

## „Holstein“-zeitliche Speläotheme der Dechenhöhle (Sauerland) Erste Ergebnisse zur Klimarekonstruktion

Detlev K. Richter, Dana F. C. Riechelmann, Rasmus Dreyer, Stefan Niggemann, Klaus P. Jochum  
& Denis Scholz

Detlev K. Richter  
Institut für Geologie, Mineralogie  
und Geophysik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150  
44801 Bochum

Dana F. C. Riechelmann &  
Denis Scholz  
Institut für Geowissenschaften  
Johannes Gutenberg-Universität  
Mainz J.-J.-Becher-Weg 21  
55128 Mainz

Rasmus Dreyer &  
Stefan Niggemann  
Dechenhöhle und Deutsches  
Höhlenmuseum  
Dechenhöhle 5  
58644 Iserlohn

Klaus P. Jochum  
Max-Planck-Institut für Chemie,  
Abteilung Klimageochemie  
Hahn-Meitner-Weg 1  
55128 Mainz

Korrespondierende Autoren:  
Rasmus Dreyer &  
Stefan Niggemann  
dechenhoehle@t-online.de

Manuskript  
Eingegangen: 24.04.2019  
Akzeptiert: 07.11.2019  
Online verfügbar: 10.12.2019

© LWL-Museum für Naturkunde

### Kurzfassung

$^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen an Speläothemen mehrerer Lokalitäten der Dechenhöhle (Sauerland) belegen mit 340–280 ka eine mittelpleistozäne Warmzeit, die dem Marinen Isotopenstadium MIS 9 entspricht. Über Revisionsbearbeitungen der Grabungsprofile Knochengrube, Königshalle und Brückengang kann das Warmzeitniveau in die quartärzeitlichen Abfolgen eingehängt werden. Der näher untersuchte Stalagmit De-Kö S 3 (Königshalle) wuchs während der Warmphasen MIS 9c/e, und die Kohlen- und Sauerstoffisotopenprofile entlang der Wachstumsachse zeigen einen Trend von kühleren zu wärmeren Klimabedingungen. Entsprechende Untersuchungen weiterer bereits vorhandener Speläotheme des MIS 9 werden die Klima-Entwicklung der mittelpleistozänen Warmzeit komplettieren.

**Schlüsselwörter:** Dechenhöhle, Speläotheme, Paläoklima, Warmzeit, Geochemie

### Abstract

$^{230}\text{Th}/\text{U}$ -dating of speleothems from several locations in the Dechenhöhle (Sauerland, Western Germany) shows ages between 340 and 280 ka and is indicative for a Mid-Pleistocene Interglacial period, corresponding to Marine Isotope Stage MIS 9. Revisional work on the excavation sites enables us to place profiles from the Königshalle, Knochengrube and Brückengang within this interglacial period in the quaternary sequence. The investigation of stalagmite De-Kö S 3 (Königshalle) marks MIS 9c/e, and carbon and oxygen isotope profiles along the growth axis indicate a trend from colder to warmer climate conditions. Further investigation of already available speleothems corresponding to the Holstein period will lead to a better understanding of climate evolution during this middle Pleistocene interglacial period.

**Keywords:** Dechenhöhle, speleothems, paleoclimate, interglacial, geochemistry

### Einführung

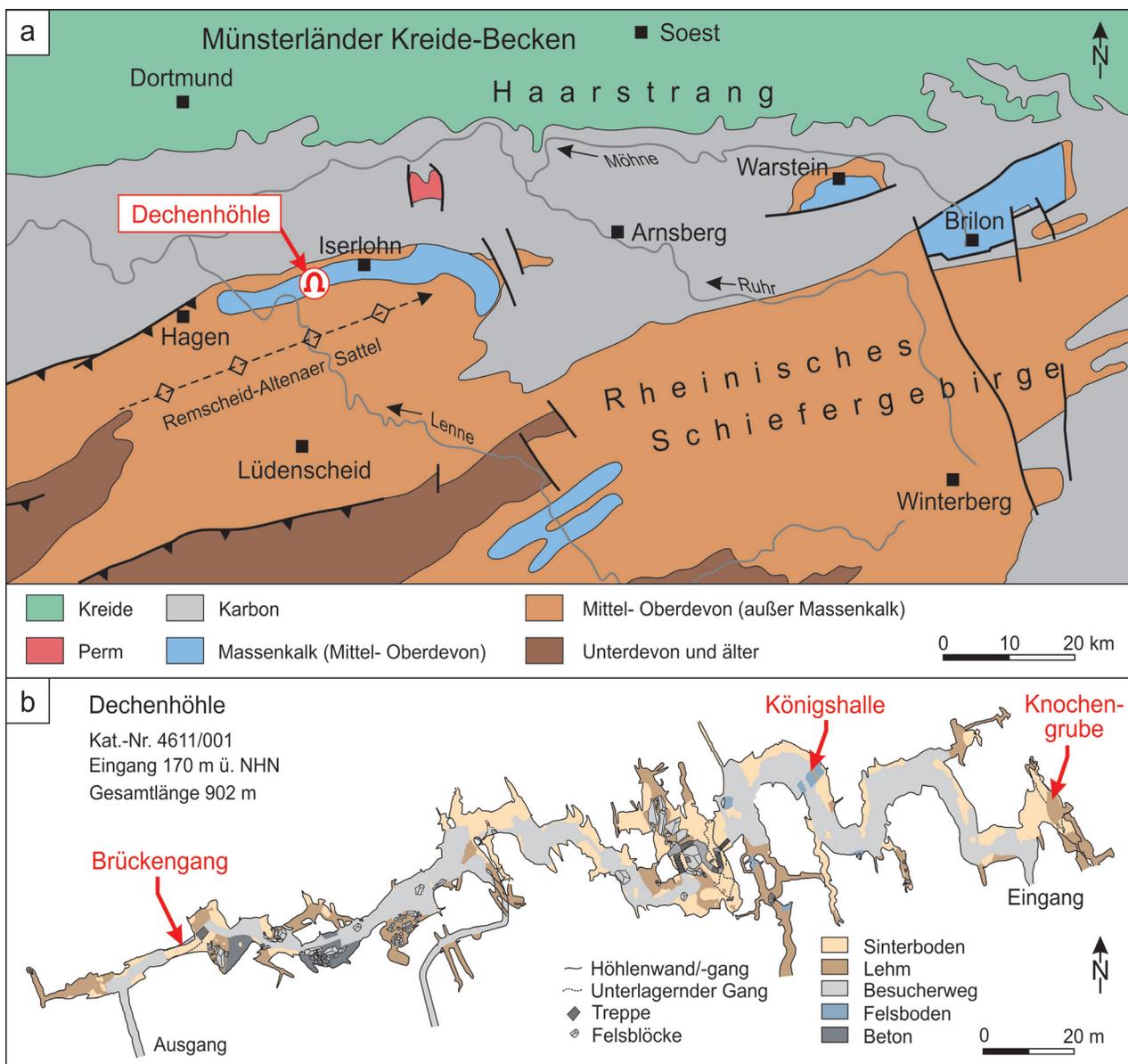
In den letzten 30 Jahren haben sich Speläotheme (insbesondere Stalagmiten) aufgrund der Datierungsmöglichkeiten über die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methodik zu einem guten Archiv zur Klimarekonstruktion der letzten 500 ka für terrestrische Bereiche etabliert (u.a. Fairchild & Baker 2012). In der Dechenhöhle (Abb. 1) sind auf diese Art und Weise inzwischen alle Interglaziale der genannten Zeitspanne belegt worden (neueste Zusammenfassung: Niggemann et al. 2018). Aber bei dieser klimatischen Zuordnung mit Speläothemenwachstum ausschließlich in Warmzeiten ist natürlich Vorsicht geboten, denn Speläotheme (Boden-Decken-Wandsinter) gibt es im mitteleuropäischen Raum zwischen nordischen und alpinen Vereisungsgebieten auch in Interstadialphasen von Glazialzeiten, wie es Einzeldatierungen an Stalagmiten aus Höhlen der schwäbischen Alb (Kempe

et al. 2002) und Detailstudien über Speläothemengenerationen der Dechenhöhle (Richter et al. 2018), sowie der Bunkerhöhle (Weber et al. 2018), gezeigt haben.

