© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Geomorphologische Untersuchung und genetische Interpretation der Dachstein-Mammuthöhle (Österreich)

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entstehung des drittgrößten Höhlensystems der Nördlichen Kalkalpen wurde in der Vergangenheit kontroversiell erklärt. Mittels morphologischer Kartierungen und morphometrischer Analysen der zentralen Teile wird die Genese anhand moderner speläogenetischer Modelle neu evaluiert. Die räumliche Anordnung der Höhle und viele aus der Frühphase der Entstehungsgeschichte erhaltene Kleinformen (z.B. Fließfacetten, Karren, Deckenmäander) ergeben folgende Interpretation: Neben jüngeren vadosen Canyon-Schacht-Systemen dominieren ältere Gänge, Labyrinthe und Schächte, die unter epiphreatischen Bedingungen während Flutereignissen gebildet wurden. Anhand von Fließfacetten und Sedimentstrukturen kann eine generelle Fließrichtung von Ost nach West abgeleitet werden. Eine bedeutende Rolle bei der Formung der heutigen Gangprofile spielten Sedimente: Durch die Sedimentbedeckung der Sohle konnten sich die Profile nur nach oben erweitern (Paragenese), und es stand meist nicht der gesamte heute nach Ausräumung der Sedimente sichtbare Querschnitt für den Durchfluss zur Verfügung. Dies ist für die Abschätzung der ehemaligen Durchflussmengen aus Querschnittsflächen und Fließfacettenlängen von Bedeutung. Lediglich für das Schlüssellochprofil des sogenannten Canyons (nahe dem Westeingang) ist Paragenese auszuschließen, und die Paläoschüttung bei Hochwasser kann mit 16 m³/s angegeben werden. Im gleichen Niveau finden sich weitere großvolumige Gänge, womit der Gesamtdurchfluss ein Mehrfaches betragen haben dürfte. Das ehemalige Einzugsgebiet der Wässer wird im Bereich südlich der heutigen Nördlichen Kalkalpen vermutet.

ABSTRACT

Geomorphologic studies and genetic interpretation of the Dachstein-Mammuthöhle (Austria)

The speleogenesis of Dachstein-Mammuthöhle, the third-longest cave system in the Northern Calcareous Alps, has been discussed controversially in the past. Using morphologic mapping and morphometric data of the central parts of the cave in combination with modern speleogenetic models a re-evaluation of its development is attempted. The geometry of the cave and several small-scale features (e.g., scallops, karren, ceiling meanders), which date back to the early history of the cave formation, lead to the following interpretion: old phreatic parts (galleries, mazes, and some pits) developed under epiphreatic conditions during flood events, followed by younger, vadose canyon-shaft-systems. Scallops and sedimentary structures indicate a general westward flow direction. Sediments played an important role during the formation of the profiles, i.e. the profiles expanded upward (paragenesis) because the floor of the galleries was sealed by sediments, and only part of the cross section, as it can be seen today after removal of these sediments, was occupied by water. This is relevant for calculations of the palaeodischarge from mean scallop lengths and cross-section areas. Paragenesis can only be ruled out for the origin of the keyhole profile of the so-called Canyon (near the Westeingang) and the palaeodischarge was estimated to 16 m³/s. This, however, was probably only a fraction of the total discharge of this system as several additional large galleries occur at the same cave level. The former catchment area was probably located south of today's Northern Calcareous Alps.

Lukas Plan
Naturhistorisches Museum Wien,
Karst- und Höhlenkundliche Abteilung,
Museumsplatz 1/10, A-1070 Wien
lukas.plan@nhm-wien.ac.at

Angelika Xaver
Landesverein für Höhlenkunde
in Wien und Niederösterreich,
Obere Donaustrasse 97/1/61, A-1020 Wien
angelika.xaver@gmx.at

Eingelangt: 18.1.2010
Angenommen: 18.4.2010

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

EINLEITUNG

Die Entdeckung der Dachstein-Mammuthöhle (DMH, 1547/9) gab einen wichtigen Impuls für die Höhlenforschung in den Ostalpen und in Österreich, da man bis vor 100 Jahren noch kein so großräumiges und ausgedehntes Höhlensystem in den Nördlichen Kalkalpen (NKA) kannte. Schon knapp nach der Entdeckung erschien eine umfangreiche Monographie über die „Höhlen im Dachstein" mit vielen Fotos und Plänen (Bock et al., 1913), in der bereits detaillierte Modelle zur Genese und zum Eishaushalt vorgestellt wurden. Die darin aufgestellte und später so genannte „Höhlenflusstheorie" gab jedoch in den folgenden Jahrzehnten Anstoß zu heftigen Diskussionen und Kritik.
Eine ausführliche Zusammenfassung über die historische Entwicklung der Entstehungsmodelle der DMH findet sich in Plan & Herrmann (2010; in diesem Heft). Es ist allerdings erstaunlich, dass es seit den 1950er Jahren kaum Arbeiten mit bedeutenden neuen Erkenntnissen über die Genese der DMH gibt. Seither wurde das Wissen über Höhlenentstehung deutlich weiterentwickelt, und Modelle zur Genese von Karsthöhlen sind international gut etabliert und weitestgehend anerkannt (u.a. Klimchouk et al., 2000; Ford & Williams, 2007; Palmer, 2007).
Für die vorliegenden Untersuchungen wurden vorhandene Vermessungsergebnisse (Pläne und 3D-Modelle; z.B. Plan, 1996) analysiert und Kartierungen von morphologischen und geologischen Elementen in der Höhle durchgeführt und danach mittels aktueller Modelle interpretiert. Die daraus resultierenden Ergebnisse präzisieren einige der bisherigen Vorstellungen und sollen qualitative und quantitative Daten (Zahlenwerte) zu den einzelnen Faktoren der Speläogenese geben.

CHARAKTERISTIK DER DMH

Geologie

Die gesamte Höhle ist im lagunären (gebankten) Dachsteinkalk der Dachsteindecke entwickelt. Die Schichten fallen mit durchschnittlich 30° (20 – 40°) in NE Richtung (020 – 070°) ein. Trimmel (1963) und Krauthausen (1989) nennen „dolomitische Zwischenlagen" (allerdings ohne örtliche Angaben und Messwerte), die ihrer Meinung nach speläogenetisch von großer Bedeutung sind. Während Krauthausen (1989) eine relativ simple Tektonik für den Dachstein-Nordrand beschreibt und damit versucht, diverse Richtungsstatistiken zu interpretieren, belegen jüngere Untersuchungen eine vierphasige Deformationsgeschichte der NKA (z.B. Linzer et al., 1997; Peresson & Decker, 1997), die zu einem äußerst komplexen Störungsmuster geführt hat.
Im Zuge der Deformationsereignisse wurden auch oftmals Schichtflächen als Störungsflächen bewegt, was durch die Bildung von Harnischflächen gekennzeichnet ist und zu bevorzugter Wasserwegsamkeit führen kann. Es finden sich auch Störungsversätze, die jünger sind als die Höhlenprofile (u.a. *Verfallene Burg*: 4,5 cm, Frisch et al., 2002) und teilweise jünger als die jüngsten Sedimente („Heller Ton": *Jeannylabyrinth*, *Tonplattenlabyrinth*, *Heli-Schöner-Gang*). Die von uns beobachteten Versatzbeträge liegen im cm- bis maximal dm-Bereich. Lediglich im *Däumelkogelschacht* sind Canyonprofile um mehrere Dezimeter versetzt. Zerrspalten, die auf gravitative Massenbewegungen zurückzuführen und bis 15 cm geöffnet sind, wie von Krauthausen (1989: 46) aus der *Riesenkluft* beschrieben, konnten nicht gefunden werden. Oftmals gibt es aber parallele Harnischflächen, wo der dazwischen liegende Kataklasit mechanisch erodiert wurde.

Anlage der Höhle

Die derzeit bekannten Teile der DMH haben eine Gesamtganglänge von 65 km und einen Höhenunterschied von 1208 m. Sie sind am glazial stark überprägten Nordrand des Dachsteinmassivs unter den Karen der Anger- und Schönbergalm sowie unter dem dazwischen liegenden Sporn des Mittagskogel entwickelt und reichen nur randlich unter die Altfläche des 2108 m hohen Krippenstein, wo mit 670 m die größte Überlagerung gegeben ist. Weiterführende Literatur zu Höhlenbeschreibungen ist in Behm & Plan (2005) zu finden.
Wie die meisten anderen Höhlensysteme der NKA (Audra et al., 2002, 2006; Plan et al., 2009a) besteht die DMH aus (1) älteren unter (epi)phreatischen Bedingungen entstandenen und (2) jüngeren vadosen Teilen. Die älteren Höhlenabschnitte sind ausgebildet als: (1a) Gänge. Besonders unter dem *Mittagskogel* sind diese oft horizontal und erreichen bis über 100 m² Querschnittsfläche. Sie können aber auch leicht geneigt sein (z.B. *Krippensteingang*) oder im Einfallen der Schichten verlaufen (*Barbarengang*, *Heli-Schöner-Gang*).

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

(1b) Deutlich kleinräumigere Labyrinthe, die meist an Schichtfugen (zentraler und südlicher Teil des *Edelweiß-* und *Blasenlabyriths, Minotauruslabyrinth*), aber auch an Störungen (z.B. vorderer Teil des *Edelweißlabyrinths, Projekt X*) angelegt sind. Hier dominiert meist eine Hauptstrecke, der seitlich kleinere labyrinthische Teile angelagert sind.
(1c) Gestufte Schächte (z.B. *Theseusschacht*: 90 m tief, *Pfingstschächte*: 55 m), die im Vergleich zu 1a und 1b relativ selten sind.
Die jüngeren zum Teil aktiven vadosen Passagen sind meist als Serien von (2a) Canyons und (2b) Schächten (z.B. *Hallstätterschacht*: 98 m) ausgebildet. Komplexe, oft an bedeutende Störungen gebundene Canyonsysteme erreichen bis 200 m Raumhöhe (z.B. *Riesenkluft, Etagencanyon/Südsystem*). Abgesehen davon, dass beide möglicherweise an denselben Initialfugen angelegt sind, schneiden die vadosen Teile die (epi)phreatischen zufällig an, was von Franke & Ilming (1963) gezeigt wurde. Oftmals wird der vorhandene phreatische Teil für eine gewisse Strecke benutzt, was zur Ausbildung von Schüssellochprofilen führt.
Fast alle (epi)phreatischen Abschnitte liegen zwischen 1250 und 1550 m und umfassen 85 % der Ganglängenmeter. Nur in der *Unterwelt* reichen bedeutende (epi)phreatische Teile bis auf 1120 m. Von der Hochfläche am Fuß des *Däumelkogel* (höchster Punkt: Eingang *Weißbierhöhle*: 1828 m) konnten zwei sich vereinigende Canyonschachtsysteme mit zwischengeschalteten (epi)phreatischen Teilen (ca.1700 m) bis zu den darunterliegenden Labyrinthen erforscht werden. Der tiefste Punkt (621 m) ist eine Engstelle im aktiven Canyonsystem von *Riesenkluft* und *Wasserschacht*. Dieser liegt ca.40 m über der vermuteten Resurgenz, der Quelle unterhalb der Seilbahn-Talstation bzw. ca.110 m über dem Vorfluter.
Die Hohlräume sind sowohl an Schicht- als auch an Störungsflächen – was bereits von Bock (1913) erkannte wurde – bzw. am Verschnitt mehrerer Elemente angelegt. Filipponi & Jeannin (2006) bzw. Filipponi et al. (2009) zeigten anhand der Analyse der Polygonzugdaten in Bezug zu den geologischen Verhältnissen, dass bei rund einem Dutzend weltweit untersuchter Riesenhöhlen 70 bis 80 % der Höhlengänge an wenigen sog. *inception horizons* (stratigraphische Initialfugen, was soviel bedeutet wie: Horizonte, die die Höhlenentstehung besonders begünstigen) angelegt sind. Für die DMH ermitteln sie, dass es nur 4-5 Zonen von den vielen hundert Schichtflächen sind. In der Höhle kann dies z.B. in den schichtgebundenen Teilen zwischen *Minotaurusbiwak* und *Saudreckröhren* (*Südsystem*) beobachtet werden, wo eine initiale Schichtfuge über 275 Höhenmeter verfolgt werden kann. Als Ursachen für diese bevorzugte initiale Wasserwegigkeit werden tektonische Bewegung an den Flächen oder Vorkommen von Pyrit diskutiert.

