

Wachstumsphasen von Stalagmiten im Katerloch (2833/59)

ZUSAMMENFASSUNG

Der Artikel gibt einen Überblick der durch Stalagmiten belegten Zeitabschnitte im Katerloch, einer der bekanntesten und tropfsteinreichsten Höhlen Österreichs, sowie einen Vergleich mit Altersdaten von zwei anderen Höhlen im Grazer Bergland, dem Blasloch (2836/229) und dem Mooschacht (2836/237). Entlang der Wachstumsachse von acht Stalagmiten aus dem Katerloch wurden jeweils mehrere Proben entnommen und mittels der radiometrischen Uran-Thorium-Methode deren Alter bestimmt. Es wurden insgesamt 83 Einzeldatierungen durchgeführt; der hier präsentierte Datensatz ist somit einer der umfangreichsten einer Höhle im gesamten Alpenraum. Vier Stalagmiten (K1, K3, K7, K8) und ein Teil von Stalagmit K5 fallen zeitlich in die gegenwärtige Warmzeit (das Holozän). K8 begann 2,4 kyr vor heute (1 kyr = 1000 Jahre), also in der Eisenzeit, zu wachsen. Drei Stalagmiten (K1, K3, K7) entstanden zwischen 11 und 10 kyr, d.h. im frühen Holozän, und der längste von ihnen (K7, 170 cm) beendete sein Wachstum bereits 6,5 kyr vor heute. Die mittlere Wachstumsgeschwindigkeit dieser Proben liegt bei 0,2 bis 0,7 mm/yr, ist also sehr hoch im Vergleich zu typischen Stalagmiten alpiner Höhlen. Die Stalagmiten K5 und K6 wuchsen während der letzten Eiszeit (Würm-Glazial) ab ca. 59 bzw. 60 kyr und beendeten ihr Wachstum einige Tausend Jahre später. Die Wachstumsraten sind mit 0,1 bis 0,2 mm/yr deutlich niedriger. Die beiden ältesten der acht Stalagmiten (K2 und K4) bildeten sich ab ca. 129 kyr vor heute, also während des letzten Interglazials. In dieser Warmzeit waren die mittleren Wachstumsraten mit 0,5 bis 0,6 mm/yr ähnlich hoch wie im Holozän. Durch Bohrkerne von großen in-situ-Stalagmiten im Katerloch sind zudem Stalagmitenalter von über einer halben Million Jahre belegt (Boch et al., 2006a).

ABSTRACT

Growth phases of stalagmites from Katerloch (2833/59)

This article gives an overview on the time intervals in the past documented by absolutely dated stalagmites from Katerloch Cave, one of Austria's most well known and highly decorated dripstone caves. The dating results are compared with those of two other caves in the region, Blasloch and Mooschacht. Multiple subsamples obtained along the growth axes of eight stalagmites from Katerloch were analyzed by a state-of-the-art Uranium-Thorium dating technique. In total, 83 individual measurements were conducted, and this data set is currently one of the most comprehensive ones of caves in the Alpine realm.

Four stalagmites (K1, K3, K7, K8) and a segment of stalagmite K5 formed during the current warm period (Holocene). K8 started its growth 2.4 kyr before present (1 kyr = 1000 years), i.e. during the Iron Age. Three stalagmites (K1, K3, K7) formed between 11 and 10 kyr, i.e. during the early Holocene, and the largest stalagmite (K7, 170 cm) stopped growing already 6.5 kyr before present. The average growth rate of these samples ranges from 0.2 to 0.7 mm/yr, which is very high compared to typical stalagmites from alpine cave sites. Stalagmites K5 and K6 grew for a few thousand years after ca. 59 and 60 kyr, respectively, i.e. during the last ice age (Würmian Glacial). The mean growth rates are significantly lower (0.1-0.2 mm/yr). The two oldest of the eight stalagmites studied (K2 and K4) formed since ca. 129 kyr, i.e. during the early Last Interglacial. The mean growth rates (0.5-0.6 mm/yr) were similar to those in the Holocene. In addition, dating of drill cores from large, in-situ stalagmites in Katerloch revealed ages of more than half a million years (Boch et al., 2006a).

Ronny Boch, Christoph Spötl

Institut für Geologie und Paläontologie
Leopold-Franzens-Universität Innsbruck
Innrain 52, 6020 Innsbruck
ronny.boch@uibk.ac.at
christoph.spoetl@uibk.ac.at

Jan Kramers

Institut für Geologie
Universität Bern
Baltzerstrasse 1-3, CH-3012 Bern

eingelangt: 17.12.2009
angenommen: 27.1.2010

EINLEITUNG

Sinterbildungen zählen mit zum Interessantesten, was Höhlen zu bieten haben; das trifft für den Besucher von Schauhöhlen in gleichem Maße zu wie für den Wissenschaftler. Wie schnell wachsen Tropfsteine? Warum hörte ein bestimmter Stalagmit zu wachsen auf? Wieso sind manche Tropfsteine zylindrisch, andere konisch? Warum sind manche Höhlen überhaupt ohne Sinterschmuck? Viele dieser Fragen können mittlerweile schlüssig beantwortet werden, denn die Forschung an Tropfsteinen hat in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht. Und man kann davon ausgehen, dass die Beschäftigung mit Sinterbildungen (auch Speläotheme genannt) in den kommenden Jahren noch weiter an Bedeutung gewinnen wird. Der primäre Grund dafür ist die Erkenntnis, dass diese ein bislang wenig beachtetes „Archiv“ vergangener Umweltänderungen darstellen. Bei der weltweiten Sorge um möglicherweise irreversible, anthropogen verursachte Klimaänderungen kommt solchen Informationsquellen der Klimageschichte große Bedeutung zu.

