

Höhlen und Paläoklimaforschung

Paläoklimatologie – eine kurze Einleitung

Spätestens seitdem Begriffe wie Klimawandel und Global Change Eingang in das Vokabular von Politik und Medien gefunden haben ist allgemein klar geworden, dass es so etwas wie ein stationäres Klima nicht gibt. Klima, also der mittlere Zustand der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum ausgedrückt in Messgrößen wie Lufttemperatur, Niederschlagsmenge, Windrichtung, Strahlung, usf., ist Veränderungen unterworfen, die auf Zeitskalen von wenigen Jahren bis Millionen von Jahren passieren. Die Wissenschaft, die sich mit der Dynamik des Klimas beschäftigt, die Klimatologie, begann sich erst im Laufe des 20. Jahrhunderts aus der Meteorologie herauszuentwickeln. Die Jugendlichkeit dieser Forschung wird verständlich, wenn man sich vergegenwärtigt, dass es erst etwa seit 100 Jahren ein einigermaßen erdumspannendes Netz an Messstationen gibt. Ein solches ist Voraussetzung, will man die enorme Dynamik der Atmosphäre, die ja keine politischen Grenzen kennt, erfassen.

Für einzelne Gebiete reichen die Klima-Aufzeichnungen mittels Instrumenten etwas weiter zurück, für Österreich z.B. bis 1767 (Station Kremsmünster). Für den gesamten Zeitraum davor – und dieser umfasst den allergrößten Abschnitt der Erdgeschichte (eindrucksvolle 99,99999%, wenn man es ganz genau nimmt) – gibt es keine "exakten" Klimadaten, sprich solche, die mit physikalischen Instrumenten gemessen wurden: Wir haben das Feld der Paläoklimatologie betreten (vom Griechischen *palaios* für alt). Auch sie ist eine junge Zunft, wenngleich sich Geologen schon seit vielen Jahrzehnten mit dem wechselvollen Gang des Klimas während der 4,5 Milliarden Jahre langen Erdgeschichte beschäftigen. Naturgemäß ist der Mensch aber mehr an dem interessiert, was sich während der jüngsten Erdgeschichte getan hat, als an dem, was sich vor Hunderten Millionen Jahren ereignet haben mag. Das Gros der Paläoklimatologen erforscht deshalb den Gang des Klimas während des Quartärs (siehe Merkblatt C27), und ein Gutteil derselben beschäftigen sich vornehmlich mit dessen jüngerem Abschnitt, grob gesprochen den letzten paar Hunderttausenden von Jahren, welche die Eiszeiten und die aktuelle Warmzeit (seit 11.500 Jahren) umfassen. Nachdem Thermometer, Barometer und andere Messinstrumente damals nicht existierten stehen die Paläoklimatologen vor einer nicht-trivialen Aufgabe: Wie kann man das Klima und seine Änderungen vor Tausenden und Abertausenden von Jahren verlässlich rekonstruieren? Der allergrößte Teil der Information aus der Vorzeit ist ja unweigerlich verloren (da nicht aufgezeichnet) und jene fragmentarische Information, die sich findet, ist von Natur aus eine indirekte, d.h. sie gestattet meist nur qualitative Angaben zum damaligen Klima. Die Kür der Paläoklimaforschung besteht jedoch darin, im Idealfall quantitative, also in Zahlen ausgedrückte Klimainformation lange vergangener Zeiten zu erhalten. Die Arbeit der Wissenschaftler gleicht dabei der detektivischen Spurensuche von Kriminalisten, die sich in Ermangelung an Kronzeugen von Indiz zu Indiz vortasten, um eine möglichst wahrheitsgetreue Rekonstruktion des Geschehens zu erstellen, und wo fallweise auch hochentwickelte "Spurensuchgeräte" zum Einsatz kommen. Wenn der Paläoklimatologe z.B. die Temperatur des Atlantiks während des Höhepunkts der letzten Eiszeit zu rekonstruieren versucht (eine wichtige Größe, die das Klima in Europa ganz maßgeblich diktiert), so verwendet er u.a. die Häufigkeit und die Isotopenzusammensetzung (Isotope sind physikalisch unterschiedliche Varianten eines chemischen Elements) bestimmter Einzeller-Arten (Foraminiferen), deren winzige kalkige Gehäuse er aus den Ablagerungen am Grund des Atlantiks mittels Bohrkernen entnimmt. Diese Messwerte wären wertlos, bestünde nicht ein systematischer Zusammenhang zwischen der Häufigkeit und der Isotopen-Zusammensetzung dieser Einzeller und der Wassertemperatur, bei der diese Organismen lebten bzw. leben (bekannt aus Messungen des heutigen Ozeans). Man spricht im Fachjargon von "Proxy Daten" (*proxy* heisst wörtlich aus dem Englischen übersetzt soviel wie (Stell)Vertreter, gemeint: für Messdaten der Meteorologie, aber auch anderer Disziplinen, im gegenständlichen Fall der Ozeanographie). Auch die Ausdehnung und Masse eines Gletschers – um ein Beispiel aus den Alpen zu verwenden – stellen Proxy Daten dar; eine einfache Umrechnung z.B. von Gletscherrückzug in Grad Celsius Lufttemperaturänderung existiert allerdings nicht. Alte Moränenrücken oder Gletscherschliffe in heute eisfreien Tälern sind zwar unumstößliche Klimazeugen, lassen aber in erster Linie nur qualitative Aussagen über das damalige Klima zu.