Hydrologie

Viele der Canyons werden von Gerinnen durchflossen, wobei sich diese in der Tiefe vereinigen. Die zwei bedeutendsten aktiven Gewässersysteme sind die *Weißbierhöhle* via *Etagencanyon* bis *Unterwelt* (Behm & Plan, 2005) und das System *Riesenkluft-Wasserschacht*. In jüngster Zeit wurde dessen Oberlauf weiter erforscht, womit das Gerinne über 940 Höhenmeter und 1,6 km Horizontalerstreckung bekannt ist (Behm, 2009). Das Einzugsgebiet der Bäche dürfte aber kaum über die Ausdehnung der DMH hinausgehen. Nur das des *Riesenkluft-Wasserschacht-Systems* reicht neuesten Forschungsergebnissen zufolge (Behm, 2009) etwas weiter nach Süden.
Die Schüttung beider beschriebener Bäche schwankt stark, wobei die Minimalschüttung im Unterlauf bei wenigen l/s liegt und die durchschnittliche bei einigen 10er l/s. Schwer zu beobachtende Maximalwerte dürften über 100 l/s erreichen. Daneben gibt es viele kleinere Gerinne, die nur auf relativ kurzen Strecken beobachtbar sind.
Wo die Bäche alte phreatische Teile benutzen, bildet das Wasser in U-förmigen Strecken Siphone (z.B. *Bohnerzbach, Jeannylabyrinth*), die nach einem Überlauf wieder in Canyons weiter fließen. Dolomitische Zwischenlagen oder Lehmverschlüsse, wie sie von Krauthausen (1989) postuliert werden, sind dazu nicht notwendig. Dies gilt mit größter Wahrscheinlichkeit auch für die Siphone in der *Unterwelt* (1120 m), da es im südlich gelegenen *Alibabacanyon* auf gleicher Höhe keine Anzeichen für stehendes Wasser gibt. In der DMH wird somit die phreatische Zone nicht erreicht. Lediglich die tiefsten Teile des *Wasserschachts* dürften der epiphreatischen Zone angehören.

Höhleninhalt

Klastische Sedimente

Autochthones Blockwerk und Verstürze finden sich in vielen Abschnitten, bevorzugt in den großräumigen Teilen unter dem *Mittagskogel* (*Saarhalle, Arkadenkluft, Großer Dom, Pilzlabyrinth*), wobei die kaum verstürzte *Paläotraun* eine Ausnahme darstellt. Seltener sind umfangreiche Deckenverbrüche in den tagfernen Teilen (*Trümmerhalle, Umkehrhalle, Wilbur-Dom).*
Allochthone Sedimente haben ein breites Korngrößenspektrum von Ton bis zu Steinen. Von der Erscheinung können an die zehn Sedimenttypen und -generatio-

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

nen unterschieden werden, deren umfassende Analyse noch aussteht. Sofern sie für die Genese der untersuchten Eisensulfide relevant waren, finden sich Analysedaten in Seemann (1973) sowie weitere punktuelle Daten in Franke & Ilming (1963).
Eine der jüngsten Sedimentgenerationen ist der für die Höhle markante „Helle Höhlenton" (Seemann, 1973), bei dem bereits Spöcker (1925) als Ablagerungsraum stagnierendes Wasser und als Ursache der Feinschichtung (Warvenschichtung) jahreszeitliche Schwankungen angenommen hat.
Anzumerken ist, dass sehr viele Gänge in fast allen Höhlenteilen völlig mit Feinsediment verschlossen sind. Beispiele für bedeutende Gänge sind: Gang E *Aignerdom* (*Oedlhöhle*), E *Rauchspalten* (nahe *Neuer Osteingang*), *Tischplattenhalle, NE-Sklavengang, Minotaurusbiwak*, *Lehmkammern* (*Minotauruslab.*), NW Ende *Barbarengang* (nach *Oase*), SE-Ende *Krippensteingang* (vor *Huziwand*), *Umkehrhalle* (*Krippensteingang* NW). Oftmals ist zu erkennen, dass auch die heute befahrbaren Teile völlig mit Sediment verfüllt waren und nur durch junge vadose Gerinne ausgeräumt wurden. Auch in den aktiven Canyons findet man angeschnittene Gangprofile, die völlig mit Sediment verfüllt sind (z.B. *Bergspalte*). Daneben sind besonders im *Alten Teil* Verschlüsse mit Geröllen häufig. Generell ist daher anzunehmen, dass ein bedeutender Teil der ursprünglich gebildeten Höhlenteile aufgrund der Sedimentverfüllung nicht zugänglich ist.

Speläotheme

Die DMH ist wie die meisten anderen alpinen Höhlen recht arm an Sinterbildungen. Vor allem (sub)rezente Sinter sind selten. Mit der U/Th Methode wurden bisher lediglich drei Proben von Speläothemen datiert. Eine stammt aus dem Bereich *Dreiteiliger Abgrund – Verfallene Burg*, die andere (M3A) aus der *Fleischmaschine* (nach *Trümmerhalle*). Beide ergaben U/Th-Gleichgewichtswerte, d.h. sie sind älter als ca. 450 kyr (kyr = 1000 Jahre; Spötl et al., 2007). Der Versuch, einen Stalagmiten aus der *Verfallenen Burg* mit der U/Pb-Methode zu datieren, scheiterte. Ein Alterswert konnte aufgrund des zu geringen U-Gehalts nicht angegeben werden. Jedoch kann vom isotopischen Gleichgewicht von ^{234}U und ^{238}U auf ein Alter von mindestens 1,5 Myr geschlossen werden (Frisch et al., 2002).
Proben die jünger als der „Helle Ton" sind, sind relativ selten und außerdem meist zu sehr verunreinigt, was eine Datierung verunmöglicht (z.B. aus dem *Gardowski-Labyrinth* der *Oedlhöhle*). Für eine dünne Sinterschicht (M6B) aus der *Umkehrhalle* (W Ende des *Krippensteingangs*), die über den laminierten Tonen lagerte, konnte ein Alter von 7 ±2 kyr ermittelt werden (R. Boch & C. Spötl, pers. Mitteilung). Der sehr große Fehler reflektiert die starke Verunreinigung.

Eis

Permanente Eisvorkommen sind auf den *Feenpalast* und die *Saarhalle* beschränkt. Massive zerbrochene Tropfsteine deuten auf eine kaltzeitliche Eisverfüllung hin. Ähnliche Szenarien werden auch für Höhlen in wesentlich wärmeren Gebieten angenommen (z.B. Kempe, 2004). Das beste Beispiel ist ein über 1 m hoher und ca.50 cm durchmessender kegelförmiger Stalagmit oberhalb der *Sesamwand* am Zugang zum *Krippensteingang*, der ca.60 cm unter der Spitze gebrochen ist. Obwohl die Bruchfläche leicht gegensinnig zum steil abfallenden Gang geneigt ist, sind Eisbewegungen der naheliegendste Prozess für das Abscheren dieses massiven Tropfsteins.

METHODIK

Die methodische Grundlage der vorliegenden Studie sind die aktuellen Konzepte zur Höhlenentstehung. Sie erlauben die Interpretation der Höhlenanlage und der Raumformen unter Berücksichtigung des Sedimentinhalts. Großteils wird auf Standardwerke Bezug genommen (Klimchouk et al., 2000; Ford & Williams, 2007; Palmer, 2007).
Die im Folgenden beschriebenen Formen wurden bei fünf eintägigen Befahrungen kartiert und vermessen. An Stellen mit erhaltenen Fließfacetten und in Gangabschnitten, die nicht von Versturzvorgängen oder Sedimenten geprägt sind, wurden Profile mit einem DistoX (elektronischer Distanzer, Kompass und Neigungsmesser) vermessen und am Pocketcomputer (PDA) skizziert. Die Gangquerschnittsflächen wurden mit ArcGIS ermittelt.
Besondere Bedeutung kommt den Kleinformen und Gangquerschnitten zu. Diese wurden in den Hauptstrecken der im nächsten Abschnitt beschriebenen Teile, mit Ausnahme der rein vadosen Strecken, kartiert.

Definition und allgemeine Bemerkungen zu den Formen

Im Folgenden werden deutsche Ausdrücke verwendet, wobei sich die Definitionen nach Palmer (2007)

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

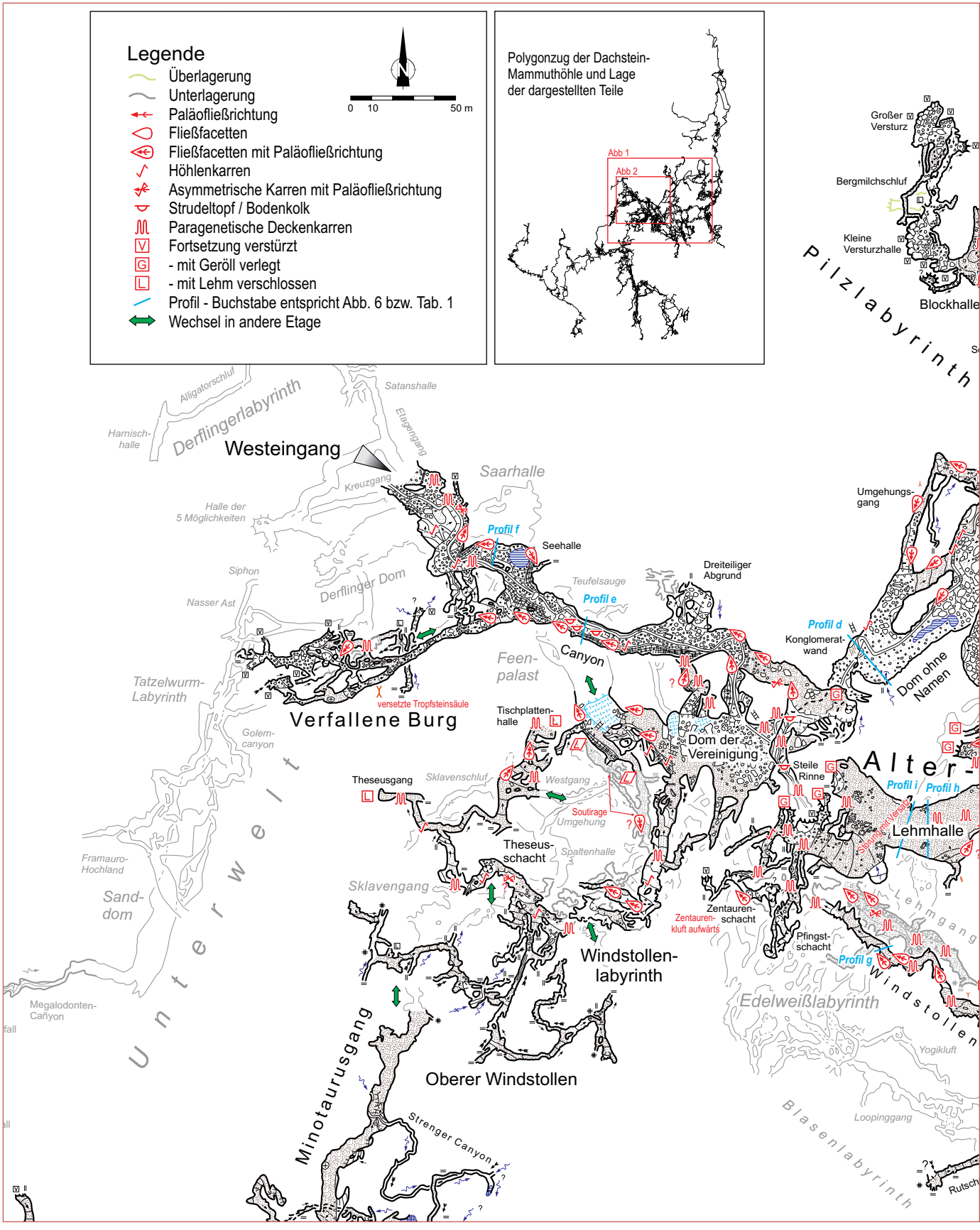

Abb. 1: Morphologische Kartierung der zentralen Teile der DMH. Hintergrund: verkleinerter Gesamtplan von Xaver, Kula & Plan, 2010.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