Mit Ausnahme der Polargebiete (kaum Speläotheme bekannt) laufen derzeit weltweit entsprechende Forschungsprogramme – so auch in einheimischen Karstgebieten. Die Ergebnisse dieser Forschungen werden in kompakter Form nach Durchlaufen eines Begutachtungsprozesses in internationalen, englischsprachigen Fachzeitschriften publiziert. Diese in den

Naturwissenschaften übliche Praxis bedeutet aber für den Höhlenforscher, dass dieser von den Ergebnissen meist nichts erfährt bzw. keinen Zugang zu den Fachzeitschriften hat, und bei der allfälligen Lektüre nur in manchen Fällen die Fachsprache bewältigt. Einen Versuch, das Wissen um Tropfsteine für ein breiteres Publikum zusammenzufassen, haben die Verfasser vor ein paar Jahren unternommen (Spötl et al., 2007a). Eine populärwissenschaftliche Einführung in die Bedeutung von Tropfsteinen für die moderne Paläoklima-Forschung findet sich in Spötl (2008).

In diesem Artikel werden im Sinne des oben Gesagten neue Ergebnisse aus einer bekannten steirischen Tropfsteinhöhle, dem Katerloch bei Weiz (2833/59), einer speläologisch interessierten Leserschaft näher gebracht. Die Ergebnisse wurden nebst anderen im Rahmen einer geologischen Dissertation (Boch, 2008) erhoben. Ziel dieser Studie war es, die Prozesse der Tropfsteinbildung im Katerloch zu verstehen, um beispielsweise Fragen der jahreszeitlichen Zyklizität zu beantworten, und dieses Wissen dann auf Fragestellungen der Paläoklima-Forschung anzuwenden. Es wurden dabei umfangreiche Altersbestimmungen an Stalagmiten durchgeführt, welche interessante Einblicke in die zeitliche Verteilung der Sinterbildung während der jüngsten geologischen Vergangenheit gewähren. Von letzterem handelt der vorliegende Artikel.

DAS KATERLOCH

Diese Höhle nahe Weiz wurde nicht von ungefähr für eine genauere Untersuchung ausgewählt. Sie zählt zu den tropfsteinreichsten Höhlen in Österreich, ist ganzjährig einfach zugänglich und ihr Besitzer, Fritz Geissler, ist an der weiteren Erforschung der Höhle interessiert. Die Höhle selbst folgt der generellen sedimentären und strukturellen Lagerung des gut verkarstungsfähigen Schöckelkalkes (metamorph überprägt) und erstreckt sich vom imposanten Eingangsportaal auf 900 m Seehöhe bis auf derzeit –135 m Vertikaldistanz. Horizontalsysteme wie in anderen großen Höhlen des Grazer Berglandes sind nicht bekannt, sieht man von der rund 200 m tiefer gelegenen Grasslhöhle (2833/60) ab, zu der jedoch keine Verbindung besteht. Dies spricht für ein hohes Alter des Katerlochs, sind doch Sedimente in deutlich tiefer gelegenen Höhlensystemen des Grazer Berglandes (z.B. Drachenhöhle, 2839/1, oder Lurgrotte, 2836/1) teils einige Millionen Jahre alt (laufende

Dissertation von T. Wagner, Karl-Franzens-Universität Graz). Bereits in der Vorhalle des Katerlochs bekommt man beim Betrachten der gewaltigen, äußerlich teilweise stark angewitterten Tropfsteinriesen einen nachhaltigen Eindruck von der weit zurückreichenden Geschichte dieser Höhlenteile. Untersuchungen an deutlich kleineren Stalagmiten des Katerlochs, wie auch der Grasslhöhle, haben gezeigt, dass in der Tat zumindest einige der Tropfsteingebilde nachweislich mehr als eine halbe Million Jahre alt sind (Boch et al., 2006a, b). Die Pilotstudie im Katerloch zeigte ferner, dass es Stalagmiten gibt, die wesentlich später gewachsen sind und dies mit erstaunlich hoher Geschwindigkeit (Boch et al., 2006a). Auch wenn es an etlichen Stellen heute noch tropft und einige Tropfsteine noch wachsen: Der Großteil der vielen hundert Tropfsteine im Katerloch wird gegenwärtig nicht mit Tropfwasser versorgt, wächst also nicht.

UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Die Beprobung von in-situ-Stalagmiten ist mittels Kernbohrung im basalen Teil gut möglich; Bohrungen in höheren Abschnitten wären gerade für die schlanken Kerzenstalagmiten des Katerlochs aus statischen Gründen nicht zu verantworten. Um genaue Einblicke in die Wachstumsdynamik der Stalagmiten zu bekommen, wurden daher im Rahmen der Studien ganze Stalagmiten beprobt, wobei bis auf zwei Ausnahmen auf Bruchstücke zurückgegriffen wurde, die ähnlich einem Puzzle zusammengefügt werden mussten. Es war nicht immer möglich, den kompletten Stalagmiten, vor allem inklusive Stalagmitenspitze, zu rekonstruieren; in allen Fällen war es aber möglich, zusammenhängende Segmente von Stalagmiten zu analysieren, ohne den Charakter der Höhle zu beeinträchtigen. Ein großer, vollständiger Stalagmit (Probe K7) wurde den Verfassern vom Landesverein für Höhlenkunde in Wien und Niederösterreich übergeben; er wurde in den Entdeckerjahren tropfstein-

reicher Teile des Katerlochs etwas nach 1950 in der *Fantasiehalle* aufgefunden (pers. Mitt. E. Solar, 2006) und als Exponat im Wiener Vereinslokal ausgestellt. Die Stalagmiten wurden der Länge nach mittels Diamantsäge aufgeschnitten, die weiterführenden Untersuchungen wurden an einer etwa 1 cm dicken Scheibe des Axialabschnittes durchgeführt. Nur dort sind die Wachstumslagen annähernd horizontal und ist eine Detailbeprobung zu empfehlen, während die Lagen an den Flanken des Stalagmiten abbiegen und ausdünnen. Entlang der Wachstumsachse wurden bei jedem Stalagmiten mehrere 0,5 bis 1 g wiegende Proben entnommen, an denen das Alter der jeweiligen Wachstumslage bestimmt wurde. Dabei kam die präzise massenspektrometrische Uran-Thorium (U-Th) Methode zum Einsatz (MC-ICP-MS), durchgeführt am Institut für Geologie der Universität Bern. Die Alterswerte werden in der Einheit „kyr“ vor heute angegeben: 1 kyr = 1000 Jahre.

