



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

Speläogenese der Hermannshöhle (Kirchberg/Wechsel, NÖ)

verfasst von

Andrea Schober, BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2014

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt: Erdwissenschaften

Betreuerin / Betreuer: Univ.-Prof. Mag. Dr. Bernhard
Grasemann

Inhalt

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	5
Zusammenfassung	8
Abstract	10
Einleitung und Motivation	12
Danksagung	13
1 Einleitung	14
2 Das Untersuchungsgebiet	15
2.1 Lage und Geographie	15
2.2 Geologie	15
3 Charakterisierung der Höhle	16
3.1 Gesamtanlage	16
3.2 Hydrologie	17
3.3 Morphologie	17
4 Methodik	18
4.1 Oberflächenkartierung	18
4.2 3D Visualisierung der Höhle mit Spelix	18
4.3 Strukturgeologie	19
4.4 Morphologische Kartierung	19
4.5 Sedimentuntersuchungen	19
4.6 U/Th-Datierung und Analyse stabiler Isotope von Speläothemen	20
4.7 Paläomagnetik	20
5 Ergebnisse	21
5.1 Geologie und Morphologie der Umgebung	21
5.2 Strukturgeologie	21
5.3 Höhlenmorphologie	22
5.3.1 Raumprofile	22
5.3.2 Kleinformen	23
5.3.2.1 Deckenkolke/ -kanäle und Pendants	23
5.3.2.2 Lösungsrampen, Wasserstandsmarken und ebene Decken	25
5.3.2.3 Fließfacetten	27
5.4 Sedimente	29
5.5 Altersdatierung von Speläothemen	31
5.6 Stabile Isotopen der Speläotheme	34

6	Diskussion	35
6.1	Geologische und strukturelle Schlussfolgerungen	35
6.2	Gliederung des Höhlensystems	37
6.3	Morphologie	39
6.4	Sedimente	44
6.5	Altersdatierung und regionale Rückschlüsse	45
7	Schlussfolgerung	47
	Dank	48
	Referenzen	49
	Weiterführende Untersuchungen	53
	Appendix	54
A.	Ergänzung zum Kapitel Strukturgeologie	54
1.	Einleitung	54
2.	Methoden	54
2.1.	Messung mit dem Gefügekompass	54
2.2.	Dünnschliffe	54
3.	Ergebnisse	54
3.1.	Strukturelle Messungen	54
3.2.	Dünnschliffe	57
3.2.1.	Probe HH43	57
3.2.2.	Probe HH44	58
3.2.3.	Probe HH45	59
4.	Diskussion	62
	Referenzen	63
B.	Aufschlusstabelle und Probendokumentation	64
C.	Messwerttabelle	95
D.	Screenshot des 3D-Modells	100
E.	Curriculum Vitae	101

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

- Abb. 1. Geologische Detailansicht des Untersuchungsgebietes (Koordinatensystem: UTM 33N). Das weiße Polygon markiert das heutige Einzugsgebiet des Ramsbaches oberhalb des HHS. Der gelbe Rahmen zeigt den Ausschnitt von Abb. 15. Geologie verändert nach Herrmann et al. (1992) unter Verwendung des Laserscans des Landes Niederösterreich (NÖ Atlas, 2013). 16
- Abb. 2 Vermessung der Hohlkehlen mittels Schlauchwaage (Rutsche). Foto: L. Plan 19
- Abb. 3. Plot der gemessenen Flächen als Großkreise im Schmidt'schen Netz. a) Die metamorphe Bänderung des Marmors fällt generell flach nach WSW bzw. SE ein. b) Foliationsflächen der nicht verkarstungsfähigen Schiefer und Phyllite. c) Störungsflächen. Die dominierenden Störungsrichtungen streichen NW-SE (rot, gelb, orange) bzw. NNE-SSW (grün) und fallen steil nach NE und NW bzw. ESE ein. In beiden Fällen ist die Bewegungsrichtung subhorizontal dextral. Der dritte Typus sind foliationsparallele Störungen, die flach nach WSW (blau) abschieben. d) Spröde Störungen mit Kataklasten fallen steil nach NE ein. 22
- Abb. 4 Pendants sind die eindeutig raumbestimmende Kleinform in diesem Teil der Sandberghalle. Foto: L. Plan 23
- Abb. 5 a Lage der Probenentnahmestellen und der kartierten Kleinformen. Paragenetische Canyons, Deckenkarren und -mäander sind nicht eingezeichnet, da sie in fast allen Teilen vorkommen. (Gesamtplan der Hermannshöhle verändert nach Hartmann, 1995) 24
- Abb. 5 b . Lage der Probenentnahmestellen und der kartierten Kleinformen. (Gesamtplan der Rauchspalten verändert nach Herrmann, 1989) 24
- Abb. 6 Hohlkehle an der Seitenwand des Barbarastollens. Die weiße Linie unterstreicht die Undulation. Foto: L. Plan 26
- Abb. 7 Nach oben offene, paragenetische Lösungsrampen im Großen Dom. Foto: L. Plan 26
- Abb. 8 Gemessene Längen der Fließfacetten. Aus dem Durchmesser lässt sich die Fließgeschwindigkeit des Wassers ableiten (Palmer, 2007). Die Rauten stellen die durchschnittliche Länge dar, die Fehlerbalken die Verteilung der Messungen. n bezeichnet die Anzahl der Messungen. 27
- Abb. 9 Wand mit Fließfacetten im *Steinigen Weg* (der Pfeil zeigt die Fließrichtung nach NW an). Die paragenetischen Deckenkarren zeigen keine Fließfacetten und müssen daher jünger sein. Links unten ist eine 1€-Münze zum Größenvergleich hervorgehoben. Foto: L. Plan 28
- Abb. 10 Wandpartie im *Krokodilgang*. Zwei Generationen von Fließfacetten zeigen eine ehemalige Sedimentbedeckung des unteren Teils und eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit darüber. Die ehemalige Sedimentoberkante ist durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet. Der Pfeil zeigt die Fließrichtung (nach NW) an. Foto: L. Plan 29
- Abb. 11 Kornsummenkurve der klastischen Sedimentproben des HHS. 30
- Abb. 12 Überblick über die gewonnenen Speläothem-Alter in Bezug auf die stratigraphische Abfolge und Relation zu Sedimentations- bzw. Erosionsereignissen am Probenahmeort. Legende: a: Zeit in Ma vor heute. b: Stratigraphische Stufe. c: Paläomagnetik (schwarz: normal; weiß: revers). d: Marine Isotopenstufe (MIS) – die Kurve beschreibt die Sauerstoffisotopie aus Eisbohrkernen. Gerade Zahlen zeigen Kaltzeiten, ungerade zeigen Warmzeiten an. Graphik teilweise erstellt mit TimeScale Creator (2013), verändert nach Gradstein et. al (2012). 33

- Abb. 13 Sedimentprofil im *Ölberg* (generalisiert). In einem Zeitraum von 200 ka kam es zu episodischen Flutereignissen, die klastisches Sediment einbrachten, das anschließend übersintert wurde. 34
- Abb. 14 Verteilung der stabilen Isotope der entnommenen Speläothemproben. 35
- Abb. 15 Übersichtskarte des HHS und ihrer Umgebung (verändert n. Hermann, 1989). Hervorzuheben ist die Grenze zwischen verkarstungsfähigem Karbonat und nicht verkarstungsfähigem Kristallin. Die Pfeile zeigen die generelle westwärts gegen das Berginnere gerichtete Paläofließrichtung (Detailkarte siehe Abb. 5). 36
- Abb. 16 Eine Sedimentwand veranschaulicht die Bildung eines durch aufwärts gerichtete Lösung geformten paragenetischen Canyon. Die Sohle ist noch immer mit klastischem Sediment bedeckt. Von hier stammt die Sedimentprobe HH41. 40
- Abb. 17 Paragenetischer Canyon in der *Fürstenhalle*. Die Initialfuge ist mit Pfeilen markiert. Foto: L. Plan 41
- Abb. 18 Anastomoische Deckenkanäle aus dem mittleren Abschnitt der *Hohen Kluff*. Foto: L. Plan 41
- Abb. 19 Schematische Darstellung der Problematik, in einem paragenetischen System zwischen eigenständigen und nur scheinbar eigenständigen Gängen zu unterscheiden. 43
- Abb. 20 U/Th-Alter der Speläotheme und ihre entsprechende Höhenlage. Die gestrichelten Geraden zeigen die Taleintiefungsraten an (Die Erklärung wird im Text gegeben). 47
- Appendix Abb. 1 a. Kataklasit in der Wildschützenhalle. b. Kataklasit am Oberflächenaufschluss HO-01 im Süden des Eulenberges. c. Bis zu den spröden Flächen ist das Gestein intakt, es fehlt die komplette damage zone (Harnisch). d. Harnischfläche mit über 1 m Durchmesser in der Höhle (Harnisch). e. Beispiel für die ausgeprägte Lineation an den spröden Flächen (Harnisch). f. Beispiel für die deutliche Undulation der Lineation (Eingang zum Karl-Ludwig-Tunnel). 55
- Appendix Abb. 2 Schematisches Blockdiagramm der in einem durch Drucklösung erfassten Gestein vorkommenden Bruchtypen (verändert nach Ramsay & Huber, 1987). Die Richtung der Hauptnormalspannung (σ_1) ist dargestellt. 56
- Appendix Abb. 3 Slickolite-Striae am Beispiel eines Oberflächenaufschlusses. Der Stift deutet die Richtung von σ_1 an. Das undulierende Relief ist am Kontakt zum hangenden Block gut erkennbar. 56
- Appendix Abb. 4. a. Konventionell gerechnete p-t-Analyse. Der Winkel zwischen p-Achse und Bewegungsfläche beträgt 45° . Das Ergebnis zeigt σ_1 in N-S-Orientierung. b. Für den Winkel zwischen p-Achse und Bewegungsfläche wurden 0° angenommen. Das Resultat zeigt σ_1 in NW-SE-Orientierung 56
- Appendix Abb. 5 Links: Dünnschliff betrachtet mit gekreuzten Polarisatoren. Der gelbe Kreis markiert das syntaxiale Wachstum der Kristalle innerhalb des Veins und das entsprechende Mutterkorn. Rechts: Derselbe Kristall ist noch einmal im gelben Kreis hervorbehalten. Jene Zwillingslamellen, die sich in beiden Hälften des Kristalls eindeutig identifizieren lassen, sind blau markiert, die übrigen sind lila. 57
- Appendix Abb. 6 Bulging oder Low-Temperature Grain Boundary Migration (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren). 58
- Appendix Abb. 7 Die Zacken der Slickolites zeigen σ_1 an (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren). 59

Appendix Abb. 8 Slickolite Striae und Stylolithen sind gut erkennbar (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren).	59
Appendix Abb. 9 Schematische Darstellung der verschiedenen Typen von Calcitzwillingen (aus Ferrill et al., 2004)	60
Appendix Abb. 10 Grünschieferfazielle Scherzonen und Drucklösungsflächen (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren).	60
Appendix Abb. 11 Links: Dünnschliff mit parallelen Polarisatoren. Alle 4 Typen mechanischer Zwillinge sind erkennbar. Rechts: Einige Körner wurden zur Verdeutlichung hervorgehoben. Die markierten Stellen sind in beiden Bildern ident.	61
Appendix Abb. 12 Links: Verschiedene Prozesse während der dynamischen Rekristallisation sind zu erkennen. Rechts: Einige Körner wurden zur Verdeutlichung hervorgehoben. Die markierten Stellen sind in beiden Bildern ident.	61
Appendix Abb. 13 Links: Neben mechanischen Zwillingen sind auch verschiedene Prozesse der beginnenden dynamischen Rekristallisation zu beobachten. Rechts: Einige Körner wurden zur Verdeutlichung hervorgehoben. Die markierten Stellen sind in beiden Bildern ident.	62
Appendix Abb. 14 Grundriss der Hermannshöhle (Blickrichtung N).	100
Appendix Abb. 15 Aufriss der Hermannshöhle (Blickrichtung N).	100
Tab. 1 Ergebnisse der U/Th Datierung. Gelb hinterlegt sind jene Ergebnisse, die nahe am Limit der Methode liegen. Die braunen Felder markieren Ergebnisse mit großer detritischer Korrektur.	32

Zusammenfassung

Mit knapp 5 km bekannter Ganglänge ist das Hermannshöhlensystem bei Kirchberg am Wechsel (NÖ) die größte Höhle des Unterostalpins. Es besteht aus vier genetisch zusammenhängenden Höhlen, von denen die Hermannshöhle mit 4,5 km die längste ist. Das System ist ungewöhnlich klein dimensioniert, mit einer Grundfläche von nur 200 m x 200 m und einer Höhendifferenz von 82 m. Die Gänge dieses Höhlensystems sind als dichtes, drei-dimensional labyrinthisches Netzwerk angeordnet. Der Grund für diese komplexe Anlage sowie die Prozesse, die während ihrer Entstehung wirkten, sind bis heute nicht befriedigend erklärt.

Das Ziel dieser Studie war es, die Genese der Höhle zu erklären. Dazu kam eine Kombination verschiedener Methoden zur Anwendung. Es wurde eine detaillierte Oberflächenkartierung mit besonderem Augenmerk auf die Grenze zwischen verkarstungsfähigem und nicht-verkarstungsfähigem Gestein durchgeführt. Des Weiteren erfolgte eine morphologische Detailkartierung innerhalb des Höhlensystems mit Fokus auf Groß- und Kleinformen. Strukturelle Elemente wurden eingemessen und dokumentiert. Die Digitalisierung der Vermessungsdaten des Hermannshöhlensystems ermöglichte es, ein dreidimensionales Modell zu erstellen. Höhlensedimente wurden auf ihre Korngrößenverteilung untersucht und an einer Stelle mit Paläomagnetik datiert. Es wurden die Alter von 27 Speläothemen mit der U/Th-Methode absolut bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Paläo-Environment und das hydrologische Setting der Hermannshöhle deutlich von den heutigen Verhältnissen unterschieden. Gespeist von ungesättigtem Wasser aus den nahegelegenen nicht-verkarstungsfähigen Schiefen und Gneisen konnte sich ein gut ausgebildeter Kontaktkarst entwickeln. Alle Höhlenformen können durch epigene phreatische Bildung erklärt werden. Phasen vadoser Speläogenese konnten im Gegensatz zu früheren Autoren nicht nachgewiesen werden. Es wurden keine Beweise für hypogene Speläogenese gefunden.

Infolge von impulsartigem Eintrag klastischer Sedimente konnte sich ein ausgeprägtes System paragenetischer Canyons ausbilden. Paragenese ist das vorherrschende morphologische Merkmal, diese dominiert beinahe die gesamte Höhle in einer Vielzahl unterschiedlicher Formen und Ausprägungen. Dazu zählen Deckenkanäle und Deckenmäander, Deckenkarren, Deckenkolke sowie Pendants. Lösungsrampen sind häufig und zeigen stellenweise schöne chronologische Abfolgen mit Fließfacetten. Letztere ergaben eine westwärts gerichtete Entwässerung des Karstsystems zur Zeit seiner Bildung mit Fließgeschwindigkeiten bis zu 1,5 m/s. Reste früherer Sedimentverfüllungen konnten im kompletten Höhlensystem nachgewiesen und ihre Ablagerungsbedingungen nachvollzogen werden. Die Sohle fast aller Gänge ist auch heute noch von Sediment bedeckt, weshalb ihre wahre Ausdehnung nicht bekannt ist.

Diese Studie gibt Aufschluss über die Prozesse, die den einmaligen labyrinthischen Charakter der Höhle formten. Zum einen ist die intensive Sedimentverfüllung verantwortlich für die labyrinthische Anlage der Höhle. Durch wiederholte Verlegung von bevorzugten Fließwegen kam es zur Erweiterung paralleler Gänge und die Präsenz des Sediments selbst erhöht ebenfalls den Eindruck eines Labyrinths. Zum anderen führten kurze Fließwege innerhalb des Höhlensystems und hohe Durchflussmengen entlang vieler verschiedener Wege zur gleichmäßigen Erweiterung konkurrierender Gänge.

Die Datierungen sprechen eher für ein kontinuierliches Absinken des Karstwasserspiegels und zeigen, dass Teile in mittlerer Höhe des Hermannshöhlen-Systems bereits vor mehr als 500 ka trocken gefallen sind. Des Weiteren scheinen auch Höhlenteile, die heute auf oder knapp unter dem Niveau des nahe gelegenen Ramsbaches liegen, bereits vor über 125 ka trocken gewesen zu sein. Anhand dieser Daten konnten Taleintiefungsraten des Otterbaches, der den Vorfluter darstellt, abgeschätzt werden. Sie liegen in der Größenordnung von 100 $\mu\text{m/a}$ und korrelieren gut mit Werten aus dem Mittelsteirischen Karst.

Das Spektrum der mikrotektonischen Merkmale zeigt, dass der Marmor des Eulenberges Bedingungen der unteren Grünschieferfazies erreicht hat und während seiner gesamten Abkühlphase bis hin zu sehr geringen Temperaturen von Deformation erfasst wurde. Es konnten eine NNW-SSE-gerichtete Kompression und eine spätere NE-SW-orientierte Kompression nachgewiesen werden.

Hinweise auf einen Zusammenhang mit der sinistralen Mur-Mürz-Störung, konnten weder im HHS noch in der näheren Umgebung gefunden werden.

Abstract

The approximately 5 km-long Hermannshöhlen cave system (Kirchberg/Wechsel, Lower Austria) is the biggest in the Lower Austro Alpine Unit. It consists of four genetically related caves of which Hermannshöhle is the longest with a total of 4.5 km of corridors. The system is developed within a ground area of only 200 m x 200 m and an elevation difference of no more than 82 m. Its corridors are arranged as a three-dimensional maze. The reason for this complex arrangement and the driving mechanisms of the evolution of the Hermannshöhle could by the day not be clarified.

The aim of this study was to enlighten the genesis of this cave using a combination of various methods. Detailed surface mapping was conducted with special attention paid to the border of karstic and non-karstic rocks. Furthermore a detailed morphologic mapping within the cave system was conducted focussing on paragenetic features. Structural elements were measured and documented. The special data of the cave system was digitalised and a 3D-model was created. 27 speleothem samples were dated using the U/Th-method. Cave sediments were investigated regarding grains size distribution and Paleomagnetic samples were taken on one spot.

The results show that the palaeo environment and the hydrologic setting of the Hermannshöhle were drastically different from today. Fed by undersaturated water from nearby non-karstic gneisses and schists well-developed contact karst features were formed. All cave features could be explained by epigean phreatic processes. In contrast to former authors, phases of vadose speleogenesis could not be confirmed. No proof for a hypogean speleogenesis was found.

Following pulses of clastic sediment input a distinct system of paragenetic canyons developed. Paragenesis is the primary morphologic feature, dominating almost the entire cave in various forms, including ceiling meanders, ceiling channels, cupolas and pendants. Solution ramps are abundant and occasionally show cross-cutting relationships with scallops. The latter indicate a westwards flow direction of the karst water at the time of the cave formation with flow velocities of up to 1.5 m/s. Remains of the extensive sediment fills are found throughout the entire cave system giving insight to the circumstances of their deposition. Clastic sediments still cover the corridor floors, leaving the true extension of the cave enigmatic.

This study sheds light on the processes that created the unique maze character of this cave system. On the one hand, the extensive sediment fills lead to the formation of the extreme maze character. Due to repeated clogging of preferred water paths, parallel corridors could be enlarged and also the sheer presence of the sediment enhances the impression of a labyrinth. On the other hand, short flow paths within the cave system and high discharge along many alternate routes lead to the equal widening of concurring corridors.

The data obtained indicate a rather continuous deepening of the water table and show that the middle parts of the Hermannshöhlensystem were dry at least 500 ka ago. Also, parts that are nowadays located at the level of or slightly beneath the nearby Rams brook were dry at least 125 ka ago. On the basis of the obtained age data valley incision rates of the Otterbach in the order of 100 $\mu\text{m/a}$ could be estimated.

The spectrum of microtectonic features shows that the marble has seen lower greenschist facies and that it has been exposed to deformation during its entire cooling phase until very low temperatures. Proof for an earlier phase of NNW-SSE compression and a later phase of NE-SW compression was detected. No evidence was found for a link with the sinistral Mur-Mürz-fault, neither within the HHS nor in the surrounding area.

Einleitung und Motivation

Seit meiner Teilnahme an den zwei zum Modul „Karstkunde und Speläologie“ an der Universität Wien gehörigen Exkursionen im Jahr 2010, die unter Anderem zum Trockenen Loch, der Koppenbrüllerhöhle, der Rieseneishöhle und der Dachstein-Mammuthöhle führten, wusste ich, dass meine Masterarbeit ebenfalls unter der Erde stattfinden würde. Ende des Jahres 2011 trat mein Betreuer Lukas Plan mit der Idee zu dieser Arbeit an mich heran. Es ging dabei um die detaillierte Untersuchung des im Eulenberg (Kirchberg/Wechsel, NÖ) situierten Höhlensystems, dessen Genese bis zum heutigen Zeitpunkt nicht befriedigend geklärt werden konnte. Das Thema überzeugte mich sofort, zum einen weil im Laufe der Arbeit eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Anwendung kam und zum anderen, weil das wissenschaftliche Interesse und die Unterstützung der Fachkollegen von Beginn weg gegeben waren.

Die Hermannshöhle befindet sich im Besitz des Hermannshöhlen-Forschungs- und Erhaltungsvereins. Sie wird als Schauhöhle betrieben und ist von März bis November im Rahmen von Führungen zu besichtigen. Die Ergebnisse dieser Studie können daher auch den Besuchern vermittelt werden.

Das ursprüngliche Ziel dieser Arbeit lag darin, einen Zusammenhang zwischen der Höhlenentwicklung und der rezenten Geomorphologie des Kirchberger Tales herzustellen. Dazu wurde eine detaillierte Kartierung des Eulenberges mit besonderem Augenmerk auf die Grenzen zwischen verkarstungsfähigem und nicht-verkarstungsfähigem Gestein durchgeführt und ein dreidimensionales Modell eines Großteils des Höhlensystems angefertigt. Im Laufe der Untersuchungen, insbesondere nach Erhalt der ersten Uran-Thorium-Alter, stellte sich jedoch heraus, dass das Höhlensystem bedeutend älter sein musste als angenommen und keine direkte Korrelation mit der Oberflächenmorphologie möglich ist. Der Fokus wurde daher auf die Klärung der Genese des Höhlensystems verlagert. Dazu wurde eine detaillierte Kartierung morphologischer Klein- und Großformen des Höhlensystems durchgeführt. Diese wurden Prozessen zugeordnet, die in weiten Teilen des Höhlensystems in eine relative Chronologie gebracht werden konnten. Unterstützend wurden eine Reihe absoluter Speläothem-Alter mittels U/Th-Methode gemessen sowie an einer Stelle auch Höhlensedimente für eine Datierung mittels Paläomagnetik genommen. Aufgrund dieser Daten konnte das Mindestalter des Höhlensystems ermittelt sowie Taleintiefungsraten abgeschätzt werden. Durch kombinierte Messungen von Fließfacetten, Imbrikationen und Korngrößenverteilungen konnten die Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit während der phreatischen Phase der Höhlenentstehung rekonstruiert werden.

Ein Großteil der Arbeit soll in der größten deutschsprachigen Fachzeitschrift „Die Höhle“ veröffentlicht werden. Das fertige Manuskript ist nachfolgend angeführt. Die strukturgeologischen Untersuchungen, die nicht separat veröffentlicht worden sind, sind als Appendix A „Ergänzungen zur Strukturgeologie“ angehängt.

Danksagung

Ich danke allen, die mich während der Arbeit an diesem Projekt unterstützt haben. Insbesondere gilt mein Dank meinen Betreuern Lukas Plan und Bernhard Grasemann, die keine Umstände gescheut und mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben, für die Unterstützung im Feld, am Mikroskop und für die unermüdlichen Bereitschaft zu Diskussion.

Meine tiefe Dankbarkeit gilt vor allem meinen Eltern, die mich stets zu meinem eigenen Weg ermutigt und dabei bedingungslos unterstützt haben, und meinem Partner, Mathias Bichler, auf den ich mich allzeit verlassen konnte, der mir auch in schweren Zeiten Kraft und Hoffnung gab und immer an meiner Seite stand.

Ganz spezieller Dank gebührt außerdem den Kollegen der Universität Innsbruck, Christoph Spötl und Yuri Dubliansky, für die Hilfe bei der Probenahme, die Aufbereitung der Proben und für die Messung der stabilen Isotopen.

Ein riesiges Dankeschön geht an Denis Scholz, Universität Mainz, für die Durchführung der U/Th-Messungen.

Des Weiteren gilt mein Dank Pavel Bošak und Petr Pruner von der Akademie der Wissenschaften in Prag für die Unterstützung während der Probenahme und die Messung der Paläomagnetik-Proben.

Ich danke Susanne Gier für ihre Geduld und ihre freigiebige Unterstützung im Labor und bei der Interpretation der Daten.

Ich danke dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) für die finanzielle Unterstützung, die in Form des FEMtech Praktikums gewährt wurde. Weiters danke ich dem Hermannshöhlen-Forschungs- und Erhaltungsverein für logistische und finanzielle Unterstützung.

Besonderer Dank gilt außerdem Philippe Audra, Augusto Auler, Ivo Baron, Harald Bauer, Steffen Birk, Kurt Decker, Thomas Exel, Philipp Häuselmann, Sabine Hruby-Nichtenberger, Tanja Ilickovic, Christopher Kollmann, Pauline Oberender, Rudolf Pavuza, Doris Rupprecht und Jo De Waele für ihre Unterstützung während der Feld- und Laborarbeit sowie der äußerst produktiven Diskussionen.

Zuletzt gilt mein Dank all meinen Freunden, die stets an mich geglaubt, meinen Arbeitskollegen, die mich allzeit motiviert haben, und insbesondere auch Peter Raumauf, der stets bemüht war, mir die Fertigstellung dieser Arbeit zu ermöglichen.

Genese der Hermannshöhle (Kirchberg/Wechsel, NÖ)

Andrea Schober¹, Lukas Plan², Denis Scholz³, Christoph Spötl⁴, Pavel Bosak⁵, Petr Brunner⁵, Yuri Dubliansky⁴

¹Inst. für Geodynamik und Sedimentologie, Univ. Wien, Althanstr. 14, 1090 Wien

²Naturhistorisches Museum Wien, Geologische Abt.; Karst- und höhlenkundliche Arbeitsgruppe, Museumsplatz 1/10, 1070 Wien

³Johannes Gutenberg-Universität Mainz, J.-J.-Becher-Weg 21, Mainz, Deutschland

⁴Universität Innsbruck, Innrain 52, Innsbruck

⁵Institute of Geology, Academy of Sciences of the Czech Republic, Rozvojová 269, 165 00 Praha 6, Czech Republic

1 Einleitung

Die Hermannshöhle im Eulenberg bei Kirchberg am Wechsel (2871/7) ist mit 4,4 km die längste Höhle im Unterostalpin (Pfarr et al., 2014) und daher geologisch von besonderer Bedeutung. Aufgrund ihrer üppigen Sinterbildungen ist sie als Schauhöhle ausgebaut und wird vom Hermannshöhlen-Forschungs- und Erhaltungsverein betrieben.

Im Eulenberg sind in unmittelbarer Nähe drei weitere befahrbare Höhlen entwickelt: Antonshöhle (2871/2), Mäanderhöhle (2871/14) und Rauchspalten (2871/34). Es kann davon ausgegangen werden, dass alle vier Höhlen eine genetische Einheit bilden (Hartmann et al., 1997). Daher werden sie in weiterer Folge als Hermannshöhlensystem (HHS) bezeichnet. Dieses dichte, netzwerkartige Gangsystem mit einer Gesamtlänge von knapp 5 km ordnet sich dreidimensional auf einer Fläche von nur 200 x 200 m mit 82 m Höhenunterschied an.

Umfassende Studien zur Erforschungsgeschichte, Biologie, Meteorologie und Geologie der Hermannshöhle wurden in einer Monographie von Hartmann et al. (1997) zusammengefasst. Diese enthält eine detaillierte morphologische Beschreibung des HHS (Hartmann & Hartmann, 1997; Hochschorner, 1997), Ideen zu seiner Speläogenese (Mrkos, 1997), einen geologisch-sedimentologischen (Seemann, 1997) und hydrologisch-tektonischen Überblick (Pavuzá, 1997) des Höhlensystems und seiner Umgebung sowie Versuche, die Höhlensinter zu datieren (Seemann et al., 1997). Frühere Autoren lieferten bereits mögliche Erklärungen zur Speläogenese des HHS (Waldner, 1942; Kempe und Mrkos, 1991; Mrkos, 1997). Die treibenden Mechanismen, die zur Ausbildung der heutigen Raumformen führten, konnten jedoch nicht befriedigend aufgeklärt werden. Darüber hinaus ist die Genese von Höhlen mit einem derart labyrinthischen Charakter schwierig zu interpretieren (Palmer, 1975 & 2011).

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt darin, Morphologie und Sedimente des HHS zu untersuchen und sie unter Berücksichtigung ebendieser modernen Konzepte zu interpretieren um Aussagen über die Genese zu treffen. Besonderes Augenmerk liegt dabei darauf, die Ursache für die ausgeprägte labyrinthische Struktur und die oftmals auftretenden canyonartigen Gänge zu verstehen. Zur zeitlichen Eingrenzung der Höhlengenese wurden Altersdatierungen an Speläothemen mittels der U/Th-Methode und an einem Feinsedimentaufschluss mittels Paläomagnetik durchgeführt. Es wurde versucht, aufgrund der gewonnenen Daten eine Korrelation zwischen Höhlengenese und der regionalen geomorphologischen Entwicklung des Kirchberger Tals herzustellen und Taleintiefungsraten zu ermitteln.

2 Das Untersuchungsgebiet

2.1 Lage und Geographie

Das Hermannshöhlensystem (HHS) liegt im Eulenberg (auch Eigenberg), nahe der Ortschaft Kirchberg am Wechsel im Süden von Niederösterreich. Die UTM-Koordinaten (Zone 33) des Haupteinganges sind 573.802 Ost und 5.274.220 Nord, die Seehöhe des Haupteingangs beträgt 627 m. Der Eulenberg liegt an der Nordseite eines breiten Talbodens, in dem der Otterbach (sein unterer Abschnitt nach Kirchberg wird Feistritz(bach) genannt) mit flachem Gefälle zwischen 1,6% und 1,9% nach Osten entwässert. Im Osten wird der Eulenberg vom Ramsbach begrenzt, der von mehreren kleinen Quellen und zum Teil schüttungsmäßig bedeutenderen Zubringern gespeist mit einem hohen Gradienten in den Otterbach mündet. Aufgrund seiner Steilheit von etwa 8,5% ist der Ramsbach, dessen Einzugsgebiet rund 3 km² misst (Abb. 1.), als stark erosiv einzustufen.

2.2 Geologie

Der Eulenberg wird von schwach metamorphen mitteltriassischen Karbonaten aufgebaut, die Teil des Semmering-Wechsel-Systems sind. Dieses komplex aufgebaute tektonische Deckensystem wird traditionell zum Unterostalpin gezählt (Herrmann et al., 1992; Seemann, 1997; Götzinger & Wagreich, 2006). Es setzt sich zusammen aus der tektonisch höheren Semmering-Einheit, die von permomesozoischen Sedimenten über einer Serie grobkörniger präpermischer Gneise aufgebaut wird, und der Wechsel-Einheit, die den tektonisch tiefsten Teil des Ostalpins ausmacht. Letztere ist nur in tektonischen Fenstern aufgeschlossen. Am Nordrand des größten dieser Fenster, dem Wechselfenster, entwickelte sich im Neogen das Kirchberger Becken (Ebner et al., 1991). Dieses tektonische Becken wurde während der letzten Phase der alpinen Orogenese im Zuge der lateralen Extrusion gebildet (Ebner et al., 1991; Faupl, 2003). Seine Füllung umfasst über 1300 m syntektonische Sedimente, dominiert von Blockschottern und Konglomeraten, in die geringmächtigen Lagen von Feinklastika eingeschalten sind. Diese Sedimente werden hochenergetischen, fluviatilen Systemen zugeordnet, die mit Schwemmfächern des aufsteigenden Beckenrandes verzahnen (Ebner et al., 1991). Sie sind westlich des Untersuchungsgebietes aufgeschlossen.

Die Karbonate des Eulenberges bestehen aus foliiertem, schwach metamorphen (untere Grünschieferfazies; Faupl, 1970) Kalkmarmor. Sie sind überwiegend weiß oder grau bis blau-grau, gebändert und zumeist feinkristallin. Sie bestehen hauptsächlich aus reinem Kalk, nur selten konnten 5-10 % Dolomitanteil nachgewiesen werden (Seemann, 1997). Die Marmor sind anisichen Alters (Tollmann, 1959; Herrmann et al., 1992). Im Norden werden sie vom tektonisch tiefer liegenden paläozoischen Gneis-und-Schiefer-Komplex begrenzt, während sie im Süden von quartären Talfüllungen bedeckt werden (Abb. 1).

Früheren Kartierungen zufolge zählt das Kirchberger Becken zu einer Reihe kleinerer und größerer, im Miozän geformter Pull-Apart-Becken. Es wurde im Zuge eines mehrphasigen Horizontalversatzes gebildet. Der nordöstliche Randbruch dieses Beckens streicht NW-SO mit dextralem Schersinn und zieht genau durch die Hermannshöhle (Müller, 1994; Pavuza, 1997). Dieses Modell wird unter Punkt 6.1 diskutiert.

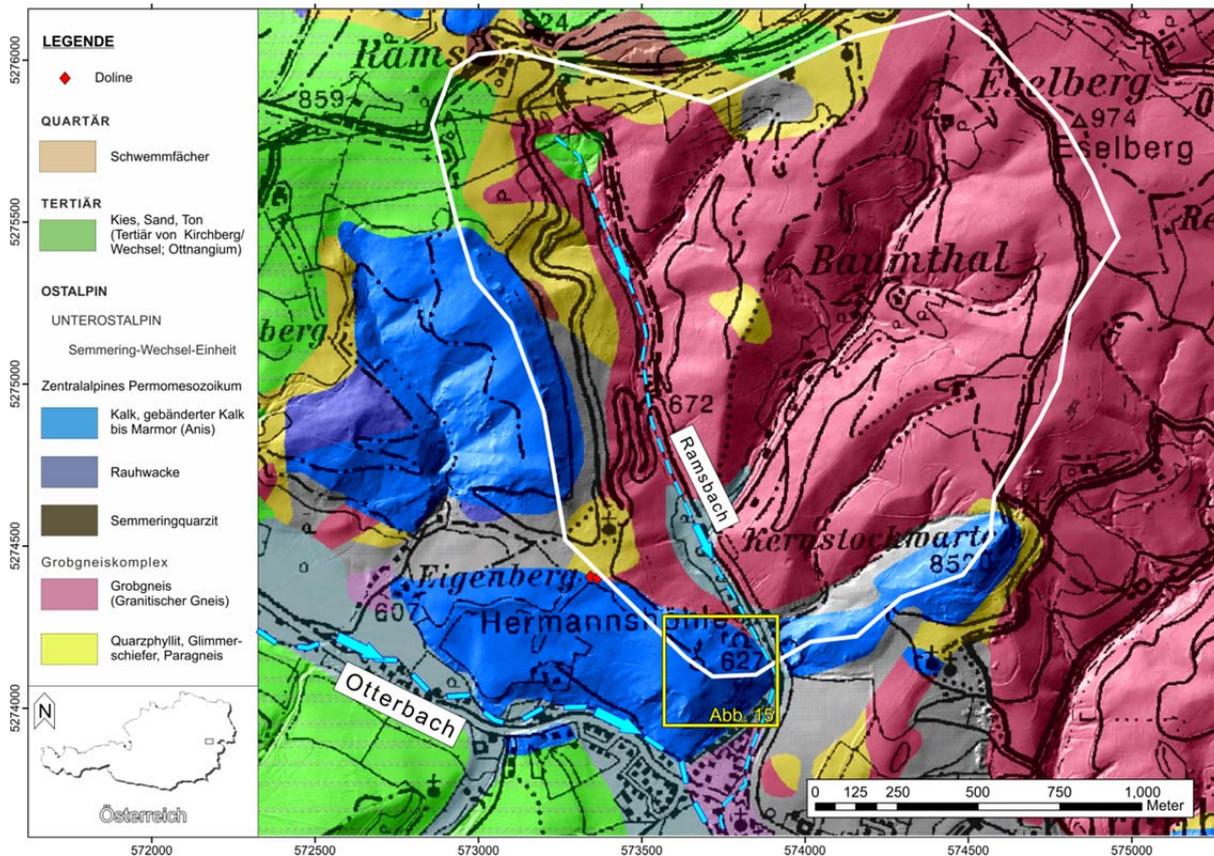


Abb. 1. Geologische Detailansicht des Untersuchungsgebietes (Koordinatensystem: UTM 33N). Das weiße Polygon markiert das heutige Einzugsgebiet des Ramsbaches oberhalb des HHS. Der gelbe Rahmen zeigt den Ausschnitt von Abb. 15. Geologie verändert nach Herrmann et al. (1992) unter Verwendung des Laserscans des Landes Niederösterreich (NÖ Atlas, 2013).

