

Einblicke in die Vereisungsgeschichte der Eisriesenwelt (Tennengebirge)

ZUSAMMENFASSUNG

Mit ihrem rund 550 m langen und etwa 11.000 m² umfassenden Eisbereich zählt die Eisriesenwelt zu den größten Eishöhlen nicht nur in den Alpen, sondern auch weltweit. In diesem Artikel wird aus Anlass des 100-jährigen Bestehens der Schauhöhle der Frage nachgegangen, wie stabil das Höhleneis auf Zeitskalen von Hunderten bis Tausenden Jahren ist und wie alt es ist. Die vorliegenden Daten zeigen während des 20. Jahrhunderts keine ausgeprägten Trends, wohl aber eine allgemeine Zunahme des Eises bis in die 1930er Jahre, die vermutlich auf den Einbau der Türe und die damit reduzierte (Sommer-)Bewetterung zurückzuführen ist. Für frühere Jahrhunderte liegen keine Beobachtungen vor, denn die Höhle wurde erst 1879 im vorderen Teil erstbefahren. Neue Daten basierend auf kryogen entstandenen Kalzitkristallen erlauben erstmals Einblicke in die deutlich umfassendere Vereisung auch der inneren, heute eisfreien Höhlenteile zurück bis 73.000 Jahre vor heute. Noch vor rund 12.000 Jahren, als die Alpengletscher am Ende der letzten Eiszeit schon stark geschrumpft waren, lag die Temperatur vermutlich im gesamten Bereich der etwa 40 km langen Höhle noch knapp unter dem Gefrierpunkt und entsprechend stark war die Vereisung. Das heutige Höhleneis dürfte an wenigen Stellen nur maximal rund 5000 Jahre alt sein; an der markanten Eiswand des *Mörk-Gletschers* ist es das basale Eis höchstens etwa 2500 Jahre alt. Aufgrund der Dimension der Höhle und der Höhenlage der vermuteten oberen Eingänge im Tennengebirge weist die Eisriesenwelt eine hohe Resilienz bezüglich der aktuellen Klimaerwärmung auf.

ABSTRACT

Insights into the history of glaciation in Eisriesenwelt (Tennengebirge)

With an ice-bearing part around 550 m long, encompassing as much as 11,000 m², Eisriesenwelt is among the largest ice caves not only in the Alps but also worldwide. On the occasion of the 100th anniversary of the start of show-cave operation, this article addresses the question of the age and stability of the ice on timescales of hundreds to thousands of years. The available data show no distinct trend throughout the 20th century, but a general increase in ice volume during the 1930s, which is presumably related to the installation of an entrance door, thereby reducing (summer) ventilation. As the first documented exploration of the cave took place in 1879, no direct observations are available for the preceding centuries. New data based on cryogenic cave calcite crystals allow a first insight into significant ice advances towards the currently ice-free inner parts of the cave during the last 73,000 years. As late as the end of the last ice age roughly 12,000 years before present, alpine glaciers had already considerably retreated, the temperature presumably was just below freezing point in the entire 40 km of passages of the cave, and the cave ice extent was correspondingly extensive. Today's cave ice reaches a maximum age of about 5000 years in only a few places; at the impressive ice wall of the *Mörk-Gletscher*, the basal ice is younger than about 2500 years. Owing to the cave dimensions and the altitude of the presumed high entrances on the Tennengebirge plateau, Eisriesenwelt exhibits a high resilience with respect to the current climate warming.

Christoph Spötl

Institut für Geologie, Universität Innsbruck,
Innrain 52, 6020 Innsbruck
christoph.spoetl@uibk.ac.at

Gabriella Koltai

Institut für Geologie, Universität Innsbruck,
Innrain 52, 6020 Innsbruck
gabriella.koltai@uibk.ac.at

Tanguy Racine

Institut für Geologie, Universität Innsbruck,
Innrain 52, 6020 Innsbruck
tanguy.racine@student.uibk.ac.at

Eingelangt: 17.5.2020
Angenommen: 29.6.2020

EINLEITUNG

Die Eisriesenwelt ist eine der bekanntesten Eishöhlen weltweit und wird mit ihrer rund 11,000 m² umfassenden Eisfläche (Buchroithner & Gaisecker, 2020) zu den größten ihrer Art weltweit gezählt. An den Eisteil, der in seiner Gesamtheit touristisch erschlossen ist, schließt sich ein rund 40 km umfassendes Hinterland an, das aktuell keine ganzjährigen Eisvorkommen aufweist und annähernd horizontal entwickelt ist.

Beginnend mit einer großen, im Auftrag von und mit Unterstützung durch die Akademie der Wissenschaften in Wien durchgeführten Expedition des Jahres 1921 war diese Höhle und insbesondere der Eisteil immer wieder Gegenstand von kleineren und größeren wissenschaftlichen Forschungsaktivitäten, die im 20. Jahrhundert den Fokus auf der Bewetterung (z.B. Gressel, 1955) und den Eisstandsänderungen (z.B. Abel, 1955) hatten. Im Zuge eines ebenfalls von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften finanzierten

Pilotprojektes wurden in den Jahren 2006–2008 diverse Forschungsarbeiten durchgeführt, die zum einen die Meteorologie und den Eishaushalt der Höhle zum Ziel hatten (Thaler, 2008; Obleitner & Spötl, 2011; Schöner et al., 2011; Hausmann & Behm, 2011; Behm & Hausmann, 2007), zum anderen die Untersuchung eines 7 m langen Eisprofils der ersten unterirdischen Eiskernbohrung in den Alpen (May et al., 2011). In der vergangenen Dekade wurde die Schauhöhle mit terrestrischen Laserscan-Verfahren vermessen (Milius & Petters, 2012; Beckert, 2015), das Eisvolumen mittels Georadar kartiert (Kaidong, 2018) und mit Untersuchungen zur Vereisung tagferner Höhlenabschnitte in früheren Klimaperioden begonnen.

Anlässlich des runden Geburtstages der Eisriesenwelt vermittelt dieser Artikel einen Überblick über den Kenntnisstand der kurz- und langfristigen Änderungen des Eises in dieser Höhle.

VERÄNDERUNGEN DES EISES IN HISTORISCHER ZEIT

Sieht man von Anton von Posselt-Czorichs Befahrung des vordersten Teiles (1879) ab, dann reichen die Informationen über das Eis der Eisriesenwelt etwa ein Jahrhundert zurück. Wir haben die verfügbaren Informationen über die Eisstandsänderungen im 20. Jahrhundert gesichtet und in Form von vier Karten kompiliert (Abb. 1), die in etwa die verschiedenen Vermessungskampagnen der Höhle widerspiegeln.

1920: Die erste Vermessung der Höhle führten Walter Czoernig-Czernhausen und Robert Oedl im Jahr 1920 durch. Die Karte im Maßstab 1:2000 wurde von Oedl (1922) publiziert.

Ca. 1956–1968: Dieser kolorierte Höhlenplan im Maßstab 1:5000 war eine Beilage des Alpenvereinsführers Tennengebirge (Kollarz, 1968). Der Plan nennt Walter Czoernig-Czernhausen, Robert Oedl und Gustave Abel als Vermesser, ohne ein Jahr anzugeben. Die Karte basiert eindeutig auf der Grundlage des Planes von 1920 und enthält Forschungsergänzungen bis 1946 (*Jenseits*) bzw. 1956 (*Rumpelkammer*). Somit dürfte der Eisstand der Schauhöhle etwa den späten 1950er bis mittleren 1960er Jahren entsprechen.

Ca. 1980: Dieser Höhlenplan, aufgenommen von Albert Morocutti sen., ist im Salzburger Höhlenbuch (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985) abgebildet. Auch diese Darstellung führt keine Jahreszahl was den Eisstand betrifft. Die Neuvermessung durch Morocutti

sen. begann 1973, der Plan dürfte die Weiterforschungen bis mindestens 1978 berücksichtigen (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985: 201). Nachforschungen haben ergeben, dass er einen deutlich zu großen Eisstand verzeichnet. Die *Posselthalle* und der Bereich der *Hymirburg* sind als komplett eisbedeckt kartiert, was damals nicht der Wirklichkeit entsprach (mündl. Mitt. A. Rettenbacher, Höhlenführer von 1979–2019). Das trifft auch auf den *Mörk-Dom* zu, dessen Westteil damals, anders als auf der Karte verzeichnet, eisfrei war. Im gleichen Band des Salzburger Höhlenbuchs findet sich als Beilage eine kolorierte Version dieses Plans im Maßstab 1:5000, sowie eine vergrößerte Ansicht der Schauhöhle im Maßstab 1:1250, und auch dort sind die eisführenden Bereiche deutlich zu groß eingezeichnet.

2010/2013: 2010 wurden der Schauteil erstmals mittels eines terrestrischen Laserscan-Verfahrens genau vermessen (Petters et al., 2011); Nachvermessungen erfolgten 2013 (Beckert, 2015), 2016, 2017, 2019 und 2020 (Buchroithner & Gaisecker, 2020). Kaidong (2018) zeichnete anhand der Vermessungen der Jahre 2010 und 2013 eine Karte der Eisverbreitung in der Schauhöhle.

