Genetische Interpretation der Eisriesenwelt (Tennengebirge)

ZUSAMMENFASSUNG

Bereits vor 100 Jahren erfolgte eine systematische wissenschaftliche Bearbeitung der Eisriesenwelt (ERW) im Rahmen einer Expedition der Akademie der Wissenschaften. Danach wurde es relativ ruhig um die geowissenschaftliche Erforschung der ERW, obwohl sie bis 1985 mit 42 km die längste Höhle Österreichs war. Dieser Beitrag basiert auf einer Kartierung von Raumformen sowie geologischen und sedimentologischen Beobachtungen, was eine Interpretation der Entstehung dieser Höhle ermöglicht.

Die meisten Teile sind vorwiegend horizontal und zwischen 1650 und 1800 m Seehöhe entwickelt, wobei großräumige Gänge mit Querschnitten über 100 m² von kleinräumigeren Labyrinthen flankiert werden. Obwohl das Gestein vorwiegend gebankter Dachsteinkalk ist, sind Schichtfugen für die Anlage der Gänge unbedeutend, und fast alle Gangabschnitte sind störungsgebunden. Einige Teile im Norden und Osten sind im Dachsteindolomit ausgebildet.

Die ERW ist durch fließendes Wasser vorwiegend unter (epi)phreatischen Bedingungen nahe dem ehemaligen Vorflutniveau entstanden. Ein Vergleich mit anderen Höhlen und Entstehungsmodellen macht eine Bildung im Oberen Miozän bis Pliozän (vor grob 5 Millionen Jahren) wahrscheinlich. Vadose Passagen bzw. eine Überprägung durch vadose Gerinne sind selten. Fließfacetten ergeben relativ konsistent eine generelle Paläofließrichtung während der (epi)phreatischen Phase nach Nordosten. Viele Abschnitte zeigen Spuren ehemaliger Sedimentverfüllung wie paragenetische Deckenkarren, Sedimentreste an den Wänden und Sinterböden über ehemaligen Sedimentfüllungen. Die Sedimente hatten aber nur in wenigen Gängen Auswirkungen auf die Querschnitte (Ausbildung paragenetischer Canyons). Sie führten eher zur vollständigen Verstopfung der Profile und zur Ausbildung von Bypässen. So können auch die verwinkelten Labyrinthe erklärt werden. Ein karbonatreicher Ton „Heller Höhlenton", der in vielen kalkalpinen Höhlen häufig ist und deren Charakter deutlich prägt, fehlt in der ERW.

Die heutigen Höhleneingänge stellen Verschnitte der deutlich älteren Höhle mit der geologisch jungen Hangoberfläche des Salzachtals dar. Das Wasser floss im Schauhöhlenteil bergauf, dieser war Teil eines zumindest 140 m tiefen Siphons. Die aus Fließfacettenlängen und Gangquerschnitten ermittelten ehemaligen Durchflussmengen während Hochwässern lagen in der Größenordnung von 100 m³/s. Dies, die Fließrichtung und die Lage am Südrand der Kalkalpen legen eine Speisung durch Flüsse aus den Zentralalpen nahe.

ABSTRACT

Genetic interpretation of Eisriesenwelt (Tennengebirge)

Already one hundred years ago, systematic scientific investigations of Eisriesenwelt (ERW) succeeded in the frame of an expedition of the Academy of Sciences in Vienna. Subsequently only little geoscientific research was carried out in ERW, although with 42 km, it was the longest cave in Austria until 1985. The present report is based on mapping of cave passage morphologies, as well as geological and sedimentological observations, which allows for an interpretation of the cave development.

Most parts are fairly horizontal and developed between 1650 and 1800 m a.s.l., whereby large passages with cross-sectional areas greater than 100 m² are flanked by extensive mazes of smaller dimensions.

Lukas Plan
Karst- und Höhlen-Arbeitsgruppe am Naturhistorischen Museum Wien
Museumsplatz 1/10/4
1070 Wien
lukas.plan@nhm-wien.ac.at

Eva Kaminsky
eva.kaminsky@nhm-wien.ac.at

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

Gabriella Koltai
gabriella.koltai@uibk.ac.at

Eingelangt: 7.4.2021
Angenommen: 8.5.2021

Although the rock is predominantly bedded Dachstein limestone, bedding planes had little control on the development of the passages, with almost all sections being guided by faults. Several parts in the north and east were formed in Dachstein dolomite.
The ERW cave system was formed by flowing water predominantly under (epi)phreatic conditions, close to the former base level. A comparison with other caves and speleogenetic models makes a formation in the Upper Miocene to Pliocene (roughly 5 million years ago) probable. Vadose passages or passages overprinted by vadose streams are rare. Scallops indicate a fairly consistent general palaeo-flow direction toward the northeast during the (epi)phreatic phase. Many passage profiles exhibit traces of prior sediment infill, such as paragenetic ceiling channels, sediment remains in wall niches and flowstone floors above former sediments. These sediments, however, affected passage morphology (development of paragenetic canyons) only in a few galleries. They more likely led to a complete blockage of the profiles and the formation of bypasses. This can also explain the complex mazes. Carbonate-rich clay deposits, common in other cave systems of the Northern Calcareous Alps and clearly defining their character, are absent in ERW.
The present cave entrances represent intersections of the clearly older cave with the geologically young slope surface of the Salzach valley. The water flowed uphill in the show-cave part and this was part of a siphon at least 140 m deep. The former flow rates during floods determined from scallop lengths and channel cross sections were in the order of 100 m³/s. This, the direction of flow and the location at the southern rim of the Northern Calcareous Alps suggest a feeding by rivers from the Central Alps.

EINLEITUNG

Die Eisriesenwelt (ERW, 1511/24) im Tennengebirge und die Dachstein-Mammuthöhle (DMH, 1547/9) stellen die ersten hochalpinen Riesenhöhlen dar, die Anfang der 1910er-Jahre auf Längen von etlichen Kilometern erkundet und dokumentiert wurden (Klappacher & Haseke-Knapczyk, 1985; Plan & Herrmann, 2010).

Bis dahin kannten die Forscher auf dem Gebiet der Österreichisch-Ungarischen Monarchie ausgedehnte und großräumige Höhlensysteme vorwiegend aus dem Mittelsteirischen, dem Klassischen und dem Mährischen Karst (Saar & Pirker, 1979). Bald wurden Modelle zur Entstehung dieser gewaltigen, in den Nördlichen Kalkalpen (NKA) gelegenen Höhlensysteme aufgestellt, die auch auf die damaligen Vorstellungen der alpinen Landschaftsentwicklung Einfluss hatten und rege diskutiert wurden (z.B. Bock, 1913, Plan & Herrmann, 2010).

Die Eisriesenwelt, die oft als größte Eishöhle der Welt gehandelt wird, ist die besucherstärkste Schauhöhle und mit 42 km Länge das neuntlängste Höhlensystem in Österreich. Es liegen umfangreiche Untersuchungen zum Höhleneis und seiner Entwicklung vor (Spötl et al., 2020). Erstaunlich ist, dass im Gegensatz zur DMH bisher wenig über die Morphologie und Entstehung der ERW publiziert wurde. Die diesbezügliche Literatur beschränkt sich großteils auf die Ergebnisse einer Expedition der Akademie der Wissenschaften in Wien vor 100 Jahren, diverse Beobachtungen und Überlegungen von Höhlenforschern sowie zwei Dissertationen, in denen die ERW nur am Rande behandelt wurde.

In diesem Artikel werden einleitend die bisherigen Untersuchungen und Modellvorstellungen zur Genese der ERW zusammengefasst. Der Hauptteil befasst sich mit morphologischen und sedimentologischen Beobachtungen und Daten, die während sechs Befahrungstagen im Herbst 2020 und Frühjahr 2021 gemacht wurden. Ziel ist die Interpretation dieser Daten entsprechend den aktuellen speläogenetischen Modellvorstellungen, um neue Einblicke in die Entstehungsgeschichte der ERW geben zu können.

BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

Die Entdeckung und Erforschung der ERW ist in Klappacher & Haseke-Knapczyk (1985) ausführlich zusammengefasst. Anfänglich (Machatschek, 1921) wurde die Entstehung analog zur DMH gesehen und Bocks (1913) „Höhlenflusstheorie" eins zu eins angewendet. Dabei wurde von einer Bildung durch große Wassermengen im Bereich des Vorflutniveaus ausgegangen. Neben der Korrosion wurde auch eine „*Ausbohrung des Gesteins durch unter Druck stehendes, rasch fließendes und Geröll führendes Wasser*" angenommen, was Bock (1913: 82) als Eforation bezeichnet. Für eine umfangreiche wissenschaftliche Erforschung organisierte die Akademie der Wissenschaften vom 30.3. bis 8.4.1921 eine großangelegte Expedition. Die Ergebnisse wurden in sieben Fachrichtungen gegliedert in mehreren *Speläologischen Jahrbüchern*

Abb. 1: Die störungsgebundene 0,25 km lange *Gerade Kluft* wurde genetisch unterschiedlich interpretiert.
Fig. 1: Several differing interpretations have been proposed regarding the origin of the 0.25 km-long, fault-controlled Gerade Kluft.
Foto: Tanguy Racine

publiziert (bzw. leicht gekürzt in Angermayer et al., 1926). Im zweiten Teil (Oedl, 1922) ist ein Plan von Walter Freiherr v. Czoerning und Robert Oedl (Forschungsstand 1920) veröffentlicht, wo die meisten Teile bis zum *Tropfsteindom* und Teile der Seitenlabyrinthe, nicht aber die Teile hinter dem *Poldischluf* dargestellt wurden. Im Rahmen dieser Expedition wurden auch geologische Beschreibungen gemacht: Pia (1923) stellte fest, dass die meisten Teile der ERW im undeutlich geschichteten Dachsteinkalk angelegt sind, der mit 25 bis 45° in Richtungen um NNW einfällt. Nur beim *Fledermausgang* und beim Steinmann S vom *Oedl-Dom* seien Linsen aus Dachsteindolomit aufgeschlossen. Weiters machte er Gefügemessungen an den Harnischflächen, die fast ausschließlich Seitenverschiebungen darstellen. Er erkannte, dass fast alle Gänge störungsgebunden sind und die Schichtung keinen Einfluss auf deren Anlage hat. Für die meisten Teile nahm Pia eine Erweiterung durch Wasser an. Eine Ausnahme sah er in der *Geraden Kluft*, die er als *„klaffende tektonische Spalte“* deutete, die später vom Wasser überprägt wurde (1923: 60; Abb. 1). Er beschrieb Augensteinsedimente, die ehemals manche Teile (z.B. *Krapfenlabyrinth*) bis zur Decke erfüllten, sowie die daraus bestehenden kugeligen Konkretionen, die als „*Krapfen*" bezeichnet wurden. Er nahm allerdings an, dass die Augensteinsedimente nicht durch das Wasser während der Höhlenentstehung abgelagert wurden, sondern später durch Schächte vom Plateau eingespült wurden. Weiters stellte er fest, dass die wechselhafte Geschichte von Sedimentation, teilweiser Zementation bzw. Sinterbildung und teilweiser Wiederausräumung Ähnlichkeiten mit der Dachstein-Rieseneishöhle (1547/17) hat.