Fig. 1 Detailed geologic map of the investigated area (coordinate system: UTM 33N). The white polygon indicates the modern catchment area of the Rams brook above the HHS. The yellow frame shows Abb. 15. Geology modified after Herrmann et al. (1992) using the Laser Scan of Land Niederösterreich (NÖ Atlas, 2013).

3 Charakterisierung der Höhle

3.1 Gesamtanlage

Die Hermannshöhle stellt in vielerlei Hinsicht eine Besonderheit dar. Sie ist mit Abstand die größte Höhle im Unterostalpin und hebt sich durch ihre Morphologie deutlich von allen weiteren ab. Sie ist als dreidimensionales Labyrinth angelegt, dessen (derzeit bekannte) 4,4 km Ganglänge sich auf lediglich 140 x 160 x 73 m entwickelten. Ein derart engräumiges Labyrinth ist nicht nur im Unterostalpin, sondern in den gesamten Ostalpen einzigartig. Die Höhle erstreckt sich vertikal von 606 m (Sandtunnel) bis 679 m (Taubenloch) Seehöhe. Obwohl das Gesamtvolumen der bekannten Gänge nur rund 17.000 m³ ausmacht (1 % des umgebenden Gesteinswürfels; Mrkos, 1997), ist die kumulative Länge und Dichte der Passagen bemerkenswert.

In unmittelbarer Nähe zur Hermannshöhle befinden sich drei weitere bedeutende Höhlen: die nordwestlich gelegenen unbefahrbar verbundenen Antonshöhle und Mäanderhöhle und die östlich gelegenen Rauchspalten. Obwohl es keine bekannte befahrbare Verbindung gibt, konnte zwischen Hermannshöhle (*Irrgang*) und Rauchspalten durch einen Rauchversuch eine wetterwegsame

Verbindung nachgewiesen werden (Waldner, 1942). Die Rauchspalten erstrecken sich mit etwa 345 m Ganglänge auf einer Grundfläche von 30 x 40 m bei ± 20 m Höhenunterschied (H). Wie auch die Hermannshöhle sind sie labyrinthisch, weisen Tropfsteine auf und beinhaltet große Mengen klastischer Sedimente. Die 28 m lange Mäanderhöhle (H: ± 3) und die 163 m lange Antonshöhle (H: ± 19) verlaufen kaum verzweigt und störungsgebunden, ihre Sohlen sind ebenfalls sedimentbedeckt.

3.2 Hydrologie

Das HHS ist heute weitgehend trocken und nur durch Tropfwässer und kleinen Gerinnen bei Starkregenereignissen mit unter 1 l/s Schüttung bei Starkregen geprägt (Pavuz, 1997; Mrkos 1997). In einigen Bereichen wie dem *Teich* oder dem *Hexenkessel* führen diese zu temporären Rückstautümpeln bzw. Sinterbecken.

Obwohl Teile des Höhlensystems (*Wasserschloss* 608 m; *Sandtunnel* 606 m; Rauchspalten 597 m) je nach Schnittwinkel bis auf oder sogar knapp unter das Niveau des Ramsbaches, der nordöstlich unterhalb der Höhle von etwa 608 m bis 597 m verläuft, reichen, werden sie auch bei Hochwasserereignissen nicht überflutet. Während der Regulierung des Ramsbaches wurden kleine Ponore entdeckt, die auf ein wasseraktives, unbekanntes Karstsystem unterhalb des HHS hindeuten (Mrkos, 1997).

3.3 Morphologie

Frühere Autoren teilten die Hermannshöhle in fünf „genetisch nicht identische Untersysteme“ (Kempe & Mrkos, 1991) bzw. sechs „speläogenetisch nicht idente Bereiche“ (Mrkos, 1997). Diese Unterteilung konnte im Rahmen dieser Studie nicht nachvollzogen werden. Es wird daher eine Gliederung nach rein morphologischen Kriterien (Verlauf, Querschnitt und Form der Gänge) bevorzugt, die nicht nur die Hermannshöhle sondern das gesamte HHS betrachtet.

Viele Gänge des HHS verlaufen entlang prominenter Störungsrichtungen, die etwa NW-SE bzw. auch NE-SW streichen (Hartmann & Hartmann, 1997; Mrkos, 1997; Hochschorner, 1997). Es existieren eine bemerkenswerte Vielzahl von Über- und Unterlagerungen, die den dreidimensional labyrinthischen Charakter entscheidend prägen. Kleine, gewundene Gänge bilden – meist im Deckenbereich – Verbindungen, die nicht nur gleichwertige Gänge zusammenschließen, sondern auch solche, die sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Die Räume sind im Allgemeinen schmal und hoch und oftmals als Canyons entwickelt, die nach ihrem Verlauf in zwei Untergruppen unterteilt werden können.

Der nordöstliche und der südwestliche Teil der Hermannshöhle (*Lehmkluftlabyrinth*, *Tropfsteinparadies* mit Durchstieg zum *Kyrlelabyrinth*) sowie die Antons- und Mäanderhöhle zeigen eher die Form eines Netzwerkes. Die Gänge sind suborthogonal angeordnet und folgen augenscheinlich dem vorherrschenden Störungssystem.

Die zentralen sowie die westlichen und südöstlichen Bereiche zeigen ein völlig anderes Bild. Hier sind vor allem mäandrierende Canyons entwickelt, die keiner bevorzugten Richtung zu folgen scheinen. Hervorzuheben ist hierbei das sogenannte „Große Canyonsystem“ das vom *Taubenloch* über den *Großen Dom* und die *Erlenschlucht* Richtung *Forscherhalle* zieht (Kempe und Mrkos, 1991; Mrkos,

1997). Dieser zwischen 1 und 3 m breite Canyon bildete über weite Strecken schöne sinusförmige Mäanderschlingen aus (*Hohe Kluft, Niagarafall*). Trotz des beachtlichen Volumens das dieser Canyon innerhalb des labyrinthisch verzweigten HHS einnimmt, zeigt er lediglich wenige Schnittpunkte mit anderen Canyons. An diesen Stellen bildeten sich Raumerweiterungen, wie z.B. der *Große Dom* mit 6 m Durchmesser, der mit 16 m bekannter Raumhöhe den größten Abschnitt des HHS bildet. Die Sohle des „Großen Canyonsystems“ ist rezent von Sediment bedeckt und seine wahre Ausdehnung daher nicht ersichtlich.

Im Gegensatz zu den Canyons des HHS zeigen das Kyrlelabyrinth und die Rauchspalten bereichsweise breite Hallen, die keiner erkennbaren Richtung folgen.

Einige Teile des HHS sind künstlich geschaffen (westliche Teil des *Karl-Ludwig-Tunnel, Eingang ins Kyrlelabyrinth*) bzw. erweitert oder überprägt (östlicher Teil des *Karl-Ludwig-Tunnel, Umgehung der Dietrichshalle, Vorhalle*). Stellenweise finden sich vertikale Röhren (*Angströhre*, Bereiche im oberen Teil der *Dietrichshalle*, Teile des *Wasserschlosses*), die an sogenannte „Feeder“ erinnern (Klimchouk, 2009).

Es zeigt sich des Weiteren, dass das HHS einen ungewöhnlichen Reichtum an klastischen sowie chemischen Sedimenten aufweist. Erstere bedeckten die Sohle beinahe aller bekannten Gänge und verbergen so das gesamte Ausmaß des HHS. Sinter- und Tropfsteinformationen prägen über weite Strecken das Raumbild und überlagern oftmals die klastischen Sedimente.

4 Methodik

4.1 Oberflächenkartierung

Um einen genauen Überblick über die geologischen Verhältnisse in und um den Eulenberg zu erlangen, wurde eine geologische und geomorphologische Detailkartierung mit Hilfe von Laserscan-Höhenmodell (NÖ-Atlas, 2013) und differentiellm GPS (Trimble® GeoXH™ handheld aus der GeoExplorer® 2008 Serie) vorgenommen. Die Auswertung der Daten erfolgte im UTM-System (Zone: UTM 33N). Die differentielle Korrektur der Daten erfolgte offline mit der Trimble® Nachbearbeitungssoftware GPS Pathfinder Office. Bei der Kartierung wurde besonderes Augenmerk auf die lithologischen Grenzen, insbesondere aber auf die Grenzen zwischen verkarstungsfähigem und nicht-verkarstungsfähigem Gestein, gelegt.

4.2 3D Visualisierung der Höhle mit Spelix

Für die 3-dimensionale Darstellung der Höhle wurde die Polygonzugsdaten samt aus Plänen erhobenen Raumdaten an jedem Messpunkt in die Onlinedatenbank *Spelix* (<http://spelix.hoehlenforschung.at>) eingegeben. Aus dieser können sie als 3d- bzw. als vrml-File ausgegeben werden. Diese Daten können z.B. mit der frei verfügbaren Software Survex (www.survex.com) dargestellt werden.

Es wurden bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung alle Bereiche des HHS, mit Ausnahme des *Kyrlelabyrinths*, digitalisiert.

4.3 Strukturgeologie

Die mylonitische Foliation des Marmors wurde sowohl innerhalb des HHS als auch an umliegenden Oberflächenaufschlüssen eingemessen und mit den Schieferungsflächen der Glimmerschiefer und Phyllite verglichen. Es wurden Störungs- und Drucklösungsflächen in der Höhle und der näheren Umgebung dokumentiert und soweit erkennbar wurden Lineationen und Schersinnindikatoren aufgenommen.

4.4 Morphologische Kartierung

Es wurden fast alle wesentlichen Abschnitte des HHS befahren (Ausnahme: *Traumland*, *Hoffnungsgang* und der Durchstieg zum *Kyrlelabyrinth*) und dabei morphologische Merkmale kartiert. Besonderes Augenmerk wurde auf Paläofließrichtungsindikatoren wie Fließfacetten oder Imbrikationen gelegt. Erstere wurden an repräsentativen Stellen vermessen und die Paläofließgeschwindigkeiten anhand von Palmer (2007: 148) ermittelt. Des Weiteren wurde der umfangreiche paragenetische Formenschatz der Höhle dokumentiert. Um zwischen Wasserstandsmarken, die exakt horizontal ausgebildet sind, und Sedimenthohlkehlen unterscheiden zu können wurde eine Schlauchwaage eingesetzt (Abb. 2).

Die Interpretation erfolgte aufgrund aktueller speläogenetischer Standardliteratur (Klimchouk et al., 2000; Palmer, 2007; Farrant & Smart, 2011).



Abb. 2 Vermessung der Hohlkehlen mittels Schlauchwaage (*Rutsche*). Foto: L. Plan

Fig. 2 Measuring the notches with a tube water level (*Rutsche*). Picture: L. Plan

4.5 Sedimentuntersuchungen

Als Ergänzung zu den Sediment- und Schwermineralanalysen, die bereits Seemann (1997) durchgeführt hatte, wurden sieben Proben genommen (Abb. 5a) und ihre Korngrößenverteilung bestimmt. Dazu wurden die Korngrößen von 32 mm 2 mm trocken- und von 2mm bis 63 μm nass gesiebt. Eine Großprobe (HH25) wurde mittels Riffelteiler repräsentativ geteilt. Die Fraktion < 2 mm aller Proben wurde zur Disaggregation und Oxidation von organischem Material mit H_2O_2 versetzt. Weitere Dispergierung erfolgte im Ultraschallbad. Die Silt- und Tonfraktionen wurden nach erneuter Dispergierung mit einem 400 W Ultraschallstab mittels Sedigraph (micromeritics® SediGraph 5100) für sechs Proben bis 0,5 μm und für eine Probe (HH28) bis 0,125 μm ermittelt.

4.6 U/Th-Datierung und Analyse stabiler Isotope von Speläothemen

Zur zeitlichen Einstufung des HHS wurden insgesamt 31 repräsentative Speläothem-Proben aus verschiedenen Bereichen der Hermannshöhle und der Rauchspalten entnommen. Im Zuge einer Vorsortierung wurden vier Proben aufgrund der bereits mit freiem Auge erkennbaren detritären Verunreinigung als nicht datierbar verworfen. Bei den verbleibenden 27 Proben (Abb. 5) handelt es sich um acht Tropfsteine und 19 Sinterlagen, von denen vier (drei Tropfsteine und eine Sinterlage) mit einer akkubetriebenen Handbohrmaschine angebohrt wurden. Dabei wurde jeweils ein etwa 8 mm langer Bohrkern entnommen. Die restlichen Proben wurden direkt aus der Wand gebrochen oder gemeißelt und anschließend mit einer Diamantsäge geschnitten. Mithilfe der U/Th-Zerfallsreihe wurde das Alter der Proben bestimmt. Die angewandte MC-ICP-MS Methodik wird von Žák et al. (2012) detailliert beschrieben.

Des Weiteren wurden 17 der 30 Speläothem-, zwei Marmor- und zwei rezente Sinterproben sowie eine Probe von Kalzithäutchen aus dem Sandtunnel mittels Massenspektrometrie (ThermoFisher DeltaplusXL mit Gasbench II) hinsichtlich ihrer Sauerstoff- und Kohlenstoffisotope analysiert und die Ergebnisse relativ zum Vienna PeeDee Belemnite Standard angegeben. Die angewandte Methodik wird von Spötl & Vennemann (2003) detailliert beschrieben.

Auch frühere Autoren stellten bereits Versuche an, die Speläotheme des HHS zu datieren. Seemann et al. (1997) nahmen acht Proben aus drei verschiedenen Lokalkomplexen. Sieben davon wurden mit der ^{14}C -Methode und drei zusätzlich mit der U/Th-Methode datiert. Es wurden dabei außerdem drei weitere Proben berücksichtigt, die aus den Jahren 1951 (analysiert 1967) und 1993 stammen. Die Analyseergebnisse ergaben zu jenem Zeitpunkt – vor allem aufgrund der damals verwendeten Analytik (alpha-Spektrometrie) – ein widersprüchliches Bild.

Die Autoren dieser Studie waren bemüht, Seemanns Proben einer Wiederholungsmessung zu unterziehen; die Stücke konnten jedoch nicht mehr aufgefunden werden.

4.7 Paläomagnetik

Als Ergänzung zu den U/Th Datierungen wurden an einer Stelle (*Teichkluft*) Paläomagnetik-Proben genommen. Dazu wurde innerhalb eines ungestörten Sedimentprofils (ca. 5 m) 67 Proben genommen. Dabei handelt es sich um 66 Sedimentproben, die orientiert genommen wurden, und eine Festgesteinsprobe. Die angewandte Methodik wird von Zupan-Hajna et al. (2008) detailliert beschrieben.

Die Proben werden derzeit noch gemessen. Es liegen bislang noch keine Ergebnisse vor.

5 Ergebnisse

5.1 Geologie und Morphologie der Umgebung

Im Zuge der Oberflächenkartierung wurde die Grenze zwischen dem verkarstungsfähigen Karbonaten und den nicht verkarstungsfähigen Gesteinen des Grobgneiskomplexes detailliert aufgenommen. Sie verläuft im Norden des Eulenberges als mehr oder weniger geradliniger Kontakt in Südost-Nordwest-Richtung. Aufgrund der schlechten Aufschlussverhältnisse kann über das Einfallen dieses Kontaktes jedoch keine Aussage gemacht werden. Die heutigen Eingänge von Mäanderhöhle und Antonshöhle befinden sich nur wenige Meter südlich dieser Grenze.

Zentral auf dem Eulenberg gelegen wurden zwei Dolinen gefunden. Die größere misst 6 m im Durchmesser und ist 2 m tief. Sie liegen direkt am Kontakt der Glimmerschiefer und der Karbonate (Abb. 1).

5.2 Strukturgeologie

Die Karbonate des Eulenberges weisen eine deutliche grau-weiße Bänderung auf, die flach nach WSW bzw. SO einfällt (Abb. 3.a). Diese Richtung stimmt mit den Foliationsflächen der nicht verkarstungsfähigen Schiefer und Phyllite überein, wenngleich jene teilweise steiler einfallen (Abb. 3.b).

Das HHS ist stark von Störungen geprägt; es wurden drei Hauptstörungsrichtungen ausgewiesen (Abb. 3.c). Die dominantesten Störungen streichen NW-SE und fallen zumeist steil nach NE, in einigen Fällen steil nach SW ein. Die zweite bedeutende Störungsrichtung ist NNE-SSW und fällt steil Richtung ESE ein. Zwischen diesen beiden Endgliedern gibt es eine Reihe weiterer Flächen, die ebenfalls steil nach SE einfallen. In beiden Fällen ist der Bewegungssinn dextral wobei die Lineare subhorizontalen Versatz anzeigen. Der dritte wichtige Typ verläuft schichtparallel zur Foliationsrichtung des Marmors und fällt flach Richtung WSW ein. Auf diesen Flächen wurden nur wenige, eine Abschiebung anzeigende Lineare beobachtet.

An so gut wie allen Störungsflächen wurden starke Lineationen dokumentiert. Diese bilden stellenweise sogar ein deutliches, undulierendes Relief. Bei genauerer Betrachtung konnte festgestellt werden, dass es sich dabei um sogenannte Stöckolite-Striae handelt. Diese durch Drucklösung entstandenen Lineationen verlaufen parallel zur Bewegungsrichtung und bilden sich auf Flächen, die normal zu gewöhnlichen Stylolith-Flächen stehen (Means, 1987; Ramsay & Huber, 1987).

Es wurden neben den Drucklösungsflächen auch einige maximal Dezimeter mächtige Kataklastite gefunden. Diese spröden Störungen fallen steil nach NO ein (Abb. 3.d).

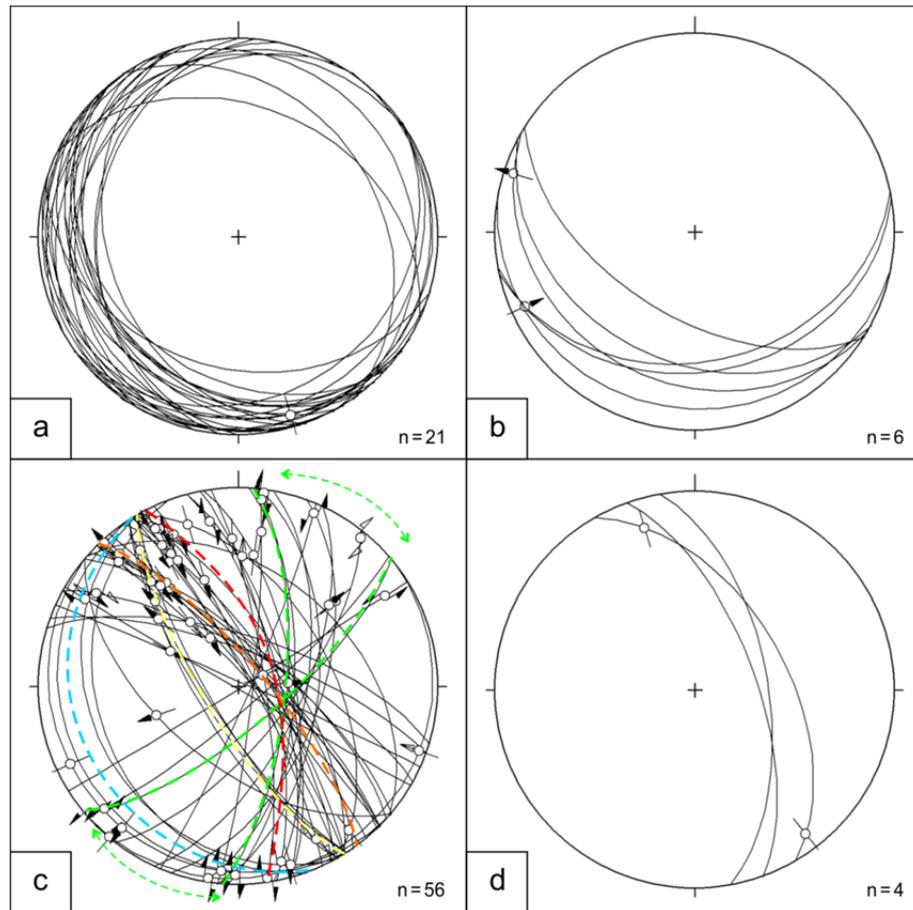


Abb. 3. Plot der gemessenen Flächen als Großkreise im Schmidt'schen Netz. a) Die metamorphe Bänderung des Marmors fällt generell flach nach WSW bzw. SE ein. b) Foliationsflächen der nicht verkarstungsfähigen Schiefer und Phyllite. c) Störungsflächen. Die dominierenden Störungsrichtungen streichen NW-SE (rot, gelb, orange) bzw. NNE-SSW (grün) und fallen steil nach NE und NW bzw. ESE ein. In beiden Fällen ist die Bewegungsrichtung subhorizontal dextral. Der dritte Typus sind foliationsparallele Störungen, die flach nach WSW (blau) abschieben. d) Spröde Störungen mit Kataklasiten fallen steil nach NE ein.

Fig. 3 a) Metamorphic foliation of the banded marble, dipping very shallow towards the WSW and the SE, respectively. b) Schistosity of the non-karstic schists and phyllites. c) Fault planes observed. The most dominant faults are striking NW-SE (red, yellow, orange), dipping steeply towards the NE. The second most dominant faults are striking NNE-SSW (green), dipping steeply towards the ESE. In both cases, the shear sense is dextral, the lineation plunges almost horizontally dextral. The third relevant type of faults are foliation-parallel, dipping shallow towards the WSW (blue). d) Brittle faults (cataclasites) dip steeply to the NE.

5.3 Höhlenmorphologie

5.3.1 Raumprofile

Die Mehrheit der Gänge des HHS ist canyonartig angelegt, mit hohen und schmalen Räumen, die an fast jeder Stelle undulieren. Geradlinige Passagen sind selten und so gut wie immer an vertikale Initialfugen gebunden (*Rutsche, Gemeißelte Röhre*). Runde oder elliptische Profile fehlen völlig, sowohl als Raumform an sich als auch am Top der Canyons. Es konnten im gesamten HHS keine Initialfugen – abgesehen von den wenigen vertikalen – nachgewiesen werden. Dennoch konnten weder Formen vadoser Speläogenese wie vadose Canyons mit gleichsinnigem Gefälle noch solche einer

epiphreatischen Entstehung wie z.B. Höhlenkarren (*rills*) oder Lösungskolke (*solution pockets*) gefunden werden.

5.3.2 Kleinformen

5.3.2.1 Deckenkolke/ -kanäle und Pendants

Das HHS zeichnet sich durch seinen Reichtum an phreatischen Kleinformen aus. Es gibt eine Vielzahl von paragenetischen Deckenkanälen, die zum Teil als wunderschöne, sinusförmige Mäander ausgebildet sind (*Wildschützenhalle*, vor Abstieg zum *Ölberg*). Sie sind meist einige Zentimeter bis Dezimeter breit und bis zu mehrere Meter lang. An vielen Stellen des HHS findet man Deckenkarren (Anastomosen; z.B. in Bodennähe in der *Hohen Kluft*), doch noch dominanter sind Pendants (Hängezapfen). Diese paragenetischen Höhlenformen kommen in fast jedem Abschnitt des HHS vor und sind nicht an geologische Strukturen gebunden. Sie treten in allen Größenordnungen auf, von wenigen Zentimeter messenden Kleinformen (*Steiniger Weg*) bis zu mehrere Meter hohen, über weite Strecken raumbestimmenden Großformen (*Sandberghalle* (Abb. 4), *Irrgang*, *Fensterhalle*, *Wasserschloss*). Auch findet man in verschiedenen Bereichen des HHS Deckenkolke (*Großer Dom*, *Sandtunnel*), die stellenweise mehre Meter Durchmesser erreichen (*Taubenloch*, Halle vor *Niagarafall*) erinnern.



Abb. 4 Pendants sind die eindeutig raumbestimmende Kleinform in diesem Teil der *Sandberghalle*. Foto: L. Plan

Fig. 4 Pendants are obviously the damonant cave feature in this part of *Sandberghalle*. Picture: L. Plan

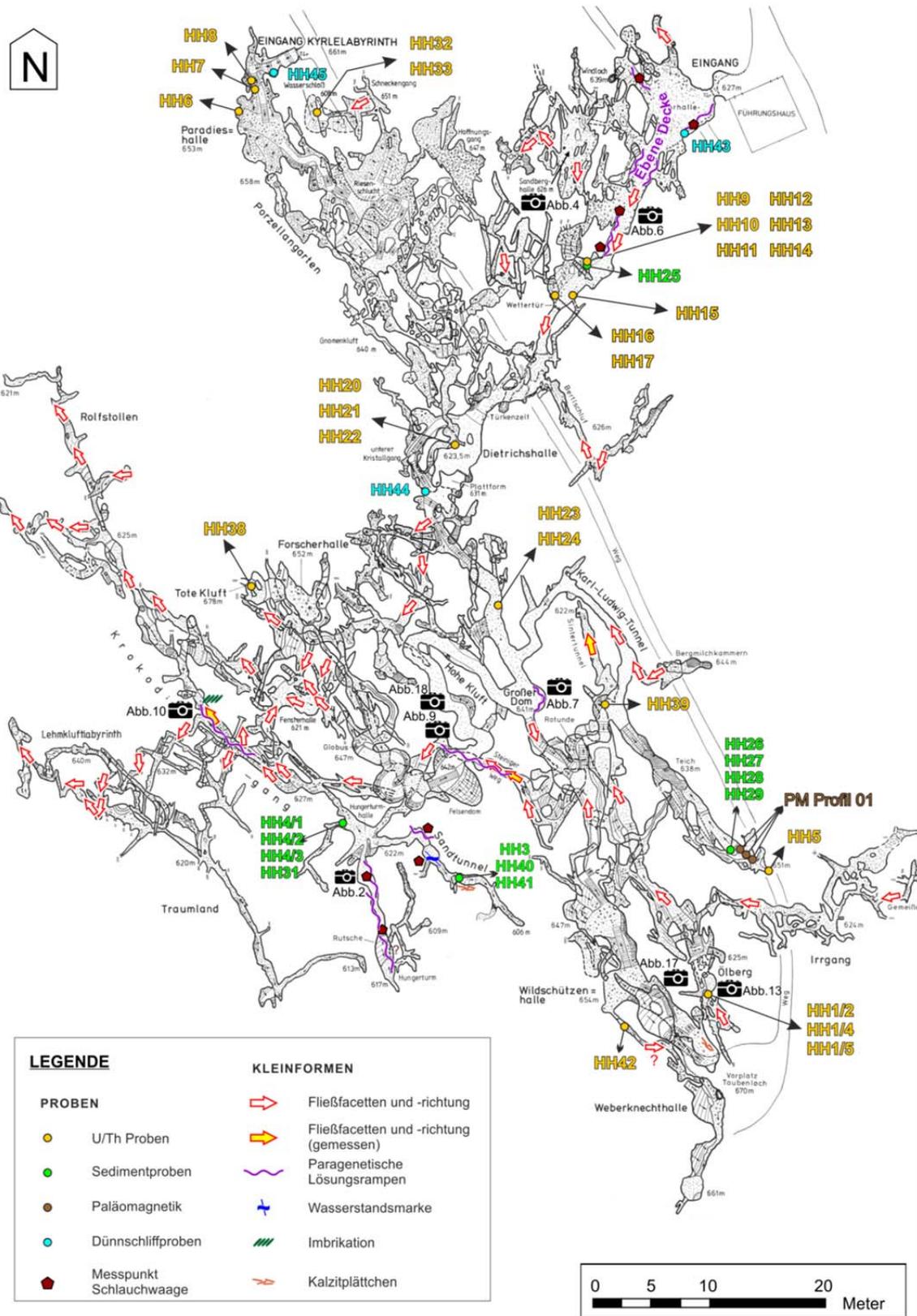
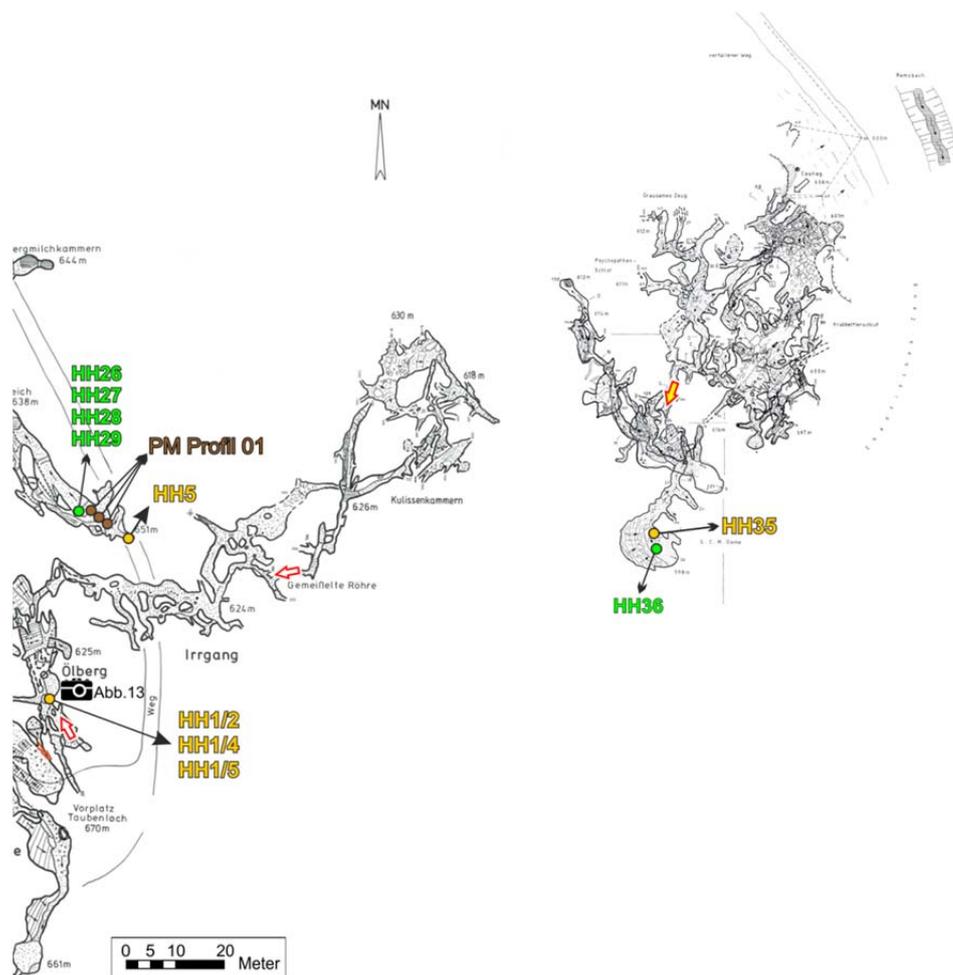


Abb. 5 a Lage der Probenentnahmestellen und der kartierten Kleinformen. Paragenetische Canyons, Deckenkarren und -mäander sind nicht eingezeichnet, da sie in fast allen Teilen vorkommen. (Gesamtplan der Hermannshöhle verändert nach Hartmann, 1995)

Fig. 5a Location of the sampling sites and the mapped micro morphologies. Paragenetic canyons and ceiling channels are not displayed since they occur in almost all parts of the cave system (general plan of the Hermannshöhle modified after Hartmann, 1995).



b. Lage der Probenentnahmestellen und der kartierten Kleinformen. (Gesamtplan der Rauchspalten verändert nach Herrmann, 1989)

b. Location of the sampling sites and the mapped micro morphologies (general plan of the Rauchspalten modified after Herrmann, 1989).

5.3.2.2 Lösungsrampen, Wasserstandsmarken und ebene Decken

Lösungskehlen sind Kerben in der Wand, die sich bilden, wenn innerhalb eines Gangquerschnittes an einer bestimmten Stelle ein relativ gesehen erhöhtes Lösungspotential vorhanden ist. Sie werden unterschieden in Lösungsrampen und Wasserstandsmarken (Abb. 5 . a & Abb. 5 . b). Erstere bilden sich über Sedimentverfüllungen. Sie können (sub-) horizontal oder geneigt verlaufen oder undulieren (Palmer, 2007; Farrant & Smart, 2011). Schöne Beispiele dafür findet man in der *Vorhalle*, wo mindestens fünf Lösungsrampen identifiziert werden konnten, und im *Barbarastollen* (Abb. 6). Sie zeigen deutliche Fließfacetten, die eine SW-wärts (höhleneinwärts) gerichtete Fließrichtung indizieren. Die Wände des *Steinigen Weges* und des *Krokodilganges* zeigen ebenfalls eine Abfolge von Lösungsrampen mit Fließfacetten und auch im Bereich der *Rutsche* konnten solche ehemaligen Sedimentverfüllungen nachgewiesen werden. Diese stehen hier an den gegenüberliegenden Wänden windschief zueinander. Lösungsrampen können auch nach oben hin offene Stufen bilden, da im Zuge der fortwährend aufwärts gerichteten Lösung die Oberkante der Kehlen weggelöst wird (Farrant & Smart, 2011). Beispiele dafür sind im *Großen Dom* (Abb. 7) eindrucksvoll aufgeschlossen.



Abb. 6 Hohlkehle an der Seitenwand des *Barbarastollens*. Die weiße Linie unterstreicht die Undulation. Foto: L. Plan

Fig. 6 Solution ramp on the side wall of *Barbarastollen*. The undulation is emphasized by the white line. Picture: L. Plan



Abb. 7 Nach oben offene, paragenetische Lösungsrampen im *Großen Dom*. Foto: L. Plan

Fig. 7 Upwards open paragenetic solution ramps in the *Großer Dom*. Picture: L. Plan

Wasserstandsmarken beschreiben horizontale Kerben, die sich an der Luft-Wasser-Grenze ehemaliger, über längere Zeit stationärer Wasserständen bilden (Palmer, 2007). Im HHS wurde nur eine Lösungskehle als ehemaliger Wasserstand identifiziert, und zwar am Beginn des *Sandtunnels*. Oberhalb dieser exakt horizontalen Hohlform war das Muttergestein geprägt von Kondenswasserkorrosion (zellige, boxworkartige Verwitterung), darunter sind die Wände eher glatt. Neben dieser vadosen Korrosion konnten an der Decke Fließfacetten beobachtet werden, die jedoch aufgrund der Verwitterung keine eindeutige Fließrichtung anzeigten. Zudem wurden etwas unterhalb Calcithäutchen gefunden, die ebenfalls auf stehendes Wasser hindeuten. Am Anfang des *Sandtunnels* befinden sich aber auch deutlich ausgeprägte Lösungsrampen.