Vergleicht man nun die flächenmäßige Eisverbreitung über die vergangenen ca. 100 Jahre, so fällt auf, dass 1920 wenig Eis existierte und dass danach eine Phase des Eiswachstums einsetzte (Abb. 1). Diese dürfte mit

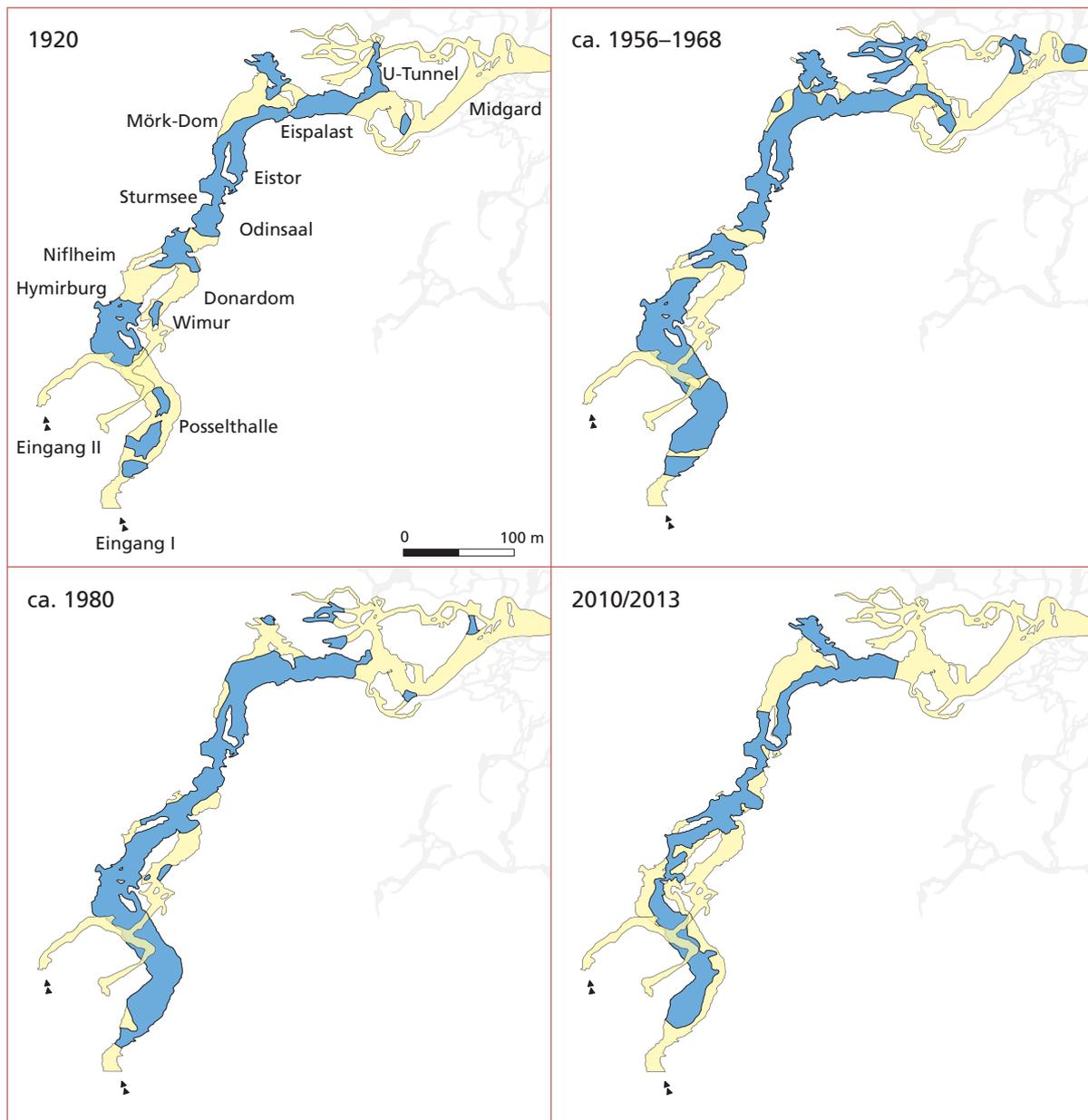


Abb. 1: Die Veränderungen des Eisteiles (in blau) im vorderen Abschnitt der Eisriesenwelt in vier Zeitscheiben, zusammengestellt aus Höhlenplänen und Berichten. Beachte, dass der Plan von ca. 1980 in manchen Bereichen eine zu große Eisausdehnung verzeichnet.

Fig. 1: Changes in the ice extent of the show cave and adjacent parts of Eisriesenwelt in four time slices, based on cave surveys and reports. Note that the map from ca. 1980 shows a too large ice extent in some parts of the show cave.

dem Beginn des Führungsbetriebes im Herbst 1920 zusammenhängen. Durch den damaligen Einbau einer Tür am Höhleneingang wurde die Bewetterung insofern künstlich geregelt, dass die Tür während der warmen Jahreszeit verschlossen wurde, während im Winter bei geöffneter Tür eine annähernd natürliche Bewetterung herrschte. Diese saisonalen Maßnahmen werden bis heute durchgeführt und haben sich sicherlich langfristig positiv auf die Massenbilanz des Höhleneises ausgewirkt. Im Detail sind die verfügbaren

Informationen jedoch etwas widersprüchlich. Bis etwa 1926 wies die *Posselthalle* einen geringen Eisstand auf (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985: 184), und es wird berichtet, dass die Höhlenbesucher erst weiter oben Steigeisen anlegen mussten (A. Rettenbacher, mündl. Mitt. 2020). Weiters wird von einem starken Eisrückgang bis 1930 berichtet (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985: 184). Die Karte von Kollarz (1968) weist jedenfalls für ca. 1956/1968 einen deutlich größeren Eisstand auch in der *Posselthalle* auf als 1920.



Abb. 2: Die bis 10 m hohe Eisfigur Baldur, als sie in etwa ihre maximale Größe erreichte (1938). Heute gibt es an dieser Stelle im westlichen Midgard nur wenig saisonales Eis.

Fig. 2: The ice stalagmite Baldur at the time when this up to 10 m tall formation reached its maximum size (1938). Today this area at the western end of Midgard contains only little seasonal ice.

Foto: Gustave Abel (Archiv des LVH Salzburg).

Dies betrifft auch den Abschnitt *Donardom-Wimur*, von dem berichtet wird, dass er 1913 völlig eisfrei war und danach eine Vereisung begann, die in den 1940er Jahren ihren Höhepunkt erreichte (Abel, 1955). 1948 begann dort das Eis zurückzugehen (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985: 185), aber noch Abel (1955) spricht davon, dass der *Wimur* von einer geschlossenen Eismasse bedeckt war. Auf der Karte von Kollarz (1968) ist der *Wimur* bereits eisfrei. Der *Wimur* führt verwinkelt zum *Eingang II*, der 1932 durch Graben geöffnet wurde. Dieser fungiert höhlenmeteorologisch gesehen wie der *Eingang I* (Gressel, 1958), d.h. ausbläsende Höhlenluft in der warmen und einziehende Außenluft in der kalten Jahreszeit. Aufgrund des geringen Querschnitts dürfte sich dieser weitere untere Eingang in die Eisriesenwelt seither nur in geringem Maß auf den Energie- und Massenhaushalt im Eisteil auswirken.

Interessant sind auch die Veränderungen im hintersten Teil der Schauhöhle am Übergang zum *Midgard*. Der heute eisfreie *U-Tunnel*, eine prädestinierte Kaltluftfalle, wies 1920 wenig Eis auf. Um 1930 führte er nur mehr saisonales Eis, um in den nachfolgenden Jahren bis ca. 1943 stark aufzueisen. Es wird von 5 m mächtigem Bodeneis berichtet, das ab 1945 wieder sukzessive abnahm (Abel, 1955). Auf dem Bodeneis bildete sich der *Heimdahl* getaufte Eisturm. In der Karte von Kollarz (1968) ist jedenfalls der *U-Tunnel* noch vereist eingezeichnet (Abb. 1). Die Karte von 1920 weist am Beginn des *Midgards* kein Eis auf. 1924 begann sich dort eine Eisfigur zu bilden, *Baldur* genannt, die bereits 1926 bis zur Decke reichte (Abel, 1955; Abb. 2). Auch Bodeneis bildete sich und erreichte rund 2000 m² Fläche. Ab 1938 nahm das Eisvolumen im Bereich des *Baldurs* ab. Auf der Karte von Kollarz (1968) sind noch Reste des dortigen Eises verzeichnet, die sich bis in die

1980er Jahre hielten (Abb. 1). Insgesamt fasst Abel (1960) aufgrund seiner langjährigen Pegelmessungen zusammen, dass ab 1926 das Eis in den hinteren Abschnitten mächtiger geworden ist, 1938 seinen Höhepunkt erreichte, um danach wieder abzunehmen. So hat die Mächtigkeit des Bodeneises im *U-Tunnel* zwischen 1942 und 1960 um 1,5 m abgenommen (Abel, 1960).

Zwei Engstellen weist die Schauhöhle auf, den (früheren) *Sturmsee* und das *Eistor* (Abb. 1). So war ersterer für die Pioniere Anfang des 20. Jahrhundert eine unangenehme Engstelle mit einem Eisse und sehr starkem Höhlenwind. Bodeneiswachstum verengte diese Stelle in den 1940er Jahren und machte eine künstliche Erweiterung notwendig (Klappacher & Hasek-Knapczyk, 1985: 188). Das *Eistor* am Übergang hinunter in den *Mörk-Dom* war 1913 in dieser Form nicht vorhanden. Es bildete sich nach dem 1. Weltkrieg durch den winterlichen Höhlenwind (Eisverdunstung) als Randspalte, die an Breite zunahm, während der anschließende *Mörk-Gletscher* um 5–6 m nach Westen gedrängt und so die prominente Eisschichtung aufgeschlossen wurde (s.u.).

Insgesamt kristallisiert sich aufgrund der vorhandenen Unterlagen heraus, dass die Höhle um die Mitte der 1930er Jahre die größte Eismasse des vergangenen

Jahrhunderts aufwies (Abel, 1960, 1965) und auch die größte Eisausdehnung jenseits des *Eispalasts*. Dieses Maximum wurde allerdings damals nicht kartenmäßig erfasst. Möglicherweise war dieser Eishochstand eine verzögerte Reaktion auf den künstlichen Verschluss des Haupteinganges während der warmen Jahreszeit. Diese Maßnahme macht es auch schwierig, die Frage zu beantworten, inwieweit sich die kühl-nassen 1910er und 1920er Jahre (z.B. Auer et al., 2007) auf die Massenbilanz des Höhleneises ausgewirkt haben. Um 1920 zeigen jedenfalls die Alpengletscher den größten Vorstoß des 20. Jahrhunderts (Hoinkes, 1968; Zemp et al., 2007). Auch wenn das Höhleneis, was seine Reaktion auf Klimaänderungen betrifft, nicht direkt mit Oberflächengletschern vergleichbar ist, so ist grundsätzlich mit einem ähnlichen Reaktionsmuster auf Klimaveränderungen zu rechnen, abhängig von der Größe und Bewetterung der Höhle gedämpft und zeitlich verzögert. Meteorologische Daten belegen, dass auch die 1970er Jahre kühler und damit „gletschergünstiger“ waren als z.B. etwa 1930–1950 und die Zeit ab ca. 1985. Hinweise, dass die 1970er Jahre zu einem Eiszuwachs geführt haben, existieren jedoch nicht. Umgekehrt zeigt sich der Eisteil der Eisriesenwelt auch stabil gegenüber dem seit Ende der 1980er Jahre beobachteten positiven Temperaturentrend der bodennahen Atmosphäre.