Lehmann (1922a), ebenfalls ein Teilnehmer der Expedition, gab eine ausführliche Beschreibung der Morphologie und Eisführung. Er versuchte auch, eine Gesetzmäßigkeit zwischen der Anzahl und Verteilung der Schlote und Schächte zu finden und Versturzvorgänge zu berechnen. Neben den vom Versturz überprägten Teilen identifizierte er etliche „*Druckstollen*", die bei ihrer Entstehung gänzlich wassergefüllt waren (z.B. *Wassergang*, *Fuchsgang*). Für einen Teil der Höhle, einen Abschnitt im *1. Verbindungsstollen*, schloss Lehmann (1922a: 89) auf eine „*eindeutige*" Fließrichtung nach SE, indem er die „*Wandnischen*" mit „*Uferwirbeln“* – Formen die heute als Fließfacetten bezeichnet werden – interpretierte. Diese richtungsweisende Methodik stammt von Vergleichen mit Formen in den Salzach- und Lammeröfen (Lehmann, 1922b). Bezüglich der Bildung der *Geraden Kluft* schloss er sich Pia (1923) an (Anm.: obwohl Pias Beitrag später erschien, bezog sich Lehmann [1922a: 93] ausdrücklich auf ihn) und meinte, dass diese „*durch Wasserwirkung in keiner Weise erklärbar*" sei. Die Phase der Wasserführung sah er im Mittelmiozän bzw. Pliozän und jedenfalls schon vor den Eiszeiten beendet. Spätere offene (also vadose) Gerinne nutzten die vorhandenen Gänge nur abschnittsweise und schnitten sich in diese ein wie z.B. im *Canyonlabyrith*. Die Herkunft der quarzreichen Sedimente deutete er wie Pia (1923) als zentralalpin. Lehmann (1922a) erkannte weiters, dass die heutigen Eingänge durch Verschnitt mit dem jüngeren Salzachtal entstanden und dass durch diese kein Wasser ausgetreten ist. Dazu spekulierte er: „*Das Wasser könnte bei genügendem Druck sogar von S her in die damalige Höhle hinein- und in dem Vorläufer der Posselthalle emporgedrungen sein. Wahrscheinlich ist ein solcher Druck aber nicht*" (Lehmann, 1922a: 121).

Ähnlich wie in der DMH sah Biese (1926; siehe auch Plan & Herrmann, 2010) seine „Gebirgsdrucktheorie" auch in der ERW bestätigt. Dabei ging er davon aus, dass Hohlräume aufgrund des vom überlagernden Kalkgestein ausgeübten Drucks verbrechen, wenn die Überlagerung wenige 100 m überschreitet. Biese (1926: 39) räumte aber ein, dass manche Gänge, wie z.B. der *Wassergang*, auch durch Eforation entstanden sein könnten. Wenige Jahre später veröffentlichte er eine umfassende Zusammenschau etlicher Höhlen aus europäischen Karstgebieten (Biese, 1933). Für die ERW gab er eine ausführliche Beschreibung der seit 1921 entdeckten Teile (bis *Robertversturz* und *Diamantenreich II* samt einiger Seitenlabyrinthe). Er argumentierte vehement gegen die Höhlenflusstheorie samt Eforation und postulierte ein Genesemodell, in dem Verbruchvorgänge und vadose Wässer die größte Bedeutung haben.

In einem Vortrag stellte Gustave Abel Vergleiche mit den Flusshöhlen des Klassischen und des Mährischen Karsts an und schloss, dass auch die ERW ähnlich entstanden ist, wobei er der mechanischen Erosion besondere Bedeutung zukommen ließ (Abel, 1952). Er nahm an, dass das Pitschenbergtal am Plateau des Tennengebirges im Tertiär ein aus den Zentralalpen gespeistes Flusstal war (Abb. 2). Darin hätten sich Ponore entwickelt, die das Wasser in Höhlenflüssen nach (N)W durch die ERW zu einem Vorläufer des heutigen Salzachtals leiteten. In der anschließenden Diskussion gab es Zustimmung aber auch Ablehnung zu seinem Modell.

Koppenwallner (1963) vertrat die Theorie, dass die großen Höhlensysteme am S-Rand der Salzburger Kalkalpen das Resultat einer N-gerichteten Entwässerung eiszeitlicher Gletscher seien, die den Bereich zwischen den Tauern und den NKA einnahmen. Auch für die ERW schloss er dies nicht aus, wobei er in

Analogie zur Tantalhöhle ein Bergauffließen des Wassers im Eingangsbereich für möglich hielt.
Trimmel (1967) widersprach der Ansicht, dass sich die ERW durch Wasser nahe dem Vorflutniveau gebildet hätte und nahm Gesteinsunterschiede wie Einlagerungen von Raibler Schichten an, für die er aber keine Belege anführte. In der *Geraden Kluft* sah er einen „*Urhohlraum*", der im Gegensatz zu Lehmann (1922a) schon vor den anderen Teilen als tektonische Spalte entstanden sei. Er räumte jedoch ein, dass die wissenschaftliche Bearbeitung über 40 Jahre nach der Expedition der Akademie der Wissenschaften revisionsbedürftig sei und regte dazu die Gründung einer Arbeitsgemeinschaft an.
In seiner Dissertation über die Karstgenese des Tennengebirges ging Toussaint (1971) auch auf die ERW ein und griff dabei die These Abels (1952) mit den Schwinden im Pitschenbergtal auf. Auch bezüglich der *Geraden Kluft* schloss er sich alten Vorstellungen an, indem er meinte, sie sei „*erst später tektonisch aufgerissen*". Von den Augensteinen nahm Toussaint (1971: 104) an, dass sie nicht nur von der Oberfläche über Schächte eingewaschen worden sind, wie dies Pia (1923) und Winkler-Hermaden (1957) postulierten, sondern „ *z.T. auch von „Höhlenflüssen" direkt eingebracht worden sein*" könnten. Die phreatische Phase ließ er im Oberpannon (grob vor 8 Millionen Jahren) mit der Ausbildung der Längstäler im S der NKA enden und die Hauptentwicklung der Riesenhöhle stellte er ins Mittelpannon.
Audra (1994; großteils publiziert in Audra et al., 2002) befasste sich in seiner Dissertation vorwiegend mit dem Berger-Platteneck-Höhlensystem (1511/162) im Bereich des Bergeralpls im NW des Tennengebirges. Die ERW wurde als typisches Beispiel für eine Höhle des Riesenhöhlenniveaus kurz vorgestellt. Aufgrund der Augensteine und der angenommenen NW-gerichteten Paläofließrichtung (wie diese ermittelt wurde, ist unklar) wurde eine Speisung durch Flüsse aus den Zentralalpen über Ponore am Rand von Poljen angenommen.
Frisch et al. (2002) versuchten Augensteine und Tropfsteine aus dem *Steinernen Wald* mittels kosmogener Nuklide bzw. mit der Uran-Blei-Methode zu datierten. Es konnten zwar keine Alter ermittelt werden, aber eine Ablagerung vor dem Pleistozän für beide Proben wahrscheinlich gemacht werden. Für das Riesenhöhlenniveau nehmen die Autoren aufgrund morphologischer Überlegungen ein obermiozänes bis unterpliozänes Alter an.

LAGE UND ANLAGE DER EISRIESENWELT

Die ERW liegt am SW-Rand des Tennengebirges an der Ostflanke des hier auf 510 m Seehöhe eingeschnittenen Salzachtals. Im Süden erstreckt sich eine aus permoskythischen Wasserstauern (i.W. Werfener Schichten) und mitteltriassischen Kalken und Dolomiten aufgebauten Region, die als Werfener Schuppenzone bezeichnet wird (Pestal et al., 2009). Die Entfernung zur südlich gelegenen Grauwackenzone beträgt knapp über 10 km (Abb. 2).
Eine ausführliche Beschreibung der altbekannten Teile findet sich in Klappacher & Haseke-Knapczyk (1985). Einige seit 2009 entdeckte Teile sind in mehreren Artikeln der Zeitschrift *Atlantis* beschrieben, zuletzt Pointner et al. (2017).
Seit der ursprünglichen Vermessung, die in einem farbigen Plan von Walter Czoernig-Czernhausen, Robert Oedl und Gustave Abel (um 1960) wiedergegeben ist, wird die Länge mit 42 km angegeben. Bei einer Neuvermessung in den 1970er Jahren unter der Leitung von Albert Morocutti sen. wurden neue Teile gefunden, aber nicht alle alten dokumentiert und nur 32 km erfasst. Zusammen mit den Neuentdeckungen und Nachvermessungen der letzten Jahre sind 38,3 km zeitgemäß dokumentiert (Pointner et al., 2017). Der Höhenunterschied beträgt 442 m (+275 m, –167 m) und die horizontale Erstreckung 2,23 km.
Vom *Eingang* in 1657 m Höhe steigt ein meist großräumiger Gang 140 m empor. Der Gang weist Seitenstrecken auf, wobei eine davon zum *Eingang II* führt, der 200 m über dem Eingangsniveau liegt. Er ist großflächig vereist, touristisch erschlossen und führt 0,5 km nach NE zum *Eispalast.* Hier biegt der Hauptgang für 0,8 km nach E und wird nach dem *U-Tunnel* – einem kurzen im Längsschnitt U-förmigen Gangstück – *Midgard* genannt. In diesem bis zu 30 m breiten und oft über 10 m hohen, annähernd horizontalen Gang nehmen ausgedehnte labyrinthische Teile ihren Anfang, wobei die südlich gelegenen wie *Maxilabyrinth* und *Krapfenlabyrinth* in die Tiefe leiten (bis –110 m unter Eingangsniveau). Die nördlichen wie *Röhrenlabyrinth*, *Asgard* und *Canyonlabyrinth* reichen bis +270 m. Im letztgenannten führt der großräumige, erst vor kurzem entdeckte *Hochkogeltunnel* weit nach Norden, wo er 1,5 km von den Eingängen entfernt relativ oberflächennahe endet (Pointner, 2016). Am E-Ende des *Midgards* teilt sich der Hauptast: (1) Ein großräumiger Teil führt 0,4 km nach N, wo er im *Dom des Grauens* an Verstürzen endet. (2) Die *Verbindungs-*

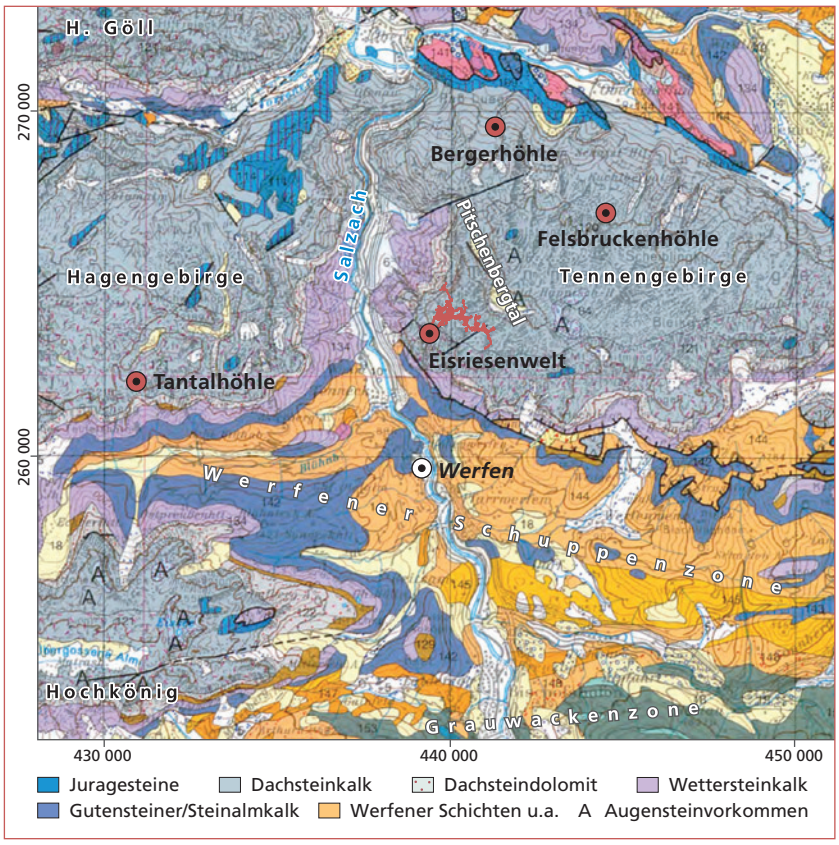


Abb. 2: Geologie der Umgebung der Eisriesenwelt. Die Legende weist nur die für diesen Beitrag relevanten Lithologien aus. Koordinaten: Österr. Bundesmeldenetz, M31; Hintergrund: Geologische Karte von Oberösterreich 1:200.000 (Krenmayr & Schnabel, 2006).
Fig. 2: Geology of the surroundings of Eisriesenwelt. Only the lithological units that are relevant for the article are presented in the legend. Projected coordinate system for Austria (M31); background: geological map of Upper Austria 1:200,000 (Krenmayr & Schnabel, 2006).

