

13. Die Bleißberghöhle – ein Glücksfall für die Klimaforschung

von Sebastian Breitenbach & Norbert Marwan

Höhlen stellen generell für die Wissenschaft ein wertvolles Archiv dar, aus dem vielfältige und interessante Erkenntnisse gewonnen werden können. So gehören sie inzwischen auch zu den bedeutendsten Klimaarchiven auf dem Festland (See- und Meeressedimente stellen andere wichtige Archive dar). Solange die Höhlensedimente und Sinter ungestört bleiben, können hydrologische und klimatische Bedingungen detailliert aufgezeichnet werden. Die Bleißberghöhle ist in diesem Zusammenhang ein ausgesprochener Glücksfall, da sie über viele Jahrtausende komplett verschlossen war und so vor äußeren Störungen bewahrt wurde. Sie ist in vielen Abschnitten mit verschiedensten Sinterformen geschmückt (siehe Kapitel *Speläotheme in der Bleißberghöhle*). Für die Rekonstruktion regionaler Klimaänderungen sind vor allem die Stalagmiten geeignet. Die wissenschaftliche Bearbeitung des aus der Bleißberghöhle gesammelten Materials ist ein langwieriger Prozess und noch lange nicht abgeschlossen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können aber bereits erste interessante Aussagen gemacht werden, auf die wir hier nach einem kurzen allgemeinen Einblick in verschiedene Aspekte der Paläoklimaforschung eingehen wollen.

Paläoklima – das Klima der Vergangenheit

In der Paläoklimatologie nutzen wir verschiedene Archive (siehe Kasten *Paläoklimaforschung*), aus denen wir petrologische¹³, physikalische oder geochemische Daten extrahieren und mit regionalen und globalen Messdaten vergleichen können. Diese Art der Entschlüsselung vergangener Klimaänderungen ist sehr nützlich, wenn es zum Beispiel darum geht, das langfristige Verhalten des lokalen, regionalen oder globalen Klimas zu verstehen. Meteorologische Zeitreihen reichen nur in das 19., selten in das 18. Jahrhundert zurück. Daher können wir in diesen

Daten Klimaveränderungen mit längeren Zyklen, z. B. mit 100 und mehr Jahren, nicht detektieren. Da die meteorologischen Daten nur das industrielle Zeitalter ab etwa 1850 abdecken, bleibt auch unklar, wie gut wir das Klima dieser – vom Menschen schon stark beeinflussten – Zeit mit historischen oder noch älteren (sogenannten Paläo-)Klimainformationen verbinden können.

Interessant sind Klimarekonstruktionen besonders auch im Hinblick auf frühere Besiedlungsdynamik, kulturelle Entwicklungen und den Einfluss des Menschen auf das Ökosystem.

Gab es einen Einfluss des Klimas (und welcher Art) auf die Entwicklung des Menschen oder gar ganzer Zivilisationen (z. B. Menschheitsentwicklung in Afrika oder Verschwinden von Hochkulturen wie der Maya)?

Wann kamen Menschen in eine Region?

Seit wann und wie stark beeinflussten diese ersten Siedler die Landschaft, den Wasserhaushalt und das Klima dieser Region?

Haben sich Informationen zu Ausnahmeereignissen (Fluten, Dürren, Stürme) in den Stalagmiten erhalten und können wir abschätzen, wie häufig sie natürlicherweise auftreten?

Können wir die Mechanismen identifizieren, die für Klimaschwankungen verantwortlich sind?

Dies sind nur einige beispielhafte Fragen, die Paläoklimaforscher gemeinsam mit Wissenschaftlern anderer Disziplinen (z. B. Archäologen, Anthropologen, Soziologen, Evolutionsbiologen oder Physikern) untersuchen. Zunehmend werden Stalagmiten für die Beantwortung solcher Fragen herangezogen.

Die moderne, interdisziplinäre Forschung leistet sehr wichtige Beiträge zur Beantwortung dieser und vieler weiterer Fragen. Sie dient auch der Abschätzung von Gefahren, die durch Klimaveränderungen künftig hervorgerufen werden können, zum Beispiel Häufigkeit von Stürmen, Hitzewellen oder

¹³ petrologisch: gesteinsbeschreibende Eigenschaften

Starkregen und Fluten. Diese Informationen sind wichtig für die Landwirtschaft und öffentliche Gesundheit, aber auch für Migrationspolitik und zur Vorbeugung von Konflikten, z. B. wenn es um beschränkte Trinkwasserressourcen oder alternative Energiegewinnung geht.

Paläoklimaforschung ist also eine Art von Detektivarbeit, bei der es um kleine Details geht. Höhlen helfen uns hierbei enorm, denn die darin verborgenen Sedimente sind einzigartige Zeugen von Veränderungen, die sich an der Oberfläche vor Jahrhunderten oder Jahrzehntausenden zugetragen haben und dort schon lange nicht mehr sichtbar sind. Stalagmiten sind besonders interessant, da sie eine recht genaue zeitliche Zuordnung der aufgezzeichneten Ereignisse erlauben.

Was aber braucht man eigentlich, um verlässliche Aussagen über das Klima einer Region treffen zu können? Mehrere Kriterien sind grundlegend für vollständige und umweltsensitive Archive (siehe Kasten *Paläoklimaforschung*). Zuerst einmal sollte das Archiv über lange Zeit ungestört sein und natürlich sensibel auf die äußeren Einflüsse reagieren, die es zu rekonstruieren gilt. Man kann sich ein Klimaarchiv etwa wie eine gut sortierte und gepflegte Bibliothek vorstellen; die Bücher werden in ein bestimmtes System (z. B. nach Erscheinungsjahr) einsortiert und vor äußeren Unbilden (Feuchte, Feuer oder Vandalismus) geschützt gelagert. Ähnlich funktioniert ein Klimaarchiv: Stalagmiten, also „die Bücher“ im Archiv Höhle, sollten kontinuierlich wachsen („gut sortiert sein“) und

sie müssen möglichst vor Korrosion durch untersättigtes Wasser geschützt sein, ansonsten würden sie wie feuchte Bücher zerfallen. Stalagmiten sollten ebenso nicht von Extremereignissen, Tieren oder Menschen ge- oder zerstört werden, sonst sind sie wie Bücher mit unsortierten oder herausgerissenen Seiten. Schließlich muss ein gutes Archiv zwangsläufig chronologisch genau festgelegt sein; fehlt dem Klimaarchiv die Zeitachse, ist das wie ein Buch ohne Inhaltsverzeichnis und mit losen Seiten, die völlig durcheinandergemischt sind. Dafür benötigt der Paläoklimatologe moderne radiochemische und statistische Verfahren. Um das Buch schließlich lesen und verstehen zu können, bedarf es viel Ausbildung und interdisziplinärer Arbeit – heute arbeiten Wissenschaftler aus diversen Fachrichtungen Hand in Hand, um die Sätze und die Geschichte im Buch „Stalagmit“ zu entziffern.