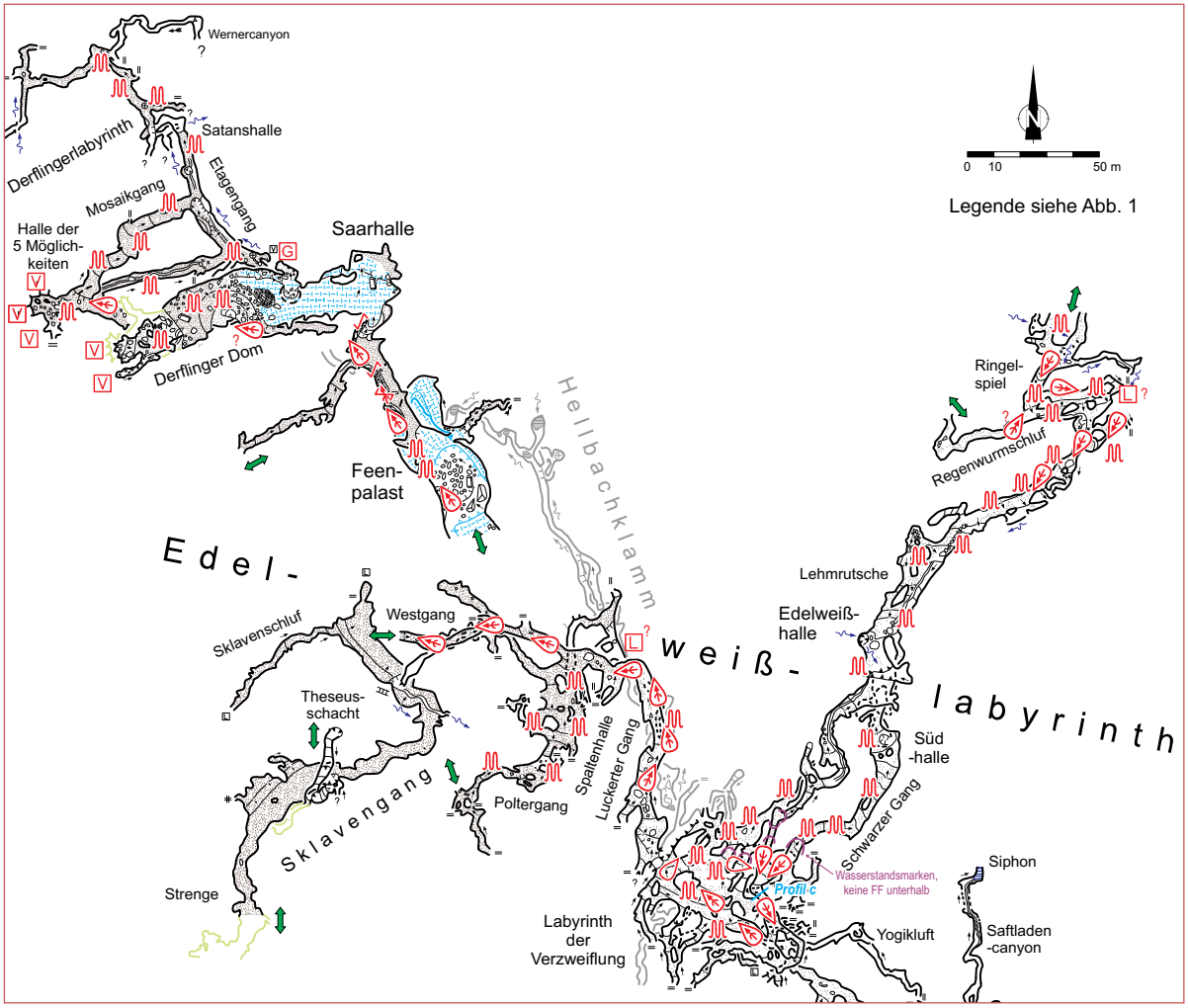

Abb. 2: Morphologische Kartierung der Unterlagerungen der zentralen Teile der DMH. Hintergrund: verkleinerter Gesamtplan von Xaver, Kula & Plan, 2010.

auf die englischen Fachausdrücke beziehen. Fließrichtung und -geschwindigkeit beziehen sich auf die Verhältnisse während der jeweiligen Entstehungsphase.

Fließfacetten (FF; *scallops*)

Hierbei handelt es sich um flächendeckend angeordnete grübchenartige Vertiefungen in der Höhlenwand. Sie erlauben aufgrund ihrer Asymmetrie und durchschnittlichen Länge Aussagen über die Fließrichtung respektive -geschwindigkeit der letzten Wässer, die die Passage erweiterten. Sie sind in der DMH häufig erhalten, oftmals aber nur bei sehr flacher Beleuchtung, die das Relief verdeutlicht, zu erkennen. Die Quantifizierung der Fließgeschwindigkeit erfolgt nach den Formeln von Curl (1974), wobei die Korrekturen von Palmer (2007: 148) für Gangdurchmesser und Querschnittsform berücksichtigt wurden (Tab. 1). Da von einer Entstehung der Gänge im Miozän vor 5 bis 10 Ma ausgegangen wird (Frisch et al., 2002), wurde eine Wassertemperatur von 15° C angenommen (Harzhauser et al., 2008). Es ist anzumerken, dass FF Fließgeschwindigkeiten während Flutereignissen repräsentieren, bei denen kalzit-untersättigtes Wasser tief in den Karst gelangt, und nicht die durchschnittliche Geschwindigkeit wiedergeben.

Höhlenkarren (*rills*)

Dies sind unter vadosen Bedingungen entstandene Formen, die den an der Oberfläche vorkommenden Rillenkarren ähneln. Sie sind typisch für die epiphreatische Zone, wo bei einem Flutereignis Wasser in die Fugen oder in den Sedimentkörper gepresst wird. Danach, während sich der Gang wieder leert, sickert das Wasser langsam heraus und Karren entstehen durch Lösung der Felsoberfläche.
Teilweise findet man in der Mammuthöhle asymmetrische Karren, die zeigen, dass sie nicht in einer spä-

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

teren rein vadosen Phase gebildet wurden: Während sich die Karren unter vadosen Bedingungen bilden, entsteht die fließfacettenähnliche asymmetrische Überprägung durch das fließende Hochwasser. Die Interpretation dieser Form ist etwas problematischer, da auch andere lokale Faktoren zu einzelnen asymmetrischen Karren führen. Nur Karrenvergesellschaftungen, die über die gesamte Fläche gleiche Asymmetrie aufweisen, wurden zur Interpretation der Fließrichtung herangezogen.

Paragenetische Canyons und Profile (*paragenetic canyons, profiles*)

Paragenese (in Bezug auf Höhlenentstehung) ist die nach oben gerichtete Lösung in einer wassererfüllten Passage, wenn Sediment die Sohle bedeckt. Ursprünglich an einer Initialfuge entstandene runde oder elliptische Profile können sich nur nach oben und seitlich erweitern, und es bilden sich kastenförmige oder canyonartige Profile. Es stellt sich abhängig vom Wasserangebot und der Sedimentfracht ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der Sedimentationsrate (positiv oder negativ), die den freien Querschnitt bestimmt, und der Fließgeschwindigkeit ein.

Paragenetische Deckenkarren (*ceiling channels*)

Dies sind meist geschwungene, teils vernetzte Kanäle an der Decke bzw. an überhängenden Gangquerschnitten. Sie entstehen bei nahezu vollständiger Füllung des Profils mit Sediment, wobei sich zwischen diesem und der Decke Fließkanäle ausbilden, in denen Kalk gelöst wird, aber die Fließgeschwindigkeit nicht ausreicht, um das Sediment zu erodieren. Die Formen sind nicht an Initialfugen gebunden. Bei fortschreitender Lösung bleiben oftmals nur zapfenförmige Gebilde (*ceiling pendants*) übrig. Die Formen werden nur freigelegt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit so groß ist, dass das Sediment wieder erodiert wird.

Schichtfugen-Anastomosen (*bedding plane anastomoses*)

sind geschwungene und vernetzte kleine Röhren. Sie bilden sich entlang von Initialfugen (meist chichtfugen), in die Wasser bei Flutereignissen injiziert wird, oder sie bleiben vom Initialstadium der Höhlenbildung erhalten. Wenn das untere Gesteinspaket herunterbricht und die Formen an der Decke freilegt, können sie paragenetischen Deckenkarren ähnlich sein. Im Gegensatz zu diesen sind sie aber an Strukturen (meist Schichtfugen) gebunden und haben eher halbkreisförmige bzw. kreisförmige Querschnitte. Im Vergleich zu den paragenetischen Formen sind sie in der DMH selten zu sehen.

Strudeltöpfe (auch Bodenkolke; *potholes*)

Den Gletschermühlen ähnlich, handelt es sich hier um brunnenartige Löcher in der Gangsohle. Sie zeigen hohe Fließgeschwindigkeiten, sind aber gegenüber früheren Annahmen nicht auf vadoses Fließen beschränkt.

Lösungskolke (auch Deckenkolke; *solution pockets*)

Dies sind blind endende Hohlformen an den Wänden und der Decke, die meist an Fugen gebunden sind. Sie werden als Zeichen für episodische Fluten gedeutet, bei denen Wasser in die Fugen gedrückt wird und diese erweitert. Ausgenommen in vados entstandenen Canyons sind sie in nahezu allen Teilen der DMH zu finden und weisen auf (epi)phreatische Entstehungsbedingungen hin.

Lösungsrampen (*solution ramps*)

Lösungsrampen sind wellenförmige Kanten bzw. Kehlen in der Höhlenwand, die über einem ehemaligen Sedimentkörper im (epi)phreatischen Milieu entstehen.

BEOBACHTUNGEN UND INTERPRETATION

Die beschriebenen Formen wurden kartiert bzw. vermessen und sind in Abb. 1 und 2 dargestellt.

Teile zwischen Ost- und Westeingang

Schmetterlingsgang – Arkadenkluft

Vom *Alten Osteingang* (1320 m) steigt der *Schmetterlingsgang* kontinuierlich zum *Caudinischen Joch* (1435 m) an, um dann wieder in den *Mitternachtsdom* abzufallen (ca.1400 m). Der *Schmetterlingsgang* führt mit Querschnitten von meist unter 10 m² gegen Süden. FF sind in den durch Frostsprengung und intensive Oberflächenverwitterung (Kondenswasserkorrosion?) geprägten Wänden nicht zu erkennen. Vereinzelt finden sich paragenetische Deckenkanäle. Bei der Einmündung der *Umgehungsgalerie* wird der Querschnitt größer und erreicht oberhalb der *Lahnerhalle* um die 20 m². Hier sind auch an mehreren Stellen FF aufgeschlossen, die ein generell gegen W gerichtetes Fließen anzeigen. Eine einzige kleine Ansammlung mit

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 3: Der untere ansteigende Abschnitt der Paläotraun, Blickrichtung Westen. Foto: A. Neumann

entgegengesetzten Formen befindet sich oberhalb des Theodolitpunktes Th309. Sie kann als Wirbel in dieser Raumerweiterung interpretiert werden. In der Folge ist der *Schmetterlingsgang* an einer markanten NE-SW streichenden Störung angelegt und stark versturzgeprägt (*Caudinisches Joch*). Im einmündenden *Knochenlabyrith* sind keine FF zu finden, sondern lediglich Karren. In der *Arkadenkluft*, wo das *Pilzlabyrinth* einmündet, nimmt die Raumhöhe deutlich zu und erreicht bis über 20 m bei wenigen Metern Breite. Raumerweiterungen mit kreisförmigem Grundriss im unteren Profilabschnitt könnten als große Bodenkolke interpretiert werden und wären somit ein Hinweis auf hohe Fließgeschwindigkeit. Der *Mitternachtsdom*, in den von unten die parallel verlaufende *Paläotraun* einmündet, ist stark versturzgeprägt. Am Umkehrpunkt des Führungswegs sind großflächig Karren ausgebildet.

Pilzlabyrinth

Dieser von der *Arkadenkluft* nach NNW ziehende Teil ist oft versturzgeprägt. Im S der *Blockhalle* weisen undeutliche FF eher auf NW gerichtetes Fließen hin. Weiters ist dieser Teil paragenetisch geprägt.