Neben den Lösungsrampen fällt die *Vorhalle* durch ihre ebene Decke auf. Diese wurde von Kempe und Mrkos (1991) als Laugdecke beschrieben. Mittels der Schlauchwaage wurde festgestellt, dass die Decke bergwärts deutlich abfällt und sich auch die gegenüberliegenden Deckenbereiche nicht auf derselben Höhe befinden. Des Weiteren zeigt die Decke wie auch die Lösungsrampen in diesem Bereich deutliche, bergwärts gerichtete Fließfacetten.

5.3.2.3 Fließfacetten

In über 50 Abschnitten konnte aufgrund von Fließfacetten (FF) die Paläofließrichtung bestimmt werden (Curl, 1966). Man findet sie insbesondere in den tieferen Teilen des HHS, bis zu einer Höhe von etwa 645 m. Die höheren Teile der Hermannshöhle sowie die Antons- und Mäanderhöhle zeigen keine FF mit Ausnahme eher zweifelhafter Exemplare an der Decke des Wildschützenkamins (etwa 660 m). Bereichsweise bilden FF über ganze Gangabschnitte die dominante Kleinform (Steiniger Weg, Bertlschluf, Krokodilgang). In vier Bereichen des HHS wurden an insgesamt sechs Punkten die Längen der FF vermessen. Daraus konnte nach Palmer (2007: 148) die Fließgeschwindigkeit des Wassers zur Zeit der Bildung der FF abgeschätzt werden (Abb. 8). Im Krokodilgang stimmt die, aus der Imbrikationen plattiger Steine, abgeleitete Paläofließrichtung mit den dort auftretenden FF überein.

Das sich daraus ergebende Gesamtbild ist recht einheitlich: Demnach floss das Wasser während der Bildung dieser Höhlenformen nicht parallel zum Ramsbach, oder zumindest zum Otterbach, sondern generell westwärts, d.h. tiefer in den Eulenberg (Abb. 15).

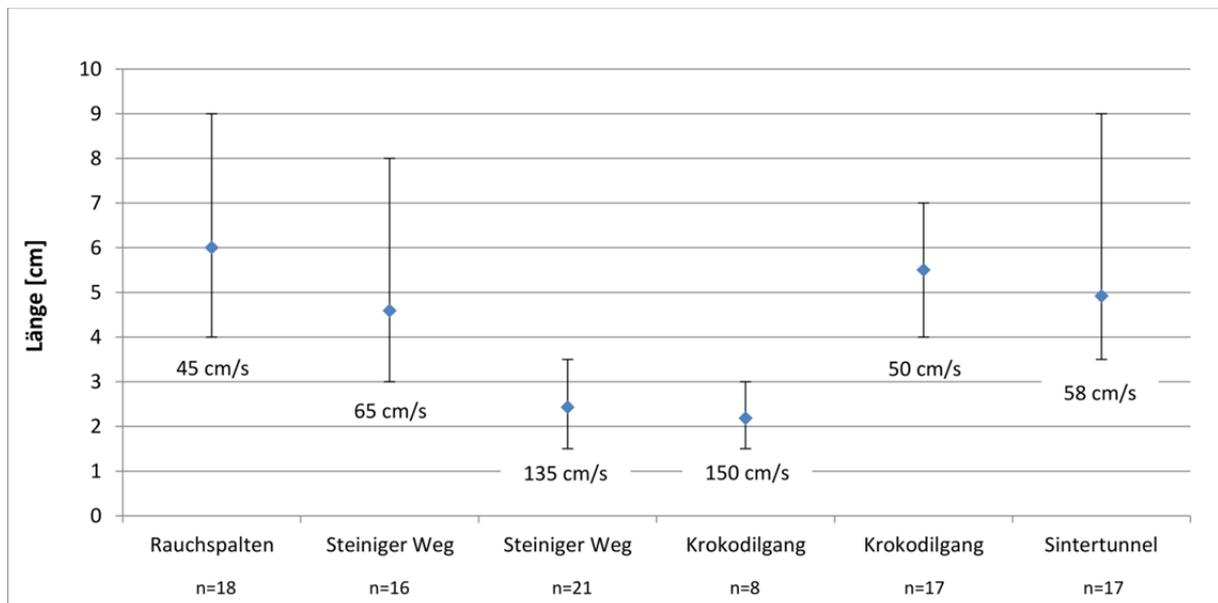


Abb. 8 Gemessene Längen der Fließfacetten. Aus dem Durchmesser lässt sich die Fließgeschwindigkeit des Wassers ableiten (Palmer, 2007). Die Rauten stellen die durchschnittliche Länge dar, die Fehlerbalken die Verteilung der Messungen. n bezeichnet die Anzahl der Messungen.

Fig. 8 Measured lengths of scallops. The diameter gives information about the flow velocity of the water (Palmer, 2007). The diamonds indicate the mean length; the error bars show the distribution of the measurements. n describes the number of measurements.

An manchen Punkten des HHS finden sich sehr schöne Beispiele für Altersabfolgen von Fließfacetten und paragenetischen Kleinformen bzw. früheren Sedimentverfüllungen. Im *Steinigen Weg* finden sich in von FF skulptierten Wänden paragenetische Wandkarren und -mäander. Sie zeigen keine FF und müssen daher zu einer Zeit gebildet worden sein, als klastische Sedimente die bereits existierenden Fließfacetten vor der Erosion schützten (Abb. 9).

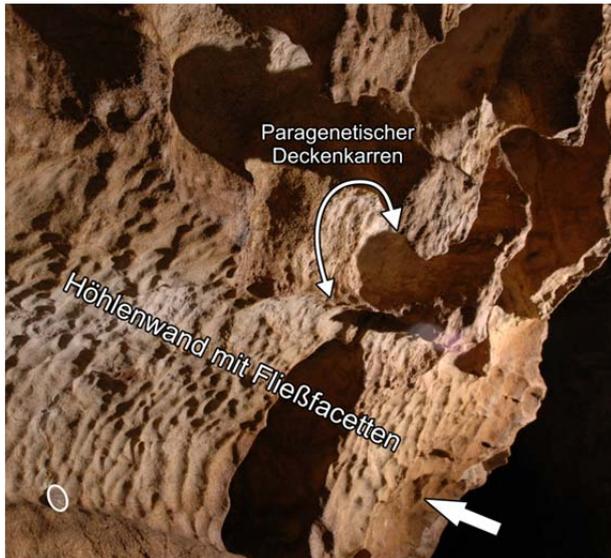


Abb. 9 Wand mit Fließfacetten im *Steinigen Weg* (der Pfeil zeigt die Fließrichtung nach NW an). Die paragenetischen Deckenkarren zeigen keine Fließfacetten und müssen daher jünger sein. Links unten ist eine 1€-Münze zum Größenvergleich hervorgehoben. Foto: L. Plan

Fig. 9 Cave wall with scallops (arrow indicates flow direction from SE to NW). The paragenetic ceiling half tubes do not show scallops and are clearly a younger feature. Note the 1 € coin at lower left for scale. Picture: L. Plan

Das zweite Beispiel befindet sich im *Krokodilgang*. Ein Gangprofil zeigt hier eine Abfolge von FF mit deutlich unterschiedlichen Längen beiderseits einer recht scharfen subhorizontalen Grenze (Abb. 10). Diese FF wurden vermessen und die Fließgeschwindigkeit abgeleitet (Abb. 8). Unter der Grenze floss das Wasser mit etwa 0,5 m/s, während darüber deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten von etwa 1,5 m/s herrschten. Diese Diskrepanz kann auf eine ehemalige Sedimentverfüllung zurückgeführt werden, im Detail gibt es jedoch zwei Erklärungsmöglichkeiten: (1) Ein vorhandenes Canyonprofil, in dem die die großen FF entstanden, wurde bis zu der heute sichtbaren Grenze mit Sediment verfüllt. Im verbleibenden kleineren Querschnitt wurden die großen Facetten durch rascher fließendes Wasser von kleineren überprägt. (2) Nur der untere Teil eines paragenetischen Canyons mit den großen FF existierte. Sedimentverfüllung bewirkte die Erweiterung des Canyons nach oben wobei sich aufgrund geänderter Parameter, die zu einer höheren Fließgeschwindigkeit führten (kleinerer Querschnitt oder höhere Durchflussrate), im oberen Bereich kleinere FF ausbildeten.

Zum Schluss wurde jedenfalls das Sediment wieder ausgeräumt und das Profil in seiner heutigen Form freigelegt.

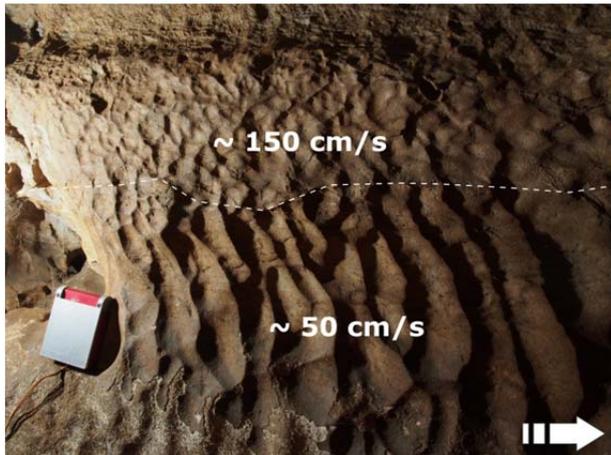


Abb. 10 Wandpartie im *Krokodilgang*. Zwei Generationen von Fließfacetten zeigen eine ehemalige Sedimentbedeckung des unteren Teils und eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit darüber. Die ehemalige Sedimentoberkante ist durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet. Der Pfeil zeigt die Fließrichtung (nach NW) an. Foto: L. Plan

Fig. 10 Profile located at *Krokodilgang*. Two generations of scallops show a former sediment infill and the resulting increase in flow velocity. The top of the sediment is indicated by the whit dotted line. The arrow indicates the flow direction (NWwards). Picture: L. Plan

5.4 Sedimente

Sowohl klastische als auch chemische (Sinter-) Ablagerungen prägen sehr stark das Erscheinungsbild des HHS.

Aufgrund des Feldbefundes und der Labormessungen der Korngrößenverteilung (Abb. 11) lassen sich fünf verschiedene Gruppen klastischer Sedimente in der Hermannshöhle unterscheiden. Vier davon sind fluviatile Ablagerungen; ihre Kornsummenkurven wurden in Abb. 11 farblich unterschieden: (1) Sehr feinkörniger brauner bis stellenweise schwarzer Ton (gelb), (2) gut bis mittelmäßig sortierte, braune schluffige Feinsande bis feinsandige Schluffe (blau), (3) sehr gut sortierter, gut gerundeter, weißer Feinsand (rot) und (4) sehr schlecht sortierte Schwemmsedimente (grün). Letztere setzen sich aus allen Korngrößen zusammen, von Tonen bis zu 30 cm großen Steinen. Alle vier Typen bestehen hauptsächlich aus allochthonen Komponenten, mit z.B. Quarz-, Gneis- und Schieferkomponenten. Lediglich einige vereinzelte, schlecht gerundete Marmorblöcke wurden gefunden (Sandberghalle). Aufgrund von Schwermineralanalysen konnte Seemann (1997) nachweisen, dass die meisten klastischen Sedimente des HHS dem Grobgneiskomplex zuzuordnen sind. Diese sind unter anderem im Norden und Nordosten des Eulenberges zu finden. Die Wechselserie kann als Liefergebiet zwar nicht ausgeschlossen werden, gilt aber als unwahrscheinlich (Seemann, 1997). Die feinkörnigen Klastika treten zumeist geschichtet auf, wobei Typ 1 und Typ 2 an einigen Stellen wechsellagern (Teichkluft, Hungerturmhalle). Alle analysierten Proben fielen bei Zugabe von H_2O_2 durch heftige Reaktion (Schäumen) auf, was auf hohen Gehalt organischer Substanzen schließen lässt. Die dunkle Färbung des Tons ist neben dem hohen Organik-Anteil wahrscheinlich auch auf seine Feinkörnigkeit und auf Verunreinigungen mit Mangan (Schlieren an der Höhlenwand) zurückzuführen.

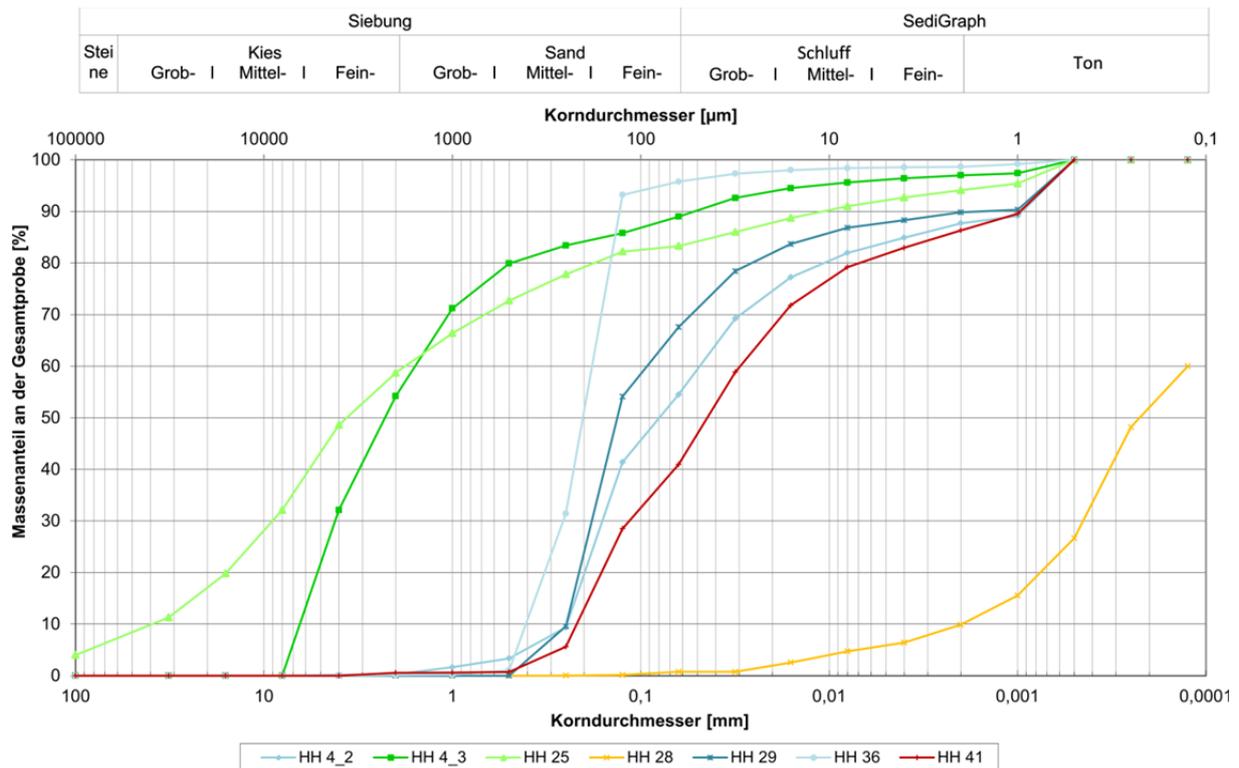


Abb. 11 Kornsummenkurve der klastischen Sedimentproben des HHS.

Fig. 11 Cumulative grain size distribution curve of the clastic sediment samples of the HHS.

Der 5. Typ klastischer Sedimente umfasst (para-)autochthone karbonatische Schutt, der insbesondere im nördlichen Teil der Hermannshöhle vorherrscht (Breccie vor der *Wettertüre*, Eingangsbereich *Kyrlelabyrinth*, *Paradieshalle*).

In weiten Teilen des HHS ist die Gangsohle rezent von einer alluvialen Sedimentschicht bedeckt, deren oft große Mächtigkeit nur in wenigen Fällen vollständig ersichtlich ist. Die Sohle der Gänge selbst ist selten aufgeschlossen, viele Passagen enden sedimentverfüllt. Reste früherer Verfüllungen mit klastischen Sedimenten aller fünf Typen sind vielerorts bis zur oder knapp unter die Decke zu finden. Relikte dieser konsolidierten Klastika ragen oftmals baldachinartig in den Raum (zwischen *Vorhalle* und *Windloch*, *Sandberghalle*). Die Ablagerungen sowie die Zwischendecken werden häufig von Sinterlagen unterteilt oder überwachsen (*Wettertüre*, *Ölberg*, *Paradieshalle*). Aus diesem Grund findet man an den Unterseiten etlicher Sinterdecken Reste der klastischen Sedimentverfüllungen. Nach der Ausräumung wurden die Sintervorsprünge und -brücken vielerorts weiter von Sinter überwachsen. Schöne Beispiele dafür sind der *Spitzenvorhang* – das Wahrzeichen der Hermannshöhle –, das *Türkenzelt*, der *Dinosaurier* (unter *Fahne mit Quaste*), der Baldachin in der *Forscherhalle*, das *Gnomentheater* oder der Baldachin in der *Paradieshalle*.

Nicht zuletzt wegen ihres Reichtums an Speläothemen ist die Hermannshöhle zur Schauhöhle ausgebaut. Wand- und Bodensinter dominieren weite Teile des HHS und bilden Tropfsteine in all ihren Ausprägungen (Stalagtiten, Stalagmiten, Sinterfahnen). Man findet Excentriques, Perlsinter, eine Sintertrommel, Bergmilch, Sinterbecken und Calcithäutchen (calcite rafts). Letztere bilden sich als dünne Kalkausfällungen an der Luft-Wasser-Grenze im Stillwassermilieu (Palmer, 2007: 278) und

sind z.B. im *Sandtunnel* und im letzten Raum unter *Taubenloch* zu finden. Auffällig ist, dass im HHS keine korrodierten Speläotheme festzustellen sind wie sie in alpinen Höhlen recht häufig sind.

5.5 Altersdatierung von Speläothemen

Es wurden 26 Proben analysiert, wobei HH17 zwei Mal gemessen wurde. Die Ergebnisse der U/Th-Datierung sind in Tab. 1 aufgetragen. Die Sinter zeigen dabei ein breites Altersspektrum: während die jüngsten Proben erst etwa 1000 Jahre alt sind, liegen die ältesten Sinter bei über 500 ka. Diese Alter fallen mit dem Limit der U/Th-Methode zusammen, daher zeigen diese Proben einen großen analytischen Fehlerbereich. Bis auf eine Probe (HH23 – gleichzeitig auch das älteste und mit dem größten Fehler behaftete Ergebnis) sind die Alter korrelierbarer Probenpunkte stratigraphisch korrekt und können daher als vertrauenswürdig angesehen werden. HH23 wird zur Zeit einer Wiederholungsmessung unterzogen, um Messfehler auszuschließen.

Einige Messungen zeigen aufgrund des hohen Detritus-Anteils der Sinter einen großen Fehler. Die betreffenden Ergebnisse sind braun hinterlegt. Alle Alter (mit Ausnahme von HH23) sind in Abb. 12 dargestellt. Eine weitere Probe (HH42) aus einer Höhe von ca. 660 m wird zurzeit gemessen.

Bemerkenswert ist, dass einige der Proben (HH32, HH33 und HH35) auf oder sogar unter dem heutigen Niveau des Ramsbaches liegen. Trotz dieser Tatsache sind alle bekannten Höhlenteile trocken. Es zeigt sich auch, dass die ältesten Proben eher in den höheren Höhlenteilen zu finden sind, wohingegen die jüngsten Proben tendenziell tiefer liegen.

An einigen Stellen des HHS (*Ölberg*, Raum vor der *Wettertüre*, *Kyrlelabyrinth*) war es möglich, schöne stratigraphische Abfolgen von Sedimentation und Sinterbildung zu beobachten. Hervorzuheben ist dabei ein Profil beim *Ölberg*, das einen Zeitraum von mindestens 200 ka abdeckt (Abb. 13). In einem paragenetischen Canyon findet man vier Sinterzwischendecken, an deren Unterseiten jeweils Reste klastischer allochthoner Sedimente haften. Zwei der Sinterdecken wurden erfolgreich datiert und dokumentieren einen Zeitraum von 100 ka. In der Zeit danach kam es zur Ausräumung der Sedimente und im Anschluss zur Bildung kleiner Stalaktiten unter der höchsten der Sinterdecken. Ein datierter Stalaktit ist weitere 100 ka jünger als die Sinterdecke, an der er gewachsen ist. Diese Daten lassen darauf schließen, dass dieser Abschnitt des HHS bereits trocken gefallen war und nur gelegentlich während extremer Flutereignisse Sediment eingebracht wurde. Dieses wurde wieder übersintert bzw. teilweise ausgeräumt.

Tab. 1 Ergebnisse der U/Th Datierung. Gelb hinterlegt sind jene Ergebnisse, die nahe am Limit der Methode liegen. Die braunen Felder markieren Ergebnisse mit großer detritischer Korrektur.

Tab. 1 Results of the U/Th dating. The yellow fields indicate results close to the limit of the method. The brown fields indicate high detrital correction.

Probe	238U [µg/g]	±	232Th [ng/g]	±	(234U/238U)	±	(230Th/238U)	±	Alter unkorrigiert [ka]	±	Alter korrigiert [ka]	±
HH 01_2	0,143	0,001	65,843	0,724	1,130	0,009	1,100	0,012	317,265	+ 14,173 - 12,0824	306,343	+ 25,5269 - 20,1382
HH 01/4	0,442	0,003	42,653	0,449	1,301	0,005	1,152	0,006	201,504	2,814	199,661	3,449
HH 01/5	0,362	0,002	56,434	0,623	1,363	0,008	0,913	0,006	116,108	1,257	113,042	1,778
HH 05	0,766	0,005	67,583	0,957	1,162	0,003	0,926	0,010	164,817	3,897	162,773	3,915
HH 06	0,158	0,001	0,161	0,002	1,227	0,006	0,768	0,006	103,060	1,616	103,037	1,636
HH 07	0,139	0,001	0,540	0,006	1,034	0,002	1,038	0,005	512,085	+ 89,565 - 48,478	511,987	+ 83,425 - 48,0865
HH 08	0,127	0,001	0,492	0,005	1,034	0,003	1,036	0,006	493,032	+ 105,6593 - 53,6173	492,934	+ 103,4591 - 53,4422
HH 09	0,111	0,001	10,419	0,113	1,219	0,005	0,067	0,012	8,409	0,230	6,176	1,145
HH 10	0,149	0,001	57,420	0,620	1,108	0,008	1,089	0,011	340,378	+ 24,4389 - 19,5046	331,125	+ 30,9532 - 23,8943
HH 11	0,195	0,001	95,983	1,005	1,199	0,016	0,985	0,007	183,603	3,672	172,035	+ 7,2324 - 6,3523
HH 12	0,202	0,001	213,309	2,453	1,029	0,008	0,937	0,015	289,748	+ 13,4367 - 11,2651	256,072	+ 21,9277 - 17,6313
HH 13	0,181	0,001	126,007	1,517	1,243	0,028	0,663	0,038	98,008	1,451	80,817	+ 7,6955 - 6,9529
HH 14	0,151	0,001	3,843	0,043	1,177	0,006	0,012	0,003	1,722	0,100	1,096	0,335
HH 15	0,202	0,002	40,695	0,453	1,163	0,008	0,759	0,009	116,342	1,824	111,456	2,614
HH 16	0,298	0,002	24,429	0,290	1,106	0,002	0,767	0,006	127,479	1,783	125,407	1,929
HH 17	0,163	0,001	78,949	0,844	1,092	0,010	1,075	0,011	356,034	+ 33,0611 - 25,3523	343,931	+ 44,0997 - 30,7115
HH 17	0,127	0,001	54,715	0,586	1,081	0,008	1,072	0,011	381,833	+ 38,1695 - 28,5663	371,103	+ 46,3718 - 33,6081
HH 20	0,148	0,001	25,928	0,285	1,178	0,007	0,802	0,008	123,499	1,986	119,379	2,499
HH 21	0,175	0,002	5,114	0,055	1,160	0,008	1,024	0,009	210,081	6,912	209,430	+ 7,382 - 6,8421
HH 22	0,170	0,002	8,385	0,088	1,145	0,010	1,110	0,011	296,147	+ 23,0596 - 19,5851	295,076	+ 23,1828 - 19,0609
HH 23	0,167	0,001	115,780	1,244	1,081	0,012	1,116	0,016	775,297	212,254	761,925	230,4409
HH 24	0,177	0,001	2,327	0,024	1,136	0,004	1,087	0,007	280,214	+ 9,3148 - 8,6566	279,924	+ 9,4064 - 8,6848
HH 32	0,484	0,003	214,933	2,372	1,185	0,012	0,828	0,013	135,792	1,827	124,962	4,450
HH 33	0,185	0,001	24,418	0,268	1,220	0,005	0,830	0,008	121,386	1,924	118,430	2,222
HH 35	0,127	0,001	37,539	0,410	0,975	0,003	0,168	0,035	29,697	0,555	20,624	4,844
HH 38	0,856	0,005	2,852	0,029	1,403	0,002	1,452	0,005	319,301	5,688	319,253	5,803
HH 39	0,288	0,002	1,841	0,021	1,097	0,002	1,124	0,006	495,632	+ 68,1523 - 41,5098	495,500	+ 67,4292 - 41,6948

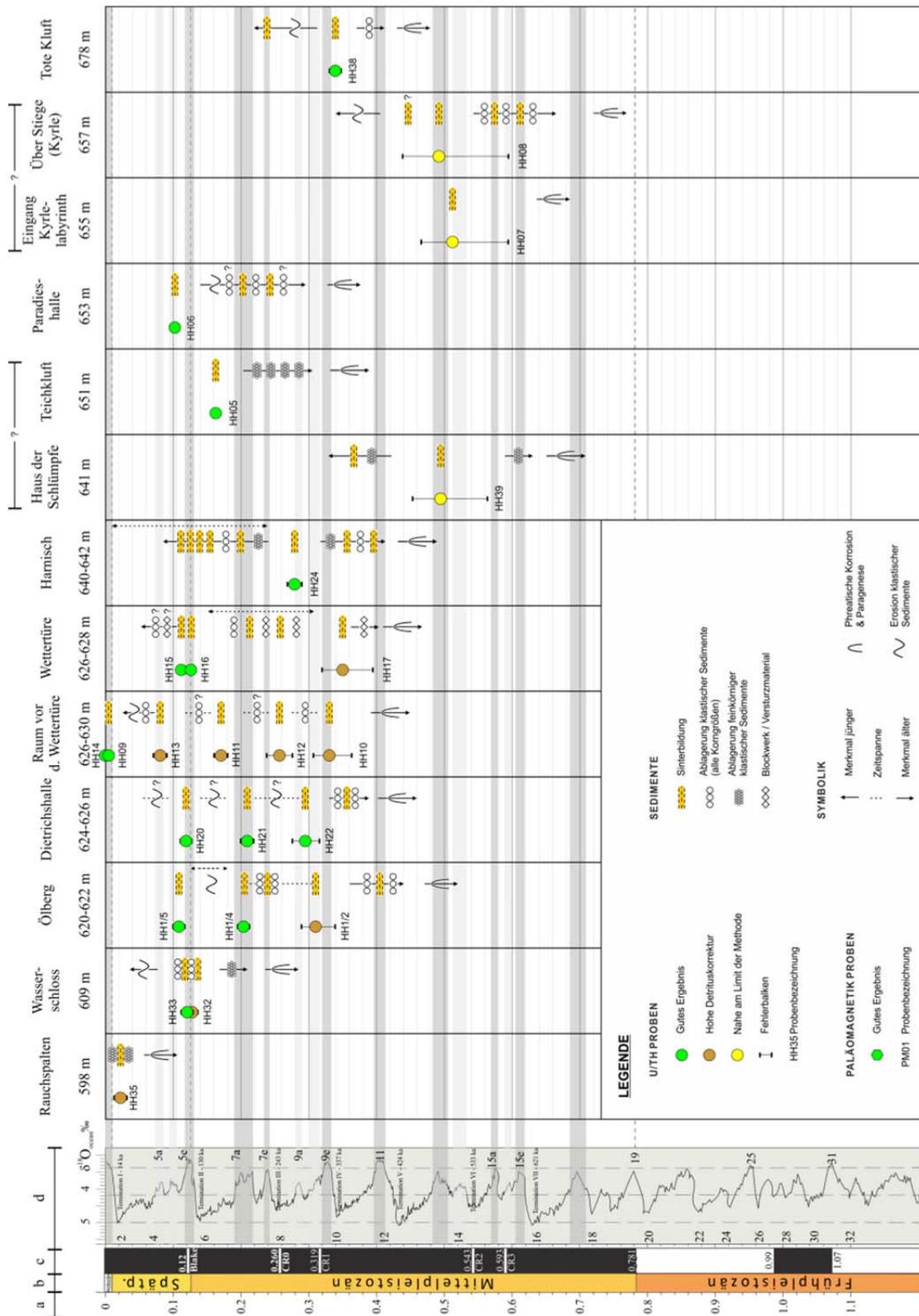


Abb. 12 Überblick über die gewonnenen Speläothem-Alter in Bezug auf die stratigraphische Abfolge und Relation zu Sedimentations- bzw. Erosionsereignissen am Probenahmeort. Legende: a: Zeit in Ma vor heute. b: Stratigraphische Stufe. c: Paläomagnetik (schwarz: normal; weiß: revers). d: Marine Isotopenstufe (MIS) – die Kurve beschreibt die Sauerstoffisotopie aus Eisbohrkernen. Gerade Zahlen zeigen Kaltzeiten, ungerade zeigen Warmzeiten an. Graphik teilweise erstellt mit TimeScale Creator (2013), verändert nach Gradstein et. al (2012).

Fig. 12 Overview of the results of the age dating of speleothems in relation to the stratigraphic succession at the sample site. Legend: a: Time in Ma before present. b: Stratigraphic stage. c: Paleomagnetic record (black: normal; white: reverse). d: Marine Isotope Stage (MIS) – the curve shows the oxygen isotope record from ice cores. Even numbers indicate cold, uneven numbers indicate warm periods. Chart partly done with TimeScale Creator (2013), modified after Gradstein et. al (2012).

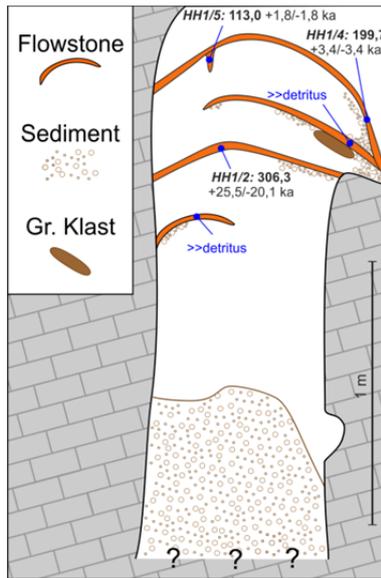


Abb. 13 Sedimentprofil im Ölberg (generalisiert). In einem Zeitraum von 200 ka kam es zu episodischen Flutereignissen, die klastisches Sediment einbrachten, das anschließend übersintert wurde.

Fig. 13 Sediment profile located at Ölberg. Within a time span of 200 ka episodic floodwaters brought in sediment that was later covered with flowstone.

5.6 Stabile Isotopen der Speläotheme

Die Verhältnisse stabiler Isotopen (in der Regel Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopen) in Speläothemen können Hinweise auf rezente oder ehemalige chemische Prozesse und dadurch auf die Bildungsbedingungen eines Materials geben (z.B. McDermott, 2004; Riechelmann et al., 2012). $\delta^{13}\text{C}$ -Werte spiegeln zumeist die Verhältnisse des überlagernden Bodens wieder. Nicht alterierte Kalke und Dolomite haben normalerweise leicht positive $\delta^{13}\text{C}$ -Werte, Boden hat typischerweise sehr niedrige. Die Isotopen von Sinterausfällungen plotten daher meist zwischen den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten des Boden und des Muttergesteins. Diese Entwicklung ist auch in den Speläothemen des HHS deutlich ersichtlich (Abb. 14). Während der Marmor $\delta^{13}\text{C}$ Werte zwischen +2 und -2 ‰ zeigt, sind die meisten Speläothemenproben im deutlich negativen Bereich angesiedelt. Es gab also zur Zeit ihrer Ausfällung Bodenbildung und Vegetation im hydrologischen Einzugsgebiet des HSS.

Um Sauerstoffisotopenwerte interpretieren und zuverlässige paläoklimatische Aussagen treffen zu können, muss eine Reihe von Faktoren berücksichtigt werden. Diese beinhalten die initiale Isotopie des Niederschlagswassers (abhängig von Quelle, Transportweg, Seehöhe sowie Niederschlagsmenge) sowie der Verweilzeit des Sickerwassers im Karstsystem (z.B. Lachniet, 2009; Dreybrodt, 2011; Dreybrodt & Scholz, 2011; Johnston et al., 2013). Im Fall des HHS sind diese Parameter nicht bekannt und wurden im Zuge dieser Studie auch nicht ermittelt. Es kann also lediglich eine sehr allgemeine Aussage getroffen werden. Grundsätzlich gilt für Mitteleuropa: Je höher die Temperatur zur Zeit der Sinterbildung, desto höher die $\delta^{18}\text{O}$ Werte der Speläotheme (C. Spötl, pers. Mitt., 2013). Für die recht homogen verteilten Proben des HHS mit einem $\delta^{18}\text{O}$ -Minimum von -10,7 ‰ scheint sich daher um warmzeitliche Wässer zu handeln (vgl. z.B. Meyer et al., 2011).

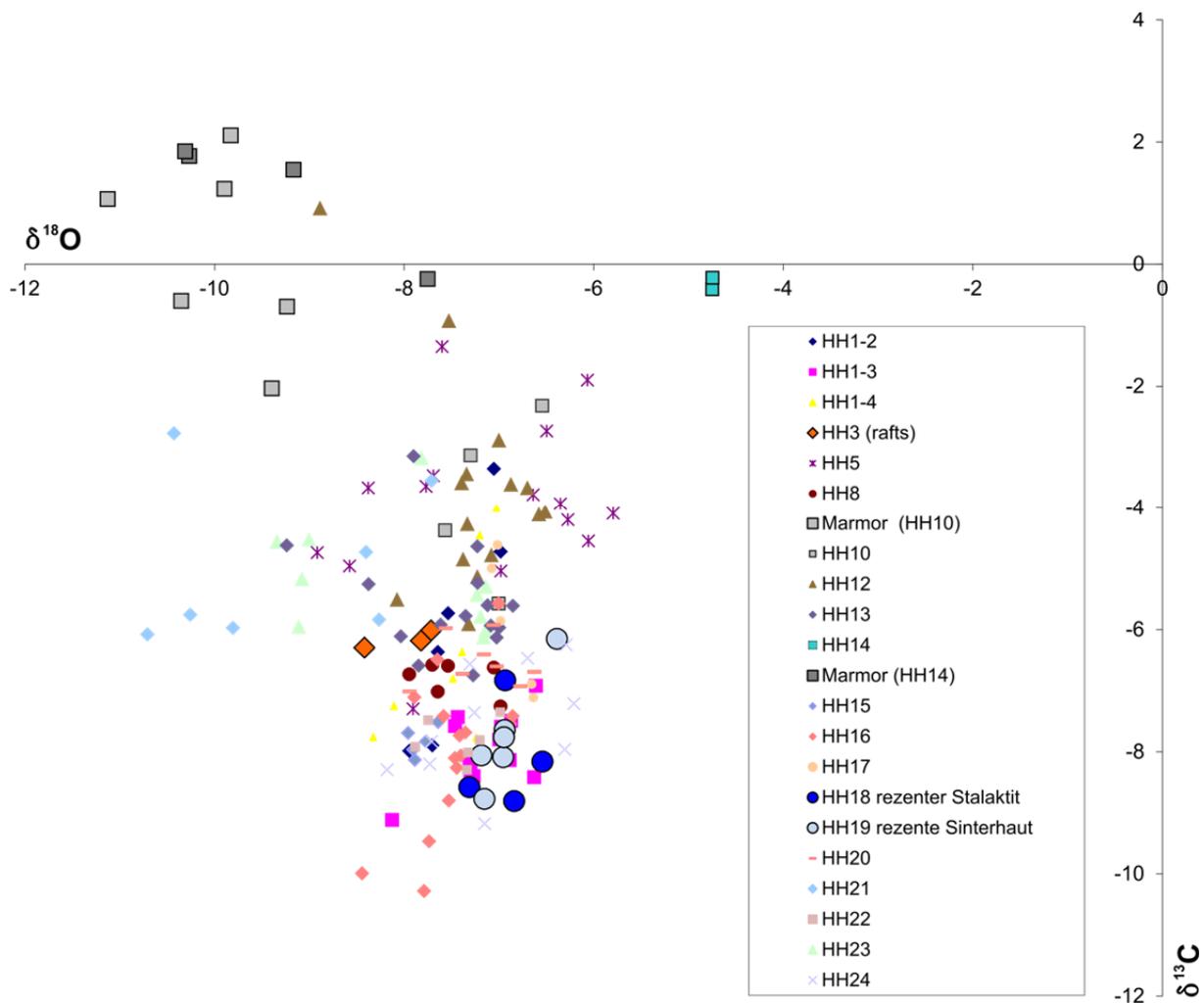


Abb. 14 Verteilung der stabilen Isotope der entnommenen Speläothemproben.