RESULTATE

Acht Stalagmiten wurden auf diese Weise analysiert (Tabelle 1), wobei die sehr niederen Uran-Gehalte von durchschnittlich 58 ppb (1 ppb ist ein Teil in einer Milliarde bzw. ein Millionstel Promille) eine Herausforderung betreffend die Datierung darstellten und die Alterswerte folglich einen etwas größeren analytischen Fehler aufweisen als bei Uran-reicheren Proben, z.B. aus Höhlen im Schrattenkalk oder in zentralalpiner Marmoren. Die angegebenen Fehler betragen etwa 1,5 % des Messwerts bei Proben aus dem letzten Interglazial und Glazial (z.B. ± 880 yr bei einer 60 kyr alten Probe) und steigen im späten Holozän (auf Grund des geringen Gehaltes an radiogen gebildetem ^{230}Th) auf einige Prozent an.

Die acht Stalagmiten fallen in den mittels U-Th-Methodik datierbaren Altersbereich (d.h. jünger als ca. 500 kyr) und geben so Einblicke in die jüngeren Sintergenerationen dieser Höhle. Die einzelnen Altersbestimmungen sind innerhalb deren Messfehler in den jeweiligen Stalagmiten stratigraphisch konsistent, d.h. älter in den tieferen und jünger in höheren Wachstumslagen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung und spricht klar dafür, dass die untersuchten Stalagmiten seit ihrer Bildung keine wesentliche geochemische Veränderung erfahren haben und die Alterswerte daher vertrauenswürdig sind.

Die beiden ältesten Stalagmiten (K2 und K4) wuchsen überlappend ein paar Tausend Jahre lang ab ca. 129 kyr

vor heute (Abb. 1). Die analysierten 57 cm von K2 repräsentieren nur den obersten Teil des Stalagmiten; der untere Teil befindet sich noch in der Höhle. Es ist somit nur das Ende des Wachstums von K2 definiert (ca. 125 kyr), während das Basisalter (ca. 128 kyr) noch nicht den tatsächlichen Wachstumsbeginn darstellt. Bei K4 fehlt die Stalagmitenspitze (das Top), der analysierte Abschnitt ist etwa zwischen 129 und 127 kyr gewachsen.

Zwei andere Stalagmiten (K5 und K6) entstanden – ebenfalls zeitlich etwas überlappend – ab ca. 59 bzw. 60 kyr und beendeten ihr Wachstum einige Tausend Jahre später (Abb. 2). Ein Alter von 53 kyr ist im Falle von Stalagmit K6 sein tatsächliches Wachstumsende (hier ist die Spitze erhalten). Im Falle des anderen Tropfsteins (K5) haben die Altersbestimmungen ein unerwartetes Ergebnis erbracht: Er wuchs zuerst zwischen 59 und 54 kyr, während das obere Drittel wesentlich jünger ist – zwischen 14,3 und 10,5 kyr vor heute. Das Interessante hierbei: Die Grenze der beiden Abschnitte ist scharf und unregelmäßig, d.h. irgendwann zwischen 54 und 14 kyr muss der ursprünglich obere Teil dieses Stalagmiten abgebrochen sein, ohne dass der untere Teil des Stalagmiten umgefallen ist. Ab etwa 14 kyr vor heute setzte das Tropfsteinwachstum auf dieser Bruchstelle fort. Äußerlich betrachtet kann man diese Fraktur und die damit verbundene Zeitlücke (Hiatus) fast nicht erkennen.

Vier Stalagmiten (K1, K3, K7 und K8) und ein Teil von K5 fallen zeitlich in die Nacheiszeit (das Holozän); drei davon zeigen basale Alter zwischen 11 und 10 kyr (vgl. Abb. 1 und 2), sowie Top-Alter zwischen 8 und 6,5 kyr, wobei jedoch in zwei Fällen (K1 und K3) die Stalagmitenspitze fehlt. Ein in-situ entnommener Stalagmit (K8; Abb. 2) ist wesentlich jünger: Sein Wachstum be-

gann vor 2,4 kyr (Eisenzeit) und dauerte bis etwa 600 yr vor heute an (Spätmittelalter/Renaissance). Dann folgte eine Wachstumsunterbrechung, welche auch im polierten Querschnitt erkennbar ist, die obersten 7 mm dürften die paar letzten Jahre bzw. Jahrzehnte vor heute sein, denn bei seiner Entnahme war er nachweislich aktiv.