DAS ALTER DES HÖHLENEISES

Zu den am häufigsten gestellten Fragen von Besuchern der Eisriesenwelt, aber auch anderer Eishöhlen zählt: Wie alt ist das Höhleneis? Die Standardmethode, um diese Frage zu beantworten, benutzt organische Einschlüsse im Eis, z.B. Nadeln, Blätter oder Holzreste, und bestimmt deren Alter mit der Radiokarbonmethode. Die so gewonnenen Daten beruhen auf der Annahme, dass das umgebende Eis in etwa gleich alt ist wie die Einschlüsse, was unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit der Radiokarbonmethode in den meisten Fällen eine begründete Annahme darstellt. Die Informationen über die Altersstruktur des Eises ostalpiner Eishöhlen beruhen auf solchen Messungen organischer Reste, jedoch fast ausschließlich von solchen in schachtförmigen Höhlen mit Eintrag von Winterschnee (z.B. Spötl & Pavuza, 2016). In dynamisch bewetterten Eishöhlen wie der Eisriesenwelt besteht de facto fast keine Möglichkeit, dass organische Reste ihren Weg in den Eisteil finden. In der warmen Jahreszeit, wenn die Vegetation aktiv ist und Bäume Laub bzw. Nadeln produzieren, verhindert der starke tagwärts gerichtete Höhlenluftstrom den Eintrag von Pflanzenresten in die Höhle. Prinzipiell ist ein Eintrag

über obere Eingänge in das Höhlensystem im Sommer oder Herbst vorstellbar. Diese Schächte, deren Lage derzeit nur ungenau bekannt ist (P. Pointner, pers. Mitt. 2019), sind in einem vegetationsarmen Hochplateau (i.W. Kahlkarst) rund 500 m über den Horizontaleiten der Eisriesenwelt zu verorten. Dass Holzreste von dort bis in den Eisteil der Höhle gelangen, ist auszuschließen. Im Winter könnten kleine organische Reste mit dem bergwärts ziehenden Luftstrom durch den unteren Eingang in den Eisteil transportiert werden. Die Schneedecke schützt jedoch meist die Vegetation vor Abtrag durch Winde. Zudem müsste z.B. eine Lärchennadel bis zum Eingangsportal hinaufgeblasen und dann mit dem Höhlenwind ein Stück in die Höhle verfrachtet werden. Nachdem der eisführende Höhlenabschnitt am Anfang stark ansteigt, ist es sehr unwahrscheinlich, dass größere organische Partikel über diese erste Eisbarriere transportiert werden. Es überrascht daher nicht, dass trotz mehrfacher Suche keine pflanzlichen Einschlüsse im Höhleneis gefunden wurden. Holzreste, die man mancherorts in den Eiswänden entlang des Führungsweges feststellen kann, stammen von früheren Einbauten oder Arbeiten in der

Schauhöhle. So wurde 2006 ein winziges Ästchen im Eis des Eistunnels unterhalb der *Hymirburg* geborgen. Eine Radiokarbonmessung ergab, dass dieser Holzrest mit großer Wahrscheinlichkeit aus der Zeit zwischen 1800 und 1940 n. Chr. stammt und somit vermutlich auch anthropogen eingetragen wurde (B. May, pers. Mitt. 2007). Selten wurden eingeeiste Insekten, z.B. Schmetterlinge, im vorderen Abschnitt des Eisteiles gesichtet.

Es gibt jedoch noch weitere, allerdings mikroskopische Einschlüsse im Eis, die organischer Herkunft sind: Pollen und Sporen. Sie sind meist zwischen 0,01 und 0,1 mm groß, extrem leicht, können weit transportiert werden und sind sehr resistent. Auch für Pollen und Sporen gilt im Prinzip das Gleiche wie für makroskopische Einschlüsse: Ihre Häufigkeit nimmt mit zunehmender Entfernung vom unteren Eingang ab, und sie können primär nur zu Zeiten von höhleneinwärts gerichteter Luftströmung in die Höhle gelangen (in sehr geringem Ausmaß auch über das Tropfwasser). Nachdem letztere Situation auf die kalte Jahreszeit beschränkt ist, Pollen und Sporen aber am Beginn der warmen Jahreszeit produziert werden, ist gerade im hinteren Eisteil der Eisriesenwelt mit geringen Konzentrationen an Pollen und Sporen zu rechnen. Das entspricht auch dem Untersuchungsergebnis von Proben, die 1972 am *Großen Eiswall* (eine Probe) und am *Mörk-Gletscher* (drei Proben) gezogen wurden. Die Pollenkonzentration in diesen Proben war gering (Fritz, 1977). Immerhin konnten jedoch 44 Pollen- und sechs Sporentypen festgestellt werden. Auch wenn mit solchen Untersuchungen keine quantitative Altersbestimmung des Eises möglich ist, so zeigen die darin gefundenen Pollen von Kulturpflanzen wie Walnuss, Roggen und Weizen, dass die untersuchten Eislagen nicht viele Tausende Jahre alt sein können. Denn erst seit etwa dem 3. Jahrtausend v. Chr., d.h. seit der ausgehenden Jungsteinzeit, begann der Mensch inneralpin zu roden und Landwirtschaft zu betreiben (z.B. Bortenschlager & Bortenschlager, 1981; Oegg, 2013).

2007 wurde im *Eispalast* eine Kernbohrung abgeteuft, die erste Eiskernbohrung in einer Eishöhle in den Alpen (Abb. 3). Diese 7,1 m lange Bohrung war der Ausgangspunkt für eine eingehende Untersuchung dieses Höhleneisprofils. Auf der Suche nach datierbaren organischen Partikeln wurde der Eiskern stückweise im Labor aufgeschmolzen und das Schmelzwasser filtriert. Es wurden keine verwertbaren makroskopischen organischen Reste gefunden. Acht Eisproben des oberen Profilsabschnittes wurden auf Pollen und Sporen untersucht. Die Hälfte der Proben war pollenfrei; in den anderen vier Proben wurden nur ganz ver-

einzel Pollenkörner von Föhre, Fichte, Brennessel und Gräsern gefunden (S. Bortenschlager, schriftl. Mitt. 2009). Der sehr geringe organische Filterrückstand von sieben Proben wurde zudem mit der Radiokarbonmethode analysiert. Die Ergebnisse waren jedoch nicht schlüssig, denn die Probenmengen waren extrem klein und die Messergebnisse sehr variabel. Trotzdem wurde eine grobe Abschätzung des Alters dieses Eisprofils vorgenommen, die dem tiefsten Eis ein Alter von rund 5000 Jahren zuweist (May et al., 2011). Einen ähnlichen Wert weist das älteste Eis der Eisgruben Eishöhle am Sarstein auf (Achleitner, 1995; Racine & Spötl, unveröff. Daten) sowie das in der *Saarhalle* der Dachstein-Mammuthöhle (Kern et al., 2018). Der Beginn des Eisaufbaues in diesen drei Höhlen der zentralen Nördlichen Kalkalpen vor rund 5000 Jahren fällt zeitlich in eine Wende der Nacheiszeit, des Holozäns. Herrschte in der ersten Hälfte des Holozäns ein überwiegend warmes Klima vor, das zu einem starken Rückgang der Gletscher führte (Beispiel Pasterze – Lieb & Slupetzky, 2011), so begann etwa ab der Mitte des 6. Jahrtausends vor heute eine gletschergünstigere Zeit. Auch der Eismann Ötzi, der vor rund 5300 Jahren starb, stammt aus dieser Zeit, und seine Mumie blieb bis zur Entdeckung 1991 in einer Eiswanne konserviert (die Stelle auf dem 3208 m hohen Tisenjoch ist heute eisfrei).

Neben der Datierung von organischen Resten, die von außen in Höhlen eingetragen werden, gibt es eine weitere ebenfalls auf dem radioaktiven Zerfall beruhende physikalische Methode um das Alter von Eis zu bestimmen, sofern es sich um Eis handelt, das maximal etwa ein halbes Jahrhundert alt ist. Die Rede ist von Tritium, dem radioaktiven Isotop des Elements Wasserstoff. Seine Halbwertszeit beträgt 12,3 Jahre. Tritium ist Teil des Wasser- bzw. Eismoleküls und in der Natur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden. In den 1950er und 1960er Jahren wurden im Zuge der atmosphärischen Nukleartests große Mengen an Tritium freigesetzt. Dieser „Bombenpeak“ wurde in den darauf folgenden Jahrzehnten zur Altersbestimmung von oberflächennahem Grund- und Quellwasser verwendet. Mittlerweile ist der „Bombenpeak“ fast komplett abgeklungen, sodass diese Methode nur noch vereinzelt zur Altersbestimmung von Grundwässern eingesetzt wird, beispielsweise am Untersberg (Reischer et al., 2015). Im Zuge der Eisbohrkernstudie im *Eispalast* wurden auch Tritium-Messungen der obersten 3,5 m des Eisprofils vorgenommen. Nur in den obersten 10 cm wurden noch geringe Gehalte an Tritium nachgewiesen. Die Werte der tieferen Proben lagen alle unter der Nachweisgrenze, das Eis ist also vor ca. Mitte der 1950er Jahre entstanden. Die geringen Gehalte der obersten Lage zeigen, dass auch dieses Eis nicht rezent

