

Kryogene Calcite unterschiedlicher Kristallform und Kathodolumineszenz aus der Glaseishöhle am Schneiber (Steinernes Meer/ Nationalpark Berchtesgaden, Deutschland)

ZUSAMMENFASSUNG

Erstmals werden kryogene Calcite aus einer Höhle des Ostalpenraums beschrieben, die offensichtlich aus langsam gefrierendem Wasser auskristallisierten. Diese kryogenen Karbonate weisen eine im Vergleich zu „normalen“ Speläothemen anormal leichte O-Isotopie ($\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen $-18,5$ und $-23,0\%$ VPDB) bei gleichzeitig schwerer C-Isotopie ($\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen $+4,7$ und $+6,6\%$ VPDB) auf.

Zwei Rhomboederkristalltypen (normale und steile Rhomboeder) unterschiedlicher C/O-Isotopenzusammensetzung nebeneinander auf dem Höhlenboden unterstreichen eine Vermengung von in unterschiedlichem Milieu gebildeten Calcitpartikeln. Der Sachverhalt steht im Einklang mit den sehr variablen Kathodolumineszenzmustern dieser Kristalle.

Die Genese der verschiedenen kryogenen Calcitpartikeltypen wird im Übergang von der letzten Kaltzeit zur heutigen Warmzeit in temporär unterschiedlich zusammengesetzten Wasserbecken auf Höhleneis gesehen. Nach dem Schmelzen des Eises sind die verschiedenen Calcitpartikel am Höhlenboden vermischt worden.

ABSTRACT

Cryogenic calcite with variable crystal shape and cathodoluminescence from the Glaseis Cave at Schneiber (Steinernes Meer/ Berchtesgaden National Park, Germany)

For the first time calcite that apparently precipitated from slowly freezing water is described from a cave in the Eastern Alps. These cryogenic carbonates show anomalously low $\delta^{18}\text{O}$ -values (-18.5 to -23.0% VPDB) but high $\delta^{13}\text{C}$ -values ($+4.7$ to $+6.6\%$ VPDB) when compared to „normal“ speleothems from the Alps.

Two types of rhombohedral crystals (normal and steep rhombohedra) of different C/O-isotopic composition occur together on the cave floor suggesting a later mixing of calcite particles which initially formed in different environments. This is in accordance with the highly variable cathodoluminescence patterns of these crystals.

It is suggested that these cryogenic calcite particles formed in separate pools on the cave ice surface during the transition from the last glacial to the current interglacial. After melting of the ice the different calcite particles accumulated on the cave floor.

Detlev K. Richter

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

Stefan Voigt

Stefan Voigt GmbH Garten- und Landschaftsbau, Breckerfelder Str. 113a D-58256 Ennepetal
info@galabau-voigt.de

Rolf D. Neuser

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

Eingelangt: 13.3.2008

Angenommen: 23.2.2009

EINLEITUNG

Erstmals von Viehmann (1960) aus der rumänischen Șcarișoara-Höhle beschriebene kryogene Höhlen-calcite (cryogenic cave calcite = CCC nach Žák et al., 2004) bilden sich aus karbonathaltigen Höhlenwässern bei Unterschreiten der 0°C -Isotherme. Erfolgt die Calcitbildung bei langsam gefrierendem Wasser, führen die Calcite anormal leichte O-Isotopenzusammensetzungen, während bei schnell gefrierendem Wasser Calcite mit relativ schwererer C-Isotopenzusammensetzung gegenüber normalen Speläo-

themen (u.a. Stalagmiten, Stalaktiten) entstehen (siehe Übersichtsartikel von Lacelle, 2007, und Žák et al., 2008). Kryogene Calcitpartikel sind in den letzten Jahren wiederholt vom Bodenbereich mitteleuropäischer Höhlen beschrieben worden und auf eine Genese von Calcit aus Wasserbecken auf ehemals vorhandenem Eis während der letzten Eiszeit zurückgeführt worden (Žák et al., 2004; Richter & Niggemann, 2005; Richter & Riechelmann, 2007; Richter et al., 2008). Aus dem Ostalpenbereich ist kürzlich von Spötl

Richter, Voigt, Neuser / Kryogene Calcite unterschiedlicher Kristallform und Kathodolumineszenz aus der Glaseishöhle

(2008) ein erstes Vorkommen kryogener Höhlencalcite aus der Eisriesenwelt des Tennengebirges beschrieben worden, wobei die Calcite lagenweise noch im Eis vorliegen und sich durch relativ schwere C-Isotopenzusammensetzung gegenüber normalen Speläotho-

men auszeichnen. In der vorliegenden Studie werden nun erstmals kryogene Calcite aus dem Ostalpenraum mit den für mitteleuropäische Höhlen typischen anormal leichten O-Isotopenzusammensetzungen vorgestellt.