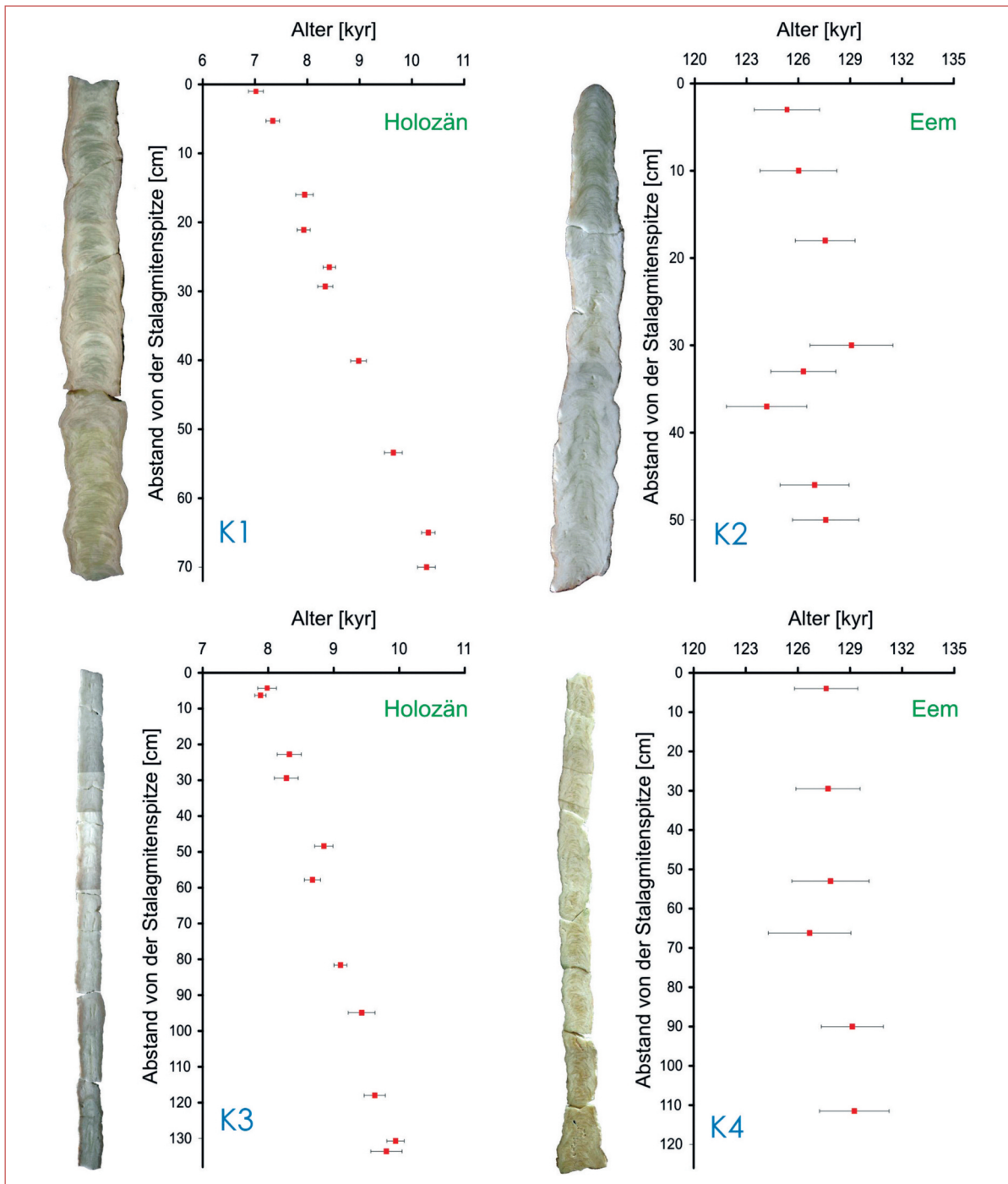


Abb. 1: Grafische Darstellung der Altersstruktur der Stalagmiten K1 bis K4, sowie deren Aussehen im polierten Querschnitt. Die dünnen horizontalen Balken geben den analytischen Unsicherheitsbereich (2 sigma) der U-Th-Altersdatierungen an. Zu beachten ist, dass die Länge der vertikalen Achse der einzelnen Stalagmiten variiert.

Tabelle 1: 83 U-Th Altersdatierungen, durchgeführt an acht Stalagmiten des Katerlochs.

