jüngsten Stalagmitenabschnitts weist mit einem Alter von 76 ka auf das Ende des Marinen Isotopen-Stadiums 5a hin. Die nach dem Sinter III (vgl. Tab. 1) gebildeten Kryocalcite haben erwartungsgemäß deutlich jüngere Alter ergeben. Die weißen bis hellbeigen Rhomboederkristalle der Lokalität 1 haben ein Alter von etwa 24 ka ergeben, welches innerhalb der Messgenauigkeit identisch dem der etwas größeren hell- bis dunkelbeigen, skelettösen Rhomboeder der Lokalität 2 ist.

Labor-Nr.	Probenbezeichnung	^{238}U [ng/g]	^{232}Th [ng/g]	^{230}Th [pg/g]	Alter [ka]	Fehler [ka]
5055	Weih2a, weißbeige Rhomboeder	1,4878	13,488	6,541	23,59	± 0,30
5330	Weih2b, beige, skelettöse Rhomboeder	1,5403	9,679	6,825	23,96	± 0,18
5331	Weih5, Stalagmitentop	0,0737	0,6433	0,8508	75,8	± 1,20

Tabelle 1: U/Th-Datierungen von Speläothemproben des Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle. *U/Th dating results of samples of the stalagmite from the "Weihnachtsbaum-Halle".*

Beide Rhomboederkollektive sind somit der ausgesprochenen Kaltphase zuzuordnen, die zeitlich mit dem sogenannten Heinrich-1-Ereignis der letzten Eis-

zeit zusammenfiel, als der Golfstrom zum Erliegen kam und gewaltige Armadas von Eisbergen im Nordatlantik trieben.

DISKUSSION UND GENESEMODELL

Die leichte O-Isotopie der Calcitpartikel der Kristallsande gegenüber normalen Speläothemen erklärt sich durch Ausfrieren kalkgesättigter Höhlenwässer, denn bei einer gemeinsamen Kristallisation von Eis und Calcit wird das schwerere ^{18}O -Isotop nach O'Neil (1968), Souchez et al. (2000) und Souchez & Jouzel (1984) bevorzugt ins Eis eingebaut. Wenn der Ausfriervorgang sehr langsam erfolgt, können $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bis unter -20‰ erreicht werden (Žák et al. 2004 u. 2008, Richter et al. 2010a). Ein derartig langsames Ausfrieren von Höhlenwässern ist nur mit einem einsetzenden bzw. fortschreitenden Permafrost denkbar.

Um die sehr unterschiedlich strukturierten kryogenen Calcite von Kristallsanden im Malachitdom N'Brilon zu erklären, haben Richter & Riechelmann (2008) ein ausfrierendes Wasserbecken auf Eis mit anschließendem Auftauen und damit einhergehender Vermengung der Kryocalcite angenommen. Dieses „auf Eis“-Seemodell wurde auch von Richter et al. (2010a) für die Kryocalcite der Rätselfalle des Herbstlabyrinth-Adventhöhle-Systems angewandt und für eine Genese um das Weichsel-Interstadial 4 verfeinert.

Im Fall des Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle dominieren Rhomboederkristalle das Partikelspektrum der Kristallsande bei weitem, sodass für deren Genese ein einfacheres „Unter-Eis“-Seemodell entwickelt wurde (vgl. Abb. 10):

- A. In den Interstadialen der Weichselkaltzeit sowie in Warmzeiten wie heute wird der der Weihnachtsbaum-Halle benachbarte Hessentunnel zumindest temporär von einem Höhlenbach durchflossen, um in einem Versturzgebiet an die Erdoberfläche zu gelangen.
- B. Mit dem Einsetzen einer Kaltphase (z.B. Stadial der Weichselkaltzeit) bildete sich ein zunächst geringmächtiger Permafrostboden, der den Ausflussbereich des Höhlenbachs gefrieren lässt, sodass sich im Inneren der Höhle ein See unter einer Permafrostzone aufstaut. Hierfür sprechen auch horizontale Höhlenlehmkrusten an den Wänden des Hessentunnels. In dieser Phase entstehen die klaren Kristallaggregate aus Calciten mit steilen Rhomboederflächen und schwererer O- sowie leichterer C-Isotopie gegenüber den Kryocalciten.
- C. Mit zunehmender Abkühlung gefriert der See, und die Permafrostzone erfasst die gesamte Höhle. Bei