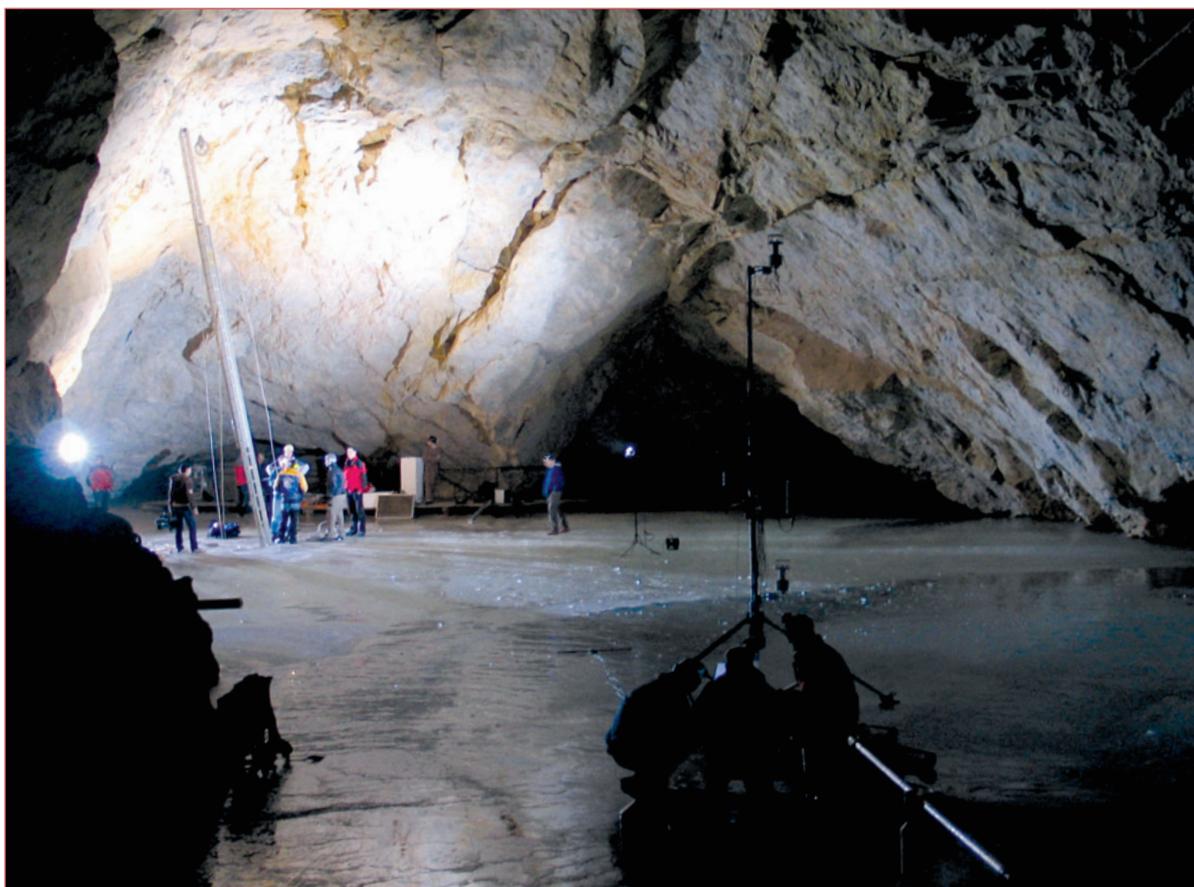


Abb. 3: Im Juni 2007 wurde im Eispalast eine Kernbohrung mit einem Durchmesser von 115 mm niedergebracht (Kerndurchmesser 75 mm), die in 7,1 m Tiefe die Eisbasis erreichte.

Fig. 3: An ice core of 115 mm diameter was drilled in the Eispalast in June 2007 and reached the base of the ice in 7.1 m depth. Foto: Barbara May

ist, sondern dass die Höhe der Eisoberfläche des *Eispalastes* über die vergangenen Jahrzehnte generell abgenommen hat, was mit historischen Berichten, alten Fotos sowie Markierungen und Messungen (Obleitner & Spötl, 2011; May et al., 2011) übereinstimmt. Von Zeit zu Zeit wird zwar eine dünne Schicht Eis auf dem Eispalast gebildet; dieses Wasser stellt nach Tritiummessungen zu urteilen z.T. Schmelzwasser dar, das aus höhergelegenen Höhlenteilen abfließt (May et al., 2011). Zusammenfassend zeigen die Daten der Tritiummessungen, dass das Eis im *Eispalast*, abgesehen vom allerobersten Bereich, aus der Zeit vor etwa Mitte 1950 stammt, wobei mit dieser Methode keine weitere zeitliche Eingrenzung möglich ist. An der Eiswand am *Mörk-Gletscher* sieht man zwischen 6,5 und 9 m mächtiges Eis auf rund 30 m Breite aufgeschlossen, einer der Höhepunkte der touristischen Höhlenführung (Abb. 4). Horizontale Schichtung ist im unteren Teil prominent sichtbar; sie wird nach oben hin undeutlicher. Die Schichtung ist dort besonders deutlich zu erkennen, wo Eislagen durch

dünne Lagen von hellbraunem Sediment getrennt werden. In einige der tieferen Lagen sind zudem eckige Kalksteinfragmente eingeschlossen, die von der Höhlendecke stammen dürften. Ein ca. 45 cm großes Felsstück ist vor wenigen Jahren im Zuge des Zurückschmelzens der Eiswand aus einer dieser Eislagen herausgebrochen.

Bei diesem feinkörnigen hellbräunlichen Sediment handelt es sich nicht, wie früher vermutet, um feinen Kalkstaub, der von der Höhlenwand bzw. -decke gerieselt ist und lokal zusammengeschwemmt wurde. Untersuchungen haben gezeigt, dass es sich um Kristalle bzw. Kristallaggregate von Kalzit handelt (Spötl, 2008). Messungen der stabilen Kohlenstoff- und Sauerstoff-Isotope belegen, dass sich diese Kristalle beim Frieren von ganz seichten Eislacken bzw. -seen gebildet haben. In der Fachsprache spricht man von feinkristallinen kryogenen Höhlenkarbonaten (*fine crystalline cryogenic cave carbonates*, CCC_{fine} – Žák et al., 2018). Das Frieren geschieht vermutlich innerhalb von Stunden bis Tagen im Winter. Die im Wasser ge-



Abb. 4: Im unteren Abschnitt der Eiswand am Mörk-Gletscher erkennt man bräunliche Zwischenlagen, die aus feinkristallinen kryogenen Höhlenkarbonaten bestehen und eine Abschätzung des Maximalalters dieses Eises erlauben.

Fig. 4: The lower part of the ice cliff at the Mörk-Gletscher shows brown layers composed of fine crystalline cryogenic cave carbonates which offer insights into the age of this ice. Foto: Robbie Shone

lösten Ionen können nicht in das Eis eingebaut werden, die Konzentration im Restwasser steigt, und ab Überschreiten des sogenannten Löslichkeitsproduktes kristallisiert Kalzit aus, wobei Kohlendioxid entweicht. Das Endprodukt des Frierprozesses sind fein im Eis verteilte und oft nur schwer erkennbare CCC_{fine} Partikel. Millimeterdünne, gut erkennbare CCC_{fine} Lagen, die auch in der Eisbohrung im *Eispalast* ange-
troffen wurden (May et al., 2011) und z.B. im Eistunnel unter der *Hymirburg* gut zu sehen sind (Abb. 5), entstehen dadurch, dass CCC_{fine} durch winterliche Eisverdunstung (Sublimation) freigesetzt und durch den Höhlenwind bzw. auch Wasser lokal verfrachtet und zusammengeblasen wurden. Dieser Prozess wurde seinerzeit im Bereich des *Sturmsees* im Frühjahr beobachtet (Hauser & Oedl, 1923: 89). Am *Mörk-Gletscher* finden sich sieben solche CCC_{fine} -Lagen, wobei die Dicke derselben zwischen ca. 1 mm und ca. 1 cm schwankt.

Kann mithilfe dieser CCC_{fine} das Alter des Höhleneises bestimmt werden? Es sind Höhlenkarbonate wie z.B. Stalagmiten, daher können sie im Prinzip mit der Uran-

Thorium-Methode datiert werden. Messungen haben aber gezeigt, dass diese feinen Partikel zu wenig rein und die Messwerte daher unbrauchbar sind (Spötl, 2008). Es gibt eine Alternative, nämlich die Messung des Radiokarbongehaltes analog wie bei organischen Proben. Die Methode hat jedoch einen Haken: Karbonatische Sinter enthalten stets einen gewissen Anteil an Kohlenstoff, der von der Auflösung des Muttergesteins stammt, und da dieses (im Fall der Eisriesenwelt ist es Dachsteinkalk bzw. -dolomit) viele Millionen Jahre alt ist, enthält es kein Radiokarbon mehr. In anderen Worten: Radiokarbonalter von Höhlenkarbonaten sind aufgrund dieser Kontamination durch sogenannten „toten Kohlenstoff“ stets Maximalalter. Untersuchungen haben gezeigt, dass dieser Effekt tausende Jahre ausmachen kann, im Extremfall bis zu 10.000 Jahren wie an Aragonitsintern der Obstanzer Eishöhle festgestellt wurde (Spötl et al., 2016). Eine noch nicht abgeschlossene Studie der Verfasser an den CCC_{fine} -Lagen am *Mörk-Gletscher* hat nicht ganz überraschend variable Radiokarbonwerte gefunden. Zwei Proben der Lagen in 1,3 m bzw. 1,7 m



Abb. 5: Lagen feinkristallinen kryogenen Höhlenkarbonats im Eistunnel unter der Hymirburg.
 Fig. 5: Layers of fine crystalline cryogenic cave carbonates exposed in the Eistunnel beneath Hymirburg. Foto: Christoph Spötl

Höhe ergaben die jüngsten Werte, die umgerechnet auf Kalenderalter etwa 2500 Jahre alt sind. Eine Probe in 3,2 m Höhe ergab etwa 1800 Jahre. Eine Korrektur für den Gehalt an „totem Kohlenstoff“ würde diese Alter verjüngen, nicht aber älter machen. Somit kann festgehalten werden, dass das Eis im unteren Teil des *Mörk-Gletschers* maximal aus der späten Eisenzeit stammt; es könnte aber auch deutlich jünger sein. Proben aus dem Eistunnel (Abb. 5) sprechen dafür, dass dort das unterste Eis höchstens etwa 1000 Jahre alt ist. Für Eis, das maximal etwa 1000 Jahre alt ist, wird aktuell an einer neuartigen Messmethode gefeilt, die auf dem Zerfall des extrem seltenen Argon-Isotops ^{39}Ar beruht. Seine Halbwertszeit beträgt 269 Jahre. Erste Tests an 4–7 kg großen Eisproben von Ostschweizer und Nordtiroler Gletschern verliefen vielversprechend (Feng et al., 2019), wenn auch die Messfehler derzeit noch groß sind. Inwieweit neben Gletschereis, das aus Schnee entstanden ist, auch Höhleneis geeignet ist, muss sich erst weisen.

Fasst man die bislang vorliegenden Daten aus dem hinteren Eisteil der Eisriesenwelt zusammen, so ergibt sich ein erstes grobes Bild der Entwicklung der Eises im Holozän: Vor rund 5000 Jahren dürfte der bis zu 7 m mächtige Eisstock im *Eispalast* zu wachsen begonnen haben. Vermutlich war dieser rückwärtige Teil der Schauhöhle im frühen Holozän großteils eisfrei. Das passt gut zur Vorstellung, dass Eishöhlen auf längeren Zeitskalen dem Muster der Oberflächengletscher folgen; letztere waren im frühen Holozän meist kleiner als am Ende des 20. Jahrhunderts (Auer et al., 2014). Im Zuge einer längerfristigen Klimaerwärmung ist anzunehmen, dass nicht nur die Eismächtigkeit in der

Eisriesenwelt abnimmt, sondern dass sich insbesondere die Länge des vereisten Bereiches verkürzt, da die inneren Bereiche wie *Mörk-Dom* und *Eispalast* zu wenig Winterabkühlung erfahren. Das passt zu den Beobachtungen, dass noch um die Mitte des 20. Jahrhunderts Bereiche, die an den *Eispalast* anschließen, vereist waren, insbesondere der *U-Tunnel* sowie die seinerzeitige Eisfigur *Baldur* im westlichen Abschnitt des *Midgards* (Abb. 2).