LOKATION



Abb. 1: Übersichtsskizze zur Lage der Glaseishöhle am Schneiber und der Eisriesenwelt im Dachsteinkalk (blaue Bereiche) der Salzburger Kalkalpen.

Die Glaseishöhle (Kat.-Nr. 1331/258) liegt im obertriadischen Dachsteinkalk des Steinernen Meeres der südlichen Salzburger Kalkalpen nahe des Schneiber (siehe Abb. 1). Das Objekt wurde 1984 von Mitgliedern des Arbeitskreises Kluterthöhle vom in 2230 m über NN gelegenen Eingang aus auf 69 m Länge bis zu einem massiven Eisverschluss erkundet. Erst im Jahr 2002 war das Eis soweit abgeschmolzen, dass hier in einem Eisschacht 20 m tief zwischen Gletscher und Felswand abgeseilt werden konnte. Daraufhin wurde in schneller Folge das gesamte Höhlensystem mit einer Länge von 2267 m vermessen und erkundet (Voigt, 2003). Die Glaseishöhle ist Teil des phreatisch entstandenen „Sauerländer Höhlensystems“ (Kat.-Nr. 1331/129), dessen Teile durch Versturz getrennt bzw. durch Hangabtragung unterbrochen sind.

Beim Glaseishöhhlensystem handelt es sich um eine typische Laugungshöhle, deren Entstehung größtenteils älter als die Hebung der Alpen sein dürfte. Vermutlich bereits mit der Heraushebung im Jungtertiär wurden die überwiegend schichtfugengebundenen Gänge zum Teil durch geräumige vertikale Schacht-

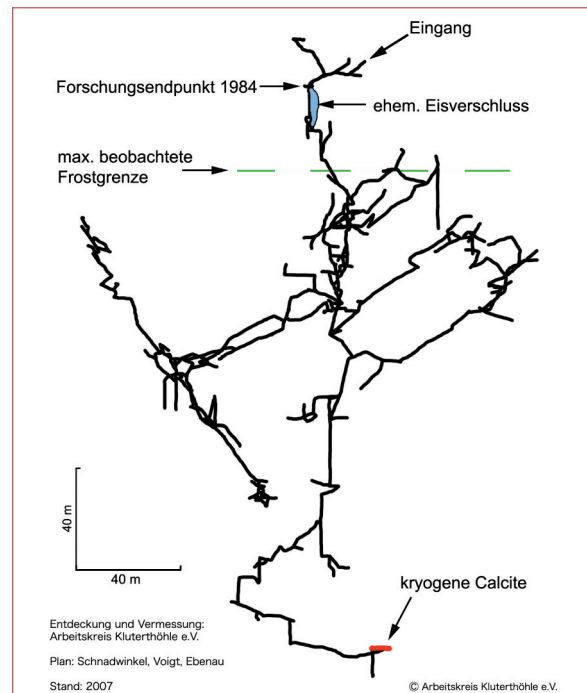


Abb. 2: Aufriß der Glaseishöhle mit Markierung der Fundstelle (Pfeil) der kryogenen Calcite.

zonen zerschnitten. Als letzte nacheiszeitliche Bildung sind einige wenige korrosiv entstandene Sickerwasserschächte und enge Canyons entstanden. Starke Schäden an mächtigen Sinterpartien weisen hier selbst im tiefsten Teil (–229 m unter Eingang) auf die zerstörende Kraft des Eises hin. Der Funnpunkt der 2007 aufgesammelten kryogenen Calcite lag auf dem

METHODIK

Das lockere bis schwach verfestigte Höhlensediment wurde zunächst von feinsten Verunreinigungen wie Eisenoxihydraten durch Waschen gereinigt, bevor es petrographisch sowie geochemisch näher untersucht wurde.