Der Fokus der Klimarekonstruktionen mittels Stalagmiten lag bislang vorrangig auf holozänen Speläothemen, da die geochemischen Daten in Verbindung mit mehrjährigen Höhlenmonitoringprogrammen gut interpretierbar waren, wie es von Niggemann (2000) am Stalagmiten STAL-DH-3 aus der Orgelgrotte (Dechenhöhle) und von Fohlmeister et al. (2012) sehr umfassend an Speläothemen aus der Bunkerhöhle (2 km östlich der Dechenhöhle) gezeigt worden ist. Ein eemzeitlicher Stalagmit aus der Dechenhöhle wurde bislang lediglich im Rahmen zweier Bachelorarbeiten untersucht (Iden 2013; Nickl 2013), wobei der Stalagmit BR-5 vom Brückengang stammt und den Zeitabschnitt mit warmzeitlichem Wachstum ( $\delta^{18}\text{O}$  -Werte vorrangig zwischen -4,0 und -6,0 [‰ VPDB]) charakterisiert.

Von Speläothemen der Dechenhöhle der Warmzeiten Dömnitz (Marines Isotopen-Stadium MIS 7), Holstein (MIS 9) und Rhume (MIS 11) liegen bislang nur einzelne  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen vor (Niggemann et al. 2018). In der vorliegenden Studie wird die Holstein-Warmzeit im Sinne von Geyh & Müller (2005) und Litt et al. (2007) mit MIS 9 korreliert. Allerdings ist eine klare Zuordnung zu MIS 9 oder MIS 11 international noch nicht erfolgt, sodass die Holstein-Warmzeit besonders in osteuropäischer Literatur (u.a. Nitychoruk et al. 2006; Marks et al. 2018) häufig mit MIS 11 korreliert wird. Nach der letztgenannten Arbeit entspricht MIS 9 der Wacken-Warmzeit und MIS 11 der Holstein-Warmzeit.

Ungeachtet der genannten nomenklatorischen Unklarheiten sind die Forschungsaktivitäten über Sinterwachstum, -zerbruch und -umlagerung in der Dechenhöhle nun so weit fortgeschritten, dass hier eine größere Verbreitung an Speläothemen des Mittel-



**Abb. 1:** Übersichtsskizzen zur geographischen/geologischen Lage der Dechenhöhle auf dem N-Flügel des Renscheid-Altenaer Sattels (a) und zur Lage der bearbeiteten Profile (rot) in der Dechenhöhle (b).

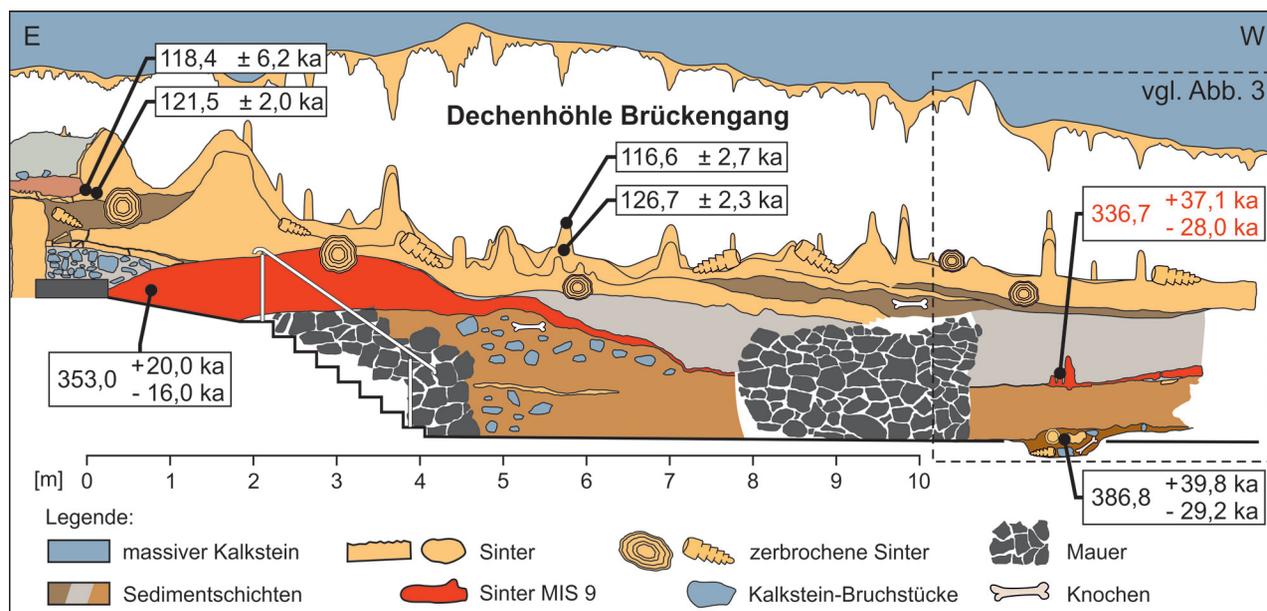


Abb. 2: Schemaprofil des Aufschlusses „Brückengang“; rot markiert: Holsteinbodensinter.

pleistozäns für die Warmzeit von MIS 9 (340–280 ka BP) vorzuliegen scheint. Erste Projektanträge des Erstators vor 10–17 Jahren wurden leider nicht gefördert, wodurch etliche Ergebnisse der Vorarbeiten (u.a. C/O-Isotopenreihen) liegen geblieben sind. Nach Bewilligung eines neuen Projekts von Dana Riechelmann und Denis Scholz (Mainz) sollen nun erste Ergebnisse zur Klimarekonstruktion über „Holstein“-zeitliche Speläotheme Mitteleuropas, aufgrund der geochemischen Vorarbeiten und umfassender geländebezogener Revisionsarbeiten, vorgestellt werden.

## 2. Überblick zur Dechenhöhle

Eine umfassende Darstellung zur Genese, Entwicklungsgeschichte sowie Nutzung der Dechenhöhle ist im Jubiläumsband zur 150-jährigen Entdeckung gegeben worden (Niggemann et al. 2018), sodass nachfolgend nur die wichtigsten Rahmenfaktoren aufgelistet werden: Wirtsgestein = mitteldevonische Flachwasserkalke mit Biostromen (vorrangig globulare und ästige Stromatoporen); Gesamtganglänge Dechenhöhle = 902 m; Höhleneingang = 170 m über NHN; Niveauhöhe über Talau = 30–40 m ( $\cong$  Mittelterasse nach der Terrassengliederung von Lenne und Ruhr); Temperatur = 11°C.

Besonders NW- bis NNW-streichende Trennflächen des Massenkalks haben postvariszisch (Hauptphase um die Jura/Kreide-Wende) unter Mitwirkung von Schiefergas und Hydrothermalkonvektion zu Anlösungen des Kalks und anschließender Mineralisation (Calcit, Dolomit, Quarz u. a.) geführt, was im Iserlohner Raum nur untergeordnet nachzuweisen ist, aber beim westlich gelegenen Wülfrath zu großdimensionierten Hydrothermalhöhlen bis über 1 km Länge, 100–200 m Breite und 20 m Höhe geführt hat (Drozdowski et al. 2017). Das hydrothermal