stollen I und *II* sowie parallele Labyrinthe leiten zur *Geraden Kluft*, die 0,25 km nach SE bis zur *Mausefalle I* reicht. Von hier führen Gänge (*Kirchendach, Tropfsteintunnel*) mit mehreren Knicken generell nach NNE zum *Tropfsteindom*. In steil nach unten ziehenden Teilen (*Stiller Dom, Mumiencanyon*) wird mit –167 m der tiefste Punkt der ERW erreicht (Pointner et al., 2017). Östlich der *Mausefalle I* führen etwas kleinräumigere labyrinthische Teile (u.a. *Poldischluf, Rutschtunnel*) weiter nach E, wobei im überlagernden *Dämonenlabyrinth* der höchste Punkt der Höhle liegt (+275 m, Pointner et al., 2017). Im *Lawinendom* wird eine eher N-S-orientierte Folge von Gängen und Hallen angefahren. Gegen N ist bald das verstürzte Ende in der *Trümmerhalle* erreicht. Gegen S werden via *Narrenberg, Poldidom* und *Gruberhalle* bis zum tagfernsten Teil, dem *Jenseits*, 0,6 km an horizontaler Entfernung überwunden.

Die großräumigen Teile sind vorwiegend zwischen 1700 und 1800 m Seehöhe angelegt. Ausnahmen bilden der Eingangsbereich, der *Hochkogeltunnel* und die Gänge im E der Höhle, die 50 m tiefer reichen. Großräumige, noch tiefere Teile sind die *Neue Welt* und der *Tiefe Dom*. Tiefe Schachtsysteme fehlen gänzlich. Schlote sind erst teilweise erforscht, wobei der höchste am SE-Ende der *Geraden Kluft* liegt und zumindest 100 m Höhe erreicht (Pointner et al., 2017).

Die ERW ist heute weitgehend hydrologisch inaktiv. Nur wenige relativ unbedeutende Gerinne mit Normalschüttungen im 10er-Sekundenliter-Bereich treten in einigen Schloten, Schächten und Canyons auf. Lokale Tropfwässer sind hingegen häufig.

METHODIK

Diese Studie beruht auf aktuellen Konzepten der Höhlenentstehung, die eine genetische Interpretation von Höhlen aufgrund der Raumformen (Kleinformen, Gangquerschnitte und 3D-Anordnung der Höhle) unter Berücksichtigung des Sedimentinhalts erlauben (Klimchouk et al., 2000; Ford & Williams, 2007; Palmer, 2007). Eine genaue Definition der verwendeten Begriffe, Literaturverweise und methodische Details finden sich in Plan & Xaver (2010). Hier soll nur eine kurze Zusammenfassung gegeben werden.

Von zentraler Bedeutung für die Rekonstruktion der Paläohydrologie sind Fließfacetten (FF; englisch

scallops), da ihre Asymmetrie die Fließrichtung und ihre Länge die Fließrichtung bzw. -geschwindigkeit anzeigen. Weiters ergibt sich aus den Gangquerschnitten die Durchflussmenge bei Hochwässern (Palmer, 2007). Höhlenkarren (*rills,* im Folgenden nur Karren) sind Anzeichen für epiphreatische Bedingungen, also für den Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels. Paragenetische Canyons entstehen, wenn an der Sohle ein wachsender Sedimentkörper lagert und das Profil nur nach oben erweitert wird. Daher kann von einem später freigelegten Profil nicht die Durchflussmenge abgeleitet werden. Paragenetische Deckenkarren (*ceiling channels,* im Folgenden nur Deckenkarren) zeigen, dass das Profil in einer späten Phase fast vollständig mit Sediment verfüllt war und sich Kanäle zwischen dem Sediment und der Decke (oder überhängenden Wänden) ausgebildet haben. Paragenetische Bypässe wiederum sind verwinkelte Röhren, die einen Sedimentverschluss oder -siphon umgehen. Strudeltöpfe (*potholes*) zeigen hohe Fließgeschwindigkeiten, sind aber nicht auf vadose Bedingungen beschränkt.

Weiters wurden Sedimentaufschlüsse grob im Gelände beschrieben. Für die Untersuchung der Mächtigkeit der Sedimentschichten kam ein handbetriebener bis zu 3,5 m verlängerbarer Erdbohrer mit Spiralbohrkopf zum Einsatz.

Zur Orientierung wurden der farbige Plan der alten Vermessung, die Umzeichnung des Morocutti-Plans in Klappacher & Haseke-Knapczyk (1985) sowie etliche Teilpläne aus dem Katasterarchiv der Karst- und Höhlen-Arbeitsgruppe am NHM verwendet. Der elektronische Polygonzug und Detailpläne der seit 2009 entdeckten Teile standen nicht zur Verfügung.

MORPHOLOGISCHE UND GEOLOGISCHE BEOBACHTUNGEN

Die besuchten Höhlenteile und die kartierten Raumformen sind in Abb. 3a und 4 dargestellt.

Geologie

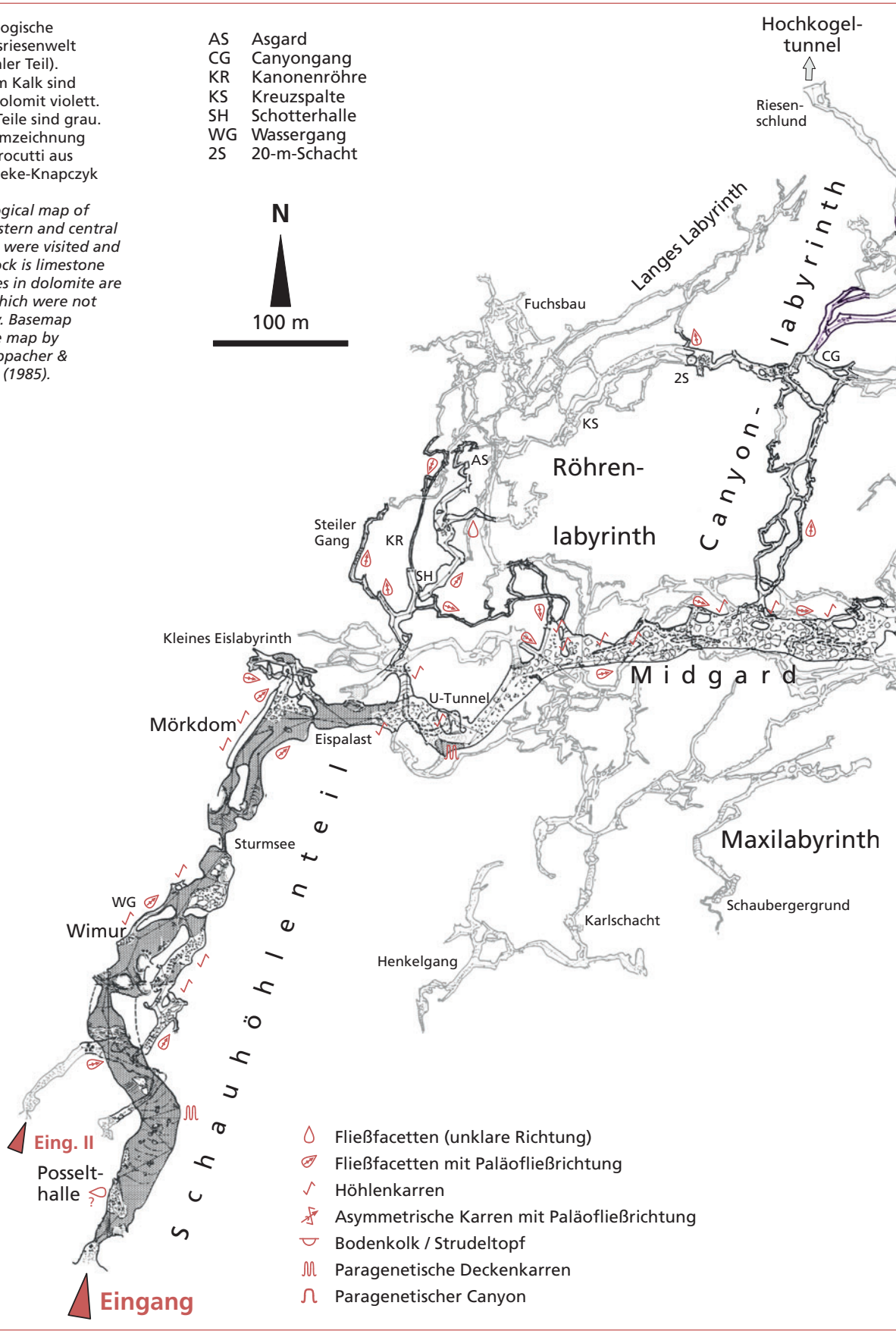
Die meisten Teile der Höhle sind im Dachsteinkalk der Lagunenfazies ausgebildet. Etliche Teile im E und teilweise im N sind im Dachsteindolomit entwickelt (Abb. 3a und 4), was teilweise bereits von Pia (1923) beobachtet wurde. Interessant ist, dass sich beim Wechsel von Kalk und Dolomit die Gangquerschnitte und -formen nicht signifikant ändern. Die Schichtfugen des Dachsteinkalks sind aber nicht besonders ausgeprägt und meist nur schwer zu erkennen. Die Lagerung stimmt mit der von Pia (1923) beobachteten überein, wobei auch ein etwas steileres Einfallen nach W beobachtet wurde (Fallrichtung/Fallwinkel: 273/56). Als Initialfugen der Höhlenentstehung spielen die Schichtfugen aber keine Rolle. Bei fast allen Gängen können eine oder mehrere Störungen beobachtet werden, die für die Anlage verantwortlich sind. Harnischflächen sind generell häufig, und teilweise sind auch bis zu metermächtige Kataklasite aufgeschlossen. *Fault gouges* (Anreicherung von Tonpartikeln durch Drucklösung entlang der Störung) erreichen Mächtigkeiten von knapp über 10 cm (z.B. *Frithjof-Oedl-Dom, Kirchendach*).

In einigen Teilen (*Kanonenröhre, Canyonlabyrinth, Irrgarten, Regenkluft, Kirchendach, Diamantenreich I*) gibt es Störungen (vorwiegend Seitenverschiebungen), die die Lösungsmorphologie oder Speläotheme versetzen und somit aktive Störungen darstellen (diese werden gesondert publiziert).