Die Paläoklimatologie hat mittlerweile eine stattliche Liste solcher Proxies in ihrem Repertoire; dass dennoch den Forschern nicht so bald langweilig werden wird kann man spätestens dann feststellen wenn man z.B. eine Rekonstruktion der Temperatur in den Alpen seit dem Ende der letzten Eiszeit sucht oder genau wissen will, wie warm es im Mittelalter oder zu Ötzi's Zeiten in den Ostalpen war. Man wird zwar schematische "Fieberkurven" finden (z.B. in Merkblatt C27), aber kaum welche, die echte meteorologische Messgrößen zeigen. Abschnitte solcher Kurven für einzelne Gebiete der Erde und Zeitfenster des Quartärs existieren bereits in der Fachliteratur; die Lücken bzw. Unsicherheiten sind jedoch noch beträchtlich, und für manche Gebiete der Erde wird es aufgrund fehlender geeigneter Klima-Archive schlichtweg nicht möglich sein, solche Rekonstruktionen zu erstellen.

Höhlen und Paläoklima

Es ist noch nicht lange her, da war, wenn von Paläoklima-Forschung gesprochen wurde, nur die Rede von Baumringen, vom Eis Grönlands und der Antarktis und von Ablagerungen der Tiefsee. Höhlen wurden in diesem Zusammenhang kaum erwähnt. Diese genießen zwar seit jeher einen ausgezeichneten Ruf unter den Paläoanthropologen und Archäologen, stammen doch die allermeisten Funde früher Menschen aus Höhlen; allein, diese Fossilien sagen nur bedingt etwas über das damalige Klima aus. Deutlich aufschlussreicher – aus paläoklimatologischer Sicht – ist oft die Analyse der begleitenden pflanzlichen und tierischen Überreste, sowie der Höhlensedimente, in denen diese gefunden wurden. Besonders interessant sind fossile Pollen (Blütenstaub) und Sporen, die die Vegetation lang vergangener Zeiten rekonstruieren lassen, welche ihrerseits - Stichwort Proxy Daten - Rückschlüsse auf das damalige Klima zulassen können. Allerdings sind Pollen und Sporen in den meisten Höhlensedimenten rar. Zum einen ist die feuchte Höhlenluft gerade eingangsferner Bereiche sehr rein, d.h. arm an Partikeln. Zum anderen werden Sporen und Pollen, obwohl sie aus widerstandsfähiger organischer Substanz aufgebaut sind, im sauerstoffhaltigen Milieu langsam oxidiert (d.h. zerstört). Gute Chancen zur Erhaltung von Pollen und Sporen bieten nur dunkle, feinkörnige Sedimente, die z.B. bei Überflutungsereignissen in Höhlen zur Ablagerung gelangen. Auch Sedimente im eingangsnahen Bereich bzw. in Halbhöhlen weisen mitunter ein erhöhtes Erhaltungspotential für organische Überreste auf.

