Geol. Paläont. Westf.	**78**	61-71	6 Abb. 1 Taf.	Münster Dezember 2010

Mittel- und oberpleistozäne Calcitpartikel kryogener Entstehung aus der Apostelhöhle südöstlich Brilon (Sauerland, NRW)

Detlev K. Richter[1], Ulrike Schulte[1], Augusto Mangini[2], Andreas Erlemeyer[3] & Matthias Erlemeyer[3]

Zusammenfassung

Lehmige Lockersedimente der Apostelhöhle südöstlich Brilon enthalten an 2 tiefgelegenen Fundstellen (-83m und -93m unter Eingangshöhe) bis zu 4cm große weiße Calcitpartikel, die sich aufgrund ihrer Strukturierung (Zopfsinter, Sphärolithsinter, Rhomboederkristallsinter, Skelettkristallsinter) und O-Isotopenzusammensetzung (-6 bis -17 ‰ VPDB) als kryogene Bildungen erwiesen haben. TIMS U/Th-Datierungen belegen für die Kryocalcite verschiedene mittel- und oberpleistozäne Genesezeiten. Die in Wasserbecken auf Eis durch langsames Ausfrieren des Wassers gebildeten Kryocalcite wurden nach Abschmelzen des Eises ein- oder mehrphasig auf dem Höhlenboden vermengt.

Abstract

Subject of the study are white, calcitic speleoparticles of up to 4 cm that have been found within the loamy sediments of the Apostelhöhle, (SE Brilon, Germany). Because of their typical structure (braid sinter, spherulite sinter, rhombohedral crystal sinter, skeletal crystal sinter) and negative ^{18}O-values (-6 to -17 ‰ VPDB), a cryogenic formation of the calcite particles can be assumed. TIMS U/Th-dating revealed a middle to upper Pleistocene age. Probably the calcites precipitated slowly “aufeis” in small water basins. After melting of the ice, the calcite particles were mixed with the cave sediments.

Schlüsselworte

Speläotheme – Kryocalcite – pleistozäne Kaltzeiten – Massenkalkhöhlen – Rheinisches Schiefergebirge – Sauerland

*Anschriften der Verfasser:
[1] Prof. Dr. Detlef K. Richter, Dr. Ulrike Schulte
Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, D-44801 Bochum, **detlev.richter@rub.de**
[2] Prof. Dr. Augusto Mangini
Forschungsstelle Radiometrie, Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Im Neuenheimer Feld 229, D-69120 Heidelberg, **amangini@iup.uni-heidelberg.de**
[3] Andreas Erlemeyer, Matthias Erlemeyer
Trift 6, D-59929 Brilon-Hoppecke

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 61

Abstract 61

Schlüsselworte 61

1. Einführung 63

2. Fundsituation und Probenauswahl 63

3. Methodik 64

4. Strukturierung der Speläopartikel 64
4.1 Zopfsinter 65
4.2 Sphärolithsinter 65
4.3 Rhomboederkristallsinter 66
4.4 Skelettkristallsinter 66

5. C/O – Isotopenzusammensetzung 68

6. U/Th – Datierungen 69

7. Zusammenfassende Diskussion 69

8. Literatur 71

1. Einführung

Calcitische Speläopartikel (Einzelkristalle, Aggregate, Sphärolithe, Hemisphärolithe – meist < 10mm Durchmesser) mit sehr leichter O-Isotopenzusammensetzung (-9 bis -24‰ VPDB) und weichselzeitlichem Entstehungsalter sind zuerst von ŽÁK et al. (2004) aus polnischen, tschechischen und slowakischen Höhlen und weiterhin von RICHTER & NIGGEMANN (2005) aus Höhlen im devonischen Massenkalk des Rheinischen Schiefergebirges beschrieben worden. Diese Calcite haben sich nach den genannten Autoren bei sehr langsamem Gefrieren von Wasser in Höhlen beim Unterschreiten der 0°C-Isotherme gebildet, wie es beispielsweise im mitteleuropäischen Raum zwischen der alpinen und der nordeuropäischen Vereisung während der Weichselkaltzeit wiederholt der Fall war. Da derartige Calcitpartikel trotz sehr unterschiedlicher Form, Internstrukturierung und Größe vermengt auf dem Höhlenboden sowie auf Versturzblöcken vorkommen und an den Höhlenwänden Eishaftungen zu beobachten sind, ist von einer Genese der Partikel in verschiedenen Bereichen von Wasserbecken auf Höhleneis auszugehen. Erst nach Abschmelzen des Eises nach erneuter Erwärmung kommt es zur Vermengung der unterschiedlichst strukturierten kryogenen Calcitpartikel (CCC=**c**ryogenic **c**ave **c**alcites sensu ŽÁK et al. (2004, 2008)).

Aus Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges sind kryogene Calcitpartikel zuvor genannter Genese bislang von folgenden Vorkommen gut belegt: Malachitdom (RICHTER & NIGGEMANN 2005, RICHTER & RIECHELMANN 2008), Großhöhle von Erdbach-Breitscheid sowie Ostenberghöhle (RICHTER & NIGGEMANN 2005), Heilenbecker Höhle (RICHTER et al. 2008) und Große Sunderner Höhle (RICHTER et al. 2009a). Nach bislang vorliegenden TIMS U/Th-Altersdatierungen koinzidiert die Kryocalcitgenese in Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges mit weichselzeitlichen Interstadialen (GI 1 in MIS 2 – RICHTER & RIECHELMANN 2008, GI 5 in MIS 3 – RICHTER et al. 2009b) und ist somit an den Übergang dieser Warmphasen zu nachfolgenden Kaltphasen gebunden.