Hauptstrecken vom Eingang zum Dom des Grauens

Vor allem die großräumigen Teile wie der Eisteil und der *Midgard* sind stark von Versturz geprägt, aber schon wenige 10er Meter hinter dem *Eingang* finden sich an der NW-Wand Lösungsformen, allerdings ohne eindeutig identifizierbare FF oder Karren. Deckenkarren gibt es erstmals an der E-Wand der *Posselthalle* rund 150 m vom *Eingang* entfernt. Die ersten Karren und FF treten im *Wassergang* auf. Diese kurze Parallelstrecke nach dem *Wimur* wurde schon von Lehmann (1922a) als Beispiel für einen Druckstollen genannt. Die FF zeigen ein höhleneinwärts- bzw. NE-gerichtetes Paläofließen. Im weiteren Verlauf des Schau- bzw. Eisteils sind an einigen Stellen Karren und im *Mörkdom* schön ausgebildete FF mit identen Fließrichtungen erhalten. Auch im stark versturzgeprägten *Midgard* setzt sich dieses Bild mit einwärts bzw. hier E-gerichteten FF fort. Vor und nach dem dazwischen gelegenen *U-Tunnel* sind an den schräg nach N ansteigenden Wänden besonders eindrucksvolle Karren vorhanden (Abb. 5). Deckenkarren finden sich hier nur im *U-Tunnel* und in der nach N ziehenden Fortsetzung vor und nach dem *Frithjof-Oedl-Dom.* Vor diesem und nahe dem *Geist* genannten Stalagmiten zeigen FF ein N-gerichtetes Paläofließen. Die Deckenform des *Lehmtunnels* deutet auf eine paragenetische Erweiterung nach oben. Dies passt auch zu langgestreckten FF an der Decke am Durchstieg zum *Dom des Grauens,* die laut Palmer (2007: 148) auf eine ehemalige fast vollständige Sedimentverfüllung hindeuten. Sie zeigen ebenfalls ein N-gerichtetes Fließen.

Abb. 3a: Morphologische Kartierung der Eisriesenwelt (West- und zentraler Teil). Befahrene Teile im Kalk sind schwarz; die im Dolomit violett. Nicht befahrene Teile sind grau. Plangrundlage: Umzeichnung des Plans von Morocutti aus Klappacher & Haseke-Knapczyk (1985).
Fig. 3a: Morphological map of Eisriesenwelt (western and central part). Parts which were visited and where the host rock is limestone are black; the ones in dolomite are magenta. Parts which were not visited are in grey. Basemap redrawn after the map by Morocutti, in Klappacher & Haseke-Knapczyk (1985).



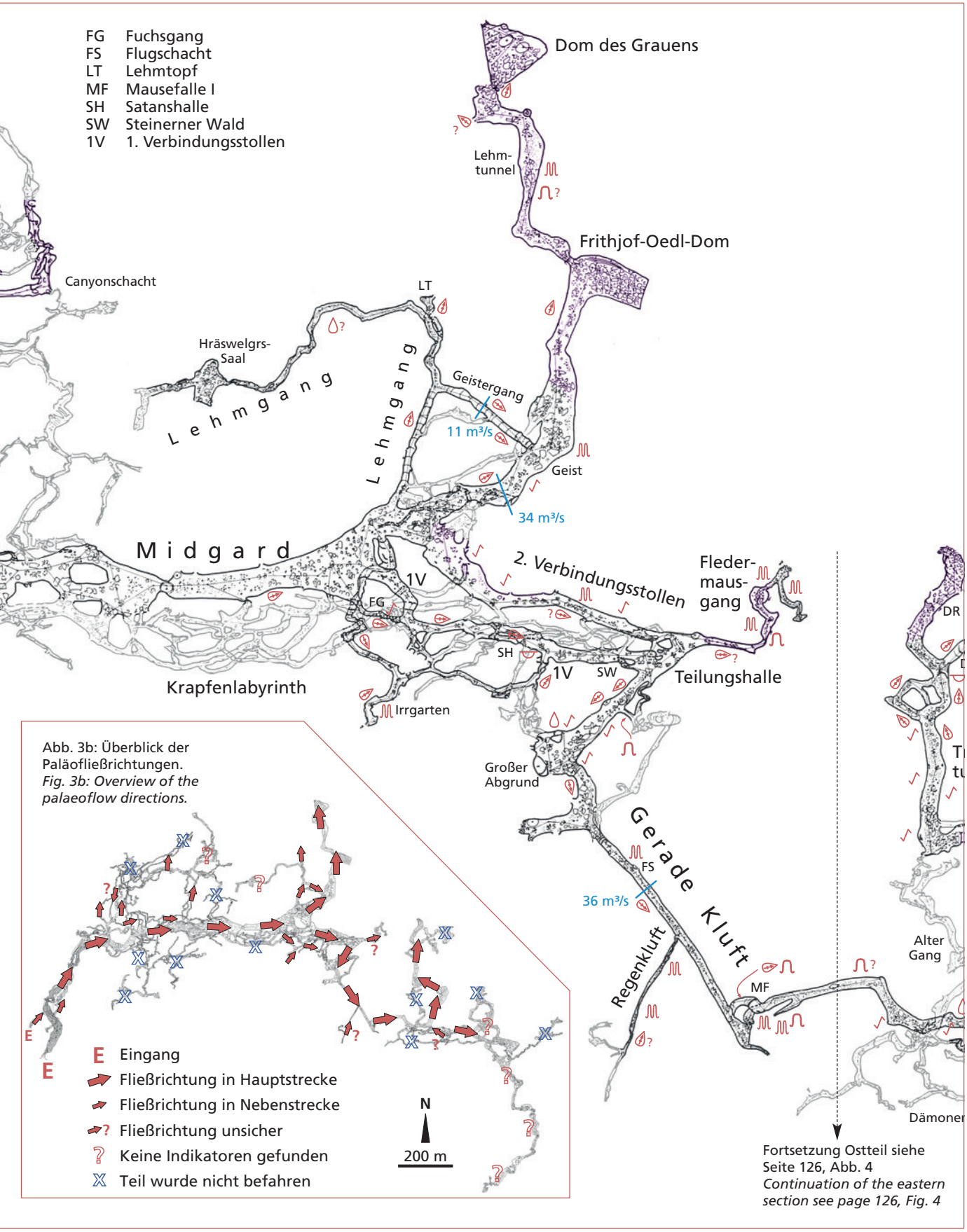


Abb. 3b: Überblick der Paläofließrichtungen.
Fig. 3b: Overview of the palaeoflow directions.

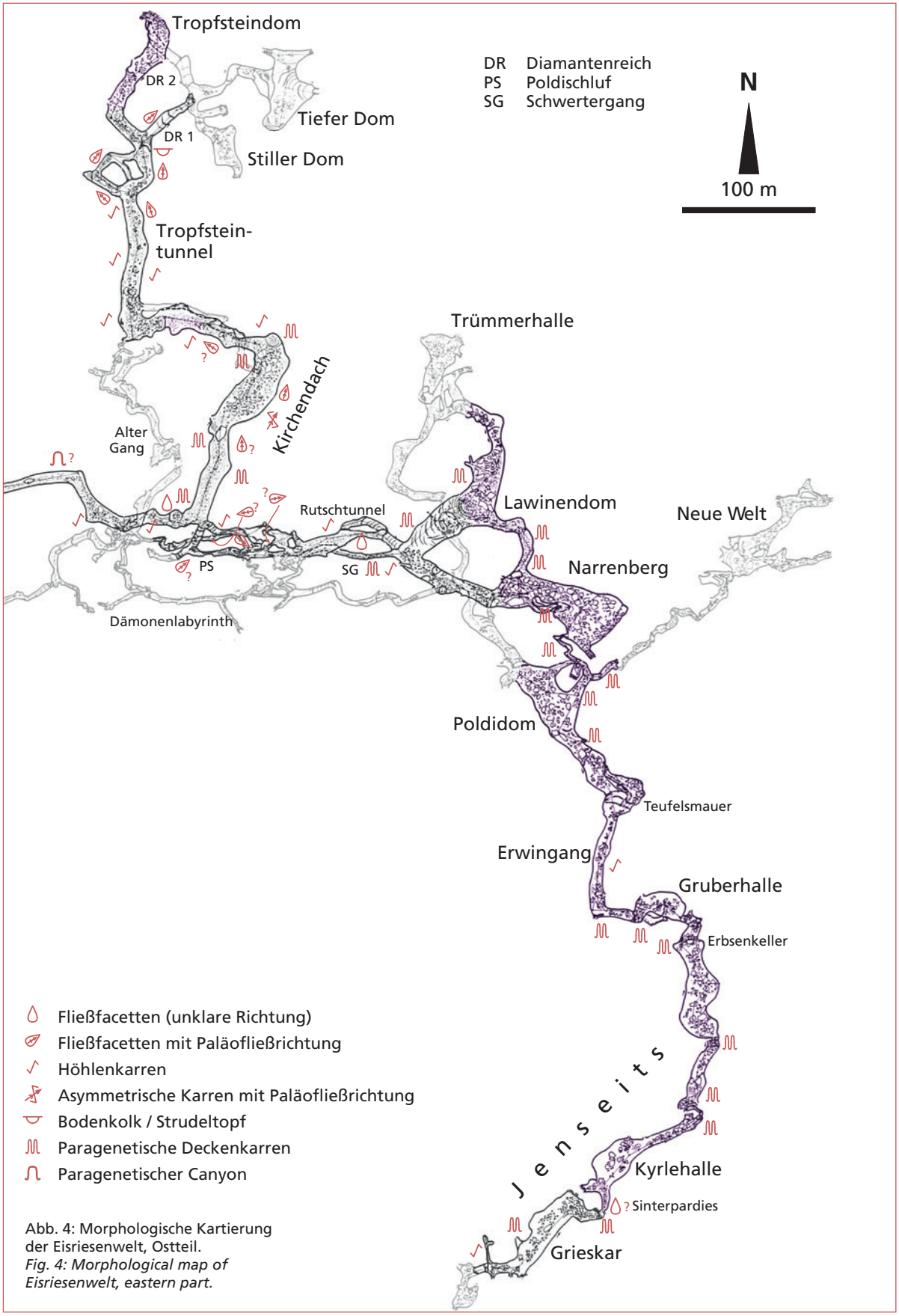


Abb. 4: Morphologische Kartierung der Eisriesenwelt, Ostteil.
Fig. 4: Morphological map of Eisriesenwelt, eastern part.

Abb. 5: Eindrucksvolles Relief von Höhlenkarren im *Midgard* östlich vom *U-Tunnel*. Foto: Tanguy Racine
Fig. 5: Impressive rills in Midgard, east of the U-Tunnel.

Seitenteile von Eingangsteil und Midgard

Im vom *Wimur* ansteigenden Gang zum *Eingang II* wurden nach NE bzw. abwärts gerichtete FF beobachtet, die mit großer Wahrscheinlichkeit der phreatischen Phase zuzurechnen sind. Im *Kleinen Eislabyrinth* finden sich deutliche FF, die E-gerichtetes Fließen anzeigen.

Vom *Röhrenlabyrinth* (Abb. 6) wurde ein eher südlicher Ast befahren, der parallel zum *U-Tunnel* verläuft. Hier zeigen FF ein E-gerichtetes Fließen. Im *Steilen Gang* und im untersten Teil des *Asgards* zeigen FF ein N- bzw. aufwärts gerichtetes Fließen (Abb. 7). Das Gestein (eventuell ein Dolomit) im höchsten Teil des *Asgards* ist stark zerbrochen und verwittert, und es wurden keine FF gesichtet. Keine eindeutige Richtung zeigen FF am Beginn des vom *1. Versturz* im *Asgard* nach E abzweigenden Gangs.