Fig. 14 Distribution of stable isotopes of the speleothem samples.

6 Diskussion

6.1 Geologische und strukturelle Schlussfolgerungen

Das HHS befindet sich an der Grenze zwischen triassischen Kalkmarmor und nicht-verkarstungsfähigen Gesteinen und wurde vermutlich vom Ramsbach gespeist. Dieser entspringt in den nahegelegenen Gneisen und Schiefen des Semmeringsystems und führt daher untersättigtes Wasser (Hartmann et al., 1997; Abb. 15). Es handelt sich beim HHS also um ein Kontaktkarstregime. Bestätigend dafür werden zwei Dolinen gewertet, die im Norden des Eulenberges inmitten von Schiefergeröllen gefunden wurden und die als Kontakt des Karbonats zum Grobgneiskomplex aufgefasst werden. Aufgrund des allochthonen Sedimentinhalts des HHS kann davon ausgegangen werden, dass das Einzugsgebiet in früheren Zeiten ebenfalls von sauren Gesteinen geprägt war. Ob es dem heutigen Areal entsprach oder nicht, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden. Seemann (1997) zufolge kommen die im Nordosten des HHS gelegenen Gesteine des Grobgneiskomplexes am ehesten als Sedimentursprung infrage.

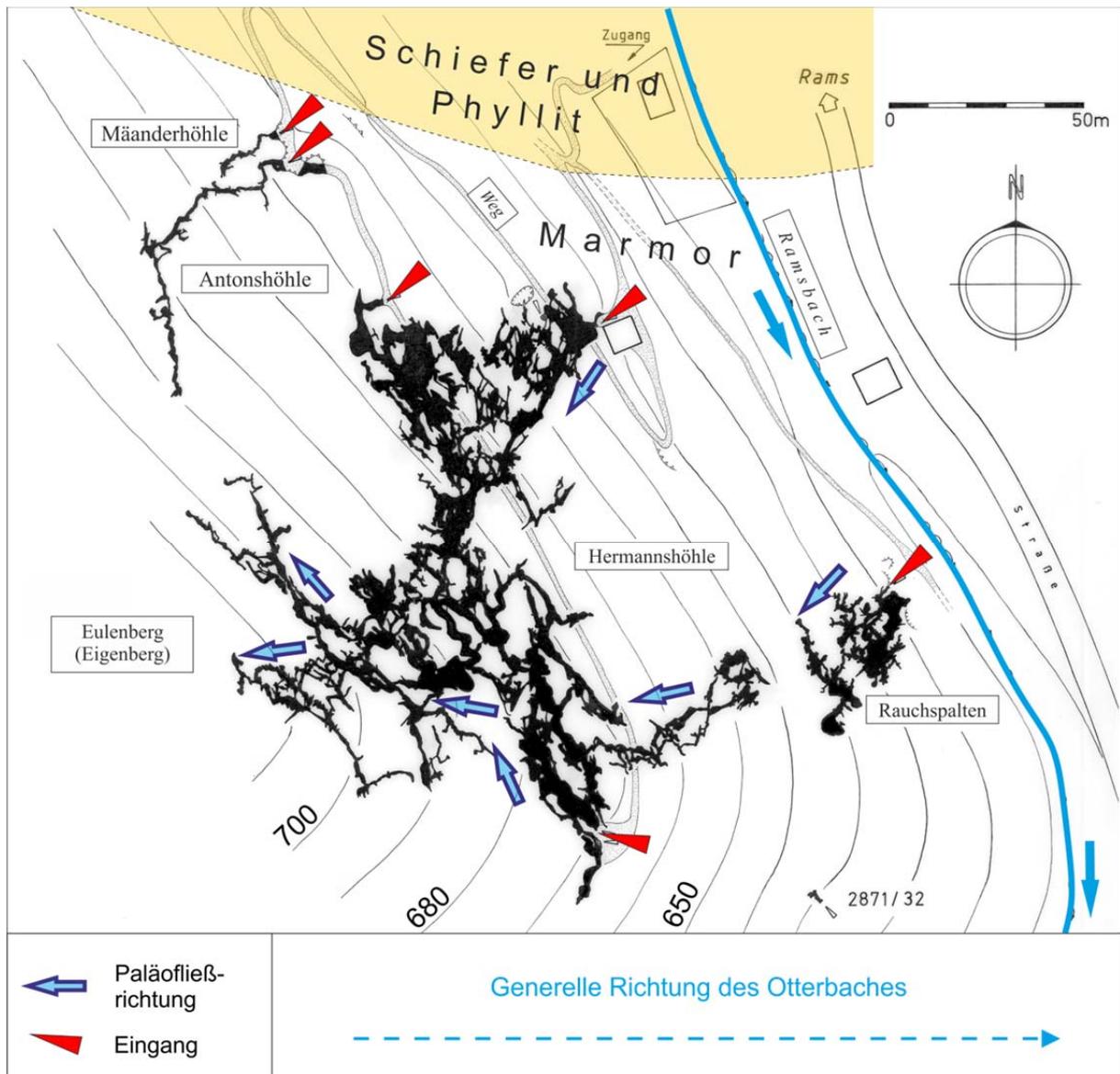


Abb. 15 Übersichtsplan des HHS und seiner Umgebung (verändert n. Herrmann, 1989). Hervorzuheben ist die Grenze zwischen verkarstungsfähigem Karbonat und nicht verkarstungsfähigem Kristallin. Die Pfeile zeigen die generelle westwärts gegen das Berginnere gerichtete Paläofließrichtung (Detailkarte siehe Abb. 5).

Fig. 15 Topographic overview map of the cave and its surroundings (edited after Herrmann 1989). Note the border between karstic carbonate and non-karstic crystalline. The arrows indicate a westwards flow, pointing towards the mountain (for detailed map see Fig. 5).

Im Zuge früherer Untersuchungen wurde der Kalkmarmor des Eulenberges als schwach metamorph (untere Grünschieferfazies) eingestuft (Faupl, 1970; Seemann, 1997). Seine intensive Bänderung interpretierten Kempe und Mrkos (1991) als dreiphasiges Faltungseignis. Tatsächlich zeigt die Bänderung zentimetergroße Isoklinalfalten, diese werden von den Autoren dieser Studie jedoch als syntektonische mylonitische Isoklinalfalten interpretiert und keinem späteren Ereignis zugeordnet. Die metamorphe Überprägung wird daher dem eoalpidischen Orogeneseereignis zugeordnet.

Für die Entwicklung des HHS scheint die ausgeprägte tektonische Beanspruchung des Marmors und die daraus resultierende Dichte wasserwirksamer Fugen eine wesentliche Rolle gespielt zu haben. Müller (1994) zufolge befindet sich das HHS genau an dem NW-SE verlaufenden Randbruch des

Kirchberger Pull-Apart-Beckens. Obwohl dies mit der Interpretation der Tertiären Sedimente des Kirchberger Beckens (Ebner et al., 1991) übereinstimmt, konnte ein solches Lineament weder in der Oberflächenmorphologie (Laserscan) noch während der geologisch-morphologischen Kartierung ausgemacht werden. Auch innerhalb des HHS konnte der starken Zerlegung des Marmors zum Trotz eine Störung dieser Größenordnung, die Kataklastite und einen zumindest vertikal signifikanten Versatz bedingen müsste, nicht nachgewiesen werden. Dennoch lassen sich drei bevorzugte Störungsrichtungen ausmachen. Die beiden bedeutenderen streichen NW-SE bzw. NNE-SSW und fallen steil nach NE bzw. ESE ein. Sie zeigen geringen dextralen Horizontalversatz und wurden bereits von Müller (1994) erkannt und beschrieben. Die dritte bevorzugte Störungsrichtung orientiert sich an der Foliation des Marmors (Kempe und Mrkos, 1991). Sie ist nahezu horizontal mit schwachem Fallen Richtung WSW und zeigt nur selten ein sprödes (abschiebendes) Linear.

Gemeinsam spannen diese drei Richtungen das Gangnetz des HHS auf. Auffällig ist dabei, dass sich im Wesentlichen die NW-SE verlaufenden Gänge eher zu Mäandern entwickelten während die NNE-SSW streichenden eher geradlinig verlaufen aufspannen. Letztere zeigen im Allgemeinen auch eine geringere Breite als die NW-SE streichenden Gänge.

Hinweise auf einen Zusammenhang mit der sinistralen Mur-Mürz-Störung, einer der größten Seitenverschiebungen Österreichs, konnten weder im HHS noch in der näheren Umgebung gefunden werden.

Wie bereits zuvor erwähnt handelt es sich bei den Störungsflächen nicht um spröde Harnische sondern um Stylolith-Striae-Flächen. Es existiert keine den Autoren bekannte Literatur darüber, wie sich solche Drucklösungsflächen als wasserwirksame Fugen im Vergleich zu „normalen“ Störungen verhalten. Daher kann über ihre speläogenetische Relevanz keine Aussage getroffen werden.

6.2 Gliederung des Höhlensystems

Kempe und Mrkos (1991) teilten die Hermannshöhle in fünf, ihnen zufolge genetisch voneinander unabhängige Bereiche, die von Mrkos (1997) noch einmal weiter untergliedert wurden. Die sechs resultierenden Abschnitte gliedern sich in (1) das „Große Canyonsystem“ (zwischen *Erlenschlucht*, *Großem Dom* und *Fürstenhalle*), (2) das „Horizontalsystem“ (*Vorhalle*, *Sandberghalle* und *Barbarastollen*), (3) das „Kleine Canyonsystem“ (*Steiniger Weg*, *Perlsinterkluft*, *Hungerturmlabyrinth* und *Krokodilgang*), (4) die *Dietrichshalle* und ihre Umgebung, (5) *Ölberg* und *Irrgang* und (6) das *Kyrlelabyrinth*. Es wird dabei aber nicht erwähnt, nach welchen Kriterien die einzelnen Bereiche voneinander unterschieden wurden.

Es ist unverkennbar, dass sich das „Große Canyonsystem“ vom Rest des HHS abhebt: Kein anderer Höhlenabschnitt bildete so prägnante, enge sinusförmige Mäanderschlingen aus. Es ist der Teil des HHS mit der größten bekannten Raumhöhe und die breitesten Hallen (ev. mit Ausnahme der *Riesenschlucht* im *Kyrlelabyrinth*) befinden sich hier. Auffällig ist, dass entlang dieses Canyons nur wenige Verschnittpunkte mit anderen Gängen existieren und dass so gut wie keine (Ausnahme: *Wolfschlucht*) Fließfacetten gefunden werden.

Die Abgrenzung der anderen oben genannten Bereiche gegeneinander kann jedoch nicht nachvollzogen werden. Der flache Boden des „Horizontalsystem“ ist ein Sedimentboden, der teilweise

anthropogen verändert wurde (betoniert) und daher nicht mit der Höhlengenesse in Verbindung gebracht werden kann. Das „Kleine Canyonsystem“ unterscheidet sich morphologisch kaum vom Rest des HHS. Eine genetische Eigenständigkeit dieses Abschnittes ist infrage zu stellen. Weshalb die Dietrichshalle und das Kyrlelabyrinth je als individuelles System ausgewiesen wurden, wurde in keiner der oben genannten Literatur begründet. Ölberg und Irrgang wurden zu einer genetischen Einheit zusammengefasst, obwohl Kempe und Mrkos (1991) den Ölberg für älter halten.

Hochschorner (1997) unterscheidet zwischen phreatisch entstandenen Kluftgängen („Horizontalsystem“, *Dietrichshalle*, *Hungerturmlabyrinth*, *Ölberg* mit *Irrgang*, die Verbindungsteile ins *Kyrlelabyrinth* sowie die Rauchspalten) und hohen, canyonartig mäandrierenden Gängen (*Erlenschlucht*, *Tote Kluft*, *Hohe Kluft*, *Wolfsschlucht* und *Steiniger Weg*). Es zeigt sich, dass diese Einteilung grundsätzlich nachvollziehbar ist, doch einiger kleinerer Veränderungen bedarf. Zum einen soll an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben werden, dass fast alle Gänge des HHS als Canyons entwickelt sind. Sie unterscheiden sich im Grunde lediglich in der Art und der Stärke des Mäandrierens. Zum anderen macht es durchaus Sinn, das zuvor beschriebene „Große Canyonsystem“ von den anderen Höhlenbereichen abzutrennen.

Aufgrund seiner morphologischen Charakteristika, seiner Kleinräumigkeit und der strukturellen Eigenschaften des Marmors werden die Höhlen des Eulenberges als genetische Einheit bezeichnet. Daher soll das HHS als Gesamtes betrachtet werden und es stellt sich die Frage nach der Sinnhaftigkeit einer weiteren Unterteilung. Weder die morphologischen Befunde noch die Altersdatierung brachten Hinweise auf eine genetische Sukzession der unterschiedlichen Bereiche. Dennoch ist nicht von der Hand zu weisen, dass gewisse Abschnitte des HHS sich aufgrund ihrer Morphologie deutlich von anderen unterscheiden. Es ist durchaus möglich, dass diese Divergenzen lediglich sekundäre Merkmale (Überprägungen; 3D-Schnitteffekte der Gänge aufgrund ihrer Sedimentverfüllung) widerspiegeln, doch könnten sie auch auf verschiedene Geneseprozesse (Dauer der Raumerweiterung; Raumlage der Initialfuge; Intensität der Auswirkung des Sediments auf die Hohlraumerweiterung) zurückzuführen sein. Daher sollten die Unterschiede dennoch erwähnt werden. Eine Einteilung des HHS nach genetischen und morphologischen Kriterien könnte somit aussehen wie folgt:

1. Das „Große Canyonsystem“ (*Forscherhalle*, *Erlenschlucht*, *Niagarafall*, *Felsendom*, *Hohe Kluft*, *Großer Dom*, *Teichkluft*). Es zeichnet sich durch seine große Raumhöhe und stark ausgeprägte Sinusmäander aus. Es gibt kaum Schlote, relativ wenige Bypässe und auch keine Fließfacetten. Da sich solche Mäander eher an flachen Initialöffnungen entwickeln (Auler, 1999), kann davon ausgegangen werden, dass es sich in diesem Fall initial um eine foliationsparallele Störung handelte.
2. Hungerturmlabyrinth, Kyrlelabyrinth. Großteils stellt man auch hier ein Mäandrieren der Gänge fest, doch ist es weit nicht so ausgeprägt. Die Gänge ordnen sich als echtes dreidimensionales Labyrinth an, es gibt viele Schlote und viele Bypässe. Beide Höhlenteile weisen einen enormen Sinterreichtum auf.
3. Mäanderhöhle, Antonshöhle, Lehmkluftlabyrinth und Traumland. Die Gänge sind schmal, eher geradlinig und großteils netzwerkartig angeordnet.

4. Sandberghalle, Rauchspalten und Irrgang. Sie sind stark sedimentverfüllt mit vielen, teilweise bis ins Sediment reichenden Pendants und folgen keiner erkennbaren Störungsrichtung.
5. Ölberg, Sintertunnel, Steiniger Weg, Sandtunnel, Rutschgänge, Tote Kluft. Bis zu einem gewissen Grad mäandrierende Gänge, deren markantes Merkmal ihr vergleichsweise steiles Einfallen ist. Dabei wurden die Decken der Gänge betrachtet und nicht die allgegenwärtigen Sedimentverfüllungen.
6. Barbarastollen, Dietrichshalle, Verbindungsteil zum Großen Dom. Vermutlich standen diese Höhlenteile mit dem „großen Canyonsystem“ in Verbindung, sie zeigen jedoch keine Mäanderschlingen.

Hochschorner (1997) zufolge weisen die hohen, canyonartig mäandrierenden Gänge einen „eindrucksvollen vadosen Formenschatz“ auf, ergaben aber aufgrund ihrer zahlreichen phreatischen Kleinformen und ihrer Gefälleverhältnisse kein klares Bild hinsichtlich ihrer Altersstellung und Genese. Fink (1974) spricht in diesem Zusammenhang von „Canyons mit gegensinnigem Gefälle“. Im Zuge dieser Studie konnten keine Formen vadoser Speläogenese nachgewiesen (vadose Canyons oder Schächte bzw. Schlüsseloch-Profile) werden. Stattdessen findet man nahezu in allen Höhlenteilen eine Vielzahl verschiedener phreatischer Kleinformen. Ein durchaus schlüssiges Konzept, die zuvor genannte Problematik zu erklären, ist das der Paragenese. Dieses Konzept beschreibt die aufwärts gerichtete Lösung verkarstungsfähigen Gesteins aufgrund der Ablagerung nicht-verkarstungsfähiger Sedimente (Lauritzen & Lundberg, 2000; Plamer, 2007; Farrant & Smart, 2011; Plan, 2013). Der immense Reichtum des HHS an Sedimentresten und -verfüllungen wurden durchwegs auch von anderen Autoren beschrieben (Kempe und Mrkos, 1991; Seemann 1997), ihre Bedeutung für die Speläogenese war zum damaligen Zeitpunkt jedoch nicht bekannt.

6.3 Morphologie

Betrachtet man das breite Spektrum an Gangquerschnitten und Kleinformen im HHS (siehe 5.3.2) so zeigt sich, dass paragenetische Überprägung eindeutig das dominanteste morphologische Merkmal ist. Die im HHS häufigen Canyons sind somit gut erklärbar, genauso wie der immense Reichtum an Pendants und Lösungskehlen. Die Sohle fast aller Passagen ist rezent mit Sediment bedeckt und das erklärt auch, warum kaum Initialfugen gefunden werden konnten: Sie liegen noch heute unter den Sedimentverfüllungen begraben (Beispiel Abb. 16).

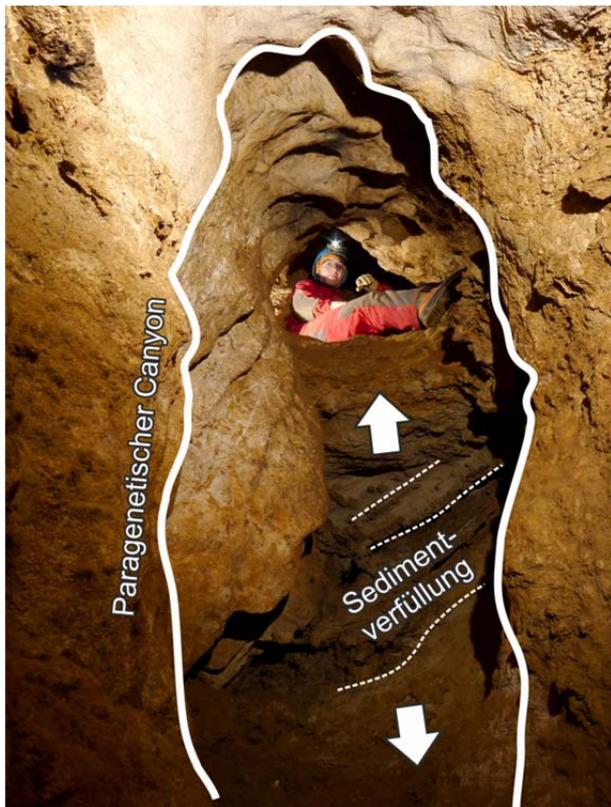


Abb. 16 Eine Sedimentwand veranschaulicht die Bildung eines durch aufwärts gerichtete Lösung geformten paragenetischen Canyon. Die Sohle ist noch immer mit klastischem Sediment bedeckt. Von hier stammt die Sedimentprobe HH41.

Fig. 16 Upwards solution of the host rock created this paragenetic canyon. The floor is still covered with clastic sediment. The sediment sample HH41 was taken at this very site.

Somit steht die phreatische Entwicklung des HHS auch nicht wie bei früheren Autoren (z.B. Mrkos, 1997) im Widerspruch zu den es beherrschenden Raumformen. Die meisten sind auf paragenetische Prozesse zurückzuführen. Interessanter Weise sind die paragenetischen Formen wie auch der ausgeprägte labyrinthische Charakter des HHS nicht auf bestimmte Bereiche oder Größenordnungen beschränkt, sondern treten im gesamte System auf. Fast alle Profile sind paragenetisch nach oben erweitert, was ihnen oftmals Canyoncharakter verleiht. Man findet sie aber nicht nur als Gangprofil von über 10 m Höhe (*Hohe Kluft* – 16 m bekannte Raumhöhe) sondern auch mit Höhen von nur wenigen Zentimetern (Abb. 17). Viele überhängende Wand- und Deckenbereiche zeigen paragenetische Deckenkanäle und anastomotische Deckenkarren (Abb. 18). In einigen Bereichen (*Großer Dom*, *Wolfschlucht*, *Vorhalle*) finden sich paragenetische Lösungsrampen, die ehemalige Sedimentoberkanten anzeigen. Einige kleinräumige Verbindungsgänge können als paragenetische Bypässe interpretiert werden (z.B. Deckenbereich der *Hohen Kluft*, Stiege oberhalb *Dietrichhalle*).

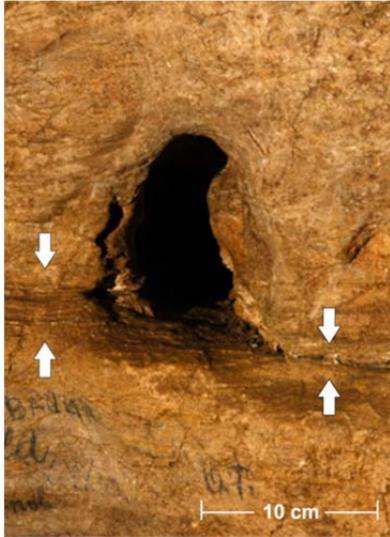


Abb. 17 Paragenetischer Canyon in der *Fürstenhalle*. Die Initialfuge ist mit Pfeilen markiert. Foto: L. Plan

Fig. 17 Paragenetic canyon in *Fürstenhalle*. The initial gap is pointed at by arrows. Picture: L. Plan



Abb. 18 Anastomische Deckenkanäle aus dem mittleren Abschnitt der *Hohen Klufft*. Foto: L. Plan

Fig. 18 Anastomoic ceiling channel observed in the middle part of *Hohe Klufft*. Picture: L. Plan

Kempe und Mrkos (1991) beschrieben eine Reihe von Laughohlkehlen (*Vorhalle*, *Sandberghalle*, *Ölberg*), Laugfacetten (*Hohe Klufft*, *Fürstenhalle*, *Wildschützenhalle*, *Taubenloch*, *Ölberg*) und eine Laugdecke (*Vorhalle*). Sie interpretieren diese Hohlkehlen dabei durchgehend als ehemalige Wasserstände und folgern daraus auf die Speläogenese der Hermannshöhle. Ihrer Auffassung nach umfasst diese eine ausgeprägte vadose Phase mit sich episodisch eintiefendem Karstwasserspiegel und eine spätere phreatische Phase, in der die Fließfacetten sowie die Kolke und Pendants gebildet wurden. Bereits Hochschorner (1997) wertete das „ausgeprägte Gefälle“, das „bei zahlreichen Hohlkehlen im eingangsnahen Bereich bis zu *Dietrichshalle* nachgewiesen werden konnte“ als Indiz dafür, dass diese Formen „vermutlich nicht nur Ausdruck der Korrosion an Gewässeroberflächen, sondern auch auf laterale Korrosion in den Sedimenten der Gangverfüllungen zurückzuführen“ seien.

Im Zuge dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass fast alle Lösungskehlen des HHS auf ehemalige Sedimentverfüllungen zurückzuführen sind und keine Wasserstände anzeigen. Es sind paragenetische Lösungsrampen die in einem phreatischen und keinem epiphreatischen oder vadosen Milieu entstanden.

Die aus der *Vorhalle* beschriebene ebene Decke wird von Kempe & Mrkos (1991) als Laugdecke interpretiert. Laugdecken bilden häufig gemeinsam mit Laugfacetten (zum Zentrum eines Ganges geneigte Wandflächen) ein dreieckiges Gangprofil. Solche Formen sind auf Dichtegradienten während der phreatischen Phase der Höhlenentwicklung zurückzuführen (Kempe, 1972; Kempe et al., 1975; Palmer, 2007: 154). Geneigte Wandflächen konnten beobachtet werden, dass es sich dabei um Laugfacetten handelt kann von den Autoren nicht bestätigt werden.

Hochschorner (1997) zufolge handelt es sich bei der flachen Decke der *Vorhalle* um einen ehemaligen Wasserstand, der knapp unter der Höhlendecke zu einer Raumerweiterung führte. Tatsächlich fällt

diese aber kontinuierlich bergwärts ab, was zu einem Widerspruch führt. Des Weiteren findet man an der Decke Fließfacetten, die genau wie auch die Hohlkehlen zwischen *Vorhalle* und *Dietrichshalle* eine Fließrichtung bergwärts anzeigen.

Die bisher beschriebenen Gangprofile und Höhlenformen sprechen für eine lange andauernde phreatische Phase der Speläogenese. Sowohl Sedimentation als auch Erosion der klastischen Sedimente scheinen kurze Ereignisse zu sein, da im Gegensatz zu vielen alpinen Höhlen keine Spuren von Korrosion oder Beschädigung an den Speläothemen festgestellt werden konnten. Es handelt sich also vermutlich eher um Katastrophenereignisse mit impulsartigem Sedimentinput und nicht um eine lange andauernde Phasen des Wiederanstieges des Karstwasserspiegels. Der einzige nachgewiesene ehemalige Wasserstand im *Sandtunnel* – einem der tiefsten Teile des HHS – kann auch mit einem lokalen Rückstau z.B. durch Sedimentverschluss erklärt werden.

Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass es in der Vergangenheit mehrere Phasen der epiphreatischen oder vadosen korrosiven Hohlraumerweiterung gegeben hat – so könnten zum Beispiel ältere Speläotheme dadurch vollständig zerstört worden sein – doch können heute keine Spuren mehr davon nachgewiesen werden. Sicher belegen lässt sich im HHS lediglich eine phreatische Phase der aktiven Hohlraumerweiterung. Dass FF über ca. 645 m Seehöhe weitgehend fehlen könnte als Hinweis gedeutet werden dass der Karstwasserspiegel in dieser Höhe relativ lange konstant war und die Teile darüber schon deutlich länger trocken liegen und die FF durch Kondenswasserkorrosion überprägt wurden.

Das auffallendste Merkmal des HHS ist seine extrem labyrinthische Anlage. Wieso entwickelte sich kein bevorzugter Wasserweg, sondern stattdessen ein dicht verflochtenes Netzwerk an Korridoren mit vielen über- und unterlagernden Wegigkeiten und Gänge mehrerer Größenordnungen?

Viele hypogene Höhlen sind als dreidimensionale Labyrinth entwickelt (Palmer, 2007: 197; Palmer, 2011). Auch Feeder-ähnliche Strukturen und wenige Kuppeln (*Taubenloch*, *Großer Dom*, *Niagarafall*) im HHS lassen auf den ersten Blick auf hypogene Prozesse schließen. Erstere lassen sich allerdings ebenfalls durch Paragenese gut erklären und auch Kuppeln können durch epigene Prozesse entstehen. Andere Hinweise auf eine hypogene Entstehung fehlen. Es gibt keine charakteristischen Kleinformen (z.B. Lösungstaschen an den Wänden) oder Mineralausfällungen. Weiters sind den Autoren keine Anzeichen für hydrothermale Aktivitäten oder H₂S- bzw. CO₂-reiche Quellen in der Region bekannt. Dafür gibt es viele Hinweise auf eine epigene Entstehung, wie allochthone Sedimente, hohe Fließgeschwindigkeiten sowie die „normale“ Signaturen der stabilen Isotope der Sinter und an der Gesteinsoberfläche. Zwar ist nicht auszuschließen, dass die primäre Anlage des HHS auf hypogene Prozesse zurückzuführen ist, doch konnte kein eindeutiger Beweis gefunden werden. Für die Entwicklung des (bekannten) HHS spielten sie daher vermutlich – wenn überhaupt – eine untergeordnete Rolle.

Der Grund für die ungewöhnlich labyrinthische Anlage liegt vermutlich im Zusammenwirken mehrerer Faktoren. Entscheidend ist, dass der sogenannte „breakthrough“ unterbunden oder verschoben wird. Dieser beschreibt den Zeitpunkt in der Anfangsphase der phreatischen Höhlenentwicklung, ab dem nicht mehr alle wasserwegsamen Fugen gleichermaßen, sondern eine der Protoröhren schneller erweitert wird. Diese „Siegerröhre“ entzieht durch ihren erhöhten Durchfluss

den konkurrierenden Röhren das Wasser und damit die Möglichkeit zur Erweiterung (Ford & Williams, 1989).

Die erste Voraussetzung für ein labyrinthisches System ist also das Vorhandensein mehrerer Protöröhren. Um diese ausbilden zu können, spielt die Inklination der Initialfuge eine entscheidende Rolle. Steile Flächen produzieren zumeist nur einzelne Protöröhren, während sich entlang flacher (oft schichtparalleler) Wegigkeiten bis etwa 5° Anastomosen bilden (Ford & Ewers, 1978; Auler, 1999). Damit sich mehrere Gänge gleichzeitig entwickeln können, müssen sie alle etwa mit derselben Rate erweitert werden, unabhängig von ihrer Größe oder dem Durchfluss. Generell gibt es dafür mehrere Möglichkeiten (Palmer, 2007: 197): (1) Es müssen große Durchflussmengen entlang vieler alternierender Wasserwege herrschen. (2) Der hydraulische Gradient muss über lange Zeiträume steil sein. (3) Die Distanz durch das lösungsfähige Gestein muss kurz sein. (4) Alle großen Öffnungen werden gleichermaßen gespeist (Palmer, 2007: 197). Auler (1999) fügt hinzu, dass die aktiv konkurrierenden Wasserwege aufgrund von Sedimentation bereits in ihrer Anfangsphase paragenetisch erweitert werden können. Selbst wenn sich eine „Siegerröhre“ ausbildet, die dann das System fast zur Gänze entwässert, kann sie wieder verlegt werden und andere Gänge werden stattdessen erweitert. Es stellt sich somit innerhalb des Systems ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Sedimentation, Durchfluss und Lösung ein.

Das HHS erfüllt nicht nur eine, sondern fast alle genannten Bedingungen die zu einer labyrinthischen Anlage führen. Die Marmorscholle des Eulenberges ist klein, weshalb das Wasser nur kurze Distanzen durch das lösungsfähige Gestein zurücklegen musste. Der im Verhältnis zu seiner lateralen Ausdehnung sehr große Höhenunterschied zwischen dem Einzugsgebiet des HHS und dem Vorfluter lässt auf einen steilen hydraulischen Gradienten innerhalb des Karstsystems schließen. Während Hochwasserereignissen kam es zu einem hohen Durchfluss entlang vieler verschiedener Wegigkeiten. Die paragenetische Überprägung sämtlicher Gänge lässt die Vermutung zu, dass das System seit seiner Entstehung nie über längere Zeit hinweg einen dominanten Wasserweg besaß.

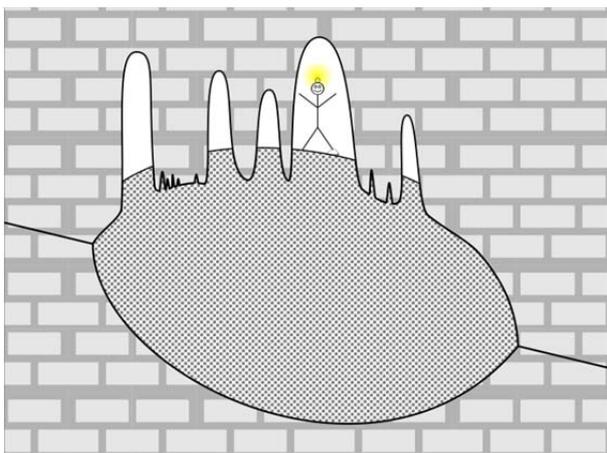


Abb. 19 Schematische Darstellung der Problematik, in einem paragenetischen System zwischen eigenständigen und nur scheinbar eigenständigen Gängen zu unterscheiden.

Fig. 19 Sketch of the difficulty of distinguishing between distinct and only apparently distinct corridors in a paragenetic system.

Ein weiterer Faktor nicht nur für den Prozess der Raumerweiterung sondern auch für Wahrnehmung des heutigen Höhlensystems sind die Sedimentreste, die immer noch das Erscheinungsbild des HHS prägen. Da sie große Bereiche der Höhle flächig bedecken, kann man nicht sagen, ob man sich in einem eigenständigen Gang oder nur in einem von mehreren paragenetischen Deckenkanälen befindet (vgl. Abb. 4). So kann es zum Beispiel vorkommen, dass parallel verlaufende Gänge eine gemeinsame Basis bzw. eine gemeinsame initiale Röhre haben, die heute lediglich mit Sediment verfüllt ist (Abb. 19). Auf diese Weise erhöht alleine die Präsenz des Sediments bereits den labyrinthischen Charakter einer paragenetisch geprägten Höhle.