einem derartig langsam erfolgenden Ausfrieren eines größeren Sees können sich unter gleichen Bedingungen gleiche Kryocalcite mit sehr leichter O-Isotopie bilden. Die sich vorrangig aus Restlösungen (erhöhte REE³⁺ bzw. Mn²⁺-Gehalte) gebildeten rhomboedrischen Kristalle haben allseitig Kristallflächenbegrenzungen gebildet, sodass sie sich wahrscheinlich zwischen Eiskristallen gebildet haben und nicht am Höhlenboden sowie an Schwimmkrusten wie in der Rätselfalle (vgl. Richter et al. 2010a).

D. Mit Einsetzen einer längeren Warmphase taut das Eis, und die Kryocalcite gelangen auf den Höhlenboden. Auf Erhöhungen, wie z.B. dem Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle, bleiben die Kryocalcite über dem Wasserspiegel vor Ort liegen, während sie im zumindest temporär aktiven Höhlenbach verschwemmt werden.

Das zuvor aufgezeigte „Unter-Eis“-Seemodell wurde für die zumeist unverfestigte jüngste Kryocalcitgeneration (23–24 ka) des untersuchten Stalagmiten aufgrund der Dominanz des Rhomboederkristalltyps entwickelt. Für eine ältere Kryocalcitgeneration (29 ka) der Rätselfalle desselben Höhlensystems haben Richter et al. (2010a) wegen der stärkeren Vermengung der Kryocalcittypen in den Kristallsanden – auch auf Versturzböcken – ein „Auf-Eis“-Seemodell angewandt. Welches Modell für die Genese einer Kryocalcitgeneration einer Höhle anzuwenden ist, muss sicherlich von Fall zu Fall entschieden werden. Möglicherweise gibt es auch noch weitere Genesemodelle, da wir neuerdings zementierte Kryocalcite in Spalten der Dechenhöhle gefunden haben. Die U/Th-datierte unverfestigte und die nicht datierte verfestigte Kryocalcitgeneration (s.o.) belegen bereits die wiederholte Bildung von Kryocalcit in einer Höhle. Da es in der Weichselkaltzeit bekanntlich etliche Warmphasen gegeben hat (vgl. Dansgaard et al. 1993, Wolff et al. 2010), muss mit einer wiederholten Genese von Kryocalciten in dieser Zeitspanne gerechnet werden. Ein erster Hinweis ist das mehrfache Auftreten kryogener Kristallsande im Bereich des hier untersuchten Stalagmiten.

Das Wechselspiel von Permafrost- und Nichtpermafrostzeiten wird auch durch das mehrphasig erfolgte Bruchmuster im Topbereich des Stalagmiten nachge-