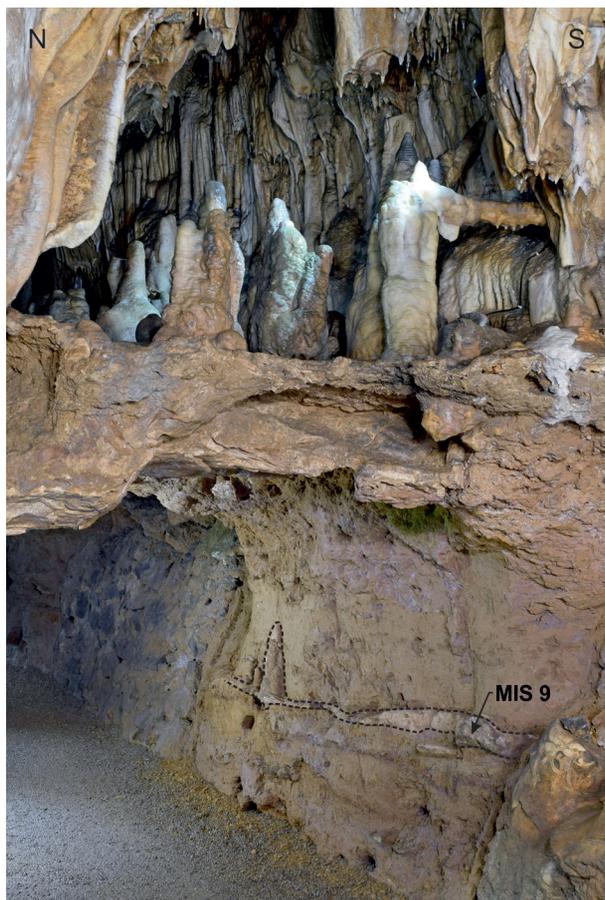
genutzte Trennflächensystem wurde ab dem Jungtertiär für oberflächennahe Kalklösung durch meteorische Wasser genutzt. Aufgrund des Zusammenspiels von Hebung des Rheinischen Schiefergebirges, Eintiefung der Flusssysteme und großklimatischen Schwankungen, können im Raum des Iserlohner Massenkalks mehrere Höhlenniveaus sowie Speläothemgenerationen unterschieden werden. Das im Bereich eines westwärts abfallenden Grundwasserspiegels gebildete Dechenhöhlenniveau gehört zum zweithöchsten und somit einem relativ alten Höhlenniveau, das entsprechend viele Speläothemgenerationen enthält (älteste Speläothemprobe: 489 ka  $\cong$  vermutlich Warmzeit von MIS 13).

## 3. Lokalitäten mit „Holstein“-Speläothemen

<sup>230</sup>Th/U-datierte Bruchstücke bis über 30 cm Größe der Holstein-Warmzeit kommen in der Dechenhöhle von der Knochengrube im Osten bis zum Brückengang im Westen vor (Lage der Lokalitäten s. Abb. 1). Drei Lokalitäten sollen hier kurz vorgestellt werden, bevor  $\delta^{13}\text{C}$ - und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte eines Stalagmiten gezeigt und interpretiert werden. Auf ausführliche Schichtbeschreibungen soll hier verzichtet werden, da diese dem Jubiläumsband (Niggemann et al. 2018) entnommen werden können.

### 3.1 Brückengang

Im EW-Längsschnitt von 15 m lassen sich im Brückengang-Profil die Speläothemgenerationen der letzten 400 ka am besten nachvollziehen, obwohl zur genauen Verifizierung noch zusätzliche <sup>230</sup>Th/U-Datierungen benötigt werden (Abb. 2, 3). Über mehrere Meter können die Bodenspeläotheme der Holstein (MIS 9)- und der Eem (MIS 5e)-Warmzeit verfolgt werden, während in



**Abb. 3:** Foto des westlichsten Profilabschnittes der Lokation „Brückeneingang“ mit Situation des MIS 9 Bodensinters.

den unter- und zwischengeschalteten Schichten bisher lediglich umgelagerte Bruchstücke der Rhume (MIS 11)- und der Dömnitz (MIS 7)-Warmzeiten gefunden wurden.

### 3.2 Königshalle

Das in den 1990er Jahren aufgegrabene Königshallen-Profil (Abb. 4, 5) wurde zunächst sedimentologisch und zur Gewinnung von Fossilien (besonders Höhlenbärenknochen) aufgenommen (Dreyer et al. 2000). Über Dünnschliffbearbeitungen konnten gut gerundete, quarzementierte Silt- und Sandsteinklasten im Basiskonglomerat (Schicht 9 in Abb. 4) belegt werden, wodurch Ablagerungen des ehemaligen Grüner Bachs in etwa 168 m über NHN (heutige Höhenlage des Grüner Bachs 135 m über NHN) angezeigt werden. Über  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen konnten im höheren Profilabschnitt (Schicht 1-5) annähernd durchhaltende pleistozäne Bodenspeläotheme nachgewiesen werden, aber in den Schichten 6-9 gibt es in den Massflowablagerungen nur Klasten von Sintern, wobei das höchste Alter 489 ka (? MIS 13) ergeben hat (Niggemann et al. 2018). Im Zuge von Revisionsarbeiten im Vorfeld des Holstein-Projekts konnte nun ein umgelagerter Holstein-Stalagmit (De-Kö S 3) in die Schicht-

folge eingehängt werden (Abb. 4). Dieser Stalagmit ist offensichtlich vom Rand der intakten Schichtfolge mit Holsteinbodensinter zur Zeit der Schicht 3 abgebrochen und stellt nun das Kernstück der vorliegenden Studie dar.

### 3.3 Knochengrube

Im Knochengrubenbereich nahe des Höhleneingangs wurden schon früh (1910) Grabungen zur Erkundung einer Dechenhöhlen-Fortsetzung durchgeführt, aber ein vollständiges Profil mit ersten  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen konnte erst im Jubiläumsband vorgestellt werden (Niggemann et al. 2018). Im Rahmen von Vorarbeiten für das zukünftige Holstein-Projekt von Dana Riechelmann und Denis Scholz wurde eine Revisionsaufnahme der Knochengrube mit gezielten  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen von Speläothemproben der Sintersequenz des kompliziert zusammengesetzten Topbereichs des Profils durchgeführt (Abb. 6, 7). Die Basis der mächtigen Massflowsequenz der Abfolge konnte noch nicht ergraben werden, sodass hier das zu erwartende Konglomerat des ehemaligen Grüner Bachs mit gut gerundeten Siltquarzit- und Sandsteinklasten von Schichtfolgen des Unterdevons und unteren Mitteldevons des Remscheid-Altenaer Sattels (vgl. Königshallenprofil) offensichtlich erst tiefer zu erreichen ist.

## 4. „Holstein“-Stalagmit De-Kö S 3

### 4.1 Aufbau

Der 11 cm lange Stalagmit setzt sich mesoskopisch aus einem mm-laminierten Anlagerungsgefüge zusammen, wobei die dunklen Bereiche nach Dünnschliffbearbeitungen klarer ausgebildet sind als die weißen einschlussreicheren Lagen (vgl. Abb. 8). Eine wenig deutlich ausgeprägte Wachstumsunterbrechung (Hiatus) kann bei etwa 5 cm Höhe ausgemacht werden. Das Calcitgefüge wird von kolumnaren Kristallen (Abb. 9a) dominiert, während dendritische Kristalle (Abb. 9b) seltener auftreten. Flanken und Top des Stalagmiten werden von einer beigefarbenen Zone abgeschlossen, in der phosphatische Minerale sowie winzige Quarze neben und über den Calcitkristallen ausgemacht werden können (Abb. 9c). Röntgendiffraktometeraufnahmen belegen im phosphatischen Material vorrangig Hydroxylapatit, was in reineren Proben von Apatitkrusten des NE-Profilabschnitts noch eindeutiger zu belegen ist (Abb. 10). In der Phosphatkruste von De-Kö S 3 sind röntgenographisch neben Hydroxylapatit noch Spuren von Quarz und möglicherweise von den selteneren Phosphaten Crandallit und Woodhouseit nachzuweisen. Die von Fledermauskot abzuleitende Hydroxylapatitbildung (u.a. Hill & Forti 1997; Miko et al.