In der vorliegenden Studie wird mit den Kryocalciten aus der Apostelhöhle ein weiteres Vorkommen im Rheinischen Schiefergebirge bekannt gemacht, wobei die ungewöhnliche Größe und das unterschiedliche Alter der Speläopartikel von besonderer Bedeutung sind.

2. Fundsituation und Probenauswahl

Die am Sticklen-Berg nordwestlich Messinghausen gelegene Apostelhöhle (Kataster-Nr. 4718-01; MTB 4618: R 347694, H 569562; Eingang 501m ü. NN) ist im mittel- bis oberdevonischen Massenkalk am Südrand der Briloner Hochfläche an der Nordflanke des Hoppecketals geformt worden (Abb. 1). Beim Wirtsgestein der am Südflügel des Messinghauser Sattels ausgebildeten Schichten handelt es sich nach PAECKELMANN (1936) um steil nach Süden einfallende Bänke des Eskesberger Kalks (dm2k2) und des Dorper Kalks (do1k).

Der Eingangsteil der Apostelhöhle wurde erstmals von WEBER (1981) im Höhlen-Kataster Westfalens erwähnt und von ZYGOWSKI (1983) in einer Übersicht zu den Höhlen der Briloner Hochfläche dokumentiert. In der Folgezeit ist der weitere Verlauf der Höhle von M. Erlemeyer und Mitarbeitern erkundet worden und in einem Plan vom Jahr 2004 kartographisch erfasst worden. Die schachtbezogene Höhle reicht bis -106m in die Tiefe (Abb. 2), wobei sie sich horizontal in südwestliche Richtung zum Hoppecketal (hier etwa 370m ü. NN) erstreckt. Die erste Fundstelle befindet sich -83m unter Eingangshöhe auf dem Höhlenboden nahe der Hohekluft, während sich die zweite Fundstelle auf einen kleinen Vorsprung in -93m im Bereich des Grossen Canyons bezieht (s. Abb. 2).

Bei den von A. Erlemeyer entnommenen Bodenproben handelt es sich um tonig/siltige braune Lehme, in denen bis zu 4cm große weiße Kristallaggregate auffallen. Die größeren Aggregate sind bei Lupenbetrachtung häufig hemisphärolithisch bzw. zopfartig ausgebildet, was in Höhlen für kryogen gebildete Calcitpartikel typisch ist (Darstellungen siehe ŽÁK et al. 2004, RICHTER & NIGGEMANN 2005, RICHTER et al. 2008). Neben den letztgenannten, offensichtlich kryogen gebildeten Partikeln, denen nachfolgend das besondere Interesse gilt, fallen aber auch klare Kristallaggregate auf, die zum Vergleich ebenfalls untersucht wurden.

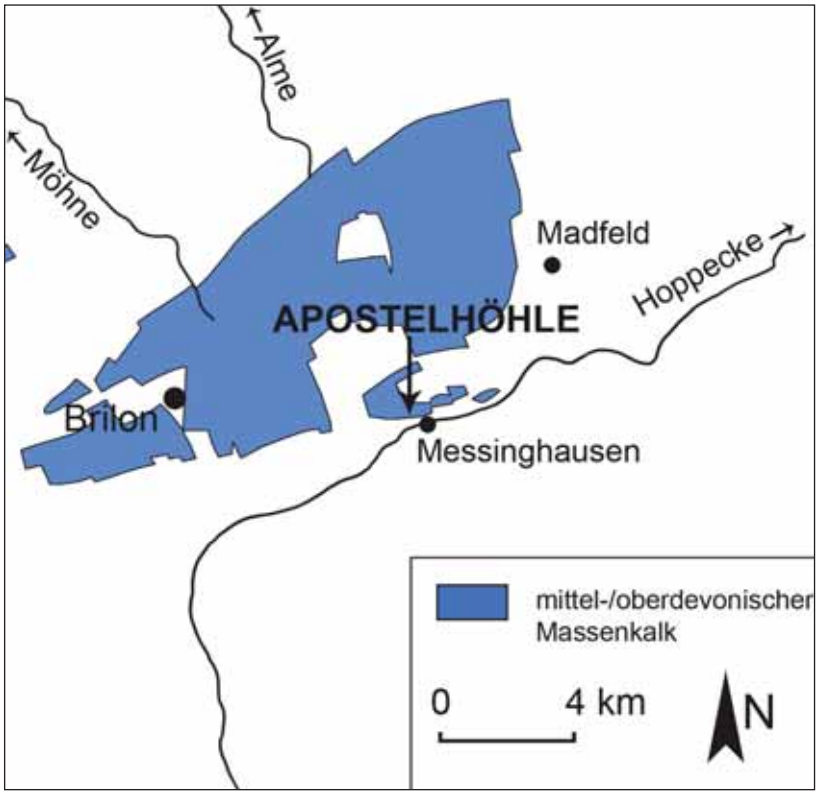

Abb. 1: Lage der Apostelhöhle am Südrand der Briloner Hochfläche an der Nordflanke des Hoppecketals nahe dem Sticklenberg nordwestlich Messinghausen.

3. Methodik

Die Typisierung der Speläopartikel erfolgte nach Ausschlämmen des tonig/siltigen Materials unter einem Binokular-Mikroskop, um danach die Detailstrukturierung anhand goldbedampfter Präparate mit einem hochauflösenden Feldemissions-Rasterelektronenmikroskop (HR-FEM) vom Typ LEO/Zeiss 1530 Gemini digital zu erfassen. Die C/O-Isotopenzusammensetzung der Calcitpartikel wurde nach Aufbereitung mit einer Gasbench mit einem Massenspektrometer delta S (Finnigan MAT) ermittelt und gegen V-PDB geeicht. (Standards: CO-1 und CO-8). Die 1 -Reproduzierbarkeit der Messwerte liegt für ^{13}C bei 0,04‰ V-PDB und für ^{18}O bei 0,08‰ V-PDB.