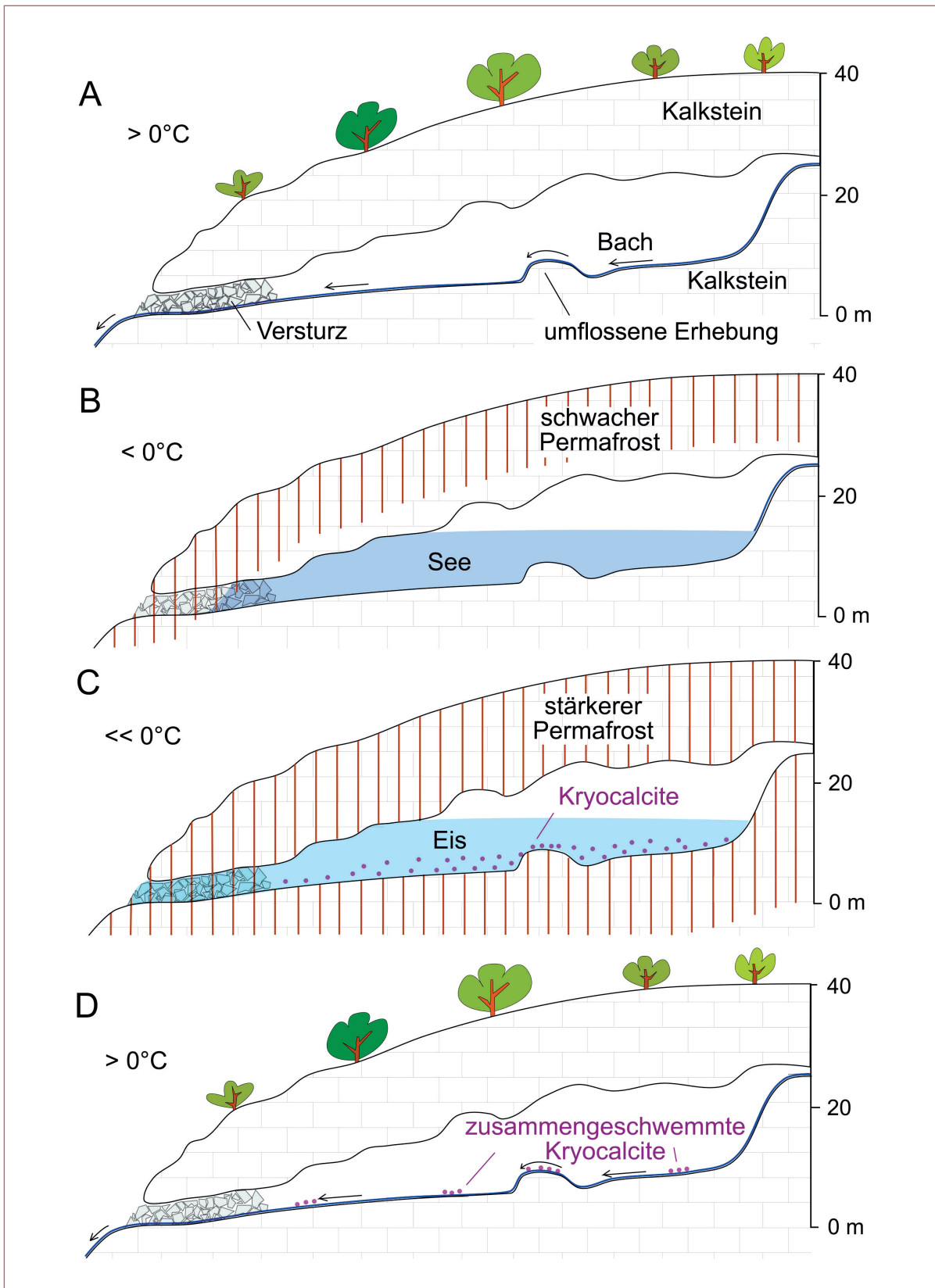


Abb. 10: Cartoonserie zur Genese der Kryocalcite des Weihnachtsbaum-Stalagmiten nach dem neuen „Unter-Eis“-Seemodell mit fortschreitender Permafrostzone.
 Permafrost model showing the proposed sequence of formation of cryogenic calcite of the stalagmite in the „Weihnachtsbaum-Halle“.