Paläotraun

Die *Paläotraun* ist mit ihrem Querschnitt von durchschnittlich 10 m Breite und, abhängig von der Sedimentverfüllung, bis zu 14 m Höhe auf einer Länge von 180 m der wohl beeindruckendste Gang der DMH (Abb. 3), dessen unterschiedliche genetische Deutungen in der Vergangenheit große Kontroversen ausgelöst haben (Plan & Herrmann 2010; in diesem Heft). Die tunnelartige Passage der *Paläotraun* nimmt in der *Halle der Vergessenheit* (1365 m) ihren Anfang. Im Raum N davon, der nur über einen künstlichen Stollen mit der *Lahnerhalle* in Verbindung steht, zeigen FF W-gerichtetes Fließen. Die Fortsetzung gegen E ist

Abb. 4: Große Fließfacetten im Bereich des SW Profils der Paläotraun (Abb. 6b) an der W-Wand knapp über dem Weg zeigen eine Fließrichtung nach links (SSW). Die mittlere Länge in diesem Bereich beträgt 15,6 cm. Das entspricht einer Fließgeschwindigkeit von 0,2 m/s (vgl. Tab. 1). Sichtbare Länge des Maßstabs 44 cm.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

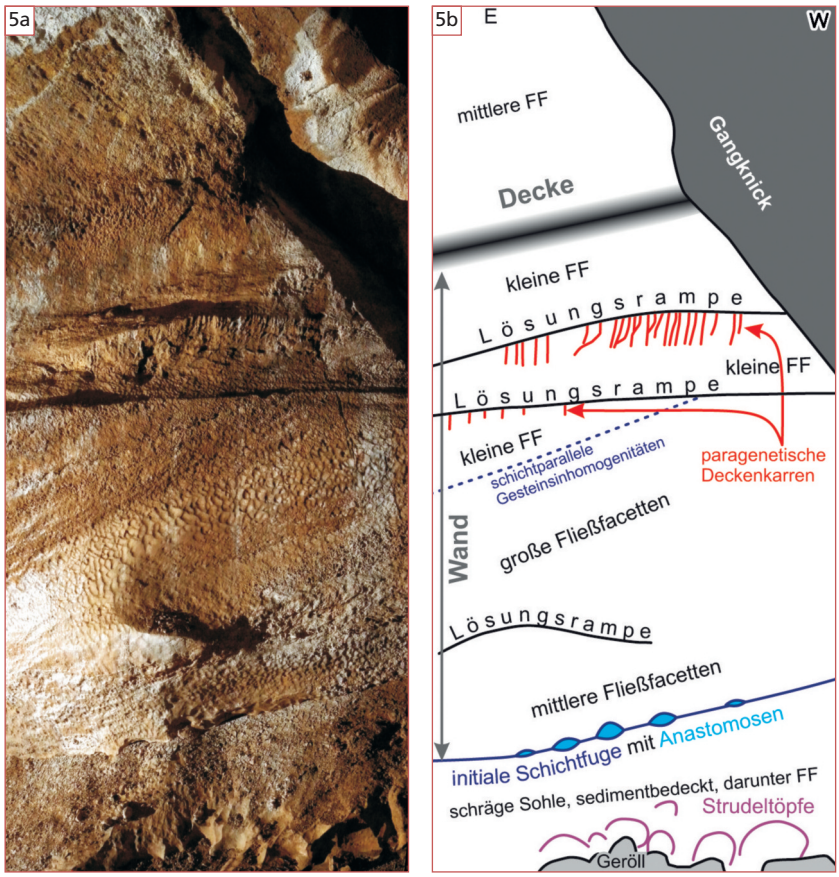

Abb. 5a: Foto (flache Beleuchtung von links) der S-Wand der Paläotraun. Die Fließfacetten (FF) zeigen eine Fließrichtung nach rechts (W).
Abb. 5b: Interpretierte Strichgrafik. Profilhöhe ca.13 m.

durch zwei große Verstürze blockiert, hinter denen durch die *Rauchspalte* (1370 m) ein kurzer großräumiger Gangabschnitt folgt, der wiederum gegen E verlehmt endet. Wie bereits Herrmann (1988) vermutet, ist hier eine der Fortsetzungen bzw. Zuflüsse der Paläotraun anzunehmen.

Die *Paläotraun* weist mehrere leichte Knicke auf und steigt von E nach W an. Im unteren Teil steigt die Decke mit 17° an (bis ca. Theodolithpunkt 63), danach nur mehr mit weniger als 5°. Während der untere Abschnitt großteils mit Sediment erfüllt ist, liegt weiter im W an einigen Stellen der Felsboden frei. Die Bankung des Kalkes (gemitteltes Einfallen: 16° nach 025°) ist nur undeutlich ausgebildet. Nur in wenigen Abschnitten ist eine initiale Schichtfuge im untersten Profilteil durch Anastomosen erkennbar (Abb. 5). Die Wände zeigen einige leicht gewellte Kanten und Kehlen, die subparallel zur Decke, aber nicht parallel zur Bankung des Kalks verlaufen und somit als Lösungsrampen zu interpretieren sind. Die Wände sind von FF skulpturiert (Abb. 5), die durchwegs ein W-gerichtetes Fließen (aufwärts) anzeigen. Zwei Profile wurden exakt vermessen und sind in Abb. 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es auch überhängende Wandpartien gibt, die Deckenkarren und -kanäle aufweisen. Sie zeigen eindeutig, dass der Gang phasenweise großteils mit Sediment verfüllt war. Wo die Sohle freiliegt, sind ineinandergreifende Strudeltöpfe erkennbar. Der Gang weist kaum Zeichen von Versturzvorgängen auf.

Beim östlichen Profil (Abb. 6a) sind nur auf einer begrenzten Fläche FF messbar (Tab. 1). Die sichtbare Querschnittsfläche beträgt hier 108 m², wobei ein großer Teil der Sohle sedimentbedeckt ist. Die FF zeigen Fließgeschwindigkeiten von rund 0,4 m/s, was, unter der Annahme, dass dieses gesamte Profil zur Verfügung stand, eine Durchflussmenge von 45 m³/s ergäbe. Das SW gelegene Profil (Abb. 6b) ist fast frei von Sediment. Die hier in vier verschiedenen Höhen zugänglichen FF ergeben stark unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 0,7 m/s (Tab. 1). Dies spricht ebenfalls dafür, dass die Sohle während der Entstehung mit Sediment bedeckt war. Somit wurde nie das gesamte Profil über längere Zeit durchflossen, sondern nur über der wachsenden Sedimentbedeckung nach oben erweitert (Abb. 7). Dabei haben in variierenden Querschnitten unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten geherrscht.

Die Imbrikation von direkt auf der Gangsohle verkitteten Augensteinschottern zeigen ebenfalls SW gerichtetes Fließen. Das Diagramm von Hjulström (1935)

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

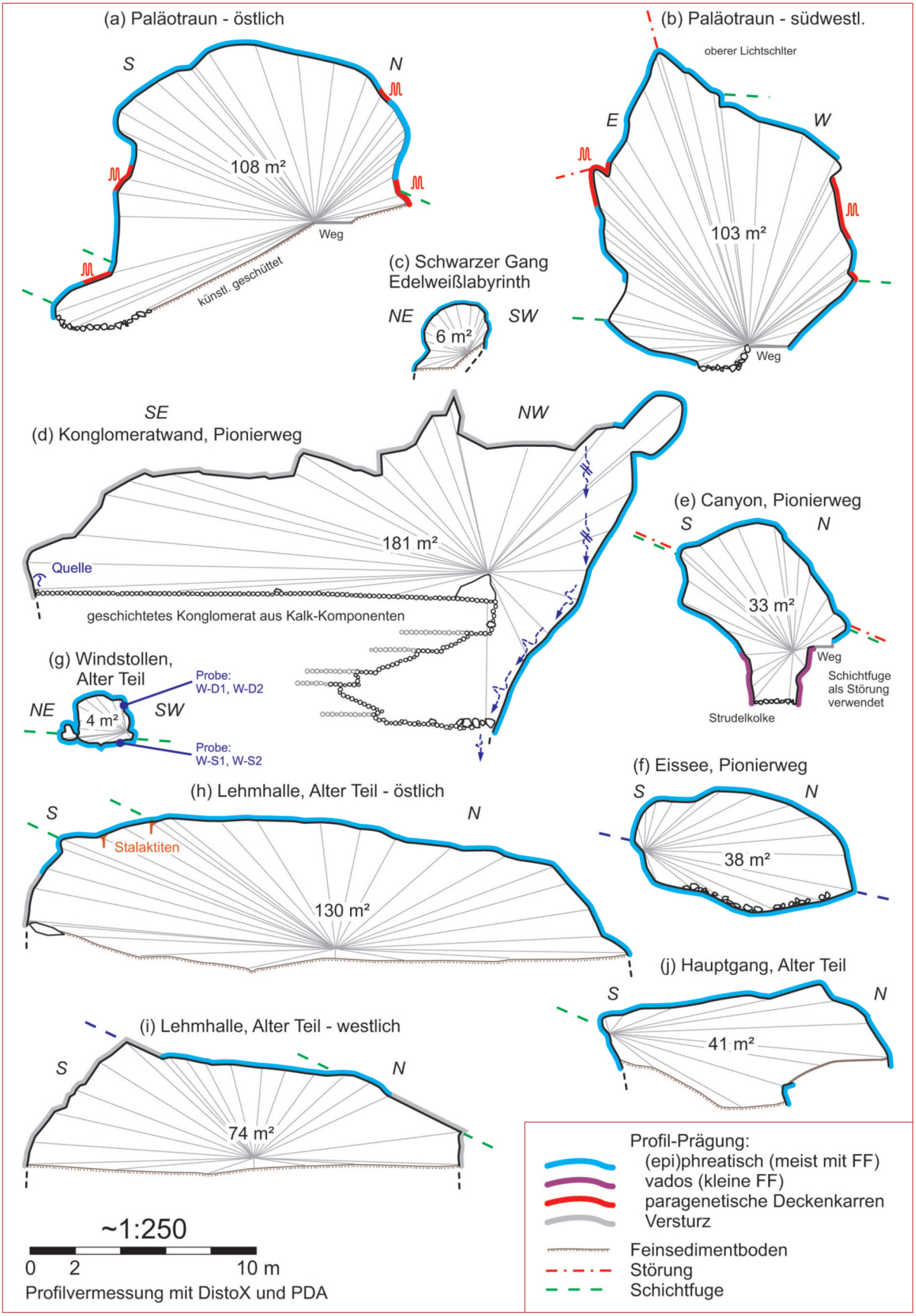

Abb. 6: Vermessung und genetische Interpretation einiger markanter Profile.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Tabelle 1: Aus Fließfacetten und Gangquerschnitten ermittelte Durchflussmenge.

	A [m²]	L [cm]	n	min [cm]	max [cm]	~DM [m]	v [m/s]	Q [m³/s]	Anmerkung
Paläotraun – östl.; a	108*	9,6	19	7	13	10; r	0,42	45+	
Paläotraun – westl.; b	103	15,6	13	12	21	10; r	0,22	23+	W-Wand: knapp ober Weg
Paläotraun – westl. ; b	103	6,9	19	5	8	10; r	0,55	58+	W-Wand: 3 m schräg ober Weg
Paläotraun – westl. ; b	103	5,3	12	4	7	10; r	0,68	72+	W-Wand: über Schichtfuge
Paläotraun – westl. ; b	103	14,4	18	11	19	10; r	0,25	26+	S-Seite: schräge Sohle
Schwarzer Gang. (EL); c	6**	5,3 1)	32	3	9	2; r	0,58	3,5+	1) SW-/ NE-Wand / Decke: 5,6 / 5,1 / 4,5
„Canyon" gesamt; e	33	7,3	21	5	10	5; r	0,49	16	
„Canyon" nur Canyon; e	1*	3,6	12	2	6	1; f	0,90	1,0	
Eissee; f	38	4,6 2)	29	2	6	5; r	0,80	30+?	2) N-/ S-Wand: 4,9 / 4,1
Hauptgang (AT); j	41**	7,0	10	5	10	5; r	0,52	21+?	