Zur Dokumentation der äußeren Konturen der Kleinsinterformen wurden goldbesputterte Präparate mit einem hochauflösenden Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (HR-FEM) vom Typ LEO/Zeiss 1530 Gemini digital erfasst. Beobachtungen zur internen Strukturierung erfolgten an Dünnschliffen unter Einsatz der Durchlicht- sowie der Kathodolumineszenz (KL)-Mikroskopie (Neuser et al., 1996; Richter et al., 2003). Röntgenographische Untersuchungen zur Zusammensetzung der Karbonatphasen erfolgten in einem Philips Zählrohrdiffraktometer PW 1050/25 mit AMR Monochromator unter Einsatz von $\text{Cu}_{K\alpha}$ -

Lehmboden in einem Gewirr kleiner phreatischer Röhren und Gänge in 229 m Tiefe (Abb. 2). Unmittelbar daneben fanden sich auch hier durch Frost zerstörte Sinterbildungen. Derzeit liegt die Frostgrenze bei etwa –40 m. In den darunter liegenden, stark dynamisch bewetterten Höhlenteilen liegen die Temperaturen heute etwa bei +1 bis +2°C.

Strahlung (40 kV, 35 mA). Dabei wurden achatgemörserte Proben mit Quarzpulver als internem Standard über den Beugungswinkelbereich 26° – 38° 2θ gefahren, um jeweils den d_{104} -Wert der rhomboedrischen Karbonate hinsichtlich ihrer Ca/Mg-Verteilung zu erfassen (vgl. Füchtbauer & Richter, 1988).

Die KL-Mikroskopie wurde an einem Heißkathoden-KL-Mikroskop vom Typ Lumic HC1-LM (Neuser et al., 1996) an beidseitig polierten, mit Gold gesputterten Dünnschliffen durchgeführt.

Die C/O-Isotopenzusammensetzung der Calcite wurde nach Aufbereitung mit einer Gasbench mit einem Delta S Massenspektrometer (Finnigan MAT) ermittelt und gegen VPDB geeicht (Standards: CO-1 und CO-8). Die 1σ Reproduzierbarkeit der Meßwerte liegt für $\delta^{13}\text{C}$ bei 0,04‰ VPDB und für $\delta^{18}\text{O}$ bei 0,08‰ VPDB.

STRUKTURIERUNG DER PARTIKEL

Die Partikel des „Karbonatsandes“ (Arenit nach üblicher Karbonatnomenklatur; von Höhlenforschern treffend als „Kristallsand“ bezeichnet) setzen sich aus einzelnen oder miteinander verwachsenen Calcitrhomboedern zusammen (Rhomboederkristallsinter nach Richter et al., 2008), wobei zwei Formen unterschieden werden können: 1. normale Rhomboeder, 2. steile Rhomboeder. Bereits durchlichtmikroskopisch fallen beide Typen auch als Aggregate auf, die sich jeweils aus miteinander verwachsenen normalen (klaren) bzw. steilen (einschlussreichen) Rhomboedern zusammensetzen (Abb. 3).

Die normalen Rhomboeder weisen Kristallgrößen von 10 – 100 μm auf, sind zumeist zopf- bis plättchenartig miteinander verwachsen (Abb. 4e,f) und erscheinen bei Lupenbetrachtung zumeist klar durchsichtig. Dagegen liegen die häufig etwas größeren steilen Rhomboeder (20 – 200 μm) zumeist als Einzelformen (Abb. 4a) und seltener als Aggregate (Abb. 4c,d) vor. Bei Lupenbetrachtung ergibt sich für die steilen Rhomboeder durchweg ein milchig weißes Erscheinungsbild,

was auf einen hohen Einschlussgehalt bzw. eine hohe Mikroporosität (Abb. 4b) zurückzuführen ist. Zudem erweisen sich die steilen gegenüber den normalen Rhomboedern durchlichtmikroskopisch bei gekreuzten Nicols als undulös. Offensichtlich sind die Kristal-

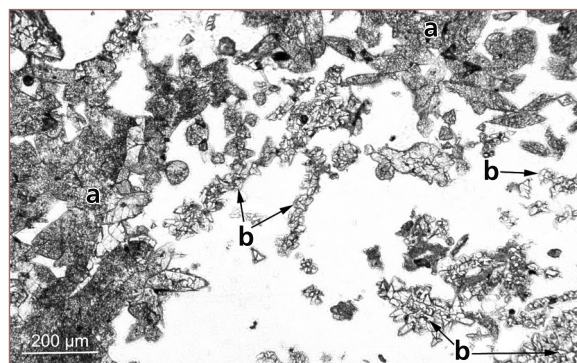


Abb. 3: Durchlichtmikroskopische Aufnahme kryogener Calcite der Glaseishöhle. a = Aggregate von Kristallen mit einschlussreichen steilen Rhomboedern, b = Aggregate von Kristallen mit zopfartig miteinander verwachsenen normalen Rhomboedern.