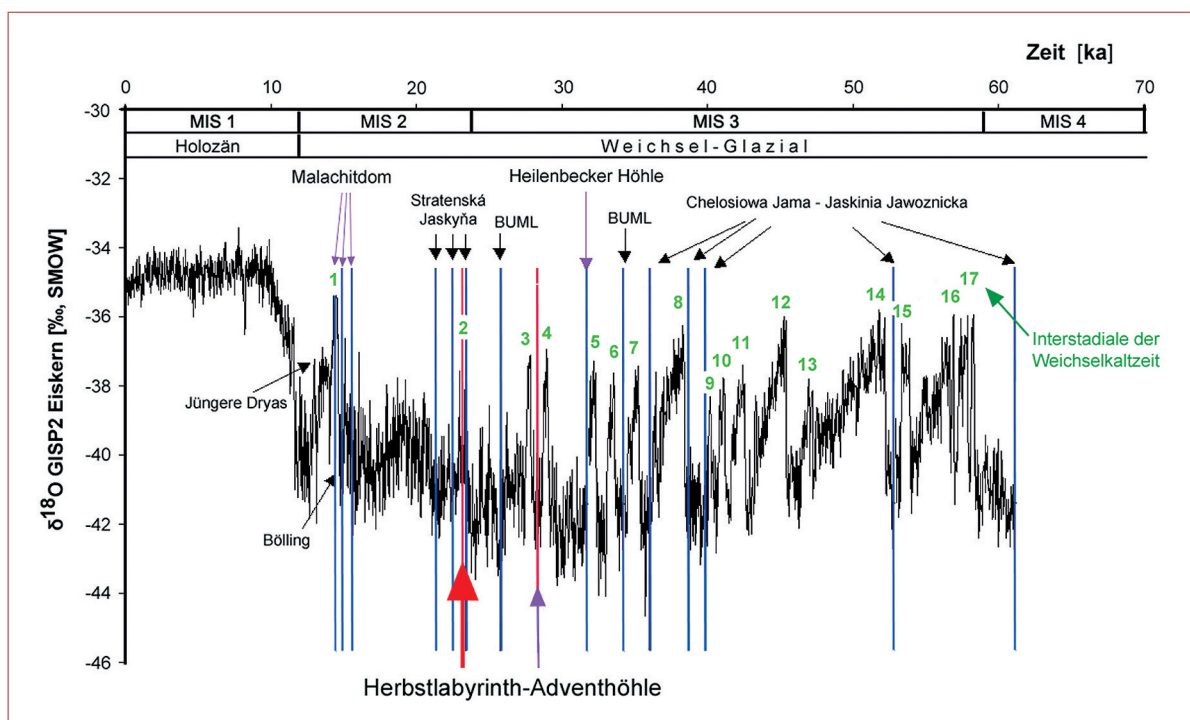


Abb. 11: U/Th-datierte weichselzeitliche Kryocalcite aus mitteleuropäischen Höhlen. Dünne schwarze Pfeile: Kryocalcite des östlichen Mitteleuropa nach Žák et al. (2004). Dünne violette Pfeile: Kryocalcite des zentralen Mitteleuropa nach Richter & Riechelmann (2008 – Malachitdom), Richter et al. (2009a – Heilenbecker Höhle) und Richter et al. (2010 – Herbstlabyrinth-Adventhöhle / Rätselhalle). MIS = Marine Isotope Stage. Dicker roter Pfeil: Kryocalcite des Weihnachtsbaum-Stalagmiten (diese Arbeit). Stabile Isotopenkurve des GISP2 Eiskerns von Grönland nach Dansgaard et al. (1993) und Wolff et al. (2010). U/Th-dated cryogenic calcite samples of the last glacial period from caves in Central Europe. Thin black arrows: cryogenic calcite from eastern Central Europe (Žák et al., 2004). Thin purple arrows: cryogenic calcite from Central Europe (Richter & Riechelmann, 2008 – Malachitdom; Richter et al., 2009a – Heilenbecker Höhle; Richter et al., 2010 – Herbstlabyrinth-Adventhöhle/Rätselhalle). MIS = Marine Isotope Stage. Thick red arrow: cryogenic calcite of the stalagmite from the "Weihnachtsbaum-Halle" (this paper). Stable isotope curve of GISP2 ice core from Greenland according to Dansgaard et al. (1993) and Wolff et al. (2010).

zeichnet (Abb. 8). Die Frostsprengung erfolgt vorrangig an den Kristallgrenzen parallel der Langachsen der kolumnaren Calcite, sowie parallel bis subparallel zum Lagenbau des Stalagmiten. Dieses Bruchverhalten kann mikroskopisch bis in den Haarrissbereich verfolgt werden. Da das Bruchmuster allseitig vertikal und parallel bis subparallel zum Sinterlagenbau ausgebildet ist, lässt sich kein tektonisches Modell zur Erklärung der Risse heranziehen, und Erdbeben sowie Rutschungen erscheinen wenig wahrscheinlich. Das beobachtete direkte Nebeneinander von Sinterbrüchen und Kryocalcitgeneration deutet auf eine Frostsprengung zur Erklärung des Bruchmusters im Weihnachtsbaum hin. Allerdings muss im Sinne einer Anmerkung des Reviewers Karel Žák darauf hingewiesen werden, dass Rissgenese und Kryocalcitbildung nicht zeitgleich erfolgt sein können, da die Frostsprengung das Resultat einer Vielzahl von Gefrier-Tau-Zyklen um den Gefrierpunkt darstellt (French 2007), während die Genese der hier behandelten großen Kryocalcite (0,2 bis über 10 mm) durch sehr langsames Ausfrieren eines Sees erfolgt ist. Somit ist im