Die Altersbestimmungen wurden mittels der TIMS (**T**hermal **I**onization **M**ass **S**pectrometry) – U/Th-Methode an der Forschungsstelle Radiometrie der Heidelberger Akademie der Wissenschaften durchgeführt (Kompilation zur Methodik siehe SCHOLZ & HOFFMANN 2008). Dabei wurden die Isotopenmessungen von Thorium und Uran über ein Feststoffmassenspektrometer der Firma Finnigan, Modell MAT 262 RPQ, ermittelt. Mess- und Arbeitsroutine für die Uran-Thorium-Datierungen erfolgten in Reinstraum-Labors.

4. Strukturierung der Speläopartikel

Unter den calcitischen Speläopartikeln der beiden Höhlenlehmvorkommen nehmen Zopfsinter und Hemisphärolithe volumen- und gewichtsmäßig den größten Teil ein. Rhomboederkristallsinter und klare Kristallaggregate treten seltener auf und Skelettkristallsinter – häufig in der Heilenbecker Höhle (RICHTER et al. 2008) – können lediglich vermutet werden. Die Zusammensetzung der Speläopartikel erweist sich nach stichprobenartiger Untersuchung mit einem Röntgendiffraktometer des Instituts für Geologie, Mineralogie und Geophysik der RUB als rein calcitisch ($d_{(104)}$-Werte: 3,034 Å bis 3,036 Å; Quarzpulver als interner Standard).

Abb. 2: Längsschnitt der Apostelhöhle nach M. Erlemeyer und Mitarbeitern mit Markierung der beiden Kryocalcit-Fundstellen.

4.1 Zopfsinter

Zopfsinter „stellen zusammengesetzte Kompositsphärolithe dar, die unregelmäßig zopfförmig oder blumenkohlähnlich zu Ketten aneinandergereiht auftreten oder traubenartige Formen bilden“ (RICHTER et al. 2009a u. b)(Abb. 3a, b u. 4a, b). Diese erstmals von ERLEMEYER et al. (1992) aus dem Malachitdom beschriebenen Kleinsinterformen reichen von etwa 1mm kleinen hantelartigen Sphärolithen bis zu 4cm großen zopfförmigen Ketten. Häufig können bei den Zopfsintern schnabelartige Verwachsungen der Sphärolithe beobachtet werden (Abb. 4b), wie es von RICHTER & NIGGEMANN (2005) für Kompositsphärolithe der Ostenberghöhle bei Bestwig (E‘ Meschede) sowie des Herbstlabyrinths bei Breitscheid (N-Hessen) beschrieben worden ist. Die Einzelelemente der sphärolithischen Struktur stellen bis über 200mm lange Fasern bzw. Leisten dar (vgl. Abb. 4a), an deren Enden man die für Calcite typische Dreizähligkeit ausmachen kann (Abb. 4 c, d).

4.2 Sphärolithsinter

Der zweithäufigste Speläopartikeltyp wird von Hemisphärolithen eingenommen, wie sie als Kryocalcite bereits von RICHTER & NIGGEMANN (2005) aus mehreren Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges erwähnt worden sind. Im vorliegenden Fall zeichnen sich die Hemisphärolithe durch die ungewöhnliche Größe bis zu 2cm aus (Abb. 3c, d).

Als Keime der faserig aufgebauten Sphärolithe haben calcitische Partikel gedient, wobei interessanterweise Zopfsinter beobachtet wurden, was die genetisch enge Beziehung zwischen Zopfsintern und Hemisphärolithen unterstreicht (vgl. Abb 4e, f). Auch der interne Aufbau aus Calcitfasern bzw. –leisten ist bei beiden Kleinsinterformen identisch.