Probe	Tiefe vom Top [mm]	U [ppb] [$\pm 1\sigma$]		$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ initial [Aktivität] [$\pm 2\sigma$]		$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ [Aktivität] [$\pm 2\sigma$]		$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ [Aktivität] [$\pm 1\sigma$]		$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ [Aktivität] [$\pm 1\sigma$]		Alter [kyr] [$\pm 2\sigma$]	
K1-1.0	10	47,3	0,1	1,583	0,002	1,568	0,001	5,8	0,0	0,0782	0,0006	7,02	0,14
K1-5.3	53	49,0	0,1	1,563	0,003	1,551	0,001	17,7	0,2	0,0698	0,0006	7,34	0,13
K1-16.0	160	45,2	0,1	1,546	0,003	1,533	0,001	48,2	0,5	0,0722	0,0007	7,95	0,17
K1-21.0	211	47,6	0,1	1,529	0,002	1,517	0,001	20,5	0,2	0,0745	0,0005	7,93	0,13
K1-26.5	265	51,3	0,1	1,563	0,002	1,549	0,001	44,9	0,3	0,0765	0,0005	8,42	0,12
K1-29.0	293	44,6	0,1	1,564	0,002	1,550	0,001	21,8	0,2	0,0780	0,0006	8,34	0,14
K1-40.0	401	53,5	0,1	1,533	0,002	1,519	0,001	42,8	0,4	0,0814	0,0006	8,98	0,15
K1-53.0	534	49,6	0,1	1,533	0,002	1,519	0,001	115,0	1,0	0,0857	0,0007	9,64	0,17
K1-64.5	650	54,8	0,1	1,505	0,003	1,490	0,001	100,1	0,7	0,0916	0,0005	10,31	0,13
K1-70.0	700	63,3	0,1	1,528	0,003	1,513	0,001	118,7	1,0	0,0911	0,0007	10,28	0,17
K2-3.0	30	64,6	0,1	1,529	0,004	1,371	0,001	652,6	5,0	0,7126	0,0030	125,3	1,9
K2-10.0	100	59,6	0,1	1,522	0,005	1,365	0,001	991,6	8,2	0,7143	0,0035	126,0	2,2
K2-18.0	180	64,0	0,1	1,516	0,004	1,360	0,001	484,2	2,3	0,7193	0,0028	127,6	1,7
K2-30.0	300	69,3	0,1	1,514	0,004	1,357	0,001	895,8	6,4	0,7236	0,0037	129,1	2,4
K2-33.0	330	69,4	0,1	1,503	0,003	1,352	0,001	586,3	2,9	0,7148	0,0031	126,3	1,9
K2-37.0	370	64,1	0,1	1,533	0,004	1,375	0,001	896,4	5,4	0,7091	0,0038	124,2	2,3
K2-46.0	460	70,1	0,1	1,508	0,004	1,355	0,001	892,0	4,0	0,7167	0,0032	126,9	1,0
K2-50.0	500	67,1	0,1	1,496	0,004	1,346	0,001	1099,3	5,8	0,7182	0,0030	127,6	1,9
K3-4.0	43	50,6	0,1	1,441	0,002	1,430	0,001	30,4	0,3	0,0733	0,0006	7,98	0,14
K3-6.0	63	50,9	0,1	1,437	0,002	1,427	0,001	119,2	0,7	0,0705	0,0003	7,88	0,09
K3-23.0	228	47,9	0,1	1,451	0,002	1,441	0,001	48,2	0,5	0,0753	0,0007	8,32	0,18
K3-29.8	294	44,2	0,1	1,475	0,003	1,463	0,001	61,3	0,3	0,1669	0,0008	8,28	0,18
K3-48.5	484	52,3	0,1	1,446	0,002	1,434	0,001	29,3	0,2	0,0811	0,0006	8,85	0,14
K3-58.0	578	60,1	0,1	1,459	0,001	1,448	0,001	55,0	0,4	0,0782	0,0005	8,68	0,12
K3-82.0	816	74,9	0,1	1,440	0,002	1,429	0,001	74,5	0,4	0,0814	0,0004	9,10	0,10
K3-95.0	949	47,3	0,1	1,439	0,002	1,427	0,001	67,1	0,7	0,0843	0,0008	9,43	0,20
K3-118.0	1180	51,6	0,1	1,447	0,002	1,435	0,001	85,4	0,7	0,0858	0,0007	9,62	0,16
K3-130.7	1307	47,6	0,1	1,433	0,003	1,420	0,002	74,7	0,5	0,0886	0,0006	9,94	0,13
K3-133.0	1336	43,5	0,1	1,431	0,004	1,419	0,002	68,1	0,8	0,0876	0,0010	9,80	0,24
K4-4.0	40	76,3	0,1	1,321	0,002	1,224	0,001	836,9	3,9	0,7100	0,0028	127,6	1,8
K4-30.0	295	80,7	0,1	1,326	0,002	1,227	0,001	688,9	3,3	0,7105	0,0028	127,7	1,8
K4-53.0	530	102,1	0,1	1,312	0,002	1,217	0,001	759,9	4,6	0,7103	0,0034	127,9	2,2
K4-67.0	662	109,8	0,1	1,294	0,003	1,206	0,001	1094,9	7,2	0,7058	0,0037	126,7	2,4
K4-90.0	900	138,2	0,2	1,285	0,002	1,198	0,001	456,1	2,1	0,7128	0,0026	129,1	1,8
K4-112.0	1115	120,9	0,2	1,282	0,002	1,196	0,001	744,5	3,8	0,7129	0,0030	129,2	2,0
K5-0.8	8	103,9	0,1	1,449	0,003	1,435	0,001	61,7	0,7	0,0941	0,0010	10,54	0,24
K5-2.0	32	54,1	0,1	1,445	0,002	1,431	0,001	37,7	0,3	0,0966	0,0008	10,72	0,19
K5-4.3	43	54,6	0,1	1,466	0,004	1,451	0,002	24,2	0,2	0,1007	0,0008	11,01	0,19
K5-8.4	84	40,9	0,1	1,480	0,003	1,465	0,001	51,7	0,4	0,0983	0,0008	11,01	0,20
K5-12.4	124	45,4	0,1	1,421	0,003	1,407	0,001	102,5	0,9	0,0995	0,0008	11,27	0,20
K5-15.1	154	57,4	0,1	1,443	0,003	1,428	0,001	165,8	1,7	0,1059	0,0010	12,09	0,25
K5-18.1	185	102,3	0,1	1,359	0,002	1,346	0,001	268,3	2,1	0,1169	0,0007	13,45	0,17
K5-19.8	200	125,6	0,2	1,320	0,002	1,307	0,001	592,9	3,8	0,1237	0,0005	14,32	0,14
K5-24.4	244	43,0	0,1	1,608	0,005	1,521	0,002	455,4	3,4	0,4023	0,0028	54,30	0,92
K5-28.6	289	39,6	0,1	1,537	0,003	1,449	0,001	418,2	1,0	0,4496	0,0015	54,14	0,91
K5-29.4	294	40,9	0,1	1,561	0,004	1,480	0,002	454,9	2,8	0,4050	0,0021	54,85	0,77
K5-31.5	317	37,1	0,1	1,703	0,004	1,598	0,002	342,3	2,1	0,4201	0,0023	57,12	0,81
K5-33.0	335	46,6	0,1	1,742	0,003	1,630	0,001	447,0	2,9	0,4231	0,0026	57,61	0,90
K5-34.6	346	36,8	0,1	1,720	0,005	1,611	0,002	602,2	3,9	0,4245	0,0024	57,92	0,86
K5-40.2	403	44,9	0,1	1,639	0,007	1,543	0,003	530,0	4,4	0,4203	0,0032	57,33	1,12
K5-48.4	484	40,6	0,1	1,612	0,004	1,518	0,002	685,4	4,5	0,4307	0,0025	59,24	0,91
K5-52.1	521	48,5	0,1	1,556	0,005	1,472	0,002	404,9	4,0	0,4238	0,0028	58,11	0,99
K5-55.0	561	62,4	0,1	1,571	0,003	1,483	0,001	481,7	2,6	0,4285	0,0020	58,92	0,73
K6-1.0	10	53,8	0,1	1,654	0,004	1,562	0,002	389,7	2,7	0,3978	0,0020	53,41	0,68
K6-10.0	100	64,6	0,1	1,602	0,004	1,516	0,002	53627,1	293,3	0,4021	0,0021	54,28	0,70
K6-11.5	115	40,1	0,1	1,585	0,006	1,502	0,002	714,1	7,5	0,4002	0,0025	54,01	0,83
K6-18.0	180	51,8	0,1	1,571	0,004	1,490	0,002	411,3	2,5	0,4013	0,0022	54,16	0,77
K6-23.8	238	54,2	0,1	1,575	0,006	1,490	0,002	414,3	2,7	0,4140	0,0024	54,01	0,83
K6-27.1	271	71,8	0,1	1,577	0,003	1,492	0,001	321,3	2,0	0,4120	0,0024	55,96	0,85
K6-43.5	435	58,8	0,1	1,584	0,004	1,495	0,001	839,9	5,2	0,4251	0,0024	58,34	0,83
K6-44.6	446	70,7	0,1	1,572	0,005	1,483	0,002	236,9	1,8	0,4311	0,0030	59,24	1,02
K6-45.3	453	60,0	0,1	1,587	0,007	1,497	0,003	624,9	4,1	0,4279	0,0025	58,80	0,90
K6-46.5	465	85,8	0,1	1,607	0,003	1,512	0,001	2113,5	14,4	0,4355	0,0024	60,17	0,88
K6-46.6	466	50,8	0,1	1,613	0,006	1,518	0,002	446,8	3,4	0,4296	0,0029	59,00	0,99
K7-2.3	23	49,0	0,1	1,834	0,008	1,817	0,004	28,2	0,4	0,0633	0,0008	6,75	0,19
K7-13.8	138	48,0	0,1	1,880	0,006	1,861	0,003	62,6	0,8	0,0684	0,0008	7,52	0,19
K7-26.9	269	47,9	0,1	1,972	0,006	1,951	0,003	90,3	0,0	0,0688	0,0007	7,62	0,17
K7-39.1	391	41,8	0,1	1,969	0,005	1,947	0,003	103,8	0,0	0,0729	0,0007	8,09	0,16
K7-49.4	494	47,7	0,1	1,929	0,007	1,908	0,004	121,4	1,4	0,0732	0,0008	8,15	0,17
K7-64.4	644	54,2	0,1	1,932	0,006	1,909	0,003	147,2	2,0	0,0797	0,0011	8,93	0,25