Im Gegensatz dazu steht die zwischen dem *Steilen Gang* und dem *Asgard* ansetzende *Kanonenröhre*. Hier treten im Endabschnitt nur knapp 1 cm lange FF auf, die ein sehr schnelles (ca. 5 m/s) Fließen bergab Richtung S anzeigen. Sie kommen aber auch an der Decke vor, was gegen ein frei abfließendes Gerinne spricht. Im teilweise durch vadose Canyons überprägten *Canyonlabyrinth* konnten nur an einer Stelle N- bzw. aufwärts gerichtete FF beobachtet werden, wenn man von diversen komplex angeordneten kleinen Röhren absieht. Auch in der Verbindung zum *Langen Labyrinth*, N des *20-m-Schachts* (E der *Kreuzspalte*) zeigen FF in dieselbe Richtung. Die weiter nach N abwärts führenden Teile nach dem *Canyongang* sind im Dolomit angelegt, und es wurden keine FF gefunden. Der am Ende des *Midgards* abzweigende *Lehmgang* zeigt in seinem unteren Abschnitt nach NNE (aufwärts) gerichtete FF und der *Geistergang* abwärts nach E zum *Geist* hin gerichtete. Deutliche N-gerichtete FF finden sich auch in der abfallenden Röhre zum *Lehmtopf* und in den neuen Teilen dahinter. Der nach W ziehende Abschnitt des *Lehmgangs* und seine Fortsetzung hinter dem *Hräswelgrs-Saal* sind stark zerfressen und zeigen keine interpretierbaren FF.

Verbindungsstollen bis Tropfsteindom

Vom *Midgard* zweigen die beiden *Verbindungsstollen* Richtung *Teilungshalle* ab. Nur im südlichen (dem *1. Verbindungsstollen*) und im parallelen *Fuchsgang* zeigen FF ein E-gerichtetes Fließen, besonders eindrucksvoll in der *Satanshalle*. In ihr finden sich auch

Abb. 6: Typisches Profil im *Röhrenlabyrinth*. Foto: Lukas Plan
Fig. 6: Typical passage profile in the Röhrenlabyrinth.

Abb. 7: Seitenröhre im *Steilen Gang*. Die Fließfacetten am Boden zeigen aufwärts gerichtetes Fließen und die Sinterdecke verweist auf eine ehemalige Füllung mit klastischem Sediment.
Fig. 7: Side tube of Steiler Gang: the scallops at the floor show upward directed palaeo flow and the false flowstone floor indicates a former filling with clastic sediments. Foto: Lukas Plan

Strudeltöpfe, die auf hohe Fließgeschwindigkeiten hindeuten. Im südlich gelegenen labyrinthischen *Irrgarten* finden sich N-, E- und S-gerichtete FF. E der *Teilungshalle*, im *Fledermausgang*, sind Deckenkarren häufig, und der erste Teil ist als paragenetischer Canyon ausgebildet. Nur im ersten Teil finden sich undeutliche FF, die eher ein E-gerichtetes Fließen anzeigen; der mittlere Abschnitt ist im Dolomit entwickelt. Der kurze Abschnitt zwischen *Teilungshalle* und *Großem Abgrund* zeigt FF mit Richtung SW, also entgegengesetzt zu den bisherigen Richtungen, aber nach wie vor einwärts im Sinne der Hauptstrecke. Die rechtwinklig dazu verlaufende *Gerade Kluft* sticht aufgrund ihres hochelliptischen Profils und des rund 250 m geradlinigen Verlaufs heraus. In den störungsgebundenen Profilen konnte bis 45 m Raumhöhe gemessen werden, und es sind große Harnischflächen ausgebildet. Auch hier zeigen FF ein einwärts- bzw. SE-gerichtetes Fließen. Deckenkarren an den Wänden im Bereich des *Flugschachts* belegen, dass dieser Teil zumindest bis 10 m über dem heutigen Boden mit Sediment verfüllt war. Trotzdem scheinen die Sedimente nur geringen Einfluss auf die Profilform gehabt zu haben, sondern führten nur zu einer nachträglichen Überprägung der überhängenden Wandpartien. In der von der *Geraden Kluft* nach SSW abzweigenden *Regenkluft* finden sich häufig Deckenkarren und nur im unteren Profilbereich NNE-gerichtete FF, die allerdings vados entstanden sein könnten.

Der alte Weg zur *Mausefalle I* zeigt kleine E-gerichtete FF und ist einer der wenigen Abschnitte mit einem breiten paragenetischen Deckencanyon. Hingegen handelt es sich im anschließenden Gang wahrscheinlich nicht um einen paragenetischen Canyon, da hier wie in der *Geraden Kluft* die höchsten Profilteile entlang der raumbestimmenden Störung verlaufen. Lediglich in einem kleinräumigen Parallelgang im Bereich der *Mausefalle I* führte die Sedimentverfüllung zu einer nach oben gerichteten Erweiterung des gesamten Profils, womit hier ein paragenetischer Canyon vorliegt. Im Gang S des *Kirchendachs* finden sich Deckenkarren und kurze Parallelröhren an der Decke, die auf eine ehemalige Sedimentverfüllung hindeuten. FF, die eindeutig eine Richtung nach N (einwärts) erkennen lassen, sind erst wieder im *Kirchdach* zu sehen, teilweise auf zehnermeterlangen Blöcken. Auf diesen finden sich auch asymmetrische Karren bzw. Karren mit Übergängen zu FF, wie sie auch aus der DMH beschrieben wurden (Plan & Xaver, 2010). Während das aus FF abgeleitete W- bzw. einwärts gerichtete Fließen im anschließenden Gang nicht eindeutig ist, zeigen die FF im *Tropfsteintunnel* sowie in kurzen Parallelstrecken wieder eindeutig nach N (einwärts). Hier finden sich auch FF an der freiliegenden Gangsohle. Auch im *Diamantenreich I* zeigen FF nach NE (einwärts). Sie sind aber mit 2-3 cm relativ klein, und auch Strudeltöpfe sprechen für hohe Fließgeschwindigkeiten. Im gesamten Abschnitt ab der *Teilungshalle* finden sich auch immer wieder Karren. Der Endabschnitt bis zum *Tropfsteindom* ist im Dolomit ausgebildet.

Tagferne Teile: Poldischluf bis Jenseits

Südlich vom *Kirchendach* zweigen der *Poldischluf* und eine parallele Röhre ab, die in die tagfernen Höhlenteile leiten. Lediglich in der parallelen Röhre sind halbwegs eindeutige, nach E (einwärts) zeigende FF zu erkennen. Jene im *Rutschtunnel* sowie W davon, W vom *Poldischluf* und im *Schwertergang* zeigen ebenfalls diese Richtung, allerdings mit etwas Unsicherheit. An zahlreichen Stellen sind Karren ausgebildet. W vom *Rutschtunnel* zweigt das eher kleinräumige *Dämonenlabyrinth* ab, das bis zu einem 7-m-Seilaufstieg befahren wurde. Hier finden sich zwar fast auf der gesamten Länge zahlreiche deutliche FF, aber sie lassen keine eindeutige Richtung ableiten.

Die Teile zwischen *Lawinendom* und *Sinterparadies* (am SW-Ende der *Kyrlehalle*) sind im Dolomit entwickelt (Abb. 8). Verstürze sind noch häufiger als in den Teilen im Kalkgestein, und es finden sich auch beachtliche Hallen wie der *Narrenberg*, der *Poldidom* sowie die *Gruber*- und die *Kyrlehalle*. Die Wände, an denen Lösungsstrukturen erhalten sind, sind meist mit vielen Kolken unterschiedlicher Größe skulptiert und teils schwammartig zerfressen. FF, die generell in fast allen Höhlen(teilen) im Dolomit fehlen, wurden auch in diesem Bereich nicht gefunden. Karren wurden nur im *Erwingang* entdeckt. An vielen Stellen konnten dagegen Deckenkarren beobachtet werden; besonders schön ausgebildet sind sie beim *Narrenberg* (Abb. 9). Der südlichste und tagfernste Höhlenteil, das *Grieskar*, ist wieder im Dachsteinkalk entwickelt. Während die langgestreckte Halle selbst stark zerbrochen und versturzgeprägt ist, finden sich in nach N ziehenden Röhren und Rampen Karren und Deckenkarren.

Abschätzung des Durchflusses

An drei Gangabschnitten mit wenig Versturzüberprägung wurde anhand der durchschnittlichen Längen von jeweils rund 15 FF und den Profilquerschnitten die Paläodurchflussmengen (während Hochwasserereignissen) grob abgeschätzt (Palmer, 2007). Am Weg zum *Frithjof-Oedl-Dom* kurz vor dem markanten Stalagmiten namens *Geist* misst das Profil 45 m², der Mittelwert der FF beider Wände ist 5 cm (Abb. 10). Daraus ergibt

Abb. 8: Versturzgeprägtes Profil des im Dolomit entwickelten Erwingangs. Die Wände sind zerfressen und mit Hydromagnesit und Frostwork überzogen.
Fig. 8: Profile of Erwingang, developed in dolomite and modified by collapse. The walls are corroded and covered with frostwork and hydromagnesite.
Foto: Tanguy Racine

Abb. 9: Paragenetische Deckenkarren im Dolomitgestein nahe der Biwakstelle beim Narrenberg. Foto: Lukas Plan
Fig. 9: Paragenetic ceiling pendants in dolomite bedrock near the Narrenberg bivouac spot.

Abb. 10: Gangprofil zwischen *Midgard* und *Geist*, wo anhand von FF (im Bereich der roten Ellipsen) und dem Gangquerschnitt der Paläodurchfluss berechnet wurde.
Fig. 10: Gallery between Midgard and the stalagmite called Geist where the palaeo-discharge was calculated using scallops (at the red ellipses) and the cross section of the gallery. Foto: Tanguy Racine

sich eine Fließgeschwindigkeit von 0,75 m/s bzw. ein Durchfluss von 34 m³/s. In einem parallelen Fließweg, dem *Geistergang*, sind die FF 4 cm lang (0,85 m/s) und das Profil hat 13 m², was einen Durchfluss von 11 m³/s ergibt. In der *Geraden Kluft* zwischen *Flugschacht* und *Regenkluft* misst das Profil 60 m² und 6,5 cm lange FF ergeben 0,6 m/s und somit einen Durchfluss von 36 m³/s.

Unter der Annahme, dass Sedimente nicht große Teile der heute sichtbaren Profile verfüllt haben und dass diese drei Gangabschnitte gleichzeitig und parallel aktiv waren, ergibt sich ein Durchfluss von 81 m³/s. In zumindest einer weiteren großräumigen, parallel vom Wasser durchflossenen Strecke, dem *Fledermausgang*, konnten keine FF gefunden werden. Da weitere Parallelstrecken wahrscheinlich sind, sind Paläodurchflussmengen von 100 m³/s oder mehr zu erwarten. Zum Vergleich: Die jährlichen Hochwässer der Enns bei Schladming liegen in diesem Bereich, und das Einzugsgebiet umfasst 649 km² (Land Steiermark, 2021).