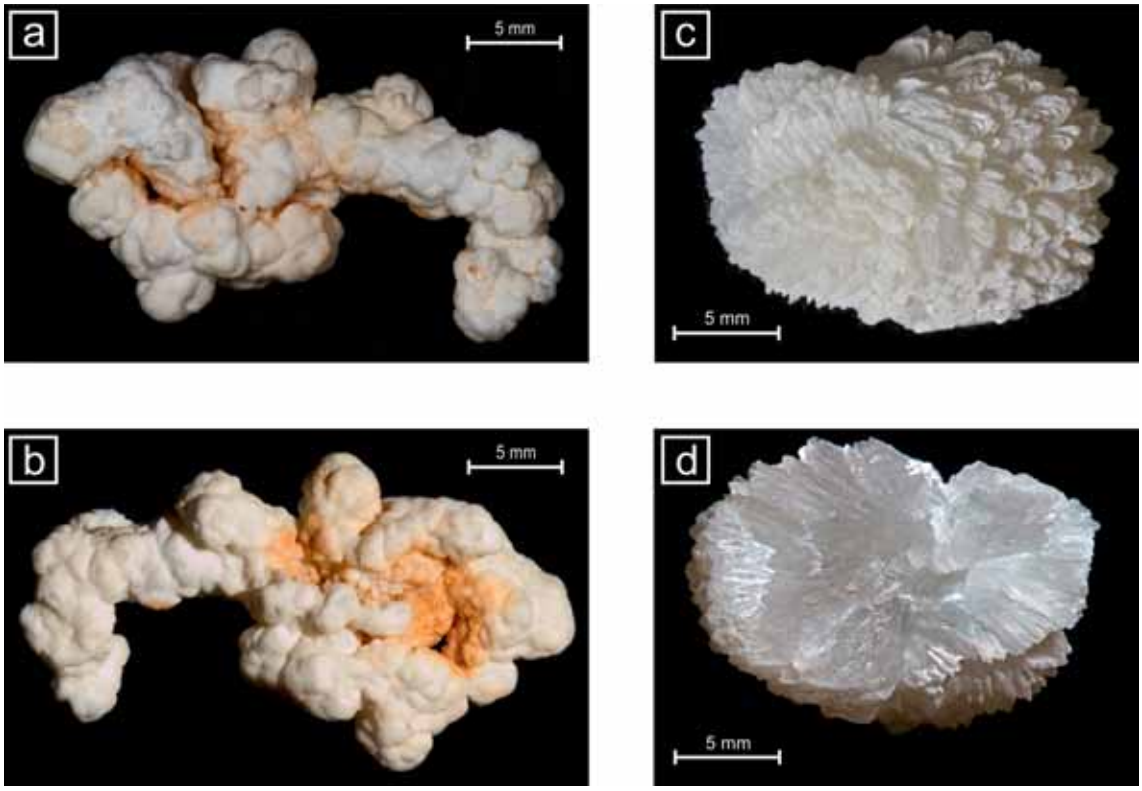

Abb. 3: Fotos der größten Zopfsinter (a-b) und Hemisphärolithe (c-d)

4.3 Rhomboederkristallsinter

Deutlich zurücktretend kommen Einzelrhomboeder und Rhomboederaggregate von 0,1 bis 1mm Durchmesser vor (Abb. 4g). Diese Rhomboederkristallsinter zeichnen sich durch leicht gewölbte Kristallflächen aus, wie es für den gleichen Speläopartikeltyp von RICHTER et al. (2008) aus der Heilenbecker Höhle und von RICHTER et al. (2009a) aus der Großen Sunderner Höhle beschrieben ist. Eine domänenartige Internstruktur dieser Rhomboeder kommt durch die stufenförmige Ausbildung der Kristallflächen zum Ausdruck.

4.4 Skelettkristallsinter

Untergeordnet kommen leisten- bis blättchenförmige Calcite vor, die häufig unregelmäßig begrenzt sind und aufgrund domänenartigen Wachstums gestuft ausgebildet sind. Sie kommen als Einzelkristalle und verwachsene Aggregate vor, wie es für Skelettkristalle – erstmals von ŽÁK et al. (2004) aus polnischen und tschechischen Höhlen beschrieben – der Heilenbecker Höhle des Bergischen Landes typisch ist (RICHTER et al. 2008). Im Fall der Apostelhöhle sind auffälligerweise auch divergierende Fächer der aus Leisten und Blättchen verwachsenen Skelettkristallaggregate zu beobachten. Am Ende der Leisten bzw. Blättchen und am divergierenden Ende der Fächer treten sphärolithische „Verdickungen“ auf (Abb. 4h), die den Einzelformen ein keulen- bis pilzförmiges Aussehen verleihen. Nach unserer Meinung handelt es sich bei diesen Partikeln um Übergangsformen zwischen älteren Skelettkristallsintern und jüngeren Sphärolithsintern. Den gleichen Typ haben ERLEMEYER et al. (1992) unter den Kleinsinterformen des Malachitdoms beschrieben und in der Gruppe „Coralloide“ zusammengefasst.

Das Restspektrum der Karbonatpartikel der Höhlemlehme der beiden Fundstellen wird von nicht näher untersuchten klaren Calcitkristallen aus steilen Rhomboedern mit Zusatzkristallflächen eingenommen. Neben Einkristallen können Bruchstücke von Kristallrasen beobachtet werden, sodass es sich um umgelagertes Material von Sinterbecken handeln dürfte. Bruchstücke bekannter Tropfsteine wie Stalagmiten, Stalagtiten, Fahnen und Flowstones fehlen offensichtlich, was mit dem geringen Sinterschmuck im Umkreis der Fundstellen im Einklang steht.