Klimaabhängige Anzeiger

Um vorherrschende Umweltbedingungen zu rekonstruieren, bieten sich sehr verschiedene Messwerte (im Fachjargon „Proxies“) an, die uns anstelle direkter Temperatur- oder Niederschlagsmessungen klimarelevante Informationen liefern (Kasten *Paläoklimaforschung*). Zum Beispiel ist die Wachstumsgeschwindigkeit eines Stalagmiten ein Indikator für die Verfügbarkeit von Wasser: Ist die Gegend oberhalb der Höhle im Extremfall zu trocken oder gefroren, steht kein Wasser zur Verfügung und der Stalagmit kann nicht wachsen.

Paläoklimaforschung

Meteorologische Daten geben uns detailliert Einblick in das Wettergeschehen und Klima auf lokaler bis globaler Ebene. Da diese Aufzeichnungen aber nur etwas mehr als 150 Jahre zurückreichen (in Jena ausnahmsweise 200 Jahre), nutzen Paläoklimatologen sogenannte Proxies („Stellvertreter“), die Umwelt- und Klimainformationen verlässlich über viel längere Zeiträume (Jahrzehnte bis Jahrmillionen) aufzeichnen. Zu den wichtigsten Klimaarchiven gehören Baumringe, Bohrkern aus dem Meer, aus Seen und dem Eis der antarktischen und grönländischen Eiskappen, sowie Höhlensedimente und Stalagmiten. Die Paläoklimaforschung beschäftigt sich mit der Extraktion und Interpretation klimarelevanter Informationen (z. B. Temperatur, Wasserhaushalt, atmosphärische Zirkulation) aus diesen Klimaarchiven und der detaillierten Rekonstruktion des Klimas der Vorzeit. Die Untersuchung der Stalagmiten aus der Bleißberghöhle wird an den Forschungsinstituten GFZ Potsdam, PIK Potsdam, Universität Mainz und Northumbria University vorangetrieben.

Zwei andere wichtige Indikatoren sind die Isotopenverhältnisse von Sauerstoff und Kohlenstoff, die bei der Ausfällung von Carbonat während des Wachstums in den Stalagmiten eingebaut werden (siehe Kasten $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ in Stalagmiten). Da Stalagmiten fast ausschließlich aus Carbonat (CaCO_3) bestehen, liegt es nahe, die Variabilität der Isotopenverhältnisse dieser beiden Elemente zu messen. Die Sauerstoffisotopenverhältnisse ($\delta^{18}\text{O}$) in einem Stalagmiten hängen sowohl von der $\delta^{18}\text{O}$ -Signatur des Tropfwassers als auch von der Temperatur während der Ausfällung des Carbonats ab. Erstere hängt wiederum vom $\delta^{18}\text{O}$ -Signal des Niederschlages ab und kann uns daher wertvolle Informationen zur Herkunft und zur Menge des Niederschlages und Geschichte des Wasserkreislaufs liefern (siehe Abb. 96). Da auch die Temperatur einen großen Einfluss auf das $\delta^{18}\text{O}$ -Signal eines Stalagmiten hat, ist es natürlich spannend, eine Temperaturrekonstruktion zu versuchen. Das Kohlenstoffsignal ($\delta^{13}\text{C}$) in Stalagmiten wird durch Prozesse in Boden, dem Fels über der Höhle (dem sogenannten Epikarst) und in der Höhle selbst gesteuert. Das $\delta^{13}\text{C}$ -Signal verändert sich beispielsweise je nachdem, ob und in welchem Verhältnis Wald oder Grasland an der Oberfläche zu finden sind, oder

durch Prozesse während der Ausfällung des Carbonats, die mit der Tropfrate zusammenhängen. Unter günstigen Umständen kann uns $\delta^{13}\text{C}$ daher die Geschichte der Feuchteverfügbarkeit erzählen. Allerdings sind die physikalischen und klimatischen Zusammenhänge enorm komplex. Obwohl die Messung von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ heute routinemäßig vonstattengeht, ist es oft notwendig, weitere unabhängige Proxies zu analysieren, um die Prozesse zu verstehen, die Einfluss auf die Isotopensignaturen haben. Zu den neueren Proxies gehören vermehrt auch Elementkonzentrationen und -verhältnisse (z. B. von Magnesium, Strontium oder Uran), da diese oft Feuchte- oder Verwitterungsindikatoren darstellen. Unser Team entwickelt daher solche neuen Anzeiger, die zudem möglichst quantitative Aussagen zu Niederschlags- oder Vegetationsveränderungen zulassen sollen.

Um nun $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, Strontium oder Schwefel aus der Bleißberghöhle für Klimarekonstruktionen nutzen zu können, benötigen wir aber noch einen weiteren Baustein: ein robustes Altersmodell, die Zuordnung eines genauen Zeitpunktes zu den gemessenen Werten. Erst wenn wir wissen, wann bestimmte Veränderungen auftraten, können wir Umwelt und Klima rekonstruieren.

$\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^{13}\text{C}$ in Stalagmiten

Chemische Elemente können aus verschiedenen aufgebauten Atomen gebildet sein. Die Anzahl Protonen im Atomkern ist zwar dabei gleich, aber die Anzahl der Neutronen kann variieren. Man spricht dann von Isotopen, deren Massen kleine, aber messbare Unterschiede aufweisen. Der Atomkern des Sauerstoffs besteht z. B. aus 8 Protonen und in der Regel aus 8 Neutronen. Es gibt aber auch Sauerstoff, dessen Kerne aus 8 Protonen und 9 oder 10 Neutronen bestehen (neben selteneren, instabilen Sauerstoffisotopen). Um das zu kennzeichnen, gibt man zusätzlich zum chemischen Symbol noch die Massenzahl (Summe aus Protonen und Neutronen) an, also ^{16}O , ^{17}O oder ^{18}O . Das zahlenmäßige Verhältnis zwischen dem häufigsten Isotop ^{16}O und dem schwereren, aber viel seltener auftretenden ^{18}O wird durch vielfältige Mechanismen bestimmt. Verdunstet z. B. das Wasser in einem Wassertropfen, so geht zuerst das Wasser mit dem leichteren Sauerstoff, also ^{16}O , in den gasförmigen Zustand über, da hierfür weniger Energie aufgewandt werden muss. Schwerere Sauerstoffisotope verbleiben in dem Wassertropfen dagegen viel länger. Das hat zur Folge, dass sich das Verhältnis zwischen ^{16}O und ^{18}O zugunsten von ^{18}O verschiebt. Diese Abweichung kann gegen Standards verglichen werden; die Abweichung dieses Verhältnisses vom Standard wird als $\delta^{18}\text{O}$ beschrieben. Da diese Abweichung des Isotopenverhältnisses vom Normalwert von verschiedenen Umweltparametern, wie Temperatur, Wind oder Luftfeuchtigkeit abhängt, bietet sie sich als Maß für Veränderungen im hydrologischen Kreislauf und damit als Klimaindikator an.