BEOBACHTUNGEN ZU DEN SEDIMENTEN

Klastische Sedimente

Am häufigsten trifft man in der ERW auf Blockwerk verschiedenster Größe. Meist erfolgte der Deckenbruch nach der hydrologisch aktiven Phase, oft sind die Blöcke aber auch durch Lösung im (epi)phreatischen Bereich überformt und abgerundet. Ebenfalls autochthone Sedimente finden sich in den im Dolomit angelegten Passagen in Form von hellgrauen Sanden, die durch Vergrusung des Muttergesteins entstanden. Teilweise bilden sie vom Spritzwasser modellierte, herabhängende, wenige Zentimeter lange Zapfen und Spitzen (z.B. beim *Narrenberg* oder zwischen *Kirchendach* und *Tropfsteintunnel*).

Generell gibt es im Vergleich zu anderen Riesenhöhlen der NKA wenig allochthones Sediment. Vier

Stellen, wo größere Mächtigkeiten zu erwarten waren, wurden untersucht: Am S-Ende des *Irrgartens* ist durch Grabungstätigkeit ein 1,5 m hohes Profil aufgeschlossen; weitere 0,6 m bis zur Felssohle (oder einem größeren Stein) wurden erbohrt. Am Top sind wenige Zentimeter dunkelbrauner leicht rötlicher Ton aufgeschlossen. Darunter wechseln Lagen aus mittelbraunem Ton bis Silt und grünlich-bräunlich glimmerreichem Sand mit cm-großen braunen Tonklasten. Nur in den untersten Dezimetern finden sich Grobsandkomponenten aus Augensteinen.

In einem Seitengang E der *Mausefalle I* wurde ein 30 cm tiefes Profil ergraben, und weitere 1,3 m wurden bis zum Fels erbohrt. Die obersten 5 cm bestehen wieder aus dunkelbraunem Ton, der hier durch Frost aufgelockert ist. Darunter lagert ein 15 cm mächtiges Feinsand-dominiertes Gemisch aus Ton bis Feinkies und darunter ein grünlich-graues, etwas gröberes Sediment mit Augensteinen.

Am N-Ende des *Kirchendachs*, wo hinter einer Sedimentböschung ein Schacht ansetzt, wurden 1,7 m bis zum Fels erbohrt. Hier ist der dunkelbraun-rötliche Ton 0,5 m mächtig. Darunter kommt hellbraun-gräulicher Silt bis Feinsand, und ab 1,2 m nimmt der Grobanteil zu und bis 1 cm große Augensteine kommen vor. 20 m SW davon, in einer Kammer W vom *Kirchendach*, wurde an einer Böschung der mächtigste Sediment-

Abb. 11: Rund 1 m mächtige Sinterlagen an der Decke des *Fledermausgangs*, die auf eine ehemalige Sedimentverfüllung hinweisen.
Fig. 11: Flowstone layers about 1 m thick on the ceiling of Fledermausgang, indicating a former sediment fill.
Foto: Lukas Plan

körper aufgefunden. Der dunkle Ton am Top ist hier knapp 10 cm mächtig und zu kompakten Ziegeln zerbrochen. Darunter sind 2,7 m an der Böschung aufgeschlossen und weitere 1,9 m wurden bis zum Fels erbohrt. Es handelt sich um Wechsellagen aus mittelbraunen und hellbraun-graufarbenen Schichten aus Ton bis Feinsand.

Zusammen mit weiteren Aufschlüssen ergibt sich, dass das älteste Sediment bräunlich, teilweise grünlich ist, einen hohen Anteil an Augensteinen hat und eine schlechte Sortierung von Silt bis Kies aufweist. Die Augensteine erreichen bis 4 cm Durchmesser, sind aber meist unter 1 cm groß. Einige Dezimeter Mächtigkeit erreichen die Augensteinsedimente im *Steinernen Wald* und am Beginn des *Tropfsteintunnels*. Teilweise finden sich Sandkonkretionen, die aufgrund ihrer kugeligen Form als Krapfen bezeichnet wurden und für das *Krapfenlabyrinth* namensgebend waren (Pia, 1923). An etlichen Stellen sind auch an den Wänden verkittete Sedimentreste (Silt bis Grobsand) erhalten.

Das jüngste Sediment ist ein rötlich-dunkelbrauner Ton am Top anderer Sedimente oder in Spalten an der Decke wie z.B. im *Lehmgang*. Auffallend ist, dass der karbonatreiche laminierte hellbraune Ton („Heller Höhlenton“ nach Seemann, 1979: 227), der in der DMH meist die oberste Sedimentlage bildet, in der ERW komplett fehlt.

Speläotheme

Häufig findet man massive fossile und vom Frost zerbrochene Sinter (Lehmann, 1922a; Spötl et al., 2020). Die markantesten sind im *Steinernen Wald*, vor dem *Geistergang* sowie zwischen *Poldidom* und *Teufelsmauer*. Teilweise bilden sie auch „falsche Böden”, wenn das ehemals darunter lagernde klastische Sediment ausgeräumt wurde, besonders eindrucksvoll an der Decke des *Fledermausgangs* (Abb. 11). Weiße Sinter, die jung wirken (aktiv oder holozän), wurden im *Asgard* beobachtet.

Besonders erwähnt werden sollen die Speläotheme im *Diamantenreich I* und *II*. Dies sind mit Sediment abgedichtete Gänge, in denen sich an Kalzit übersättigtes Wasser gesammelt hat. In unterschiedlichen Höhen finden sich horizontale Kalziträndер (*shelfstone*) an den Wänden. Darunter bildeten sich spitze Kalzitkristalle mit einigen Zentimeter Länge aus. Inwieweit bis zu mehrere Zentimeter lange Excentriques-artige Kalzitgebilde ebenfalls unter Wasser gebildet wurden, ist unklar. Im tiefsten Bereich des *Diamantenreichs I* ist hingegen eine Hohlkehle ausgebildet, die auf eine spätere Ansammlung mit untersättigtem Wasser hindeutet.

Weiters finden sich im *Diamantenreich I* Kalzitplättchen (*cave rafts*) und ein *raft cone*. Diese kegelförmige Anhäufung von *cave rafts* entsteht, wenn die auf der Wasseroberfläche treibenden *cave rafts* unter einer Tropfstelle zu Boden sinken. *Raft cones* sind z.B. in der Szemlő-hegyi-barlang in Budapest häufig und werden dort als Christbäume bezeichnet. Der im *Diamantenreich I* ist rund 30 cm hoch und unseres Wissens der einzige bisher aus Österreich beschriebene.

Eine weitere Besonderheit sind zwei miteinander verwachsene Sintertrommeln (*shields*) im mittleren Abschnitt des *Lehmgangs*.

Über Untersuchungen an kryogenen Höhlenkarbonaten wurde in Spötl et al. (2020) berichtet.

In den im Dolomit ausgebildeten Teilen finden sich häufig Aragonitnadeln (*frostwork*) gemeinsam mit Hydromagnesit und eher kugeligen Aggregaten aus Kalzit; besonders schön und großflächig am *Narrenberg* und im *Erwingang*.

An einigen *fault gouges* bildeten sich Gipskristalle. Einzelne Nadeln haben bis 4 cm Länge wie z.B. im *Erbsenkeller*. Weitere Fundpunkte sind an der über 70 m aufgeschlossenen Harnischfläche N des *Kirchendachs* sowie im *Irrgarten*.

INTERPRETATION UND DISKUSSION

Vergleich mit Beobachtungen aus anderen Höhlen

Bergerhöhle (1511/162)

Die Bergerhöhle – ein Teil des 30 km langen und 1291 m tiefen Berger-Platteneck-Höhlensystems – liegt am NW-Rand des Tennengebirges (Abb. 2). Sie hat ausgedehnte horizontale Teile in rund 900 bis 1000 m Seehöhe und war namensgebend für das „Bergerhöhlenniveau“, ein Sub-Niveau zwischen dem Riesen- und dem Quellhöhlenniveau (Knapczyk, 1985). Am 19.12.2019 wurden die Höhlenteile bis zum *Stiegenhaus* befahren, wobei morphologische und sedimentologische Beobachtungen gemacht wurden. Die Gänge haben Querschnitte bis wenige Zehnerquadratmeter, und an zahlreichen Stellen zeigen FF ein N-wärts gerichtetes Paläofließen. Ähnlich wie in der ERW sind Karren und Deckenkarren häufig und markante paragenetische Canyons selten. Bezüglich der Sedimente ist der „Helle Höhlenton“, der von

Seemann (1979) aus der DMH beschrieben wurde, nahezu allgegenwärtig, wobei beim *Gletscherbruch* bis zu 7 m davon aufgeschlossen sind. Es ist ein feingeschichteter Lehm mit hohem Karbonatanteil, der als eiszeitliches Rückstausediment interpretiert wird (Audra et al., 2002; Plan & Xaver, 2010). Trotz intensiver Suche konnten keine Augensteinsedimente – auch nicht in den aktiven Gerinnen – gefunden werden. An einigen Tropfstellen sind jedoch Fremdgerölle in Form bunter Ton- bis Feinsandsteine aufgeschlossen. Audra (1994) beschrieb ebenfalls Komponenten jurassischer Gesteine aus den Geröllen und keine Augensteine.

Die Bergerhöhle unterstützt somit nicht das Bild einer Speisung der einstigen Karstgrundwässer des Tennengebirges durch Flüsse aus den Zentralalpen, schließt dies aber auch nicht aus. Die Gangquerschnitte können auch durch eine autogene Speisung erklärt werden. Die Sedimente, die die Paragenese verursachten, wurden vollständig ausgeräumt. Der „Helle Höhlenton“ kommt aufgrund seines hohen Karbonatanteils dafür nicht in Frage. Ob es sich dabei um Augensteine handelte, ist unklar. Generell wurde vom Erstautor beobachtet, dass diese in tiefer liegenden Höhlen der zentralen NKA deutlich seltener sind als in Höhlen des Riesen- und vor allem des Ruinen-Niveaus.

Dachstein-Mammuthöhle (DMH, 1547/9)

Ausführliche Beobachtungen zur Morphologie und eine genetische Interpretation finden sich in Plan & Xaver (2010). Im Vergleich zur ERW fallen einige Unterschiede auf, zumal 85 % der ausgedehnten phreatischen Teile in 1400 ± 150 m Seehöhe und somit deutlich tiefer liegen.

Schon Pia (1923: 60) fiel auf, dass die Schichtflächen für die Anlage der Gänge in der DMH eine deutlich größere Rolle spielen als in der fast ausschließlich störungsgebundenen ERW, wo die Schichtung „*auf den Verlauf der Gänge ganz ohne Einfluß zu sein scheint*“. Ein weiterer Unterschied ist, dass in der DMH paragenetische Gänge bzw. Canyons häufig sind, während nur wenige deutlich ausgebildete Beispiele in der ERW beobachtet werden konnten. Auch die Gestalt der Labyrinthe ist deutlich anders. In der DMH treten fast nur Schichtfugenlabyrinthe auf, in denen teilweise die Fugen flächig erweitert wurden und oft nur unterschiedlich große Pfeiler übrig blieben. Die Labyrinthe in der ERW haben eher den Charakter chaotisch angeordneter, vernetzter Röhren, die fast alle störungsgebunden sind.

Eines der jüngsten Sedimente in der DMH ist der für viele Teile kennzeichnende “Helle Höhlenton”. Auffallend ist, dass dieser in der ERW fehlt, wie schon in Spötl et al. (2020) erwähnt. Ein in der DMH meist darunter lagernder dunkler rötlich-brauner Ton (Bethke, 2020) hat hingegen Ähnlichkeit mit den mancherorts aufgeschlossenen Feinsedimenten der ERW. Dies lässt die Interpretation zu, dass es während Eiszeiten in der DMH zum Rückstau von Schmelzwässern durch den Traungletscher kam, wobei der „Helle Höhlenton“ abgelagert wurde. Hingegen reichte der Rückstau des Salzachgletschers nicht so weit hinauf, weshalb dieses charakteristische Sediment in der ERW fehlt. Dies stimmt mit der Rekonstruktion des hochwürmzeitlichen Salzachgletschers überein, der nur knapp über den Eingang reichte (van Husen, 1987; Spötl et al., 2020). In deutlich tiefer liegenden Höhlen wie der Bergerhöhle (aber auch z.B. im *Alten Teil* der Hirlatzhöhle, 1546/7) ist dieses Sediment hingegen noch deutlich mächtiger als in der DMH.