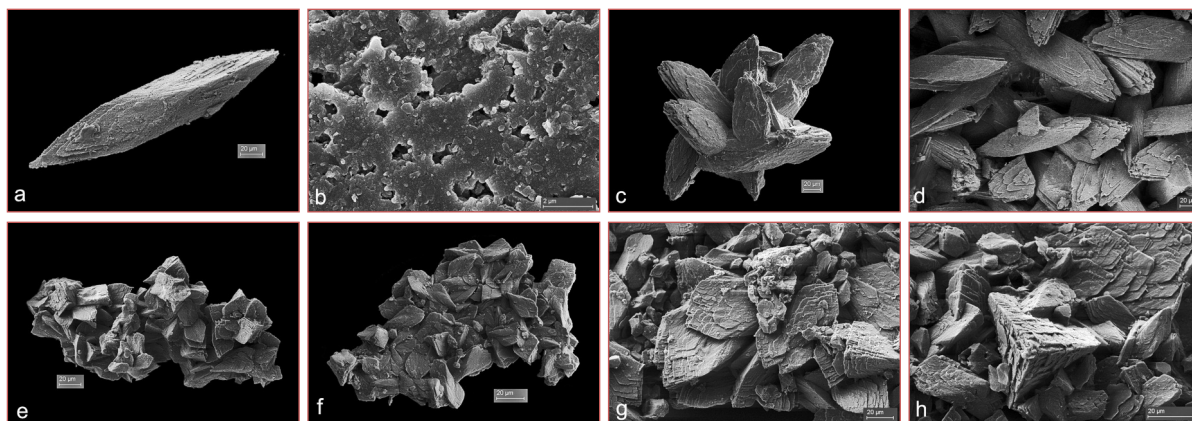


Abb. 4a-h: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen kryogener Calcite der Glaseishöhle. a-d = Typ A (steile Rhomboeder), a – Einzelkristall, b – Oberfläche eines Einzelkristalls, c – sternförmiges Aggregat, d – Ausschnitt eines plättchenförmigen Aggregats. e-h = Typ B (normale Rhomboeder), e+f – ketten- bis plättchenförmige Aggregate, g+h – stärkere Vergrößerungen der normalen Rhomboeder.

le aus nahezu gleichermaßen orientierten Subindividuen zusammengesetzt, wofür auch die gestufte Ausbildung an der Peripherie der Rhomboeder spricht. Dies ist allerdings sowohl bei den steilen (Abb. 4 a,c,d) als auch bei den normalen (Abb. 4g,h) Rhomboedern

zu beobachten. Fremdionen (z.B. Mg^{2+}) spielen als Ursache für die Undulosität keine Rolle, da die Rhomboeder nach röntgenographischer Untersuchung nahezu stöchiometrisch zusammengesetzt sind ($d_{104} = 3,035-3,036 \text{ \AA}$).

KL-MIKROSKOPIE

Durch einen Elektronenstrahl angeregt, wird eine erstaunliche Variabilität im KL-Verhalten der Calcitpartikel aus der Glaseishöhle aufgedeckt (Abb. 5), was im Kontrast zur intrinsischen KL (blaue Lumineszenzfarbe reiner Calcite mit Breitbanden bei 400 nm

sowie zwischen 580 und 660 nm nach Habermann et al. 1999) der kryogenen Calcite der Eisriesenwelt steht (Spötl, 2008). Die im Wesentlichen vom Anteil des Aktivatorelements Mn^{2+} im Calcitgitter (vgl. Quantifizierung von Habermann et al., 1998) abhängige