Probe	Tiefe vom Top [mm]	U [ppb] [±1σ]	²³⁴ U/ ²³⁸ U initial [Aktivität] [±2σ]	²³⁴ U/ ²³⁸ U [Aktivität] [±2σ]	²³⁰ Th/ ²³² Th [Aktivität] [±1σ]	²³⁰ Th/ ²³⁴ U [Aktivität] [±1σ]	Alter [kyr] [±2σ]						
K7-78.9	789	59,0	0,1	1,899	0,005	1,876	0,002	166,4	1,8	0,0808	0,0008	9,06	0,20
K7-94.4	944	43,3	0,1	2,036	0,007	2,009	0,004	150,6	1,6	0,0830	0,0008	9,29	0,19
K7-96.6	966	66,3	0,1	1,914	0,005	1,890	0,002	92,9	1,2	0,0834	0,0011	9,29	0,25
K7-115.0	1150	41,9	0,1	2,001	0,008	1,973	0,004	166,3	1,8	0,0905	0,0009	10,19	0,21
K7-136.6	1366	54,5	0,1	1,927	0,005	1,901	0,003	281,7	2,7	0,0904	0,0008	10,22	0,18
K7-156.1	1561	49,7	0,1	1,993	0,006	1,963	0,003	237,1	3,3	0,0944	0,0013	10,68	0,30
K7-169.5	1695	54,2	0,1	2,072	0,007	2,040	0,004	140,9	1,3	0,0970	0,0008	10,93	0,18
K8-1.1	11	46,0	0,1	1,872	0,008	1,870	0,004	6,9	0,6	0,0070	0,0006	0,60	0,13
K8-8.6	86	29,3	0,0	1,849	0,008	1,846	0,004	7,1	0,3	0,0113	0,0005	0,98	0,10
K8-17.6	176	28,9	0,0	1,756	0,009	1,754	0,004	11,8	0,3	0,0111	0,0003	1,08	0,07
K8-25.0	250	23,2	0,0	1,877	0,009	1,872	0,005	9,7	0,4	0,0203	0,0008	1,89	0,18
K8-34.7	347	37,4	0,1	1,784	0,007	1,779	0,003	13,4	0,2	0,0225	0,0004	2,22	0,08
K8-38.6	386	31,0	0,0	1,745	0,004	1,739	0,002	8,0	0,2	0,0263	0,0007	2,41	0,17

INTERPRETATION

Insgesamt wurden 83 Einzeldatierungen durchgeführt (Tabelle 1). Der vorliegende Datensatz ist damit einer der umfangreichsten einer Höhle im gesamten Alpenraum. Dennoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die untersuchten acht Stalagmiten repräsentativ für die vielen Hundert Stalagmiten des Katerlochs sind. Dies gilt insbesondere für sehr große Stalagmiten, von denen es in der Höhle zahlreiche gibt. Ihre detaillierte Beprobung wäre logistisch eine große Herausforderung und bislang liegen nur einige Daten vor, die auf Kernbohrungen an der Stalagmitenbasis beruhen (Boch et al., 2006a).

Fasst man die Altersdatierungen der acht im Detail untersuchten Stalagmiten zusammen, so umfassen diese etwas mehr als einen kompletten Interglazial-Glazial-Zyklus:

(1) *Das letzte Interglazial (auch Eem genannt)*: Dieses begann um 130 kyr, belegt u.a. durch Speläothem-Daten aus der Spannagel-Höhle (2411/1) in Hintertux (Spötl et al., 2007b) und der Corchia-Höhle nahe Pisa (Drysdale et al., 2009) und endete im mitteleuropäischen Raum vor 119 bis 118 kyr (nachgewiesen wiederum anhand von Tropfsteinen, z.B. aus der Entrischen Kirche (2595/2) am Eingang des Gasteiner Tales; Meyer et al., 2008). Während dieser klimagünstigen Zeit waren die Bedingungen für Verkarstung und Tropfsteinbildung in vielen alpinen und randalpinen Höhlen aufgrund der warmzeitlichen Vegetation und Bodenbildung optimal. Es überrascht deshalb nicht, dass zwei der acht Stalagmiten genau während dieser Zeit entstanden (K2 und K4). Zudem liegen Basisalter von zwei großen in-situ-Stalagmiten in der *Fantasiehalle* vor, deren Basis (Bohrkerndaten) ca. 130 bzw. 134 kyr alt ist (Boch et al., 2006a). Aus den neuen U-Th Daten lässt sich die mittlere Wachstumsgeschwindigkeit der Tropfsteine ermitteln: Diese lag zwischen 0,5 und 0,6 mm/yr, d.h. ein Stalagmit, welcher die letzte Warmzeit komplett aufgezeichnet hat,

wäre demnach etwa 6-7 m hoch. Dies passt gut zu den für die aktuelle Warmzeit ermittelten Wachstumsraten.