Neben mikroskopischen Überresten können auch größere, d.h. makroskopische Fossilien wichtige Informationen zum Paläoklima liefern. Voraussetzung ist, dass diese bei Höhlengrabungen horizontbezogen aufgesammelt werden, was bei früheren Grabungen aus verschiedenen Gründen leider oft nicht der Fall war. Bekanntes Beispiel sind die zahllosen Knochenfunde aus der Drachenhöhle bei Mixnitz (Stmk.), die im Zuge des Phosphatabbaues in den 1920er Jahren getätigt wurden, deren genaue Stratigraphie (d.h. Zuordnung zu bestimmten Schichten im Sediment) jedoch nicht oder nur sehr ungenau bekannt ist (Döppes & Rabeder, 1997). Auch die Bergung der Fossilien im Zuge der Freilegung der Griffener Grotte in den 1950er Jahren geschah unsystematisch; dennoch konnte aus der Analyse dieser Fauna Einiges zum (Eiszeit)Klima Unterkärntens abgeleitet werden (Gleirscher & Pacher, 2005).

Schließlich sind auch Höhlensedimente selbst Träger von Paläoklima-Informationen. Dazu zählen klastische Sedimente (Höhlenlehm bis Blöcke), chemische Sedimente (Höhlensinter) und – wenn man den Begriff Sediment weit fasst – auch Höhleneis. Klastische Sedimente in Höhlen erweisen sich meist als harte Nuss, zeichnen sie doch primär hochenergetische Ereignisse auf, die nur bedingt Aussagen zum Klima der Vorzeit gestatten. Auch muss damit gerechnet werden, dass Sedimentabfolgen in Höhlen große Lücken beinhalten können, in denen über lange Zeit keine Ablagerung erfolgte bzw. lokal Sediment auch wegerodiert wurde (Ablagerungslücke bzw. Hiatus). Aus diesen Gründen existiert auch weltweit nur eine begrenzte Anzahl an detaillierten Untersuchungen zur Sedimentologie von klastischen Höhlenablagerungen. Beispiele sind eine Studie über Höhlensedimente der Hermannshöhle (Seemann, 1987), Sedimente in Höhlen der Berchtesgadener Alpen (Langenscheidt, 1992), klastische Sedimente in Wechsellagerung mit Höhlensintern im Siebenhengste-Hohgant System in der Schweiz (Häuselmann, 2002), sowie eine Übersichtsarbeit über Sedimente in belgischen Höhlen (Quinif, 2006). Eine gute aktuelle internationale Zusammenschau findet sich im Buch von Sasowsky & Mylroie (2004 bzw. 2007). Im Übrigen sei auf die Merkblätter C30 (Höhleninhalt) bzw. C35 (Höhleneis) verwiesen.

Höhlsinter und Paläoklima

Im letzten Kapitel war davon die Rede, dass Höhlen in der Paläoklimaforschung früher kaum Beachtung gefunden haben. Nicht zuletzt angekurbelt durch die laufende Diskussion über Klimawandel bzw. Global Change haben sich Forscher auf die Suche nach weiteren Klima-Archiven gemacht und sind u.a. in Tropfsteinhöhlen fündig geworden. Der Schlüssel zum Durchbruch und zur weltweiten Anerkennung dieser Forschung liegt zum einen in der Möglichkeit, das Alter unterschiedlicher Schichten in Tropfsteinen genau zu bestimmen (siehe Merkblatt C34). Zum anderen konnte gezeigt werden, dass Tropfsteine sensibel auf Klimaänderungen außerhalb der Höhle reagieren, und, da sie bekanntermaßen über lange Zeiträume hinweg wachsen, gewissermaßen als unterirdische "tape recorders" fungieren.