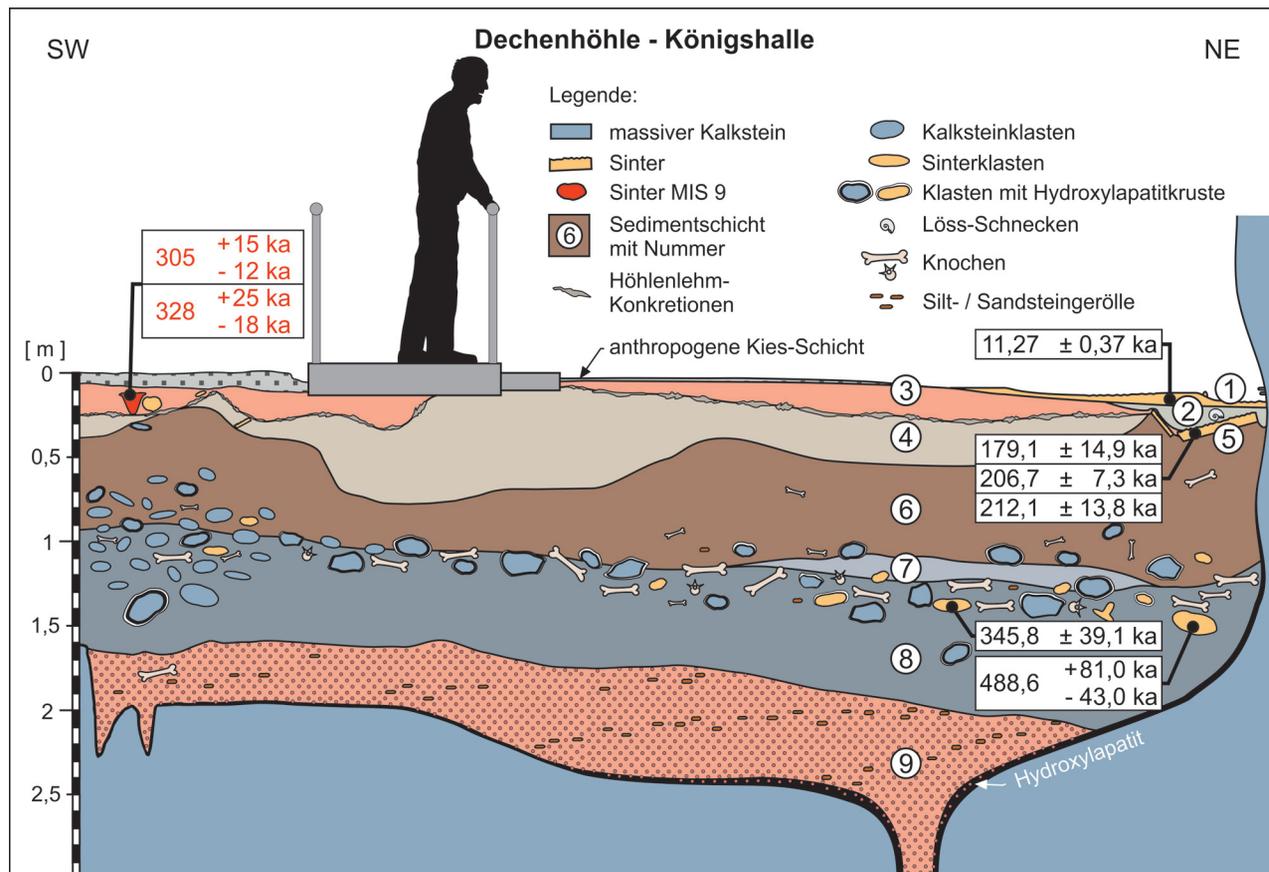


Abb. 4: Schemaprofil des Aufschlusses „Königshalle“; rot markiert: Holsteinbodensinter.

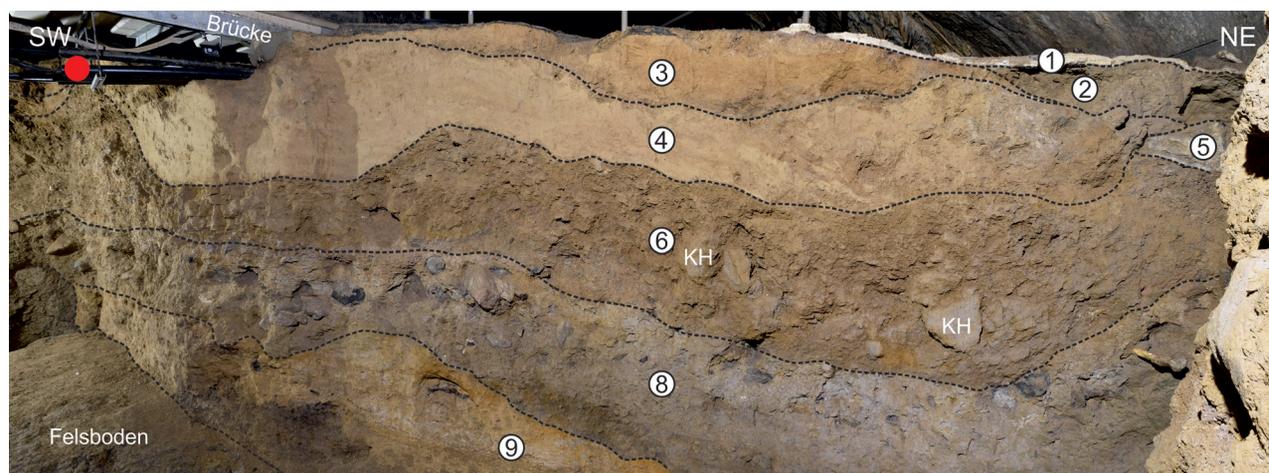


Abb. 5: Foto der Lokation „Königshalle“ (leicht verzerrtes Panorama). Roter Punkt: Entnahmestelle von De-Kö S 3. Schichtnummern vgl. Abb. 4. Die Klasten anverfestigten Höhlenlehms, die in Schicht 8 Dekazentimetergröße erreichen (KH), sind im Profil von Abb. 4 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt worden. Schicht 7 ist auf dieser Profilsseite nicht erkennbar.

2001; Onac et al. 2001) ist wahrscheinlich noch in der Warmzeit des Stalagmitenwachstums erfolgt, da an der Stalagmitenunterseite keine Kruste ausgebildet ist und die Umlagerung des Stalagmitenbruchstücks offensichtlich präeemzeitlich (? Saale-Kaltzeit) erfolgt ist (vgl. Abb. 4).

#### 4.2 <sup>230</sup>Th/U-Datierungen

Zwei <sup>230</sup>Th/U-Datierungen über Thermionenmassenspektrometrie im radiometrischen Labor der Heidelberger Akademie der Wissenschaften haben 328 (+25-18) ka für den unteren Abschnitt und 305 (+15 -12) ka für den oberen Abschnitt des Stalagmiten ergeben, was einer Speläothembildung in der Holstein-Warmzeit (MIS 9) entspricht (vgl. Geyh & Müller 2005; Lisiecki & Raymo