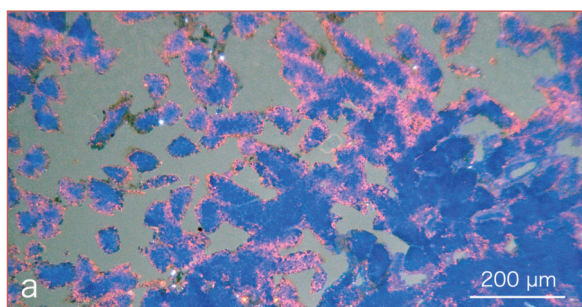
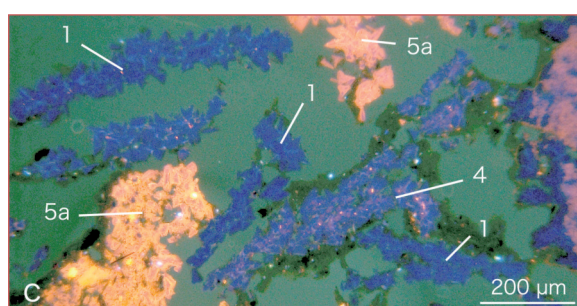
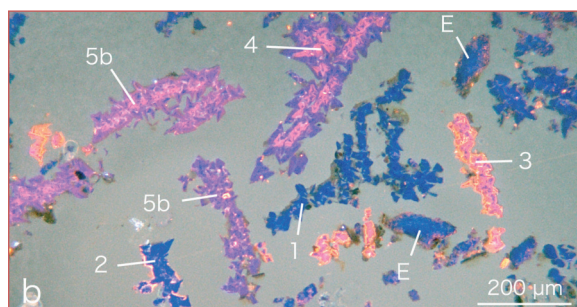


Abb. 5a-c: Kathodolumineszenzmikroskopische Aufnahmen kryogener Calcite der Glaseishöhle. a = steile Rhomboeder mit intrinsisch-blauem Kern und fleckige lumineszierender Außenzone; b+c = zopfartig miteinander verwachsene normale Rhomboeder mit unterschiedlichem KL-Verhalten: 1 = Subtyp 1 mit intrinsisch-blauer Farbe, 2 = Subtyp 2 mit überwiegend blau lumineszierenden Kernbereichen und einem dünnen Saum mit rotvioletter und gelb-orangefarbener KL, 3 = Subtyp 3 mit violetter KL-Farbe im Inneren und einer dünnen gelborangefarbenen Zone außen, 4 = Subtyp 4 mit überwiegend violett lumineszierenden inneren Bereichen und nahezu intrinsisch blauen äußeren Zonen, 5 = Subtyp 5 mit intensivem Zonarbau aus gelborangefarbenen sowie violetten Zonen (5a) und aus gelborangefarbenen, violetten und blauen Zonen (5b). E = Einzelkristalle steiler Rhomboeder mit



intrinsisch-blauem Kern und fleckig lumineszierender Außenzone.

blau-violett-orange KL-Farbe verteilt sich bei den Glaseishöhlencalciten unter Einbeziehung zonarer Verteilungsmuster auf folgende Haupt- und Subtypen:

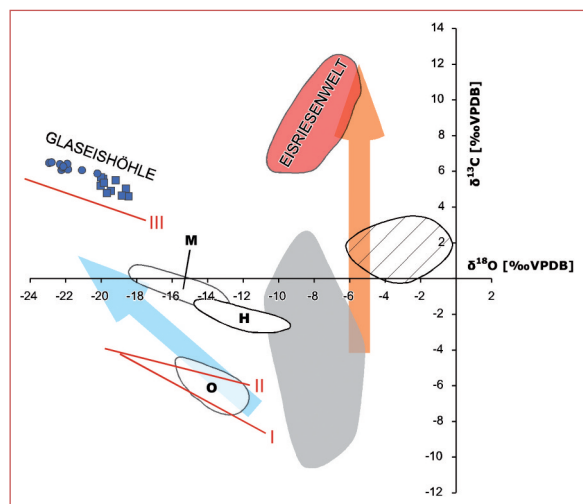
1. Die einschlusreichereren, größer dimensionierten (bis 200 μm) steilen Rhomboeder weisen im Inneren stets eine intrinsisch blaue KL-Farbe auf, während sich ein unterschiedlich dicker Randbereich durch ein fleckiges KL-Muster mit blauen, violetten und orangefarbenen Farbnuancen auszeichnet (Abb. 5a und E in Abb. 5b).
2. Die zumeist kettenartig aus klaren kleineren (bis 100 μm Durchmesser), vorwiegend normalen Rhomboedern aufgebauten Aggregate können eine einheitliche blaue KL-Farbe aufweisen (Subtyp 1 in Abb. 5b und c), zeigen aber zumeist einen intensiven