Tropfsteine und Niederschlag

Die Erkenntnis, dass Tropfsteine Änderungen an der Erdoberfläche "spüren", ist nicht neu und ergibt sich aus der Karsthydrologie: Tropfwasser, für das Wachstum von Höhlensinter per se unabdingbar, stammt vom Niederschlag, der oberhalb der Höhle fällt (Regen, Schnee) und mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung, sowie angereichert an gelösten Stoffen, in der Höhle ankommt. Dieses Sickerwasser ist somit der direkte "Draht" zur Außenwelt bzw. dem Klima, das es zu erforschen gilt. Nimmt der Niederschlag längerfristig ab, so wird man auch in den Höhlen eine Verlangsamung der Tropftätigkeit feststellen. In diesem Fall bleibt der Tropfen länger an der Spitze des Stalaktiten bzw. des Sinterröhrchens hängen, entgast dort stärker, was in weiterer Folge dazu führt, dass weniger Kalzit am darunter befindlichen Stalagmiten zur Ablagerung kommt: Die Wachstumsgeschwindigkeit des Stalagmiten verlangsamt sich. Im Extremfall kommt es zu einem Wachstumsstopp, welcher sich durch eine Datierung der einzelnen Tropfsteinlagen nachweisen lässt bzw. oft auch als mehr oder weniger markante interne Grenzfläche im Sinter (in aufgeschnittenem Zustand) erkenntlich ist. Dass Tropfsteine sehr gute Paläoklima-Archive in Bezug auf Niederschlag sind zeigen aktuelle Untersuchungen in Trockengebieten. Sowohl in israelischen als auch in arabischen Höhlen setzte das Tropfsteinwachstum immer dann ein, wenn das Klima feuchter wurde (z.B. Fleitmann et al., 2007; Vaks et al., 2006; heute sind die allermeisten Höhlen in diesen Gebieten trocken und das Tropfsteinwachstum steht still). Spannende Daten kommen seit einigen Jahren auch aus chinesischen Höhlen; die dortigen Stalagmiten haben sich als Kronzeugen des Monsuns herausgestellt. Ganze Kulturen sind in der Vergangenheit in diesem Land ausgelöscht worden, als die Monsunregen über längere Zeit aussetzten. Aufgezeichnet sind diese Klimaschwankungen in Tropfsteinen (z.B. Wang et al., 2005).

Tropfsteine und Temperatur

Neben dem Niederschlag ist die Temperatur ein wichtiger Parameter, der das Tropfsteinwachstum steuert und indirekt auch in den Tropfsteinen aufgezeichnet wird. Aufgrund des Gefrierpunktes von Wasser ergibt sich, dass Tropfsteine nur bei positiven Temperaturen entstehen können. Da Höhlen annähernd die gleiche Temperatur aufweisen wie das langfristige Mittel der Lufttemperatur in der entsprechenden Höhlenlage ist sowohl in hohen Breiten, als auch in Seehöhen ab ca. 2000-2500 m (in unseren Breiten) keine Sinterbildung zu erwarten. Tropfsteinhöhlen, die heute knapp an dieser natürlichen Grenze liegen, sind deshalb hochsensible Klima-Archive, denn bereits eine geringe Klimaverschlechterung kühlt die Höhle unter den Gefrierpunkt ab und stoppt das Sinterwachstum. Durch Proben aus solchen kalten Höhlen kann man eine lange Aufzeichnung früherer Warmzeiten erhalten, denn nur während dieser sprang die Verkarstung und damit die Sinterausscheidung an.

Neben diesem "Ein/Aus Schalter" gibt es mittlerweile auch Methoden, um direkt Paläotemperaturen aus einzelnen Tropfsteinlagen zu bestimmen (Näheres dazu z.B. in Spötl et al., 2007).

Erwähnt werden sollte noch, dass die Klima-Parameter Temperatur und Niederschlag ihrerseits auch die Vegetation und damit die Intensität der Verkarstung steuern. Verkarstung ist ja eine Folge des Eintrages von Kohlendioxid bzw. Kohlensäure in das Grundwasser und der Ursprung dieser Säure ist in den

allermeisten Fällen Kohlendioxid, das im Boden durch Wurzelatmung und bakteriellen Abbau organischer Substanz entsteht. Eine Zunahme des Niederschlages wird also einerseits die Tropftätigkeit in der Höhle erhöhen, andererseits auch eine dichtere Vegetation und eine höhere Bodenaktivität fördern, was ihrerseits die Verkarstung ankurbeln und so zu einem schnelleren Wachstum von Stalagmiten und anderen Sinterformen führt.