6.4 Sedimente

Die fluviatilen Ablagerungen in Höhlen lassen sich nach Bosch & White (2004) unterschiedlichen Fazies zuordnen. Die sehr schlecht sortierten Sedimente (Typ 4) stammen aus der Diamiction Fazies. Diese Ablagerungen sind auf Flutereignisse zurückzuführen. Sie setzen sich aus einer Mischung aller Korngrößen zusammen und beinhalten Steine mit bis zu 30 cm Durchmesser. Um solche Komponenten zu transportieren werden Fließgeschwindigkeiten von etwa 1,7 m/s benötigt (Hjulström, 1935). Dieser Wert korreliert gut mit den kleinen FF am *Steinigen Weg*, die bei Geschwindigkeiten von 1,5 m/s entstehen. Die sehr feinkörnigen Sedimente (Typ 1) gehören zur Slackwater Fazies und sind Ablagerungen des Stillwasserbereiches. Sie deuten auf die Bildung von Rückstaubereichen nach Flutereignissen und in weiterer Folge langsame Sedimentation hin. Die mäßig sortierten feinsandigen Schluffe und schluffigen Feinsande könnten ebenfalls zur Slackwater Fazies gehören oder aber möglicherweise auch zur Channel Fazies. Letztere besteht in der Regel aus einer Abfolge klar abgegrenzten Lagen gut sortierter Sedimente. In diese Fazies dürften auch die sehr gut sortierten Feinsande (Typ 3) fallen. Möglicherweise kam es während des Transportes zu einem Abfall der Fließgeschwindigkeit, so dass sie aus der Suspension sedimentiert, die Tone und Silte jedoch weiter transportiert werden. Die für diese Separation nötige Geschwindigkeit liegt zwischen 1,9 cm/s und 0,45 cm/s. Unwahrscheinlicher ist, dass das Sediment bereits sortiert in die Höhle eingebracht wurde. Dass das HHS heute überhaupt befahrbar ist, bedeutet, dass das für die Paragenese des Höhlensystems verantwortliche Sediment abtransportiert worden sein muss. Es stellt sich somit die Frage nach dessen Verbleib. Es ist anzunehmen dass das HHS zum Otterbach entwässert hat und dieser als Vorfluter für die phreatische Hohlraumentwicklung maßgeblich war. Es gibt keine bekannten Quellaustritte für die rezent wasseraktiven Teile des HHS, obwohl Mrkos (1997) von einem Hinweis in Jäger (1873) auf einen solchen spricht. Dieser konnte aber nie nachgewiesen werden. Es gibt am südwestlichen Fuß (590 m) des Eulenberges zwei phreatische Höhlen (Koderholdlucke (2871/9) und Koderholdspalte (2871/10)), die ebenfalls eine paragenetische Überprägung aufweisen. Möglicherweise gehören sie ebenfalls zum HHS. Die innerhalb des HHS ermittelte Fließrichtung des Wassers und damit auch die Transportrichtung des Sedimentes deuten in Richtung dieser beiden Höhlen. Es kann jedoch kein Zusammenhang nachgewiesen werden, da beide Höhlen bereits nach wenigen Metern mit Sediment verlegt sind und keine Paläofließrichtungsindikatoren aufweisen.

Es ist naheliegend, dass der Großteil der Sedimente des HHS schlicht in tiefere Bereiche des Karstsystems befördert wurde, doch ist dessen Aufnahmekapazität natürlich begrenzt. Der immense Reichtum klastischer Sedimente des HHS – auch in den heute zugänglichen Bereichen – legt nahe, dass es häufig zu Rückstauen gekommen sein muss. Kempe und Mrkos (1991) lieferten eine interessante Erklärung, wie das Sediment dennoch verlagert werden konnte: „Als letzte Phase der Höhlenentwicklung ist die noch andauernde Erweiterung der Räume auf dem Niveau des heutigen Vorfluters (unter 600 m Höhe) zu nennen. Dies bewirkt ein ständiges Absacken der [...] Sedimente und hat die Hermannshöhle in weiten Teilen überhaupt erst zugänglich gemacht.“ Es ist durchaus denkbar, dass zumindest ein Teil der Sedimente, die aus dem heute bekannten HHS ausgeräumt wurden, in tiefer gelegene Bereiche des Karstsystems transportiert wurden. Das dazu nötige Volumen wurde (und wird noch rezent) durch phreatische (paragenetische?) Hohlraumerweiterung in den aktiven Teilen des HHS geschaffen.

6.5 Altersdatierung und regionale Rückschlüsse

Die Ergebnisse der U/Th Datierungen zeigen, dass Teile des HHS bereits vor über 500 ka trocken gewesen sein mussten. Die ältesten Proben stammen dabei aus mittlerer Höhe im HHS, auf etwa 640 m, und der etwas höher gelegenen *Paradieshalle* (660 m). Es ist anzunehmen, dass Proben aus höheren Bereichen noch ältere Alter liefern könnten. Generell kann beobachtet werden, dass alte Proben eher in hohen Bereichen des HHS zu finden sind, während junge Proben sich auf die tiefer liegenden Bereiche beschränken. Dies deutet auf ein langsames Absinken des Karstwasserspiegels und das sukzessive Trockenfallen der einzelnen Höhlenabschnitte hin. Es zeigt sich des Weiteren, dass auch tiefe Teile des HHS (z.B. *Wasserschloss*) bereits vor etwa 125 ka trocken waren, obwohl diese heute auf oder sogar unter dem Niveau des Ramsbaches liegen.

Frühere Autoren versuchten oft, einen Bezug zwischen den heutigen Höhleneingängen und den ehemaligen hydrologischen Verhältnissen herzustellen (Kempe & Mrkos, 1991; Mrkos, 1997). Dabei wurden die Windlöcher als „Schwinden“ und das Taubenloch als „Überfallsquelle“ angesprochen. Da das Alter vieler Höhlenteile jedoch jenseits der 0,5 Ma liegt, muss ein bedeutender Oberflächenabtrag berücksichtigt werden. Pavuza (1997) errechnete einen lösungsbedingten Kalkabtrag von rund 50 $\mu\text{m/a}$, was für 0,5 Ma 25 m ergibt. Gerade in den Kaltzeiten des Quartärs ist aber mit bedeutender Frostschuttbildung und mechanischer Erosion zu rechnen, was diesen Wert um ein Mehrfaches erhöht. Die Höhleneingänge sind also willkürliche Verschnitte mit der heutigen lokalen Landoberfläche und entsprechende Korrelationen sind daher nicht möglich.

Der logische Austrittspunkt für die Entwässerung des Eulenbergs liegt an dessen tiefsten Punkt an der Südostseite, im Bereich des Zusammenflusses von Rams- und Otterbach. Daher ist die aus Indikatoren wie FF und Imbrikationen abgeleitete generell westwärts gerichtete Paläofließrichtung schwierig zu interpretieren. Diese steht normal zur südwärts gerichteten Entwässerung des Ramsbaches und entgegen der heutigen Fließrichtung des Otterbaches. Die plausibelste Erklärung für einen wahrscheinlichen im Westen gelegenen Austritt des Systems ist, dass der Bereich im Südosten durch nicht-verkarstungsfähige Gesteine oder durch Sedimente blockiert war.

Eine andere mögliche – oder auch ergänzende – Begründung wäre, dass zur Zeit der Höhlengeneese im Osten und Südosten des Eulenberges noch die Schiefer und Gneise des Grobgneiskomplexes anstanden. Durch Ponore, Schwinden und Klüfte an der Oberfläche des Marmors hätte Wasser von dort infiltrieren können. Der Austritt bzw. (Wieder-) Eintritt in den Grundwasserkörper des Kirchberger Tals wäre trotz der dessen ostwärts gerichteter Entwässerung auf der Westseite des Eulenberges, wo die Tertiären Sedimente lagerten, zu erwarten. Beide genannten Möglichkeiten wurden bisher in keiner den Autoren bekannten Literatur diskutiert.

Früheren Autoren zufolge scheint es außerdem eindeutig, dass die Entwicklung der Hermannshöhle mit der tektonischen Absenkung des Kirchberger Beckens (Waldner, 1942) und der Ausbildung des Ramsbaches sowie dessen Durchbruch nach Süden ins Kirchberger Tal untrennbar verbunden ist (Waldner, 1942; Mrkos, 1997). Waldner (1942) postulierte einen früheren Abfluss des Ramsbaches über den Sattel des Eulenberges (720 m) nach (Süd-) Westen. Diese Annahme kann weder bestätigt noch widerlegt werden. Da der Eulenbergsattel deutlich höher liegt als die höchsten Teile des HHS ist diese Entwicklung für die heute bekannten Teile nicht relevant. Durchaus wahrscheinlich ist ein ehemals durchgehender Karbonatrücken zwischen Eulenberg und Kernstockwarte an dessen Nordseite die Wässer in das Karstsystem infiltrierten. Ab wann Teile – bzw. ein Großteil wie heute – des Ramsbaches oberirdisch abfließen, kann auch aufgrund der neuen Datenlage nicht gesagt werden.

Anhand der ältesten datierten Speläotheme lässt sich die Eintiefungsrate des Otterbachs grob abschätzen. Dazu wurde durch die ältesten Alter jeder datierten Höhenlage eine Gerade gelegt und deren Steigung ermittelt. Als Beispiel dafür werden die Werte der Proben HH35 und HH01/2 herangezogen (lila Gerade in Abb. 20). Die Höhendifferenz dieser beiden Lokalitäten beträgt 22 m, die Altersdifferenz etwa 286 ka. Die resultierende Abtragsrate liegt daher bei etwa 77 $\mu\text{m/a}$.

Eine weitere Möglichkeit ist, eine Beziehung zwischen dem höchsten Punkt des HHS zum heutigen Vorfluter herzustellen. Dazu wurde die Differenz vom höchstgelegenen und ältesten vertrauenswürdigen Speläothemalter (HH17, 626 m) und der Seehöhe des Otterbaches (etwa 575 m am Zusammenfluss mit dem Ramsbach) herangezogen (grüne Gerade in Abb. 20). Die dadurch errechnete Abtragsrate ist etwa doppelt so hoch, nämlich rund 137 $\mu\text{m/a}$, stellt aber einen Maximalwert dar.

Diese Raten passen gut mit einem weiteren Befund aus der nahen Umgebung überein. In der westlich des HHS gelegenen Spinnenhöhle (2871/16) wurde eine „recht reichhaltige kaltzeitliche Fauna [Höhlenbär, Bison, (Woll-?) Nashorn]“ gefunden (vgl. Pavuza, 1997). Die Fundstelle liegt nur wenige Meter über dem heutigen Niveau des Otterbaches. Das ergibt ebenfalls eine Taleinfiefungsrate in der Größenordnung von 100 $\mu\text{m/a}$, deckt jedoch einen wesentlich kürzeren Zeitraum ab. Sie lässt sich gut mit Beispielen aus dem Murtal, nördlich von Graz, korrelieren, wo Wagner (2011) für die letzten 4 Ma eine Rate von 100 $\mu\text{m/a}$ ermittelte. Im Vergleich dazu sind aus vergletscherten Gebieten der Schweizer Alpen zehnfach höhere Werte bekannt (Häuselmann et. al, 2007).

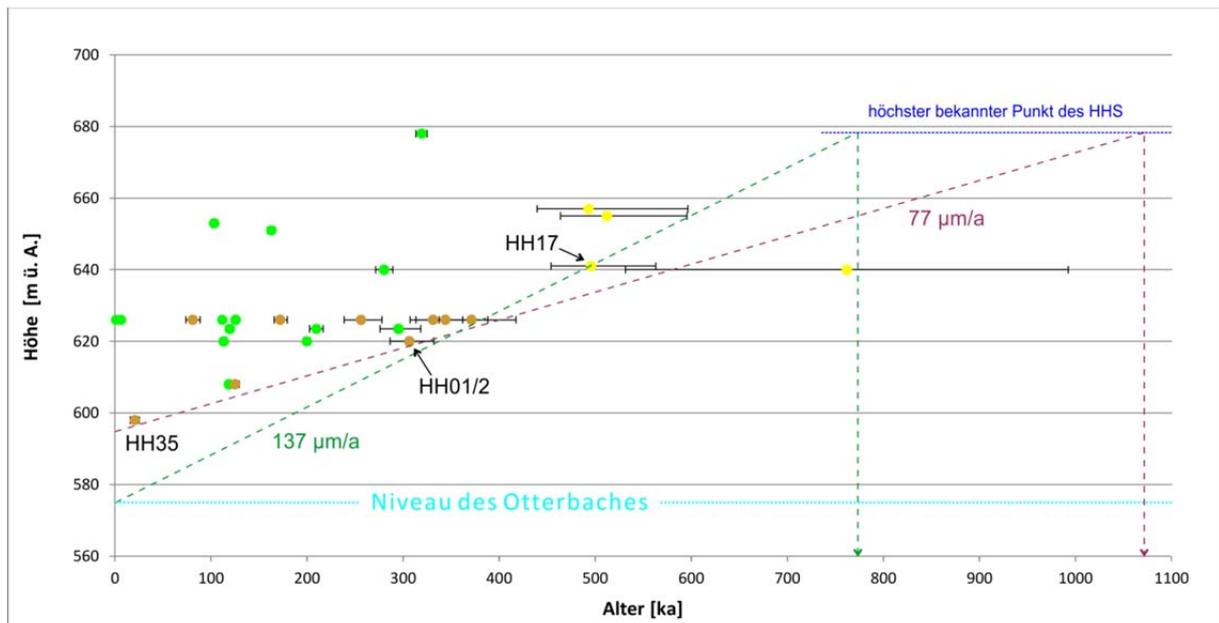


Abb. 20 U/Th-Alter der Speläotheme und ihre entsprechende Höhenlage. Die gestrichelten Geraden zeigen die Abschätzung der Taleintiefungsraten an (Die Erklärung wird im Text gegeben).

Fig. 20 U/Th-ages of speleotheme samples and their respective altitude. The dashed lines indicate the estimated valley incision rates.

Diese Raten erlauben auch, das Trockenfallen der höchsten bekannten Höhlenteile (Taubenloch, 679 m) abzuschätzen. Je nach Rate liegt das Minimalalter dafür zwischen 0,8 Ma und 1,1 Ma (Abb. 20).

Es ist denkbar, dass der Otterbach nicht nur die Tertiären Sedimente, sondern mit derselben Rate auch die Marmore des Eulenberges erodierte und so den heute am Südufer gelegenen Karbonatsporn vom Rest des Berges abtrennte. Aufgrund der dürftigen Aufschlussverhältnisse in der gesamten Umgebung des Eulenberges ist es schwierig, eine fundierte Aussage zu treffen. Es scheint jedoch nicht ausgeschlossen, dass der Ramsbach ein junges Element ist, das entlang einer kleineren Nord-Südgerichteten Störung entstanden ist. Solche Störungen sind auch im Nordwesten des Eulenberges, zwischen Otterthal und Gloggnitz, zu finden und diese Bewegung stimmt mit den innerhalb des HHS gefundenen strukturellen Elementen überein.

7 Schlussfolgerung

Das Hermannshöhlensystem im Eulenberg repräsentiert ein schönes Beispiel für Kontaktkarst, der durch die Infiltration ungesättigter Wässer aus dem nördlich gelegenen Gneis-Schiefer-Komplex gebildet wird. Der tektonisch stark beanspruchte Marmor zeigt auf fast allen Bewegungsflächen Slickolite-Striae, jedoch keine Störungen mit markantem Versatz.

Alle Höhlenformen können durch epigene phreatische Bildung erklärt werden. Epiphreatische und vadose Phasen scheinen speläogenetisch nicht relevant zu sein, sondern lediglich Sedimente umzulagern. Für eine hypogene Entstehung konnten keine Nachweise gefunden werden.

Das HHS weist eine Vielzahl paragenetischer Groß- und Kleinformen auf. Dazu zählen die Canyon-Form der Gänge, Deckenkanäle und Deckenmäander, Deckenkarren, Deckenkolke und Pendants sowie paragenetische Lösungsrampen. Relikte früherer Sedimentverfüllungen aber auch die rezente Bedeckung der Sohle prägen entscheidend das Erscheinungsbild der Höhle. Die allochthonen alluvialen Sedimente sind sehr heterogen hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung und ihrer Sortierung.

Als Erklärung für die dreidimensionale labyrinthische Anlage der Höhle werden drei Hauptgründe angenommen: Einerseits war die Distanz, die das Wasser durch das lösungsfähige Gestein zurücklegen musste, ziemlich kurz, andererseits gab es während Hochwasserereignissen eine hohe Durchflussmenge entlang vieler verschiedener Wege. Aufgrund der hohen Sedimentfracht wurden Protoröhren verengt oder verstopft und es kam zur Erweiterung mehrerer Gänge. Die Bildung paragenetischer Bypässe prägte den dreidimensional-labyrinthischen Charakter des HHS entscheidend. Auch die Reste von Sedimentverfüllungen verstärken alleine durch ihren Verbleib im Höhlensystem den Eindruck eines Labyrinths. Der andauernde impulsartige Sedimenteintrag führte schlussendlich zu den verschiedenen Formen von Paragenese, die man heutzutage in der Höhle findet.

Die aus Fließfacetten ermittelte generelle Paläofließrichtung war westwärts gerichtet. Die Fließgeschwindigkeit betrug stellenweise bis zu 1,7 m/s. Dadurch konnten auch sehr grobe Sedimente mit Kantenlängen bis zu 30 cm in die Höhle eingebracht werden.

Obwohl einige Teile des Höhlensystems tiefer liegen als der nahe gelegene Ramsbach, fielen sie bereits vor 125 ka trocken. Auf dem mittleren Niveau des bekannten Höhlensystems findet seit mindestens 500 ka vadose Sinterbildung statt. Da die Genese dieser und der noch höheren Höhlenteile deutlich länger zurückliegen muss, ist eine Korrelation mit der heutigen Oberflächenmorphologie nicht möglich. Die räumliche und zeitliche Verteilung der datierten Sinter sowie das Fehlen korrodierter Speläotheme sprechen eher nur für eine speläogenetisch markante phreatische Phase und für ein kontinuierliches Absinken des Karstwasserspiegels. Anhand der Altersdaten und ihrer entsprechenden Höhenlagen konnten Taleintiefungsraten um 100 $\mu\text{m/a}$ abgeschätzt werden.

Dank

Wir danken dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) für die finanzielle Unterstützung, die in Form des FEMtech Praktikums gewährt wurde. Weiters danken wir dem Hermannshöhlen-Forschungs- und Erhaltungsverein für logistische und finanzielle Unterstützung. Besonderer Dank gilt Philippe Audra, Augusto Auler, Ivo Baron, Harald Bauer, Mathias Bichler, Steffen Birk, Kurt Decker, Thomas Exel, Susanne Gier, Philipp Häuselmann, Sabine Hruby-Nichtenberger, Pauline Oberender, Rudolf Pavuza, Doris Rupprecht und Jo De Waele für ihre Unterstützung während der Feld- und Laborarbeit sowie der äußerst produktiven Diskussionen.

Referenzen

- Audra, P. & Palmer, A. N. (2011): The pattern of caves: controls of epigenic speleogenesis. – *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4: 359-378.
- Auler, A. S. (1999): Karst Evolution and Palaeoclimate in Eastern Brazil. – Unveröff. Diss. University of Bristol.
- Bosch, R. F. & White, W. B. (2004): Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. – In: I. D. Sasowsky & J. Mylroie (Ed.): *Studies of cave sediments: Physical and chemical record of paleoclimate*. Dordrecht: Kluwer: 1-22.
- Curl, R. L. (1966): Scallops and Flutes. – *Transactions of Cave Research Group of Great Britain*, 7(2): 121-160.
- Decker K., Peresson, H. & Faupl, P. (1994): Die miozäne Tektonik der östlichen Kalkalpen: Kinematik, Paläospannungen und Deformationsaufteilung während der "lateralen 'Extrusion" der Zentralalpen. – *Jb. Geol. B.-A.*, 137: 5-18.
- Ebner F., Sachsenhofer R. F. & Schwendt, A. (1991): Das Tertiär von Kirchberg am Wechsel. – *Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark*, 121: 119-127.
- Egger H., Krenmayr H.-G., Mandl G. W., Martura A., Nowotny A., Pascher G., Pestal G., Pistotnik J., Rockenschaub, M. & Schnabel W. (1999): *Geological Map of Austria 1:2.000.000*. – Geological Survey of Austria, Vienna.
- Farrant, A. R., Smart, P. L. (2011): Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis. – *Geomorphology*, 134: 79-93.
- Faupl, P. (1970): Zur Geologie und Petrographie des südlichen Wechselgebietes. – *Mitt. Geol. Ges.*, 63: 22-51.
- Ford, D. C. & Ewers, R. O. (1978): The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. – *Canadian Journal of Earth Sciences* (15), 1783-1798.
- Ford, D. C. & Williams, P. W. (1989): *Karst geomorphology and hydrology*. – Unwin Hyman, London.
- Geologic TimeScale Foundation (2013): *TimeScale Creator*. - <https://engineering.purdue.edu/Stratigraphy/tscreator/index/index.php>. abgerufen 12.2013.
- Götzinger, M. & Wagreich, M. (2006): *Geologie der Steiermark. Exkursionsführer*. http://www.univie.ac.at/Mineralogie/docs/Geologie_der_Steiermark.pdf

- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. & Ogg, G. (2012): The Geologic Time Scale 2012 2-Volume Set, 1st Edition. – Elsevier BV.
- Hartmann, H. & Hartmann, W. (1997): Beschreibung der Hermannshöhle. In: Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos H. (Red.), Die Hermannshöhle. – Die Höhle, Beiheft Nr. 50: 59-82.
- Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H. (Red.) (1997): Die Hermannshöhle. Die Höhle, Supplement 50. Hermannshöhlen-Forschungs- und Erhaltungsverein, Wien.
- Herrmann, P., Mandl, G. W., Matura, A., Neubauer, F., Riedmüller, G. & Tollmann, A. (1992): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000: Blatt 105 Neunkirchen. – Geologische Bundesanstalt, Wien.
- 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.
- Hochschorner, K. H. (1997): Der Formenschatz der Hermannshöhle, In: Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos H. (Red.), Die Hermannshöhle. – Die Höhle, Beiheft Nr. 50: 101-106.
- Jäger, G. (1873): Der Wechsel und sein Gebiet in Nieder-Oesterreich und der Steiermark. – Der Tourist V, 13-16 (Wien): 248 ff.
- Johnston, V. E., Borsato, A., Spötl, C., Frisia, S. & Miorandi, R. (2013): Stable isotopes in caves over altitudinal gradients: fractionation behaviour and inferences for speleothem sensitivity to climate change. – *Climate of the Past*, 9, 99–118.
- Kempe, S. (1972): Cave genesis in gypsum, with particular reference to underater conditions. – *Cave Science*, 49, 1-6.
- Kempe, S., Brandt, A., Seeger, M. und Vladi, G. (1975): „Facetten“ and „Laugdecken“: Typical morphological elements of caves developed in standing water. – *Annales de Spéléologie*, 30 (4), 705-708.
- Kempe, S. & Mrkos, H. (1991): Zur Speläogenese der Hermannshöhle bei Kirchberg am Wechsel / Niederösterreich. – *Mitt. Verb. dt. Höhlen- und Karstforsch*, 37 (4), 76-81.
- Klimchouk, A. B., Ford, D. C., Palmer, A. N., Dreybrodt, W. (Hrsg.) (2000): Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. – National Speleological Society, Huntsville, Alabama (USA).
- Klimchouk, A. (2007): Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. – Special Paper no. 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM.
- Klimchouk, A. (2009): Morphogenesis of hypogenic caves. – *Geomorphology*, 106: 100–117.

- Lachniet, M. S. (2009): Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. – *Quaternary Science Reviews*, 28, 412–432.
- Lauritzen, S.-E. & Lunderberg, J. (2000): Solutional and erosional morphology. – In: Klimchouk, A. B., Ford, D. C., Palmer, A. N., Dreybrodt, W. (Hrsg.): *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. – National Speleological Society, Huntsville, Alabama (USA): 408-426.
- McDermott, F. (2004): Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. – *Quaternary Science Reviews* 23, 901-918.
- Means, W. D. (1987): A newly recognized type of slickenside striation. *Journal of Structural Geology*, 9 (5-6), 585-590.
- Meyer, M. C., Cliff, R. A. & Spötl, C. (2011): Speleothems and mountain uplift. – *Geology*, 39, 447-450
- Mrkos, H. (1997): Zur Entstehung der Herrmannshöhle In: Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H. (Red.), *Die Hermannshöhle*. – *Die Höhle*, Beiheft Nr. 50: 89-100.
- Müller, W. (1994): Neue chronologische und strukturgeologische Daten zur geodynamischen Entwicklung des nördlichen Semmering- und Wechsel-Gebietes (Niederösterreich). – Unveröff. Dip. Arb. Univ. Wien.
- NÖ-Atlas (2013): Land Niederösterreich, NÖ Atlas. <http://atlas.noel.gv.at>.
- Palmer, A. N. (1975): The origin of maze caves. – *Natl. Speleol. Soc. Bull.*, 37: 56–76.
- Palmer, A. N. (1991): Origin and morphology of limestone caves. – *Geological Society of America bulletin*, 103 (1): 1-21.
- Palmer, A. N. (2007): *Cave Geology*. – Cave Books, Dayton.
- Palmer, A. N. (2011): Distinction between epigenic and hypogenic maze caves. – *Geomorphology*, 134: 9-22.
- Pavuz, R. (1997): Hydrogeologische Aspekte der Hermannshöhle bei Kirchberg am Wechsel, In: Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H. (Red.), *Die Hermannshöhle*. – *Die Höhle*, Beiheft Nr. 50: 89-100.
- Pfarr, T., Seebacher, R. & Plan, L., 2014. Die längsten und tiefsten Höhlen Österreichs. www.hoehle.org/long&deep.php. abgerufen 01.2014.
- Plan, L. (2013): Paragenese – ein häufiges Phänomen ostalpiner Höhlen. – *Die Höhle*, 64 (1-4): 3-14.

Ramsay, J. G. & Huber, M. I. (1987): *The Techniques of Modern Structural Geology: Folds and Fractures*. Academic Press, London.

Riechelmann, D. F. C., Deininger, M., Scholz, D., Riechelmann, S., Schröder-Ritzrau, A., Spötl, C., Richter, D. K., Mangini, A. & Immenhauser, A. (2012): Disequilibrium carbon and oxygen isotope fractionation in recent cave calcite: Comparison of cave precipitates and model data. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103, 232-244.

Seemann, R. (1997): Sediment- und Mineralinhalt der Hermannshöhle, In: Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H. (Red.), *Die Hermannshöhle. – Die Höhle, Beiheft Nr. 50*: 107-132.

Seemann, R., Geyh, M. A., Franke, H. W. (1997): Altersbestimmung an Sinter- und Tropfsteinformationen der Hermannshöhle, In: Hartmann, H., Hartmann, W. & Mrkos, H. (Red.), *Die Hermannshöhle. – Die Höhle, Beiheft Nr. 50*: 133-146.

Spelix (2013): <http://spelix.hoehlenforschung.at/>

Spötl, C. & Vennemann, T.W. (2003): Continuous-flow IRMS analysis of carbonate minerals. – *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 17, 1004-1006.

Tollmann, A. (1959): Der Deckenbau der Ostalpen auf Grund der Neuuntersuchungen des zentralalpiner Mesozoikums. – *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.*, 10, 1-62.

Waldner, F. (1942): *Die Hermannshöhle und die übrigen Höhlen im Eulenberge bei Kirchberg am Wechsel, Niederdonau. – Wien–Leipzig (Niederdonau / Natur und Kultur, 15)*.

Wagner, T. (2011): Datierung fluviatiler Höhlensedimente mittels kosmogener Nuklide am Beispiel des Grazer Berglandes. – *Die Höhle*, 62. (1-4).

Žak, K., Richter, D. K., Filippi, M., Živor, R., Deininger, M., Mangini, A. & Scholz, D. (2012): Coarsely crystalline cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe. – *Climate of the Past*, 8: 1821–1837.

Zupan Hajna, N., Mihevc A., Pruner P. & Bosák, P. (2008): Palaeomagnetism and Magnetostratigraphy of Karst Sediments in Slovenia. – *Carsologica*, 8, Založba ZRC, Ljubljana.

Weiterführende Untersuchungen

Um die Ergebnisse dieser Studie zu untermauern, wurden Paläomagnetik-Proben genommen. Die Ergebnisse stehen zum jetzigen Zeitpunkt noch aus.

Es empfiehlt sich, die Chronologie der Höhlenentstehung mit weiteren Methoden wie z.B. Pollenanalyse der klastischen Sedimente oder weiteren Sinterdatierungen zu verfeinern. Weiteren U/Th-Datierungen von Speläothemen wären optimal um das bestehende Bild des HHS zu untermauern. Um Bereichen des HHS ohne Speläothembildung oder solchen, deren Speläothemalter außerhalb der U/Th-Bestimmungsgrenze liegt, absolute Mindestalter zuordnen zu können empfiehlt sich die Analyse klastischer Sedimente mittels kosmogener Nukliden. Diese Untersuchungen könnten auch weitere Informationen über die Entstehung des Kirchberger Beckens liefern.

Um das in dieser Studie vertretene Modell der Speläogenese und die Erklärungen zur Ausbildung des 3D-Labyrinths zu überprüfen, sind numerische Modellierungen, die auch den Sedimentinput miteinberechnen, unerlässlich.

Des Weiteren sollten die Dünnschliffe mittels BSE und SEM-Mikroskopie untersucht werden, um genauere Informationen über die Entstehung der Slickolite-Striae zu erhalten.

Appendix

A. Ergänzung zum Kapitel Strukturgeologie

1. Einleitung

Der Marmor des Eulenberges ist augenscheinlich stark beansprucht. Störungs- und Kluftflächen können als wasserwegsame Initialfugen ideale Bedingungen zur Entstehung von Höhlen bilden. Ziel der strukturgeologischen Arbeit war es, den Einfluss der strukturellen Elemente auf die Höhlengeneese zu prüfen. Im Zuge dieser Untersuchung konnten weitere überraschende Merkmale dokumentiert werden.

2. Methoden

2.1. Messung mit dem Gefügekompass

Es wurden 56 Messungen an spröden Störungen innerhalb und um das HHS durchgeführt. Dabei fiel auf, dass die Harnischflächen zwar starke Lineationen aufweisen, jedoch bis auf wenige Ausnahmen (Abb. 1. a. & b.) nirgendwo Kataklastite gefunden wurden. An den meisten Stellen ist das Gestein bis zur Bewegungsfläche hin völlig intakt (Abb. 1. c.).

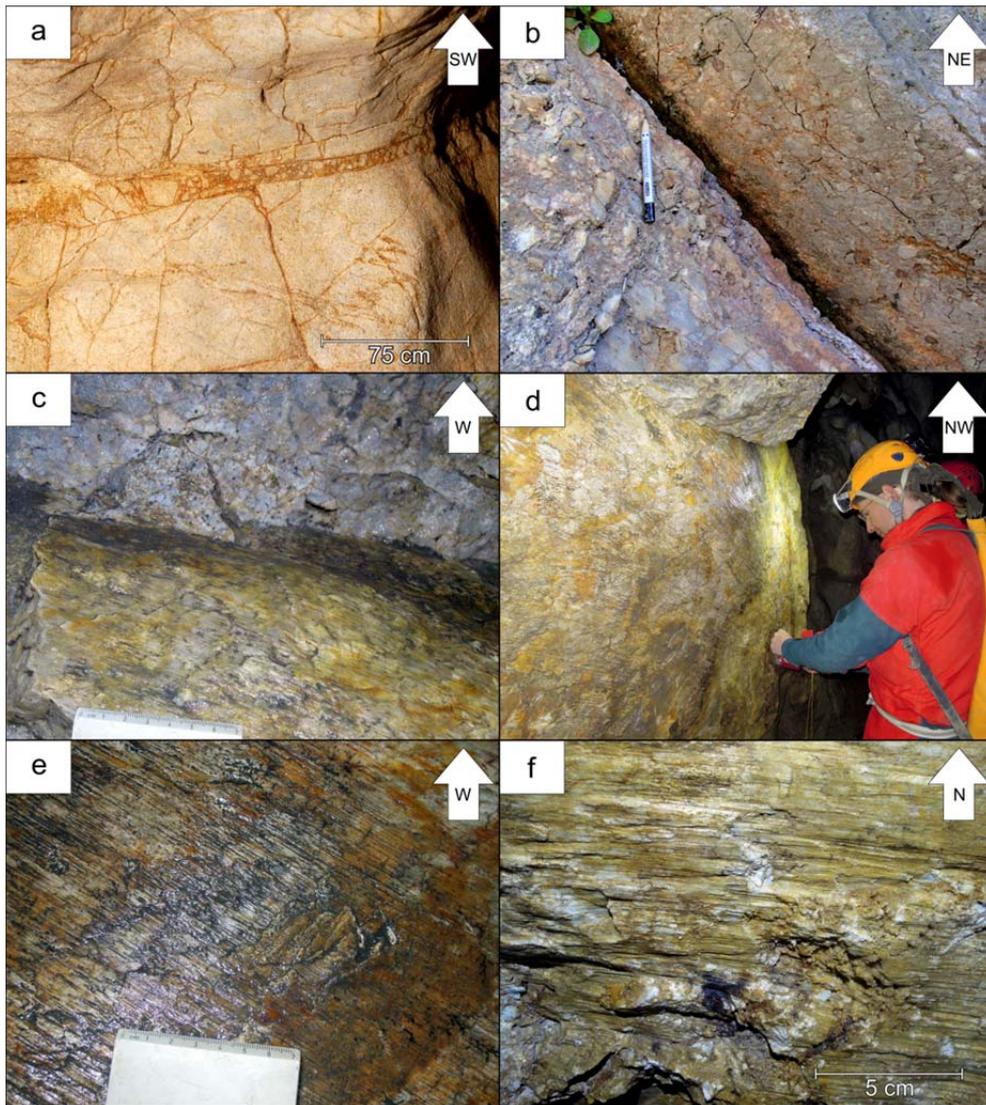
2.2. Dünnschliffe

Ergänzend zu den strukturellen Messungen mit dem Gefügekompass wurden innerhalb der Hermannshöhle drei repräsentative orientierte Marmorproben (HH43, HH44 und HH45) genommen (siehe auch Abb. 3). Aus jedem Handstück wurde ein Dünnschliff mit einer Dicke von 40 μm hergestellt. Es wurde keine Färbung zur Unterscheidung von Calcit und Dolomit vorgenommen. Die Dünnschliffe wurden unter dem Mikroskop sowohl mit parallelen als auch mit gekreuzten Polarisatoren untersucht.

3. Ergebnisse

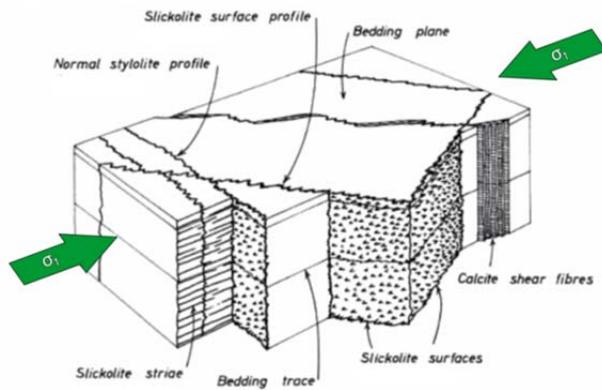
3.1. Strukturelle Messungen

Wie in Appendix A beschrieben, handelt es sich bei den spröden Störungsflächen nicht um gewöhnliche Harnischflächen (Abb. 1. d.), sondern um Drucklösungsflächen, im Speziellen um Slickolite Striae. Slickolite Striae sind jene Flächen innerhalb eines von Drucklösung erfassten Gesteins, die subparallel zur Hauptspannungsrichtung (σ_1) stehen (Abb. 2). Sie stehen normal auf Stylolith-Flächen und zeigen typischer Weise eine ausgeprägte Lineation (Abb. 1. e.). Sie können ein starkes, bis zu mehrere mm tiefes Relief ausbilden (Abb. 1. f.). Zwischen Stylolithen und Slickolite Striae können sich Slickolithe entwickeln, inklinierte Stylolithe, deren Zacken in die Richtung der größten Normalspannung zeigen.



Appendix Abb. 1 a. Kataklastit in der *Wildschützenhalle*. b. Kataklastit am Oberflächenaufschluss HO-01 im Süden des Eulenberges. c. Bis zu den spröden Flächen ist das Gestein intakt, es fehlt die komplette *damage zone* (*Harnisch*). d. Harnischfläche mit über 1 m Durchmesser in der Höhle (*Harnisch*). e. Beispiel für die ausgeprägte Lineation an den spröden Flächen (*Harnisch*). f. Beispiel für die deutliche Undulation der Lineation (Eingang zum *Karl-Ludwig-Tunnel*).