Es war einmal ... – Datierungen und Zeitachsen

Messen wir nun Proxies in einem Stalagmiten, sehen wir zuerst einmal nur die Variationen der Messwerte entlang einer Distanz – der Wachstumsachse. Um die Messwerte aber für die Rekonstruktion von Umweltbedingungen nutzen zu können, müssen wir jedem Proxywert ein Alter zuordnen, das heißt ein Altersmodell erstellen. Die Zeitachse ist somit absolut grundlegend für jegliche Rekonstruktion und die dafür notwendige Datierung die eigentlich erste Aufgabe im Labor. Zur Datierung können, je nach den Umständen, verschiedene Verfahren angewendet werden. Häufig werden sogenannte radiometrische Verfahren benutzt, die auf Gesetzmäßigkeiten beim Zerfall von Atomen beruhen.

Nicht zuletzt aus Kostengründen kann nicht jede einzelne Probe radiometrisch datiert werden. Normalerweise werden nur relativ wenige Datierungen an einem Stalagmiten durchgeführt, wobei die Anzahl sowohl von der Länge des Stalagmiten und den finanziellen und analytischen Kapazitäten als auch von der Komplexität des Stalagmiten selber abhängt. Stalagmiten können mit der Uran-Thorium-Methode sehr genau datiert werden (Kasten *Datierung von Stalagmiten*), was auch einer der Gründe ist, weshalb sie so begehrte Klimaarchive sind. Die erreichbare Genauigkeit hängt von mehreren Faktoren ab, aber einer der wichtigsten ist das konkrete Alter der Probe und die Menge Uran, die im Calcit eingebaut wurde. In den letzten 20 Jahren wurden enorme analytische Fort-

schritte gemacht, sodass heute noch bis zu 700.000 Jahre alte Proben datiert werden können. Unsere Stalagmiten aus der Bleßberghöhle werden im radiometrischen Labor des Max-Planck-Institutes für Chemie in Mainz gemessen, das große Erfahrung mit der Datierung von Tropfsteinen hat.

Langzeitbeobachtungen des Mikroklimas

Um die Faktoren, die Einfluss auf die gemessenen Proxies nehmen, zu isolieren und zu verstehen und die datierten Proxydaten mit den damals herrschenden Umweltbedingungen in Verbindung zu setzen, benötigen wir detaillierte meteorologische Daten aus der Höhle. Durch Langzeitbeobachtung (Monitoring) möglichst vieler Parameter (Temperatur, CO₂-Gehalt, Luftdruck, Tropfrate, Isotopensignatur des Tropfwassers etc.) können wir verstehen, wie und in welchem Maße Hydrologie, Höhlenventilation, Calcitausfällung und Isotopenzusammensetzung der Stalagmiten von äußeren Faktoren abhängt.

Monitoring wird zunehmend als Königsweg zur quantitativen Klimarekonstruktion erkannt. Für möglichst genaue Rekonstruktionen ist die Kombination von detailliert gemessenen Proxies und deren genauen Kalibration mit möglichst langen meteorologischen Datenreihen aus der Höhle und von der Oberfläche notwendig. Monitoring ist sehr aufwändig und erfordert eine möglichst regelmäßige und langfristige Daten- und Probensammlung. Hierfür arbeiten die Höhlenforscher und Wissenschaftler intensiv zusammen.

Datierung von Stalagmiten

Stalagmiten können mittels radiometrischer Altersbestimmung sehr präzise datiert werden. Hierfür wird die Uran-Thorium-Zerfallsreihe als Uhr genutzt (auch U/Th-Methode genannt): Uran zerfällt mit bekannten Halbwertszeiten (245.500 Jahre) zum Tochterelement Thorium. Stalagmiten bauen bei ihrem Wachstum (fast) nur das wasserlösliche Uran ein, während das schlecht bewegliche Thorium zum größten Teil im Boden und Epikarst über der Höhle verbleibt. Dies ausnutzend kann der Paläoklimatologe die Zeit berechnen, die seit der Ausfällung der untersuchten Carbonatprobe vergangen ist. Moderne massenspektrometrische Verfahren erlauben Altersbestimmungen mit der U/Th-Methode bis zu 700.000 Jahren vor heute. Die Stalagmiten aus der Bleßberghöhle werden an der Universität Mainz in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz datiert.