vorliegenden Fall des Stalagmiten der Weihnachtsbaum-Halle die jeweilige Zeit der Frostsprengung vor das Seestadium „unter Permafrost“ zu legen. Das Seestadium spiegelt bei den insgesamt kaltzeitlichen Zyklen jeweils geringfügig wärmere Phasen wider, in denen der Ausgang des Höhlensystems aber durch nicht aufgetauten Permafrost plombiert blieb, während der Wasserzulauf aus höher gelegenen Gebieten nördlich des Höhlensystems erfolgt ist. Dabei können wechselnde Lithologien (Grenze von Massenkalk zu siliziklastischem Devon), Störungsverläufe und unterschiedlich mächtige Überdeckungen durchaus eine größere Bedeutung für die hydrologische Situation der Wasserzufuhr haben.

Insgesamt ergibt sich – besonders aufgrund der Abfolge in Abb. 8 – ein Wechsel von Sinterwachstum, Zerbrechen von Sinter und Kryocalcitbildung. Aufgrund der bislang vorliegenden U/Th-Datierungen (vgl. Abb. 11) scheint die Genese der Kryocalcite in mitteleuropäischen Höhlen vorrangig an die Übergänge von Warm- zu Kaltphasen (Interstadial/Stadial-Übergänge) der Weichselkaltzeit gebunden zu sein.

AUSBLICK

Weiterführende Untersuchungen werden auf die Mehrphasigkeit von Kryocalcit- und Bruchgenerationen in einer Höhle sowie auf Kryocalcitbildungen in verschiedenen tief gelegenen Höhlen fokussiert. Somit kann mittelfristig einerseits der Klimawechsel innerhalb von Kaltzeiten (vgl. Abb. 11) und andererseits die Permafrostmächtigkeit im Peri-

glazialraum Mitteleuropas entschlüsselt werden. Nach einer ersten Kompilation von U/Th-datierten Kryocalciten und Teufenlage der Fundschichten unter Geländeoberkante hat sich für die jungpleistozänen Kaltphasen des Zeitabschnitts 13 bis 40 ka (vgl. Abb. 11) eine Permafrostmächtigkeit von 30-70 m ergeben (Žák et al. 2011a).

DANKSAGUNG

Für wertvolle Hinweise und die konstruktive Durchsicht des Manuskripts bedanken wir uns herzlich bei den Herren C. Spötl, Innsbruck und K. Žák, Prag.

Die C/O-Isotopenanalytik wurde freundlicherweise von B. Gehnen und U. Schulte, Bochum, durchgeführt.