Der *Mörk-Gletscher* ist nach den neuesten Daten in seinem unteren Abschnitt höchstens etwa 2500 Jahre alt, möglicherweise auch deutlich jünger. In weiterer Konsequenz bedeutet das, dass dieser nordwestliche Hangbereich und das anschließende *Eistor* vorher eisfrei waren. Im Bereich der markanten Eiswand liegen laut Georadar-Daten noch 4–5 m Eis unterhalb des Niveaus des Führungsweges (Kaidong, 2018). Möglicherweise ist dieses basale Eis ähnlich alt wie das tiefe Eis des *Eispalasts*.

Die genannten Altersinformationen stammen vom inneren Eisbereich der Höhle. Mit Sicherheit darf man diese Daten nicht 1:1 auf eingangsnäher gelegene Bereiche übertragen. Gerade im Bereich der touristisch bedeutsamen großen Eisformationen gibt es große Massenumsätze in kurzer Zeit (z.B. Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985). Immerhin zeigen die ersten Daten vom Eistunnel an, dass lokal auch dort bis zu rund 1000 Jahre Eis existieren dürfte, das seither nie abgeschmolzen ist.

Entscheidend für die längerfristige Entwicklung des Eishaushaltes in dieser und anderen dynamisch bewetterten Eishöhlen sind Eisverschlüsse bzw. Engstellen. Anfang des 20. Jahrhunderts war der *Sturmsee* ein

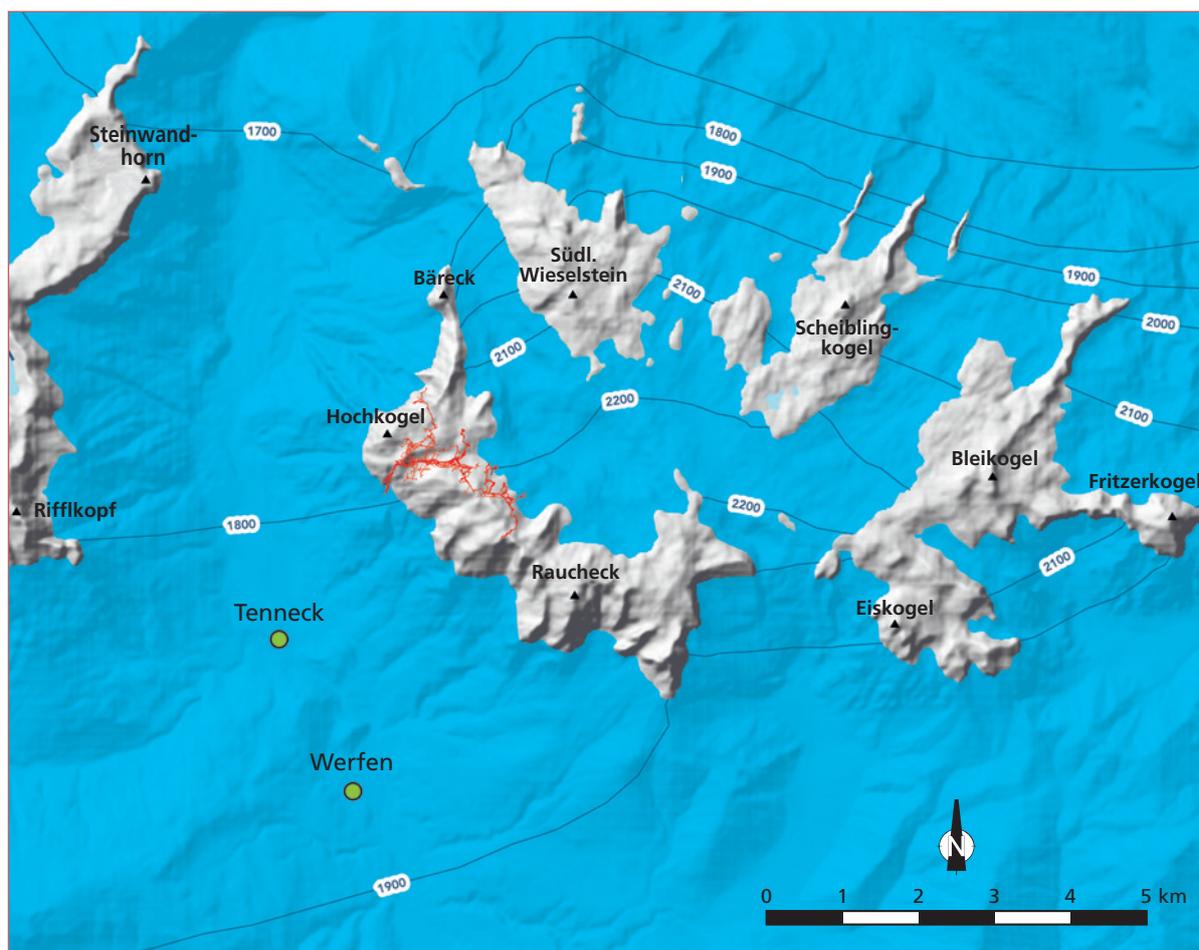


Abb. 6: Rekonstruktion des Tennengebirges zur Zeit des Hochglazials vor rund 25.000 Jahren und Verlauf der Eisriesenwelt im Untergrund (rot). Die dunkelblauen Linien und die Zahlen geben die Seehöhe der Eisoberfläche an. Verändert nach van Husen (1987).
 Fig. 6: Reconstruction of the Tennengebirge during the Last Glacial Maximum approximately 25,000 years ago. The dark blue lines and the numbers indicate the elevation of the ice surface. Eisriesenwelt is shown in red. Modified after van Husen (1987).

solches Nadelöhr, ebenso wie das *Eistor*, welches noch Anfang des 20. Jahrhunderts nur eine enge horizontale Spalte war. Letztere Engstelle wurde seither durch den Höhlenwind erweitert und die spektakuläre Eiswand des *Mörk-Gletschers* sukzessive weiter zurück verlegt. Würde sich durch exzessives Eiswachstum eine solche Engstelle verschließen, so würde die Bewetterung gestoppt, und es käme zu einer langsamen Erwär-

mung beiderseits des Eisverschlusses. Diese würde zu einem allmählichen Abschmelzen des Eises und in weiterer Folge zu einem erneuten Einsetzen der Bewetterung (=Abkühlung) führen, sobald der Eisverschluss entfernt ist. So manche dynamisch bewetterte alpine Eishöhle weist einen solchen Autozyklus auf, der Jahre bis Jahrzehnte umfasst (z.B. Klappacher & Knapczyk, 1979: 215; Wimmer, 2008, 2019).

HINWEISE AUF GRÖßERE VEREISUNGEN IM PLEISTOZÄN

Vor 11.700 Jahren endete die bislang letzte Kaltzeit des Pleistozäns, die rund 100.000 Jahre währte, und die Nacheiszeit, das Holozän, begann. Diese letzte Kaltzeit, im Alpenraum als Würm-Glazial bezeichnet, bot eine Achterbahn des Klimas mit sehr kalten und trockenen Intervallen, die von mildereren und etwas feuchteren unterbrochen wurden (z.B. Auer et al.,

2014). Die Gletscher der Alpen waren stets größer als im Holozän und reagierten mit Vorstößen bzw. Rückschmelzphasen auf die großen und vielfach abrupt einsetzenden Klimaschwankungen. Gegen Ende des Würm-Glazials, vor rund 25.000 Jahren, erreichte die Vergletscherung der Alpen die größte Ausdehnung. Es ist naheliegend, für diese langen und variabel



Abb. 7: Vermutlich durch Eisdruck abgescherter großer Stalagmit im heute eisfreien Steinernen Wald der Eisriesenwelt.
Fig. 7: Large stalagmite in today's ice-free Steinerner Wald of Eisriesenwelt that was sheared off its base presumably by ice flow.
Foto: Christoph Spötl

kalten Glazialzeiten Eisstände in den alpinen Höhlen anzunehmen, die größer waren als die im Holozän. Die Eisausdehnung dürfte dabei aber nicht eine einfache Funktion der atmosphärischen Abkühlung gewesen sein. Denn die Glaziale waren auch vielfach sehr niederschlagsarme Zeiten und in manchen dieser Phasen bzw. über manchen Höhlen breitete sich Permafrost aus; beide Prozesse reduzieren die Infiltration von Niederschlagswasser in das Karstsystem und bremsen so das Wachstum von Höhleneis. Und während glazialer Maxima, als die Gletscher der Zentralalpen bis über den Alpenrand vorstießen, blockierten Eismassen so manchen Höhleneingang und führten durch Rückstau von Schmelzwasser

zu stark veränderten hydrologischen Bedingungen in den Höhlen.

Der Haupteingang der Eisriesenwelt lag im Würm-Glazial für maximal ein paar Tausend Jahre ebenfalls unter Eis, das der Salzach-Gletscher aus den Hohen Tauern bis in das Salzburger Becken transportierte. Die maximale Eisoberkante wird auf ca. 1800 m rekonstruiert (van Husen, 1987), d.h. etwa 160 m über dem Haupteingang, während der kleine Eingang II im 1838 m knapp darüber lag (Abb. 6).