Der Buchstabe beim Profilnamen bezieht sich auf Abb. 6: sedimentfreie Querschnittsfläche (*Querschnitt durch Sedimente verringert, **stark verringert), L: Mittelwert der Facetten-Längen; n: Anzahl der gemessenen FF; min: minimale L; max: maximale L; ~DM: in der Rechnung berücksichtigter Gangdurchmesser; r: Röhrenform; f: Fuge; v: errechnete Fließgeschwindigkeit; Q: Durchflussmenge (+Aufgrund von Paragenese ist der Wert um ein Mehrfaches zu hoch).

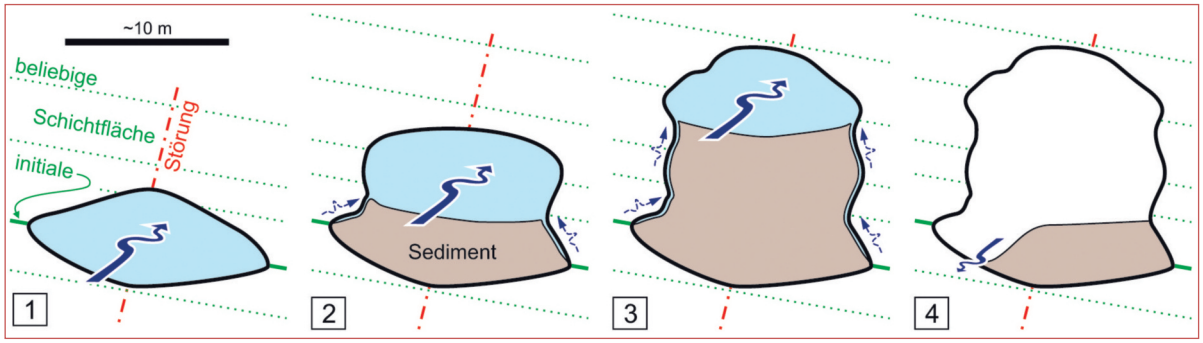

Abb. 7: Schematische Entstehung des paragenetischen Profils der Paläotraun: (1) Am Schnittpunkt einer Schichtfuge und einer Störung entsteht ein elliptisches Profil. (2) Durch Sedimente am Boden wird in weitere Folge das Profil nur nach oben erweitert. Zwischen Sediment und Höhlenwand aufdringende Wässer lassen an den überhängenden Profilteilen paragenetische Deckenkarren entstehen. Paragenese findet somit in zwei unterschiedlichen Maßstäben statt: einerseits bei der Ausformung des Gesamtprofils (10er m Maßstab) und andererseits bei der Bildung der Deckenkarren (dm-Maßstab). Man beachte, dass für die weitere Profilentwicklung Schichtfugen und Störungen keine Rolle mehr spielen. (3) Weiterentwicklung des Profils nach oben. (4) Erosion des Sediments führt zur Freilegung eines Großteils des Profils. Zumindest im Endstadium geschah dies durch vadose Wässer mit geringer Schüttung. Ob es auch unter phreatischen Bedingungen zur Sedimenterosion kam ist fraglich.

erlaubt eine Abschätzung der Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Korndurchmesser. Für diese Kiese mit 1 bis 2 cm Korngröße ergeben sich ca. 1 m/s. Dieser Wert ist geringfügig höher als der durch die FF repräsentierte Wert. Neben gut gerundeten Augensteinen mit bis zu 15 cm Durchmesser haben zahlreichere mäßig gut gerundete Kalkkomponenten bis 40 cm Länge. Sie zeigen oft eine Imbrikation, die ebenfalls auf W bzw. SW gerichtete Strömung hindeutet (Abb. 8). Aufgrund der Korndurchmesser dieser Gerölle ergeben sich zeitweilige Strömungsgeschwindigkeiten von einigen m/s, also deutlich höher als die FF anzeigen. Anzumerken ist, dass Schlote oder ansteigende Seitenteile, die einen subvertikalen Eintrag der Steine ermöglichen, in der *Paläotraun* fehlen.

Abb. 8: Die Imbrikation (dachziegelartige Anordnung von länglichen oder plattigen Komponenten) von Kalkgeröllen in der Paläotraun zeigt ein Fließen nach rechts (W). Vom Zentimetermaßstab (rechts) sind 27 cm zu sehen.

Dom ohne Namen

Alle vom *Mitternachtsdom* zum *Dom ohne Namen* (1385 m) führenden Strecken weisen W-gerichtete FF auf. Der freie Gangquerschnitt (Abb. 6d) beträgt hier knapp 200 m², aber ein weiterer Teil des Profils ist mit mächtigen Sedimenten bedeckt. Schon den Ent-

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 9: Konglomeratwand: Vadose Wässer haben einen völlig mit Geröll verfüllten Gang teilweise wieder freigelegt. Im Deckenbereich besteht mit großer Wahrscheinlichkeit eine nach wie vor verfüllte Verbindung zum Ende der Steilen Rinne.

deckern (Bock, 1913) fiel die *Konglomeratwand* mit ihren mächtigen Geröllbanken auf (Abb. 9).

Es handelt sich um eine siphonartige Strecke, die mit schlecht sortierten, mäßig gerundeten karbonatischen Geröllen (Augensteine fehlen) und mit einzelnen Sand- und Silt-Zwischenlagen aufgefüllt ist. Lediglich ein kleines rezentes Gerinne (*Quelle*) in der S-Seite des *Dom ohne Namen* lagert Augenstein-Kiese auf den Kalkgeröllen ab. Die von Trimmel (1980) beschriebenen zwischengeschalteten Sinterschichten, die eventuell eine Datierung zulassen würden, konnten nicht gefunden werden. Das Sediment ist deutlich geschichtet und fällt mit 4° nach NE ein. Dieses Einfallen zeigt auch der Boden des *Dom ohne Namen* auf einer Länge von ca.50 m.

Da derselbe Sedimenttyp mit gleichem Einfallen auch E des unteren Endes der *Steilen Rinne* aufgeschlossen ist und hier die Fortsetzung des Gangs nach E damit plombiert, ist es naheliegend, dass es sich um einen ehemals zusammenhängenden Sedimentköper handelt. Dies impliziert wiederum, dass sich der vom *Dom ohne Namen* kommende Gang teilt, wobei der mit Konglomerat plombierte Ast Richtung *Westeingang* zieht und der nicht vollständig sedimentverfüllte Ast in den *Dom der Vereinigung* leitet. Beim Aufstieg in diesen sind an der Decke markante Deckenkarren ausgebildet.

Ende der Steilen Rinne bis Westeingang

Unmittelbar westlich vom unteren Ende der *Steilen Rinne* (1390 m), wo sich W-gerichtete FF befinden, ist ein Kalkkonglomerat zu finden. Es gleicht dem der *Konglomeratwand*, fällt hier aber gegen W ein. Ähnliche Sedimente kommen auch oberhalb der *Steilen Rinne* bei der Einmündung des *Lehmgangs* sowie oberhalb der *Lehmhalle* im *Brikerlversturz* (N des Theodolit-

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

punkts M34, Sh 1471 m), zu der ein verstürzter Schlot emporzieht, sowie beim Durchstieg in die *Zentaurenkluft* vor. Der Ursprung, vermutlich eine Vertikalstrekke, die an die ca.80 m darüber liegende Oberfläche führt, ist somit in diesem Bereich anzunehmen.
Weiter Richtung *Westeingang* (1388 m) bestehen sowohl über den *Dreiteiligen Abgrund* als auch über den für den *Pionierweg* erweiterten Gang mehrere kleinräumigere Verbindungen zum *Dom der Vereinigung*. In einer weiteren horizontalen Strecke weisen FF undeutlich auf einen Zufluss vom *Dom der Vereinigung* hin. Danach steigt der sogenannte *Canyon* leicht an und ist als markantes Schlüssellochprofil ausgebildet: In den 7 x 4 m schrägelliptischen oberen Profilteil ist ein über 2 m tiefer und 0,7 bis 2 m breiter Sohlencanyon eingeschnitten (Abb. 6e). W-gerichtete FF im Bereich des elliptischen Profils haben durchschnittlich 7,3 cm Länge, im Canyonteil nur 3,6 cm. Sprengabraum vom Bau des Pionierweges bedeckt die Sohle, aber große, die gesamte Breite einnehmende Strudeltöpfe sind zu erkennen. Aufgrund der Fläche von 33 m² ergibt sich eine Durchflussmenge von 16 m³/s und für den vadosen Canyoneinschnitt 1 m³/s. Danach fällt der Gang wieder leicht ab, und kurz nach dem *Eissee* ist die gesamte Sohle aufgeschlossen, aber kein Canyoneinschnitt mehr zu erkennen (Abb. 6f).
Beim *Canyon* kann aufgrund der Breite des Sohlencanyons und seines Fehlens in den tiefer liegenden Teilen W davon (E bedeckt Schuttwerk die Sohle) von einer gleichzeitigen bzw. sukzessiven Entstehung der Profilteile ausgegangen werden. Somit wird diese Passage als Einschnitt eines Canyons in eine nach oben gewölbte Röhre (*isolated vadose trench* nach Ford & Williams, 2007: 232) interpretiert. Dies ist, neben den in diesem Bereich zahlreichen Karren, ein weiteres Anzeichen epiphreatischer Entstehungsbedingungen (im Überflutungsbereich). Außerdem schließt die gleichzeitige Eintiefung des Sohlencanyons Paragenese aus. Der Querschnitt und FF beim *Eissee* ergeben 30 m³/s Durchfluss. Die Asymmetrie des elliptischen Profils in Bezug auf die initiale Schichtfuge kann als Zeichen für Paragenese gedeutet und die Durchflussdifferenz zum *Canyon* mit einer teilweisen Sedimentverfüllung in diesem siphonartigen Abschnitt erklärt werden. FF und die kleinen Querschnitte sprechen gegen bedeutende Zuflüsse aus der schräg nach W ansteigenden *Verfallenen Burg*, wo nicht gut erhaltene FF auf eine W-gerichtete ansteigende Strömung deuten.
In der hinteren Ecke des *Eissees* zeigen gegensinnige FF das Auftreten eines großen Wirbels. Weiter gegen den *Westeingang* sind noch einige Male FF, Karren und asymmetrische Karren aufgeschlossen. Im Gegensatz zum bereits beschriebenen Gangabschnitt deuten Deckenkanäle und an der Wand verfestigte Sande auf eine ehemals vollständige Verfüllung hin.

Dom der Vereinigung, Saarhalle bis Derflingerdom

Der *Dom der Vereinigung* (1380 m) ist durch gewaltige Versturzvorgänge überprägt. Seine Decke wird von einer mehrere 100 m² großen Schichtfläche gebildet, was von Arnberger (1953) als Hinweis für einen tektonischen Ursprung gedeutet wurde. Diese These unterstützende Beobachtungen konnten nicht gemacht werden. Die Strecke von hier über *Feenpalast* (1365 m) und *Saarhalle* in den bis zu 23 m hohen *Derflingerdom* (1350 m) ist von NW-gerichteten FF, Paragenese und Karren gekennzeichnet. Eine aufgrund der drastischen Querschnittsänderungen vermutete Parallelstrecke zwischen *Feenpalast* und *Saarhalle* dürfte mit Sediment und tw. Eis verschlossen sein. Im *Derflingerdom* endet dieser sehr großvolumige Gang an großen Verstürzen.

Derflingerlabyrinth

Dieses ist durchwegs von Paragenese geprägt. Nur in der *Halle der 5 Möglichkeiten* (1340 m) befinden sich an der Decke W-gerichtete FF. Sowohl im E als auch im W werden die großräumigen Gänge (ca.10 m² Querschnitt) durch mächtige Verstürze begrenzt. Eine weiter nach W Richtung *Harnischhalle* ziehende Strecke ist relativ unbedeutend (ca.1 m²). Bis zu 3 m hohe Profile, die aus mindestens fünf sehr unterschiedlichen Sedimenttypen aufgebaut werden, sind zu beobachten.