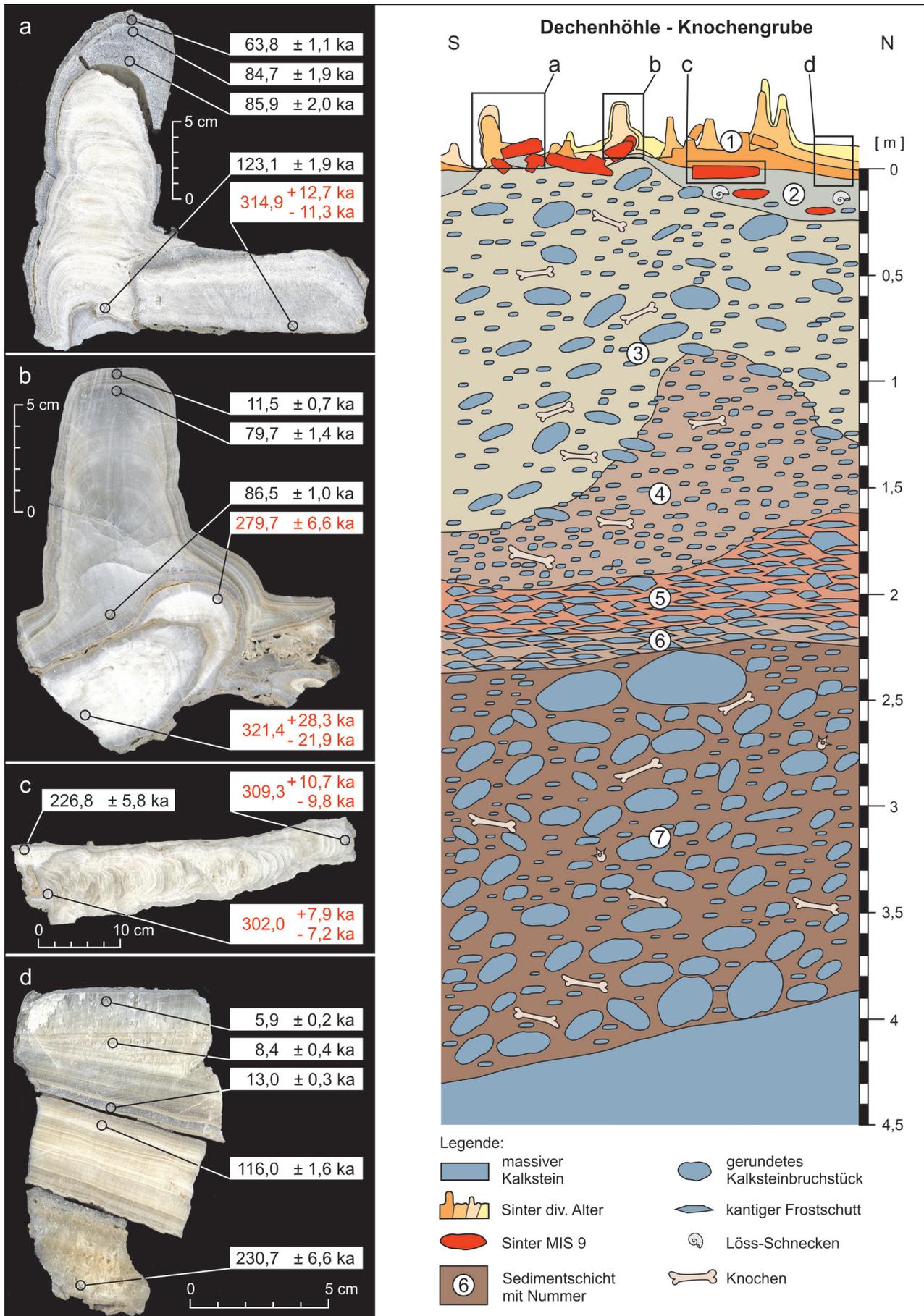
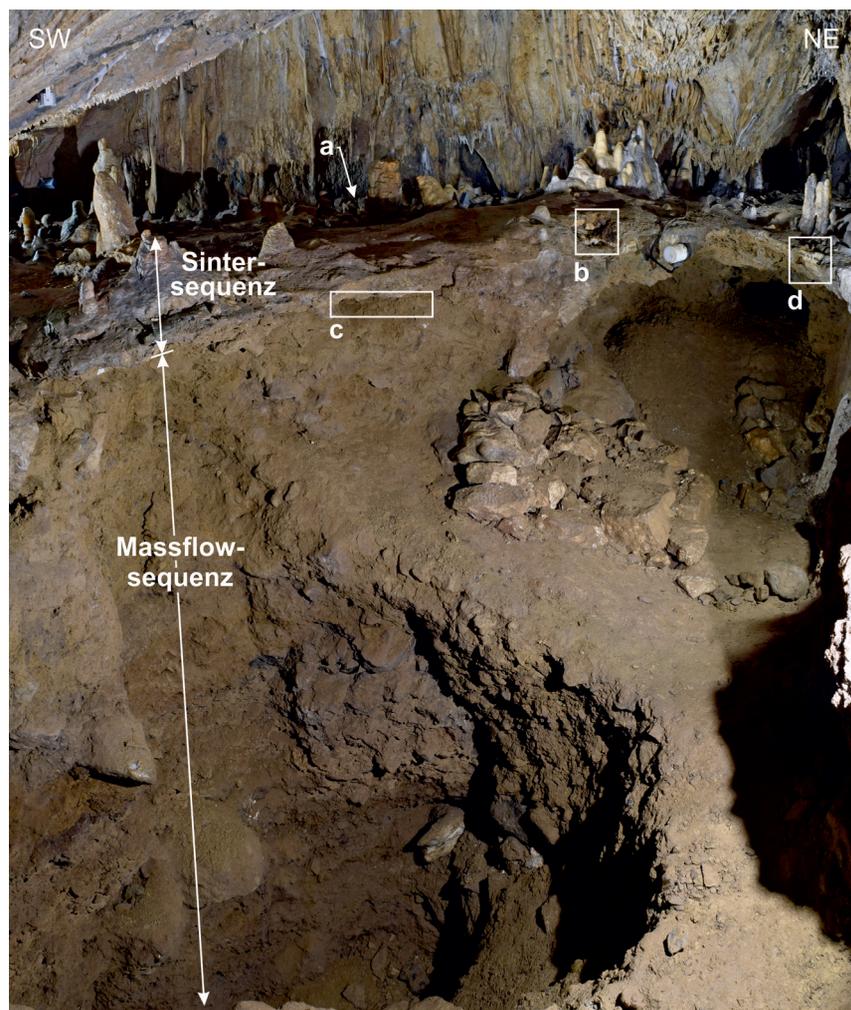


Abb. 6: Schemaprofil des Aufschlusses „Knochengrube“; rot markiert: Holsteinbodensinter; a-d: beprobte Sinter aus der „Knochengrube“.



**Abb. 7:** Foto der Lokation „Knochengrube“ (leicht verzerrtes Panorama) mit Markierung der Sinter- und Massflowsequenz und Entnahmestellen der beprobten Sinter a-d.

2005; Litt et al. 2007). Zur Korrelation von Holstein zu MIS 9 oder MIS 11 siehe auch die Diskussionen von Nitychoruk et al. (2006) und Marks et al. (2018).

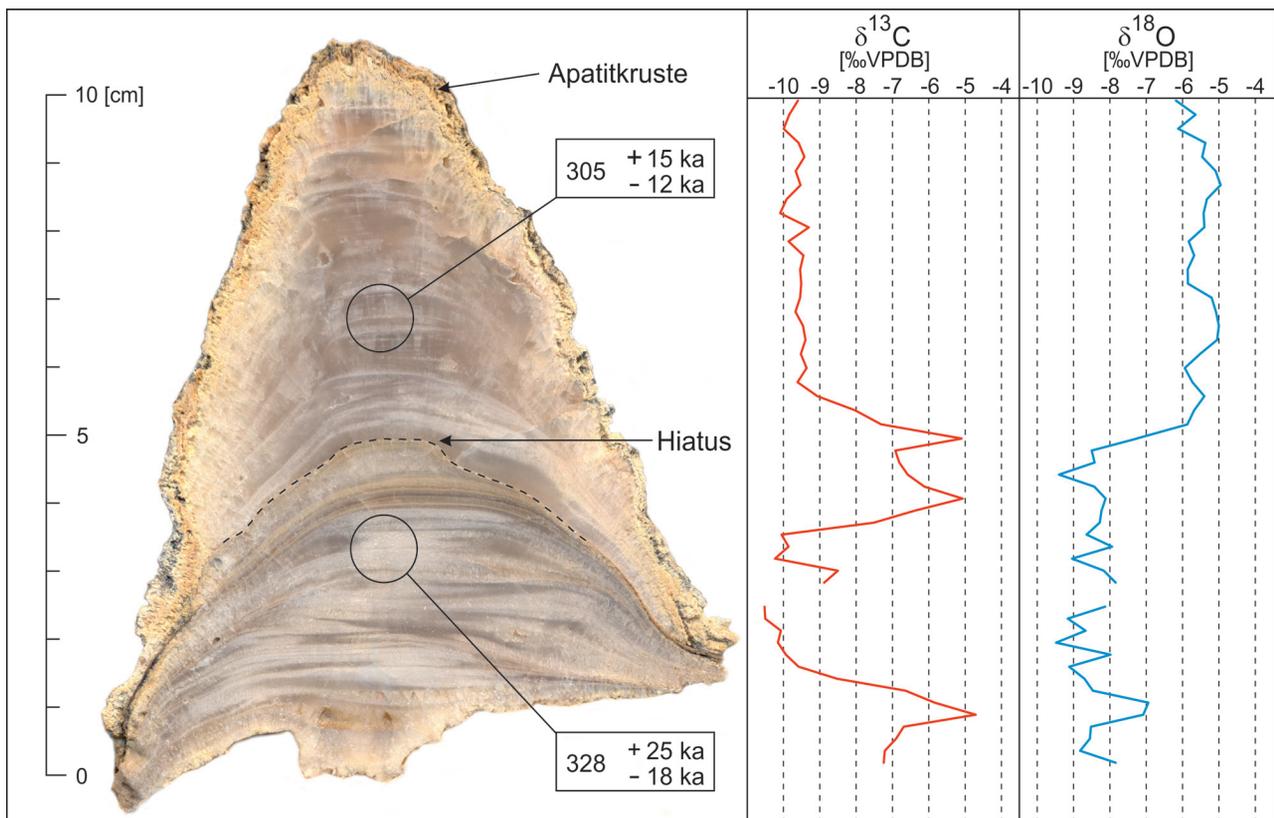
Die gemessene Spanne entspricht lediglich dem älteren Teil, der von 340 bis 280 ka reichenden MIS 9-Zeit (Abb. 11). Für genauere Aussagen fehlen noch einerseits eine hochaufgelöste Zeitreihe an  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten für De-Kö S 3, und andererseits müssen noch weitere, inzwischen geborgene, Speläotheme der MIS 9-Warmzeit (vgl. Abb. 11) entsprechend untersucht werden.