Hinweise, dass es zum Rückstau von Schmelzwässern während des hochglazialen Eismaximums kam, existieren nicht. Solche Belege findet man in Form von regelmäßig fein geschichteten Höhlenlehmen z.B. im

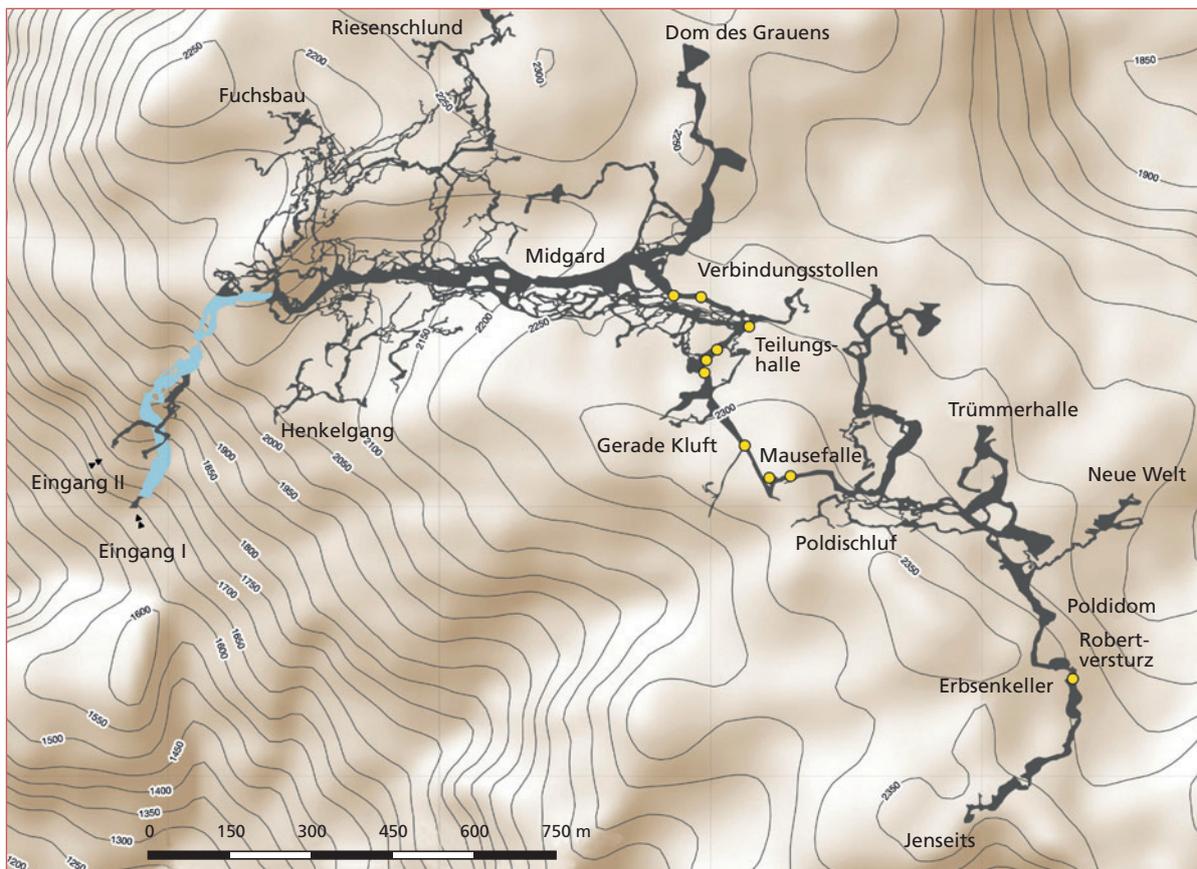


Abb. 8: Übersichtsplan der Eisriesenwelt (unter Weglassung einer Fortsetzung Richtung Norden) mit dem Eisteil (vereinfacht durchgängig hellblau) und den Vorkommen von grobkristallinen kryogenen Höhlenkarbonaten (gelbe Punkte), die frühere Eisareale im ausgehenden Pleistozän dokumentieren. Die Topografie über der Höhle ist durch Schattierung und 50-m-Höhenlinien angezeigt.

Fig. 8: Overview map of Eisriesenwelt (excluding a branch extending further north) showing the ice-bearing part (simplified and light blue) and the occurrences of coarse crystalline cryogenic cave carbonates (yellow dots), which document ice deposits during the Upper Pleistocene. The topography above the cave is indicated by the shading and by 50 m isohypsies.

Berger-Platteneck-Höhlensystem am Nordwestrand des Tennengebirges (Audra, 2002) oder in der Entrischen Kirche im Gasteinertal.

Sucht man in der speläologischen Fachliteratur nach Kriterien, ob ein Höhlenraum in der Vergangenheit perennierendes, d.h. ganzjähriges Höhleneis aufwies, so findet man zweierlei: Hinweise auf Deformation durch Eisbewegung und kryogene Höhlenkarbonate. Zu ersteren zählen z.B. massenhaft in einer gewissen Höhe abgebrochene Stalaktiten, sowie Stalagmiten, welche nahe ihrer Basis abgesichert sind, und Sinter- oder Gesteinsstücke, die an Höhlenwänden angesintert sind. Detaillierte Beobachtungen stammen aus etlichen Höhlen in Mitteleuropa (z.B. Kempe et al., 2009; Orvošová et al., 2012) sowie aus einigen alpinen Höhlen. Aus dem Eisrohrhöhle-Bammelschacht-System der Reiteralm (Wisshak et al., 2013) und aus den Obir Tropfsteinhöhlen (unveröff. Daten der Verfasser) sind Belege für durch Eisdruck deformierte Stalagmiten be-

kannt. In mehreren Höhlenteilen der Hirschgrubenhöhle (Hochschwab) sind massive Tropfsteine umgestürzt, was auf Frostvorgänge und/oder Eisbewegungen zurückgeführt wird (Plan et al., 2019). In der Dachstein-Mammuthöhle oberhalb der *Sesamwand* findet sich ein gut 1 m hoher Stalagmit, dessen oberer Teil vermutlich durch Eisdruck abgesichert ist (Plan & Xaver, 2010: 21). In der Eisriesenwelt gibt es nur stellenweise Sinterbildungen; der bekannteste Bereich mit sehr großen Stalagmiten ist der *Steinerne Wald* im mittleren Abschnitt der Höhle. Es fällt auf, dass diese fossilen kegelförmigen Stalagmiten von ihrer Basis abgesichert, z.T. umgestürzt und von Bruchlinien durchzogen sind (Abb. 7). Die Altersbestimmung eines dieser bis zu 3 m hohen Stalagmiten scheiterte seinerzeit (Frisch et al., 2000). Nachdem mittels kryogener Höhlenkarbonate nun belegt werden kann, dass an den *Steinernen Wald* angrenzende Höhlenteile früher vereist waren (s.u.), ist es wahrscheinlich, dass die gro-



Abb. 9: Grobkristalline kryogene Höhlenkarbonate (CCC_{coarse}) in tagfernen Abschnitten der Eisriesenwelt. **A:** Sandartige Anhäufung von weißen Kristallen vor der Geraden Klufft. Bildbreite 6,5 cm. **B:** Kugelige und hantelähnlich verwachsene Partikel von der Teilungshalle. Zeichenstift als Maßstab. **C:** Halbkugelige und länglich-flache Formen. Erbsenkeller. Durchmesser der größeren erbsenähnlichen Halbkugeln ca. 1 cm. **D:** 5 x 3 cm messendes großes Aggregat aus zusammengewachsenen kugeligen Formen aus dem mittleren Abschnitt der Geraden Klufft.

Fig. 9: Coarse crystalline cryogenic cave carbonates (CCC_{coarse}) in the interior parts of Eisriesenwelt. **A:** Sandy accumulation of white crystals before Gerade Klufft. Width of image 6.5 cm. **B:** Spherical and dumbbell-shaped particles from Teilungshalle. Pen for scale. **C:** Hemispherical and elongated forms from Erbsenkeller. The larger pea-shaped particles are about 1 cm in diameter. **D:** Large 5 x 3 cm aggregate of spherical forms from the middle part of Gerade Klufft. Fotos: Christoph Spötl

ßen Stalagmiten durch Eisdeformation abgesichert und teilweise umgestürzt wurden.

Das zweite Kriterium um das einstige Vorhandensein von Höhleneis nachzuweisen, sind Minerale bzw. Kristalle, die sich in diesem Eis bilden und von denen schon die Rede war: kryogene Höhlenkarbonate. Neben den CCC_{fine} gibt es eine grobkristalline Variante, im Englischen *coarse crystalline cryogenic cave carbonates* (CCC_{coarse}) genannt, die sich nach gängigem Verständnis in sehr langsam zufrierenden Wasserblasen im Höhleneis bilden, welche ihrerseits durch Tropfwasser gebildet werden (Žák et al., 2018). Die Prozesse ihrer Bildung sind noch nicht restlos geklärt, denn diese Bildungen wurden noch nie *in statu nascendi* beobachtet. CCC_{coarse} Kristalle und Kristallaggregate sind

mm- bis maximal wenige cm groß und können – im Gegensatz zu CCC_{fine} – mit der U-Th Methode altersbestimmt werden.

Untersuchungen von CCC_{coarse} in alpinen Höhlen haben erst vor wenigen Jahren begonnen; gewiss wurden und werden diese unscheinbaren Kristalle mancherorts übersehen. Eine erste Übersicht für Österreich boten Pavuza & Spötl (2017). Im Zuge einer noch nicht abgeschlossenen Studie wurde in den heute eisfreien inneren Bereichen der Eisriesenwelt gezielt nach CCC_{coarse} gesucht. Ein Hinweis auf das Vorkommen dieser Speläotheme existiert in Form eines Fotos im Salzburger Höhlenbuch, das rund 1 cm große halbkugelige Minerale unter dem Namen „Erbsensinter (Kern Aragonit)“ zeigt (Klappacher & Haseke-

Knapczyk, 1985: 198). Der Fundort dieser eigenartigen Bildungen, die an Erbsen erinnern, ist der gleichnamige *Erbsenkeller* kurz vor dem *Jenseits*, einem der tagfernen Abschnitte dieser Höhle (Abb. 8).

Im Zuge unserer Untersuchungen konnte das Vorkommen im *Erbsenkeller* verifiziert werden, und auch in anderen Teilen wurden diese Speläotheme gefunden. Es zeigte sich, dass es selbst für das geübte Auge zuweilen schwierig ist, CCC_{coarse} in der Höhle sicher anzusprechen. Erst die Analyse im Labor (die Werte der stabilen Isotope des Kohlen- und Sauerstoffs) gibt letztlich die Bestätigung. Abbildung 8 zeigt den aktuellen Stand der Verbreitung von CCC_{coarse} in den eisfreien Abschnitten der Eisriesenwelt. Die zehn Stellen befinden sich alle in der östlichen Hälfte der Höhle und häufen sich zwischen *Verbindungsstollen* und *Mausefalle*.

Betrachtet man die CCC_{coarse} der einzelnen Fundpunkte näher, so weisen diese durchaus unterschiedliche makroskopische Formen auf. Es finden sich neben halbkugeligen auch kugelige Formen mit einer markanten Eindellung, hantelartig verwachsene Formen, rhombische Kristalle und Aggregate aus zusammengewachsenen kleineren Kugeln (Abb. 9).