Oedlhöhle

Der engräumige Eingangsbereich der *Oedlhöhle* (Eingang: 1330 m) hat meist Querschnitte von wenigen Quadratmetern und birgt undeutliche FF, die höhlenauswärts (N-gerichtetes) Fließen zeigen. Er führt in den *Bartongang* (1340 m), wo Deckenkarren aufgeschlossen sind. Im nach S leitenden *Essltunnel* sind zwei Generationen von Deckenmäandern zu sehen, wobei N-gerichtete FF in der Phase dazwischen entstanden. Die Querschnitte betragen hier wie im *Bartongang* max. 10 m², wobei das Profil großteils mit Lehm erfüllt scheint. Im großräumigen Gang, der zum *Aignerdom* (1375 m) leitet, sind sedimentfreie Querschnitte von über 30 m² aufgeschlossen, wobei die Sohle nirgends zu sehen ist. Nach E, knapp vor der Einmündung des *Essltunnels*, versinkt der Gang in einem Lehmsiphon. Auch vor dem *Aignerdom* zeugen Deckenmäander von einer früheren kompletten Sedimentverfüllung. Nur im Deckenbereich sind FF zu erkennen, deren Richtung aber nicht interpretiert werden konnte.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 10: Gangprofil im Windstollen (Alter Teil): Das an einer Schichtfuge (im unteren Teil) entstandene Profil hat sich aufgrund von Sedimentbedeckung an der Sohle nach oben entwickelt. Unbedeutende rezente Gerinne haben die Sedimente wieder entfernt und einen nur wenige cm tiefen Sohlencanyon hinterlassen.

Im *Lahner-* und *Gardowskilabyrinth* sind oft Deckenmäander zu sehen und nach N, Richtung *Paläotraun* weisende FF. Knapp vor dem trennenden Versturz sind Karren aufgeschlossen.

Alter Teil und Tonplattenlabyrinth

Diese Teile liegen mit 1390 bis 1520 m Seehöhe höher als die zuvor beschriebenen.

Der *Alte Teil* (*AT*) wird vom nahezu horizontalen *Hauptgang* (ca.1450 m) dominiert, der nach der *Pfeilerhalle* in die *Lehmhalle* bzw. den *Großen Dom* übergeht. Das vom *Hauptgang* abzweigende *Tonplattenlabyrinth* liegt tiefer (bis 1400 m) und setzt sich mit größter Wahrscheinlichkeit hinter einem 8 m langen Lehmsiphon im *Lehmgang* fort. Dessen Ende ist über drei (epi)phreatische Schlote (*Zentaurenkluft, Pfingstschächte,* und *Brikerlversturz* – mit Steinen verlegt) mit dem W Ende der *Lehmhalle* verbunden bzw. besteht hier der Zugang zum *AT* über die *Steile Rinne*. Von der *Pfeilerhalle* besteht weiters über den *Krokodilschluf* und den *Windstollen* eine kleinräumige subhorizontale Verbindung mit dem Ende des *Lehmgangs*, die als Zugang zum *AT* benutzt wird.

Die *Steile Rinne* weist zwar ein Schlüssellochprofil und kleinere Strudeltöpfe auf, die geringe Breite des Canyoneinschnitts spricht aber für seine spätere Entstehung während einer vadosen Phase. Aufgrund deutlicher Oberflächenverwitterung durch Kondenswasserkorrosion sind keine interpretierbaren FF erhalten. Generell zeigen die FF im *AT* W-gerichtete Strömung (*Hauptgang, Pfeilerhalle, SE Großer Dom, Windstollen, Tonplattenlabyrinth, Lehmgang*). Es ist anzumerken, dass der *Hauptgang* im E mit mehreren tagnahen Verstürzen beginnt (bzw. endet). Unerwartet ist, dass FF in der *Zentaurenkluft* eindeutig durch aufwärts gerichtetes Fließen geprägt sind. In der *Lehmhalle* konnten keine FF gefunden werden. Der vordere Bereich des *Kluftgangs* fungiert als Zubringer zum *Hauptgang*, was sich auch in der Dimensionszunahme W der Einmündung widerspiegelt. Das Wasser dürfte aus einer verstürzten Passage am nördlichsten Punkt gekommen sein, da FF W davon eher W-gerichtetes Fließen anzeigen. Die Fließrichtung im *Wassergang* ist nicht ganz eindeutig N gerichtet (undeutliche FF, Imbrikation von Augensteinen).

Viele Teile zeigen paragenetische Prägung in Form von Deckenkarren und Mäandern. Im *Windstollen*, wo oftmals die Gangsohle aufgeschlossen ist, kann die paragenetische Profilentwicklung modellhaft beobachtet werden: Von einer initialen Schichtfuge im untersten Teil des Profils (Abb. 6g und Abb. 10) hat sich der Querschnitt aufgrund wachsender Sedimentbedeckung nach oben entwickelt. Im mittleren und oberen Teil sind keine Fugen mehr anzutreffen. Theoretisch könnte auch der stark unterschiedliche Dolomitgehalt zu einseitiger Lösung geführt haben. Je zwei Gesteinsproben von der Decke (Abb. 3g, W-D1, W-D2) und der Sohle (W-S1, W-S2) wurden nach Kohlensäureaufschluss auf ihr Ca/Mg-Verhältnis analysiert. Obwohl die Proben oberhalb der Schichtfläche sehr reine Kalke darstellen (molares Ca/Ca+Mg Verhältnis: 0,97 bzw. 0,98) und die unterhalb etwas dolomitisiert sind (0,94 bzw. 0,89), ist nicht anzunehmen, dass dieser geringfügige Unterschied gravierende Auswirkungen auf die Lösungseigenschaften hat.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Abb. 11: Lehmhalle (Alter Teil): Eine fast vollständige Sedimentverfüllung und Paragenese führten zur Ausbildung der fast ebenen Decke.

Ähnliche Gangprofile mit der Initialfuge im oftmals von Sediment bedecktem unteren Bereich finden sich in vielen Teilen der DMH. Auch der Querschnitt der *Lehmhalle* (Abb. 6h und i, Abb. 11) ist so zu erklären. Obwohl er trapezförmig ist und eine relativ ebene Dekke hat, ist diese nicht wie von Arnberger (1953: 70) beschrieben eine Schichtfläche. Das Schichteinfallen entspricht mit (gemittelt) 27° gegen 039° den üblichen Werten in der DMH (Abb. 6). Am Beginn und im mittleren Abschnitt weisen Deckenmäander auf eine einstmalige völlige Sedimenterfüllung hin. Die relativ ebene Decke ist somit als paragenetische Bildung über einem ebenen Sedimenthorizont zu interpretieren, was von Palmer (2007: 264) als häufiges Phänomen beschrieben wird. Die Felssohle der Halle ist nicht aufgeschlossen, und ein Profil am Beginn zeigt eine derzeitige Verfüllung mit zumindest 3 m Sediment.

Über den *Großen Dom*, den mit ca.100 x 35 m Grundfläche und durchschnittlich ca.20 m Höhe größten Raum der DMH, in dem mächtige Harnischflächen und Kataklasitzonen dominieren, kann aufgrund der starken Versturzprägung keine Aussage über die ursprüngliche Genese gemacht werden. Auch die von E und W einmündenden Gänge zeigen keine Fließrichtungsindikatoren. Der im oberen Teil von E einmündende Gang schließt mit Kalkgeröllen, die denen der *Konglomeratwand* ähneln und von E her eingebracht wurden.

Edelweiß- und Windstollenlabyrinth

Die epiphreatischen Teile von *Edelweißlabyrinth* (*EL*) und *Windstollenlabyrinth* zeichnen sich durch deutlich größere Höhenunterschiede (1309 bis 1445 m) aus. Sie sind im zentralen und S-Teil an markante Schichtfugen und im N-Teil an eine nach S einfallende Störungsfläche gebunden. In der Hauptstrecke des *EL* zeigen FF vom Einstieg im *Mitternachtsdom* über *Ringelspiel, Lehmrutsche, Edelweißhalle, Südhalle, Schwar-*

Abb. 12: Schwarzer Gang (Edelweißlabyrinth): Von der räumlichen Anordnung des Teiles kann auf Schichtgebundenheit geschlossen werden, jedoch ist die initiale Fuge nicht sichtbar und unter dem Bodensediment zu vermuten. An der Decke finden sich große paragenetische Kanäle und ceiling pendants (zapfenförmige Gebilde).

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

zer Gang, Labyrinth der Verzweiflung, Luckerter Gang, Westgang bis zur *Tischplattenhalle* generell W-gerichtetes Fließen an. Interessanterweise finden sich im U-förmigen Verlauf zwischen *Lehmrutsche* und dem oberen Ende des *Schwarzen Gangs* keine FF. Die Obergrenze dieser Zone wird von einer Wasserstandsmarke in Form einer Deckenstufe auf ca.1355 m Seehöhe gebildet, die an mehreren Stellen erhalten ist. Es muss sich um einen lokalen Rückstau handeln, da in den W unterhalb dieses Niveaus gelegenen Teilen FF deutlich ausgebildet sind. Der Abschnitt zwischen *Tischplattenhalle* und *Theseusschacht* (über *Theseusgang*) weist keine FF auf, ebenso die *Spaltenhalle*.

Im *Windstollenlabyrinth* konnten, zumindest bis zur Abzweigung zum Sturmtunnel, einwärts gerichtete FF beobachtet werden. Danach (bis *Theseusschacht*) konnten keine eindeutig interpretierbaren FF gefunden werden. Der 90 m tiefe *Theseusschacht* ist phreatisch entstanden und weist teilweise einen schmalen Sohlencanyon auf. Generell sind *EL* und *WL* paragenetisch geprägt. Bei vielen Gängen ist ähnlich dem *Windstollen* und der *Paläotraun* zu erkennen, dass sie aufgrund der sedimentbedeckten Sohle nach oben erweitert wurden und die initiale Schichtfuge nahe der oftmals sedimentbedeckten Sohle liegt (Abb. 12).

DISKUSSION

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die geräumigen Teile der DMH durch fließendes Wasser in der epiphreatischen Zone entstanden sind. Die zahlreichen vadosen Canyons bildeten sich später und weisen oftmals noch rezente Gerinne auf. Nur beim Schlüssellochprofil des *Canyon* ist der Sohlencanyon vermutlich gleichphasig mit der phreatischen Röhre entstanden.

In der internationalen Fachliteratur wird der Einfluss der mechanischen Erosion im Verhältnis zu Korrosion nach wie vor diskutiert. Generell wird ersterer eher wenig Bedeutung zugemessen, bei Flutereignissen und entsprechender Sedimentfracht kann sie aber zum Teil die chemische Lösung an Einfluss übertreffen (Palmer, 2007: 170). Einige Formen wie FF können sowohl rein erosiv (z.B. in Graniten) als auch rein korrosiv (Salz, Eis) entstehen, womit der Unterscheidung keine große Bedeutung für die Interpretation der Fließrichtung und -geschwindigkeit zukommt. Ob die von fließendem, unter Druck stehendem Wasser gebildeten Gänge vorwiegend erosiv, wie von Bock (1913) angenommen, oder korrosiv erweitert wurden, kann nach wie vor nicht beantwortet werden.

Arnberger (1951, 1953 & 1984) geht z.T. für die DMH von einer rein tektonischen Entstehung der Gänge während der Gebirgsbildung aus, wofür keinerlei Anhaltspunkte gefunden wurden. Dieses Modell ist geologisch höchst unwahrscheinlich, aus den Alpen fehlen Beispiele für vergleichsweise große (*Paläotraun*) Hohlräume. Als Argument, dass die *Paläotraun* nicht von fließendem Wasser geschaffen wurde, wird von Arnberger (u.a. 1953: 77) eine Grabung am „Ende der *Halle der Vergessenheit*“ angeführt, wo man in 1,5 m Tiefe „auf felsige Sohle stieß“. Im Gegensatz zur kaum verstürzten *Paläotraun* weist die Decke hier deutlich Spuren von Versturzvorgängen auf. Die Profile sind hier nicht phreatisch, sondern durch deutliche Kanten und Ecken geprägt. Dadurch ist anzunehmen, dass lediglich die Oberfläche eines Versturzblocks ergraben wurde. Auch geoelektrische Messungen (R. Pavuza, pers. Mitteilung) konnten nicht bis zu einer Felssohle eindringen und lassen schließen, dass hier etliche Meter Sediment lagern.