Zonarbau, der weiteren Subtypen zugeordnet werden kann (Abb. 5b und c):

- Subtyp 2: Auf überwiegend blau lumineszierenden Calciten schließt sich ein dünner Saum mit rotvioletter und gelb-orangefarbener KL an (Subtyp 2 in Abb. 5b).
- Subtyp 3: Calcit mit violetter KL-Farbe im Inneren und einer dünnen gelborangefarbenen Zone außen (Subtyp 3 in Abb. 5b).
- Subtyp 4: An überwiegend violett lumineszierende innere Bereiche schließen sich Zonen mit nahezu intrinsisch blauer KL an (Subtyp 4 in Abb. 5b und c).
- Subtyp 5: Calcite mit intensivem Zonarbau aus gelborangefarbenen (Subtyp 5a in Abb. 5c) sowie violetten Zonen und aus gelborangefarbenen, violetten und blauen Zonen (Subtyp 5b in Abb. 5b).

C/O-ISOTOPENZUSAMMENSETZUNG

Die massenspektrometrische Untersuchung der Rhomboederkristallsinter hat $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen +4,7 und +6,6‰ VPDB und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen -18,5 und -23,0‰ VPDB ergeben (Abb. 6). Auffälligerweise sind die Kleinsinter aus steilen Rhomboedern gegenüber denjenigen aus normalen Rhomboedern leichter bezüglich der O-Isotopie und schwerer bezüglich der C-Isotopie.



Diese Calcitpartikel sind gegenüber „normalen“ Speleothemen (Stalagmiten, Stalaktiten, Boden-/Wand-sinter) ostalpiner Höhlen hinsichtlich der C-Isotopie schwerer und der O-Isotopie isotopisch leichter (Abb. 5). Eine ebenfalls abweichende C/O-Isotopenzusammensetzung weist der Dachsteinkalk – das Höhlenmuttergestein – auf, wie es sich aus den Daten von Gökday (1974) für entsprechende Kalkgesteine der benachbarten Loferer Steinberge sowie der Reiter Alpe ableiten lässt (Abb. 6).

Abb. 6: C/O-Isotopenzusammensetzung kryogener Calcite der Glaseishöhle (Kreise = steile Rhomboeder, Vierecke = normale Rhomboeder) im Vergleich zu entsprechenden Daten „normaler“ Tropfsteine (Stalagmiten, Bodensinter) ostalpiner Höhlen (graues Feld – nach Spötl, 2008) sowie Dachsteinkalkproben der Salzburger Alpen (schraffiertes Feld – nach Gökday 1974). Orangefarbener Pfeil: C/O-Isotopentrend kryogener Calcite bei raschem Ausfrieren; rotes Feld – kryogene Calcite der Eisriesenwelt (Spötl 2008); hellblauer Pfeil: C/O-Isotopentrend kryogener Calcite bei langsamem Ausfrieren. I-III = Trends von kryogenen Calciten aus Höhlen des östlichen Mitteleuropas nach Žák et al., 2004, I = Jaskinia Jaworzidia Höhlensystem, II = BUML Höhle, III = Stratviská Jaskyňa Höhlensystem; MHO = Bereiche von Calciten mitteleuropäischer Höhlen nach Richter & Niggemann (2005), M – Malachitdom bei Bleiwäsche/Brilon, H – Herbstlabyrinth bei Breitscheid, O – Osterberghöhle bei Bestwig.

DISKUSSION

Nach den vorliegenden Daten weist die unterschiedliche Form der Rhomboederkristallsinter (normale versus steile Rhomboeder) neben- und übereinander auf dem Boden der Glaseishöhle auf eine Zusammen-

schwemmung genetisch verschiedener kryogener Kleinsinter hin. Das polymikte Verteilungsmuster der „Kristallsande“ wird durch die sehr variable KL-Strukturierung unterstrichen und verstärkt. Das Zusammen-

menschswemmen verschiedener kryogener Calcitpartikel ist bereits von Erlemeyer et al. (1992 – ohne C/O-Isotopendaten) und Richter & Niggemann (2005 – mit C/O-Isotopendaten) aus dem Malachitdom bei Brilon (NE' Rheinisches Schiefergebirge) und von Richter et al. (2008 - mit C/O-Isotopendaten) aus der Heilenbeker Höhle in Ennepetal (Bergisches Land) beschrieben worden.