Die mit Abstand größten Formen wurden zwischen der *Teilungshalle* und dem Beginn der *Geraden Kluft* gefunden, und sind Aggregate von mehreren cm Größe, bestehend aus kugeligen Komponenten. Alle untersuchten Formen bestehen aus Calcit, auch die im Salzburger Höhlenbuch abgebildeten aus dem *Erbsenkeller*. In einer einzigen Probe wurden unter dem Elektronenmikroskop winzige halbkugelige Aufwüchse von Aragonit auf Calcit festgestellt (und mittels Raman-Spektroskopie verifiziert).

Die Untersuchung mit der U-Th-Methode ergab, dass die zehn Vorkommen nicht alle zur selben Zeit gebildet wurden. Das älteste bislang gefundene Vorkommen mit etwa 73.000 Jahren liegt in der *Geraden Kluft*. Proben aus dem *Verbindungsstollen* sind rund 54.000 und 13.300 Jahre alt. Die „Erbsen“ des *Erbsenkellers* weisen ein Alter von rund 13.500 Jahren auf. Die restlichen Lokalitäten ergaben meist Alter zwischen etwa 13.300 und 12.400 Jahren. Es gibt auch Hinweise, dass an ein und derselbe Stelle CCC_{coarse} Partikel unterschiedlichen Alters vorkommen. So wurden in einem Vorkommen in der *Geraden Kluft* drei unterschiedlich alte Generationen festgestellt. Das bedeutet, dass an manchen Stellen in der fernen Vergangenheit mehrfach ein Eiskörper existierte, in dem es zu Tau-Frier-Prozesse gekommen ist.

Die zehn Fundpunkte liegen in Bereichen, in denen die Lufttemperatur heute zu warm für perennierendes Eis ist. Unpublizierte Messwerte der Autoren zeigen eine generelle Abnahme der winterlichen Abküh-

lung (eine zunehmende Dämpfung) mit der Entfernung vom (unteren) Eingang und eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur in derselben Richtung. Ab dem *Poldischluf* ist der Jahresgang kaum mehr in den Messungen nachzuweisen und mit stabilen 1,8 °C ist der *Robertversturz* kurz vor dem *Jenseits* der relativ wärmste (gemessene) Bereich der Höhle. Die Altersbestimmungen der CCC_{coarse} belegen erstmals, dass auch innere Bereiche der Eisriesenwelt einst zeitweise eisführend waren und dass es dort um gut 2 °C kälter war als heute. Das passt zu der Beobachtung, dass die durch CCC_{coarse} belegten Alter allesamt in Zeitintervalle des Würm-Glazials fallen, von denen man aus regionalen Paläoklimadaten weiß, dass das Klima kälter als heute war. Interessant ist eine Häufung der Werte, die in die sogenannte Jüngere Dryas-Zeit fallen. Diese letzte Kaltphase unmittelbar vor Beginn des Holozäns begann vor etwa 12.900 Jahren und endete vor 11.700 Jahren. Damals wies der mittlere Abschnitt der Eisriesenwelt zwischen *Teilungshalle* und *Mausefalle* offenbar ausgedehnte Eisbereiche auf. Dass diese jüngste Kaltphase in den CCC_{coarse} Funden so prominent ist mag auch damit zusammenhängen, dass CCC_{coarse} älterer Eisstände über die Jahrtausende durch Schmelz- oder Tropfwasser weggespült oder durch Deckenbrüche begraben wurden.

Es fällt weiters auf, dass kein Datum in die Zeit um 25.000 Jahre vor heute fällt, als die Gletscher der Alpen ihre größte Ausdehnung erreichten. Es ist davon auszugehen, dass die Höhle, deren Eingang damals mit Ferneis des Salzach-Gletschers verschlossen war, ausgedehnte Eisbereiche hatte. Das sehr kalte Klima dürfte zu einer gegenüber der Jüngeren Dryas-Zeit noch größeren Abkühlung der tagfernen Bereiche geführt haben; unter diesen Bedingungen können sich jedoch keine CCC_{coarse} bilden. Erst mit der rapide einsetzenden Klimaverbesserung um 14.700 Jahre vor heute erwärmten sich Höhlenteile lokal auf 0 °C, einige der analysierten Proben datieren genau dieses Ereignis.

Keine der CCC_{coarse} Funde wurden im *Midgard* getätigt, in dessen westlichem Abschnitt noch Mitte des 20. Jahrhunderts ein größeres Eisvorkommen bestand (s.o.). Das könnte darin begründet sein, dass CCC_{coarse} nach gängigem Verständnis nur unter sehr stabilen höhlenmeteorologischen Bedingungen entstehen. Anderenfalls bilden sich CCC_{fine} . Der *Midgard* ist die Hauptarterie der Bewetterung der Höhle und weist auch heute einen deutlichen Jahresgang mit Sommerwerten um +0,5 °C und Winterminima von –3 bis –5 °C auf (am Messpunkt bei der ehemaligen Eisfigur *Baldur*, unpublizierte Messdaten).

Und schließlich ist noch festzuhalten, dass keine der

Altersdatierungen in das Holozän fällt. Falls sich dieses Bild durch weitere Messungen erhärtet spricht es klar dafür, dass während Warmzeiten (wie dem Holozän) die Dauereiszone auf den tagnahen Abschnitt bis maximal *Eispalast* und *U-Tunnel* beschränkt war (mit nicht unbeträchtlichen Schwankungen innerhalb dieser Zone wie anhand der Radiokarbonaten oben gezeigt). Während der langen Glazialperioden hingegen waren weite Teile des 40 km langen Höhlensystems um mindestens ein paar Grad kälter und viele Bereiche dort, wo es Wasserzutritte gab, eisführend. Die in Ausarbeitung befindlichen Daten der *CCC_{coarse}*

erlauben somit erstmals einen zeitlich genauen Blick in die langfristige Vereisungsdynamik einer großen dynamisch bewetterten alpinen Höhle. Das Bild wird unvollständig bleiben, da erstens Spuren älterer Eisstände tendenziell unterrepräsentiert sind, zweitens *CCC_{coarse}* beim Abschmelzen der Eiskörper oder später durch Tropfwasser weggespült bzw. unter herabgebrochenen Blöcken begraben sein können, drittens nicht überall dort, wo es in der Vergangenheit perennierendes Eis gab, sich auch *CCC_{coarse}* bildeten, und schlussendlich nur dort Eiskörper wachsen konnten, wo es einen Wasserzutritt gab.

ZUSAMMENFASSUNG UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG

Die neuen Daten basierend auf den kryogenen Karbonaten zeichnen das Bild einer Höhle, die während des letzten Glazials selbst in ihrem innersten Teilen Vereisungsbereiche aufwies. Mit Beginn des Holozäns dürfte der Eisbereich ungefähr auf den heutigen Zustand geschrumpft sein, wobei in der ersten Hälfte des Holozäns dieser vermutlich noch deutlich kleiner war. Das älteste Eis im heutigen Schauteil dürfte etwa 5000 Jahre alt sein (und damit aus der Zeit von Ötzi stammen), jenes, das am *Mörk-Gletscher* aufgeschlossen ist, maximal 2500 Jahre in seinem unteren Abschnitt. Im vergangenen Jahrhundert erfuhren einzelne Abschnitte der Schauhöhle zum Teil beträchtliche Veränderungen ihres Vereisungsgrades, die sowohl natürliche (Klimaschwankungen, Eisrückgang an Engstellen durch Eisverdunstung) wie menschengemachte Ursachen (Unterbindung des Ausströmens der Höhlenluft im Sommer, Erweiterung von Engstellen) hatten. Insgesamt hat sich die Manipulation der Höhlenbewetterung in der warmen Jahreszeit förderlich auf die Massenbilanz des Eises ausgewirkt.

Während die Lufttemperatur in den Alpen seit der Mitte des 19. Jahrhunderts um rund 2 °C angestiegen ist (Auer et al., 2014) und diese Erwärmung in den

letzten Dekaden noch zugenommen hat, zeigte die Eisriesenwelt keine deutliche Reaktion, sowohl was die Höhlenlufttemperatur (Thaler, 2008), als auch was die Eisdynamik angeht. Im Gegensatz zu kleineren Eishöhlen besitzt die Eisriesenwelt erstens „einen hohen Kamin“ in Form des Tennengebirges, wo auf rund 2200 m der oder die oberen Eingänge vermutet werden. Die rund 500 m messende Vertikaldifferenz zum Eingangsportale sorgt für eine effiziente Bewetterung, sprich Kühlung, im Winter. Der ausgedehnte, etwa 24.000 m² umfassende Eisteil wirkt zweitens als thermischer Puffer gegen die sommerliche Erwärmung, die hauptsächlich über den Eintrag latenter Wärme in Form von Regenwasser erfolgt. Die Eisriesenwelt zählt somit zu jenen Eishöhlen der Ostalpen, die ob ihrer Höhenlage, Größe und Bewetterung eine vergleichsweise hohe Resilienz gegenüber der prognostizierten atmosphärischen Erwärmung aufweisen. Rückgänge des Eises als verzögerte Reaktion auf die Klimaerwärmung sind insbesondere in den rückwärtigen Teilen der Schauhöhle zu erwarten, in denen die winterliche Abkühlung am schwächsten und das Eis daher nahe am Schmelzpunkt ist.

DANK

Fritz Oedl, Alois Rettenbacher und Siegfried Kaml haben unsere langjährigen Forschungsarbeiten mit großem Interesse und tatkräftig unterstützt. Walter Klappacher stellte Bildmaterial aus dem Nachlass von Gustave Abel zur Verfügung und Peter Pointner einen aktuellen Übersichtsplan. Teile dieser Arbeiten wurden von Projekten der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Programm Alpenforschung (AUSTRO*ICE*CAVES*2100), vom Fond zur Förderung der

wissenschaftlichen Forschung, FWF P318740, und von der Tiroler Wissenschaftsförderung, F.16947/5-2019, gefördert. Wolfgang Schöner und Michael Behm begutachteten den Artikel und gaben nützliche Hinweise.

Diese Publikation ist posthum Dietmar Wagenbach (ehemals Universität Heidelberg, † 2014) gewidmet, der mit großem Engagement am Eisbohrkernprojekt (AUSTRO*ICE*CAVES*2100) beteiligt war.