Auch die Vorstellungen von Biese (1926) und Trimmel (1949), wonach Versturzvorgänge für die Ausformung der Tonnengewölbe verantwortlich sind, fanden keine Bestätigung. In den meisten Fällen sind versturzgeprägte Profile sehr gut durch kantige Felsoberflächen zu erkennen. Trimmels Argument, dass die vergrößerte Oberfläche die Höhlenentstehung begünstigt, ist mit modernen speläogenetischen Modellen nicht in Einklang zu bringen, da Modellierungen zeigen, dass der limitierende Faktor bei der korrosiven Höhlenerweiterung nicht die Oberfläche, sondern die Kalzitsättigung des Wassers ist.

Ein Hauptkritikpunkt am Bockschen Entstehungsmodell ist das gewaltige Einzugsgebiet (30.000 – 60.000 km²), das für die von ihm errechnete Durchflussmenge (1500 – 3000 m³/s) benötigt wird. Er nimmt Fließgeschwindigkeiten von 5-10 m/s an, was aufgrund der Größe der anzutreffenden Gerölle durchaus gerechtfertigt ist. Der mittlere Gangquerschnitt von 300 m² (Bock, 1913) scheint um das Doppelte zu hoch, kann aber in einigen Teilen aufgrund der Sedimentverfüllung nicht ausgeschlossen werden. Die angenommene mittlere Abflussmenge von 50 l/s/km² (entspricht 1578 mm) ist für heutige Verhältnisse zu hoch, aber für das feuchtere Klima im Oberen Miozän (Harzhauser et al., 2008) nicht unrealistisch.

Aus drei Gründen ist diese Rechnung aus heutiger Sicht trotzdem signifikant nach unten zu korrigieren. (1) Die Korndurchmesser der bewegten Gerölle repräs-

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

sentieren nicht die mittlere Fließgeschwindigkeit, sondern die der Flutereignisse. Die Werte können somit, analog zu für Karstriesenquellen typischen Differenzen zwischen Hoch- und Mittelwasserschüttungen, um einen Faktor 5 bis 20 korrigiert werden (vgl. Ford & Williams, 2007: 121).

(2) Bereits Bauer (1961) äußerte aufgrund theoretischer Überlegungen, dass durch die teilweise Sedimentverfüllung nie der Gesamtquerschnitt vom Höhlenfluss genutzt wurde. Dies wird durch die vorgestellten morphologischen Kriterien (z.B. Abb. 5) unterstützt und führt abermals zu einer Korrektur um einen Faktor ähnlicher Größenordnung.

(3) Die Differenz zwischen den aufgrund der Korndurchmesser und der FF ermittelten Geschwindigkeiten zeigt, dass die Gerölle eher Einzelereignisse repräsentieren, während die FF längerwährende Zustände wiedergeben. Die präsentierten Messungen zeigen einen Unterschied bis über einen Faktor 10. Um die riesige Fläche zu ermöglichen, musste Bock das Einzugsgebiet in den Bereich S der NKA legen und annehmen, dass Flüsse über Schwinden in den Karst infiltrierten (allogene Speisung). Die vorgestellten Messungen an den FF und Profilen sprechen für Durchflüsse von rund 20 bis 50 m³/s bei Hochwässern. Im unwahrscheinlichen Extremfall, basierend auf den größten Gesamtquerschnitten und der von den größten Geröllen abgeleiteten Geschwindigkeit, ergibt sich eine Durchflussrate von einigen 100 m³/s. Der erste Wert kann leicht mit einem autogenen (innerhalb des Karstmassivs gelegenen) Einzugsgebiet erklärt werden. Auch rezente autogen gespeiste Karstriesenquellen der NKA wie Kläfferquelle (Plan et al., 2009b), Waldbach- und Pießling Ursprung (Hydrographisches Jahrbuch, 2009) kommen mit ihren Hochwasserschüttungen in den Bereich von 20 bis 40 m³/s. Selbst der Extremwert kann, da man mit einem größeren zusammenhängenden Karstmassiv und feuchterem Klima rechnen kann, noch autogen erklärt werden, ohne dass eine Speisung durch Oberflächengerinne aus dem S geherrscht haben muss.

Trotzdem erscheint eine allogene Speisung wahrscheinlich. Die labyrinthische Anlage und die Lösungskolke sprechen für sehr starke Schüttungsschwankungen, die für allogen gespeiste Höhlensysteme typisch sind. Weiters kann so die große Sedimentfracht leichter erklärt werden. Beobachtungen aus der *Südwandhöhle* (1543/28) legen nahe, dass es allogene Speisung in das Dachsteinmassiv gegeben hat. Diese Höhle beginnt mit sehr großen Gängen am heutigen Südrand der Kalkalpen knapp über deren Basis (Seebacher, 2006) und hat mit größter Wahrscheinlichkeit nach N entwässert. Außerdem ist anzunehmen, dass es neben den zufällig bekannten Teilen der DMH noch viele weitere großräumige Gänge im jeweiligen Niveau des Dachstein gibt, für deren Bildung autogene Niederschlagswässer nicht ausreichen. Eventuell erlaubt ein Vergleich der Schwermineralspektren der Augensteinsedimente aus der Höhle und der Oberfläche weitere Aufschlüsse darüber. Bauer (1961) gibt Hinweise auf deutliche Unterschiede, allerdings konnten die zugrundeliegenden Daten dieser Behauptung nicht ausfindig gemacht werden.

Die generell nach W gerichtete Fließrichtung stimmt mit Beobachtungen von Bock (1913) überein, obwohl seine Argumente nicht vollkommen nachvollzogen werden können, ebenso mit denen von Bauer (1954; 1961). Bock (1926/27) und Kyrle (1923) vermuten einen Teil des Oberlaufs der DMH in der *Dachstein-Rieseneishöhle*. Dies scheint nach wie vor wahrscheinlich und wird durch gleichsinnige FF (Bauer, 1954) untermauert. Auch die maximale Augenstein-Korngröße von ca. 15 cm in der *Paläotraun* gleicht denen der *Dachstein-Rieseneishöhle* (Seemann et al., 1999). Analog zu vielen epiphreatischen Höhlensystemen weltweit (Palmer, 1987; 2007) und in den NKA (Tennengebirge Nord: Audra et al., 2002; Totes Gebirge Ost: Plan et al., 2009a) kann auch bei der DMH davon ausgegangen werden, dass die nicht vados gebildeten Teile, nach einer initialen Phase in der phreatischen Zone, vorwiegend im Bereich eines vorflutgebundenen Karstwasserspiegels erweitert wurden. Als Bildungsmechanismus kann analog zu anderen Höhlen, die in der epiphreatischen Zone gebildet wurden, das *filling-overflow manner* Modell (Häuselmann et al., 2003) angenommen werden: Die nur bei Hochwasser gefluteten Gänge verlagern sich sukzessive in tiefere Niveaus, wobei die Drainage über *soutirages* (kleinräumige Verbindungsstücke) erfolgt. Einige Strecken können als solche interpretiert werden (z.B. E vom *Sturmtunnel* abzweigender abfallender Schluf, der in die *Augensteinhalle*, einen unterlagernden, beidseits verlehmten Gang, mündet).

Die von Krauthausen (1989; bzw. in Henne et al., 1994) vertretene Ansicht, dass gravitative Massenbewegungen (Zerrspalten) zur Anlage der Hohlräume beigetragen haben, kann nicht geteilt werden, da die beobachteten Störungen nur sehr geringen „jungen Versatz“ aufweisen und großteils jünger als die Ablagerung des hellen Tons (jüngste Flutungsphase) sind. Die angeführte gute Korrelation der Richtungsverteilung der Gänge und der Wandabbrüche an der Oberfläche, die von Isohypsen abgeleitet wurde, kann leicht erklärt werden: „Alte“ Störungen dienten sowohl als Initialfugen bei der Höhlenentstehung, stellen aber auch Schwächezonen dar, entlang deren sich die Felswände bildeten.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Abgesehen von versturzgeprägten Teilen sind nur in wenigen Abschnitten keine ursprünglichen Kleinformen wie FF erhalten. Es sind dies zum einen stark bewetterte Strecken (z.B. *Steile Rinne*, *Windstollenlabyrinth*) mit deutlicher Oberflächenverwitterung aufgrund von Kondenswasserkorrosion und häufigen Frostwechseln. Zum anderen handelt es sich um Teile, die mit Wasser und/oder Sediment erfüllt waren (vorderer Teil des *Edelweißlabyrinths* unterhalb Wasserstandsmarke bei 1355 m). Beide Mechanismen führten zu einer Überprägung der primären Formen. Die Hypothese von Trimmel (1956), wonach die FF beim *Canyon* (nahe Westeingang) auf Eisschmelzwässer zurückzuführen sind, erklärt nicht deren Asymmetrie parallel der Längsachse des Ganges, die nur von lateralem, W gerichteten Fließen hervorgerufen werden kann. Vielmehr zeigt die gute Erhaltung dieser präquartären Kleinformen, dass die Eisschmelzwässer kein Lösungspotential hatten bzw. haben.
Die junge Flutung der Höhle durch nahezu stagnierende Wässer, die die laminierten, hellen und kalkreichen Tone zur Ablagerung brachte, kann als Rückstau *(back flooding)* interpretiert werden: In pleistozänen Kaltzeiten kam es durch die Gletscherverfüllung der Täler zu einem Aufstauen des Karstwassers und zur Flutung der Höhlen. Sowohl die Höhlenmorphologie in Bezug zur Sedimentlagerung als auch die Tatsache, dass die Wässer kalkreiches Feinsediment transportierten und somit kein Lösungspotential vorhanden war, sprechen dagegen, dass es in dieser Phase zu einer Erweiterung der Höhle kam. Dies steht im Gegensatz zu Seemann (1973), der die Ablagerung der „hellen Höhlentone“ als Produkt „interglazialer Verkarstung“ ansieht, wobei er keinen Mechanismus nennt, der zur hydrologischen Reaktivierung der Höhle geführt haben soll. Das holozäne Alter (7 ±2 kyr) einer Sinterprobe aus der *Umkehrhalle*, die über dem hellen Ton abgelagert wurde, steht mit einer würmzeitlichen Flutung nicht in Widerspruch. Die Interpretation von Spöcker (1925) der zufolge die Lamination der hellen Tone auf jahreszeitliche Schwankungen zurückzuführen ist, ist gut nachvollziehbar, aber nicht erwiesen.

AUSBLICK

Ausständig ist die morphologische Kartierung der tagferneren Teile, wobei punktuelle Beobachtungen bei Vermessungsfahrten kaum deutliche FF und andere Kleinformen gezeigt haben. Die detaillierten Kartierungen haben ergeben, dass beim systematischen Arbeiten bei eigens dafür vorgesehenen Befahrungen ungemein mehr Formen entdeckt werden als im „Vorübergehen“ bei Vermessungsfahrten.
Es wurden fünf Augensteinproben für eine Datierung mittels kosmogener Nuklide genommen, die derzeit aufbereitet und gemessen werden (vgl. Sahy et al., 2009). Die erhofften Alter könnten Aufschluss über den Zeitpunkt der Einschwemmung der Augensteine und somit das (Mindest-)Alter der Höhle geben. Daraus sollen wiederum Taleintiefungsraten ermittelt werden.
Eine offene Frage ist, ob für die Bildung der häufigen und ausgedehnten Labyrinthe nur die Schüttungsschwankungen verantwortlich sind (Palmer, 1975, 2007: 197) oder ob noch andere Faktoren eine Rolle gespielt haben. Ein 3D-Laserscan wäre eine elegante Möglichkeit, die Kleinformen der *Paläotraun* detailliert zu erfassen und genauere Aussagen über die jeweils phasenweise herrschenden Durchflussmengen zu machen. Nach wie vor wenig Datenmaterial gibt es über die Sedimente der DMH. Neben den üblichen sedimentologischen Aufnahmen und Analysen wird versucht werden, eine allgemeine Stratigraphie zu erstellen und diese mit den Kleinformen der Höhle zu korrelieren.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die meisten untersuchten Teile der Dachstein-Mammuthöhle zeigen Formen, die aus der frühen Entstehungsgeschichte erhalten sind und eine genetische Rekonstruktion erlauben: Die räumliche Anordnung sowie die Querschnitte der Gänge, Labyrinthe und Schächte deuten auf eine Entstehung unter vollständiger Wassererfüllung hin (phreatische Bedingungen). Höhlenkarren und ein Canyoneinschnitt in eine phreatische Röhre an einem Sattelpunkt (*isolated vadose trench*) zeigen, dass die Ausbildung im Schwankungsbereich des Karstwasserspiegels (epiphreatische Zone) erfolgte. Karren sowie Lösungskolke sprechen weiters dafür, dass die Gänge hauptsächlich während Flutereignissen gebildet wurden. Fließfacetten und die Imbrikation von Geröllen zeigen eine generelle Paläo-Fließrichtung von E nach W. Erstere zeigen Fließgeschwindigkeiten von 0,2 m bis 1 m/s über längere Zeiträume. Die Korngröße der transportierten Gerölle deutet auf zeitweise deutlich schnellere (bis mehrere m/s) Strömung hin. Im Längsschnitt lassen sich mehrere