Die C/O-Isotopendaten der Rhomboeder aus der Glaseishöhle fallen mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von +4,7 bis +6,6‰ VPDB und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen –18,5 und –23,0‰ VPDB an die Peripherie des für langsam gebildete kryogene Calcite bekannten Bereichs (Abb. 6). Diese positivste C-Isotopenzusammensetzung bei stark negativer O-Isotopenzusammensetzung aller bekannten langsam auskristallisierten Kryocalcite (Žák et al., 2008, vgl. Fig. 5) steht nach unserer Meinung sensu Žák et al. (2004) mit der sehr starken Bewetterung der Höhle (vgl. Kap. Lokation) in Einklang, was einen stärkeren Evaporationseffekt zur Folge hat.

Während die von Spötl (2008) aus der Eisriesenwelt des Tennengebirges beschriebenen kryogenen Calcitpartikel mit schwerer C- und O-Isotopenzusammensetzung lediglich auf einen stärkeren Evaporationseinfluss bei einer Kristallisation aus schnell gefrierendem Wasser zurückgeführt werden, entspricht die C/O-Isotopenzusammensetzung der Proben der Glaseishöhle mehr einer Mineralisation aus langsam gefrierendem Wasser sensu Žák et al. (2004). Im mitteleuropäischen Raum geschah diese langsame Bildung kryogener Calcite im Übergang von Kalt- zu Warmzeiten im Bereich der 0°-Isotherme der durchschnittlichen Jahrestemperatur oberhalb der Höhle, wobei zunächst temporär Tropfwasser in die bislang im Permafrostbereich gelegenen Höhle gelangten und zu einem Eiskörper auf dem Höhlenboden gefroren (Žák et al., 2004; Richter & Niggemann, 2005; Richter & Riechelmann, 2008; Richter et al., 2008).

Aus Wasserbecken auf dem Eis bzw. überfroren im Eis bildeten sich dann im Verlauf langsamen Gefrierens

kryogene Calcite aus Restlösungen, die natürlich von Becken zu Becken variabel zusammengesetzt sein können, was zu unterschiedlich zusammengesetzten kryogenen Calciten führt. Bei kryogener Calcitbildung aus langsam gefrierendem Wasser entstehen gegenüber derjenigen aus schnell gefrierendem Wasser größere Kristalle (Žák et al., 2008; Spötl, 2008; Richter & Riechelmann, 2008). Nach Abschmelzen des Eises liegen die verschiedenen Kryocalcite miteinander vermengt auf dem Höhlenboden vor. Im Fall der Glaseishöhle kann die kryogene Calcitbildung für die bestenfalls anverfestigten Kristallsande am Höhlenboden frühestens im Holozän (z.B. mit der Warmphase des Atlantikums) begonnen haben. Da aber die aktuelle Temperatur der Höhle nahe am Gefrierpunkt liegt, ist im Umfeld des Fundpunktes der beschriebenen Partikel auch rezent die Bildung kryogener Calcite denkbar.

Das zuvor skizzierte Genesemodell dürfte zutreffen, da die verschiedenen kryogenen Calcittypen keine Übergangsformen zeigen und somit in unterschiedlichen Milieus gebildet worden sein müssen. Eine Genese in chemisch unterschiedlichen kleinen Wasserbecken wird auch durch die KL-mikroskopisch unterscheidbaren Typen der Sinterformen belegt. Möglicherweise spielt bei der Genese der Calcitsinter mit steilen Rhomboedern gegenüber denjenigen mit normalen Rhomboedern ein stärkerer Evaporationseffekt eine Rolle oder es liegt eine starke kinetische Fraktionierung vor, zumal sie sich durch relativ schwere C-Isotopenzusammensetzungen auszeichnen. Für diese Interpretation mag auch die Beobachtung von Folk (1974) sprechen, dass aus Lösungen mit erhöhtem Mg/Ca-Verhältnis Calcitkristalle mit steilen Rhomboedern gebildet werden. Nur in unserem Fall ist der Effekt nicht auf einen erhöhten Mg-Anteil, sondern auf einen deutlich erhöhten Fluideinschlussgehalt (milchiges Aussehen) zurückzuführen, was möglicherweise das Seiten- gegenüber dem Längenwachstum behindert hat.