(2) *Mittelwürm*: Die letzte Eiszeit (Würm) wird in den Alpen traditionell viergeteilt: das Frühwürm (ca. 119 bis 60 kyr), in dem sich in den wärmeren Abschnitten noch Wälder in den Alpen halten konnten, das Mittelwürm (ca. 60 bis 25 kyr) mit genereller Waldfreiheit und einem raschen Wechsel von sehr kalt-trockenen und etwas wärmeren Phasen, das Hochwürm (ca. 25 bis 19 kyr), das die eigentliche Großvereisung mit sich brachte und schließlich das Spätwürm (Spätglazial) vom Eiszerfall bis zum Beginn der Nacheiszeit vor 11,7 kyr (z.B. Preusser, 2004). Aus dem langen Abschnitt des Frühwürms sind aus dem Katerloch noch keine Stalagmitenproben bekannt; zwei Tropfsteine fallen aber in das Mittelwürm (K5 und K6). Die abgeleiteten durchschnittlichen Wachstumsraten belegen, dass die Bedingungen glazialen Tropfsteinwachstums im Gebiet des Katerlochs deutlich schlechter waren als im warmen Eem. Die Wachstumsraten schwanken stärker und liegen mit 0,1 bis 0,2 mm/yr deutlich unter jenen der warmzeitlichen Proben. Dies deutet auf ein instabiles Klima hin, welches trockener und kühler war und nur eine bescheidene Vegetation oberhalb der Höhle aufkommen ließ. Detaillierte Untersuchungen der Sauerstoff-Isotopenzusammensetzung entlang der Wachstumsachse dieser Stalagmiten belegen ausgeprägte abrupte Klimaeinbrüche (Boch, 2008).

(3) *Nacheiszeit (Holozän)*: Die meisten der untersuchten Stalagmiten fallen zeitlich in die gegenwärtige Warmzeit, welche vor 11,7 kyr einsetzte. Dies wurde bereits durch frühere Kernbohrungen nahegelegt, wobei in zwei Fällen die Basis von großen in-situ-Stalagmiten der *Fantasiehalle* Alter von 11,2 bzw. 9,6 kyr ergab (Boch et al., 2006a). Von einer Reihe anderer Klimaarchive wissen wir, dass der frühe Abschnitt des Holozän in den Alpen durch generell etwas höhere

Temperaturen geprägt war (nachgewiesen etwa durch Baumfunde in heute noch vergletscherten Gebieten), sowie dass ab der Mitte des Holozäns und kulminierend in der „Kleinen Eiszeit“ (Mitte des 13. bis Mitte des 19. Jahrhunderts n. Chr.) das Klima kühler wurde (cf. Wanner et al., 2008). Drei der untersuchten Stalag-

miten decken den frühholozänen Zeitabschnitt ab und ergaben mittlere Wachstumsraten von 0,2 bis 0,7 mm/yr, also ähnlich jenen der Stalagmiten K2 und K4 des Eem-Interglazials. Zudem sprechen die Sauerstoff-Isotopenwerte für ein ausgeglicheneres Klima als während des Mittelwürms (Boch et al., 2009).