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

nacheinander entstandene Niveaus erkennen, die mit Paläovorflutern zu korrelieren sind.
Einen sehr wichtigen Faktor bei der Ausbildung der meisten Gangquerschnitte bildeten Sedimente, die zu paragenetischen Deckenformen führten. Weiters bedingte Sedimentbedeckung an der Gangsohle eine einseitige Erweiterung der Profile nach oben, was in vielen Teilen, z.B. *Paläotraun*, *Edelweißlabyrinth* oder im *Alten Teil*, gut zu beobachten ist. Die daraus resultierenden Profile (sofern die Sedimente wieder ausgeräumt wurden), sind deutlich größer als die ehemaligen Fließquerschnitte und können nicht zur Ermittlung des Durchflusses herangezogen werden. Nur im Bereich des *Canyon* (nahe Westeingang) kann davon ausgegangen werden, dass während der Bildung der Fließfacetten der gesamte Querschnitt sedimentfrei war. Hier ergibt sich ein Durchfluss von ca. 16 m³/s bei Flutereignissen; bei weniger als 1 m³/s erfolgte vadoses Fließen im Sohlencanyon. Da es aber auf diesem Niveau großlumigere Parallelstrecken gibt (*Feenpalast* bis *Derflingerdom*), kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtmenge, die die Höhle durchströmte, ein Mehrfaches betrug.
Dass die Höhle nicht nur von autogenen Wässern (d.h. auf das Karstgebiet fallender Niederschlag), sondern auch allogen, durch Wässer, die über Ponore am Südrand der Kalkalpen infiltrierten, gespeist wurde, ist wahrscheinlich, aber nicht eindeutig.
Obwohl die von Hermann Bock (1913) vor knapp 100 Jahren getroffenen Aussagen zur Entstehung der DMH später heftig kritisiert wurden und einzelne Ergebnisse aus heutiger Sicht zu revidieren sind, so sind viele Grundaussagen mit heutigen Höhlenentstehungsmodellen gut in Einklang zu bringen. Sein Werk kann als Meilenstein in der historischen Entwicklung der Theorie der Speläogenese alpiner Höhlen – und der (Eis-)Höhlenklimaforschung – betrachtet werden.

DANK

An der Diskussion vor Ort waren beteiligt: Michael Behm, Jo De Waele, Philipp Häuselmann und Rudolf Pavuza. Weiters wurde mit Stephan Kempe, Eckart Herrmann und Robert Seemann diskutiert. Für die Sinterdatierung sei Ronny Boch und Christoph Spötl (Universität Innsbruck) gedankt; für die Messung des Ca/Mg-Verhältnisses von Gesteinsproben Rudolf Pavuza (NHM Wien).
Für die Verbesserung des Manuskripts und kritische Anmerkungen im Zuge der Begutachtung danken wir Wolfgang Ufrecht, Marco Filipponi und Christoph Spötl. Der Dachstein-Höhlenverwaltung, im speziellen Stephan Höll, ist für die gute Zusammenarbeit und für ihr Entgegenkommen zu danken.
Nicht unerwähnt darf die Grundlage jeglicher wissenschaftlicher höhlenbezogener Arbeit bleiben, nämlich die genaue Dokumentation und Vermessung, die in der DMH von mehreren Generationen von Höhlenforschern erfolgte.
Dank gilt weiters den vielen Kollegen, mit denen die Vermessungstouren und sonstige Befahrungen unternommen wurden.

LITERATUR

Arnberger, E. (1951): Neue Forschungen in der Dachstein-Mammuthöhle. – Die Höhle, 2 (3): 43-48.
Arnberger, E. (1953): Neue Ergebnisse morphotektonischer Untersuchungen in der Dachstein-Mammuthöhle. – Mitteilungen der Höhlenkommission, 1953: 68-79.
Arnberger, E. (1984): Die wissenschaftliche Erforschung der Dachstein-Mammuthöhle und ihre Bedeutung für die Speläogenese. – Die Höhle, 35 (3-4): 93-104.
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.
Audra, P., Quinif, Y., Rochette, P. (2002): The genesis of the Tennengebirge karst and caves (Salzburg, Austria). – Journal of Caves and Karst Studies 64: 153-164.
Bauer, F. (1954): Zur Paläohydrologie des Dachsteinstockes. – Die Höhle, 5 (3-4): 46-48.
Bauer, F. (1961): Sedimentation und Konvakuationserweiterung in aufsteigenden Siphonstrecken. – Atti Symp. Internaz. Speleol., Varenna (Como), Rassegna Speleologica Italiana, 5(1): 171–175.
Behm, M. & Plan, L. (2005): Sechzigster Kilometer in der Dachstein-Mammuthöhle. – Die Höhle, 56: 77-84.
Behm, M. (2009): Zur Neubearbeitung der Riesenkluft in der Dachstein-Mammuthöhle (1547/9). – Höhlenkundl. Mitt. Wien, 65 (11-12): 133-139.
Biese, W. (1926): Vorläufiger Bericht über Untersuchungen in den Dachsteinhöhlen. – Mitt. über Höhlen- und Karstforschung. 1926 (1): 1-11 u. (2): 33-40.
Bock, H. (1913): Alte Höhlenstromläufe im Inneren des Mittagskogels. – In: Bock, H., Lahner, G. & Gaunersdorfer, G. (Eds.): Höhlen im Dachstein. – Graz (Verein f. Höhlenkunde in Österreich): 72–88.
Bock, H. (1926/27): Zur Altersfrage der Dachsteinhöhlen. – Mitt. über Höhlen- und Karstforschung. 1926 (3): 72-77, (4): 105-113 u. 1927 (1): 1-19.

© Verband Österreichischer Höhlenforscher, download unter www.biologiezentrum.at

Curl, R. (1974): Deducing flow velocities in cave conditions from scallops. – National Speleological Society Bulletin, 35 (2): 1-5.

Filipponi, M., Jeannin, P.Y., Tacher, L. (2009): Evidence of inception horizons in karst conduit networks. – Geomorphology, 106: 86–99.

Filipponi, M. & Jeannin, P.Y. (2006): Is it possible to predict karstified horizons in tunneling? – Austrian Journal of Earth Science. 99: 24-30.

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

Franke, H.W. & Ilming, H. (1963): Beobachtungen in der Dachstein-Mammuthöhle. – Die Höhle, 14(2): 36-40.

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.

Harzhauser, M., Kern, A., Soliman, A., Minati, K, Piller, W.E., Danielopol, D. & Zuschin, M. (2008): Centennial- to decadal-scale environmental shifts in and around Lake Pannon (Vienna Basin) related to a major Late Miocene lake-level rise. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 270: 102–115.

Häuselmann, P., Jeannin, P.Y. & Monbaron, M. (2003): Role of epiphreatic flow and soutirages in conduit morphogenesis: the Bärenschacht example (BE, Switzerland). – Zeitschrift f. Geomorph., 47: 171-190.

Henne, P., Krauthausen, B. & Stummer, G. (1994): Höhlen im Dachstein. – Die Höhle, 45(2): 48-67.

Herrmann, E. (1988): Dachstein-Mammuthöhle. – Höhlenkundl. Mitt. Wien, Landesverein f. Höhlenkunde Wien u. NÖ, 44 (4): 98-103.

Hjulström, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by River Fyriers. – Bulletin of the Geol. Inst., University of Uppsala, 25: 221-527.

Kempe, S. (2004): Natural speleothem damage in Postojnska jama, Slovenia, caused by glacial cave ice? : A first assessment. – Acta Carsologica, 33: 314-317.

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

Krauthausen, B. (1989): Höhlen und Tektonik am Nordrand des Dachsteins zwischen Echerntal und Hageneck. – Oberrhein. Geol. Abh. 35: 37-48.

Kyrle, G. (1923): Grundriss der theoretischen Speläologie. – Wien (Speläologisches Inst.).

Linzer, H.G., Moser, F., Nemes, F., Ratschbacher, L. & Sperner, B. (1997): Build-up and dismembering of the eastern Northern Calcareous Alps. – Tectonophysics, 272: 97-124.

Palmer, A. (1975): The origin of maze caves. – NSS Bulletin, 37(3): 57-76.

Palmer, A. (1987): Cave levels and their interpretations. – NSS Bulletin, 49(2): 50-66.

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

Peresson, H., & Decker, K. (1997): The Tertiary dynamics of the northern Eastern Alps (Austria): changing paleostresses in a collisional plate boundary. – Tectonophysics, 272: 125-157.

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

Plan, L. (1996): Technische Daten zur Vermessung der Dachstein-Mammuthöhle. – Höhlenkundl. Mitt. Wien, 52 (12): 185-194.

Plan, L., Filipponi, M., Behm, M., Seebacher, R. & Jeutter, P. (2009a): 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.

Plan, L., Kuschnig, G. & Stadler, H. (2009b): Kläffer Spring – The major spring of the Vienna Water Supply (Austria). – In: Kresic, N. & Stevanovic, Z. (Eds.): Groundwater Hydrology of Springs. Amsterdam (Elsevier): 411-426.

Sahy, D., Häuselmann, P., Grasemann, B., Kubik, P., Schenk, B., Stüwe, K., Wagner, T. & Fiebig, M. (2009): Cave sediments as records of landscape evolution in the Eastern Alps. – Proceedings of the 15th Int. Congress f. Speleology, Kerville, Vol 2: 979.

Seebacher, R. (2006): Aktuelle Forschungen in der Südwandhöhle (Dachsteinloch, 1543/28), Stmk/OÖ. – Die Höhle, 57: 76-89.

Seemann, R. (1973): Die Genese der Pyrite der Karstgebiete der Nördlichen Kalkalpen. – Unveröff. Diss. Univ. Wien.

Seemann, R., Brandstätter, F. & Hammer, V. (1999): Sedimente und Mineralneubildungen in der Dachstein-Rieseneishöhle. – Die Höhle, 50 (3): 101-115.

Spöcker, R.G. (1925): Die Mammuthöhle im Dachstein. – Mitt. über Höhlen und Karstforschung, 1925 (3): 70-79.

Spötl, C., Offenbecher, K.H., Boch, R., Meyer, M., Mangini, A., Kramers, J. & Pavuza, R. (2007): Tropfstein-Forschung in österreichischen Höhlen – ein Überblick. – Jahrbuch der Geol. B.A., 147 (1+2): 117-167.

Trimmel, H. (1949): Gab es Riesenhöhlenflüsse? – Natur und Technik, 3 (6): 166-168.

Trimmel, H. (1956): Die Vermessungsarbeiten in der Dachstein-Mammuthöhle bis Ende des Jahres 1955 und die dabei erzielten Ergebnisse. – Höhlenkundl. Mitt. Wien, 12 (4): 34-40.

Trimmel, H. (1963): Die Neubearbeitung der Dachstein-mammuthöhle und einige Bemerkungen über schichtengebundene Höhlenräume. – Akten des III. Int. Kongresses für Speläologie (1961), Bd. 3: 235 – 239.

Trimmel, H. (1980): Ergebnisse und künftige Schwerpunkte wissenschaftlicher Forschung im Dachsteinhöhlenpark. – Die Höhle, 31 (2): 62-71.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Die Höhle

Jahr/Year: 2010

Band/Volume: 061

Autor(en)/Author(s): Plan Lukas, Xaver Angelika

Artikel/Article: Geomorphologische Untersuchungen und genetische Interpretation der Dachstein- Mammuthöhle (Österreich) 18-38