Deutung der Entstehung der ERW

Epiphreatische Entstehung

Die von uns festgestellte Bildung der meisten Höhlenteile durch fließendes Wasser unter (epi)phreatischen Bedingungen wurde auch von vielen bisherigen Autoren vertreten. Lediglich die *Gerade Kluft* wurde, angefangen mit Pia (1923) bis einschließlich Toussaint (1971), meist als tektonische Bildung (im Sinne einer Zerrspalte) gedeutet. Dafür fanden wir keine Hinweise, und es sind den Autoren auch keine solche Beispiele aus den NKA bekannt (cf. Plan & Oberender, 2016).

Fließfacetten

Fast alle beobachteten FF deuten auf eine generelle Paläofließrichtung nach NE bzw. höhleneinwärts (Abb. 3b). Auch die FF in den Seitenlabyrinthen zeigen analoge Fließrichtung, was eine Interpretation der Labyrinthe als paragenetische Bypässe erlaubt. Am augenscheinlichsten ist dies beim *Röhrenlabyrinth* möglich, das als Umgehung des ehemals sedimenterfüllten *U-Tunnels* gedeutet werden kann.

Es ist allerdings unklar, wieso am Beginn des *Dämonenlabyrinths* keine eindeutige Richtung aus den zahlreichen FF abgeleitet werden kann. Eventuell floss das Wasser hier je nach Wasserstand abwechselnd in die eine oder die andere Richtung.

Die einzigen von diesem Befund abweichenden FF finden sich im *Kanonenrohr*, die S- bzw. abwärts gerichtete Paläofließrichtungen anzeigen. Da dieser Teil zwischen *Steilem Gang* und *Asgard* liegt, die entgegengesetzte Richtungen aufweisen, und die FF ungewöhnlich klein sind, könnten sie aus einer

späteren Phase stammen, als Wässer durch diese kleine Röhre abgeronnen sind.
Die von uns beobachtete generelle NE-gerichtete Paläofließrichtung steht im Gegensatz zu den meisten bisherigen Modellen (z.B. Audra et al., 2002) und schließt auch eine Speisung über das Pitschenbergtal (Abb. 2) aus, wie sie z.B. von Abel (1952) und Toussaint (1971) angenommen wurde. Lediglich die von Lehmann (1922a) angegebene Fließrichtung im *1. Verbindungsgang* stimmt mit unseren Beobachtungen überein.

Karren

Karren, die epiphreatische Bedingungen andeuten, sind in fast allen großräumigen Teilen häufig. Dagegen sind sie in den kleinräumigen Röhren der Labyrinthe eher selten. Die Karren sind in einigen Teilen (z.B. vor und nach dem *U-Tunnel*) besonders markant und in der ERW mit Tiefen von 0,5 m deutlich mächtiger ausgebildet als in vielen anderen Höhlen der NKA. Von lateral fließendem Wasser asymmetrisch geformte Karren belegen, dass die FF während Flutereignissen und die Karren beim Trockenfallen gebildet wurden, also beide im selben Zeitabschnitt.

Paragenese

Paragenetische Deckenkarren zeigen an vielen Stellen eine ehemalige teilweise oder vollständige Sedimentverfüllung. Diese führte aber in den meisten Fällen nur zu einer Überprägung mit diesen Kleinformen. Zumindest für manche Teile lässt sich belegen, dass die Deckenkarren jünger sind als die FF. In der *Geraden Kluft* zum Beispiel überprägen Deckenkarren die überhängenden Wandpartien, während FF nur an den nicht überhängenden erhalten sind.
Weiters gibt es paragenetische Bypässe, und auch die Labyrinthe können zumindest teilweise so erklärt werden. Es gibt aber kaum paragenetische Canyons, also Teile, wo das gesamte Profil nach oben erweitert wurde. Wieso diese in der ERW fast fehlen, aber z.B. in der DMH so häufig sind, kann nur spekuliert werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass sich zu deren Ausbildung ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Sedimentation, Erosion, Korrosion und der Fließgeschwindigkeit einstellen muss (Plan & Xaver, 2010: 25), was eine gewisse Konstanz der Schüttung und des Sedimenteintrags voraussetzt. Ist dies nicht der Fall, würden die hohen Fließgeschwindigkeiten extremer Flutereignisse (denkbar sind auch Verklausungen oder andere Katastrophenereignisse) die Sedimente gänzlich ausräumen oder eine extreme Sedimentfracht würde das Profil komplett verlegen. Möglicherweise traf letzteres für die ERW nahe dem S-Rand des Karstmassivs bzw. der Schwinden eher zu, während die Bedingungen in der DMH am N-Rand des Dachsteins weitaus gedämpfter waren.

Bergauffließen

Der heutige *Eingang* sowie der 200 m höher liegende *Eingang II* stellen zweifelsfrei zufällige Verschnitte der etliche Millionen Jahre alten Höhle mit dem heutigen Salzachtal dar. Das NE gerichtete Paläofließen impliziert, dass das Wasser vom *Eingang* 140 m bergauf floss. Das wiederum bedeutet, dass der *Eingang* Teil eines Siphons mit zumindest dieser Tiefe war, was auf den ersten Blick außergewöhnlich erscheint.
In (epi)phreatischen Röhren ist dies für solche U-förmigen Siphone (Englisch *loops*) aber kein Extremwert. Heiland (2017) berichtete aus der Felsbrückenhöhle (Teil des 26 km langen Kuchlberg-Höhlensystems, 1511/1090) von ehemaligen Siphonen mit 300 m Höhenunterschied. Auch aus den Beschreibungen des Fließwegs von der Cosa-Nostra- zur Bergerhöhle lassen sich Siphone mit 250 m Höhenunterschied herauslesen (Audra, 1994: 75). In den NKA ist der tiefste betauchte Siphon der des Pießling-Ursprungs mit 87 m Tiefe (Seebacher, 2016). Auch in Gebieten mit deutlich weniger Landschaftsrelief, wie dem Klassischen Karst, sind tiefe Siphone durch Taucher dokumentiert. In einem Siphon zwischen der Pivka jama (Teil des Postojnska-jama-Systems) und der Planinska jama wurde ein Tauchgang bei –96 m abgebrochen (Vrhovec, 2018), und auch in der Nova Križna jama setzt sich ein Siphon in 128 m Tiefe weiter nach unten fort (schriftl. Mitt. Mitja Prelovšek). Die heute beobachteten Extremwerte für Schwankungen des Karstwasserspiegels in den NKA übertreffen diesen Wert noch. In der Bärenhöhle beim Torrenerfall (1335/1) im benachbarten Hagengebirge maß Höfer-Öllinger (2019) mit Drucklogger 220 m Anstieg, und im *Alten Teil* der Hirlatzhöhle wurden 225 m beobachtet (Greger et al., 2004).

Zentralalpine Speisung

Die ehemalige Fließrichtung nach NE impliziert aufgrund der Lage der ERW eine Speisung durch Flüsse aus den Zentralalpen, wie sie bereits von etlichen Autoren angenommen wurde. Neben der Lage sprechen auch die großen Gangdurchmesser für eine zentralalpine Speisung. Schon in einem zusammenfassenden Artikel über die alpine Speläogenese wurde die ERW als Beispiel für ein ehemals phreatisches Höhlensystem angeführt, dessen Gangdurchmesser nicht zum heutigen kleinen Einzugsgebiet passt (Audra et al., 2006). Es wurde interpretiert, dass die ERW durch Erosion vom ehemaligen Einzugsgebiet abgeschnitten wurde.

Die Gangdurchmesser und die FF zeigen ehemalige Durchflussmengen für die ERW in der Größenordnung von 100 m³/s während Hochwässern. Die größten rezenten Karstquellen der NKA zeigen Maxima von lediglich knapp 50 m³/s bei Einzugsgebietsgrößen von rund 70 km² (Plan, 2016: 658). Selbst wenn man annimmt, dass die Werfener Schuppenzone während der Bildungsphase der ERW noch mit verkarstungsfähigen Karbonatgesteinen bedeckt war, so misst dieses Gebiet, wenn man es bei Hüttau im Osten begrenzt, rund 100 km². Dies könnte, wenn man höhere Niederschlagsmengen im obersten Miozän annimmt, für die ERW ausreichen (siehe Vergleich mit der heutigen Enns bei Schladming). Die Kenntnis zahlreicher weiterer Passagen des Riesenhöhlenniveaus im Tennen- und Hagengebirge spricht aber doch deutlich dagegen.

Diese Belege unterscheiden die ERW von der DMH. Für letztere ist eine zentralalpine Speisung zwar ebenfalls wahrscheinlich, aber es könnten auch nur Wässer gewesen sein, die direkt am Karstmassiv versickert sind (Plan & Xaver, 2010). Einerseits liegt die DMH am Nordrand des Dachsteins und zeigt eine W-gerichtete Paläofließrichtung (also parallel zum Plateaurand). Andererseits sind die meisten Gangprofile paragenetisch stark erweitert, und nur ein kleiner Teil der heute sichtbaren Profile stand dem Wasser als Fließquerschnitt zur Verfügung. Dies ergibt relativ geringe Durchflussmengen, die problemlos mit einer lokalen Speisung erklärt werden können.

Die bisher oft als Beleg für eine zentralalpine Speisung angesehenen Augensteine sind nur ein schwaches Indiz, da sie auch von den Karsthochflächen stammen könnten.

Alter

Wenn bisher auch noch keine absoluten Alter aus der ERW eine Entstehung während des Obermiozäns bis Unterpliozän belegen (Frisch et al., 2002), so scheint dies doch wahrscheinlich. Die Datierung von Quarzkiesen der Tantalhöhle (1335/30; Hagengebirge) in einer ähnlichen Höhenlage ergab ein Einschwemmalter von 4,7 ± 0,5 Millionen Jahren (Häuselmann et al., 2020).

Bedeutung für die Modellvorstellungen in den NKA

Die Morphologie der Gänge wurde schon von Lehmann (1922a) insofern richtig gedeutet, als es sich bei vielen Gängen um Bildungen in der phreatischen Zone handelt. Auch die Wässer wurden von ihm und Pia (1923) als zentralalpin gedeutet. Im Gegensatz zu Bock (1913), der aus den Beobachtungen und Schlüssen, die er in der DMH zog, ein überregionales Entwässerungsmodell ableitete, vermied Lehmann (1922a) dies. Er gab sich auch bescheidener, indem er einleitend einräumte: „*Ein kleiner, aber wichtiger Teil der Formen dieser Höhle entzieht sich einer befriedigenden Erklärung so lange, als wir nicht eine brauchbare allgemeine hydrographische Theorie des Höhlenkarstes haben…*" (Lehmann, 1922a: 51).

Insgesamt ist erstaunlich, dass die Interpretation der ERW als Bildung durch fließendes Wasser aus den Zentralalpen (Lehmann, 1922a; Pia, 1923; etc.) nur von wenigen Autoren – vorwiegend Biese (1933) und Trimmel (1967) – angezweifelt wurde. Eine regelrechte Anfeindung, wie sie die Modelle von Bock (1913) erfuhren, erfolgte nicht (Plan & Herrmann, 2010).