Um den Unterschied zwischen Harnischflächen und Slickolite Striae-Flächen zu verdeutlichen, wurden die gesammelten Messungen spröder Flächen (Abb. 3. c) einer p-t-Analyse unterzogen. Dabei wird aus dem vorhandenen Datensatz automatisch die Pressure-Achse, die σ_1 entspricht, die Tension-Achse, die σ_3 repräsentiert und die intermediäre Achse, die normal auf die beiden andere steht, errechnet. Für die Analyse wurde das Programm TectonicsFP verwendet. Dieses Programm unterscheidet nicht zwischen Drucklösungsflächen und Harnischflächen. Das Ergebnis zeigte die Orientierung der Hauptspannungsrichtung σ_1 in N-S-Richtung (Abb. 2).



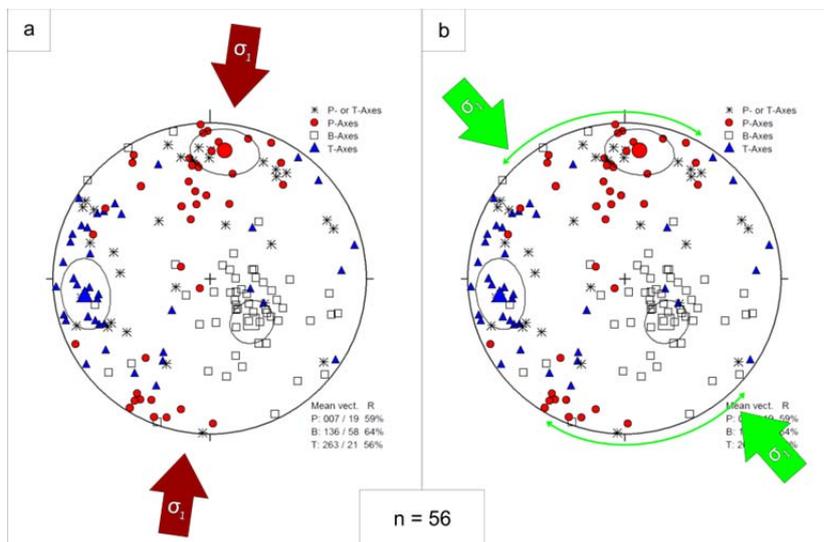
Appendix Abb. 2 Schematisches Blockdiagramm der in einem durch Drucklösung erfassten Gestein vorkommenden Bruchtypen (verändert nach Ramsay & Huber, 1987). Die Richtung der Hauptnormalspannung (σ_1) ist dargestellt.



Appendix Abb. 3 Slickolite-Striae am Beispiel eines Oberflächenauflusses. Der Stift deutet die Richtung von σ_1 an. Das undulierende Relief ist am Kontakt zum hangenden Block gut erkennbar.

Bei der Bildung spröder Störungen beträgt der Winkel zwischen σ_1 und der Harnischfläche jedoch etwa 45° . Das bedeutet, dass TectonicsFP zur Berechnung der Hauptspannungsrichtung ebenfalls einen 45° -Winkel annimmt.

Slickolite Striae hingegen verlaufen (sub-)parallel zu σ_1 . Daher muss die aus der p-t-Analyse resultierende Hauptspannungsrichtung verworfen werden. Logischer Weise muss die wahre Hauptspannungsrichtung parallel zu den Linearen verlaufen, was etwa einer NW-SE-Orientierung entspricht.



Appendix Abb. 4. a. Konventionell gerechnete p-t-Analyse. Der Winkel zwischen p-Achse und Bewegungsfläche beträgt 45° . Das Ergebnis zeigt σ_1 in N-S-Orientierung. b. Für den Winkel zwischen p-Achse und Bewegungsfläche wurden 0° angenommen. Das Resultat zeigt σ_1 in NW-SE-Orientierung

3.2. Dünnschliffe

Da Calcit und Dolomit dieselben optischen Eigenschaften haben und die Dünnschliffe nicht angefärbt wurden, konnte aktiv nicht zwischen den Karbonatarten unterschieden werden. Aus Seemann (1997) ist jedoch bekannt, dass es sich im Bereich der Hermannshöhle um einen weitgehend dolomitfreien, reinen Calcitmarmor handelt, der nur selten geringe Anteile (<10%) von Dolomit aufweist.

3.2.1. Probe HH43

Die Probe besteht fast ausschließlich aus Karbonat. Nur vereinzelt findet man Hellglimmer, die sich bevorzugt entlang der Drucklösungsflächen einregeln.

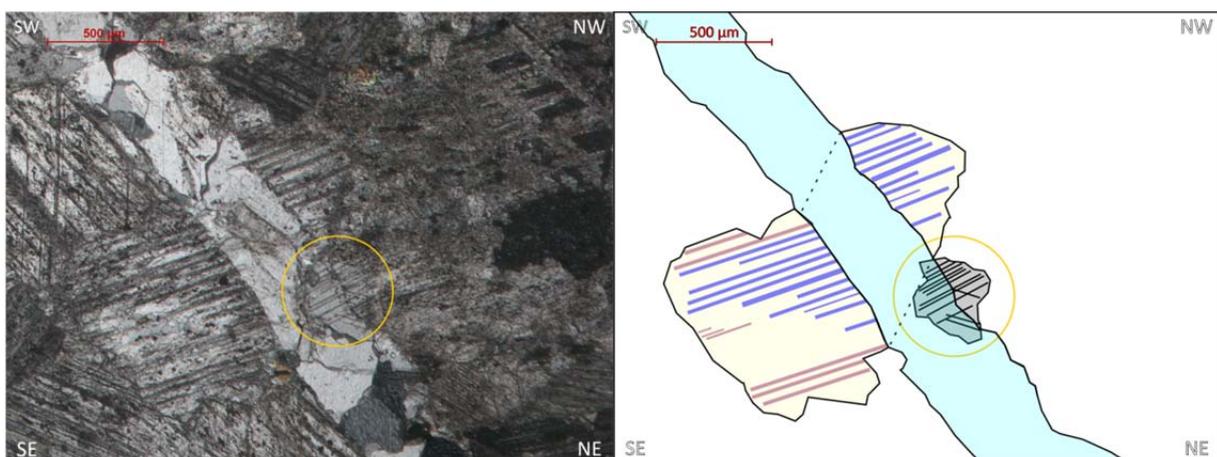
Es gibt 2 Generationen von Veins, die NW-SE bzw. NE-SW verlaufen und somit etwa normal auf einander stehen. Die Öffnungsrichtung der Veins entspricht dabei σ_3 , also der Richtung der geringsten Normalspannung. Die NW-SE-streichende Generation ist dünn und zeigt stellenweise beginnende Rekristallisation (Appendix Abb. 6) während die NE-SW-orientierte massiv ausgebildet und scharf begrenzt ist (Appendix Abb. 5).

- Detailansicht 1

Ein NE-SW-gerichtetes Vein ist gut zu erkennen. Es wird von massiven (im Gegensatz zu fibrösen) Kristallen aufgebaut und ist an den Rändern scharf begrenzt.

Hervorzuheben ist das syntaxiale Wachstum der Kristalle innerhalb der Veins. Im Bild erkennt man, dass teilweise sogar die Zwillingslamellen die optische Orientierung des Mutterkorns übernehmen (durch gelben Kreis hervorgehoben).

An einer Stelle ist zu sehen, dass das Vein einen präexistenten Kristall scharf durchschlägt, ohne dessen optische Orientierung zu übernehmen. Die parallel verlaufenden Zwillingslamellen sind in beiden Hälften gut nachvollziehbar. Diese Beobachtung spröder Deformation lässt darauf schließen, dass der Marmor zur Zeit der Bildung dieses Veins bereits sehr weit abgekühlt war.



Appendix Abb. 5 Links: Dünnschliff betrachtet mit gekreuzten Polarisatoren. Der gelbe Kreis markiert das syntaxiale Wachstum der Kristalle innerhalb des Veins und das entsprechende Mutterkorn. Rechts: Derselbe Kristall ist noch einmal im gelben Kreis hervorheben. Jene Zwillingslamellen, die sich in beiden Hälften des Kristalls eindeutig identifizieren lassen, sind blau markiert, die übrigen sind lila.

- Detailansicht 2

Ein NW-SE-streichendes Vein ist zu sehen. Es wurde ursprünglich von massiven, länglichen Kristallen aufgebaut. An den Rändern des Veins ist Bulging-Rekristallisation zu erkennen. Dabei kommt es zur lokalen Migration von Korngrenzen in benachbarte Körner und in weiterer Folge zu Kristallneubildung (Passchier & Trouw, 2006). Es handelt sich also um eine Phase der beginnenden dynamischen Rekristallisation, wo an den Korngrenzen neue, um Größenordnungen kleinere Kristalle gebildet werden.



Appendix Abb. 6 Bulging oder Low-Temperature Grain Boundary Migration (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren).

3.2.2. Probe HH44

Es handelt sich auch bei dieser Probe um hochreinen Marmor, der nur vereinzelt Glimmer aufweist. Man findet schöne Beispiele für Stylolithen, *Slickolites* und *Slickolite Striae*. Braune Ausfällungen entlang dieser Drucklösungsflächen erleichtern ihre Identifikation.

Die Spitzen von Stylolithen zeigen in die Richtung der größten Spannungskomponente σ_1 . Es kann in diesem Schliff also nicht nur σ_3 aufgrund der Veins, sondern auch σ_1 zweifelsfrei identifiziert werden.

- Detailansicht 1

In der Mitte des Ausschnittes ist deutlich ein *Slickolite* zu sehen. Die Orientierung der Drucklösungsfläche verläuft dabei fast vertikal durch das Bild, die Zacken zeigen jedoch eine Inklination. An ihnen lässt sich die Richtung der größten Hauptspannung ableiten, die in diesem Fall etwa (W)NW-(E)SE ist.

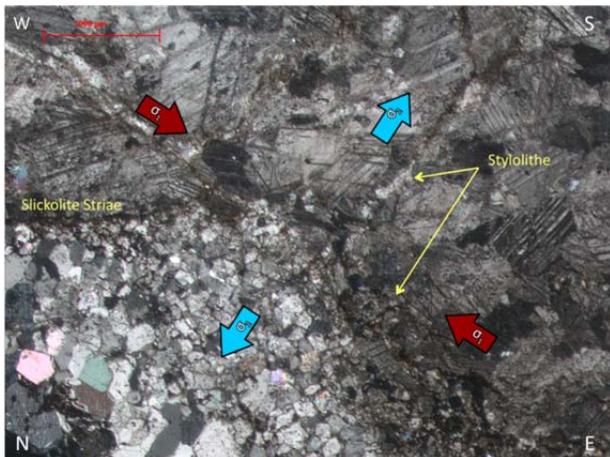
Normal dazu sieht man die Öffnung eines Veins (1. Quadrant) und die Aggregation einiger Glimmer (3. Quadrant). Das Vein zeigt (E)NE-(W)SW-gerichtete Extension. Es wird von den Slickolites gut sichtbar abgeschnitten und dürfte daher eine ältere Deformationsphase repräsentieren.



Appendix Abb. 7 Die Zacken der Slickolites zeigen σ_1 an (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren).

- Detailansicht 2

Eine etwa diagonal durch den Ausschnitt verlaufende Stylolithen-Fläche zeigt (W)NW-(E)SE-Verkürzung an. Auf sie normal stehend sind *Slickolite Striae* ausgebildet, die (sub-)parallel zu σ_1 orientiert sind. Im 3. Quadranten erkennt man die grobspätigen Kristalle eines Veins, das etwa N-S-Extension anzeigt. Möglicherweise fand seine Öffnung zeitgleich mit der Entstehung der Drucklösungsflächen statt.



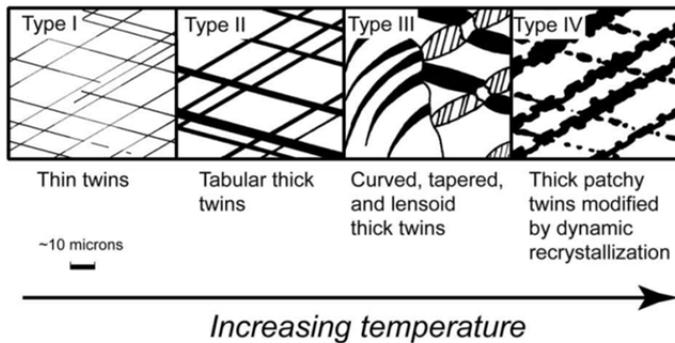
Appendix Abb. 8 *Slickolite Striae* und Stylolithen sind gut erkennbar (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren).

3.2.3. Probe HH45

Drucklösungsflächen treten weniger häufig auf, stattdessen findet man eine Reihe von grünschieferfaziellen Scherzonen und Anzeichen beginnender dynamischer Rekristallisation. Besonders ausgeprägt ist in diesem Schliff die intensive Bildung mechanischer Zwillinge. Ihre Geometrie gibt Auskunft über die während der Deformation herrschenden Temperaturen (Appendix Abb. 9).

Mechanische Zwillinge vom Typ I sind als dünne, gerade Linien ausgebildet. Sie dominieren bei Temperaturen unter 170°C, können aber bis zu 200°C gebildet werden. Bei höheren Temperaturen werden die Zwillinge vom Typ I aufgeweitet (Typ II). Diese herrschen zwischen 200°C und 300°C

vor. Über 200°C beginnt die Bildung von Zwillingen des Typ III, die aus gebogenen und sich kreuzenden Lamellen bestehen. Übersteigen die Temperaturen 250°C setzt die dynamische Rekristallisation ein. Dieser Prozess ist in Calciten häufig nicht auf die Korngrenzen beschränkt, sondern kann auch an den Grenzen der Zwillinglamellen beginnen (Typ IV). Durch diese sogenannte *Twin Boundary Recrystallisation* kann ein komplettes Kristallkorn rekristallisiert werden ohne dabei die Korngrenzen zu beeinträchtigen (Passchier und Trouw, 2005).

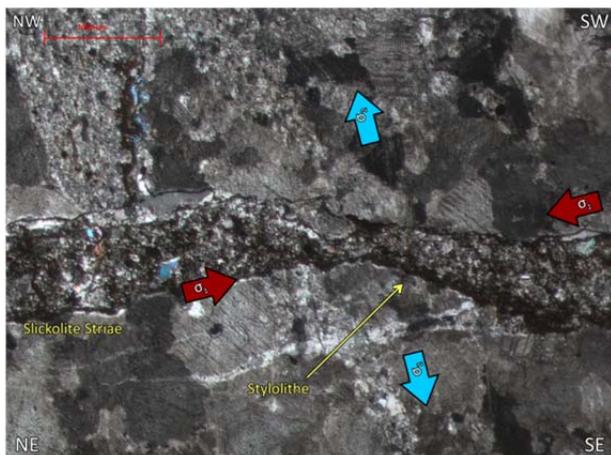


Appendix Abb. 9 Schematische Darstellung der verschiedenen Typen von Calcit-zwillingen (aus Ferrill et al., 2004)

- Detailansicht 1

Der Ausschnitt zeigt etwa normal aufeinander stehende grünschieferfazielle Scherzonen, die WNW-ESE- bzw. ENE-WSW-orientiert verlaufen. Letzte durchschlagen die WNW-ESE-gerichteten Scherzonenbänder, weshalb sie vermutlich jünger sind. Da keine Bewegungsrichtung entlang dieser Scherzonen festgestellt werden konnte, bleibt σ_1 für die Zeit ihrer Entstehung unbekannt.

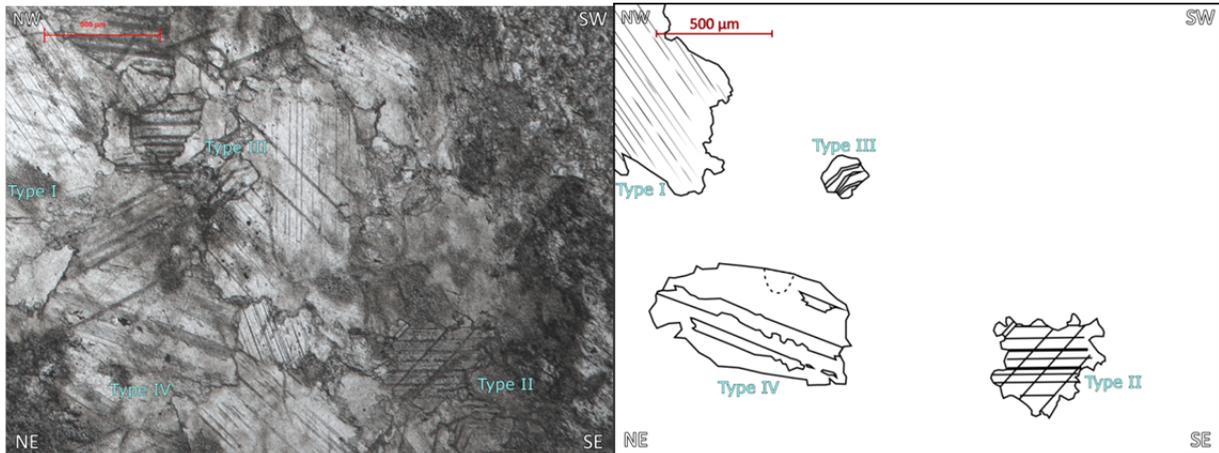
Entlang der ENE-WSW-orientierten Scherzone sind Stylolithen und *Slickolite Striae* ausgebildet, die eine NNE-SSW-Verkürzung anzeigen.



Appendix Abb. 10 Grünschieferfazielle Scherzonen und Drucklösungsflächen (Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren).

- Detailansicht 2

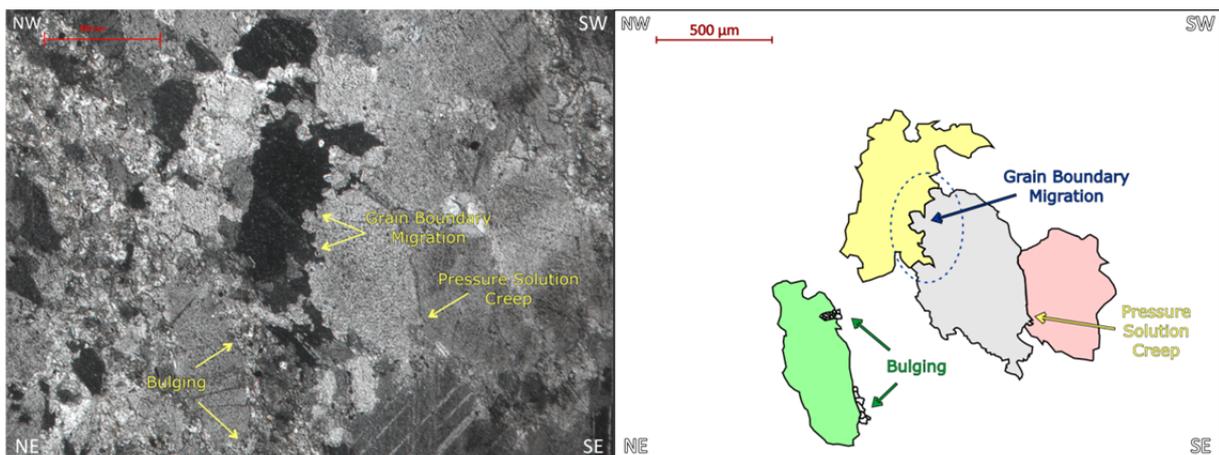
Im Schliff HH45 dominieren mechanische Zwillinge vom Typ I und Typ II. Stellenweise kann ein Übergang von Typ II zu Typ III beobachtet werden. Dieser findet bei Temperaturen knapp über 200°C statt. Man findet häufig Zwillinge vom Typ II, deren verbreiterte Lamellen beginnende *Twin Boundary Migration* zeigen. Daher kann darauf geschlossen werden, dass auch noch bei höheren Temperaturen (>250°C) geringe Deformationsraten geherrscht haben.



Appendix Abb. 11 Links: Dünnschliff mit parallelen Polarisatoren. Alle 4 Typen mechanischer Zwillinge sind erkennbar. Rechts: Einige Körner wurden zur Verdeutlichung hervorgehoben. Die markierten Stellen sind in beiden Bildern ident.

- Detailansicht 3

In diesem Teil des Schliffs sind kaum noch mechanische Zwillinge zu erkennen. Das dominierende Merkmal ist Grain Boundary Migration. Die diffusen, lobaten Korngrenzen sind deutlich zu erkennen. An anderen Korngrenzen findet Kornverkleinerung (Bulging) statt. Stellenweise ist Pressure Solution Creep zu beobachten. Dieser Prozess beschreibt das durch Drucklösung bedingte Eindringen meist kleiner, spitzer Kristalle in benachbarte Körner (Rutter, 1976, 1983; Engelder et al.).

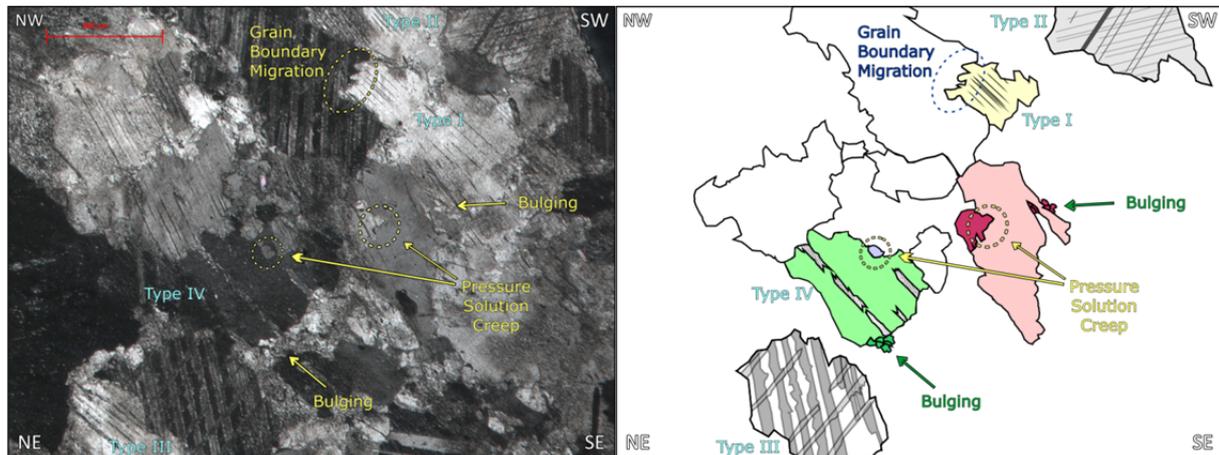


Appendix Abb. 12 Links: Verschiedene Prozesse während der dynamischen Rekristallisation sind zu erkennen. Rechts: Einige Körner wurden zur Verdeutlichung hervorgehoben. Die markierten Stellen sind in beiden Bildern ident.

- Detailansicht 4

Es herrschen Deformationszwillinge von Typ I bis Typ II vor. Stellenweise erkennt man beginnende Twin Boundary Migration und unterbrochene oder gebogene Zwillingslamellen (Typ III in Appendix Abb. 13) oder schon fast zur Gänze rekristallisierte Körner (Typ IV).

Fast alle Körner dieser Detailansicht zeigten Hinweise auf beginnende dynamische Rekristallisierung wie Grain Boundary Migration, Bulging oder Pressure Solution Creep.



Appendix Abb. 13 Links: Neben mechanischen Zwillingen sind auch verschiedene Prozesse der beginnenden dynamischen Rekristallisation zu beobachten. Rechts: Einige Körner wurden zur Verdeutlichung hervorgehoben. Die markierten Stellen sind in beiden Bildern ident.

4. Diskussion

Im Zuge einer Diplomarbeit (Müller, 1994) wurde die Petrographie und Strukturgeologie des Semmering-Wechsel-Gebietes und damit auch des Eulenberges untersucht. Es wurden dabei vier Deformationsphasen beschrieben: (1) Eine NNW-SSE-gerichtete Kompression, (2) eine NE-SW- (bis NNE-SSW-) Kompression, (3) eine E-W- (bis ENE-WSW-) gerichtete Extension und (4) eine E-W-Kompression. Müller war in der Lage, die Deformationsphasen einer relativen zeitliche Abfolge zuzuordnen, wobei die 1. die älteste und die 3. die jüngste ist. Phase 4 konnte zeitlich nicht mit Sicherheit eingestuft werden. Es ist möglich, dass es sich bei ihr um eine Fortsetzung der Rotation von Phase 2 handelt, oder dass sie ein eigenständiges Ereignis darstellt. Im letzteren Fall könnte sie die jüngste Deformationsphase sein (Peresson & Decker, 1994). Die sedimentären und petrographischen Untersuchungen zeigten, dass zumindest die ersten drei Phasen im Miozän stattfanden (Müller, 1994).

Sowohl die 1. als auch die 2. Deformationsphase konnten im Schriff HH 43 nachgewiesen werden. Der Schriff HH 44 zeigt anhand eines von Slickolites abgeschnittenen Veins NE-SW-gerichtete Extension, was der 1. Deformationsphase zuzuordnen sein dürfte. Ob die spätere (W)NW-(E)SE-gerichtete Verkürzungsphase der 2. Phase spröder Deformation in dieser Region entspricht oder der vierten, kann in diesem Fall nicht restlos geklärt werden. Auch im Schriff HH 45 konnte das 2. Deformationsereignis durch Stylolithen und Slickolite Striae nachgewiesen werden.

Hinweise auf die dritte Deformationsphase (E-W-Extension) konnte in keinem der Schriffe gefunden werden.

Das Spektrum der im Schlift HH45 gefunden mikrotektonischen Merkmale zeigt, dass der Marmor Bedingungen der unteren Grünschieferfazies gesehen hat. Dies stimmt gut mit den Beschreibungen von Faupl (1970) und Seemann (1997) überein. Anhand der unterschiedlichen Ausprägungen der mechanischen Zwillinge kann abgeleitet werden, dass während der gesamten Abkühlphase, bis hin zu sehr geringen Temperaturen, der Marmor von Deformation erfasst wurde.

Referenzen

Engelder, T., Geiser, P. A., Alvarez, W. (1981): Role of pressure solution and dissolution in geology. – *Geology* 9, 44-45.

Ferrill, D. A., Morris, P. A., Evans, M. A., Burkhard, M., Groshong, Jr. R. H., Onasch, C. M. (2004): Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer. – *Journal of Structural Geology*, 26: 1521–1529.

Passchier, C. W. & Trouw, R. A. J. (2005): *Microtectonics* (2nd edition). – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 366p.

Peresson, H. & Decker, K. (1997): The Tertiary dynamics of the northern Eastern Alps (Austria): changing palaeostress in a collisional plate boundary. – *Tectonophysics*, 212: 125-157

Rutter, E. H. (1976): The kinetics of rock deformation by pressure solution. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences* 283, 203-219.

Rutter, E. H. (1983): Pressure solution in nature, theory and experiment. – *Journal of the Geological Society, London* 140, 725-740.

B. Aufschlusstabelle und Probendokumentation

Aufschlusstabelle und Probendokumentation

Legende:

Sedimentproben (klastisch)

Proben für Pollenanalyse

Sinterproben

Host-Rock Proben

Paläomagnetikproben

Ergebnisse der U/Th-Datierung:

Probe	Gutes Ergebnis
Probe	Hohe Detrituskorrektur
Probe	Ergebnis nahe am Limit der Methode

Messungen mit dem Gefügekompass:

HF	→	Harnischfläche
FoF	→	Foliationsfläche
BF	→	Bänderungsfläche
SF	→	Schieferungsfläche
L	→	Linear
FC	→	Fasercalcit
GF	→	Initialfuge (Guiding Fracture)

Aufschlusstabelle HÖHLE:

01 BARBARASTOLLEN EINGANG

Fließfacetten (FF) an der Decke + Paragenese
Dreiecksprofil (ebene Decke)

02 RAUM VOR DER WETTERTÜR

ident mit Aufschluss 017 → Details siehe dort

03 SANDBERGHALLE

Versturz → Sedimentgeröll durch Anschnitt von Höhle (≠ Oberfläche reingestürzt)

Nach links (schmaler Gang), dann nochmal links → Fließhorizont mit Facetten

Im Schutt am Weg von Sandberg- zu Eingangshalle: Brocken von bis zu 27 x 15 cm (1x Quarzit, 1x Marmor)

Mäßig gerundet → hohe Fließgeschwindigkeiten!

04 BERTLSCHLUF bis Sinterbecken (Weihbrunnkessel)

Sinterbecken trocken

FF kurz vor dem Knick in Richtung Führungsweg (ca. 3cm Ø), reichen bis an die Decke

FF nach dem Knick ebenfalls Richtung Führungsweg (ca. 4-5 cm Ø), reichen bis auf etwa 2/3 der Ganghöhe

Etwa ab Schlot (auf ca. 2/3 des Weges) keine FF mehr

05 Eingang zur DIETRICHSHALLE

ident mit Aufschluss 19 → Details siehe dort

06 vor WILDSCHÜTZENHALLE

Oben im Durchgang etwa 15 cm hoher Stalagmit

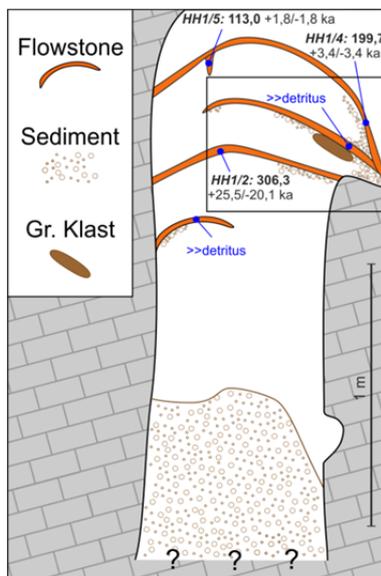
Paragenetisches Canyonprofil mit Hohlkehlen

07 ÖLBERG

HH1/2, HH1/3 (zu große Verunreinigung für Datierung), HH1/4, HH1/5: Flowstoneproben

Probe	²³⁸ U [µg/g]	²³² Th [ng/g]	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁸ U	Alter (un- korr.) [ka]	±	Alter (korr.) [ka]	±
HH 1/2	0,143	65,843	1,130	1,100	317,27	+ 14,17 - 12,08	306,34	+ 25,53 - 20,14
HH 1/4	0,442	42,653	1,301	1,152	201,50	2,81	199,66	3,45
HH 1/5	0,362	56,434	1,363	0,913	116,11	1,26	113,04	1,78

HH 1/2: große detritische Korrektur!



Sehr unreifes klastisches Sediment: sandige Matrix; Silt; Ton (tw. unverfestigte Klasten); Gneis- und Schiefergerölle (kaum bis tw. gut gerundet), Durchmesser 15-20 cm; wenig Quarz
H₂S-Geruch in unverfestigten Tonklasten → org. Anteil!

Kein autochthoner Anteil

Taschen mit Ton an den Seitenwänden

Leichte Gradierung erkennbar (feiner werdend gegen das Hangende; fining upward)

Profilabfolge:

1. Paragenetisches Profil
2. Mit Feinsediment verfüllt
3. Feinsediment wieder ausgewaschen; teilweise in seitlichen Taschen zurückgeblieben
4. Profil mit Grobsediment verfüllt (im Hangenden etwa feiner)
5. Übersinterung des Grobsediments; Kalkkonkretionen und Sediment tw. verfestigt; Lage etwa 1-2 cm mächtig; nicht datierbar
6. Etwa 5-10 cm schlecht sortiertes Sediment
7. Übersinterung des Sediments (Lage 2; Probe HH1/2)
8. Etwa 10 cm mächtiges Sediment mit bis Schiefergeröllen mit zu 18 cm Durchmesser
9. Darüber Sinterlage (Lage 3, bis zu 8 cm dick); nicht datierbar
10. Erneut etwa 2-3 cm mächtiges Feinsediment (siltiger Sand, leicht tonig); mäßig bis schlecht sortiert
11. Danach oberste Sinterlage (Lage 4; Probe HH 1/4)
12. Ausräumung des Sediments; Zurückbleiben von Resten an den Unterseiten der Sinterdecken
13. Tropfsteinbildung (Probe HH1/5)

08 KYRLELABYRINTH, rechts vom Gnomentheater

Sinterdecke über Grobsedimentabfolge; unten feiner körnig (Durchmesser der Komponenten 1-3 cm), oben gröber (Durchmesser 3-5 cm); gerundete Komponenten; Quarz, Gneis, Schiefer

09.1 STEINIGER WEG, am Weg zur Hungerturmhalle

Fließfacetten entlang des Weges, Deckenmäander; Paragenetische Kanäle zwischen Sediment und Höhlenwand

09.2 STEINIGER WEG, am Weg zur Hungerturmhalle

Etwa 3 m vor Aufschluss 10, rechts oben in einer Rampe (auf etwa 3 m Höhe): Flowstone über feinkörnigem Sediment
Probe **HH2** (nicht datierbar)

09.3 SANDTUNNEL, bei Steilstufe

Calcite Rafts (Kalzithäutchen)
Entsprechen Layer im Hangenden des Sandes
Probe **HH3** (nicht datierbar)

10 HUNGERTURMHALLE

Sedimentprofil: (s. auch → 24)
Gröber klastisch (schlecht sortiert, Feinsand bis Feinkies; **HH4/3**)
Ton 2 (ca. 20 cm mächtig; hat Bohrspuren & Wurmröhren)
Sand (ca. 20 cm mächtig; Probe **HH4/2**)
Ton 1 (ca. 20 cm mächtig; **HH4/1**)
Anstehender Marmor, völlig verwittert

11 VORHALLE Richtung WINDLOCH
Sedimentzwischendecke mit Hohlkehlen

12 Hinteres Ende der Teichkluft
Etwa 4 m hinter Aufschluss 23

HH5: Flowstoneprobe

Probe	^{238}U [$\mu\text{g/g}$]	^{232}Th [ng/g]	$^{234}\text{U}/$ ^{238}U	$^{230}\text{Th}/$ ^{238}U	Alter (un- korr.) [ka]	\pm	Alter (korr.) [ka]	\pm
HH 5	0,766	67,583	1,162	0,926	164,82	3,90	162,77	3,91



13 KYRLELABYRINTH, NW-Ecke der Paradieshalle

HH6: Bohrkern von Stalagmitenbasis / Zentrum

Probe	^{238}U [$\mu\text{g/g}$]	^{232}Th [ng/g]	$^{234}\text{U}/$ ^{238}U	$^{230}\text{Th}/$ ^{238}U	Alter (un- korr.) [ka]	\pm	Alter (korr.) [ka]	\pm
HH 6	0,158	0,161	1,227	0,768	103,06	1,62	103,04	1,64

Sediment unter der Sinterdecke (älter als Sediment? Jünger?)



14 KYRLELABYRINTH, Über Stiege zwischen Wurzelstollen und Paradieshalle

HH7: Stalagmiten-Bohrkern

Sample	238U [μg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 7	0,139	0,540	1,034	1,038	512,08	+89,57 -48,48	511,99	+83,43 -48,09

nahe am Limit der Methode!