LITERATUR

- Abel, O. (1965): Veränderungen am Höhleneis der Eisriesenwelt (Salzburg). – *Die Höhle*, 16: 105–106.
- Abel, O. (1960): Veränderungen am Volumen des Höhleneises in Salzburger Höhlen. – *Die Höhle*, 11: 102–103.
- Abel, G. (1955): Höhleneismessungen in den Jahren 1924–1953. – *Mitt. Höhlenkomm. Bundesministerium f. Land- und Fortwirtschaft*, 1953: 36–40.
- Achleitner, A. (1995): Zum Alter des Höhleneises in der Eisgruben-Eishöhle im Sarstein (Oberösterreich). – *Die Höhle*, 46: 1–5.
- Audra, P., Quinif, Y. & Rochette, P. (2002): The genesis of the Tennengebirge karst and caves (Salzburg, Austria). – *J. Cave Karst Stud.*, 64: 153–164.
- Auer, I., Foelsche, U., Böhm, R., Chimani, B., Haimberger, L., Kerschner, H., Koinig, K.A., Nicolussi, K. & Spötl, C. (2014): Vergangene Klimaänderung in Österreich. – In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Wien (Österreichische Akademie der Wissenschaften), 227–300.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Merzalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. & Niepova, E. (2007): HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. – *Inter. J. Climatol.*, 27: 17–46.
- Beckert, R. (2015): Erstellung eines virtuellen Durchflugs der Eisriesenwelt, Werfen/Österreich, unter Verwendung terrestrischer Laserscannerdaten und digitaler Farbaufnahmen zur Texturierung sowie Analyse der Eisdickenveränderungen für ausgewählte Untersuchungsgebiete innerhalb der Eishöhle. – Unveröff. Masterarbeit TU Dresden.
- Bortenschlager, I. & Bortenschlager, S. (1981): Pollenanalytischer Nachweis früher menschlicher Tätigkeit in Tirol. – *Veröff. Tiroler Landesmuseum Ferdinandeum*, 61: 5–12.
- Buchroithner, M.F. & Gaisecker, T. (2020): Ice surface changes in Eisriesenwelt (Salzburg, Austria) based on LIDAR measurements between 2017 and 2020. – *Die Höhle* (dieser Band).
- Feng, Z., Bohleber, P., Ebser, S., Ringena, L., Schmidt, M., Kersting, M., Hopkins, P., Hoffmann, H., Fischer, A., Aeschbach, W. & Oberthaler, M.K. (2019): Dating glacier ice of the last millennium by quantum technology. – *PNAS*, 116: 8781–8786.
- Frisch, W., Kuhlemann, J., Dunkl, I., Székely, B., Vennemann, T. & Rettenbacher, A. (2000): Dachstein-Altfläche, Augenstein-Formation und Höhlenentwicklung – die Geschichte der letzten 35 Millionen Jahre in den zentralen Nördlichen Kalkalpen. – *Die Höhle*, 53: 1–37.
- Fritz, A. (1977): Pollenanalytische Untersuchungen von Alteisproben. – *Carinthia II*, 167/87: 217–226.
- Gressel, W. (1958): Zur Bewetterung der Eisriesenwelt. – *Die Höhle*, 9: 36–37.
- Gressel, W. (1955): Zur Dynamik in alpinen Höhlen. – *Die Höhle*, 6: 67–71.
- Hauser, E. & Oedl, R. (1923): Die große Eishöhle im Tennengebirge (Salzburg). (Eisriesenwelt). V. Eisbildungen und meteorologische Beobachtungen. – *Speläol. Jb.*, 4: 17–47.
- Hauser, E. & Oedl, R. (1926): Eisbildungen und meteorologische Beobachtungen. – In: Angermayer, E., Asal, A., Czörnig-Czernhausen, W., Hauser, E., Lehmann, O., Oedl, R., Pia, J. & Wettstein-Westersheim, O.: *Die Eisriesenwelt im Tennengebirge* (Salzburg). – *Speläol. Monogr.*, 6: 77–105, Wien (Verlag Speläol. Inst.).
- Hausmann, H. & Behm, M. (2011): Imaging the structure of cave ice by ground-penetrating radar. – *The Cryosphere*, 5: 329–340.
- Behm, M. & Hausmann, H. (2007): Eisdickenmessungen in alpinen Höhlen mit Georadar. – *Die Höhle*, 58: 3–11.
- Hoinkes, G. (1968): Glacier variation and weather. – *J. Glaciol.*, 7: 3–19.
- Kaidong, A. (2018): Ice basement mapping of Eisriesenwelt Cave with Ground Penetrating Radar. – Unveröff. Masterarbeit, TU Dresden.
- Kempe, S., Bauer, I. & Dirks, H. (2009): Glacial cave ice as the cause of wide-spread destruction of interglacial and interstadial speleothem generations in Central Europe. – *Proceedings 15th Intern. Congr. Speleol.*, Kerrville, Texas, July 19–26, 2009, 2: 1026–1031.
- Klappacher, W. & Haseke-Knapczyk, H. (1985): *Salzburger Höhlenbuch*, Bd. 4, Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg).
- Klappacher, W. & Knapczyk, H. (1979): *Salzburger Höhlenbuch*, Bd. 3, Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg).
- Kollarz, O. (1968): Alpenvereinsführer durch das Tennengebirge. – München (Bergverlag Rother).
- Lieb, G.K., Slupetzky, H. (2011): *Die Pasterze*. – Salzburg (Pustet).
- May, B., Spötl, C., Wagenbach, D., Dublyansky, Y. & Liebl, J. (2011): First investigations of an ice core from Eisriesenwelt cave (Austria). – *The Cryosphere*, 5: 81–93.
- Milius, J. & Petters, C. (2012): Eisriesenwelt – from laser scanning to photo-realistic 3D model of the biggest ice cave on earth. – In: Jekel, T., Car, A., Strobl, J., Griesebner, G. (Hrsg.): *GI-Forum 2012: Geovisualisation, Society and Learning*. – Berlin (Wichmann), 513–523.
- Obleitner, F. & Spötl, C. (2011): The mass and energy balance of ice within the Eisriesenwelt cave, Austria. – *The Cryosphere*, 5: 245–257.
- Oedl, R. (1922): Die große Eishöhle im Tennengebirge (Salzburg). (Eisriesenwelt.). II. Vermessung. – *Berichte der Bundeshöhlenkommission* (Vierteljahreshefte für theoretische und praktische Höhlenkunde), 3(1/2): 5–30.
- Oeggel, K. (2013): Die Vegetations- und Siedlungsgeschichte im mittleren Unterinntal seit dem Neolithikum. – In: Schaffer, V. (Red.): *Cuprum Tyrolense. 5550 Jahre Bergbau und Kupferverhüttung in Tirol*, 29–54, Brixlegg (Montanwerke Brixlegg AF).
- Orvošová, M., Vlček, L., Holúbek, P. & Orvoš, P. (2012): Frost and cave ice action as a cause of speleothem destruction during glacial: examples from selected caves in Slovakia. – *Slovensky Kras, Acta Carsologica Slovaca*, 50: 157–172.
- Pavuzá, R. & Spötl, C. (2017): Neue Daten zu Vorkommen und Entstehung kryogener Calcite in ostalpinen Höhlen. – *Die Höhle*, 68: 100–106.

- Petters, C., Milius, J. & Buchroithner, M.F. (2011): Eisriesenwelt: terrestrial laser scanning and 3D visualisation of the largest ice cave on earth. – Proceedings European LiDAR Mapping Forum, Salzburg.
- Plan, L., Spötl, C. & Bryda, G. (2019): Speläologie und Geologie der Hirschgrubenhöhle am Hochschwab (Steiermark). – Die Höhle, 70: 79–93.
- Plan, L. & Xaver, A. (2010): Geomorphologische Untersuchung und genetische Interpretation der Dachstein-Mammuthöhle (Österreich). – Die Höhle, 61: 18–38.
- Reischer, M., Bichler, B., Spötl, C., Höfer-Öllinger, G. & Wyhlidal, S. (2015): Karst hydrogeology of the Untersberg massif and its interaction with the porous aquifer in the adjacent Salzburg Basin. – Austrian J. Earth Sci., 108: 68–81.
- Schöner, W., Weyss, G. & Mursch-Radlgruber, E. (2011): Linkage of cave-ice changes to weather patterns inside and outside the cave Eisriesenwelt (Tennengebirge, Austria). – The Cryosphere, 5: 603–616.
- Spötl, C. (2008): Kryogene Karbonate im Höhleneis der Eisriesenwelt. – Die Höhle, 59: 26–36.
- Spötl, C. & Pavuza, R. (2016): Eishöhlen und Höhleneis. – In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz (OÖ Landesmuseum): 139–154.
- Spötl, C., Fohlmeister, J., Cheng, H. & Boch, R. (2016): Modern aragonite formation at near-freezing conditions in an alpine cave, Carnic Alps, Austria. – Chem. Geol., 435: 60–70.
- Thaler, K. (2008): Analyse der Temperaturverhältnisse in der Eisriesenwelt-Höhle im Tennengebirge anhand einer 12-jährigen Messreihe. – Unveröff. Masterarbeit Univ. Innsbruck.
- Wimmer, M. (2019): 25 Jahre Eis- und Höhlenklimaforschung im Schönberg-Höhlensystem. – Mitt. Landesvereins f. Höhlenkunde in Oberösterreich, 65/124: 17–25.
- Wimmer, M. (2008): Eis- und Lufttemperaturmessungen im Schönberg-Höhlensystem (1626/300) und Modellvorstellungen über den Eiszyklus. – Die Höhle, 59: 13–25.
- Wisshak, M., Straub, R., Jantschke, H. & Correa, M.L. (2013): 25 Jahre Exploration des Eisrohrhöhle-Bammelschacht-Systems (Reiteralm, Berchtesgadener Alpen, D). – Die Höhle, 64: 90–105.
- van Husen, D. (1987): Die Ostalpen und ihr Vorland in der letzten Eiszeit (Würm). – Karte 1:500.000, Wien (Geol. Bundesanstalt).
- Žák, K., Onac, B.P., Kadebskaya, O., Filippi, M., Dublyansky, Y. & Luetscher, M. (2018): Cryogenic mineral formation in caves. – In: Perşoiu & S.-E. Lauritzen (Hrsg.): Ice Caves. – Amsterdam (Elsevier), 123–162.
- Zemp, M., Paul, F., Hoelzle, M. & Haeberli, W. (2008): Glacier fluctuations in the European Alps 1850–2000: an overview and spatio-temporal analysis of available data. – In: Orlove, B., Wiegandt, E. & Luckman, B.H. (Hrsg.): Darkening Peaks – Glacial Retreat, Science and Society. – Berkeley (University of California Press): 152–167.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 2020

Band/Volume: [71](#)

Autor(en)/Author(s): Spötl Christoph, Koltai Gabriella, Racine Tanguy

Artikel/Article: [Einblicke in die Vereisungsgeschichte der Eisriesenwelt \(Tennengebirge\) 45-61](#)