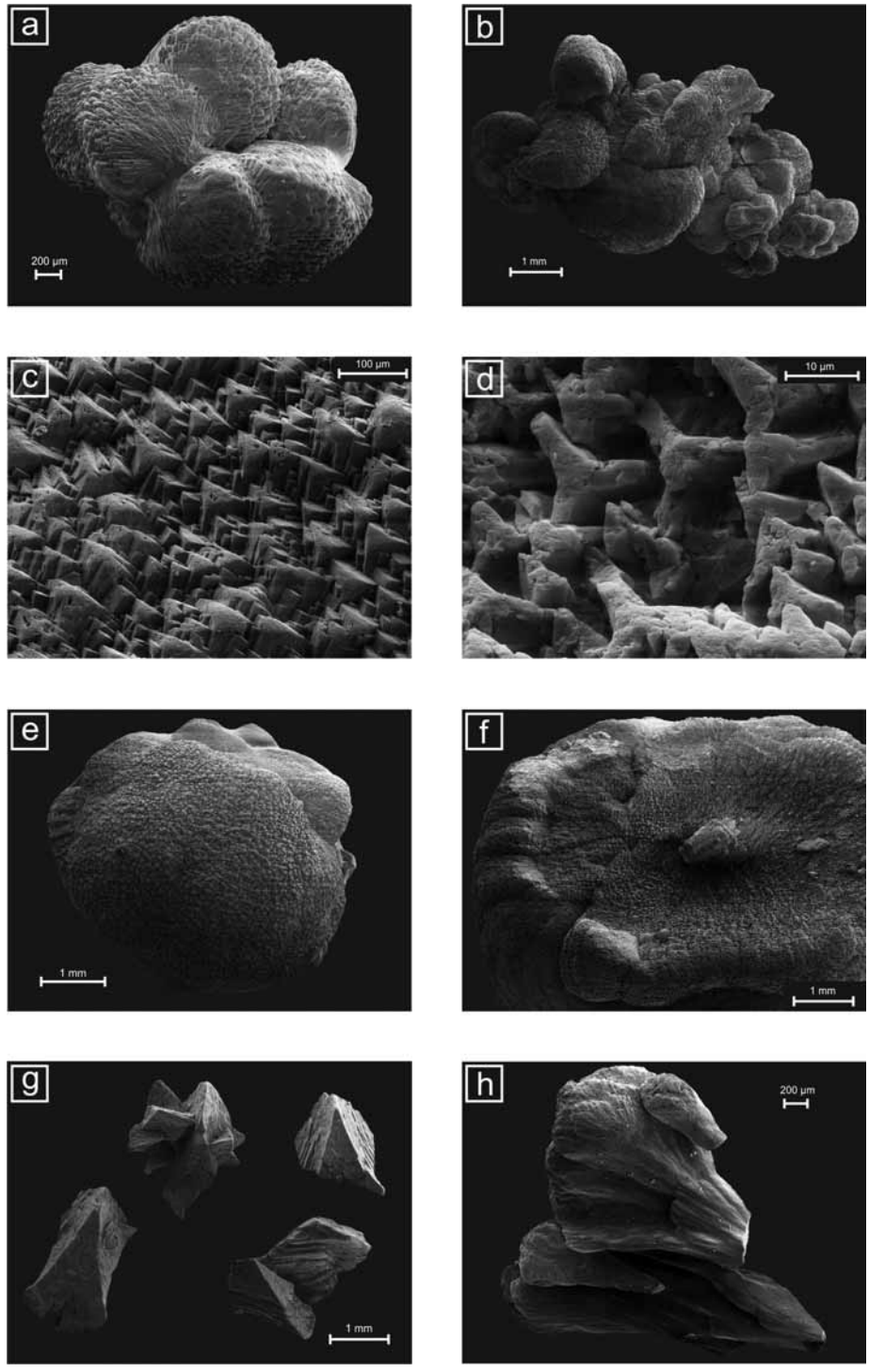

Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen verschiedener Kryocalcite:
a) Zopfsinter mit komplexer sphärolithischer Struktur aus Calcitleisten
b) Zopfsinter mit schnabelartiger Verwachsung von Sphärolithen (links)
c) Außenende der normalen Leistenstruktur sphärolithischer Sinter
d) Außenende einer skelettartigen Leistenstruktur von Zopfsintern
e) Konvexe Seite eines Hemisphäroliths
f) Gerade Seite eines Hemisphäroliths mit zopfsinterähnlichem Aggregat im Zentrum
g) Einzelrhomboeder und Rhomboederaggregate mit leicht gewölbten Kristallflächen
h) Sphärolithische Verdickungen (Sphärolithsinter) auf divergierenden unregelmäßig geformten Calcitleisten
i) (Skelettkristallsinter).

5. C/O – Isotopenzusammensetzung

Die speläogenen Calcitpartikel belegen mit ^{13}C-Werten zwischen +3,5 und -6,2‰ VPDB sowie mit ^{18}O-Werten zwischen -6,4 und -16,8‰ VPDB eine enorme Spannweite (Abb. 5). Es zeigt sich dabei ein Trend zu schwererer C-Isotopie mit leichterer O-Isotopie. Bezüglich der einzelnen Partikeltypen liegen die Hemisphärolithe mit relativ leichter O-Isotopie und schwerer C-Isotopie im Endbereich leichter O-Isotopie und schwererer C-Isotopie des Datenkollektivs, während die C/O-Werte der Zopfsinter das gesamte Kollektiv überspannen (Abb. 5). Insgesamt ist kein Unterschied in der Variationsbreite sowie im Trend der Isotopenwerte der Kryocalcitkollektive der beiden Fundorte (-83m und -93m) gegeben. Die devonischen Kalke der Höhlenumgebung führen mit ^{13}C-Werten zwischen +2,0 und +1,7‰ VPDB sowie mit ^{18}O-Werten zwischen -4,6 und -5,5‰ VPDB, wodurch sie sich deutlich vom Datenkollektiv der kryogenen Speläopartikel und der normalen Speläotheme (hier: Wandsinter) abheben (Abb. 5). Dieser Sachverhalt ist aufgrund der unterschiedlichen Calcitgenese verständlich und für Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges wiederholt belegt worden (RICHTER & NIGGEMANN 2005, RICHTER & RIECHELMANN 2008, RICHTER et al. 2008 u. 2009a u. b) (vgl. Abb. 6).