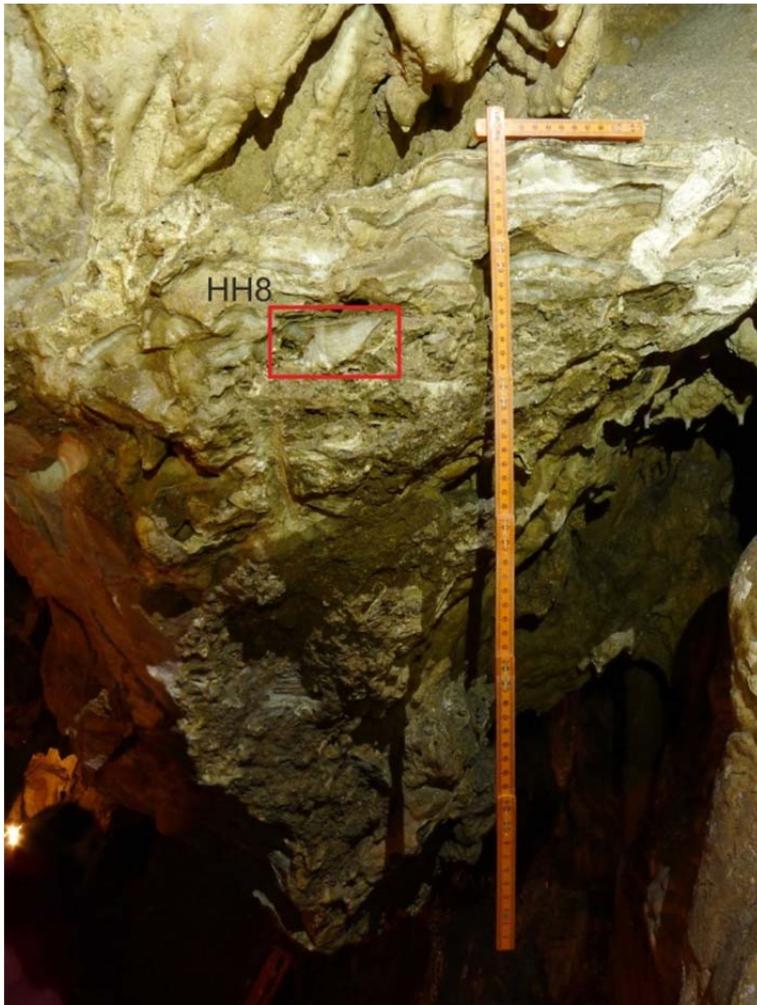
Stalagmit in der Mitte gesprungen und wieder verheilt!

15 KYRLELABYRINTH, Über Stiege zwischen Wurzelstollen und Paradieshalle

HH8: Flowstoneprobe über Sediment

Sample	^{238}U [$\mu\text{g/g}$]	^{232}Th [ng/g]	$^{234}\text{U}/$ ^{238}U	$^{230}\text{Th}/$ ^{238}U	uncorr [ka]	\pm	age corr [ka]	\pm
HH 8	0,127	0,492	1,034	1,036	493,03	+105,66 -53,62	492,93	+103,46 -53,44

nahe am Limit der Methode!



Wechsellagerung von Sinter und Sedimenten

HH8 an der Basis der obersten Sinterlage genommen

16 Raum vor der Wettertüre (rechts)

HH9: Bohrkern aus Stalagmitenbasis - Zentrum

Sample	238U [μg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 9	0,111	10,419	1,219	0,067	8,41	0,23	6,18	1,14

HH10: Flowstone an der Wand (älteste Lage)

HH 10	0,149	57,420	1,108	1,089	340,38	+ 24,44 - 19,50	331,13	+ 30,95 - 23,89
-------	-------	--------	-------	-------	--------	--------------------	--------	--------------------

große detritische Korrektur!

HH11: Flowstonelage über Sediment

HH 11	0,195	95,983	1,199	0,985	183,60	3,67	172,03	+ 7,23 - 6,35
-------	-------	--------	-------	-------	--------	------	--------	------------------

große detritische Korrektur!

unter Sinterfahne und Sediment (→ Wand-Flowstone mit Pebbles)

HH12: Flowstonelage über Sediment

HH 12	0,202	213,309	1,029	0,937	289,75	+13,44 -11,27	256,07	+21,93 -17,63
-------	-------	---------	-------	-------	--------	------------------	--------	------------------

große detritische Korrektur!

HH13: Oberste Flowstonelage über Sediment

HH 13	0,181	126,007	1,243	0,663	98,01	1,45	80,82	+ 7,70 - 6,95
-------	-------	---------	-------	-------	-------	------	-------	------------------

große detritische Korrektur! - Passt stratigraphisch nicht zu HH11

HH14: Flowstonelage über Sediment - jüngste Lage

HH 14	0,151	3,843	1,177	0,012	1,72	0,10	1,10	0,33
-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------	------

HH25: schlecht sortierter Sand-Kies



17 Raum vor der Wettertüre (direkt vor der Wettertüre), links (östlich)

HH15: Flowstonelage (Basis) überm Schutt (strat. jünger als HH16)

Sample	238U [µg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 15	0,202	40,695	1,163	0,759	116,34	1,82	111,46	2,61

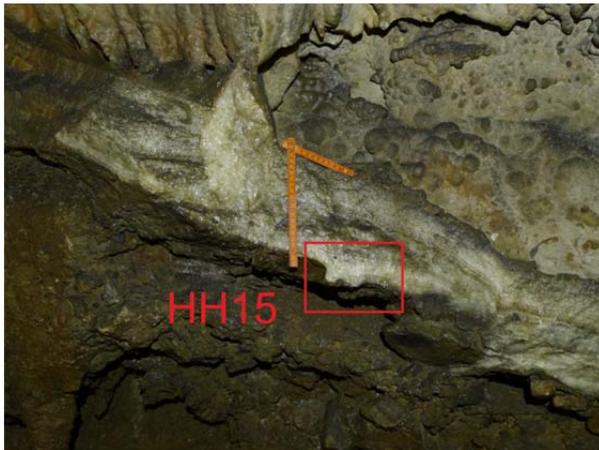
Übersinterter Stalagmit

rechts (westlich)

HH16: Flowstonelage im Schutt (jünger)

Sample	238U [µg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 16	0,298	24,429	1,106	0,767	127,48	1,78	125,41	1,93

Feinkörniges Sediment (KG mm-cm), gut gerundet, mit allochthonem Anteil; s-paralleler Tropfstein im Sediment



HH17: Flowstonelage im Schutt

HH 17	0,163	78,949	1,092	1,075	356,03	+ 33,06 - 25,35	343,93	+ 44,10 - 30,71
-------	-------	--------	-------	-------	--------	--------------------	--------	--------------------

große detritische Korrektur!

wurde noch einmal gemessen:

HH 17_2	0,127	54,715	1,081	1,072	381,83	+ 38,17 - 28,57	371,10	+ 46,37 - 33,61
---------	-------	--------	-------	-------	--------	--------------------	--------	--------------------

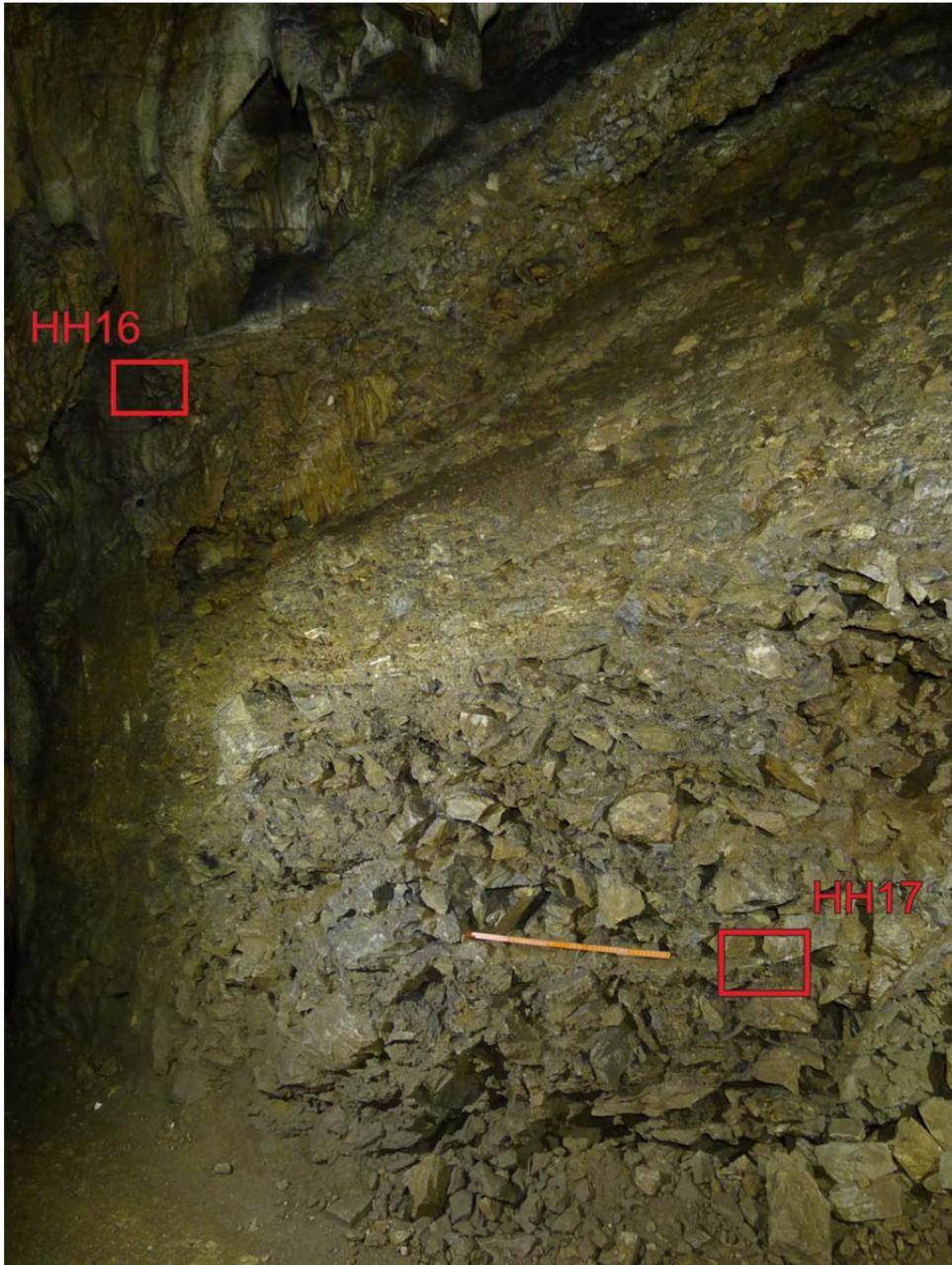
große detritische Korrektur!

Großer (Schutt-)Sedimentkörper: grobklastisch (Korngrößen bis 40 cm Durchmesser), fining upward, paraautochthone Komponenten, nicht gerundet.

Basis: nur autochthon! Nicht gerundet, sehr groß (ca. 10 – 40 cm)

Top: kleine Komponenten (mm-cm), allochthon und autochthon, gut gerundet

Dazwischen Flowstone-Lagen, die das Sediment übersintern → mehrere Events.



- 18 Künstlicher Stollen zwischen dem unteren Teil der Dietrichshalle und Fahne mit Quaste**
Stollen ist älter als 120 Jahre.
2 rezente Sinterproben für Isotopensignatur:

HH18: Rezenter Flowstone von der Decke



HH19: Rezenter Flowstone aus Wasserrinne oberhalb Stiege (Bildbreite ca. 35 cm)



19 Eingang zur Dietrichshalle (rechts; siehe auch 05)

HH20: Flowstone fast Top

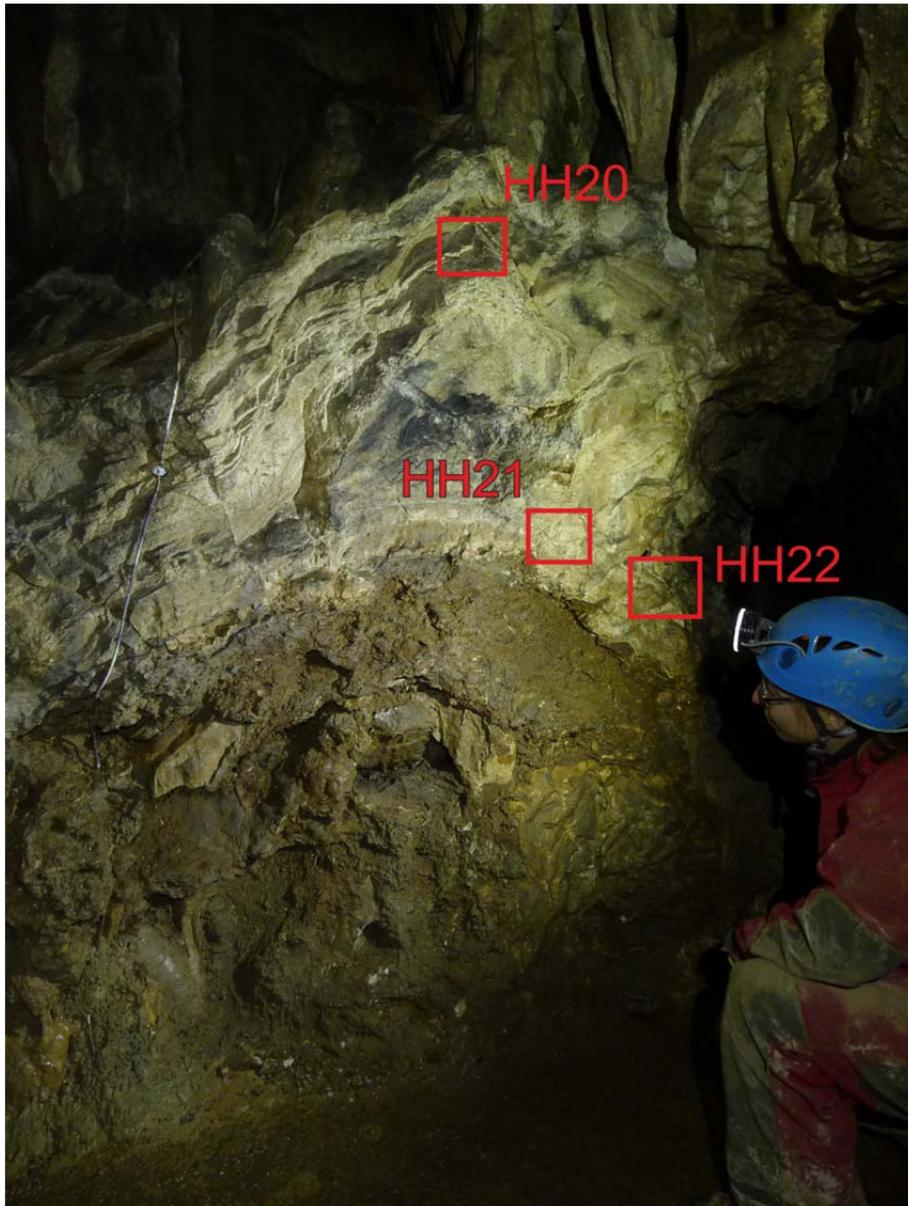
Sample	238U [μg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 20	0,148	25,928	1,178	0,802	123,50	1,99	119,38	2,50

HH21: Flowstone Mitte

HH 21	0,175	5,114	1,160	1,024	210,08	6,91	209,43	+ 7,38 - 6,84
-------	-------	-------	-------	-------	--------	------	--------	------------------

HH22: Flowstone über Sedimentlage (älteste Lage)

HH 22	0,170	8,385	1,145	1,110	296,15	+ 23,06 - 19,59	295,08	+ 23,18 - 19,06
-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------------------	--------	--------------------



20 Gegenüber Harnischfläche vor Großem Dom

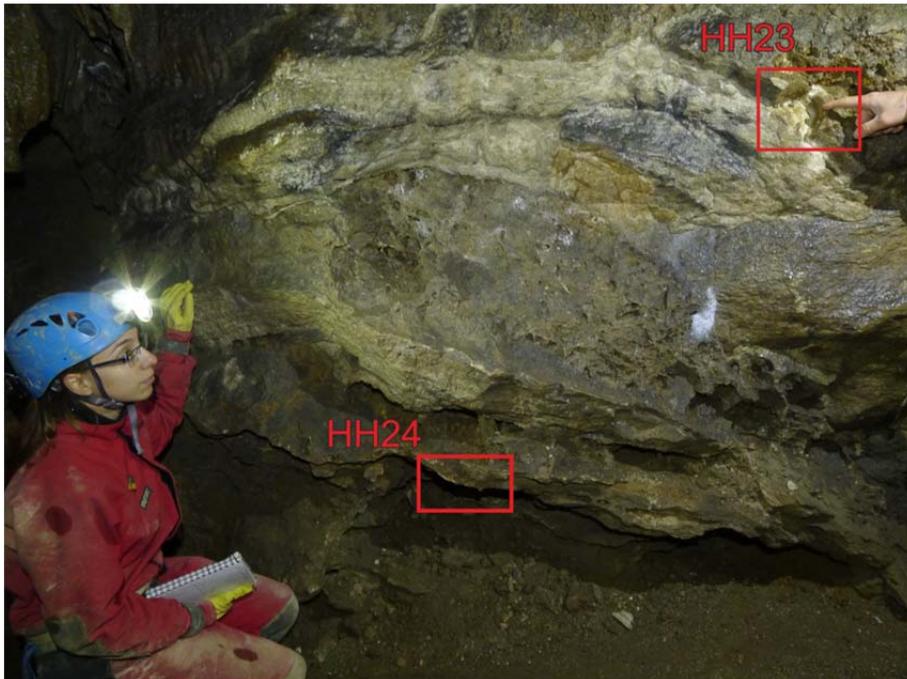
HH23: Flowstone Top

Sample	^{238}U [$\mu\text{g/g}$]	^{232}Th [ng/g]	$^{234}\text{U}/$ ^{238}U	$^{230}\text{Th}/$ ^{238}U	uncorr [ka]	\pm	age corr [ka]	\pm
HH 23	0,167	115,780	1,081	1,116	775,30	212,25	761,92	230,44

nahe am Limit der Methode!

HH24: Flowstone Zwischenlage

HH 24	0,177	2,327	1,136	1,087	280,21	+ 9,31 - 8,66	279,92	+ 9,41 - 8,68
-------	-------	-------	-------	-------	--------	------------------	--------	------------------



Feinsediment / Ton in Pockets → Calcitverfüllung der Trockenrisse

Tropfstein (links außerhalb des Bildes): älter als das Sediment und die Sinterlagen; zum Datieren leider ungeeignet

21 Raum vor der Wettertüre

Sediment-Großprobe HH25; genommen unterhalb von HH12 (→ s. 16)

22 Nach Teich (aber vor 12)

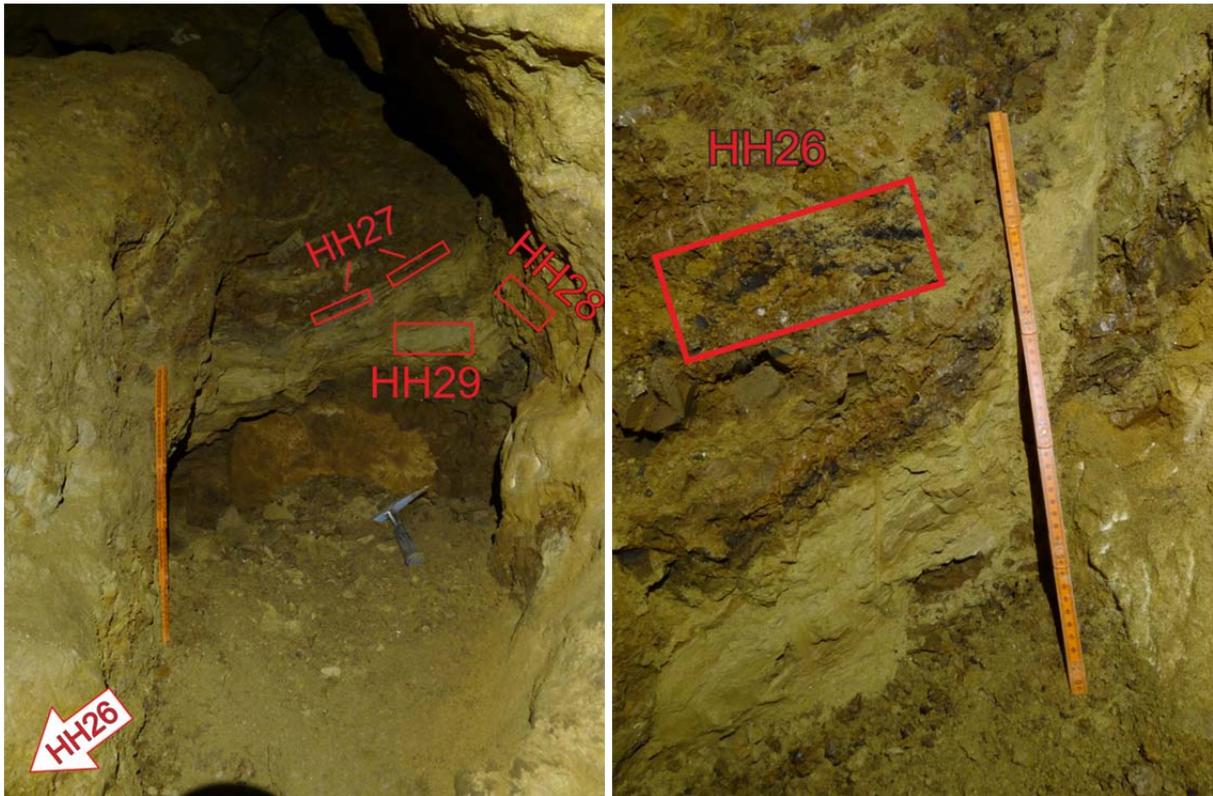
HH27: Dunkles Sediment für Pollenanalyse (hängend)

HH28: Dunkler Ton

HH29: Heller Feinsand

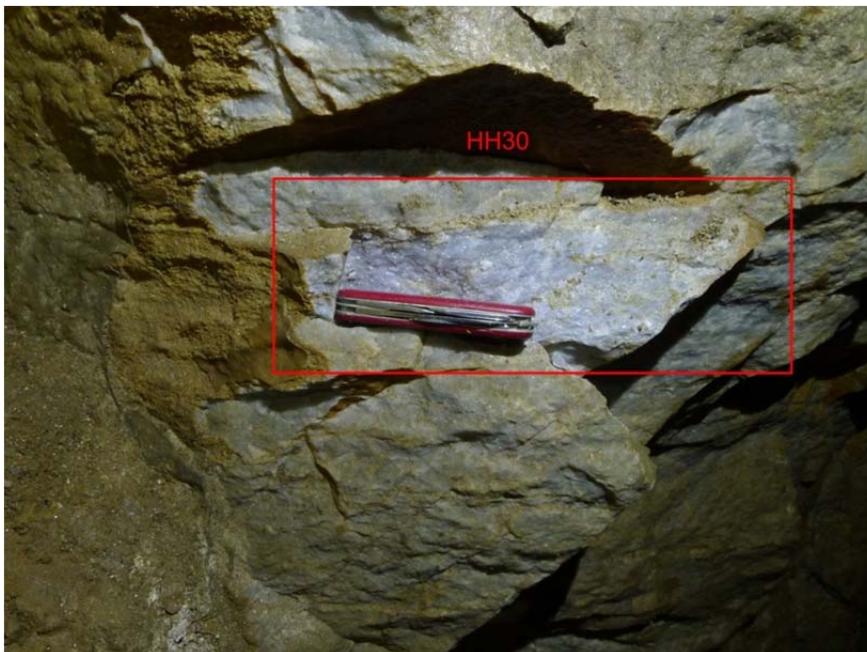
HH26: Dunkles Sediment für Pollenanalyse (liegend)

Paläomagnetik-Proben [PM Profil 01](#) von hier genommen!



23 Führungsweg gegenüber Teich, “Haus der Schlümpfe”

HH30: Host-Rock Probe



vom Führungsweg vor Abstieg zum Teich

24 Hungerturmhalle Richtung Krokodilgang links (gleiches Profil wie 10)

HH4/3: schlecht sortierter Sand-Kies

HH31: Dunkles Sediment für Pollenanalyse (ca. 3 cm unter Top genommen;
dunkle Lage im groben Sediment zwischengeschaltet)

Schlecht sortierter Sand-Kies

Tonlage

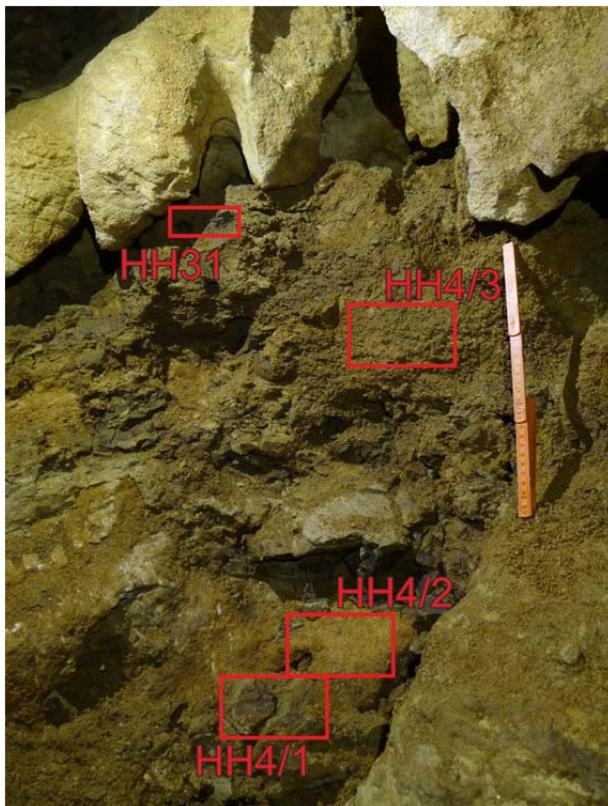
HH4/2: Heller, schluffiger Feinsand

HH4/1: Dunkler Ton ?

Anstehender Marmor (stark verwittert)

} ca.
70 cm

In der groben Sedimentlage finden sich (wie in 07) häufig Würmer. Sie sind weiß, haben viele kleine Füßchen und befinden sich bevorzugt in Spalten/ Rissen.



25 Wasserschloss (2 m über tiefstem Punkt)

HH32 Wandsinter (älter als Sand/Kies, jünger als Paragenese)

Sample	238U [µg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 32	0,484	214,933	1,185	0,828	135,79	1,83	124,96	4,45

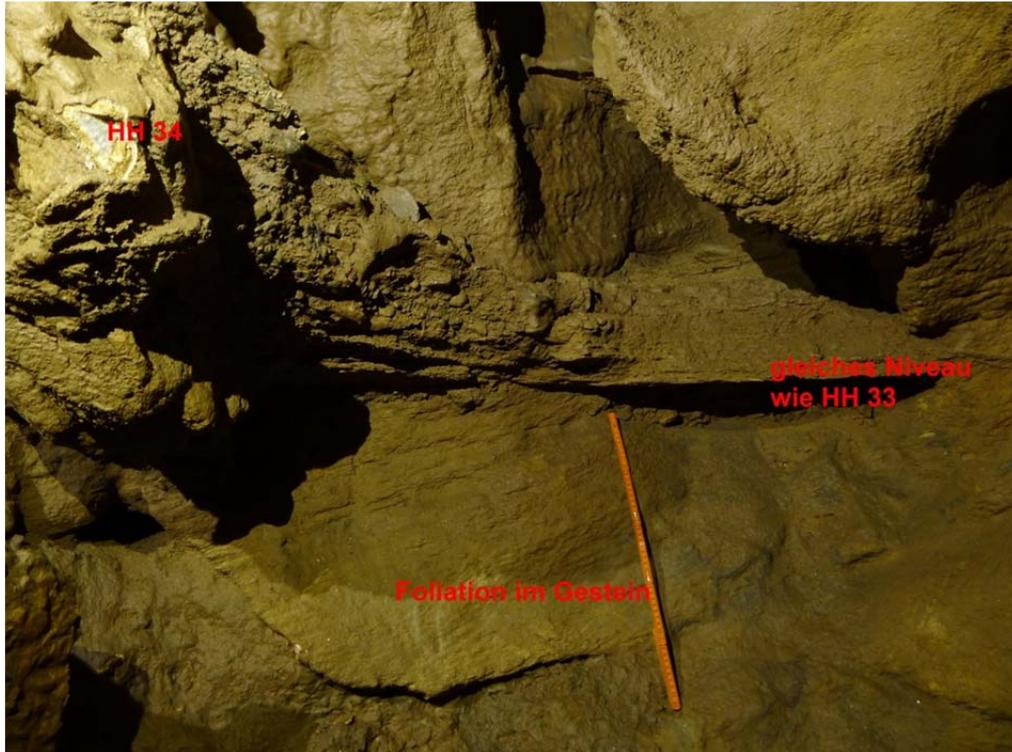
große detritische Korrektur!

HH33 Sinterdecke (jünger als 32) zwischen Sand/Kies (mit Resten von gleicher Lage wie 32)

HH 33	0,185	24,418	1,220	0,830	121,39	1,92	118,43	2,22
-------	-------	--------	-------	-------	--------	------	--------	------



HH34 Wandsinter (gleich wie 32, nur Gegenüberseite = Nordseite)



über und unter HH33 ist ein schlecht sortiertes Sediment aus Silt, Sand, Kies und Steinen (Gneisgerölle bis 17 cm). Die Sinterdecke (HH33) fällt mit ca 20° ein.

26 Rauchspalten, SCM-Dome (nahe tiefster Punkt)

HH35 kleiner Stalagmit auf braunem Schluff

HH36: brauner Schluff, feinsandig, tonig (ca. 20 cm unter Sediment Oberkante)

Im braunen Schluff wurde ein Loch gegraben: er ist rund 80 cm mächtig, darunter folgt Grobsand mit Ton (zumindest bis 95 cm).

Sample	238U [μg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 35	0,1270	37,5	0,9751	0,168	29,70	0,56	20,6	4,8



HH37: Kompetente Linse im Kalkmarmor
Große CC-Kristalle, Glimmerschiefer ? und Gneis Fragmente ?
mit kleinem Harnisch.



27 Rauchspalten, nahe VP16

Fließfacetten an Decke und im oberen Bereich der Wände
Längen in cm: 8, 5, 7, 8, 7, 7, 6, 4, 4, 7, 6, 6, 9, 5, 5, 4, 4, 6
Mittelwert: 6,0 cm; n = 18 (4 bis 9 cm)



28 Ende der Toten Kluft (höchster Punkt der HH)

HH38 Stalagmit auf verfestigtem, verkippten Sediment

Sample	238U [μg/g]	232Th [ng/g]	234U/ 238U	230Th/ 238U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 38	0,856	2,852	1,403	1,452	319,30	5,69	319,25	5,80

Höchster Punkt der HH (hinterstes Ende der Toten Kluft)

Viele Spaghetti an der Decke

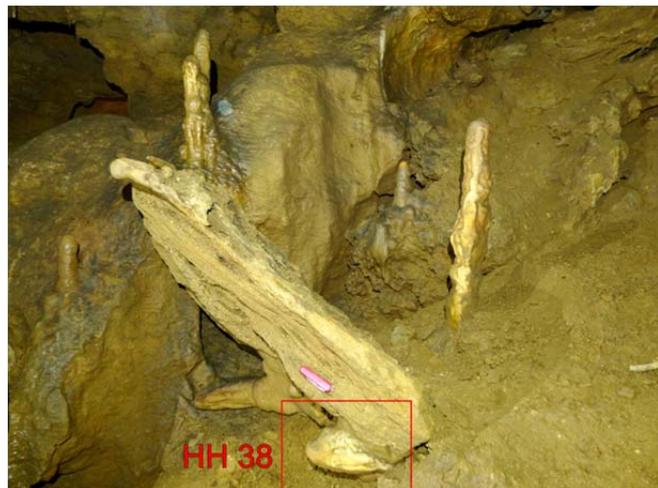
Flowstone / Stalagmiten auf Lockersediment

Davor: verfestigtes Sediment mit zwei Tropfsteinen, die auf dem Kopf stehen und rotiert wurden → standen früher vermutlich an der Stelle der jetzt intakten Tropfsteine

Trockenrisse an der Unterseite des Sediments

Abfolge:

- Tropfsteine sind auf Lockersediment gewachsen
- Es folgte Wassereintrag
- Die Basis wurde weggeschwemmt
- Auf der Unterseite des sich durch das Wasser verfestigenden Sediment bilden sich versinterte Trockenrisse und Sinterröhrchen
- Basis wird komplett weggeschwemmt
- Rotation und Kippung des Gebildes
- Neue Tropfsteine bilden sich an derselben Stelle



Host Rock: lagiger Marmor, verwittert, gelb, boxwork- bzw. rauhwarkeartig

Zwischenlagen & Kluftfüllungen wittern heraus

Sieht teilweise aus wie eine Störungsbreccie (rotierte und zerbrochene Stücke im Gesteinsverband)

Etwa horizontale Grenze ca. 75 cm unter Decke. Fällt mit 330/10 (+/- 10-15° in alle Himmelsrichtungen) ein. Verläuft ungefähr parallel mit der Foliation des Marmors

Darunter: Marmor ist verwittert, weiß, massiger als oberhalb der Grenze

Sinterröhrchen sind ausschließlich oberhalb der Grenze, im gelben Marmor!

29 Haus der Schlümpfe, links neben Host Rock Probe HH30

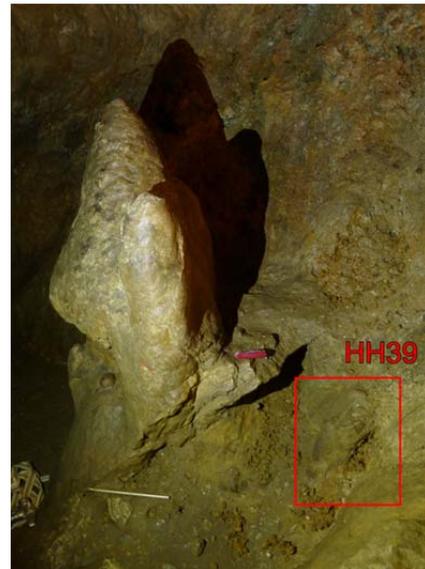
HH39 Stalagmit in Sediment, umgeben von älterem rotbraunem Ton

Sample	²³⁸ U [μg/g]	²³² Th [ng/g]	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³⁰ Th/ ²³⁸ U	uncorr [ka]	±	age corr [ka]	±
HH 39	0,288	1,841	1,097	1,124	495,63	+ 68,15 - 41,51	495,50	+ 67,43 - 41,69

nahe am Limit der Methode!

Abfolge:

- Stalagmit (HH39; hangend)
- Sediment (Schluff, sandig, kiesig)
- Flowstone
- Roter Ton (liegend)



30 Eingangshalle

Messung der alluvial notches (Wandkehlen) mittels Schlauchwaage:

- Fallen Richtung Höhle
- Undulieren
- Es gibt 2 Horizonte der sg. „Laughohldecke“, diese fallen ebenfalls Richtung Höhle ab
- Die Wandkehlen sind auf der rechten Wand höher als links (sofern es sich um dasselbe Ereignis handelt)
- Es gibt min. 5 verschiedene Ereignisse, alle haben FF Richtung Berg
 - 2 im Deckenbereich
 - 2 ± auf Augenhöhe
 - 1 am Boden

31 Rutsche

Alluvial notches: nach Sedimentverfüllung Profil ± elliptisch erweitert

„Wasserstandswulst“: Sinter auf ehemaligem Wasserstand; entspricht Sinterteppich

Wandkehlen fallen von der Rutsche aus gesehen links zum Hungerturm hin ab, rechts steigen sie an → windschief!

Es muss sich also um ehem. Sedimentstände handeln!

32 Sandtunnel

Wasserstandsmarken, horizontal!

Darüber: Kondenswasserkorrosion

Darunter: keine Kondenswasserkorrosion

An der Wasserstandsmarke sind Sinter → beginnender Sinterteppich?

An der Decke befinden sich stark verwitterte Fließfacetten. Fließrichtung ist nicht (mehr) eindeutig identifizierbar. Sie sind vermutlich älter als die Korrosionsdecke.

33 Sedimentstufe (wie 09.3)

HH40 Konkretion (verfestigter Sand)

HH40 Sand (hell, gleichförmig, geschichtet)



34 Nach Wettertüre

Harnischflächen mit 2 Linearen

HF I 082/79 L I 356/27 (dex?; älter)

L II 173/03 (dex; jünger)

HF II 096/84 L I 003/23 (dex?; älter)

L II 182/07 (dex; jünger)

35 Zwischen den Stiegen

Harnischflächen eingemessen (s. Appendix C)

Mylonitische Isoklinalfalten im Marmor → eoalpines Movement?