#### 4.3 Stabile Kohlen- und Sauerstoffisotope

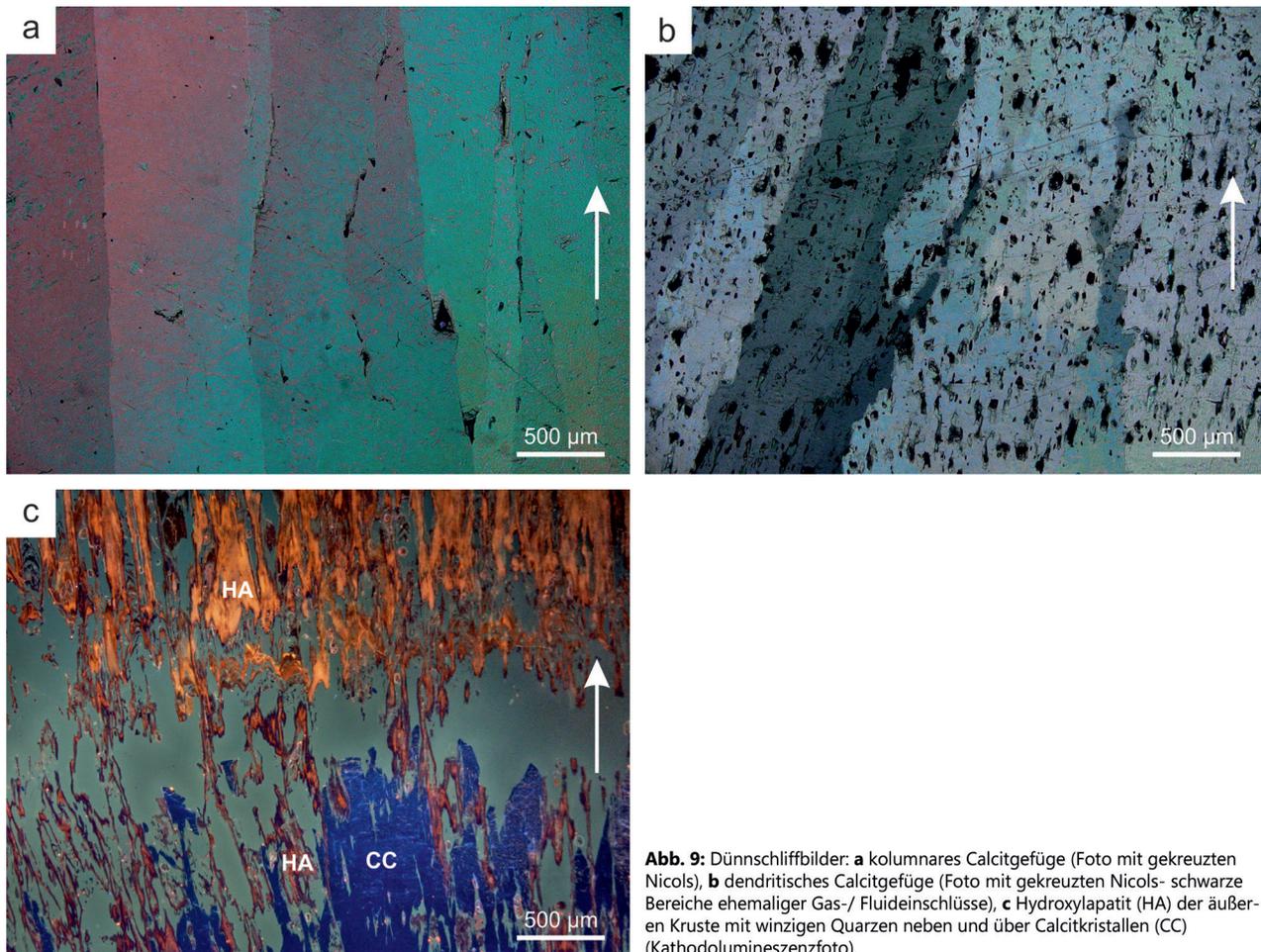
Die C/O-Isotopenanalysen wurden im Jahr 2009 mit einem ThermoScientific MAT253 IR-GC Massenspektrometer ausgerüstet mit einer GASBECH II im Isotopenlabor des Instituts für Geologie, Mineralogie und Geophysik der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die Stalagmitencalcite haben  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen -4,8 und -10,5 [‰ VPDB] und  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen -5,0 und -9,5 [‰ VPDB] ergeben (Abb. 8). Insgesamt entsprechen diese Werte den Literaturdaten für holozäne Speläotheme des zentralen Mitteleuropas (u.a. Wurth 2002; Fohlmeister et al. 2012; Mischel et al. 2017). Die

Abschnitte mit relativ hohen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten (bis -5 ‰) lassen sich sicherlich erst im Zusammenhang mit umfangreicheren Untersuchungen für holsteinzeitliche Stalagmiten erklären (? Wachstumsunterbrechungen/Schichtenkondensationen/wechselnde Vegetationen sowie Bodenaktivitäten oberhalb der Höhle), aber für die Verteilung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit niedrigeren Werten (-7,0 bis -9,5 ‰) im unteren Abschnitt und mit höheren Werten (-5,0 bis -6,5 ‰) im oberen Abschnitt kann bereits eine erste Interpretation angeboten werden. Nach umfangreichen petrographisch/geochemischen Untersuchungen von Wurth (2002) an holozänen Stalagmiten des Sauerlands und der Fränkischen Schweiz (d.h. gleicher Abstand für die Herkunft des über dem Atlantik verdunstenden Wassers, aber unterschiedlicher Höhenlage der Höhlen über dem Meeresspiegel) sind die Calcite des Iserlohner Raums gegenüber denjenigen der Fränkischen Schweiz unter wärmeren Höhlenbedingungen gebildet worden (11 °C versus 9 °C).

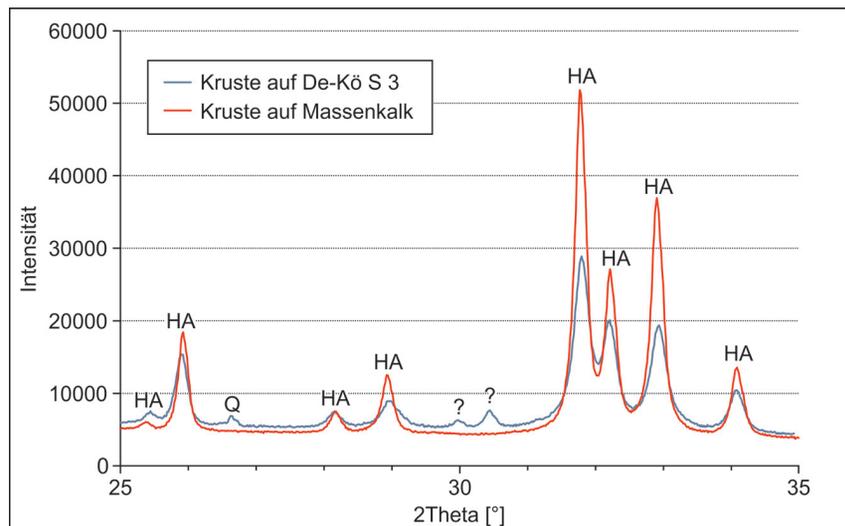
Unter Berücksichtigung dieses Temperatureffekts entspricht der untere Abschnitt des Stalagmiten DE-Kö S 3 einem kühleren Klima und der obere Abschnitt einem wärmeren Klima oberhalb der Höhle (vgl. Datenverteilung in Abb. 12). Somit dürfte der



**Abb. 8:** Stalagmit De-Kö S 3. Links: aufgeschnittener Stalagmit mit Positionen der Proben für die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen; rechts: C/O-Isotopenprofile.