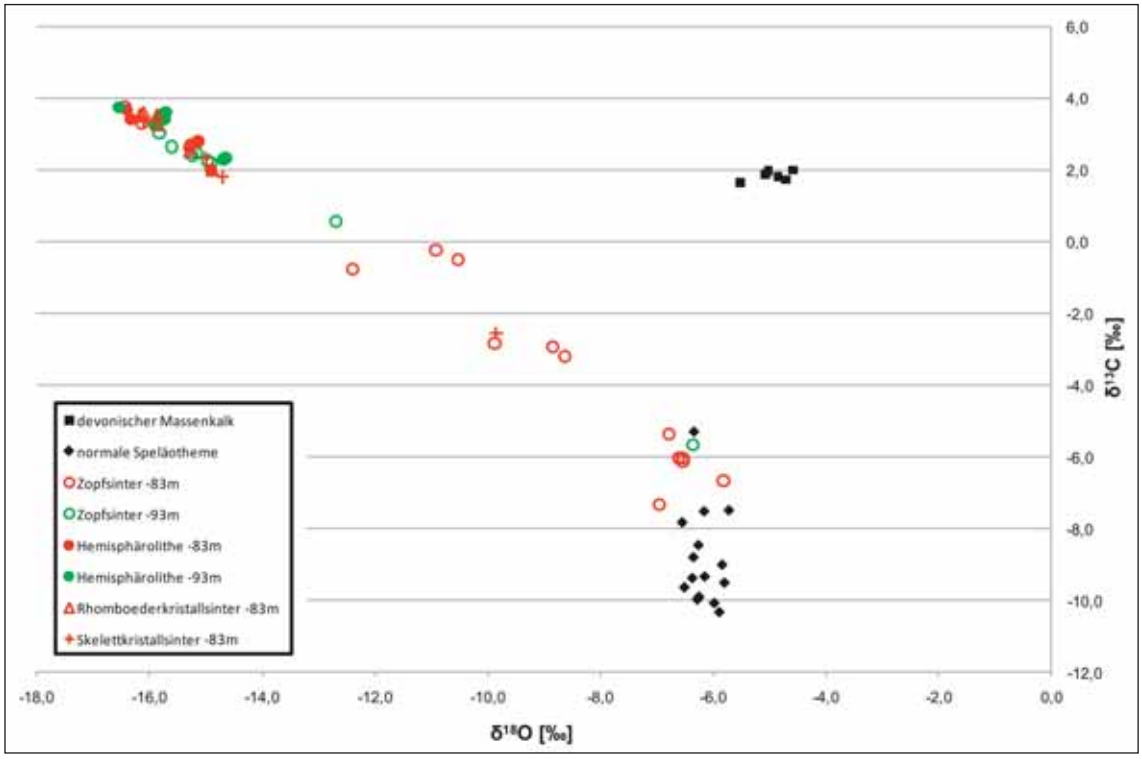

Abb. 5: C/O-Isotopenzusammensetzung der kryogenen Calcite im Vergleich zu entsprechenden Daten normaler Speläotheme (hier: Wandsinter) der Apostelhöhle sowie der mitteldevonischen Wirtsgesteine.

6. U/Th – Datierungen

Labor-Nummer	Proben-Bezeichnung	Alter [ka]	Fehler [ka]
4904	Apostel -83 m Hemisphärolith	37,53	± 0,31
4919	Apostel -83 m Zopfsinter	83,5	± 1,4
4920	Apostel -93 m Zopfsinter	408	+ 42 - 31
5079	Apostel -93 m Hemisphärolith	35,59	± 0,42

Tab. 1: TIMS – U/Th-Datierungen von Kryocalciten der Apostelhöhle (Analytik: R. Eichstädter /Heidelberg)

Die U/Th-Altersdatierungen an 4 Kryocalcitpartikeln haben 3 weichselzeitliche und ein cromerzeitliches Alter ergeben (Tab. 1). Die beiden Hemisphärolithsinter aus -83 m und -93 m weisen mit Altern von 35 bis 38 ka auf eine Bildung nach der weichselzeitlichen Warmphase 8 hin, während die beiden Zopfsinter aus -83 m und -93 m abweichend sehr unterschiedliche Alter ergeben haben. Der Zopfsinter aus -83 m Teufe markiert ein weichselzeitliches Alter nach der weichselzeitlichen Warmphase 21. Dagegen fällt der Alterswert für den Zopfsinter aus -93 m Teufe in die „Super-Warmzeit“ vor etwa 400 ka. Da bei der letztgenannten Datierung der Fehlerwert sehr hoch ist, und sich die Kryocalcite mit leichter O-Isotopie durch Ausfrieren bilden, ist als Bildungszeit für diesen Zopfsinter die Abkühlungsphase nach der „Super-Warmzeit“ anzunehmen (MIS = **M**arine **I**sotopen-**S**tadien 11 bis 10).

7. Zusammenfassende Diskussion

Bis zu 4cm große Calcitpartikel aus Höhlenlehm von zwei Fundstellen der schachtbetonten Apostelhöhle werden aufgrund ihrer Ausbildung und C/O-Isotopenzusammensetzung als kryogene Bildungen erkannt. Es dominieren Zopf- und Hemisphärolithsinter mit leistenförmiger Calcitstruktur, während Rhomboederkristall- und Skelettkristallsinter seltener auftreten. Warum diese vier Kryocalcittypen in den verschiedenen Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges in unterschiedlicher Häufigkeit zueinander auftreten (vgl. RICHTER et al. 2008 u. 2009a), bleibt umfassenderen Untersuchungen vorbehalten.

Die C/O-Isotopenzusammensetzung der morphologisch als Kryocalcitpartikel erkannten Typen belegt eine Genese im Verlauf des Ausfrierens von Wasserbecken, wobei sensu O’NEIL (1968) und CLARK & FRITZ (1997) ^{18}O vorzugsweise in das sich bildende Eis eingebaut wird, sodass sich die Kryocalcite durch leichte O-Isotopenzusammensetzung auszeichnen. Dies trifft jedoch nur für Kryocalcite bei langsamem Ausfrieren zu (ŽÁK et al. 2004), während für Kryocalcite bei schnellem Ausfrieren aufgrund rasch erfolgter Evaporation eine schwerere C/O-Isotopenzusammensetzung gegeben ist (LACELLE 2007, LACELLE et al. 2009a u. b). Letztere wurden bislang in Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges nicht gefunden, was jedoch aufgrund ihrer kleinen Partikelgröße (<200µm) wohl nur eine Frage weiterer Forschungsintensität ist.