LITERATUR

- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B. Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J., Sveinbjondottir, A.E., Jouzel, J. & Bond, G. (1993): Evidence for general climate instability of past climate from a 250-kyr-ice-core record. – *Nature*, 364: 218-220.
- Dorsten, I., Hülsmann, T. & Hüser, A. (2005): Das Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System. Die erste Riesenhöhle Hessens. – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 52/1: 4-10.
- French, H.M. (2007): *The periglacial environment*. – 3rd ed., J. Wiley & Sons, 458 S.
- Füchtbauer, H. & Richter, D.K. (1988): Karbonatgesteine. – [In:] Füchtbauer, H. (Hrsg.): *Sedimente und Sedimentgesteine*. – 233-434, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Grubert, C. (1996): Neuland in Hessen. – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 42: 37.
- Kaiser, T.M. & Keller, T. (1999): Der eiszeitliche Höhlenboden von Breitscheid-Erdbach, ein paläontologisches Denkmal. – *Denkmal und Kulturgeschichte*, 1: 16-20.
- Kaiser, T.M., Keller, T. & Tanke, W. (1998): Ein neues pleistozänes Wirbeltiervorkommen im Paläokarst Mittelhessens (Breitscheid-Erdbach, Lahn-Dill-Kreis). – *Geologisches Jahrbuch Hessen*, 126: 71-79.
- Kempe, S. (1989): Sinterschäden verursacht durch Permafrost oder Erdbeben? – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 35: 87-90.
- Kempe, S. (2008): Natürliche Sinterschäden, Indikatoren für glaziales Höhleneis in Mitteleuropa. – *Stalactite*, 58/1: 39-42.
- Kempe, S. & Henschel, H.-V. (2004): Alois Schaffraths zerbrochene Pyramide (Postojna Jama) ein Zeuge glazialer Höhlenvereisung. – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 50: 76-81.
- Krebs, W. (1966): Der Bau des oberdevonischen Langenau-Bach-Breitscheider Riffes und seine weitere Entwicklung im Unterkarbon (Rheinisches Schiefergebirge). – *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft*, 511: 1-105.
- (1971): Devonian Reef Limestones in the Eastern Rhenish Slate Mountains. – Hrsg. von Müller, G. & Friedmann, G.M., Verlag W. Kramer, 45-81.
- Mischel, S. (2010): Petrographische Untersuchungen, 230Th/U-Altersdatierungen und Spurenelementanalysen an Speläothemen aus dem Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid-Erdbach, Hessen. – Unveröffentlichte Diplomarbeit Universität Mainz.
- Moser, M. & Geyer, M. (1981): Seismospeläologie – Erdbebenzerstörungen in Höhlen am Beispiel des Geisloches bei Oberfellendorf in Oberfranken, Bayern. – *Karst und Höhle*, 1981: 59-74.
- Neuser, R.D., Bruhn, E., Götze, J., Habermann, D. & Richter, D.K. (1996): Kathodolumineszenz: Methodik und Anwendung. – *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil 1*, 1995: 287-306.
- O'Neil, J.R. (1968): Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water. – *Journal of Physical Chemistry*, 72/10: 3683-3684.
- Pielsticker, K.-H. (1998): Die Große Sunderner Höhle. Sinterbrüche und Umlagerungen – Eisdruck oder Erdbeben? – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 44: 4-11.
- (2000): Höhlen und Permafrost – Thermophysikalische Prozesse von Höhlenvereisungen während des Quartärs. – *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten*, 55: 187-196.
- Richter, D.K. & Niggemann, S. (2005): Kryogene Calcite in Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges. – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 51/4: 129-132.
- Richter, D.K. & Riechelmann, D.F.C. (2008): Late Pleistocene cryogenic calcite spherulites from Malachitdom Cave (NE Rhenish Slate Mountains, Germany): origin, unusual internal structure and stable C-O isotope composition. – *International Journal of Speleology*, 37: 119-129.
- Richter, D.K., Götte, T., Götze, J. & Neuser, R. (2003): Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology. – *Mineralogy and Petrology*, 79: 127-166.
- Richter, D.K., Götte, T., Niggemann, S. & Wurth, G. (2004): REE³⁺ and Mn²⁺ activated cathodoluminescence in late