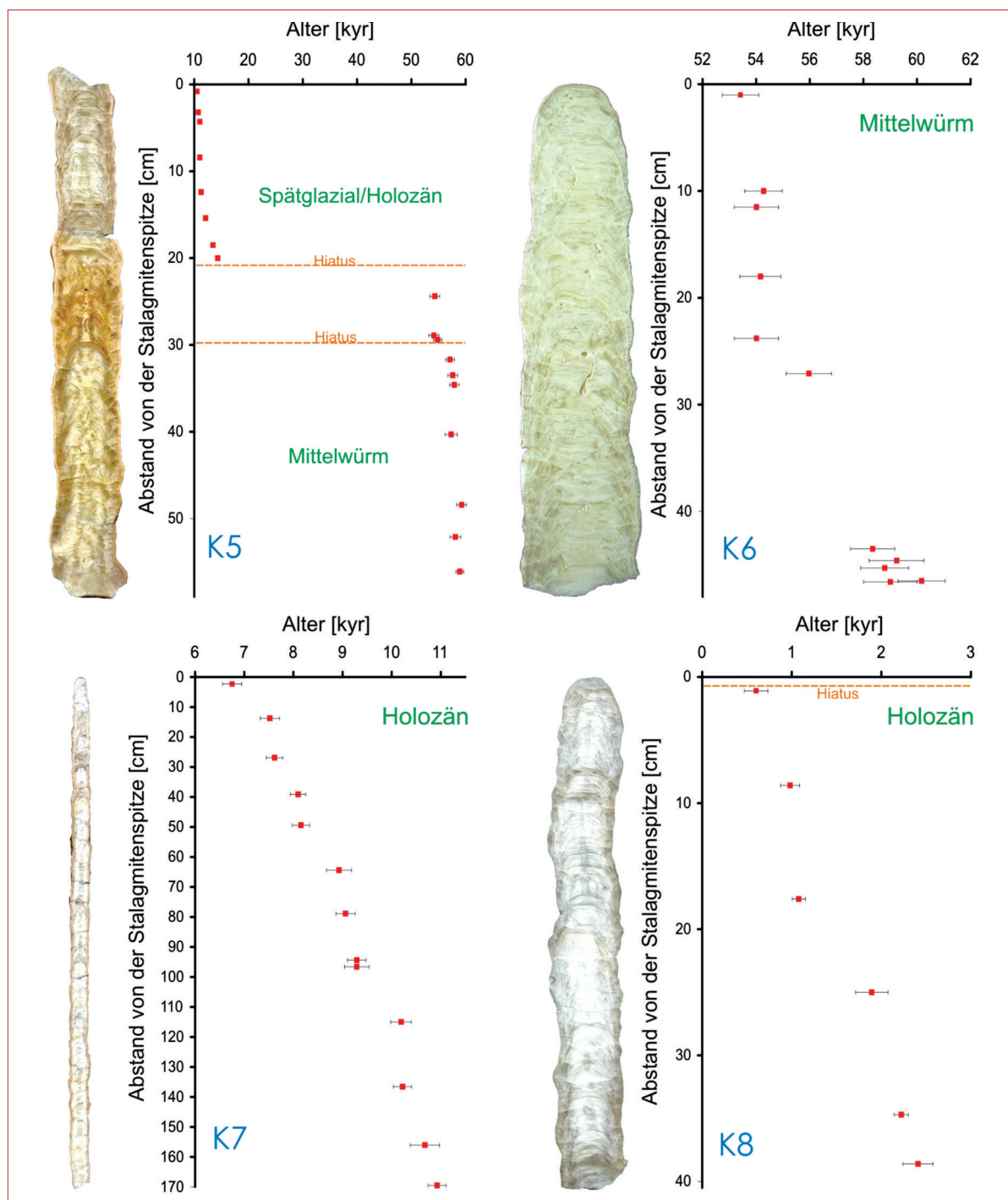


Abb. 2: Grafische Darstellung der Altersstruktur der Stalagmiten K5 bis K8, sowie deren Aussehen im polierten Querschnitt. Die dünnen horizontalen Balken (z.T. innerhalb der Größe der roten quadratischen Symbole) geben den analytischen Unsicherheitsbereich (2 sigma) der U-Th Altersdatierungen an. Eindeutige Wachstumsunterbrechungen (Hiati) sind durch orange strichlierte Linien gekennzeichnet. Zu beachten ist, dass die Länge der vertikalen Achse der einzelnen Stalagmiten variiert.

DANK

Diese Studie wurde durch den österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF Projekte Y122-GEO und P18637-N10) unterstützt. Wir danken Mag. Fritz Geissler für seine tatkräftige und beständige Unterstützung vor Ort. Die Bezirkshauptmannschaft Weiz erteilte die natur-

schutzrechtliche Genehmigung zur Beprobung. Der Landesverein für Höhlenkunde in Wien und Niederösterreich stellte einen Stalagmiten zur Verfügung. Denis Scholz und Ralf Benischke begutachteten das Manuskript eingehend, wofür wir uns herzlich bedanken möchten.

LITERATUR

- Bassinot, F.C., Labeyrie, L.D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N.J., Lancelot, Y. (1994): The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. – *Earth and Planetary Science Letters*, 126: 91-108.
- Boch, R. (2008): Stalagmiten from Katerloch Cave, Austria: Growth dynamics and high-resolution records of climate change. – Unveröff. Diss. Univ. Innsbruck, 223 S.
- Boch, R., Spötl, C. & Kramers, J. (2006a): Das Alter der Stalagmiten im Katerloch (2833/59): Erste Ergebnisse der Uran/Thorium Datierung. – *Die Höhle*, 57: 57-62.
- Boch, R., Spötl, C. & Kramers, J. (2006b): Altersbestimmungen an zwei großen Stalagmiten der Grasslhöhle (2833/60). – *Die Höhle*, 57: 63-65.
- Boch, R., Spötl, C. & Kramers, J. (2009): High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria. – *Quaternary Science Reviews*, 28: 2527-2538.
- Drysdale, R.N., Hellstrom, J.C., Zanchetta, G., Fallick, A.E., Sánchez-Goni, M.F., Couchoud, I., McDonald, J., Maas, R., Lohmann, G., Isola, I. (2009): Evidence for obliquity forcing of glacial Termination II. – *Science*, 325: 1527-1531.
- Kusch, H. (1994): Das Blasloch (Kat.-Nr. 2836/229) bei Semriach, Steiermark. – In: Benischke, R., Schaffler, H. & Weissensteiner, V. (Hrsg.), *Festschrift Lurgrotte 1894-1994*. 63-79, Graz (Landesverein für Höhlenkunde in der Steiermark).
- Kusch, H. (2004): Forschungsprojekt Mooschacht (2835/237) auf dem Tannebenstock bei Semriach, Steiermark. – *Die Höhle*, 55: 83-90.
- Meyer, M., Spötl, C. & Mangini, A. (2008): The demise of the Last Interglacial recorded in isotopically dated speleothems from the Alps. – *Quaternary Science Reviews*, 27: 476-496.
- North Greenland Ice Core Project members (2004): High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. – *Nature*, 431: 147-151.
- Offenbecher, K.-H. (2004): Stabile Isotope in Stalagmiten als Indikatoren der Klimaentwicklung im Quartär in den österreichischen Alpen. – Unveröff. Diss. Univ. Innsbruck, 229 S.
- Preusser, F. (2004): Towards a chronology of the Late Pleistocene in the northern Alpine foreland. – *Boreas*, 33: 195-210.
- Spötl, C., Offenbecher, K.-H., Boch, R., Meyer, M., Mangini, A., Kramers, J. & Pavuza, R. (2007a): Tropfstein-Forschung in österreichischen Höhlen – ein Überblick. – *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt (Festschrift H.-P. Schönlaub)*, 147: 117-167 (Download unter www.geologie.ac.at/GBACGI/Z_SEPARATUM_1.cgi?id=JB1471_117_A).
- Spötl, C., Holzkämper, S. & Mangini, A. (2007b): The Last and the Penultimate Interglacial as recorded by speleothems from a climatically sensitive high-elevation cave site in the Alps. – In: Sirocko, F., Claussen, M., Litt, T. & Sánchez-Goni, M.F. (eds.), *The Climate of Past Interglacials. Developments in Quaternary Science Series*, 7: 471-491 (Elsevier).
- Spötl, C. (2008): Stimme aus dem Untergrund – Tropfsteine und Klimawandel. – In: Kempe, S. & Rosendahl, W. (Hrsg.), *Höhlen. Verborgene Welten*, 127-135, Darmstadt (Wiss. Buchges.).
- Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M., Widmann, M. (2008): Mid- to Late Holocene climate change: an overview. – *Quaternary Science Reviews*, 27: 1791-1828.