DANKSAGUNG

Für technische Unterstützung bezüglich der Dünnschliffherstellung danken wir M. Born. Aufbereitung und Messungen für die C/O-Isotopie verdanken

wir B. Gehnen. Für die konstruktive Begutachtung durch R. Pavuza sowie C. Spötl bedanken wir uns herzlich.

LITERATUR

Erlemeyer, M., Hasenmeyer, B. & Schudelski, A. (1992): Das Höhlensystem Kreiselhalle-Malachitdom – ein bemerkenswerter Aufschluss für Höhlenminerale. – In:

Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Der Malachitdom – Ein Beispiel interdisziplinärer Höhlenforschung im Sauerland, 69-89.

- Folk, R.L. (1974): The natural history of crystalline calcium carbonate. Effect of magnesium content and salinity. – *J. Sedim. Petrol.* 44: 40-53.
- Füchtbauer, H. & Richter, D.K. (1988): Karbonatgesteine. – [In:] Füchtbauer, H. (Hrsg.): *Sedimente und Sedimentgesteine*. – Schweizerbart/Stuttgart, 233-434.
- Gökdag, H. (1974): Sedimentpetrographische und isotopengeochemische (O^{18} , C^{13}) Untersuchungen im Dachsteinkalk (Oberror-Rät) der Nördlichen Kalkalpen. – Inaugural-Dissertation Univ. Marburg/Lahn, 156 S.
- Habermann, D., Götze, J., Neuser, R.D. & Richter, D.K. (1999): The phenomenon of intrinsic cathodoluminescence: Case studies of quartz, calcite and apatite. – *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, Jg.1997: 1275-1284.
- Habermann, D., Neuser, R.D. & Richter, D.K. (1998): Low limit of Mn^{2+} -activated cathodoluminescence of calcite: state of the art. – *Sed. Geol.*, 166: 13-24.
- Lacelle, D. (2007): Environmental setting (micro)morphologies and stable C-O-isotope composition of cold climate carbonate precipitates – A review and evaluation of their potential as paleoclimatic proxies. – *Quaternary Sci. Rev.*, 26: 1670-1689.
- Neuser, R.D., Bruhn, E., Götze, J., Habermann, D. & Richter, D.K. (1996): Kathodolumineszenz: Methodik und Anwendung. – *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, 1995: 287-306.
- Richter, D.K., Götze, T., Götze, J. & Neuser, R.D. (2003): Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology. – *Mineral. Petrol.*, 79: 127-466.
- Richter, D.K. & Niggemann, S. (2005): Kryogene Calcite in Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges. – *Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstf.*, 51: 129-132.
- Richter, D.K. & Riechelmann, D.F.C. (2007): Cupulas of the Malachitdom cave (Sauerland/NRW) – cryogenic spherulites with unusual calcitic structure and C/O-isotopic composition. – *Geo.Alp.*, 4: 79.
- Richter, D.K. & Riechelmann, D.F.C. (2008): Late Pleistocene cryogenic calcite spherulites from the Malachitdom Cave (NE Rhenish Slate Mountains, Germany): origin, unusual internal structure and stable C-O isotope composition. – *Int. J. Speleology*, 37: 119-129.
- 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: 39-47.
- Spötl, C. (2008): Kryogene Karbonate im Höhleneis der Eisriesenwelt. – *Die Höhle*, 59: 26-38.
- Viehmann, I. (1960): Un nouveau processus de genèse des perles de caverne. – *eskoslovensk Kras*, 12: 177-185 (tschechisch mit franz. Kurzfassung).
- Voigt, S. (2003): Die Glaseishöhle. Neue Großhöhle am Schneiber, Steinernes Meer, Berchtesgaden. – *Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch.*, 49: 46-47.
- Žák, K., Onac, B.P. & Perşoiu, A. (2008): Cryogenic carbonates in cave environments: A review. – *Quaternary Intern.*, 187: 84-96
- Žák, K., Urban, J., Cilek, V. & Hercman, H. (2004): Cryogenic cave calcite from several Central European caves: age, carbon and oxygen isotopes and a genetic model. – *Chem. Geol.*, 206: 119-136.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 2009

Band/Volume: [060](#)

Autor(en)/Author(s): Richter Detlef K., Voigt Stefan, Neuser Rolf D.

Artikel/Article: [Kryogene Calcite unterschiedlicher Kristallformen und Kathodolumineszens aus der Glaseishöhle am Schneiber \(Steinernes Meer/Nationalpark Berchtesgaden, Deutschland\) 3-9](#)