Vermutung: je nach strain-Rate gab es mylonitische Bänderung oder Burch & spröden Versatz entlang derselben Flächen

Hier haben so gut wie alle Flächen Bewegung + Lineare!

Handstück HH44 (Markierung: HF 045/85 L 315/15 (o.))

36 Harnisch

Gegenüber von → 20

Harnischfläche etwa 1,5 m Durchmesser (siehe Appendix Abb. 1. d.)
Keine Damage Zone! Extrem begrenzte, lokalisierte Bewegung!
Geringer (mm-Bereich) Versatz

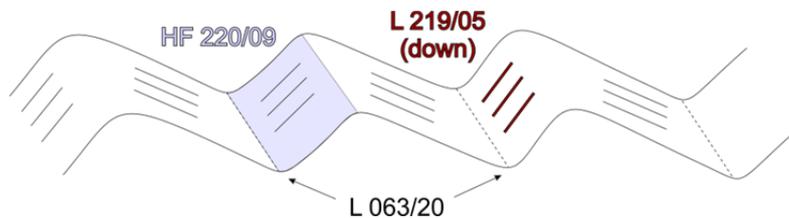
HF 045/78 L 326/40 dex

HF 046/79 L 320/32 dex

37 Vor Karl-Ludwig-Tunnel

Zuckerkörniger Marmor mit einer Vielzahl kleiner Harnischflächen (s Appendix C)

Harnischflächen bilden „Wellen“; undulieren sehr stark!
Das sollte im monomineralischen Gestein eigentlich nicht so sein
Lineation ist ungewöhnlich stark ausgeprägt



Es sieht aus, als würde der Host Rock in sich zerfallen und entlang von vielen verschiedenen Flächen gleichzeitig bewegt werden

Vermutung: Bewegung ist älter als Extrusionstektonik!

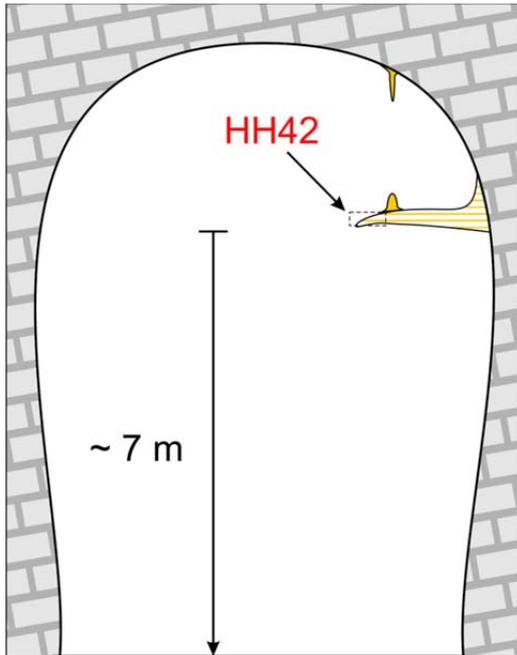
Könnte aus dem Abkühlungsstadium des Mylonits stammen

38 Fürstenhalle, Wildschützenkamin

Probe HH 42 (kein Foto vorhanden)

Zu dieser Probe liegt noch kein Alter vor

FF ganz vage Richtung Taubenloch; sind jedoch schon stark angewittert

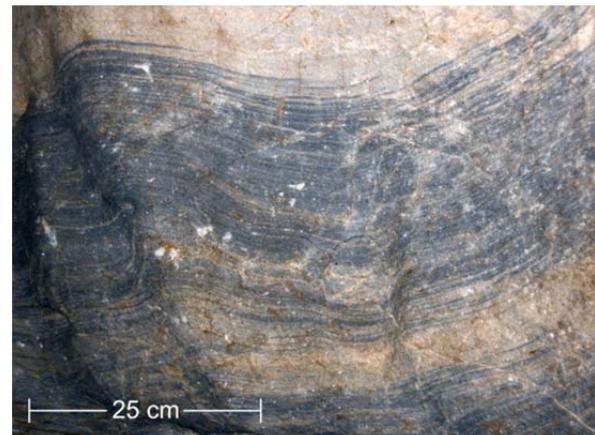


- 39 Globus**
FolF 220/25

- 40 Stiege Richtung Taubenloch**
Zuckerkörniger Marmor
Dunkle Lage franst aus, geht in helle über
→ intramylonitische Isoklinalfaltung

Links: Lukis Lieblings-Deckenmäander
BF 145/20

Danach: Kalzithäutchen → ehemaliges
Sinterbecken (Rückstaubecken)



- 41 Kyrle Eingang**
FolF 240/27 L 160/14 (spröd & duktil ident)
FolF 230/27

Handstück HH 45 (Markierung 275/65 (u.))

- 42 Eingangshalle Babarastollen (siehe auch → 30)**
Linke Wand Richtung Höhle: Handstück HH43 (Markierung: 077/77 (u.))

- 43 (Kurve vor) Steiniger Weg**
HF 240/78 L 146/16 (dex)

Steiniger Weg ist voll von FF
FF zeigen höhleneinwärts

Es gibt mehrere Level von FF → Profil mit ca. 1 m

- Level 1 (oberer) Längen in cm: 8; 7; 5; 5; 4; 4; 4,5; 4; 4; 3,5; 5; 4; 4; 3; 3,5; 5
Mittelwert: 4,6 cm; n = 16
- Level 2 (unterer) Längen in cm: 3; 3,5; 3; 3; 2; 2,5; 2; 3; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2,5; 1,5; 1,5;
2,5; 2,5; 2; 3; 2; 2
Mittelwert: 2,4 cm; n = 21

44 Krokodilgang

Mehrere Level von FF → immer wieder Sedimentation und paragenetische Erweiterung nach oben

Fließrichtung bergewärts

Profil mit ca. 50 cm

- Level 1 (oberer) Längen in cm: 2,5; 3; 2,5; 1,5; 2; 2; 1,5; 2,5
Mittelwert: 2,2 cm; n = 8
- Level 2 (unterer) Längen in cm: 5; 4; 6; 4; 5; 6; 4; 4,5; 5; 5; 7; 7; 6,5; 5; 5,5; 7; 7
Mittelwert: 5,5 cm; n = 17

45 Sintertunnel

Längen der Fließfacetten in cm: 5; 9; 7; 5,5; 5; 4; 5,5; 4,5; 3,5; 3,5; 4,5; 5,5; 4,5; 4; 4; 3,5; 5

Mittelwert: 4,9 cm; n = 17

46 Irrgang (Gemeißelte Röhre)

GF = 280/77

FF höhleneinwärts

47 Felsendom

Große Harnischfläche, die den oberen Teil der Halle dominiert

Kann nicht direkt eingemessen werden, mit Feldbuch geschätzt

Keine ausreichend große Fläche exponiert → kein Linear gefunden/gemessen

Durch die Morphologie konnte die Kinematik bestimmt werden (abschiebend)

HF 050/53	}	abschiebend (ca. 0,5 cm)
HF 052/55		
HF 053/53		
HF 075/73 L I 374/18 (dex; FC)	}	selbe HF, Linear biegt um
HF 079/75 L II 175/12 (dex; FC)		

48 Großer Dom

Solution notches! → Lösungsrampen

Sind nicht horizontal; sind nach oben hin offen → fortwährende aufwärts gerichtete Lösung!

BF 143/13

HF 065/83 L 340/18 dex (1; Stylos, FC)
(eher unbedeutend)

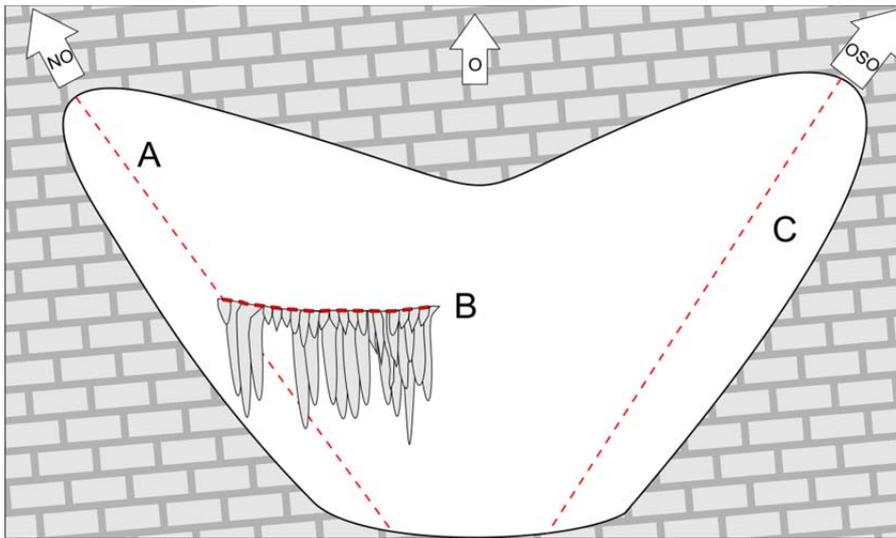
49 Riesenkluft

3 große Störungen vermutet, wegen Versinterung aber nicht direkt einzumessen
Messungen an Störungsparallelen Flächen durchgeführt

A: HF 110/56 L 045/38 an der Gegenseite (rechts) gemessen

B: BF = KF 275/30 schichtparallele Kluft
 KF 262/23 an der Gegenseite gemessen

C: HF 046/64 aus 2 Perspektiven geschätzt
 HF 065/80



Aufschlusstabelle OBERFLÄCHENKARTIERUNG:

Aufschluss	UTM_Rechtswert (m)	UTM_Hochwert (m)
HO01	573487	5273929
HO02	573324	5274015
HO03	573230	5274028
HO04	573088	5274017
HO05	573022	5274025
HO06	572862	5274200
HO07	572845	5274226
HO08	572853	5274588
HO09	572989	5274687
HO10	573435	5274611
HO11	573354	5274407
HO12	573955	5274131
HO13	574111	5274099
HO14	574181	5274163
HO15	574251	5274376
HO16	574470	5274270
HO17	574622	5274396
HO18	574492	5274339
HO19	573658	5274301

HO 01 Südrand des Eulenberges

Marmor, zerbrochen (fast schon Kataklasit)

Kalkmarmor (braust mit HCl), weiß, grobkristallin, verwittert braun

Harnischfläche mit Styloliten (siehe auch Appendix Abb. 1 und Appendix Abb. 2)

HF 060/85 L 340/20

Kataklasit mit Fasercalciten

HF 060/52 L I 150/15 L II 250/10



HO 02 Südrand des Eulenberges (weiter westlich)

Kalkmarmor mit vielen Harnischflächen und zwei bevorzugten Bruchrichtungen

FoIF 025/35

HF I 220/58 L 256/60 (abschiebend, down)

Stylolith!

HF II 075/70 L 098/80 (down)

Fasercalcit

HO 03 Südrand des Eulenberges (weiter westlich)

Kalkmarmor-Wand, stark zerbrochen

HO 04 Südwestlichster Punkt des Eulenberges

Kalkmarmorwand

Eingang zu Koderholdlucke (mit Kamin und Sedimentzwischenendecke) und Koderholspalte

HO 05 Kalkmarmor-Klippe

Hellglimmer auf Schichtflächen

Mn(?)-Ausfällungen auf Schichtflächen (→ Dendrit-Bildung)

HO 06 Kalkmarmor

Gleich wie HO 05

HO 07 Kalkmarmor

Stärker verwittert, Foliation kaum bis nicht mehr erkennbar

Verwitterung: zerbrochen, weiß-grau mit rötlicher Färbung (Fe?) der Klüfte

Zwischen HO 06 und HO 07 liegen schlecht gerundete Schiefergerölle

HO 08 Kontakt zwischen Marmor und Biotit-Schiefer NW des Eulenberges

Marmor: dunkel, massig, hat aber Foliation (FF 196/34)

Kontaktfläche 310/28

Schieferungsfläche des Bt-Schiefers 212/55

[Probe HO 08/01: Marmor über dem Kontakt](#)

[Probe HO 08/02: Schiefer unter dem Kontakt](#)



HO 09 Wand aus Marmor

Marmor: weiß, massig, verwittert dunkelgrau

Große Störung (Bergzerreißung; zu groß zum Einmessen); streicht NE-SW

FolF 125/05 bzw. 211/11

Viel Schiefer im Geröll

HO 10 Schiefer-Hügel in Straßenkurve

SF 168/35 L 244/05 (dextral/up)

SC-Gefüge!

HO 11 Zentral (nördlich) auf Eulenberg

2 Dolinen:

- Große: ca. 3 m tief, 6 m Durchmesser
- Kleine: ca. 1 m tief, 5 m Durchmesser

Darüber: Schiefer-Gerölle! → Kontakt?

HO 12 Steinbruch gegenüber Hermannshöhle

Marmor, gebankt, massig

Grobkristallin, Foliationsflächen durch Verwitterung zu erkennen, nicht aber im Anstehenden

FolF 305/12

FolF 300 /20

Große Kluftflächen, keine Stylolithe, keine Fasercalcite, keine Damage Zone

KF I 052/89

KF II 355/70

KF III 198/89

KF IV 050/78

HO 13 Östlich des Steinbruches

Übergang von Karbonat-Geröllen zu Gneis-, Schiefer- und Phyllit-Geröllen

HO 14 Nordöstlich von HO 13

Kalkmarmor wie HO 12

FolF 270/29

HO 15 Bergrücken gegenüber Eulenberg Richtung Kernstockwarte

Kalk, massiv, recht verwittert

HO 16 Südhang unter Kernstockwarte

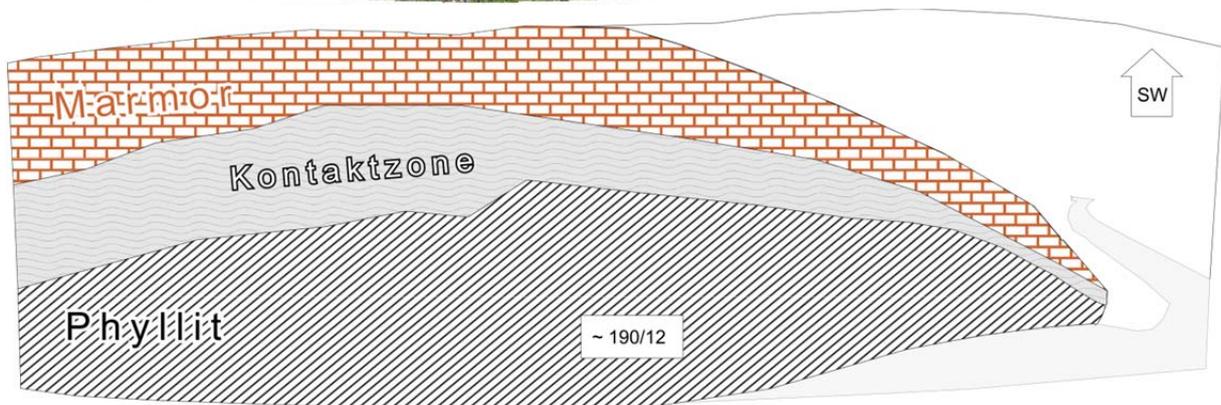
Kalk, FolF wittert heraus

Langer, breiter Aufschluss (Klippe)

HO 17 Östlich unter Kernstockwarte, in Kurve

Kontaktzone zwischen Phyllit und Karbonat

Stark verwittert, kein eindeutiger Kontakt identifizierbar; braune, erdreiche Übergangszone



HO 18 Südlich unterhalb Kernstockwarte

Folierter Marmor, bricht stark

FoIF 198/09

HO 19 Klippen im N des Eulenberges

Etwa in der Mitte der Marmorklippen (8-12 m hoch): Initialfuge mit Protoröhren

Initialfuge 293/80

Gleich daneben FoIF 252/08

C. Messwerttabelle

Of/Höhle	Aufschlussnummer	Art der Fläche	Fläche		Linear		Richtung (0=?; 1=auf; 2=ab; 3=dex; 4=sin)	Qualität (0=?; 1= excellent; 2=good; 3=poor)	Aufschlussort	Bemerkung	Merkmal
			Fallrichtung	Fallwinkel	Streichrichtung	Fallwinkel					
H	10	HF	40	74	318	33			Hungerturmhalle		
H	10	HF	42	73	325	37			Hungerturmhalle		
H	13	BF	256	17					Paradieshalle		
H	13	HF	236	13	136	3	3		Paradieshalle		
H	17	HF	133	20					Vor der Wettertür	an der Decke links	
H	18	HF	20	75	328	68	1		Dietrichshalle vor Stiege		
H	18	HF	237	77	314	40	3	1	Vor Stiege (rechts)	HF I	
H	18	HF	237	75	308	46	3	1	Vor Stiege (rechts)	HF I	
H	18	HF	24	88	278	58	3	1	Vor Stiege (rechts)	HF II	
H	20	HF	45	78	326	40	3		Harnisch		FC, Stylos
H	20	HF	46	79	320	32	3		Harnisch		FC, Stylos
H	20	HF	55	74	324	33	3	1	Harnisch		
H	20	HF	45	80	320	37	3	1	Harnisch		
H	24	HF	100	62	186	1	3		Richtung Krokdilgang	unbedeutend, nicht viel Versatz	FC
H	24	HF	96	57	5	4	3		Richtung Krokdilgang	unbedeutend, nicht viel Versatz	FC
H	28	BF	330	10					Tote Kluft (29)	parallel zur Kontaktfläche unterschiedlich verwitternden Marmore	
H	34	FoIF	55	30					Nach Wettertür vor Dietrichshalle		
H	34	HF	80	67	0	37	1		Nach Wettertür vor Dietrichshalle		
H	34	HF	82	79	356	27	0		Wettertüre	älter	
H	34	HF	82	79	173	3	3		Wettertüre	jünger	
H	34	HF	96	84	3	23	0		Wettertüre	älter	
H	34	HF	96	84	182	7	3		Wettertüre	jünger	
H	35	HF	48	88	310	38	3		auf 2. Stiege links (zw. DH und Harnisch)	ACHTUNG EISEN!	
H	35	HF	31	76	315	46	3		auf 2. Stiege links (zw. DH und Harnisch)	ACHTUNG EISEN!	
H	35	HF	41	73	323	36	3		auf 2. Stiege links (zw. DH und Harnisch)	ACHTUNG EISEN!	

OF/Höhle	Aufschluss- nummer	Art der Fläche	Fläche		Linear		Richtung (0=?; 1=auf; 2=ab; 3=dex; 4=sin)	Qualität (0=?; 1= excellent; 2=good; 3=poor)	Aufschlussort	Bemerkung	Merkmal
			Fall- richtung	Fall- winkel	Streich- richtung	Fall- winkel					
H	35	HF	43	67	339	47	3		auf 2. Stiege links (zw. DH und Harnisch)	ACHTUNG EISEN!	
H	35	BF	222	32					auf Stiege vor Harnisch	ACHTUNG EISEN!	
H	35	HF	56	72	353	57			auf Stiege vor Harnisch	ACHTUNG EISEN!	
H	35	HF	9	63	98	27			auf Stiege vor Harnisch	ACHTUNG EISEN!	
H	35	BF	215	20					Geländer zur Dietrichshalle	ACHTUNG EISEN!	
H	35	BF	250	25					Zwischen den Stiegen	ACHTUNG EISEN!	
H	35	BF	282	20					Zwischen den Stiegen	ACHTUNG EISEN!	
H	35	HF	250	30	320	15			Zwischen den Stiegen		
H	35	HF	45	85	315	15			Zwischen den Stiegen		
H	37	BF, HF	140	5	290	4	2	2	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	älter	FC
H	37	FoIF	230	20					Karl-Ludwig-Tunnel	HF ist vmtl Strylofi!	
H	37	HF	240	73	315	14			Karl-Ludwig-Tunnel		
H	37	HF	140	73	230	3	4	1	Karl-Ludwig-Tunnel	HF ist vmtl Strylofi!	
H	37	KF	306	3					Karl-Ludwig-Tunnel		
H	37	BF, HF	140	5	40	1	2		Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	jünger	
H	37	HF	58	79	62	65	0		Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)		
H	37	HF	58	79	340	25	0		Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)		
H	37	HF	58	84	328	30	0		Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	sollten etwa denen vom Geländer und der 2. Stiege entsprechen	
H	37	KF	175	8					Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)		
H	37	HF	220	9	219	5	2	1	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	undulierende HF (HF B)	
H	37	HF	17	69	335	50	1	3	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF A	
H	37	HF	220	9	63	20	0	0	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF B (bin etwas verwirrt über dieses Linear... ?)	

OF/Höhle	Aufschlussnummer	Art der Fläche	Fläche		Linear		Richtung (0=?; 1=auf; 2=ab; 3=dex; 4=sin)	Qualität (0=?; 1= excellent; 2=good; 3=poor)	Aufschlussort	Bemerkung	Merkmal
			Fall- richtung	Fall- winkel	Streich- richtung	Fall- winkel					
H	37	HF	61	78	305	45	1	1	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF C	
H	37	HF	61	78	315	16	3	2	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF C	
H	37	HF	128	69	26	9	3	2	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF D	
H	37	HF	115	64	53	36	2	1	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF E	
H	37	HF	139	81	227	10	4	1	Karl-Ludwig-Tunnel (Eingang)	HF F, wurde schon mal gemessen	
H	38	BF	233	3					nach Fürstenhalle		
H	39	FoIF	220	25					Globus		
H	40	KF	235	69					kurz vor Treppen zum Taubenloch		
H	40	BF	145	20					vor Taubenloch	Luki's Lieblingscanyon; BF scheint umzubiegen	
H	41	BF	227	26					Kyrle Eingang		
H	41	FoIF	240	27	160	14			Kyrle Eingang	L spröd & duktil ident!	
H	41	FoIF	230	27					Kyrle Eingang		
H	43	HF	240	78	146	16	3	2	Kurve vor Steiniger Weg		
H	44	HF	95	70	10	5	3		Richtung Krokodligang, bisschen weiter	HF I (älter)	FC
H	44	HF	93	67	182	6	3		Richtung Krokodligang, bisschen weiter	HF I (älter)	FC
H	44	HF	41	42	2	35	2	3	Richtung Krokodligang, bisschen weiter	HF II (jünger)	FC
H	44	HF	29	75	301	17	3	2	Richtung Krokodligang, noch weiter	ist für einige Meter raumbestimmend	
H	46	KF	280	77					Gemeißelte Röhre	Guiding Fracture	
H	47	HF	75	73	347	18	3	1	Felsendom	ident, biegen um	FC
H	47	HF	79	75	175	12	3	1	Felsendom	ident, biegen um	FC
H	47	KF	50	53			2		Felsendom	abschiebend (~0,5cm)	
H	47	KF	52	55			2		Felsendom	abschiebend (~0,5cm)	

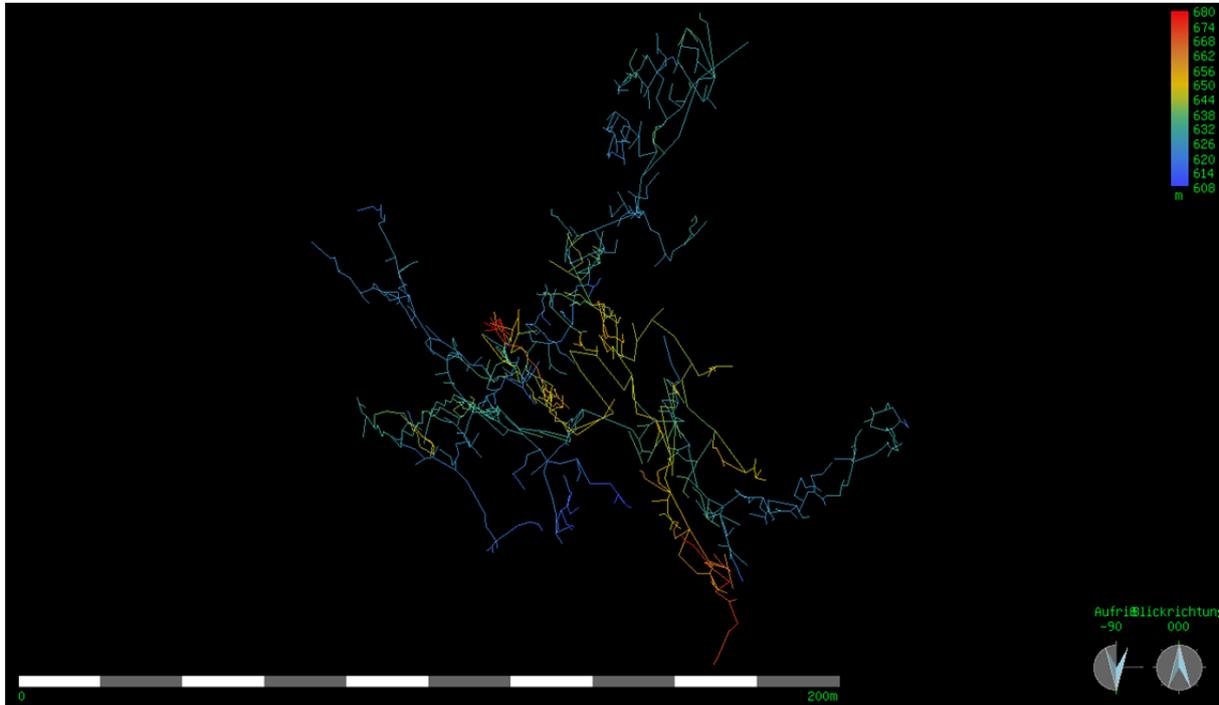
OF/Höhle	Aufschlussnummer	Art der Fläche	Fläche		Linear		Richtung (0=?; 1=auf; 2=ab; 3=dex; 4=sin)	Qualität (0=?; 1= excellent; 2=good; 3=poor)	Aufschlussort	Bemerkung	Merkmal
			Fall- richtung	Fall- winkel	Streich- richtung	Fall- winkel					
H	47	KF	53	53			2		Felsendom	abschiebend (~0,5cm)	
H	47	HF	58	69	334	11	3	1	Felsendom	HF B	
H	47	HF	210	89	299	13	3	0	Felsendom	HF C	
H	47	HF	113	85	20	6	4	1	Felsendom	HF D	
H	48	HF	50	84	327	34	3	1	Großer Dom, Richtung Ausgang	ident, dextral aufschiebend	FC
H	48	HF	50	84	327	34	1	1	Großer Dom, Richtung Ausgang	ident, dextral aufschiebend	FC
H	48	HF	65	83	340	18	3	1	Großer Dom	eher unbedeutend	FC, Stylos
H	48	BF	143	13					Großer Dom		
H	49	BF	250	35					Riesenkluft		
H	49	BF, KF	275	30					Riesenkluft		
H	49	HF	110	56	45	38			Riesenkluft	an der Gegenseite gemessen	
H	49	KF	115	60					Riesenkluft		
H	49	KF	262	23					Riesenkluft	auf der Gegenseite gemessen	
H	49	KF	46	64					Riesenkluft	aus 2 Perspektiven geschätzt	
H	49	KF	65	80					Riesenkluft	aus 2 Perspektiven geschätzt	
H	49	KF	80	60					Riesenkluft	Kataklasit	
H	49	KF	70	65					Riesenkluft	Kataklasit	
H	49	KF	80	75					Riesenkluft		
OF	HO-01	HF	148	90	60	15	4		HO-01		FC
OF	HO-01	HF	60	85	340	20	4		HO-01		Stylos
OF	HO-01	BF	238	5					HO-01	Kalkmarmor	
OF	HO-01	KF	255	82					HO-01		
OF	HO-01	KF	60	52	150	15			HO-01		
OF	HO-01	KF	60	52	350	10			HO-01		
OF	HO-02	HF	75	70	98	80	2		HO-02		FC
OF	HO-02	HF	220	58	256	60	2		HO-02		Stylos
OF	HO-02	BF	25	35					HO-02	Kalkmarmor	
OF	HO-06	BF	62	14					HO-06	Kalkmarmor	
OF	HO-08	BF	196	34					HO-08	dunkler Marmor	
OF	HO-08	FoF	212	55					HO-08	Schiefer	
OF	HO-08	Kontaktfl	310	28					HO-08	Kontaktfläche	
OF	HO-09	BF	125	5					HO-09	Marmor	

OF/Höhle	Aufschluss- nummer	Art der Fläche	Fläche		Linear		Richtung (0=?; 1=auf; 2=ab; 3=dex; 4=sin)	Qualität (0=?; 1= excellent; 2=good; 3=poor)	Aufschlussort	Bemerkung	Merkmal
			Fall- richtung	Fall- winkel	Streich- richtung	Fall- winkel					
OF	HO-09	BF	211	11					HO-09	Marmor	
OF	HO-10	FoIF	170	30					HO-10	Schiefer	
OF	HO-10	FoIF	208	35					HO-10	Schiefer	
OF	HO-10	FoIF	210	25	290	10	3		HO-10	Schiefer	
OF	HO-10	FoIF	168	35	244	5	1		HO-10	Schiefer	
OF	HO-12	FoIF	305	12					HO-12	Marmor	
OF	HO-12	FoIF	300	20					HO-12	Marmor	
OF	HO-12	KF	52	89					HO-12	Marmor	
OF	HO-12	KF	355	70					HO-12	Marmor	
OF	HO-12	KF	198	89					HO-12	Marmor	
OF	HO-12	KF	50	78					HO-12	Marmor	
OF	HO-14	FoIF	270	29					HO-14	Marmor	
OF	HO-17	FoIF	190	12					HO-17	Phyllit	
OF	HO-18	FoIF	198	9					HO-18	Marmor	
OF	HO-19	FoIF	252	8					HO-19	Marmor	
OF	HO-19	KF	293	80					HO-19	Marmor	

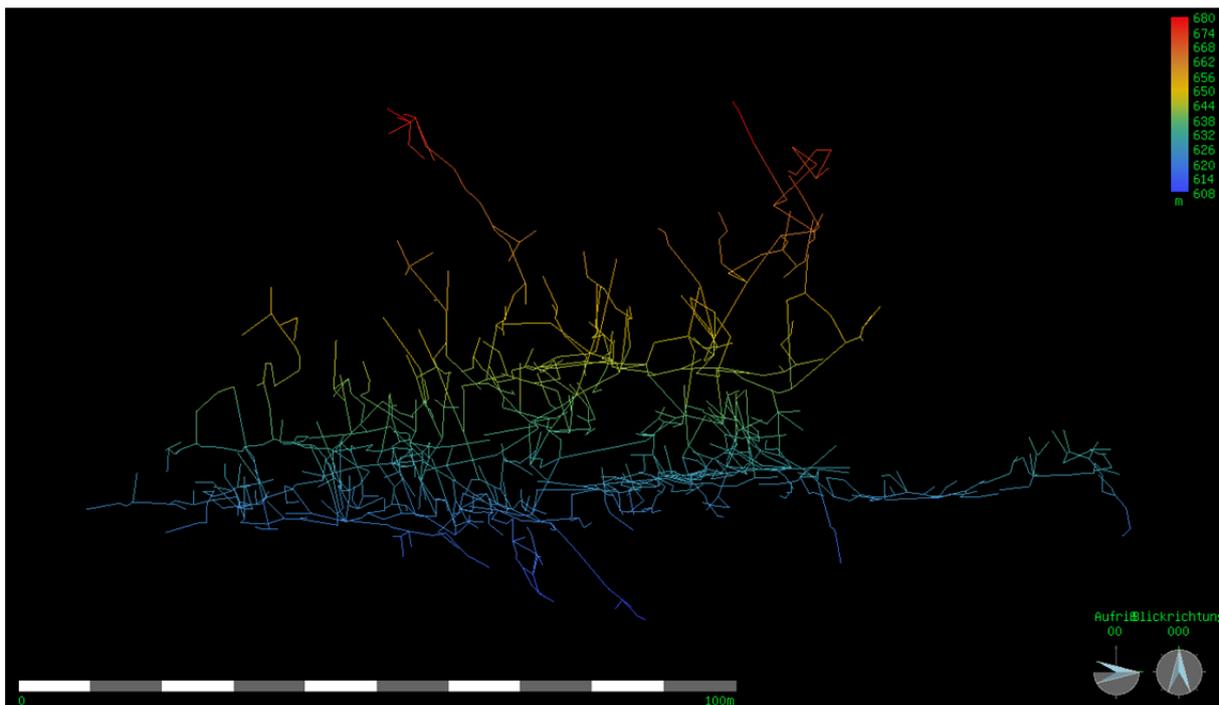
D. Screenshot des 3D-Modells

Im Rahmen des FEMtech Praktikums im Jahr 2012 wurden alle Höhlen des Hermannshöhlensystems digitalisiert und sind somit dreidimensional darstellbar. Einzige Ausnahme bildet das *Kyrlelabyrinth* (NW-Teil der Hermannshöhle), dessen Vermessungsdaten noch nicht eingegeben wurden. Es ist daher auf den Screenshots nicht dargestellt.

Zur Darstellung der 3D-Modelle wurde die Software Spelix verwendet (<http://survex.com>).



Appendix Abb. 14 Grundriss der Hermannshöhle (Blickrichtung N).



Appendix Abb. 15 Aufriss der Hermannshöhle (Blickrichtung N).

E. Curriculum Vitae

Name: Andrea Schober

Ausbildung

- 2011 – 2014: *Masterstudium der Erdwissenschaften* an der *Universität Wien*, Althanstraße 14, 1090 Wien
- 2007 – 2011: *Bachelorstudium der Erdwissenschaften* an der *Universität Wien*, Althanstraße 14, 1090 Wien
- 1999 – 2007: *Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Wien 3*, Kundmanngasse 20-22, 1030 Wien
Zweig: Gymnasium mit zweiter lebender Fremdsprache
- 1995 – 1999: *Volksschule VS3*, Kolonitzgasse 15, 1030 Wien

Beruflicher Werdegang

- 2012 – heute: **Angestellte Teilzeit:** *HPC Austria GmbH*, Schlossplatz 13/1, 2361 Laxenburg
- 2010 – 2012: **Freie Dienstnehmerin:** *HPC Austria GmbH*, Schlossplatz 13/1, 2361 Laxenburg
- Februar 2012: **Angestellte:** *Naturhistorisches Museum Wien*, Karst- und Höhlenkunde, Museumsplatz 1/10, 1070 Wien
„FEMtech“: Vom BMVIT gefördertes Praktikum für Studentinnen

Tutorien am Earth-Science-Center Wien

- SS 2011: Strukturgeologie und Tektonik
- SS 2011: Sedimentologie
- WS 2010/11: Stratigraphie und Erdgeschichte

Wissenschaftliche Publikationen

Schober, A. & Exner, U. (2011): 3D structural modelling of an outcrop-scale fold train using photogrammetry and GPS mapping. – *Austrian Journal of Earth Sciences*, 104 (2), 73-79.

Präsentationen auf internationalen Kongressen

Vortrag

Schober, A., Plan, L., Scholz, D. & Spötl, C. (2013): Speleogenesis of a 3D-maze cave (Hermannshöhle, Lower Austria). – 16th International Congress of Speleology, Brno.

Schober, A. (2013): Speleogenesis of a 3D-maze cave (Hermannshöhle, Lower Austria). – Studentische Vortragsreihe, Universität Wien.

Poster Präsentation

Schober, A., & Plan, L. (2013): A 3D-maze cave (Hermannshöhle, Lower Austria): Hypogene speleogenesis or just much ado about nothing? – 21st International Karstological School, 2nd Circular, Postojna.

Schober, A., & Plan, L. (2013): Palaeohydrology of a 3D-maze cave (Hermannshöhle, Lower Austria). – EGU General Assembly, Vienna.

Schober, A. & Exner, U. (2011): 3D structural modelling of an outcrop-scale fold train using photogrammetry and GPS mapping. – EGU General Assembly, Vienna.