**Abb. 9:** Dünnschliffbilder: **a** kolumnares Calcitgefüge (Foto mit gekreuzten Nicols), **b** dendritisches Calcitgefüge (Foto mit gekreuzten Nicols- schwarze Bereiche ehemaliger Gas-/ Fluideinschlüsse), **c** Hydroxylapatit (HA) der äußeren Kruste mit winzigen Quarzen neben und über Calcitkristallen (CC) (Kathodolumineszenzfoto).



**Abb. 10:** Röntgendiffraktogramme für die Hydroxylapatitkruste mit Quarz auf dem Stalagmiten De-Kö S 3 und für eine reine Hydroxylapatitkruste vom NE-Abschnitt des Königshallenprofils (HA = Hydroxylapatit, Q = Quarz, ? = Crandallit/Woodhouseit).

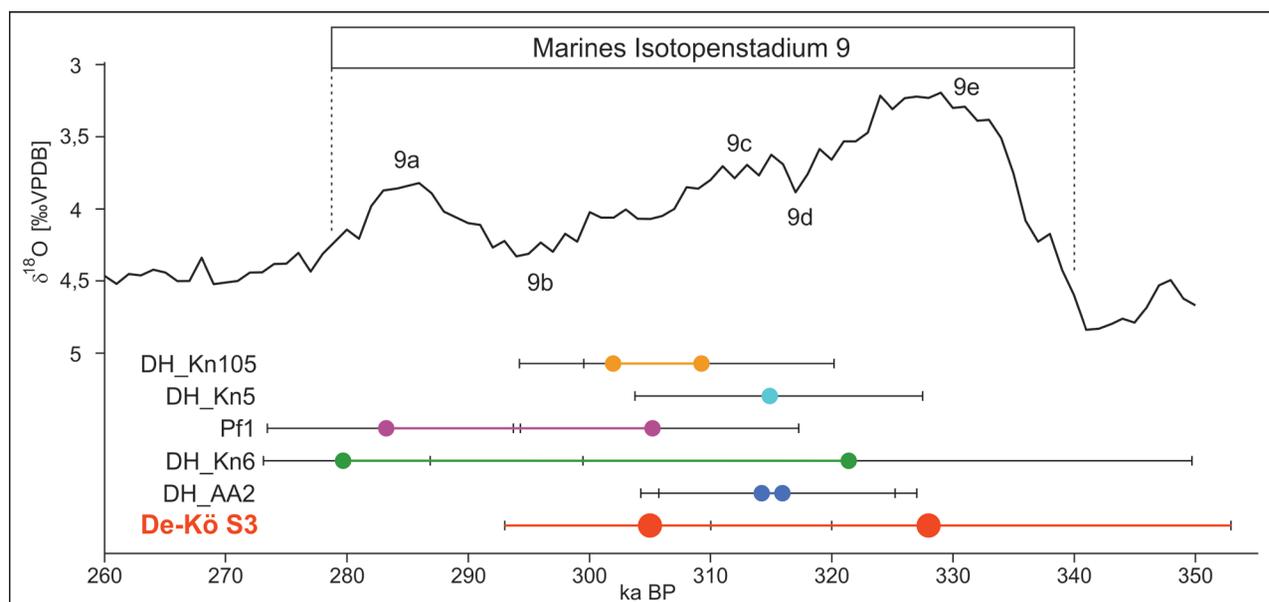
Stalagmit De-Kö S 3 lediglich den Abschnitt vom Beginn bis zum Optimum der Holstein-Warmzeit widerspiegeln, bevor er von der Hydroxylapatitmineralisation von Fledermauskot versiegelt worden ist. Für die Klimarekonstruktion der vollständigen Warmzeit MIS 9a-e müssen die bereits gewonnenen und vorab datierten Proben (vgl. Abb. 11) entsprechend untersucht werden.

**5. Diskussion und Schlussfolgerung**

Erstmals sind Holstein-zeitliche Speläotheme einer mitteleuropäischen Höhle petrographisch/geochemisch näher untersucht worden, um Aussagen zur Klimaentwicklung der Warmzeit MIS 9 zu gewinnen. Diese Warmzeit entspricht nach Literaturrecherchen (u. a. Petit et al. 1999; Geyh & Müller 2005; Lisiecki & Raymo 2005; Litt et al. 2007) einem Altersabschnitt von 340-280 ka. Die Dechenhöhle ist für die Entschlüsselung der Klimaentwicklung von MIS 9 im zentralen Europa

bestens geeignet, da Speläotheme aus dem MIS 9 mittlerweile über die gesamte Höhle bis in die direkt östlich gelegene Pferdestall-Höhle bekannt sind. Zudem lässt sich das Niveau in den drei Grabungsprofilen Knochengrube, Königshalle und Brückengang in die quartäre Schichtfolge mit warmzeitlichen Speläothemen und kaltzeitlichen Klastika gut einhängen und verfolgen.

Der bereits vor 20 Jahren entnommene Stalagmit De-Kö S 3 ist mit TIMS <sup>230</sup>Th/U-Altern von 328 und 305 ka trotz größerer Fehlergrenzen in den wärmeren unteren bis mittleren Abschnitt von MIS 9 einzuordnen (Abb. 9). Der liegende Teil des Stalagmiten ist, nach  $\delta^{18}O$ -Werten von -7,0 bis -9,5 ‰, unter etwas kühleren Bedingungen gegenüber dem jüngeren Teil, mit  $\delta^{18}O$ -Werten zwischen -5,0 bis -6,5 ‰, entstanden. Die letztgenannten Werte entsprechen Daten holozäner Stalagmiten der Dechenhöhle (Niggemann 2000; Wurth 2002), der nahegelegenen Bunkerhöhle



**Abb. 11:** <sup>230</sup>Th/U-Alter mit Fehlerbalken für den Stalagmiten De-Kö S 3 (rot) und für die noch hochaufgelöst zu bearbeitenden Stalagmiten. Im Vergleich der MIS 9-Abschnitt des  $\delta^{18}O$ -Profils für benthonische Foraminiferen nach Lisiecki & Raymo (2005).

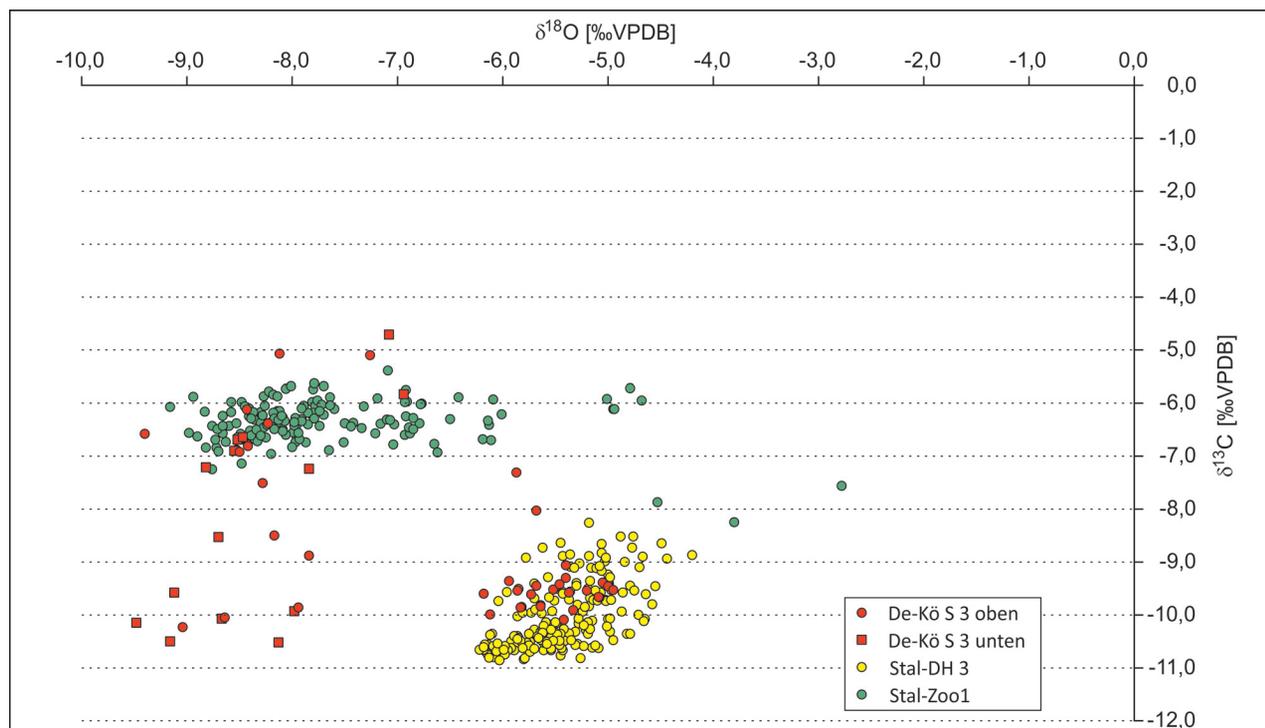


Abb. 12:  $\delta^{18}\text{O}$ - und  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte für De-Kö S 3 und für spätglazial/holozäne Stalagmiten der Dechenhöhle (Stal-DH 3 nach Wurth 2002) und der Zoolithenhöhle (Stal-Zoo 1 nach Wurth 2002).