- glacial and Holocene stalagmites of central Europe: evidence for climatic processes? – *The Holocene*, 14/5: 759-767.
- Richter, D.K., Neuser, R.D. & Voigt, S. (2008): Kryogene Calcitpartikel aus der Heilenbecker Höhle in Ennepetal (NE Bergisches Land/Nordrhein-Westfalen). – *Die Höhle*, 59: 37-47.
- Richter, D.K., Mangini, A. & Voigt, S. (2009a): Erste Th/U-datierte Kryocalcite der mittleren Weichseiszeit aus einer Höhle des Rheinischen Schiefergebirges (Heilenbecker Höhle, Bergisches Land). – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 55: 125-127.
- Richter, D.K., Dreyer, R., Niggemann, S. & Pielsticker, K.-H. (2009b): Kryocalcite in der Großen Sunderner Höhle (Sauerland) – ein weiterer Beleg für die vormalige Eishöhle. – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- und Karstforscher e.V.*, 55: 80-85.
- Richter, D.K., Meissner, P., Immenhauser, A., Schulte, U. & Dorsten, I. (2010a): Cryogenic and non-cryogenic pool calcites indicating permafrost and non-permafrost periods: a case study from the Herbstlabyrinth-Advent cave system (Breitscheid-Erdbach Cave, Germany). – *The Cryosphere*, 4: 501-509.
- Richter, D.K., Schulte, U., Mangini, A., Erlemeyer, A. & Erlemeyer, M. (2010b): Mittel- und oberpleistozäne Calcitpartikel kryogener Entstehung aus der Apostelhöhle südöstlich Brilon (Sauerland, NRW). – *Geologie, Paläontologie Westfalen*, 78: 61-71.
- Richter, D.K., Voigt, S. & Neuser, R.D. (2009): Kryogene Calcite unterschiedlicher Kristallform und Kathodolumineszenz aus der Glaseishöhle am Schneiber (Steinernes Meer, Nationalpark Berchtesgaden, Deutschland). – *Die Höhle*, 60: 3-9.
- Scholz, D. & Hoffmann, D. (2008): 230Th/U-dating of fossil corals and speleothems. – *Eiszeitalter und Gegenwart*, 57/1-2: 52-76.
- Souchez, R. & Jouzel, J. (1984): On the isotopic composition in δD and $\delta^{18}O$ of water and ice during freezing. – *Journal of Glaciology*, 30: 369-372.
- Souchez, R., Jouzel, J., Lorrain, R., Sleewægen, S., Stiéverand, M. & Verbeke, V. (2000): A kinetic isotope effect during ice formation by water freezing. – *Geophysical Research Letters*, 27: 1923-1926.
- Spöcker, R.G. (1981): Zur Landschaftsentwicklung im Wiesentgebiet um Muggendorf und Streitberg (Nördliche Frankenalb). – *Karst und Höhle*, 1981: 1-34.
- Wolff, E.W., Chappellac, J., Blunier, T., Rasmussen, S.O. & Svansson, A. (2010): Millennial-scale variability during the last glacial: The ice core record. – *Quaternary Science Reviews*, 29: 2828-2838.
- Žák, K., Urban, J., Cilek, V. & Hercmann, H. (2004): Cryogenic cave calcite from several Central European caves: age, carbon and oxygen isotopes and a genetic model. – *Chemical Geology*, 206: 119-136.
- Žák, K., Onac, B.P. & Perşoiu, A. (2008): Cryogenic carbonates in cave environments: a review. – *Quaternary International*, 187: 84-96.
- Žák, K., Hercman, H., Orvošová, M. & Ja ková, I. (2009): Cryogenic cave carbonates from the Cold Wind Cave, Nízke Tatry Mountains, Slovakia: Extending the age range of cryogenic cave carbonate formation to the Saalian. – *International Journal of Speleology*, 38: 139-152.
- Žák, K., Filippi, M., Živor, R. & Richter, D.K. (2011a): Cryogenic cave carbonates: a new tool for estimation of former permafrost depths. – *Goldschmidt Congress 2011*, abstract 2372.
- Žák, K., Šmída, B., Filippi, M., Živor, R., Komaško, A. & Vybíral, S. (2011b): New localities of cryogenic cave carbonates in the Czech Republic and Slovakia. – *Proceedings of the Meeting of cavers in the Moravian Karst, Sloup, Czech Republic, April 29-May 1, 2011*, Bosák, P. & Novotná, J. (eds.), *Speleofórum*, 30: 103-110.

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): Richter Detlef K., Mischel Simon, Dorsten Ingo, Mangini Augusto, Neuser Rolf D., Immenhauser Adrian

Artikel/Article: [Zerbrochene Höhlensinter und Kryocalcite als Indikatoren für eiszeitlichen Permafrost im Herbstlabyrinth-Adventhöhle-System bei Breitscheid-Erdbach \(N-Hessen\) 31-45](#)