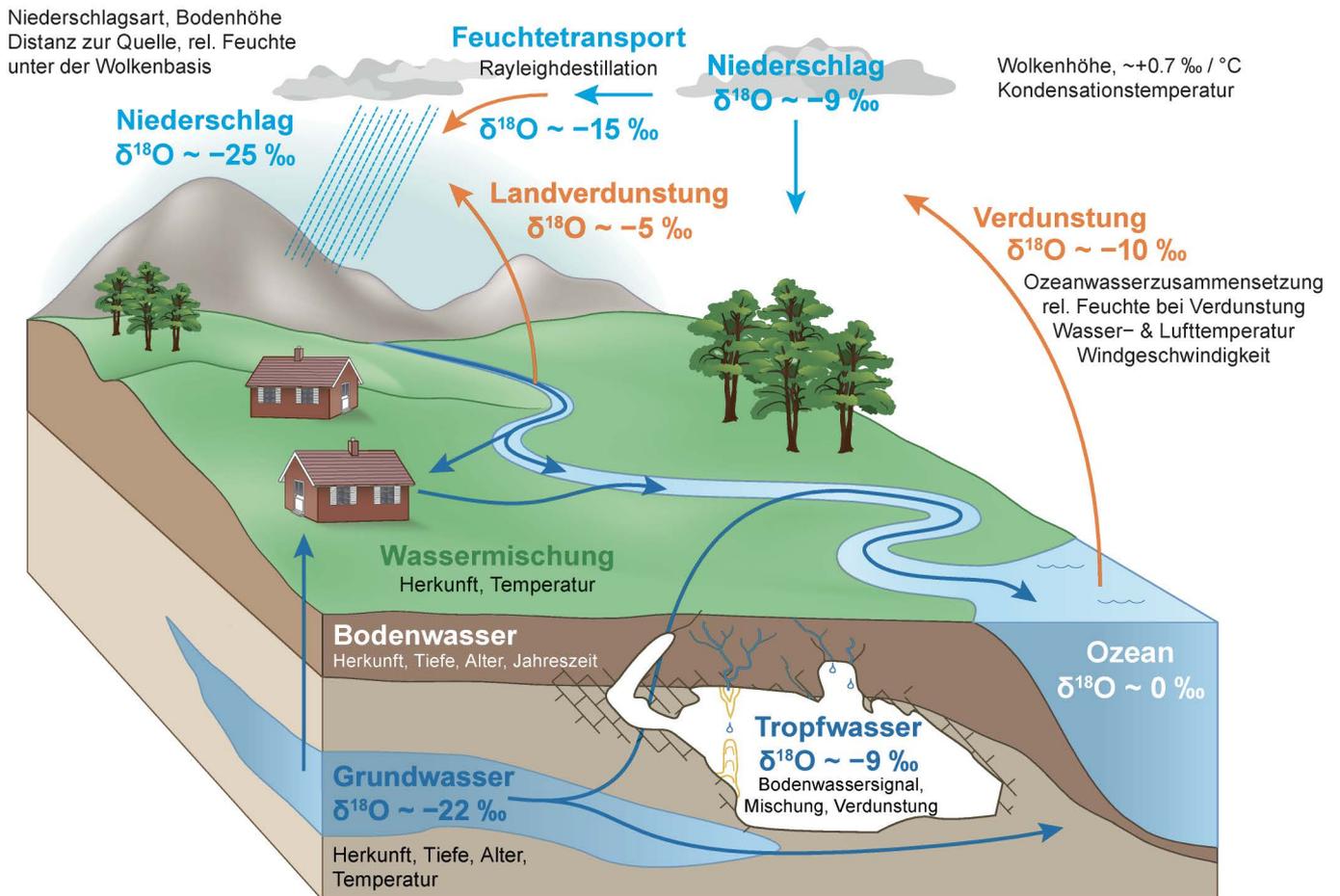


Abb. 96: Mittels der Verhältnisse der Sauerstoffisotope lassen sich viele Prozesse des Wasserkreislaufs rekonstruieren. Verdunstung aus dem Ozean führt zu niedrigeren Isotopenverhältnissen in den Wolken. Weil bei jedem Regen zuerst die schweren ^{18}O -Isotope ausregnen, wird das Isotopensignal in der Wolke immer niedriger, je weiter sie transportiert wird. Damit verringert sich natürlich auch die Isotopenzusammensetzung im Niederschlag. Wolkenhöhe, Entfernung vom Ozean und das Mischungsverhältnis unterschiedlicher Feuchtequellen (z. B. einer ozeanischen und einer kontinentalen Quelle), Temperatur und viele andere Faktoren hinterlassen ihre Spuren im Isotopensignal, das über das Tropfwasser in die Höhle gelangt und in Stalagmiten gespeichert werden kann. Grafik: modifiziert nach Bowen et al. (2019) [3].

Die Bleßberghöhle – ein Glücksfall für die Klimaforschung

Obleich die Tunnelbauaktivitäten gravierende negative Auswirkungen auf die Bleßberghöhle hatten, wurde diese doch erst durch die Bauarbeiten überhaupt entdeckt. Für die Klimaforschung ist dies ein ungewöhnlicher Glücksfall. Viele Höhlen Mitteleuropas sind schon seit Jahrhunderten oder sogar Jahrtausenden bekannt und wurden als Grabstätten, Wohn- und Stauraum oder für den Abbau unterschiedlicher Mineralstoffe genutzt. Durch diese Eingriffe wurde mindestens das natürliche Mikroklima innerhalb dieser Höhlen gestört. Oft jedoch gab es weit dramatischere Zerstörungen: Es wurden Sedimente und Sinter unachtsam ausgeräumt oder zerbrochen, sodass die eigentlichen Klimaarchive

(Stalagmiten und Höhlensedimente) verloren gingen. Daher sind Klimarekonstruktionen in solchermaßen veränderten Höhlen erschwert oder gar unmöglich.

Die Bleßberghöhle ist in dieser Hinsicht eine erfreuliche Ausnahme in Mitteleuropa. Da sie bis zu ihrer Entdeckung 2008 keinen bekannten Zugang besaß, sind auch ihre Sedimente bis dahin nur durch natürliche Umstände verändert worden. Damit steht uns heute ein besonders wertvolles Archiv zur Verfügung, in dem wir mittels geochemischer Methoden aus Stalagmiten Informationen zum Wasserhaushalt, zur Temperatur und zu anderen Umweltparametern gewinnen und so das Klima der Vorzeit rekonstruieren können. Um den Vergleich von oben noch einmal zu bemühen: Die Bleßberghöhle stellt quasi eine intakte Bibliothek mit vielen druckfri-

schen Büchern dar, die es zu lesen und zu dechiffrieren gilt.

Wie kam es zur wissenschaftlichen Erforschung des Paläoklimas in der Bleißberghöhle?

Während der Entdeckung der Höhle wurden unterschiedliche Institutionen in die Erkundung einbezogen. Bei der Erkundung und Vermessung des Nordganges der Westhöhle im Januar 2009 durch den THV (siehe Kapitel *Westteile der Bleißberghöhle*) wurden zwei abgebrochene Stalagmiten gefunden und geborgen. Diese zwei ersten Stalagmiten (BB-1 und BB-2) wurden sofort zum GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam gebracht, wo sie analysiert und gemeinsam mit den anderen Instituten detailliert untersucht werden. Nach ersten mineralogischen Voruntersuchungen begann recht schnell die Planung weiterer Analysen, denn es war offensichtlich, welch großartiges Archiv sich uns eröffnete. Zunächst galt es, ein Labor für die Datierungen zu finden, was glücklicherweise mit der Universität Mainz gelang.