Bei den Fundstellen der Apostelhöhle liegen die vier Kryocalcittypen nebeneinander im und auf dem Höhlenlehm vor, sodass wie bei den anderen Kryocalcitvorkommen des Rheinischen Schiefergebirges (RICHTER & RIECHELMANN 2008, RICHTER et al. 2008 u. 2009) eine Genese in gefrierenden Wasserbecken auf Eis wahrscheinlich ist, sodass die Partikel nach Schmelzen des Eises in einer nachfolgenden Warmphase auf dem Höhlenboden sowie auf Versturzblöcken vermengt zur Ablagerung kamen.

Im Fall der Apostelhöhle ist die Situation bezüglich der kryocalcitführenden Lehme gegenüber den übrigen Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges komplizierter, da stichprobenartig durchgeführte TIMS-U/Th-Datierungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen geführt haben (verschiedene weichselzeitliche Alter und ein präholsteinzeitliches Alter). Offensichtlich hat sich in der Apostelhöhle im Verlauf des Quartärs mehrfach Eis gebildet und es ist mehrfach zur Kryocalcitgenese gekommen. Nach den Schmelzpro-

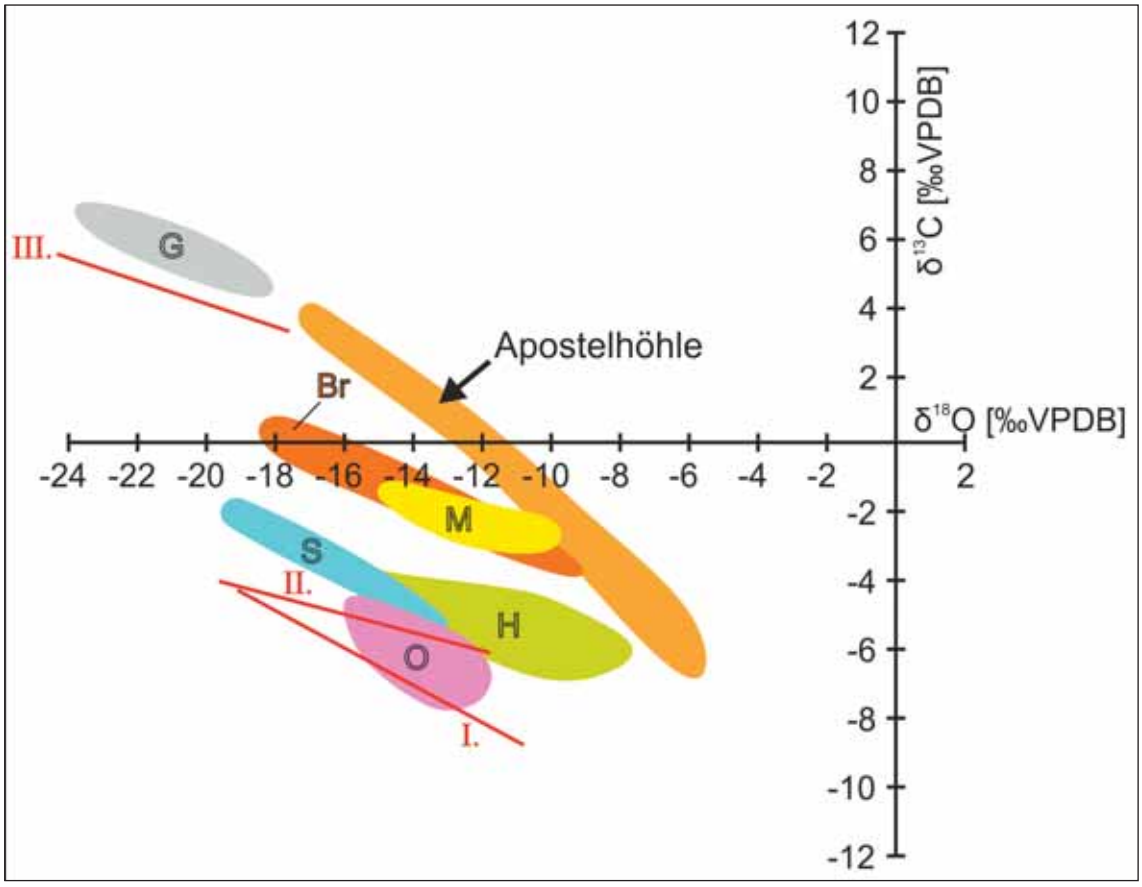

Abb. 6: C/O-Trends und –Felder bisher bearbeiteter kryogener Calcite aus mitteleuropäischen Höhlen: Östliches Mitteleuropa nach ŽÁK et al (2004) – I: Jaskinia Jaworzidia Höhlensystem, II: BUML-Höhle, III: Stratviska Jaskyna-Höhlensystem; Rheinisches Schiefergebirge nach RICHTER & NIGGEMANN (2005 – Ostenberghöhle = O), RICHTER & RIECHELMANN (2008 – Malachitdom = M), RICHTER et al. (2008 – Heilenbecker Höhle = H), RICHTER et al. (2009 – Sunderner Höhle = S) und Richter et al. (im Druck – Breitscheid-Erdbach-Höhle = Br); Nördliche Kalkalpen nach RICHTER et al. (2009c – Glaseishöhle = G). Apostelhöhle = C/O-Feld von Abb. 5.

zessen haben sich die verschieden alten Kryocalcite an geschützten Stellen geringster Sedimentationsrate akkumuliert, sodass sie nach der Probenentnahme in derselben Probe vorlagen. Aufgrund der filigranen Ausbildung (Skelettkristallsinter) und gut erhaltenen Morphologie (Zopf- und Hemisphärolithsinter) sowie ihrer teilweise exponierten Fundstelle (Lok. 1 bei -93m) sind größere Umlagerungen auszuschließen.