Tropfsteine und Meeresspiegel

Dass neben dem Klima auch die (absolute) Höhe des Meeresniveaus keine Konstante darstellt ist seit Beginn der Klima Diskussion allgemein bekannt. Die Höhe des Meeresspiegels ist zwar keine eigentliche Klima-Messgröße; sie gibt aber wesentliche Aufschlüsse über die Menge des am Festland in Form von Eisschilden und Gebirgsgletschern gespeicherten Eises. Schmilzt letzteres, dann steigt der Meeresspiegel und flach liegende Küstenbereiche werden überflutet. Im Quartär stieg und fiel der Meeresspiegel dutzende Mal im Rhythmus der Eiszeiten und Tropfsteine haben sich als verlässliches Instrument herausgestellt, diesen Gang nachzuzeichnen. Untersuchungsobjekte sind Höhlen in Küstengebieten des Mittelmeerraumes und der Karibik. Das Prinzip ist einfach: Fällt der Meeresspiegel am Beginn einer Eiszeit, so werden ehemals geflutete Höhlenräume luffüllt, mit dem Niederschlag setzt Verkarstung ein und Tropfsteine beginnen zu wachsen. Am Ende einer Eiszeit schmelzen große Mengen an festländischem Eis ab, der Meeresspiegel steigt (im Maximum bis zu 130 m), die Küstenlinie verschiebt sich landeinwärts und tiefer gelegene Höhlensysteme werden unter Wasser gesetzt. Tropfsteine können im Meerwasser nicht "gedeihen"; sie werden aber auch nicht aufgelöst. Oftmals kann man den Bewuchs von kalkabscheidenden Organismen (z.B. Würmern) auf Unterwasser-Tropfsteinen beobachten. Aus den Untersuchungen solcher Tropfsteine z.B. aus den bekannten *Blue Holes* auf den Bahamas konnte man die Chronologie früherer (eiszeitlicher) Meeresspiegel-Tiefstände präzise erfassen.

Literatur:

Döppes, D. & Rabeder, G. (1997): Pliozäne und pleistozäne Faunen Österreichs. – Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Bd. 10, 411 S.

Gleirscher, P. & Pacher, M. (2005): Griffen und die Altsteinzeit im Südostalpenraum. - *Rudolfinum Jahrbuch des Landesmuseums Kärnten*, 2004: 65-107.

Häuselmann, P. (2002): Cave genesis and its relationship to surface processes: investigations in the Siebenhengste region (BE, Switzerland). - *Höhlenforschung im Gebiet Sieben Hengste-Hohgant* No. 6, 166 S.

Langenscheidt, E. (1992): Höhlen und ihre Sedimente in den Berchtesgadener Alpen. - *Nationalpark Berchtesgaden Forschungsbericht*, 10, 95 S.

Sasowsky, I.D. & Mylroie, J. (2004): *Studies of Cave Sediments. Physical and Chemical Records of Paleoclimate*.- 329 S. New York (Kluwer; Nachdruck Springer 2007).

Seemann, R. (1997): Sediment- und Mineralinhalt der Hermannshöhle. - In: *Die Hermannshöhle in Niederösterreich* (Red. Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H.), *Wissenschaftliche Beihefte Die Höhle*, 50: 107-132.

Spötl, C., Offenbecher, K.-H., Boch, R., Meyer, M., Mangini, A., Kramers, J. & Pavuza, R. (2007): Tropfstein-Forschung in österreichischen Höhlen – ein Überblick. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 147: 117-167. Download unter www.geologie.ac.at/ (unter Geomarkt – Publikationen – Jahrbuch).

Bemerkung: Die übrige, in diesem Merkblatt zitierte Fachliteratur ist leider nur über Universitäten bzw. kostenpflichtig über Fachverlage erhältlich. Interessierte HöhlenforscherInnen können sich jedoch an den Autor wenden (christoph.spoetl@uibk.ac.at).