SCHLUSSFOLGERUNG

Die ERW ist ein vorflutgebundenes System des Riesenhöhlenniveaus. Komplex angeordnete großräumige Gänge (mit zwischengeschalteten versturzgeprägten Hallen) werden von kleinräumigen Labyrinthen flankiert. Beide sind phreatisch und in der letzten Phase unter epiphreatischen Bedingungen entstanden. Eine vadose Überprägung ist selten, wie auch generell vadose Canyons und Schächte eher unbedeutend sind. Die Labyrinthe können zumindest teilweise als paragenetische Bypässe interpretiert werden, die sich beim Umfließen sedimentverfüllter Hauptstrecken bildeten. Fast alle Höhlenteile sind an Störungen gebunden. Schichtfugen des gebankten Dachsteinkalks spielten für die Anlage der Gänge keine Rolle.

Fließfacetten zeigen generell ein Paläofließen gegen NE, also vom heutigen *Eingang* aufwärts und höhleneinwärts. Somit wiesen die Siphone zumindest Tiefen von 140 m auf.

Die ERW ist das erste Höhlensystem, für das gut belegt werden kann, dass Flüsse aus den Zentralalpen durch die NKA nach N entwässert haben. Dass dies nicht für die gesamten NKA verallgemeinert werden kann, zeigte eine Untersuchung, die für das Tote Gebirge eine radiale Paläoentwässerung nahelegt (Plan et al., 2009). Im Gegensatz zu tiefer liegenden Höhlen (Bergerhöhle, DMH, Hirlatzhöhle) war die ERW nicht vom Aufstauen des Karstwasserspiegels durch eiszeitliche Gletscher betroffen, was am Fehlen des „Hellen Höhlentons" erkennbar ist und auch durch das Vorhandensein von bis zu 73.000 Jahre alten kryogenen, d.h. im Verband mit Höhleneis gebildeten Karbonaten belegt wird (Spötl et al., 2020).

DANK

Fritz Oedl, Franz Reinstadler und Siegfried Kaml von der Eisriesenwelt GmbH sei für den Zugang zur Höhle und logistische Unterstützung gedankt.
Peter Pointner, Mitja Prelovšek und Christoph Spötl für die Diskussion.
Gerit Gratwohl, Giorgio Höfer-Öllinger und Jörg Robl waren an der Befahrung der Bergerhöhle beteiligt.
Christian Bauer und Wolfgang Frisch machten konstruktive Anmerkungen im Zuge des Reviews.

LITERATUR

Abel, G.A. (1952): Die Entstehung der Eisriesenwelt (1. Diskussionsabend der Geologisch-Mineralogischen Arbeitsgruppe am 16.1.1951). – Mitt. d. Naturwiss. Arbeitsgemeinschaft am Haus der Natur Salzburg – GEO A2: 1–10.

Angermayer, E., Asal, A., Czoernig-Czernhausen, W., Hauser, E., Lehmann, O., Oedl, R., Pia, J., & Wettstein-Westersheim, O. (1926): Die Eisriesenwelt im Tennengebirge. – Spel. Monogr., 6, Wien.

Audra, P. (1994): Karsts alpins. Genèse de grands réseaux souterrains. – Karstologia Mémoires, 5: 1–279.

Audra, P., Quinif, Y. & Rochette, P. (2002): The genesis of the Tennengebirge karst and caves (Salzburg, Austria). – J. Caves Karst Studies 64: 153–164.

Audra, P., Bini, A., Gabrovsek, F., Häuselmann, P., Hobléa, F., Jeannin, P.Y., Kunaver, J., Monbaron, M., Sustersic, F., Tognini, P., Trimmel, H. & Wildberger, A. (2006): Cave genesis in the Alps between the Miocene and today: a review. – Z. Geomorph. 20 (2): 153–176.

Bethke, K. (2020): Sedimente der Höhlen am Dachstein-Nordrand und ihre Aussage für die Höhlen- und Landschaftsentwicklung. – Unveröff. Masterarbeit, Univ. Wien.

Biese, W. (1926): Vorläufiger Bericht über Untersuchungen in den Dachsteinhöhlen. – Mitt. über Höhlen- u. Karstforschung, 1926 (1): 1-11 u. (2): 33–40.

Biese, W. (1933): Über Höhlenbildung. II. Entstehung von Kalkhöhlen (Rheinland, Harz, Ostalpen, Karst). – Abh. d. Preuß. Geol. Landesaufn., Neue Folge, 146.

Bock, H. (1913): Alte Höhlenstromläufe im Inneren des Mittagskogels. – In: Bock, H., Lahner, G. & Gaunersdorfer, G. (Hrsg.): Höhlen im Dachstein. – Graz (Verein f. Höhlenkunde in Österreich): 72–88.

Ford, D. & Williams, P. (2007): Karst Hydrogeology and Geomorphology. – Chichester (Wiley).

Frisch, W., Kuhlemann, J., Dunkl, I., Székely, B., Vennemann, T. & Rettenbacher, A. (2002): Dachstein-Altfläche, Augenstein-Formation und Höhlenentwicklung – die Geschichte der letzten 35 Millionen Jahre in den zentralen Nördlichen Kalkalpen. – Die Höhle, 53 (1): 1–36.

Greger, W., Seethaler, P. & Wimmer, M. (2004): Die extreme Hochwassersituation Anfang August 2002 in der Hirlatzhöhle (1546/7), im Vergleich mit hydrologischen Daten des Dachsteingebietes. – Die Höhle, 55: 3–11.

Häuselmann, P., Plan, L., Pointner, P. & Fiebig, M. (2020): Cosmogenic nuclide dating of cave sediments in the Eastern Alps and implications for erosion rates. – Int. J. Speleol., 49: 107–118.

Heiland, S. (2017): The formation of the Felsbrücken cave, Tennengebirge, Austria, in relation to faults and fractures. – Unveröff. Masterarbeit, Univ. Tübigen.

Höfer-Öllinger, G. (2019): Untersuchungen der Karsthydrogeologie im Land Salzburg, Österreich. – Grundwasser, 25: 15–29.

Klappacher, W. & Haseke-Knapczyk, H. (1985): Salzburger Höhlenbuch, Band. 4. – Salzburg (Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg).

Klimchouk, A., Ford, D., Palmer, A. & Dreybrodt, W. (2000): Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers. – Huntsville (National Speleological Society).

Knapczyk, H. (1985): Der Untersberg bei Salzburg. Die ober- und unterirdische Karstentwicklung und ihre Zusammenhänge. Ein Beitrag zur Trinkwassererforschung. – MaB-Programmes der Österr. Akad. Wiss., 15: 1–223.

Koppenwallner, F.X. (1963): Versuch einer Erklärung für die Häufung von Großhöhlen am Südrand der Salzburger Kalkalpen. – Die Höhle, 14: 29–36.

Krenmayr, H.G. & Schnabel, W. (2006): Geologische Karte von Oberösterreich 1:200.000. – Wien (Geol. Bundesanstalt).

Land Steiermark (2021): Steiermark Online. – app.hydrographie.steiermark.at/bilder/Hochwasserzentrale/Source/SteiermarkOverview_Pub.htm, Abgerufen: 3.4.2021.

Lehmann, O. (1922a): Die große Eishöhle im Tennengebirge (Salzburg, Eisriesenwelt); IV. Morphologische Beobachtungen. – Speläol. Jb., 2: 52–121.

Lehmann, O. (1922b): Die Auswaschung an Klammwänden und die Richtung des Wasserlaufes. – Speläol. Jb., 3: 40–49.

Machatschek, F. (1921): Die Eisriesenhöhle im Tennengebirge. – Z. Ges. Erdkunde Berlin, 1921: 60–64.

Oedl, R. (1922): Die große Eishöhle im Tennengebirge (Salzburg, Eisriesenwelt); II. Vermessung. – Speläol. Jb., 3: 5–33.

Palmer, A. (2007): Cave Geology. – Daton (Cave Books).

Pestal, G., Hejl, E., Braunstingl, R. & Schuster, R. (2009): Erläuterungen zur geologischen Karte von Salzburg 1:200.000. – Wien (Geol. Bundesanstalt).

Pia, J. (1923): Die große Eishöhle im Tennengebirge (Salzburg, Eisriesenwelt); VI. Geologische Beobachtungen. – Speläol. Jb., 4: 48–65.

Plan, L. (2016): Hochschwab. – In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz (OÖ-Landesmuseum): 645–660.

Plan, L. & Herrmann, E. (2010): Paläotraun? Der Wissenschaftsdisput um die Entstehung der Dachstein-Mammuthöhle. – Die Höhle, 61: 3–17.

Plan, L. & Oberender, P. (2016): Nicht-Karsthöhlen. – In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz (OÖ-Landesmuseum): 61–72.

Plan, L. & Xaver, A. (2010): Geomorphologische Untersuchung und genetische Interpretation der Dachstein-Mammuthöhle (Österreich). – Die Höhle, 61: 18–38.

Plan, L., Filipponi, M., Behm, M., Seebacher, R. & Jeutter, P. (2009): Constraints on alpine speleogenesis from cave morphology – a case study from the eastern Totes Gebirge (Northern Calcareous Alps, Austria). – Geomorphology, 106 (1-2): 118–129.

Pointner, P. (2016): Tennengebirge. – In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz (OÖ-Landesmuseum): 553–568.

Pointner, P., Rothauer, M. & Lienbacher, F. (2017): Eisriesenwelt - Jahresbericht 2016 im Projekt Fortluftführung der Neuvermessung. – Atlantis, 39: 3–25.

Saar, R. & Pirker, R. (1979): Geschichte der Höhlenforschung in Österreich. – Die Höhle, Beiheft 13.

Seebacher, R. (2016): Höhlentauchen. – In: Spötl, C., Plan, L. & Christian, E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich. – Linz (OÖ-Landesmuseum): 427–438.

Seemann, R. (1979): Die sedimentären Eisenvererzungen der Karstgebiete der Nördlichen Kalkalpen. – Ann. Naturhistor. Mus. Wien, 82: 209-289.

Spötl, C., Koltai, G. & Racine, T. (2020): Einblicke in die Vereisungsgeschichte der Eisriesenwelt (Tennengebirge). – Die Höhle, 71: 45–61.

Toussaint, B. (1971): Hydrogeologie und Karstgenese des Tennengebirges (Salzburger Kalkalpen). – Steir. Beitr. z. Hydrogeol., 23: 5–115.

Trimmel, H (1967): Über einige Aufgaben und Probleme der Karst- und Höhlenforschung im Lande Salzburg. Beiträge zur Stadt- u. Landeskunde von Salzburg, 109: 66–87.

van Husen, D. (1987): Die Ostalpen und ihr Vorland in der letzten Eiszeit (Würm). – Karte 1:500.000, Wien (Geol. Bundesanstalt).

Vrhovec, I. (2018): Potapljaške raziskave prito nega sifona Pivke v Planinski jami v letu 2017. – Jama, 2018/3: 36–37.

Winkler-Hermaden, A. (1957): Geologisches Kräftespiel und Landformung. Grundsätzliche Erkenntnisse zur Frage junger Gebirgsbildung und Landformung. – Wien (Springer).

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Die Höhle

Jahr/Year: 2021

Band/Volume: 72

Autor(en)/Author(s): Plan Lukas, Kaminsky Eva, Racine Tanguy, Koltai Gabriella

Artikel/Article: Genetische Interpretation der Eisriesenwelt (Tennengebirge) 117-138