Insgesamt ergibt sich bezüglich der Kryocalcite in Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges noch ein enormer Forschungsbedarf. Dabei sollte einerseits ein besonderes Augenmerk auf gegenseitige Überwachsungen der verschiedenen Kryocalcittypen geworfen werden und andererseits gilt es zeitlich deutlich verschiedene Kryocalcitgenerationen zu unterscheiden. In Verbindung mit der Entschlüsselung warmzeitlicher Sintergenerationen ist es somit mittelfristig möglich, die jungquartäre Klimageschichte Mitteleuropas unabhängig von bzw. ergänzend zu Seesedimentabfolgen aufzudecken.

Danksagung

Unser Dank geht an R. Eichstädter für die Durchführung der TIMS-Analytik, R. D. Neuser für die Unterstützung bei den Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop, an D. Buhl für Fotoaufnahmen, an P. Meissner für Fotomontagen und an A. Schäffer für Grafikerstellungen.

8. Literatur

CLARK, I. & FRITZ, P. (1997): Environmental Isotopes in Hydrogeology.- 328 S.; New York (Lewis Publisher).

ERLEMEYER, M., HASENMAYER, B. & SCHUDELSKI, A. (1992): Das Höhlensystem Kreiselhalle – Malachtidom – ein bemerkenswerter Aufschluß für Höhlenminerale – In: Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Der Malachitdom. Ein Beispiel interdisziplinärer Höhlenforschung im Sauerland.- 69-89; Krefeld.

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.- Quat. Sci. Rev., **26(11-12)**: 1670-1689; Oxford.

LACELLE, D., LAURIOL, B. & CLARK, I. D. (2009): Formation of seasonal ice bodies and associated cryogenic carbonates in cavern de L'ours, Québec, Canada: Kinetic isotope effects and pseudo-biogenic crystal structures.- Journal of Cave and Karst Studies, **71(1)**: 48-62; Huntsville, Alabama.

O'NEIL, J. R. (1968): Hydrogen and Oxygen Isotope Fractionation between Ice and Water.- The Journal of Physical Chemistry, **72/10**: 3683-3684; Washington DC.

PAECKELMANN, W. (1936): Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Lfg. 341, Blatt 2660 Adorf; Berlin.

RICHTER, D.K. & NIGGEMANN, S. (2005): Kryogene Calcite in Höhlen des Rheinischen Schiefergebirges.- Mitt. Verb. Dt. Höhlen- u. Karstforscher, **51**: 129 – 132; München.

RICHTER, D.K. & RIECHELMANN, D.F.C. (2008): Late Pleistocene cryogenic calcite spherolites from the Malachitdom Cave (NE Rhenish Slate Mountains, Germany): origin, unusual internal structure and stable C – O isotope composition.- Int. J. Speleology, **37(2)**: 119 – 129; Bologna.

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** (1-4): 37-47; Wien.

RICHTER, D.K., DREYER, R., NIGGEMANN, S. & PIELSTICKER, K.-H. (2009a): Kryocalcite in der Großen Sunderner Höhle (Sauerland) – ein weiterer Beleg für die vormalige Eishöhle.- Mitt. Verb. Dt. Höhlen- u. Karstforscher, **55**: 80-85; München.

RICHTER, D.K., MANGINI, A. & VOIGT, S. (2009b): Erste Th/U-datierte Kryocalcite der mittleren Weichseleiszeit aus einer Höhle des Rheinischen Schiefergebirges (Heilenbecker Höhle, Bergisches Land).- Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **55**: 125-127; München.

RICHTER, D.K., VOIGT, S. & NEUSER, R.D. (2009c): Kryogene Calcite unterschiedlicher Kristallform und Kathodolumineszenz aus der Glaseishöhle am Schneiber (Steinernes Meer / Nationalpark Berchtesgaden, Deutschland).- Die Höhle, **60** (1-4): 3-9; Wien.

RICHTER, D.K., MEISSNER, P., IMMENHAUSER, A., SCHULTE, U. & DORSTEN, I. (im Druck): Cryogenic and non-cryogenic pool calcites reflect alternating permafrost and interglacial periods (Breitscheid – Erdbach Cave, Germany).- The Cryosphere.

SCHOLZ, D. & HOFFMANN, D. (2008): ^{230}Th/U-dating of fossil corals and speleothemes.- Eiszeitalter und Gegenwart, **57/1-2**: 52-67; Hannover.

WEBER, H.-W. (1981): Höhlenkataster Westfalen, Stand 5/81.- Antiberg **21/22**, 48 S. (als Blätter bezeichnet, „Loseblattsammlung"); Hemer.

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.- Chem. Geol., **206**: 119-136; Amsterdam.

ŽÁK, K.,ONAC, B. P. & PER OIU, A. (2008): Cryogenic carbonates in cave environments: a review.- Quat. Internat., **187**: 84-96; Oxford.

ZYGOWSKI, D. W. (1983): Die Höhlen der Briloner Hochfläche (östliches Rheinisches Schiefergebirge).- Karst und Höhle **1982/83**: 15-46; München.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Geologie und Paläontologie in Westfalen

Jahr/Year: 2010

Band/Volume: 78

Autor(en)/Author(s): Richter Detlef K., Schulte Ulrike, Erlemeyer Andreas, Erlemeyer Matthias

Artikel/Article: Mittel- und oberpleistozäne Calcitpartikel kryogener Entstehung aus der Apostelhöhle südöstlich Brilon (Sauerland, NRW) 61-71