Als nach ersten Datierungen dieser beiden Stalagmiten klar wurde, dass die jüngsten 400 Jahre in ihnen nicht archiviert waren, wurde im August 2013 ein dritter Stalagmit (BB-3) aus der Höhle in der Hoffnung entnommen, diese letzten Jahrhunderte mit abzudecken (siehe *Abb. 97*). Dieser Stalagmit war nämlich noch vollständig intakt und tropfnass – normalerweise ein Zeichen für aktives Wachstum. Diese Annahme sollte sich später jedoch als falsch erweisen. Parallel zu den Datierungsarbeiten wurden die Klimarekonstruktionen mit den bereits vorhandenen Proxydaten und Altern vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) und der Ruhr-Universität Bochum (RUB) gemeinsam vorangetrieben. Diese Klimarekonstruktionen waren bislang auf das Holozän (die letzten 10.000 Jahre) fokussiert. Ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziertes Nachfolgeprojekt bearbeitet aktuell Proben, die bis zu 60.000 Jahre, also tief in die letzte Eiszeit, zurückreichen. Diese Forschungsarbeit ist international angelegt, mit Forschern in

Potsdam, Mainz, Newcastle upon Tyne und natürlich Thüringen.

Unabhängig von unseren (THV, PIK, RUB, GFZ) begonnenen Aktivitäten hatte von behördlicher Seite die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) ebenfalls begonnen, umfangreich Proben zu bergen. Diese Arbeiten betrafen hauptsächlich den Ostteil der Bleißberghöhle sowie die Bleißberghöhle 2. Die Proben (Sinterwände, Sinterfahnen, Stalaktiten, Stalagmiten) wurden vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) in Hannover ansatzweise untersucht. Hier wurden vor allem mineralogische Untersuchungen zur Bildung der Stalagmiten und Versinterungen angestellt.

Erste Ergebnisse ...

Es liegen bereits erste Ergebnisse vor, die teilweise publiziert sind. Daher können wir ausgewählte und gleichsam vorläufige Aussagen vorstellen, und dies auch nur für die drei Stalagmiten aus der Westhöhle.

Die drei geborgenen Stalagmiten zeigen eine sehr schöne, gelbliche Färbung und zeichnen sich durch feine Lagen aus (siehe *Abb. 97*). Um die Verwendbarkeit der Stalagmiten für paläoklimatologische Fragestellungen zu evaluieren, wurde zunächst ihre Mineralogie mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt. Die drei Stalagmiten bestehen ausschließlich aus Calcit (neben Spuren weiterer Elemente, wie Uran); wären sie aus mehreren Mineralphasen, z. B. Aragonit und Calcit zusammengesetzt, hätte dies die Interpretation von Isotopenmessungen sehr erschwert.

Anschließend wurden alle drei Stalagmiten in Mainz radiometrisch datiert. Stalagmit BB-1 ist demzufolge vor 5.600 bis 600 Jahren, BB-2 vor 6.200 bis 3.700 Jahren und BB-3 (obwohl der kürzeste!) vor 11.200 bis 5.300 Jahren gewachsen. Das Alter für BB-3 war für uns überraschend, da die Umstände in der Höhle darauf hindeuteten, dass er noch aktiv wäre, und nicht, wie die Datierung jetzt offenbarte, bereits vor 5.300 Jahren aufhörte zu wachsen. Damit ist jedoch klar, dass die drei Stalagmiten zusammen das Holozän abdecken. Andere, bei TLUG und LIAG vorhandene Proben reichen tief in die Vergangenheit, bis 340.000 Jahre in die letzte Eiszeit zurück.

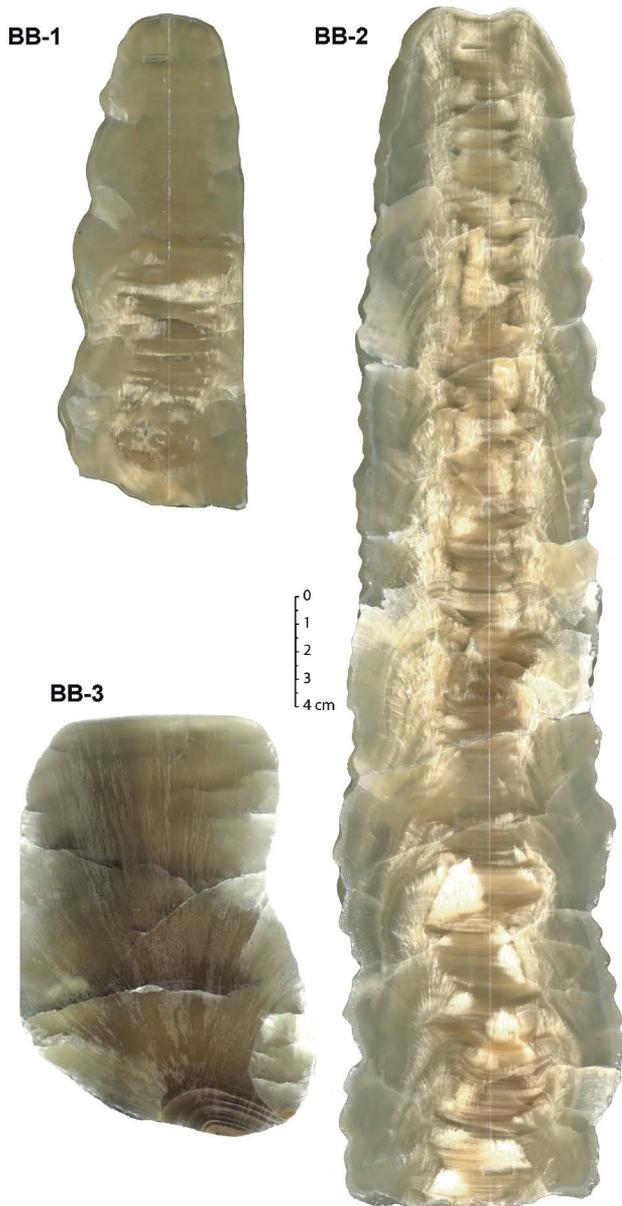


Abb. 97: Die drei Stalagmiten BB-1, BB-2 und BB-3 werden derzeit geochemisch analysiert

Für die Rekonstruktion der Umweltbedingungen sind die isotochemischen Untersuchungen von großem Interesse. Am GFZ wurden im BB-1 über 1.000 Proben auf $\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$ untersucht, im BB-2 und BB-3 jeweils etwa 400 bzw. 540 Proben. Parallel dazu wurde die Verteilung verschiedener Elemente röntgenanalytisch gemessen. Mithilfe der Datierungen aus Mainz wurden am PIK Altersmodelle für die Stalagmiten erstellt, um jedem gemessenen Isotopenwert ein Alter zuzuordnen zu können.

... und eine erste Interpretation

Die Altersmodelle von BB-1 und BB-3 zeigen sowohl zwischen den Stalagmiten als auch über die Zeit verschiedene Wachstumsraten auf. Betrachtet auf den gesamten Zeitraum, so ist BB-1 generell schneller gewachsen (0.051 mm pro Jahr) als BB-3 (0.033 mm pro Jahr). In den Altersmodellen beider Stalagmiten fallen abrupte Wechsel von einem langsamen zu einem schnellen Wachstum bei etwa 5900 v. Chr. und von einem schnellen zu einem eher langsamen Wachstum der Stalagmiten bei etwa 2600 v. Chr. auf (siehe Abb. 98). Das schnellere Wachstum fällt mit einer bekannten Phase

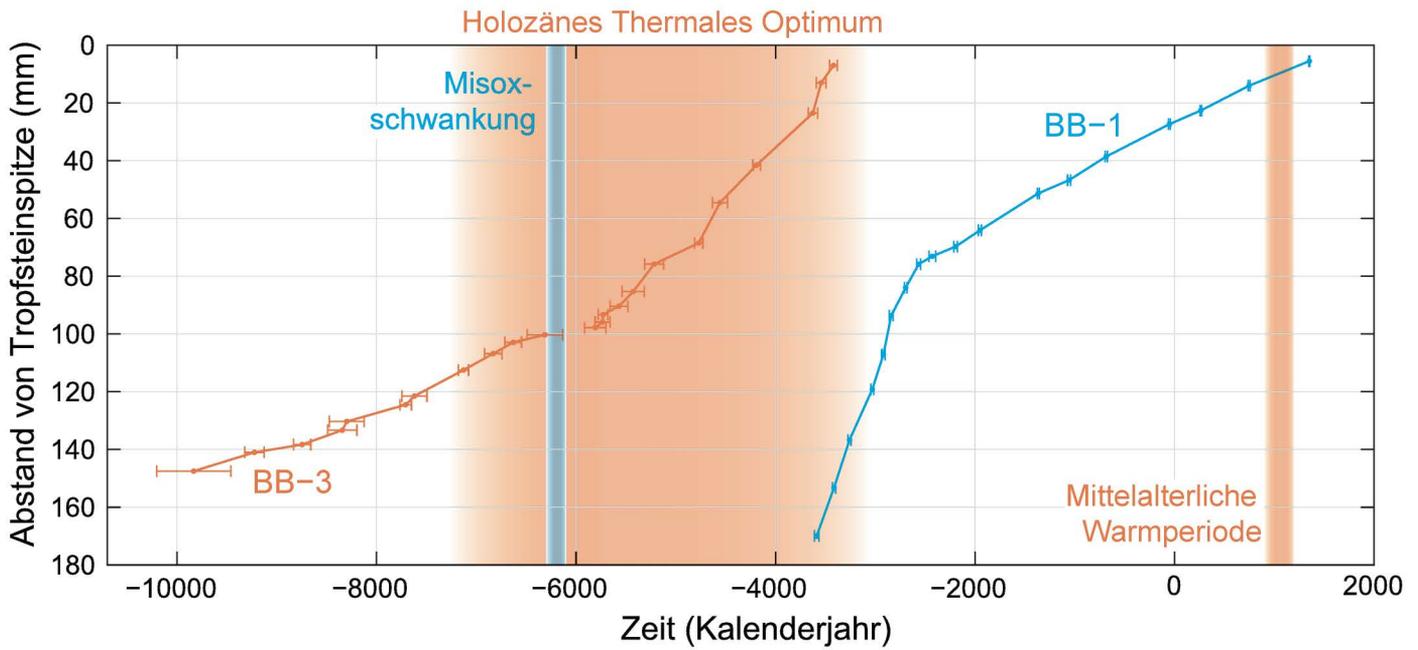


Abb. 98: Altersmodelle der Stalagmiten BB-1 und BB-3. Deutlich sind Änderungen der Wachstumsgeschwindigkeiten bei etwa 6200 v. Chr. und zwischen 5900 und 2600 v. Chr. zu erkennen, wofür Klimaänderungen verantwortlich sind

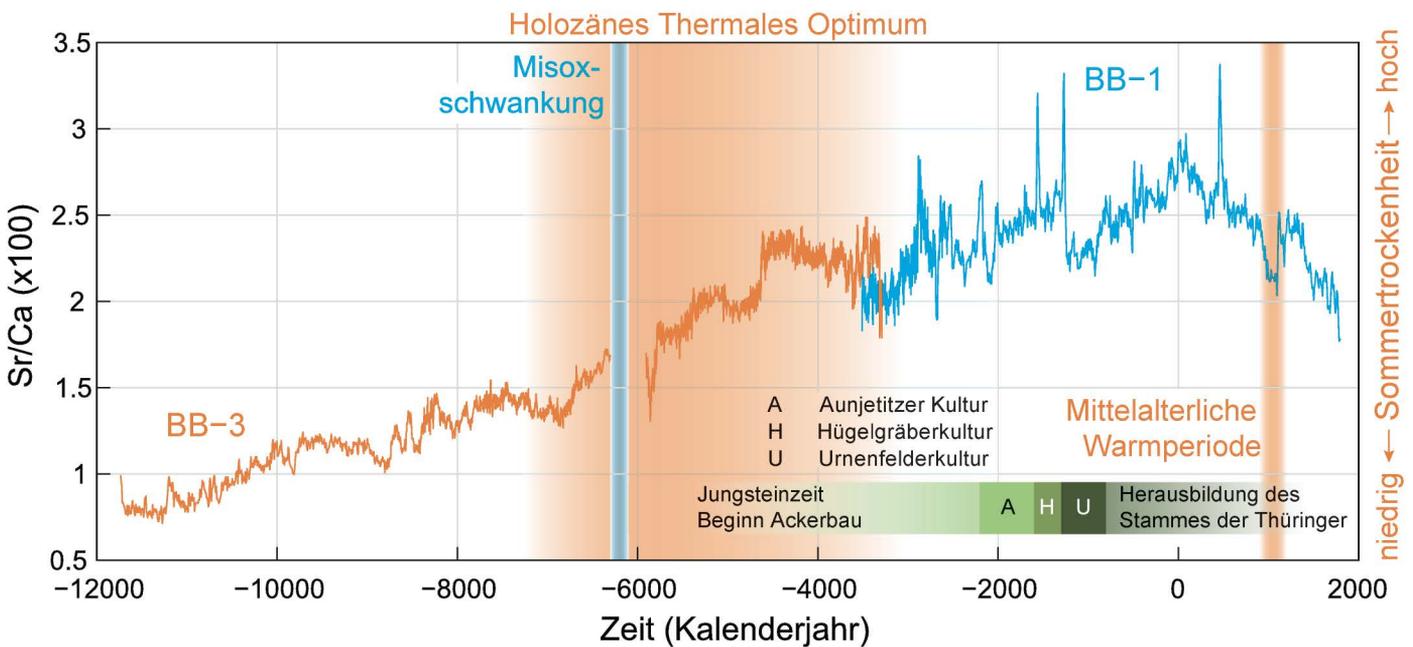


Abb. 99: Elementverhältnis von Strontium zu Calcium als Anzeiger saisonaler Niederschlagsveränderungen oberhalb der Höhle. Höhere Sr/Ca-Werte seit Mitte des Holozänen Thermalen Optimums deuten auf trockenere Sommer hin, mit einigen ausgeprägten Extremereignissen. Seit dem Mittelalter deutet sich ein Trend zu verstärktem Sommerregen an. Leider fehlen die letzten 450 Jahre, sodass wir keine direkten Vergleiche mit dem heutigen Klima ziehen können

wärmeren Klimas zusammen, dem sogenannten „Holozänen Thermalen Optimum“. Bei genauerem Betrachten der Alterskurve von BB-3 fällt auch noch ein sehr flacher Abschnitt bei etwa 6.200 v. Chr. auf. Während dieser Zeit erlebte das globale Klima für eine kurze Zeit einen Temperatursturz (ausgelöst durch das Auseinanderbrechen des Laurentidischen Eisschildes in Nordamerika und in der Folge eines

Abschwächens des Golfstroms), bekannt als Misoxschwankung (oder auch „8.2 ka event“). Die gemessenen Isotopen- und Elementdaten aus den Stalagmiten BB-1 und BB-3 wurden analysiert, um sie im Sinne von Klimaänderungen interpretieren zu können. So konnten bereits erste Interpretationen erfolgen, von denen wir hier auf zwei beispielhaft näher eingehen wollen.

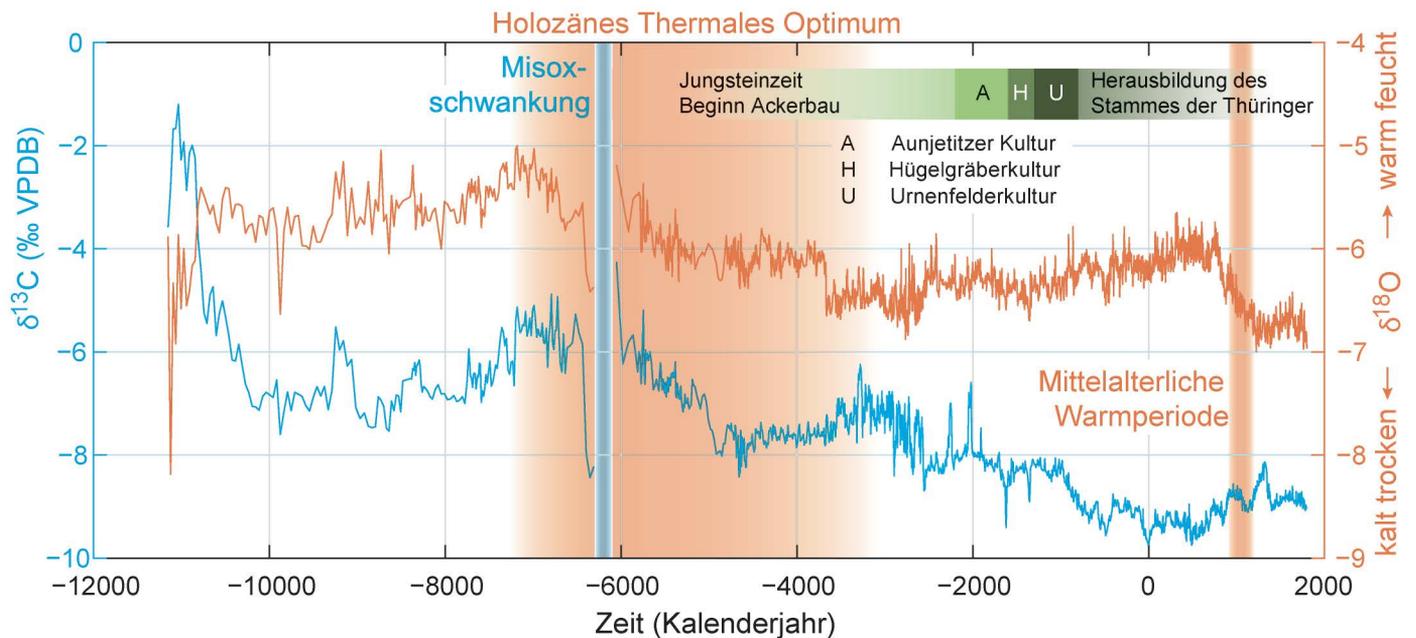


Abb. 100: Isotopenverhältnisse in Stalagmiten BB-1 und BB-3 (kombiniert). Die längerfristigen Trends spiegeln vermutlich eine Änderung des solaren Einflusses wider. Die kurzzeitige Klima-Abkühlung um 6200 v. Chr. ist deutlich in den Isotopenverhältnissen zu erkennen. Der abrupte Abfall der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte um 900 bis 1.200 AD fällt mit der mittelalterlichen Warmperiode zusammen

Manche Elemente stellen spannende Umweltindikatoren dar. Zum Beispiel verändert sich das Verhältnis von Strontium zu Calcit abhängig von der Niederschlagsmenge oberhalb der Höhle (siehe Abb. 99). Unter trockeneren Bedingungen wird zunehmend mehr Strontium in Stalagmiten eingebaut und während feuchter Phasen entsprechend weniger. Da es an der Bleißberghöhle besonders im Sommer an ausreichend Niederschlag fehlt, dient uns das Sr/Ca-Verhältnis als Sommerfeuchte-Indikator. Bis ins mittlere Holozäne Thermale Optimum (ca. 4.500 Jahre v. Chr.) wurden die Sommer demnach trockener. Anschließend stagnierte dieser Trend für etwa 2.000 Jahre, wurde danach aber durch stärkere Schwankungen ersetzt, die auf wiederholte Veränderungen der sommerlichen Niederschläge hindeuten.

Die zeitlichen Änderungen der Isotopenverhältnisse (siehe Abb. 100) wurden mit Paläoklimadaten aus der Bunkerhöhle in Nordrhein-Westfalen und aus Grönland verglichen [6]. Dieser Vergleich erlaubt eine Abschätzung der räumlichen Verteilung des Einflusses des maritimen, feuchten und warmen Atlantik-Klimas in Mitteleuropa. Die Bleißberghöhle befindet sich an der Grenze zwischen dem Einfluss des Atlantik-Klimas und dem kontinentalen, trockeneren und kälteren

Klima aus dem Osten (siehe Abb. 101). Der Wechsel zwischen stärkerer Ähnlichkeit und größeren Unterschieden im regionalen Klima an der Bleißberghöhle und der Bunkerhöhle kann genutzt werden, um festzustellen, wann die Klimazonengrenze östlich oder westlich von der Bleißberghöhle war, wann also das atlantische, feuchtere und wärmere Klima und wann das kältere und trockenere Kontinentalklima über der Bleißberghöhle vorherrschte. Diese Analyse konnte bis etwa 4.000 Jahre zurück durchgeführt werden (also etwa 2050 v. Chr.). Vor dieser Zeit können aufgrund fehlender Daten aus Grönland bislang keine Aussagen bezüglich der Lage der Klimazonengrenze getroffen werden, aber zumindest war um diese Zeit die Bleißberghöhle wohl im Einfluss des atlantischen Klimas. Um 1850 v. Chr. wechselte es dann zum kontinentalen Klima (in der späten Aunjetitzer Kultur, bekannt durch die Himmelscheibe von Nebra). Zwischen 950 bis 850 v. Chr. wurde der atlantische Einfluss wieder dominanter (gegen Ende der Urnenfelderkultur).

Diese Klimazonenverschiebungen deuten auf signifikante Änderungen im regionalen Klima. Aus der Literatur ist bekannt, dass sich Mitteleuropa während des Subboreal genannten Zeitabschnittes etwas abkühlte [12]. Zudem änderte sich die Niederschlagsverteilung

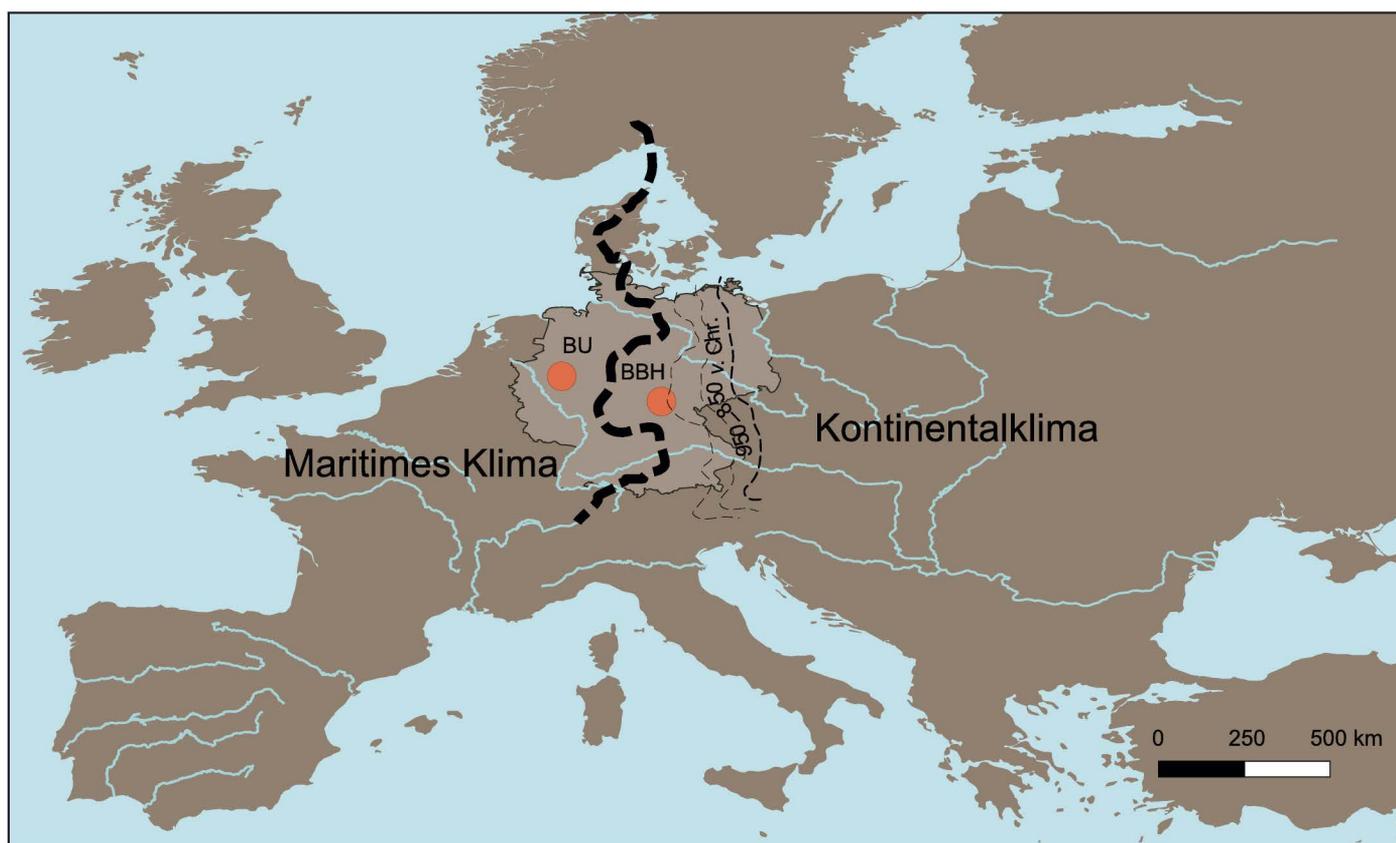


Abb. 101: Verlagerung der Klimazonengrenze (gestrichelt) nach Osten mit hypothetischem Verlauf (gepunktet) zur Zeit der Urnenfelderkultur (BU – Bunkerhöhle, BBH – Bleßberghöhle)

hin zu insgesamt höheren Jahreswerten [15]. Obwohl diese Entwicklung in den Messungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse nicht deutlich erkennbar ist (siehe Abb. 100), kann der Trend hin zu niedrigeren $\delta^{13}\text{C}$ -Werten als Indikator für stärkere Bewaldung interpretiert werden. Es ist dabei auch erkennbar, dass es sich um eine längerfristige Entwicklung handelte.

Um diese Veränderungen genauer zu verstehen und detailliert interpretieren zu können, werden die Umweltbeobachtungen (Monitoring) und geochemischen Untersuchungen in der Höhle weitergeführt und ausgeweitet. Die laufenden Untersuchungen lassen spannende Resultate erwarten, die eine geografische Lücke in der Paläoklimaforschung füllen werden.