(Fohlmeister et al. 2012) und des Herbstlabyrinths bei Breitscheid/N-Hessen (Mischel et al. 2017), sodass die Klimata der holsteinzeitlichen und der heutigen Warmzeit pauschal gesehen ähnlich gewesen sein dürften. Möglicherweise ist der wärmste Abschnitt von MIS 9 in De-Kö S 3 nicht ausgebildet, da eine Kruste aus Hydroxylapatit den Stalagmiten versiegelt hat. Schließlich war das Klima der Holstein-Warmzeit nach einer Literatur-Kompilation von Ehlers (2011) gegenüber dem heutigen Klima im zentralen Mitteleuropa etwas wärmer ( $3^\circ\text{C}$  nach Petit et al. 1999).

Die zurzeit von Dana Riechelmann und Denis Scholz am Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz durchgeführten Detailuntersuchungen an insgesamt sechs Stalagmiten werden das Bild der Klimaentwicklung des MIS 9 im zentralen Mitteleuropa sicherlich deutlich erweitern.

### Danksagung

Die Untersuchungen wurden dankenswerterweise durch technische Hilfen von Mathias Born, Beate Gehnen, Hartmut Mammen und Rolf D. Neuser (Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität Bochum) sowie René Eichstätter (Akademie der Wissenschaften, Heidelberg) unterstützt. Die C/O-Isotopenanalytik wurde dankenswerterweise durch den Förderverein Dechenhöhle und Deutsches Höhlenkundemuseum e. V. finanziell gefördert. D. Scholz und D. F. C. Riechelmann danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft

für Forschungsmittel (SCHO 1274/9-1, 11-1, 13-1) sowie dem Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, für die jahrelange erfolgreiche Kooperation. Konstruktive Hinweise verdanken wir den Begutachtungen von S. Kempe und F. Knolle.

### 6. Literatur

- Dreyer, R., Graw, R., Niggemann, S. & Richter, D.K. 2000: Forschungsgrabung „Dechenhöhle 2000“: Erste Ergebnisse. – Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten 55: 169-178.
- Drozdowski, G., Richter, D.K. & Wrede, V. 2017: Hydrothermalkarst im nördlichen Rheinischen Schiefergebirge. – Karst und Höhle, 2015-2017: 1-88.
- Ehlers, J. 2011: Das Eiszeitalter. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Fairchild, I. J. & Baker, A. 2012: Speleothem Science. From Process to Past Environments. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Fohlmeister, J., Schröder-Ritzrau, A., Scholz, D., Spötl, C., Riechelmann, D.F.C., Mudelsee, M., Wackerbarth, A., Gerdes, A., Riechelmann, S., Immenhauser, A., Richter, D.K. & Mangini, A. 2012: Bunker cave stalagmites: an archive for central European Holocene climate variability. – Climate of the Past 8: 1751-1764.
- Geyh, M. A. & Müller, H. 2005: Numerical  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating and a palynological review of the Holsteinian/Hoxnian Interglacial. – Quaternary Science Reviews 24: 1861-1872.
- Hill, C. & Forti, P. 1997: Cave Minerals of the World. – Second Edition, Huntsville: National Speleological Society.
- Iden, E. 2013: Datierung des Stalagmiten BR-5 aus der Dechenhöhle, Iserlohn und Erstellung eines Altersmodells. – Bachelorarbeit, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, Deutschland.

- Kempe, S., Rosendahl, W., Wiegand, B. & Eisenhauer, A. (2002): New speleothem dates from caves in Germany and their importance for the Middle and Upper Pleistocene climate reconstruction. – *Acta Geologica Polonica* 52: 55-61.
- Lisiecki, L. E. & Raymo, M. E. 2005: A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. – *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Litt, T., Behre, K.-E., Meyer, K. D., Stephan, H.-J. & Wansa, S. 2007: Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. – *Eiszeitalter und Gegenwart* 56: 7-65.
- Marks, L., Karabanov, A., Nitychoruk, J., Bahda-Sarau, M., Krzywicki, T., Majecka, A., Pochocka-Szwarc, K., Rychel, J., Woronko, B., Zbuckl, L., Hradunova, A., Hrychanik, M., Mamchyk, S., Rylova, T., Nowacki, L. & Pielach, M. 2018: Revised limit of the Saalian ice sheet in central Europe. – *Quaternary International* 478: 59-74.
- Miko, S., Kuhta, M. & Kapelj, S. (2001): Bat guano influence on the geochemistry of cave sediments from Modrič Cave, Croatia. – 13<sup>th</sup> International Congress of Speleology, Brasilia DF, 187-192.
- Mischel, S. A., Scholz, D., Spötl, C., Jochum, K. P., Schröder-Ritzrau, A. & Fiedler, S. 2017: Holocene climate variability in Central Germany and a potential link to the polar North Atlantic: A replicated record from three coeval speleothems. – *The Holocene* 27(4): 509-525.
- Nickl, A.-L. 2013: Messung der stabilen Sauerstoff- und Kohlenstoff-Isotope in einem Stalagmiten aus dem Sauerland. – Bachelorarbeit, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, Deutschland.
- Niggemann, S. 2000: Klimabezogene Untersuchungen an spät- und postglazialen Stalagmiten aus Massenkalkhöhlen des Sauerlandes. – *Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten* 55: 5-129.
- Niggemann, S., Richter, D. K., Hammerschmidt, E., Dreyer, R., Grebe, W. & Platte, A. 2018: Dechenhöhle Erdgeschichten. Iserlohn: Dechenhöhle.
- Nitychoruk, J., Binka, K., Ruppert, H. & Schneider, J. 2006: Holsteinian Interglazial = Marine Isotope Stage 11?. – *Quaternary Science Reviews* 25: 2678-2681.
- Onac, B.P., Mylroie, J.E. & White, W.B. (2001): Mineralogy of cave deposits on San Salvador Island, Bahamas. – *Carbonates and Evaporates* 16: 8-16.
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. L., Barnola, J. M., Basile, I., Bender, M., Chappellaz, J., Davis, J., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. & Stievenard, M. 1999: Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. – *Nature* 399: 429-436.
- Richter, D.K., Dreyer, R., Niggemann, S. & Scholz, D. 2018:  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -datierte warm- und kaltzeitliche Sinter der Dechenhöhle und die großklimatische Entwicklung der letzten 200.000 Jahre. – *Mitteilungen des Verbandes der deutschen Höhlen- u. Karstforscher* 64: 16-24.
- Weber, M., Scholz, D., Schröder-Ritzrau, A., Deininger, M., Spötl, C., Lugli, F., Mertz-Kraus, R., Jochum, K. P., Fohlmeister, J., Stumpf, C. F. & Riechelmann, D. F. C. 2018: Evidence of warm and humid interstadials in central Europe during early MIS 3 revealed by a multi-proxy speleothem record. – *Quaternary Science Reviews* 200: 276-286.
- Wurth, G. 2002: Klimagesteuerte Rhythmik in spät- bis postglazialen Stalagmiten des Sauerlandes, der Fränkischen Alb und der Bayerischen Alpen. – Dissertation, Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland.