



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Sedimente der Höhlen am Dachstein-Nordrand und ihre
Aussage für die Höhlen- und Landschaftsentwicklung

verfasst von / submitted by

Knud Bethke, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2020 / Vienna, 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 066 815

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Erdwissenschaften

Betreut von / Supervisor:

Mag. Dr. Lukas Plan

Inhalt

| | |
|---|----|
| Zusammenfassung | 5 |
| Abstract | 7 |
| Einleitung | 8 |
| Allgemeines über Höhlensedimente | 8 |
| Geographie..... | 10 |
| Geologie | 11 |
| Untersuchte Höhlen | 12 |
| Dachstein-Mammuthöhle (DMH) | 12 |
| Dachstein-Rieseneishöhle (DRE) | 12 |
| Schönberghöhle (SBH) | 12 |
| Bisherige Modelle zur Höhlenentstehung..... | 12 |
| Bisherige Untersuchungen zu den Höhlensedimenten..... | 14 |
| Ziel und Fragestellung..... | 15 |
| Methoden | 17 |
| Feldmethoden..... | 17 |
| Kornformbestimmung..... | 20 |
| Korngrößenbestimmung | 20 |
| Röntgendiffraktometrie (XRD) | 20 |
| Karbonat Bestimmung | 21 |
| Schwermineralanalyse..... | 21 |
| ²³⁰ Th/U Datierung | 21 |
| Ergebnisse | 24 |
| Aufschlüsse und Profile | 24 |
| Dachstein-Mammuthöhle (DMH) | 24 |
| Dachstein-Rieseneishöhle (DRE) | 33 |
| Schönberghöhle (SBH) | 35 |
| Korngrößenanalysen..... | 36 |
| Profil M-01 | 36 |
| Profil M-02..... | 37 |
| Profil M-06..... | 38 |
| Profil E-01 | 38 |
| Profil E-02..... | 40 |
| Organischer Anteil | 40 |
| Röntgendiffraktometrie..... | 41 |
| Profil M-01 | 41 |

| | |
|---|----|
| Profil M-02..... | 42 |
| Profil M-06..... | 43 |
| Profil E-01 | 44 |
| Profil E-05..... | 44 |
| Profil S-01 | 45 |
| Karbonatgehaltsbestimmung | 46 |
| Proben E-01e und E-01f..... | 46 |
| Proben M-02a und M-02b..... | 46 |
| M-13 | 46 |
| S-01c..... | 46 |
| Interpretation | 46 |
| Schwermineralanalyse..... | 47 |
| Probe M-01a..... | 47 |
| Probe E-01a..... | 47 |
| Probe E-01c | 47 |
| Probe E-01d | 47 |
| Probe E-01e..... | 47 |
| Probe E-01f | 49 |
| Probe E-03 | 49 |
| Probe E-05b | 49 |
| Interpretation der Schwermineralzusammensetzung | 49 |
| Th/U Datierung | 50 |
| M-07a und M-07b..... | 50 |
| M-08b und M-08d..... | 50 |
| M-09..... | 50 |
| Diskussion | 51 |
| 1 Heller Höhlenton..... | 51 |
| 2 Dunkler Höhlenton | 52 |
| 3 Grünliche Sedimentgemenge..... | 53 |
| 4 Karbonatische Kiese und Steine | 54 |
| Schlussfolgerungen | 56 |
| Dank | 57 |
| Literatur | 58 |
| Anhang | 61 |
| Probenpunkte | 61 |
| Dachstein-Mamuthöhle..... | 61 |
| Dachstein-Rieseneishöhle | 83 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| Schönberghöhle..... | 87 |
| Tabellen der Korngrößenanalyse..... | 90 |

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit Sedimenten dreier Höhlen am Dachstein-Nordrand in den Nördlichen Kalkalpen (Oberösterreich, Österreich): Der Dachstein-Mammuthöhle (67 km Länge), der Dachstein-Rieseneishöhle (3 km) und der Schönberghöhle (9 km). Das Dachsteinmassiv ist mit 580 km² Fläche eines der größten Karstmassive Österreichs und ist schon seit Kaiserzeiten ein beliebtes Wander- und Erholungsgebiet. Nach der Entdeckung der Mammuthöhle und der Rieseneishöhle im Jahre 1910 spielt auch die Höhlenforschung eine wichtige Rolle. Um ein genaueres Bild von der Entstehungsgeschichte der untersuchten Höhlen zu erhalten, wurden an 23 Profilen und Aufschlüssen 43 Sedimentproben entnommen und analysiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Sieb- und Sedigraphmessungen an den Proben durchgeführt. Diese zeigen einen fluviatilen Transport und dass sich die Strömungsgeschwindigkeit drastisch geändert haben. Die Komponenten weisen eine Rundung auf, welche auf einen längeren Transport hinweist. Imbrikationen zeigen eine generell westgerichtete Strömung, die mit morphologischen Formen korreliert. XRD Messungen zeigen die Mineralzusammensetzung der Proben. Fünf Proben von Sinterlagen wurden im Rahmen dieser Arbeit mittels der ²³⁰Th/U Ungleichgewichtsmethode datiert um die Ablagerung der Sedimente zeitlich einzugrenzen.

Auch wenn die meisten Profile eine oftmalige Umlagerung einzelner Schichten anzeigen, konnte durch Zusammenführen aller Daten und Profile die klastischen Sedimente in vier Haupttypen eingeteilt werden und eine relative Altersabfolge bestimmt werden.

- 1) Die ältesten Sedimente sind grünliche Gemenge aus schlecht sortierten Silten bis Grobkiesen. Nur wiederaufgearbeitete Schichten (z.B. Sand- oder reine Augensteinlagen) zeigen eine gute Sortierung. Die grünliche Färbung beruht auf Klinochlor. Die Mächtigkeit dieser Schicht kann über 2 m ausmachen. Meist kann diesem Typ *Channel-* bzw. *Thalweg-*Fazies zugeordnet werden; beides deutet auf schnell fließende Höhlenbäche hin. Der hohe Quarzanteil lässt schließen, dass es sich um Anteile der oligo- bis miozänen Augenstein-Formation handelt, die in die Höhle eingeschwemmt wurde. Die aus den Korngrößen abgeleiteten Paläo-Fließgeschwindigkeiten stimmen mit denen von Fließfacetten an den Höhlenwänden überein. Dies lässt darauf schließen, dass dieses Sediment in einer frühen Phase der Höhlenentstehung abgelagert wurde. In einem anderen Projekt erhobene Einschwemmalter an Quarzen (*Al/Be-burial-age-dating*) von über 4.4 Ma unterstützen eine obermiozäne bis pliozäne Ablagerung.
- 2) Darüber folgen meist massige, dunkle rötlich-braune Tone. Vermutlich handelt es sich um Paläoböden, die in die Höhle eingespült wurde, wobei der Zeitpunkt unklar ist. Dieser Fraktion konnte hauptsächlich die *Slack-water-*Fazies zugeordnet werden.
- 3) Vorwiegend Kiese und Steine, die fast ausschließlich aus hellem Kalk bestehen, bilden den dritten Typ. Sie treten nur lokal auf. Neben einem teils geringen Feinsand-Anteil kommen Steinen mit bis zu 0,2 m Größe vor. Die Schichtung in einem der Aufschlüsse (Konglomeratwand) legt fluviatilen Transport nahe. Komponenten mit bis zu 0,8 m Durchmesser, die sehr nahe der Oberfläche lagern, wurden wahrscheinlich vom Gletscher in die Höhle geschoben.
- 4) Die jüngsten Sedimente sind Lehme von hellrosa-gelblicher Farbe. Diese wurden schon früher als *Heller Höhlenton* bezeichnet. Sie sind in den drei untersuchten Höhlen fast allgegenwärtig und schließen die meisten Profile ab. Die Mächtigkeit der Schichten kann rund 1 m betragen. In höher gelegenen Höhlen am Dachstein fehlt der *Helle*

Höhlenton (Günther-Stummer-Höhle, 1950 m S.h.), in tiefer gelegenen Höhlen (Hierlatzhöhle, 900 m S.h.) bildet er bis über 4 m mächtige Schichten. Auffällig ist eine Feinschichtung: die hellen kalkreicheren Lagen haben bis zu bis 88 % Karbonatanteil und die dunkleren sind silikatreicher. Es ist wahrscheinlich, dass es sich um Warven handelt, aber mangels datierbarem Material nicht nachweisbar. Für die Entstehung dieses Sedimentes der *Slack-Water*-Fazies wird glaziale Erosion der Karboante an der Oberfläche und gletscherbedingter Aufstau der Wässer in den Höhlen angenommen (*Pleistocene backflooding*). Mittels $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierung von darunter oder darüber lagernden Sintern konnten eine Ablagerung zwischen 5 und 700 ka festgestellt werden.

Abstract

This thesis is primarily concerned with sediments of three caves at the northern edge of the Dachstein Massif in the Northern Calcareous Alps (Upper Austria, Austria): the Dachstein-Mammuthöhle (67 km length), the Dachstein-Rieseneishöhle (3 km) and the Schönberghöhle (9 km). The Dachstein forms with 580 km² one of the largest karst massifs in Austria. Since the times of the Austrian emperors it is a famous trekking and recreation area. After the discovery of the Mammuthöhle and the Rieseneishöhle in the year 1910, cave exploration and the study of caves plays an important role.

For this thesis, 23 sections and outcrops were recorded and 43 samples were collected and analysed in different parts of the three caves to get a better picture of their formation history. These samples were analyzed with respect to stratigraphy, grain size, mineral composition (XRD), heavy minerals, carbonate content, and color. Sieve and Sedigraph measurements showed that the current velocity changed drastically over time. Components of the samples showed a roundness which indicates longer travel times. Imbrication showed that the current ran relatively constant in western direction.

Even though many layers in the profiles show frequent redistribution, it was possible by combination of data and profiles to classify four main types of clastic sediments and establish their relative ages.

- 1) The oldest sediments are poorly sorted, often greenish, and can reach at least 2 m in thickness. They range from silt to very coarse gravel and are dominated by quartz and mica; the greenish color derives from chlorite. This type of sediment is often associated with channel- or thalweg-facies. The origin of the sediments is the Oligocene to early Miocene Augenstein Formation. As the flow velocity for transporting the gravel corresponds to that indicated by scallops at the cave walls, it is assumed that it was deposited during an initial phase of speleogenesis. Layers of moderately to well sorted quartz gravel or greenish sands are interpreted as a fractionation of this sediment. Dating of quartz rich samples from other projects gave burial ages of more than 4.4 Ma.
- 2) Subsequently, a dark brown fine-grained sediment was deposited, which lacks layering. It can be classified as a slack-water facies. It is most likely attributed to a paleo soil that derived from the Augenstein Formation and was washed into the cave. However, the time of deposition is unclear.
- 3) Only at a few places, a coarse sediment or conglomerate with rounded limestone components occurs. Grain size ranges from sand to pebbles. At two outcrops, layering indicates fluvial transport, but at one site, which is very close to the earth surface, it seems that gravels and boulders (up to 0.8 m in diameter) were pushed into the cave by glacier ice.
- 4) The youngest sediment is a bright pinkish yellow, thin-layered silty clay. It has already been described as *Heller Höhlenton*. It is almost omnipresent on the top of the profiles in the three caves and can reach thicknesses of up to one meter. It is likely that the layering represents varves, but due to the lack of datable material this can't be proven. The carbonate content is generally high and can reach 88 %. In other caves in Dachstein at low altitude (e.g. Hirlatzhöhle at 900 m asl.), this sediment type is much thicker (>4 m), and in elevated ones (e.g. Günther-Stummer-Höhle at 1950 m asl.), it is missing. It derived from glacial erosion and was deposited as slack-water facies due to glacial back flooding. Deposition during the Pleistocene is supported by ²³⁰Th/U-dating of flowstone layers that grew between 5 and 700 ka.

Einleitung

Allgemeines über Höhlensedimente

Höhlen sind gute Sedimentfallen. Die dann sogenannten Höhlensedimente spielen bei der Ausbildung von Höhlen eine große Rolle: Sei es durch teilweises Versperren ganzer Höhlenabschnitte oder Sedimentbedeckung des Bodens und der nun nur nach oben möglichen Ausbildung der Höhlengänge, der so genannten Paragenese (Farrent & Smart 2011). Zum Teil kann es auch zur lateralen Ausbreitung der Höhlengänge kommen. Durch die mitgeführte Sedimentfracht, die das Reibungsvermögen von Wasser erhöht, kann dies ebenfalls das Ausbilden von Flutwasserlabirinth ermöglichen. Die Ausbildung von Höhlen ohne Sedimentverfüllung erfolgt fundamental unterschiedlich von der von Höhlen mit Höhlensedimenten kann man in zwei Kategorien unterteilen: allochthone Sedimente und autochthone Sedimente.

Allochthone Sedimente sind durch Zuflüsse wie Ponore, große Höhleneingänge mittels Flüssen, Rückstau von Flüssen/Quellen, Einwaschen über Lösungsröhren durch überliegende Gesteine und Glazialeintrag meist in die Höhle eingespült worden. Hier handelt es sich hauptsächlich um klastische Sedimente. Auch die Luft kann als Transportmittel von Löss und Asche genutzt werden, um in die Höhle zu gelangen. Die Menge der eingespülten Sedimente wird meist durch externe Klimafaktoren bestimmt. In diesem Fall spielen Warm- und Kaltzeiten mit dem Ausbilden von Gletschern (Schmelzwasser besonders im Sommer) eine große Rolle beim Entstehen als auch beim jetzigen Erscheinungsbild der Höhle.

Die häufigste Form des Eintragens in die Höhle ist die mittels eines Flusses. Im Inneren der Höhle bilden sich dann auch spezifische Fazies aus (Abb. 1). Farrent & Smart (2011) führen fünf Faziestypen auf: *Thalweg*-, *Channel*-, *Slack-Water*-, *Diamicton*- und *Backswamp*-Fazies. *Thalweg*-Fazies befindet sich mitten im Strom und besteht aus sehr gut sortiertem Material. *Channel*-Fazies ist die aus seitlich abgelagertem Gestein eines Flusses und besteht aus einer Bandbreite verschiedenster, mal mehr oder weniger gut sortierten, unterschiedlich großen Komponenten. *Slack-Water*-Fazies wird in stillem Wasser, meist Seen, gebildet. Hier findet man gut sortierte Feinsedimente (z.B. *Heller Höhlenton*). *Diamicton*-Fazies besteht aus Sedimenten von Schüttungsereignissen wie z.B. *Debris flows*. Sie bestehen aus allen Sedimentgrößen und sind schlecht sortiert. *Backswamp*-Fazies Sedimente entstehen meist durch langsamen Oberflächenabfluss, wobei Labyrinth entstehen. Hier lagern sich meist feinkörnige Sedimente mit eingestreuten größeren Komponenten ab.

Glaziale Ereignisse können einen großen Einfluss auf die eingeführte Sedimentfracht haben. Hauptsächlich durch Schmelzwässer können riesige Mengen an Sediment in die Höhlen eingeführt werden. Diese nun sedimentbefüllten Höhlen bilden nun andere Formen aus. Dies ist in vielen Höhlen der Nördlichen Kalkalpen (im Folgenden NKA) geschehen, so auch in den von uns untersuchten Höhlen.

Bei klastischen autochthonen Höhlensedimenten handelt es sich meist um Bruchstücke des Umgebungsgesteins selbst. Diese bis zu mehrere Kubikmeter großen Versturzböcke treten in vielen Höhlenteilen auf. In weniger reinen Kalken und Kalkmergeln sind es aus dem Umgebungsgestein herausgelöste, nicht wasserlösliche Komponenten wie z.B. Glimmer, die eigene Tonlagen bilden können.

Als parautochthon können Sedimente bezeichnet werden, die zwar aus dem Gebirgsmassiv stammen, aber in die Höhle umgelagert wurden, wie zum Beispiel der *Helle Höhlenton*.

Chemische autochthone Sedimente können in mehreren Formen in einer Höhle entstehen und werden als Speläotheme bezeichnet. Tropfsteine sind wohl das bekannteste und markanteste Beispiel und bestehen meist aus kalzitischem Sinter. Dieser entsteht, wenn Regenwasser, in dem Kohlendioxid gelöst ist, auf den Boden trifft und weiteres CO₂ und organische Säuren aufnimmt. Diese Säuren können nun Kalkgestein lösen und als Ionen transportieren. Nach dem Eindringen in das Felsgestein und dem Erreichen eines Hohlraumes entweicht der an Kalzit gesättigten Lösung an der Höhlenluft Kohlendioxid. Dadurch fällt das Karbonat als Kalziumkarbonat aus, während das überbleibende Wasser abfließt. Dies geschieht mehrere Male, bis sich über lange Zeiträume langsam aus vielen Schichten Sinterlagen (flowstone) und Tropfsteine ausbilden. Sie können mittels eingebautem Uran durch das Verhältnis Uran/Thorium datiert werden. Zudem kann man anhand von ebenfalls eingebauten stabilen Isotopen das Klima zum Zeitpunkt der Bildung rekonstruieren, bzw. proximieren (Spötl, 2020).

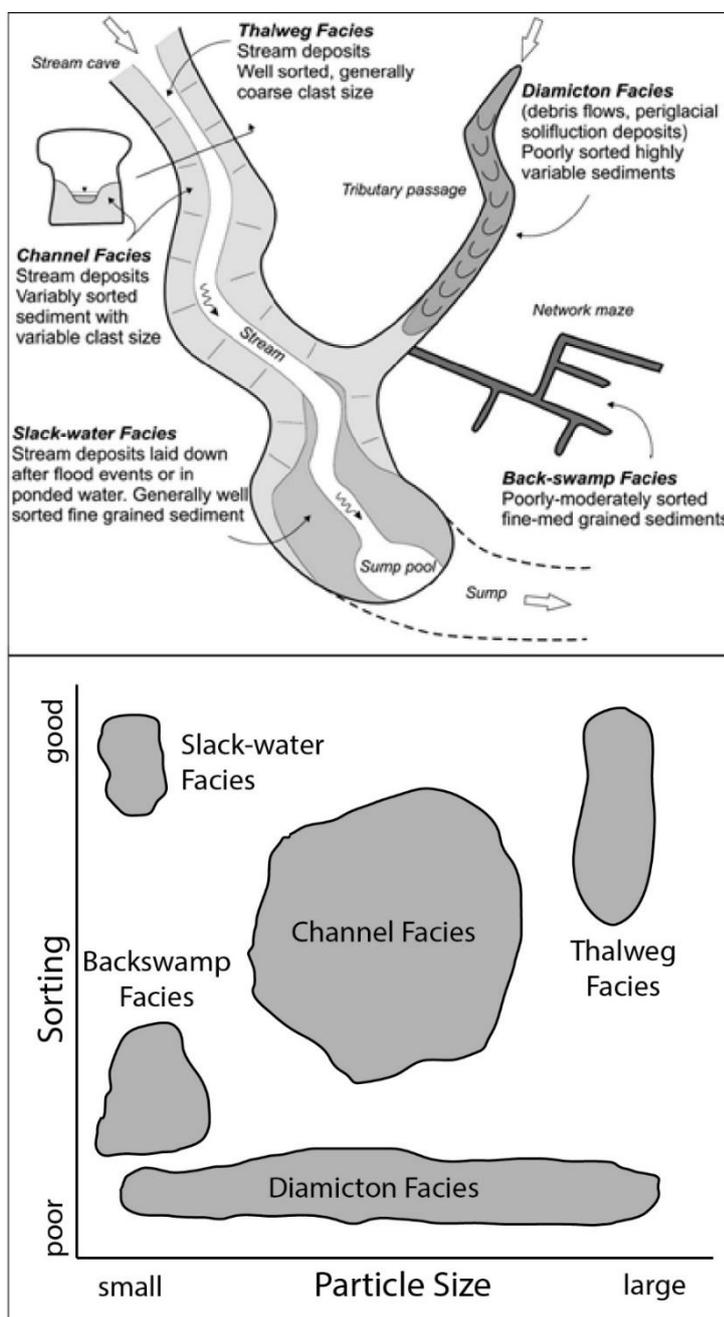


Abbildung 1: Oben: Schema der Klassifikation der Höhlensediment Fazies in einem Höhlensfluss, einem ehemaligen Zubringer und einem labyrinthischen Teil (aus Farrant & Smart, 2011).

Unten: Schematische Repräsentation der Sedimentfazies nach Sortierung und Korngröße (nach Bosch & White, 2004).

Weitere chemische Sedimente sind Kristallbildungen an Höhlenwänden und Decken von hauptsächlich Gips in verschiedensten Ausbildungsformen, so wie auch zu Teil magnesiumreichen Carbonaten. Erwähnenswert ist die so genannte *Bergmilch* (auch *Mondmilch*), eine besondere Form der Kalzitablagerung. Zudem gibt es auch schwarze Ablagerungen, die ganze Flächen überziehen können.

Biogene Sedimente in Höhlen spielen meist eine untergeordnete Rolle. Die am häufigsten anzutreffenden biogenen Sedimente sind Knochen, entweder von in der Höhle lebenden Tieren selbst stammen oder von ihnen in die Höhle eingeschleppt oder durch Gewässer eingewaschen wurden. Kot oder Guano von den in der Höhle lebenden Tieren zählen ebenfalls dazu. Auch Pflanzenreste sind in die Höhlen oft eingewaschen worden.

Durch Höhlensedimente lassen sich allgemeine Aussagen über Ablagerungsbedingungen wie die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung von Höhlengewässern, das Herkunftsgebiet, teilweise das Alter, rhythmische Ereignisse, wie die Warvenbildung und auch das Paläoklima treffen.

Geographie

Diese Arbeit beschäftigt sich mit drei Höhlen im Süden Oberösterreichs am Dachstein-Nordrand: Dachstein-Mammuthöhle (von nun an DMH), Dachstein-Rieseneishöhle (DRE) und Schönberghöhle (SBH, [Abb. 2](#)). Das Dachsteinmassiv ist das zweitgrößte Karstgebiet Österreichs (580 km²) nach dem Toten Gebirge und zählt dank seiner großen Karstfläche und den zahlreichen Höhlen zu den bedeutendsten Karstlandschaften Österreichs und Europas. Hier bilden sich auch lehrbeispielhafte Formen des oberirdischen und unterirdischen Karsts aus. Unter anderem befinden sich hier zwei der fünf längsten Höhlen Österreichs. Das Gebiet reicht von den vergletscherten Bereichen des Hochplateaus bis in die Täler mit den Seen hinab ([Behm et.al., 2016](#)). Das Relief reicht vom 2995 m hohen Dachstein-Gipfel bis zum Hallstätter See in 508 m Höhe.

Der Krippenstein ist ein Gipfel am Rand des Dachsteinmassivs. Er hat zwei Erhebungen: den Hohen Krippenstein (2108 m) und den Niederen Krippenstein (1989 m). Sie erheben sich südlich des Hallstätter Sees. Die drei Höhlen sind mit der Krippenstein-Seilbahn zu erreichen. Die DMH und die DRE sind von der Mittelstation nach einer kleinen Wanderung leicht zu erreichen und wurden zu Schauhöhlen ausgebaut. Um die SBH zu erreichen, ist noch ein Abseilen nötig. Am Krippenstein gibt es auch einen „Karstlehrpfad“, direkt oberhalb der hier untersuchten Höhlen.

Die heutigen Vorfluter des Berges und der Höhlen sind im Norden der Hallstätter See (Meereshöhe 508 m, 8,5 km² Fläche) und die Traun. Die Traun ist ein Nebenfluss der Donau mit einer Gesamtlänge von rund 153 km. Die Traun durchfließt den Hallstätter See von Südost nach Nord. Der See hat noch weitere Haupt-Zuflüsse, die den See speisen. Die Landschaft wurde während der Eiszeiten von Gletschern geformt und die Täler ausgehöhlt.

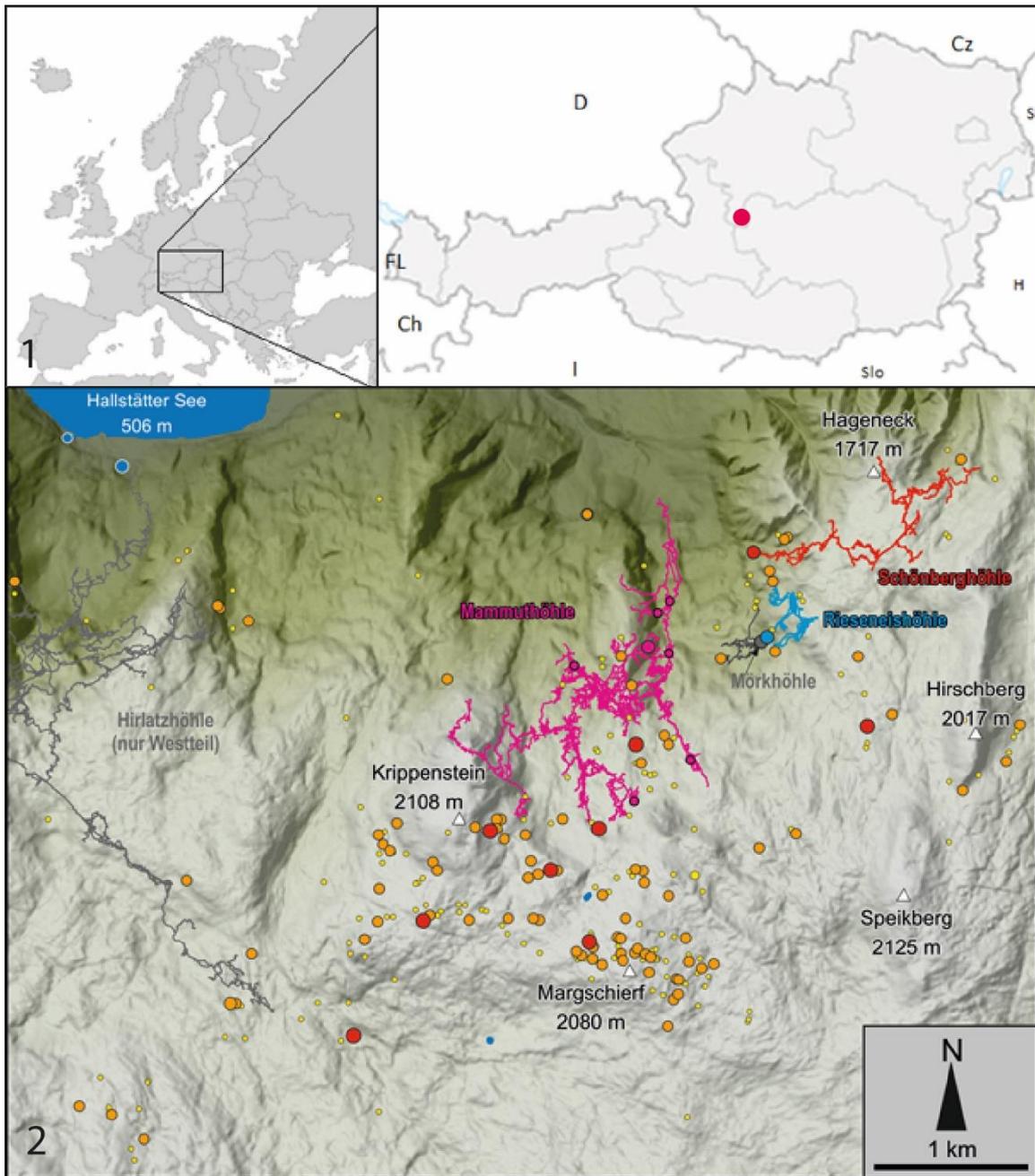


Abbildung 2: 1: Lage des Arbeitsgebietes in Österreich. 2. Untersuchte Höhlensysteme in der Umgebung des Klippensteins im Dachsteinmassiv. Nicht untersuchte Höhlensysteme sind grau dargestellt. Weitere Höhleneingänge sind als Punkte markiert (rot 500-5000 m, orange 50-500 m, gelb 5-50 m.). Verändert nach Behm et al. (2016).

Geologie

Die drei untersuchten Höhlen entstanden in Karbonatgesteinen der NKA, die ursprünglich im Tethysmeer während der Trias abgelagert wurden. Zwischen der paläogeographisch nördlichen Hauptdolomit-Fazies und der paläogeographisch südlichen Hallstätter-Fazies liegt die Dachsteinkalk-Fazies, in der sich die drei untersuchten Höhlen gebildet haben. Die Dachsteinkalk-Fazies folgt dem sogenannten Lofer-Zyklothem mit Megalodonten führenden Kalken (Faupl, 2003). Stratigraphisch werden die NKA in die Deckensysteme des Bajuwarikum, Tirolikum und Juvavikum unterteilt. Diese Einteilung wurde von Hahn (1913)

vorgeschlagen, von [Tollman \(1985\)](#) weitergeführt und von [Mandl et al. \(2017\)](#) weiter differenziert und neu zugeordnet. Die untersuchten Höhlensysteme befinden sich im juvavischen Deckensystem. Auf dem Dachsteinplateau wird die Dachsteinkalk-Fazies bis zu 1,5 km mächtig. Die drei Höhlen repräsentieren das Riesenhöhlenniveau; das mittlere der drei Höhlenniveaus in den NKA. Hier findet man auch gebankten Dachsteinkalk mit Megalodonten ([Lobitzer, 2017](#)). Das Einfallen der Schichten im Dachsteinkalk in Bereich der untersuchten Höhlen ist im Durchschnitt 30° ($20\text{-}40^\circ$) in Richtung NE ($020\text{-}070^\circ$; [Plan & Xaver, 2010](#)). Die drei beprobten Höhlen SBH, DMH und DRE folgen meist Schichtfugen und Störungen (Gamsjäger, 1980).

Untersuchte Höhlen

Dachstein-Mammuthöhle (DMH)

Bereits bei ihrer Entdeckung 1910 stellte die DMH eine Sensation da. Derart große Höhlen waren bis zu diesem Zeitpunkt in den NKA unbekannt. Mit ihrer Entdeckung begann die Karst- und Höhlenforschung in diesem Gebiet. Durch weitere Forschung in den folgenden Jahrzehnten gelang es, die DMH mit nahegelegenen Höhlen zu verbinden. Die derzeit bekannten Ausmaße der DMH umfassen eine Gesamtlänge von 67,4 km und ein Höhenunterschied von 1208 m (Behm et al., 2016). Sie hat 21 bekannte Eingänge. Diese Höhle hat wie die meisten großen Höhlensysteme in Österreich phreatische bzw. epiphreatische entstandene Teile, die von jüngeren vadosen Schächten und Canyons angeschnitten werden ([Plan & Xaver, 2010](#)).

Dachstein-Rieseneishöhle (DRE)

Die DRE (und die SBH) sind deutlich kleiner als die DMH. Die DRE wurde zur selben Zeit wie die DMH entdeckt und ist besonders durch ihre reichhaltigen Eisvorkommen bekannt. Ihre heutigen Ausmaße von rund 2,7 km Länge waren bald nach ihrer Entdeckung bekannt. Zudem stellte das Eis schon früh eine wirtschaftlich wichtige, touristische Einnahmequelle dar. Der Eisreichtum der Höhle wurde hinsichtlich des Höhlenklima und den Einflüssen des Klimawandels dokumentiert. Das Eisvolumen wird auf 13.000 m³ geschätzt. Starke Bewitterung lässt vermuten, dass es noch einen ausgedehnten unerforschten Teil hinter einem unbefahrbaren Verstoß gibt.

Schönberghöhle (SBH)

Die SBH wurde erst 1974 entdeckt, da ihr Eingang nur durch Klettern oder Abseilen von oben zugänglich ist. Sie ist langgestreckt und als einzige der drei nicht als Schauhöhle ausgebaut. Ihre Länge beträgt rund 9,3 km bei einem Höhenunterschied von rund 275 m.

Bisherige Modelle zur Höhlenentstehung

Die Entstehung der DMH wird schon lange diskutiert. [Plan & Herrmann \(2010\)](#) stellen den Ablauf der Diskussion dar. Schon kurz nach ihrer Entdeckung stellte [Bock \(1913\)](#) die später so genannte *Höhlenflusstheorie* auf. Der Hauptansatz dieses Modells besagt, dass die DMH durch einen im Untergrund des Dachsteins fließenden, großen Fluss entstanden ist. Dieser Fluss führte laut Bocks Berechnungen 1500-3000 m³/s Wasser. In seiner Arbeit erkannte Bock

zudem den Unterschied zwischen dem unter Druck fließendem Wasser (phreatisch) und dem Fließen ohne Druck (vados) ausgebildeten Höhlenformen (oval gegen Schlüsseloch-Profile). Auch stellte er fest, dass es eine generelle Fließrichtung von Ost nach West gab. Diesen Fluss benannte er *Paläotraun* und ebenso den tunnelartigen Gang in der DMH, auf dessen Untersuchung er sich stützte. Er nahm an, dass dieser Fluss an einen tertiären Vorfluter gebunden war. Für den Beginn der Paläotraun nennt er das Senonium (Oberkreide), wobei er das Hauptausbildungsalter der DMH in das Miozän stellt. Dieses Alter leitet er aufgrund von Ähnlichkeiten mit Sedimenten an der Erdoberfläche, den sogenannten *Augensteinen*, ab. Sie zeigen ein ähnliches Schwermineralbild und eine optische Ähnlichkeit mit den Höhlensedimenten.

Bocks Theorien waren schon von Beginn an umstritten und es wurden so ziemlich alle Aspekte bezweifelt. Die errechnete Schüttung des Flusses und das dafür notwendige riesige Einzugsgebiet, das angenommene Alter der Höhle, die Existenz eines Vorfluters, als auch die Frage ob ein Fluss bei der Bildung der Höhle überhaupt eine Rolle gespielt hat. Schon im Jahre der Aufstellung der Theorie bezweifelte Göttinger seine Thesen.

[Lehmann \(1922\)](#) und [Smekal \(1923\)](#) stellten ein alternatives Höhlenentstehungsmodell mittels Lösung von stehendem Wasser auf. Ein weiteres Gegenmodell stellte [Biese \(1926\)](#) auf, das hauptsächlich auf Tektonik beruht. [Lahner \(1937, 1948\)](#) postulierte ein Modell, welches Höhlen durch Korrosion durch langsam fließenden Wasser entstehen ließ. Arnberger und Trimmel wurden in den 50er und 60er Jahren zu Bocks größten Kritikern (z.B. [Arnberger \(1955\)](#); [Trimmel \(1955\)](#)). Beide schlossen vorflutgebundene Höhlenniveaus aus und stützten ihre Modelle auf tektonische Ereignisse, die einen Hohlraum entlang von Schichten aufreißen, der mit der Zeit abgerundet wird.

Allerdings hatte Bocks Theorie auch Anhänger, die seine Theorie unterstützen und zwischen 1918 bis 1925 ausbauten und erweiterten (z. B. [Spengler \(1918\)](#); [Kyrle \(1923\)](#); [Spöcker \(1925\)](#)). [Bauer \(1954\)](#) untersuchte Fließfacetten, die die generelle Fließrichtung von Ost nach West und eine vollständig mit Wasser verfüllte Höhle bestätigte. [Winkler-Hermaden \(1957\)](#) stellte den Vorfluter ins Unterpliozän. [Bauer \(1961\)](#) stellte fest, dass eine Sedimentverfüllung der Höhlensohle eine Erweiterung des Hohlraumes nach oben bewirkt, zudem würde dies bewirken, dass der Fluss keine so gewaltigen Ausmaße, wie von Bock angenommen, haben muss.

[Seemann \(1973\)](#) teilt die Entstehung der Höhle in mehrer Phasen ein: (1) frühe Genese im Paläogen, (2) voreiszeitliche Verkarstung, (3) interglaziale Verkarstung und (4) schwarze Ablagerungen im Holozän. Echte Höhlenflüsse sind laut ihm nur Ausnahmeerscheinung. Franke (1974) nimmt an, dass die Mischungskorrosion bei der Höhlenbildung im Hochgebirge einen hohen Stellenwert hat. [Krauthausen \(1989\)](#) schließt auf den Einfluss von tektonischen Aktivitäten zur Bildung von Initialfugen.

[Frisch et al. \(2000, 2002\)](#) stellten theoretische Überlegungen zur Hebung der Zentralen und Östliche NKA an und schließen, dass der Bildungszeitraum des Riesenhöhlenniveaus zwischen 5 und 10 Ma., also Oberes Miozän, war. Zu diesem Riesenhöhlenniveau gehören auch die drei hier untersuchten Höhlen.

Die aktuellste Untersuchung wurde von [Plan & Xaver \(2010\)](#) durchgeführt. Sie kamen durch morphologische Untersuchungen zu dem Schluss, dass große Teile der Mamuthhöhle durch fließendes Wasser in der epiphreatischen Zone entstanden sind. Zudem stellten sie fest, dass sich große Teile der Höhle aufgrund von sedimentbedeckten Sohlen nach oben ausgebildet haben und paragenetische Formen ausbildeten. Sie zeigten, dass die angenommenen Schüttungsmengen für einen Fluss deutlich kleiner sind als von Bock 1913 angenommen, und

stellten fest, dass größere Steine nur bei Flutungsereignissen in die Höhle bewegt wurden. Aufgrund der Ausbildung der Fließfacetten schließen [Plan & Xaver \(2010\)](#) auf laterales Fließen während länger andauernder Hochwasserereignisse mit einer Fließgeschwindigkeit von 0,2 bis 1 m/s. Zudem folgern sie aufgrund des Längsschnittes auf mehrere Höhlenniveaus die sie mit einem Paläovorfluter korrelieren.

Bisherige Untersuchungen zu den Höhlensedimenten

[Seeman \(1973\)](#) hat sich in seiner Dissertation mit den Sedimenten der DMH beschäftigt. Er behandelte hauptsächlich Pyrite und Erze und nur untergeordnet „Begleitsedimente“. Zudem stellte er fest, dass die Sedimentverfüllung einen erheblichen Anteil am Durchfluss und der Ausbreitung eines Höhlenflusses gehabt haben muss. [Seeman et al. \(1999\)](#) haben sich mit den Sedimenten der DRE und Mineralneubildungen beschäftigt. Hierfür haben sie Schwermineralanalysen, Siebungen und Bestandsaufnahmen aller ersichtlichen Sedimente durchgeführt.

Zuvor hatten schon [Franke & Ilming \(1963\)](#) Beobachtungen zu den Sedimenten der DMH gemacht. Sie befassten sich vornehmlich mit dem *Hellen Höhlenton*, den sie in drei Alter unterteilten. [Arthofer & Thaler \(1998\)](#) gelang mittels Schlämmen (Goldwaschen) im Augensteinsediment aus dem Sklavengang der Nachweis von 40 Goldkörnern.

[Plan & Zaver \(2010\)](#) nahmen neben morphologischen Untersuchungen auch Proben von Sintern. Die Datierung einer dünnen Sinterschichte über dem *Hellen Höhlenton* der Umkerhalle (Krippensteingang) ergab 7 ± 2 ka, wobei der große Fehler auf der detritären Verunreinigung beruht. Dies zeigt das Mindestalter des *Hellen Höhlentons*. Messungen von Sinterschichten unter diesem Sedimenttyp ergaben Alter jenseits der Datierungsgrenze der Th/U Methode (0,5 Ma).

[Salomon \(2014\)](#) hat sich mit einem Aufschluss aus 4 m mächtigem *Hellen Höhlentones* in der Hierlatzhöhle beschäftigt. In dieser Arbeit ist sie unter anderem auf die unterschiedlichen Eigenschaften der zwei Ausbildungsformen des *Hellen Höhlentones* sedimentologisch eingegangen. Jedoch das Hauptaugenmerk der Arbeit befasst sich mit den seismischen Aktivitäten der SEMP-Störung, die sich in den Sedimentstrukturen des *Hellen Höhlentones* widerspiegeln. Sie konnte daraufhin fünf Annahmen treffen (1) die Sedimente wurden abgelagert als fluvio-lakustrine Bedingungen herrschten, (2) dass sie ihren Ursprung im südlich angrenzenden Kristallin haben, (3) dass es zyklische seismische Ereignisse gab, (4) dass die untersuchten Strukturen vorzugsweise an der Grenze zum wassergesättigten Sediment gebildet wurden und (5) dass eine Senkung des Schwerewiederstandes durch eine Liquifizierung und Dichteunterschiede zwischen den einzelnen Schichten des *Hellen Höhlentones* bewirkt wurde.

[Häuselmann et al. \(2020\)](#) haben Daten zum Mindestalter und Hebungsraten von Höhlen in den NKA erhoben. Hierfür haben sie zwölf Proben aus acht Höhlen entnommen. Es wurden Einschwämmalter (*burial age dating*) mittels des kosmogenen radioaktiven Elementpaares $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ bestimmt. Die Proben aus der DMH entstammen aus dem *Deflinger Labyrinth*, der *Paläotraun* und dem *Wassergang*. Die vier Proben die in der DMH genommen wurden, erreichten ein Alter von unterem Pliozän und sind jünger als erwartet, passen aber noch ins Bild. Alter aus der naheliegenden Hierlatzhöhle ergeben allerdings ein für die angenommene Hebung zu altes Datum.

Ziel und Fragestellung

Für die sedimentologischen Untersuchungen wurden neben Profilbeschreibungen verschiedene Methoden in dieser Arbeit angewandt: Schwermineralanalyse, Röntgendiffraktometrie (XRD), Korngrößen- und Kornformbestimmung und diverse chemische Analysen.

Ziel ist es, aufgrund der Sedimentologie Rückschlüsse auf die Entstehung der Höhlen und deren Sedimenten zu erhalten. Zudem sollte eine relative Altersabfolge der Sedimente bestimmt werden und mittels $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierung auch ein Mindestalter des *Hellen Höhlentons* angegeben werden. In der Folge fließen noch Ergebnisse anderer Autoren von Altersdatierungen mittels kosmogener Nukleide in diese Arbeit mit ein. Die Ergebnisse der Schwermineralanalysen und Siebungen werden mit denen von vorhergehenden Arbeiten verglichen.

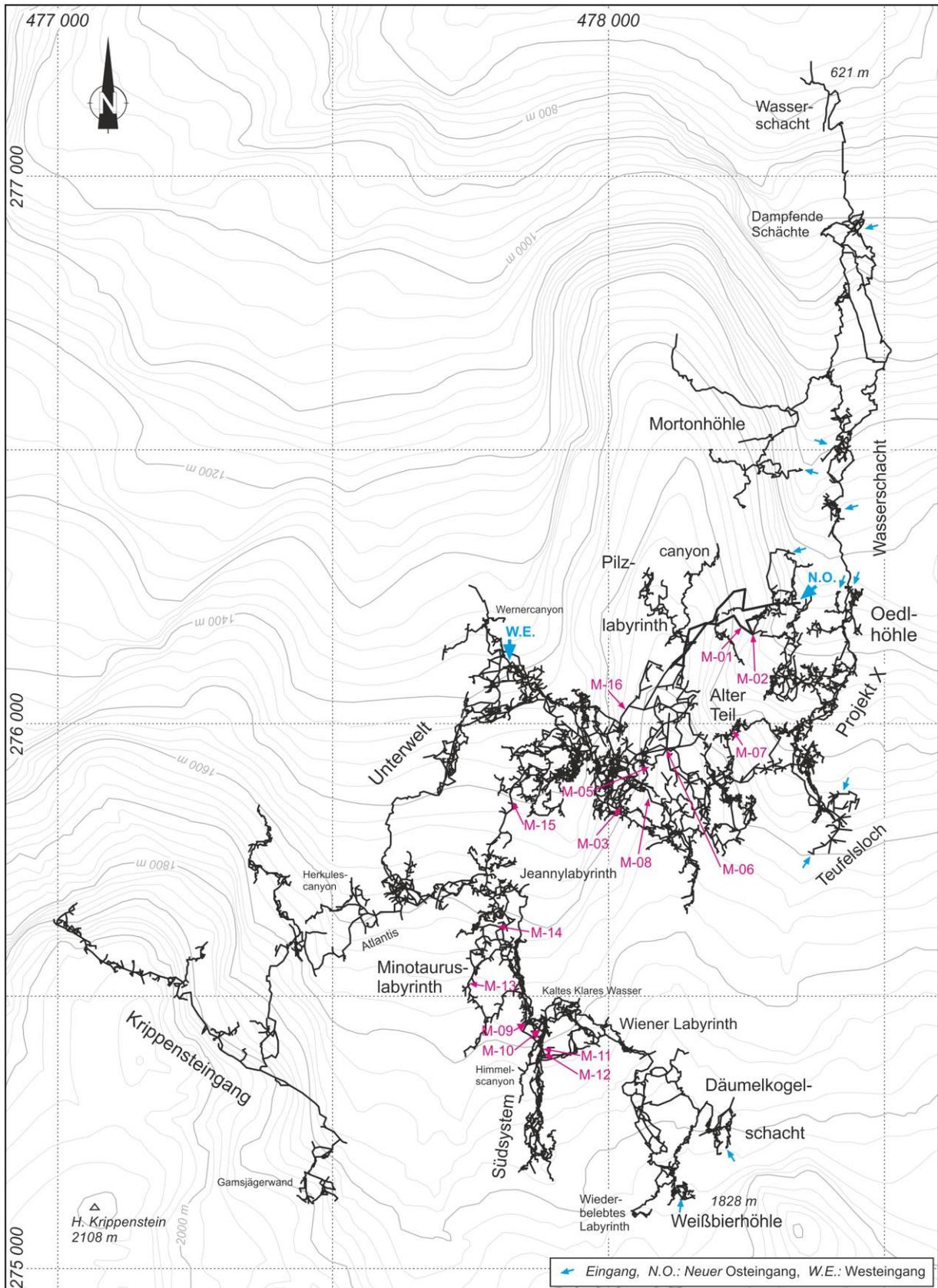


Abbildung 3: Übersicht der Dachstein-Mammuthöhle (nur Polygonzug, Stand 2004) mit den Probenpunkten (verändert nach Behm et. al 2005; Koordinaten BMN-M31).

Methoden

Feldmethoden

In den drei untersuchten Höhlen, DMH (Abb. 3), DER (Abb. 4) und SBH (Abb. 5), wurden Proben genommen und ihre Aufnahmepunkte im Höhlenplan verzeichnet (siehe Tabelle 1). In der DMH und der DRE wurden acht Profile aufgenommen. Eines dieser Profile wurde schon 1995 für die Suche von Höhlenbärenknochen durch das Institut für Paläontologie der Universität Wien freigelegt. In zwei Fällen wurden diese Profile von mir freigegeben, eines wurde für den Führungsweg freigelegt und die restlichen wurden von Bächen freigelegt.

Die Schichtfolge der Profile wurden beschrieben (siehe auch Tabelle 2). Die Unterscheidung zwischen den einzelnen Schichten wurde hauptsächlich nach Farbe und Korngröße mit freiem Auge vorgenommen. Die Höhe der Profile und die Dicke der Schichten wurden mittels Maßband gemessen und es wurden vor Ort Skizzen der Profile angefertigt (siehe Anhänge). Proben wurden, bis auf wenige Ausnahmen, direkt aus dem Profil entnommen. Die Probengröße richtet sich nach der Zusammensetzung der Probe und schwankte zwischen wenigen Gramm bis zu Kilogramm-Größe.

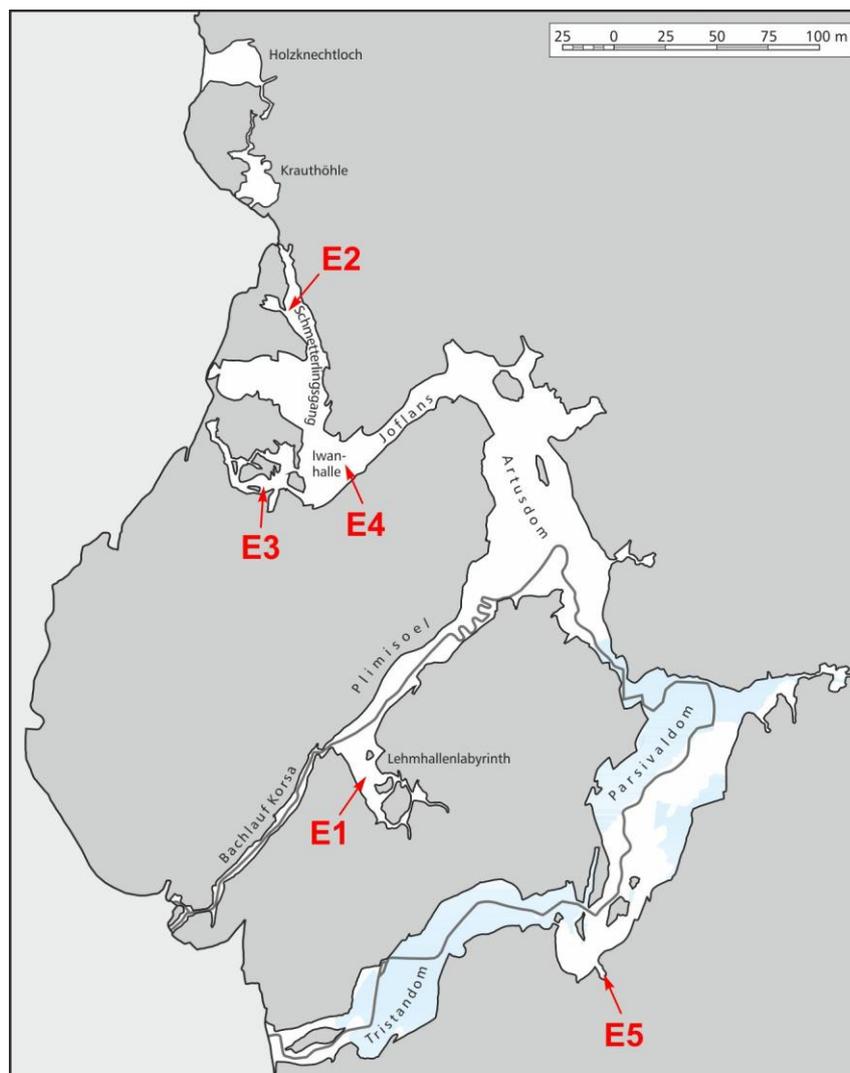


Abbildung 4: Übersicht der Dachstein-Rieseneishöhle mit Probenpunkten. Blau: ganzjährig vorhandene Eismassen. (verändert nach Andreas Neumann)

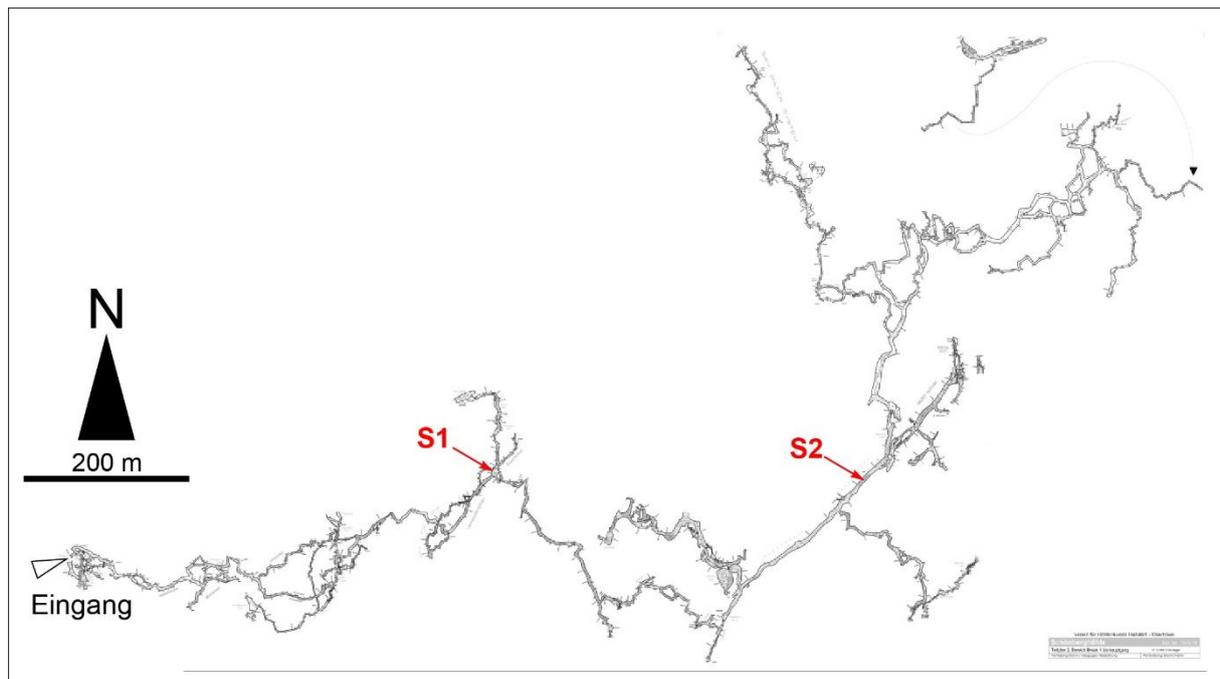


Abbildung 5: Übersicht der Dachstein-Schönberghöhle mit Probenpunkten. (verändert nach Gottfried Buchegger)

Mittels des Rock-Color-Chart ([Geological Society of America, 1995](#)) wurde die Farbe vor Ort im Licht von weißen LED-Lampen (Scurion) bestimmt. Farben der Rock-Color-Chart werden im Folgenden kursiv geschrieben. Spezielle Merkmale der einzelnen Schichten, wie z.B. deren Lagerung und Einfallswinkel wurden im Feldbuch vermerkt. Alle Aufschlüsse wurden fotografisch dokumentiert (siehe Anhang).

Tabelle 1: Liste der Aufschlusspunkte. SH ... Seehöhe, Anz. ... Anzahl der Proben, VP ... Vermessungspunkt.

| Nr | Höhle | Teil | nahe VP | Sh [m] | Art | Anz. |
|------|-------|---|------------------|--------|--|------|
| M-01 | DMH | Paläotraun | Th66 | 1367 | Sedimentprofil | 8 |
| M-02 | DMH | Halle der Vergessenheit | Th67 | 1365 | Heller Höhlenton | 2 |
| M-03 | DMH | Edelweißlabyrinth, Schwarzer Gang | CA125 | 1367 | Sedimentoberfläche | 2 |
| M-05 | DMH | Edelweißlabyrinth, Schwarzer Gang | CA111 | 1334 | Schwarze Zwischenschicht im Sedimentkörper | 1 |
| M-06 | DMH | Lehmhalle, Großer Do | Th41 | 1454 | gegrabenes Profil | 2 |
| M-07 | DMH | Wassergang | GI11 | 1440 | Flowstone, Profil am Bach | 2 |
| M-08 | DMH | Windstollen | Th22 | 1469 | Flowstone, Profil am Bach | 3 |
| M-09 | DMH | Bockstalagmit | LB101 | 1433 | Bockstalagmit | 1 |
| M-10 | DMH | Minontauruslabyrinth, Höllentor | | | Gegrabenes Profil | 2 |
| M-11 | DMH | Südsystem nach einstieg Hexenrutsche | MA6 | 1443 | Schwarzer Überzug | 1 |
| M-12 | DMH | Südsystem, Canyon eingegraben | MB2 | 1448 | Sedimentprofil | 0 |
| M-13 | DMH | Minontaurusgang, oberhalb Wasserschacht 1 | LB8 | 1422 | Heller Höhlenton | 1 |
| M-14 | DMH | Minontaurusgang, oberhalb Kletterstelle unterhalb Hydromagnesit | LA70 | 1349 | Schwarze Schicht an Decke | 0 |
| M-15 | DMH | Sklavengang | KA54 | 1301 | Sedimentprofil | 2 |
| M-16 | DMH | Konglomeratwand | Th55 | 1376 | Sedimentprofil | 1 |
| M-17 | DMH | Verfallene Burg | | | Verschiedene Proben | 3 |
| E-01 | DRE | Lehmhalle | 30 m s. Pg | 1408 | Sedimentprofil | 6 |
| E-02 | DRE | Schmetterlingsgang | P100 | 1338 | Moräne | 1 |
| E-03 | DRE | Iwanlabyrinth | 20 m w. Pg801 | 1425 | Probe an Decke | 1 |
| E-04 | DRE | Iwanhalle | Pg8 | 1425 | Schwarze Steine | 1 |
| E-05 | DRE | Überlagerung Anfortashalle | 30 m s. P26 | 1460 | grünl. Sedimentprofil | 5 |
| S-01 | SBH | Biwak 1 | 49 | 1180 | Sedimentprofil | 3 |
| S-02 | SBH | Hauptgang | 18 | 1217 | Sedimentprofil | 2 |

Tabelle 2: Angewandte Untersuchungsmethoden an den Proben.

| Probe | Litho-fazies | Textur | Kornform | Kornsummen-kurven | XRD | Karbonat-gehalt | Schwer-minerale | U/Th-Alter |
|---------------------------------------|--------------|--------|----------|-------------------|-----|-----------------|-----------------|------------|
| Dachstein-Mammuthöhle (DMH) | | | | | | | | |
| M-01h | x | x | | x | x | | | |
| M-01g | x | x | | x | x | | | |
| M-01f | x | x | | | x | | | |
| M-01e | x | x | | x | x | | | |
| M-01d | x | x | | x | x | | | |
| M-01c | x | x | | | x | | | |
| M-01b | x | x | | | x | | | |
| M-01a | x | x | | x | x | | x | |
| M-02b | x | x | | x | x | x | | |
| M-02a | x | x | | x | x | x | | |
| M-06b | x | x | | x | x | | | |
| M-06a | x | x | | x | x | | | |
| M-07b | x | x | | | | | | x |
| M-07a | x | x | | | | | | x |
| M-08d | x | x | | | | | | x |
| M-08c | x | x | | | | | | |
| M-08b | x | x | | | | | | x |
| M-09 | x | x | | | | | | x |
| M-10b | x | x | | | | | | |
| M-10a | x | x | | | | | | |
| M-11 | x | x | | | | | | |
| M-12 | x | | | | | | | |
| M-13 | x | x | | | x | x | | |
| M-15b | x | x | | | | | | |
| M-15a | x | x | | | | | | |
| M-16a | x | x | x | | | | | |
| Dachstein-Rieseneishöhle (DRE) | | | | | | | | |
| E-01f | x | x | | x | x | x | x | |
| E-01e | x | x | | x | x | x | x | |
| E-01d | x | x | | x | x | | x | |
| E-01c | x | x | | x | x | | x | |
| E-01b | x | x | x | | | | | |
| E-01a | x | x | | x | x | | x | |
| E-02 | x | x | | x | | | | |
| E-03 | x | x | | x | | | x | |
| E-05d | x | x | | | x | | | |
| E-05c | x | x | | | x | | | |
| E-05b | x | x | | | x | | x | |
| E-05a | x | x | | | x | | | |
| Schönberghöhle (SBH) | | | | | | | | |
| S-01c | x | x | | | x | x | | |
| S-01b | x | x | | | x | | | |
| S-01a | x | x | | | x | | | |

| | | | | | | | | |
|-------|---|---|--|--|--|--|--|--|
| S-02b | x | x | | | | | | |
| S-02a | x | x | | | | | | |

Fortsetzung Tabelle 2

Kornformbestimmung

Die Kornformbestimmung wurde nur bei Komponenten größer als Grobsand angewendet. Bestimmt wurde sie durch Vermessung mit Zollstock und durch Augenmaß. Der Rundungsgrad wurde nach [Pettijohn \(1975\)](#) bestimmt. Der Rundungsgrad lässt Aufschlüsse über die Transportweite der einzelnen Komponenten zu.

Korngrößenbestimmung

Die erste Einschätzung wurde an Ort und Stelle hauptsächlich mit Auge und Fühlen, zum Teil auch Kosten vorgenommen. Die größten Komponenten wurden direkt in der Höhle vermessen (alle drei Achsen) und vor Ort gelassen. Da es sich meist um Lockersedimente handelte, konnten Proben ohne weiteren Aufwand genommen werden.

Die Proben wurden trocken gewogen. Eine genauere Bestimmung der Korngrößenanteile wurde durch Nasssiebung der Proben durchgeführt. Als erstes wurden die organischen Komponenten mit verdünnter H_2O_2 oxidiert und das Gestein durch O_2 Blasenentstehung gesprengt. Dann wurden die Proben mit destilliertem Wasser gereinigt. Unter fließendem Wasser wurden die Fraktionen über unterschiedlichen Sieben (2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm und 0,063 mm) aufgefangen, unter dem kleinsten Sieb (0,063 mm) wurde die Silt- und Tonfraktion in Eimern gesammelt. Alle Fraktionen wurden dann im Trockenschrank getrocknet und abgewogen. Durch Zusammenrechnung aller Fraktionen konnte so das Gewicht des anorganischen Anteils der Probe bestimmt werden. Nach Abzug dieses Anteils von Gesamtgewicht der Probe wurde so der organische Anteil festgelegt.

Die Anteile der Silt- und Tonfraktion wurde nun im Sedigraph genauer bestimmt. Ein Teil der Probe wurde mit einem Fließmittel vermischt und in den Sedigraph (Typ Micromeritics 5100) eingeführt. Der Sedigraph bestimmt dann mittels Absorption eines Laserstrahls die verschiedenen Fraktionen innerhalb der Tonfraktion.

Röntgendiffraktometrie (XRD)

Für die Röntgendiffraktometrie wurden die Proben gebrochen und soweit zerkleinert, bis keine Einzelkomponenten mit den Fingern ertastet werden konnten. Sehr grobe Proben wurden zuerst mit dem Backenbrecher zerkleinert. Für die weitere Bearbeitung zur Herstellung des Pulverpräparates wurde eine Schwingscheibengesteinsmühle eingesetzt. Für das Röntgendiffraktometer (Typ SCARDA 2098) wurde das Pulver auf den Probenhaltern 2 mm dick aufgetragen. Wegen der großen Probenanzahl wurde ein Autosampler eingesetzt, der ein automatisches Wechseln der Proben zwischen den Messungen ermöglichte.

Bei der Röntgendiffraktometrie misst man den Abstand zwischen den Strukturen der einzelnen Minerale. Jedes Mineral hat spezifische Unterschiede bei den Gitterabständen. Wichtig ist dabei auch der Winkel θ des auftreffenden Röntgenstrahles. Aus der Intensität des zurückgestrahlten Röntgenstrahles bei bestimmten Winkeln kann nicht nur die Zuordnung zu einem Mineral erfolgen, sondern auch die Menge dieses Minerals abgeschätzt werden.

Bei einem Pulver (zufällig angeordnete Kristalle) ist θ der Winkel zwischen der Oberfläche des Pulvers und des Strahles. Zur Berechnung der Amplitude wird dann Braggs Law ($n \cdot d \cdot \sin \theta$; θ =Winkel) herangezogen.

Die entstandenen Peaks sind mineralspezifisch. Minerale zeigen meist mehrere Peaks, die sich überlappen können. Zur Identifikation der Minerale wird eine Mineraldatenbank herangezogen. Die Verwendung dieser Datenbank ist sehr hilfreich. Die Ergebnisse sollten aber nochmal überprüft werden, da die Datenbank meist nur mit Endgliedern von Mineralmischreihen arbeitet. Bei bestimmten Mineralen kann man durch die Positionen der Peaks auch Aussagen über die Elementzusammensetzung treffen.

Karbonat Bestimmung

Die Karbonatbombe ist eine einfache, billige, relativ genaue und erprobte Methode um den Karbonatgehalt einer Probe zu bestimmen. Die Probe muss hierfür nicht behandelt werden, sollte aber klein genug sein, um in die Bombe zu passen. Zudem löst sich die karbonathaltige Probe in feinkörniger Form schneller als in einem ganzen Stück. Als Erstes wird eine Versuchsreihe mit einem Standard (Calciumcarbonat für Analysen 31208, Riedel-de Haën AG) gemacht, um den Außendruck der Umgebung zu berücksichtigen. Die Änderung des Druckes innerhalb der Karbonatbombe während der Testreihe mit dem Standard ergibt eine Eichkurve aus der dann die Ergebnisse abgelesen werden können.

Die Probe wird getrennt von der Säure (HCl, meist verdünnt) in die Karbonatbombe eingeführt. Nach luftdichtem Verschluss werden beide Komponenten gemischt. Das Karbonat im Gestein wird aufgelöst und in CO₂ umgewandelt, welches einen Gasdruck erzeugt. Der Rest des Gesteins bleibt ungelöst. Der erhöhte Gasdruck wird abgelesen, mit dem Standardtest verglichen und einem Karbonatgehalt zugeordnet.

In einer zweiten Messreihe wurde das Gerät FOG II Digital Soil Calcimeter verwendet. Der Aufbau des Gerätes ist dem der Karbonatbombe im Grunde gleich nur dass die Messung des entstandenen Druckes über eine Sonde extern angezeigt wird. Für dieses Gerät wurde rund 1 g Probe (bei 23,6 °C Raumtemperatur) mit 5-6 ml 20 %iger HCl vermengt. Eine Vergleichsprobe mit der Karbonatbombe ergab, dass die Abweichung des Messwertes im Fehlerbereich der Karbonatbombe liegt.

Schwermineralanalyse

Die größten Proben wurden mit dem Backenbrecher zerkleinert. Die anderen Proben waren unverfestigt. Etwa 500 g wurde mit 300 ml Wasser vermengt und unter ständigem Rühren wurde 80 %ige Essigsäure zur Lösung des organischen Anteils dazugegeben. Daraufhin wurden die Proben eine Woche stehen gelassen und mindestens täglich umgerührt. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis keine CO₂-Bläschen mehr aufsteigen, also alles Organische in der Probe gelöst war. Säurereste wurden mit Wasser abgespült. Durch Nasssiebung wurde die Fraktion 0,125-0,063 mm (Feinsand) abgetrennt. Die Schwereretrennung erfolgt mittels LST Fast Float mit einer Dichte von 2,95 g/cm³. Die Dichtentrennung wurde von Sabine Hruby-Nichtenberger durchgeführt. Die Schwerminerale wurden mit Canada Blasam (Applichan Panreac) auf Objektträger geklebt, mit einem Deckplättchen bedeckt und nach Reinigung mittels Aceton waren sie zur Untersuchung mit dem Durchlicht Mikroskop bereit. Es wurden zwischen ca. 100 und 200 Körner ausgezählt, was laut [Douglas & McConchie \(1994\)](#) repräsentativ ist.

²³⁰Th/U Datierung

Um den Ablagerungszeitraum des *Hellen Höhlentones* zu datieren, wurden im Zuge dieser Arbeit vier Proben aus der DMH entnommen: M-07a und b aus dem *Wassergang*, sowie M-08b und d aus dem *Windstollen*; beides *Alter Teil*. Eine weitere Probe wurde vom sogenannten

Bockstalagmiten (M-09) genommen. Fast alle Proben wurden als Handstücke frei entnommen. Nur die Probe des *Bockstalagmiten* wurde vorsichtig an einer nicht gut sichtbaren Stelle abgeschlagen, um seine Erscheinung nicht zu beeinträchtigen. Im Labor wurden mittels Feinsäge rund 0,1 g schwere Stücke entnommen. Diese Proben wurden nun nicht weiter von mir behandelt, sondern die Messungen wurde von Denis Scholz an der Johannes Gutenberg Universität Mainz durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Aufbereitung und MC-ICP-MS-Messung findet sich in [Žák et al. \(2012\)](#).

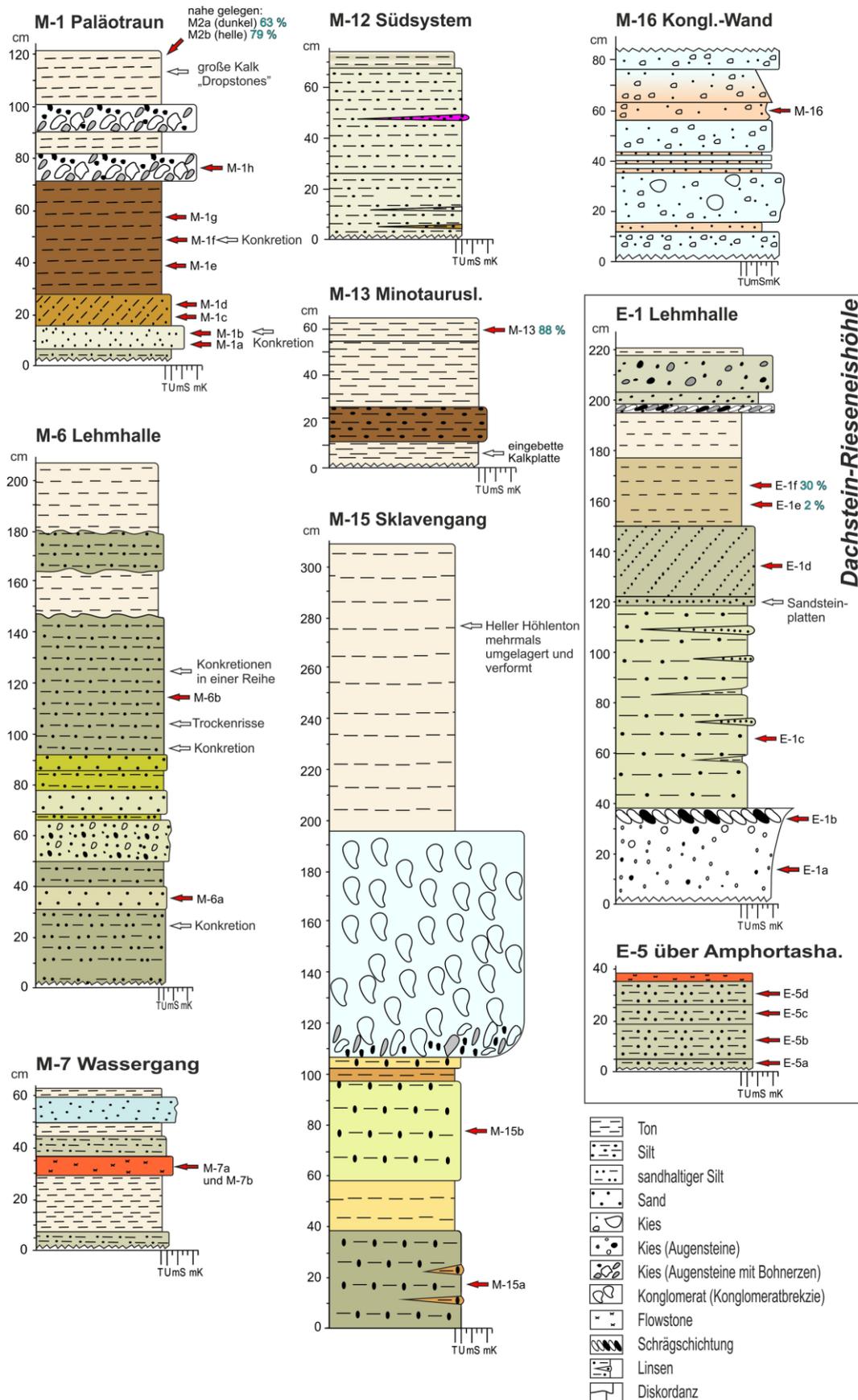


Abbildung 6: Alle aufgenommenen Profile im Detail.

Ergebnisse

Aufschlüsse und Profile

Planausschnitte der DMH und der SBH mit Probenpunkten befinden sich am Ende des Anhangs. [Abbildung 6](#) stellt ausgewählte Profile aus DMH und DRE dar.

Dachstein-Mammuthöhle (DMH)

M-01 Paläotraun

Um den Führungsweg durch die DMH bequem begehbar zu machen, wurde eine ca. 1 m tiefe Furche durch den Sedimentkörper am Beginn bzw. dem Ostende der Paläotraun gegraben ([Abbildung 7](#)). Die Basis ist nicht aufgeschlossen und laut Georadarmessungen durch Michael Behm und Lukas Plan mindestens 5 m tiefer (pers. Mitteilung Lukas Plan). Die unterste freigelegte Schicht ([Tabelle 3](#)) besteht aus *grau oliv-braunem*, grobem, geschichteten Silt. In ihr kommen Konkretionen aus eben diesem Material vor. Darüber folgt eine ca. 9 cm dicke Sandschicht. Abgelöst wird sie von einer 13 cm mächtigen Siltschicht. Sie ist gedeckt *hellbraun* und keilt seitlich aus. Auffallend ist eine *orange-braune* Zwischenschicht. Auf ihr liegt eine 42 cm mächtige Tonschicht. Es handelt sich um eine *gedeckt dunkle gelb-braune* massive Einheit. In der Schicht haben sich die Komponenten zu Klumpen vereinigt. Zudem kann man auch in ihr Konkretionen finden. Es folgt die erste Schicht Augensteine. Sie besteht hauptsächlich aus gerundeten Komponenten aus Quarz und *schwarzen* kugeligen Komponenten, die ein korngestütztes Gefüge bilden. Darauf folgt *Heller Höhlenton*. Sie ist ebenlagig geschichtet. Sie wird abgelöst von einer weiteren Lage Augensteine. Es folgt wiederum eine Lage *Heller Höhlenton*, die das Profil abschließt. Auffällig ist, dass in diese abschließenden Schicht Kalkplatten eingebettet sind, die sich anscheinend von der Decke gelöst haben.

Tabelle 3: Aufschlussbeschreibung von M-01. # Schichtnummer; Pr ... Probennummer; Mä ... Mächtigkeit in cm; Kg dominante Korngröße; Fac ... Farbecode gemäß Rock-Color-Chart (Geological Society of America, 1995).

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|---|--------------|-----|---------|----------|------------------------------------|--------------------|--|
| 8 | | 20 | Ton | 10yr 8/2 | sehr blasses orange | eben lagig | große Kalkstücke sind im Ton eingebettet |
| 7 | M-01h | 10 | m. Kies | 5YR 7/2 | gräuliches orange-pink | massig | Augenstein; Korngestützt; Komponenten schwarz bis Weiß |
| 6 | | 10 | Ton | 10yr 8/2 | sehr blasses orange | eben lagig | |
| 5 | | 10 | m. Kies | N 1 | schwarz | massig | Augenstein; Korngestützt |
| 4 | M-01g | 42 | Ton | 7yr 4/2 | gedecktes dunkles gelbliches braun | massig | krümelig, Konkretionen |
| 3 | M-01e, M-01f | 13 | Silt | 5yr 5/5 | hell gedecktes braun | schräg geschichtet | keilt seitlich aus, gelbliche Zwischenlage |
| 2 | M-01d | 9 | Sand | 5Y 7/2 | gelbliches grau | eben lagig | |
| 1 | M-01a, M-01b | >10 | g. Silt | 8y 5/3 | grau olive-braun | geschichtet | Konkretionen |

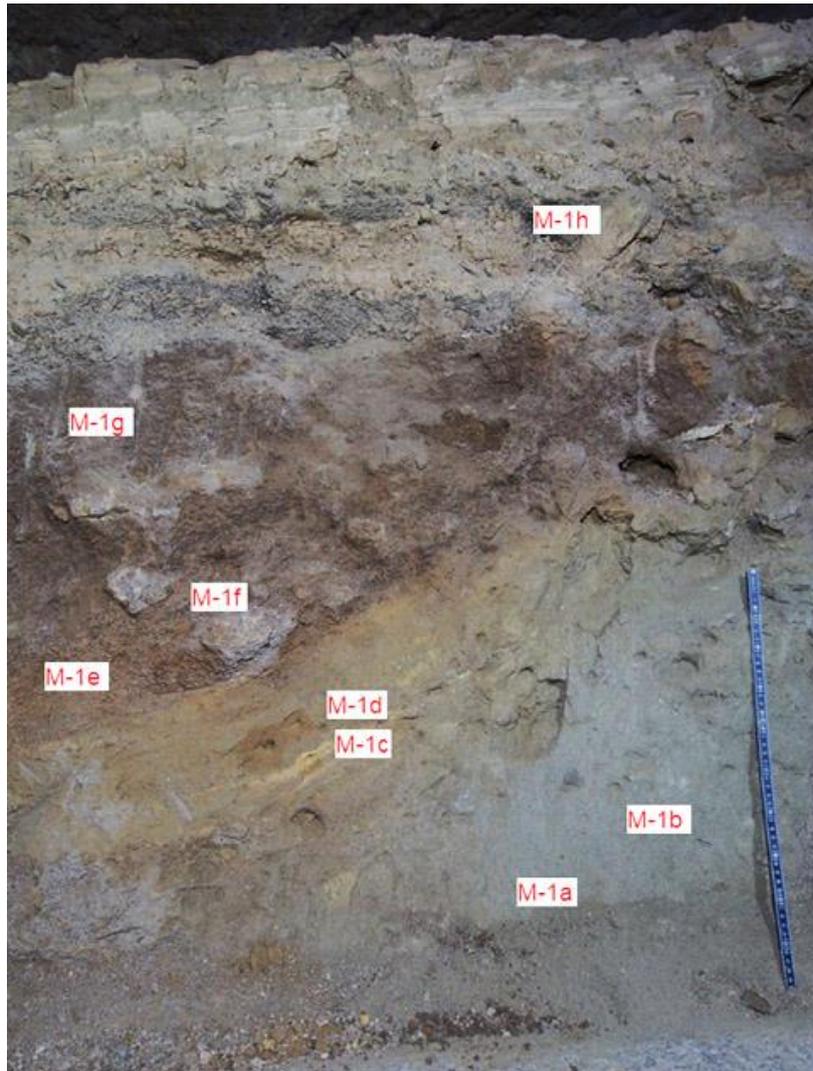


Abbildung 7: Überblick über Profil M1 mit Probeentnahmestellen. Länge des Maßstabs 50 cm.

M-2 Halle der Vergessenheit

Entlang eines rund 1 m tiefen Einschnitts eines Gerinnes ist der *Helle Höhlenton* gut aufgeschlossen. Zwei Proben wurden genommen.

M-3 Schwarzer Gang

In diesem Teil des *Edelweißlabyrinths* ist die Sedimentoberfläche (*Heller Höhlenton* lagert am Top mit Trockenrissen) mit einer dünnen schwarzen Schicht bedeckt. Von der schwarzen Schicht wurden zwei Proben genommen.

M-5 Schwarzer Gang

Eine schwarze Schicht liegt im Ton eingebettet. Eine Probe der schwarzen Schicht wurde entnommen. Charakteristisch ist hier eine Kegelbildung der Sedimenteoberfläche.

M-06 Lehmhalle

Das Profil in der Lehmhalle (Abb. 8), im großen Dom, wurde extra für diese Arbeit freigelegt. Erwähnenswert ist, dass sich die Lithologie in der näheren Umgebung von der in der Grabung unterscheidet. Dort wurde eine Brekzie mit bis zu 10 cm großen Komponenten gefunden, die sich im Profil nicht angefundnen hat. Es ist möglich, dass nicht tief genug gegraben wurde und

sie etwas tiefer auftauchen würde. Die Felssohle wurde bei der Grabung nicht erreicht. Im Profil (Tabelle 4) haben wir einen großen Block Dachsteinkalk gefunden, was auf Versturzvorgänge während der Ablagerung des Höhlensediments hinweist.

Die Abschließende Schicht *Hellen Höhlentones* schmiegt sich über den gesamten Hügel und zeigt zwar Schichtung, aber keine ebene Ablagerung an. Eine zweite Schicht *Hellen Höhlentones* etwas tiefer im Profil, welche auffallend diskordant die untere und darüber liegende Schicht schneidet. Die mittlere mächtige Siltschicht hat zudem Trockenrisse, die mit *Hellem Höhlenton* gefüllt wurden. Zudem haben sich auch in ihr Konkretionen gebildet, die zum Teil sogar eine feste Lage gebildet haben. Da die Höhlensohle nicht erreicht wurde, bildet die tiefste gegrabene Schicht die Basis des Profils M-06.

Tabelle 4: Aufschlussbeschreibung von M-06.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|----|-------|-----|---------------|----------|---------------------------|------------|---|
| 12 | | 27 | Ton | 10yr 6/6 | dunkles gelbliches orange | lagig | Heller Höhlenton; chaotisch in Lagen kreuz und quer |
| 11 | | 15 | Silt | 5y 4/4 | gedecktes olive-braun | massig | Diskordanzen an beiden Schichtgrenzen |
| 10 | | 17 | Ton | 10yr 6/6 | dunkles gelbliches orange | eben lagig | Heller Höhlenton |
| 9 | M-06b | 55 | Silt | 5y 4/4 | gedecktes olive-braun | massig | Konkretionen und eine Konkretionslage, Trockenrisse verfüllt mit Hellem Höhlenton |
| 8 | | 5 | Fein Sand | 5y 5/4 | düsteres olive-gelb | massig | |
| 7 | | 8 | Silt | 5y 5/4 | düsteres olive-gelb | massig | Konkretionen |
| 6 | | 10 | Fein Sand | 5y 5/2 | helles olive-grau | massig | mit einer auf beiden Seiten Auslaufenden grünlichen, geschichteten Lage |
| 5 | | 2 | Silt- Sand | 5y 5/4 | düsteres olive-gelb | eben lagig | |
| 4 | | 16 | Sand mit Kies | 5y 5/2 | helles olive-grau | eben lagig | Kiesgroße Augensteine |
| 3 | | 10 | Silt | 5y 4/4 | gedecktes olive-braun | eben lagig | Sandige Strifen drin |
| 2 | M-06a | 9 | Fein Sand | 5y 5/3 | helles olive-braun | massig | gut sortiert |
| 1 | | >31 | Silt-Sand | 5y 4/4 | gedecktes olive-braun | eben lagig | Konkretionen |



Abbildung 8: Überblick über Profil M6 mit Probeentnahmestellen.

Diese unterste Schicht ist mindestens 31 cm dick und besteht aus Silt und Sand. Die Farbe ist laut *Rock-color-Chart* (Geological Society of America (1995)) *gedecktes olive-braun*. Sie ist eben lagig gegliedert. Zudem findet man in ihr Konkretionen. Darauf liegt eine dünne, 9 cm dicke, gut sortierte *helle oliv-braune*, feinsandige Schicht. Oberhalb von ihr liegt eine Siltschicht mit sandigen Streifen. Sie sind ebenlagig eingeordnet. Ihre Farbe ist *gedecktes olive-braun*. Es folgt eine Sandlage mit kiesgroßen *Augensteinen*. Sie zeigen keine besondere Einregelung in diese Schicht. Sie ist *hellolive-grau* mit ebener Schichtung. Eine 2 cm dünne Silt-Sand-Schicht folgt. Sie hat keine besonderen Merkmale. Sie unterscheidet sich durch ihre dunklere Farbe von der darunterliegenden Schicht. Eine Feinsandlage folgt. Sie ist sehr massig, mit *hellolive-grauen* Farbton und ist 10 cm dick. In ihr befinden sich nach beiden Seiten auslaufende, dünne, geschichtete, grüne Lagen. Darauf folgt eine massige Siltschicht in dunklerem *olive-gelb*. Sie ist 8 cm dick und enthält Konkretionen. Es folgt eine 5 cm dünne Feinsandschicht im selben Farbton. Auch sie ist massig, zeigt aber sonst keine herausstechenden Merkmale. Nun folgt eine sehr prominente Siltschicht. Sie sticht nicht nur durch ihre 55 cm Mächtigkeit heraus, sondern auch, dass sie von Trockenrissen durchzogen ist. Diese Risse sind mit *Hellem Höhlenton* gefüllt. Die Lage ist massig und *gedeckt olive-braun*. In ihr kommen auch Konkretionen vor. Nun folgt eine Schicht des typischen *Hellen Höhlentons*, allerdings etwas dunkler als in anderen Stellen in der Höhle. Dieser Höhlenton bildet auch die Verfüllung der Spalten in der darunterliegenden Siltschicht. Es folgt eine 15 cm dicke, massige Siltschicht, die sich sowohl diskordant auf *Höhlenton* aufliegt, als auch von

Höhlenton diskordante überlagert wird. Sie ist von *gedeckt olive-brauner* Farbe, enthält nach oben offene Trockenrisse und lagig angeordnete Konkretionen. Das Profil wird von einer ebenfalls dunkleren Schicht lagigen *Höhlentons* abgeschlossen. Sie liegt zwar konkordant auf der Siltschicht, ist aber nicht eben lagig sondern erscheint zusammengedrückt.

M-07 Wassergang

Im *Wassergang* fließt ein kleiner Bach der ein ca. 60 cm tiefes Profil gegraben hat ([Abb. 6](#), [Tabelle 5](#)). Hier findet sich eine Flowstone-Lage die sich zwischen zwei Lagen *Hellem Höhlenton* befindet. Die unterste Schicht besteht aus *grau-oliv-braunem* Silt. Die Felssohle der Höhle ist nicht aufgeschlossen. Auf der untersten aufgeschlossenen Schicht liegt eine 22 cm eben lagige Schicht aus *Hellem Höhlenton*. Dann folgt eine Flowstone-Schicht aus massivem Kalzit. Sie ist 7 cm dick und intensiv *weiß* gefärbt. Eine 8 cm dicke Siltlage folgt. Sie liegt eben auf dem Flowstone und ist *grau-olive-braun* gefärbt. Darauf folgt die erste Lage *Hellen Höhlentons* von 5 cm Mächtigkeit. Diese Schicht ist zum Teil durchzogen von dünnen glimmerreichen Schichten. Es folgt eine 10 cm dicke Sandlage. Sie ist recht massiv und *hell braungrau* gefärbt. Abgeschlossen wird das Profil von einer nur 3 cm dicken Schicht *Hellen Höhlentons*. Sie liegt locker auf, fast wie aufgedudert und geht mehr in den *dunkleren braunen* Farbbereich.

Tabelle 5: Aufschlussbeschreibung M-07.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|---|--------------|-----|-----------|----------|---------------------------|------------------|---|
| 7 | | 3 | Ton | 10yr 7/3 | blasses orangliches braun | locker auflegend | Heller Höhlenton |
| 6 | | 10 | Sand | 5B 7/1 | hell bläuliches grau | massiv | |
| 5 | | 5 | Ton | 10yr 8/2 | sehr blasses orange | eben lagig | Heller Höhlenton mit dunkleren dünnen glimmerlastigen Schichten |
| 4 | | 8 | Silt | 8y 5/3 | grau olive-braun | eben lagig | |
| 3 | M-07a, M-07b | 7 | Flowstone | N9 | weiß | massiv | Kalzit |
| 2 | | 22 | Ton | 10yr 8/2 | sehr blasses orange | eben lagig | Heller Höhlenton |
| 1 | | > 7 | Silt | 8y 5/3 | grauliches olive-braun | eben lagig | |

M-8 Windstollen

Im *Windstollen* befindet sich an der untersuchten Stelle ein Flowstone unterhalb einer Schicht *Hellen Höhlentones*. Hier wurden zwei Proben entnommen zur Datierung des Flowstones um ein Mindestalter des *Hellen Höhlentones* zu bestimmen.

M-9 Bockstalagmit

Der rund 2 m hohe *Stalagmit* (seine Basis ist in Tone eingebettet) steht im *Minotauruslabyrinth*. Ihm wurde eine kleine Probe der jüngsten Sintergeneration an einer versteckten Stelle zur Altersbestimmung entnommen. Der *Bockstalagmit* ist in *Hellem Höhlenton* eingebettet.

M-10 Minotauruslabyrinth Höllentor

Hier wurde aus einer kleinen Ausgrabung zwei Proben entnommen. *Heller Höhlenton* liegt über einer sehr dunklen grünliche-bräunlichen Schicht.

M-11 Südsystem nach Einstieg Hexenrutsche

Ein sich eingegrabener Canyon legt Kalksteine frei, die einen dickeren schwarzen Überzug besitzen. Der Canyon ist nur zeitweise wasserführend.

M-12 Südsystem

Im Südsystem hat sich ein ehemaliger Bach einen ca. 1 m tiefen Graben in das Höhlensediment eingeschnitten. Das Profil (Abb. 6, Tabelle 6) besteht aus Lagen *Hellen Höhlentons*, die sich mit Lagen aus siltigem Material abwechseln. Die Lagen des Höhlentones werden nach oben hin häufiger und mächtiger. Während die siltigen Lagen weniger werden. In ca. 25 cm Tiefe befindet sich eine sandige Lage, die aber zu einer Seite hin auskeilt. Das Profil als Ganzes lässt sich grob in drei Schichten einteilen. Die Abgrenzung der Schichten ist allerdings nicht sehr eindeutig.

Tabelle 6: Aufschlussbeschreibung M-12.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|---|----|------|------|-----------------------------|---|--------------|--|
| 3 | | 7 | Ton | 8y 5/3 und 10yr 8/2 | grauliches olive-braun und sehr blasses orange | eben laminar | Wechsellagerung zwischen grüner Schicht und Hellem Höhlenton |
| 2 | | 47 | Silt | 8y 5/3 | grauliches olive-braun | eben laminar | Sandige Zwischenschicht; ein wenig Heller Höhlenton und rötliche Schichten |
| 1 | | > 26 | Silt | 8y 5/3, 10yr 8/2 und 5r 4/6 | grauliches olive-braun, sehr blasses orange und gedecktes rot | eben laminar | Hauptsächlich grünliche Schicht aber auch Heller Höhlen Ton und Rötliche Schichten |

Die unterste Schicht besteht aus hauptsächlich grünen Lagen aus Silt (*gräuliches olive-braun*). Dazwischen befinden sich immer wieder Lagen in *hellem orange* (*Heller Höhlenton*) und *gedecktem rot*. Sie liegen alle eben aufeinander. Es folgt eine 47 cm mächtige Schicht aus Silt von fast nur *gräulich-olive-brauner* Farbe. Die in der darunterliegenden Schicht noch häufiger vorkommenden Lagen aus *Hellem Höhlenton* und roten Siltlagen kommen in dieser Schicht kaum vor. In dieser Schicht gibt es eine sandige Zwischenschicht. Die oberste Schicht besteht wie üblich aus *Hellem Höhlenton*, der sich hier mit grünlichen Schichten abwechselt.

M-13 Minotaurus-Labyrinth

Im *Minotaurus-Labyrinth* knapp oberhalb des *Wasserschachtes 1* befindet sich ein Profil, das hauptsächlich aus *Hellem Höhlenton* besteht (Abb. 6, Tabelle 7). In der ca. 1 m dicken Lage des *Hellen Höhlentones* befindet sich eine Lage *dunkelbraunen* Silts und ein verstürzter Blockes Dachsteinkalk. Hier wurde eine Probe zur Analyse des *Hellen Höhlentones* genommen. Auch bei diesem Profil ist die Felssohle nicht aufgeschlossen.

Tabelle 7: Aufschlussbeschreibung M-13.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|---|------|------|------|----------|------------------------------------|----------------|---|
| 4 | M-13 | 10 | Ton | 10YR 9/2 | sehr sehr blasses orange | eben Laminiert | Heller Höhlenton |
| 3 | | 28 | Ton | 10YR 8/2 | sehr blasses orange | eben Laminiert | Heller Höhlenton |
| 2 | | 15 | Silt | 10YR 4/4 | gedecktes dunkles gelbliches braun | laminiert | umgelagert |
| 1 | | > 10 | Ton | 10YR 8/2 | sehr blasses orange | eben Laminiert | Heller Höhlenton; eingebettetes Stück Dachsteinkalk |

Das Profil besteht aus drei leicht unterschiedlichen Arten *Hellen Höhlentones* und einer Zwischenschicht aus Silt. Der unterste Teil des Profils ist eine mindestens 10 cm dicke Schicht aus *Hellem Höhlenton*. In dieser eben laminierten Schicht ist das Stück aus Dachsteinkalk eingebettet. Darauf liegt die oben erwähnte Silt-Zwischenschicht. Sie ist von *gedecktem*

dunklen gelb-Braun und weist Lamination auf. Abgeschlossen wird das Profil von zwei Schichten eben gelagerten *Hellen Höhlentons*, wobei die obere abschließende Schicht noch ein wenig heller ist.

M-14 Minotaurusgang, oberhalb der Kletterstelle unterhalb Hydromagnetit

An der Decke befindet sich eine dünne schwarze Schicht. Diese wurde für Vergleichszwecke beprobt.

M-15 Sklavengang

Im Sklavengang befindet sich ein Profil ([Abb. 2](#), [Tabelle 8](#)), dass von der Basis bis knapp unter die Decke des Ganges aufgeschlossen ist. Direkt auf der Felssohle aufliegend befindet sich in diesem Profil eine 41 cm mächtige Siltschicht. Die Textur dieser Schicht ist laminar. Die Schicht hat eine *gedeckte olive-braune* Farbe. In ihr befinden sich bräunliche Zwischenlagen, die allerdings nach beiden Seiten hin auskeilen. Es folgt eine 20-cm-Tonschicht im *gedeckten gelb-Braun*. Auf ihr liegt eine eben- laminierte Silt bis Feinsandschicht. Auffällig sind die mit schwarzen Sediment verfüllten Spalten. Sie ist rund 39 cm mächtig. Darauf liegt eine 5 cm dicke laminare Schicht *hellbraunen* Lehms. Auf ihr folgt wiederum eine weitere 5 cm dicke Schicht, die aus Silt besteht. Sie ist *gedeckt gelb-Braun* gefärbt und laminar geschichtet ist. Obenauf liegt eine konglomeratische Brekzie, die hauptsächlich aus kalkigen Komponenten besteht. Sie ist sehr massig und *bläulich weiß* gefärbt. An der Basis des Gesteins befindet sich *Augensteine* (auch Bohnerz). Zudem fällt auf, dass sie an ihrer Basis feiner gekörnt ist und nach oben gröber wird. Die größten der kalkigen Hauptkomponenten sind bis zu 20 cm groß. In der konglomeratischen Brekzie befindet sich auch eine Konkretion mit ca. 30 cm Durchmesser. Die gesamte Schicht ist an dieser Stelle bis zu 91 cm mächtig. Der Abschluss dieses Profils ist eine 115 cm dicke Schicht aus *Hellem Höhlenton*. Diese Tonschicht ist uneben laminiert. Zudem scheint diese Schicht verformt und in mehrere unterschiedliche Teile getrennt zu sein. Manche dieser Stücke zeigen ein vadoses Relief. Eine genauere strukturgeologische Untersuchung vergleichbar mit der Arbeit von [Salomon \(2014\)](#) ist zu empfehlen.

Tabelle 8: Aufschlussbeschreibung M-15.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|---|-------|-----|---------------------|----------|----------------------------|-----------------------------|---|
| 7 | | 115 | Ton | 10yr 8/2 | sehr blasses orange | in Schichten Kreuz und Quer | Heller Höhlenton, in Blöcke Zersetzt, vadoses Relief |
| 6 | | 91 | Konglomerat-Brekzie | 5B 9/1 | bläuliches weiß | massig | Bohnerz an der Basis, ist unten feiner, bis 20 cm Größe |
| 5 | | 5 | Silt | 10yr 5/4 | gedecktes gelbliches braun | laminar | |
| 4 | | 5 | Lehm | 5yr 5/6 | hell braun | laminar | |
| 3 | M-15b | 39 | Silt-Feinsand | 10y 7/4 | gedecktes grünliches gelb | laminar | schwarze Spaltfüllung |
| 2 | | 20 | Ton | 10yr 5/4 | gedecktes gelbliches braun | laminar | |
| 1 | M-15a | 41 | Silt | 5y 4/4 | gedecktes olive-braun | laminar | hat bräunliche Lagen die auf beiden Seiten auskeilen |

M-16 Konglomeratwand

Bei der *Konglomeratwand*, neben der Stahlstiege, befindet sich ein Aufschluss, der der Wand den Namen gibt ([Abb. 9](#), [Tabelle 9](#)). Die Dicke des Konglomerates lässt sich nur schätzen, da man weder die Basis sieht, noch den obersten Teil der Schicht. Das Konglomerat scheint sich in mehreren Zyklen abgelagert worden zu sein. Auf herauswitternde gräuliche Schichten folgen im Wechsel geringmächtigere rötliche Schichten. Meist ist die Matrix der rötlichen Schichten

feinkörniger. Innerhalb der gräulichen Schichten können sich die Komponenten so verkitten, dass sie Platten bilden.

Tabelle 9 Aufschlussbeschreibung M-16.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|---|------|----|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------|--|
| 8 | | >5 | grobkies | 5B 9/1 | bläuliches weiß | massiv | |
| 7 | | 12 | grob sand | farbübergang von 5B 9/1 nach 10R 5/6 | rötlich geht in grau über | gradiert | coarsing upwards |
| 6 | M-16 | 7 | mittel bis grob sand | 10R 5/6 | gedecktes rotliches orange-braun | massiv | |
| 5 | | 13 | grobkies | 5B 9/1 | bläuliches weiß | massiv | |
| 4 | | 7 | | 5B 9/1 und 10R 5/6 | rot-grau-rot-grau-rot | (laminiert) | 5 sehr dünne Schichtnen rot grau rot grau rot |
| 3 | | 20 | grobkies bis schutt | 5B 9/1 | bläuliches weiß | massiv | |
| 2 | | 3 | grob sand mit kies | 10R 5/6 | gedecktes rotliches orange-braun | massiv | |
| 1 | | >8 | grobkies | 5B 9/1 | bläuliches weiß | massiv | |

Die Kornform ist stark variierend von gut gerundet bis eckig, doch sind alle Komponenten mindesten kantengerundet. Große Komponenten können auch die einzelnen Schichten durchschlagen. Alle Komponenten des Konglomerates bestehen aus Dachsteinkalk. Ihre Größe erreicht 26 cm. *Augensteine* und Konkretionen wurden hier nicht gefunden. Nur an frischen Flächen kann man eine genaue Unterscheidung zwischen den einzelnen Schichten machen. An älteren Flächen scheinen sich rötliche Schleier über den Aufschluss zu legen, vermutlich aus ausgewaschener, rötlichen Matrix. Zu erwähnen sind einzelne größere Brocken, die sich wahrscheinlich bei einem Versturz von der Decke gelöst haben und in die Konglomerate eingebaut wurden.

Das ausgewählte Profil in der Konglomeratwand ist rund 75 cm hoch. Für dieses Teilprofil haben wir die Stelle gewählt, an der die Schichten am besten zu unterscheiden sind. Zu erwähnen ist, dass sich die Schichten bis auf kleine Unterschiede in der Kongröße nur in der Farbe unterscheiden. Die unterste Schicht unseres ausgewählten Profiles bildet eine Grobkiesschicht. Sie ist von *bläulich-weißer* Farbe und massig. Es folgt eine rötliche Grobsandschicht mit Kieskomponenten. Es folgt wiederum eine *bläulich-weiße* Grobkiesschicht mit Komponenten bis zur Schuttkorngröße. Darauf liegen fünf sehr dünne Schichten, die zusammen 7 cm mächtig sind. Hier wechseln sich rötliche und gräuliche (*bläulich-weiß*) Schichten ab. Sie sind feiner als ihre unterliegenden Schichten und sind in den Sandbereich einzustufen. Auf ihnen liegt eine massive Grobkiesschicht. Sie ist rund 13 cm mächtig und wie auf rötliche Schichten folgend *bläulich-weiß*. Es kommen nun eine 7 cm mächtige rötliche Mittel- bis Grobkieslage und eine 12 cm mächtige, von rötlich ins *bläulich-weiße* übergehende Grobsandlage. Letztere zeigt ein deutliches coarsening upward auf. Abgeschlossen wird dieses Profil mit einer massiven, *bläulich-weißen* Grobkieslage.

Bei einem westlich davon gelegenen Aufschluss (nahe der Stiege) lagert am Top des Konglomerats einige Zentimeter *Heller Höhlenton*.



Abbildung 9: Überblick über den Aufschluss M16.

Dachstein-Rieseneishöhle (DRE)

E-01 Lehmhalle

Zum Auffinden von Höhlenbärenknochen wurde 1995 von der Universität Wien eine Grabung in der *Lehmhalle* durchgeführt. Die Grube wurde nicht wieder verschüttet und legt nun ein 1,8 m breites und rund 2 m tiefes Profil frei (Abb. 10, Tabelle 10), wobei die Felssohle nicht erreicht wurde. Das Profil besteht aus Tonlagen bis Kiesen und zeigt weder regelmäßig wiederkehrende, noch einheitliche Trends auf.

Tabelle 10: Aufschlussbeschreibung E-01.

| # | Pr | Mä | Kg | Fac | Farbe | Textur | Weitere Merkmale |
|----|--------------|-------|---------------------|----------------|--------------------------|------------------|---|
| 12 | | 2 | Ton | 10YR 8/2 | sehr blasses orange | Eben Lagig | Heller Höhlenton |
| 11 | | 8 | mittel Kies | 5Y 4/1 dunkler | olive-grau | Korngestützt | Augensteinlage, siltig-sandige Matrix |
| 10 | | 9 | mittel Kies | 5Y 4/1 | olive-grau | Korngestützt | Augensteinlage, Sandige Matrix |
| 9 | | 5 | Sand | 10YR 6/2 | blasses gelbliches braun | Eben Lagig | keilt seitlich aus |
| 8 | | 2 1/2 | mittel Kies | 5Y 4/1 | olive-grau | Korngestützt | Augensteinlage, Imbrikation NW |
| 7 | | 5 1/2 | Ton | 10YR 8/2 | sehr blasses orange | massig | dunklerer Heller Höhlenton; Trockenrisse |
| 6 | | 7 | Ton | 10YR 8/2 | sehr blasses orange | massig | Heller Höhlenton; Trockenrisse |
| 5 | E-01e, E-01f | 30 | Lehm | 10YR 5/4 | hell olive | matrixgestützt | Matrix ist Lehm; oben klastiger unten lehmiger |
| 4 | E-01d | 25 | fein Sand | 10Y 5/2 | blasses gräuliches olive | Schrägschichtung | Schichtung nach Nord-West |
| 3 | | 2 1/2 | Sandstein | 10Y 5/2 | blasses gräuliches olive | massig | verhärtet Sandsteinlage in zwischen den zwei Schichten |
| 2 | E-01c | 90 | Ton | 5Y 5/2 | hell olive-grau | lagig | sandig und siltige Lagen eingeschoben |
| 1 | E-01a, E-01b | > 40 | Grobsand bis Schutt | - | - | Korngestützt | Augensteine; oberste Lage gröber und eingeregelt nach Süd-Ost |

Die unterste Schicht besteht aus gröberen Komponenten. Die Korngröße schwankt von Grobsand bis Schutt. Das Gefüge ist korngestützt und es sind hauptsächlich *Augensteine* vorhanden. Auffallend ist, dass der obere grobkörnige Teil eine Einregelung der *Augensteine* nach Süd- Ost zeigt. Diese weisen eine Imbrikation auf. Auf ihr liegt eine 90 cm mächtige Tonschicht mit eingeschlossenen sandigen und siltigen Lagen. Die Farbe ist *hell olive-grau* und im Ganzen ist die Schicht lagig aufgebaut. Es folgt eine 2,5 cm mächtige Sandsteinschicht. In ihr befindet sich eine verhärtete Lage, die in Platten zerbrochen ist. Darauf liegt eine 25 cm dicke Feinsandschicht im selben *hellgrauen-oliv*. Auffallend ist eine Schrägschichtung mit Einfallen der Schichtblätter Richtung Nordwest. Darüber lagert eine 30 cm mächtige Lehmschicht in *hell-olive*. Sie könnte man in einen oberen Teil, der klastischer (krümeliger) ist, und einen unteren Teil, der einen höheren Tonanteil hat, unterteilen. Die gesamte Schicht hat einen *hellen oliven* Farbton. Nun folgen zwei Schichten *Hellen Höhlentones* mit Trockenrissen. Sie unterscheiden sich optisch dadurch, dass die obere 5,5 cm Schicht dunkler ist als die 7 cm mächtige untere Schicht. Beide Schichten sind massig. Auf ihnen liegt eine 2,5 cm dicke Augensteinlage. Sie hat eine Korngröße von mittlerem Kies und ist korngestützt. In ihr kann man eine Imbrikation nach Nordwest erkennen. Auf ihr liegt eine 5 cm mächtige Sandschicht von grauer Farbe. Sie keilt zur Seite des Profils hin aus. Es folgen zwei

Augensteinlagen mit 8 und 9 cm Mächtigkeit. Ihre Matrix ist korngestützt, aber im Unterschied zu den zwei anderen *Augensteinschichten* zeigen beide keine Imbrikation. Sie unterscheiden sich durch ihre Matrix. Während die untere sandig ist, besteht die obere neben dem Sand auch aus Silt. Den Abschluss dieses Profils bildet eine Schicht *Hellen Höhlentons*. Sie ist rund 2 cm dick und ebenlagig.



Abbildung 10: Überblick über Profil E1 mit Probeentnahmestellen.

E-2 Schmetterlingsgang

Nahe der Oberfläche wurde ein Höhlenausgang mit Gesteinsschutt (vermutlich von außen) versperrt. Das Material besteht aus Komponenten unterschiedlichster Korngrößen (Blöcke bis Silt-Ton) und Rundungen. Dies bildet einen starken Kontrast zu den umliegenden Gesteinen, die keine feinen Komponenten führen.

E-03 Iwanlabyrinth

An dieser Stelle befindet sich eine grünlich-graue Schicht an der Decke. Bei ihr scheinen die Feinkomponenten schon ausgewaschen worden zu sein.

E-04 Iwanhalle

Durch ein Loch an der Decke tropft Wasser auf das unterliegende Gestein. Hier hat sich neben dem Kalzitüberzug auch ein dünner schwarzer Belag auf den Steinen gebildet.

Schönberghöhle (SBH)

S-01 Biwak 1

In der Nähe des *Biwak-Platzes 1* wurde ein kleiner Aufschluss gegraben. Hier steht *Heller Höhlenton* in mehr oder minder gestörter Lagerung an.

S-02 Hauptgang nahe VP-18

Dunkelbraun tonige Lagen wechseln sich mit schwarzen Lagen sich an diesem Aufschluss ab. Die Höhe des Aufschlusses beträgt ca. 40 cm.

Korngrößenanalysen

Profil M-01

Eine Zusammenfassung der Kornsummenkurven für Profil M-01 findet sich in [Abb. 11](#). Diese zeigt unterschiedliche Verläufe, die in der Folge erläutert werden.

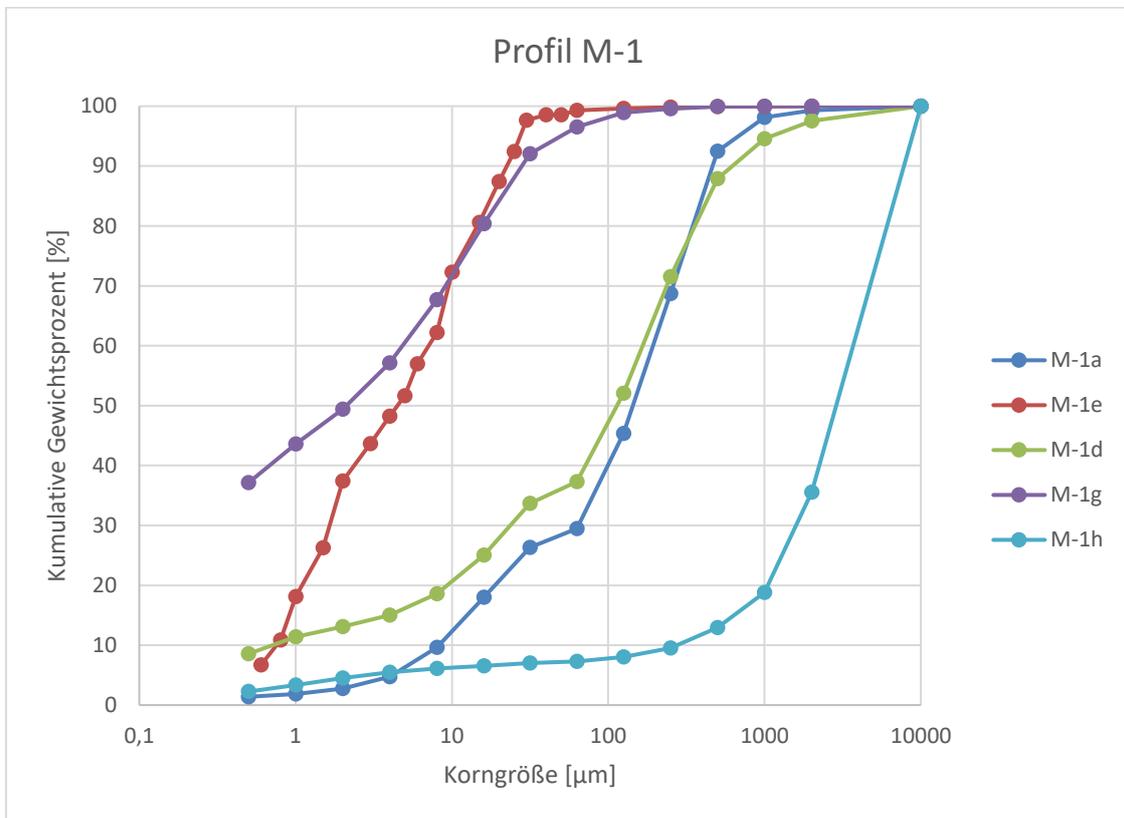


Abbildung 11: Kornsummenkurven der genommenen Proben im Profil M-01.

M-01a

Die Probe M-01a ist eine sehr schlecht sortierte Probe ([Abb. 11](#)). Es gibt zwar einen Hauptteil, allerdings kommen alle Korngrößenfraktionen vor. Der Hauptteil der Probe wird von drei Fraktionen gestellt. Es sind die Fraktionen größer als 0,125; 0,25 und größer als 0,5 mm. Ein Ausbleiben in der Grobsiltfraktion ist auffällig. Dann folgt ein erneutes Plateau (0,008-0,016 mm und 0,016-0,0315 mm Fraktionen) bis die kleineren Fraktionen der Probe mit abnehmenden Anteilen aufscheinen.

M-01d

Die Probe M-01d ist der Probe M-01a in der Korngrößenverteilung sehr ähnlich ([Abb. 11](#)). Jedoch ist sie weiter gestreut als diese.

M-01e

Die Probe ist sehr feinkörnig. Es sind zwar alle Siebfractionen zu finden aber mit sehr großem Abstand sind die Fraktionen des Siltes und des Tones am häufigsten ([Abb. 11](#)). Im Sedigraph zeigt sich, dass die Probe hauptsächlich aus Ton besteht.

M-01g

Die Probe ist sehr feinkörnig. Der Hauptanteil ist deutlich im Silt- und Tonbereich zu finden, wobei der Tonanteil größer als der Siltanteil ist (Abb. 11). Die Siltanteile sind gleichmäßig verteilt. Unter den Siebfraktionen ist der Feinsandanteil am größten.

M-01h

Der Korngrößenanteil ist bei der Fraktion über 2 mm am größten und nimmt zu den kleineren Fraktionen hin ab. Andere auffällige Merkmale sind nicht zu erkennen (Abb. 11).

Profil M-02

Eine Zusammenfassung der Kornsummenkurven für Profil M-02 findet sich in Abb. 12. Diese zeigt unterschiedliche Verläufe, die in der Folge erläutert werden.

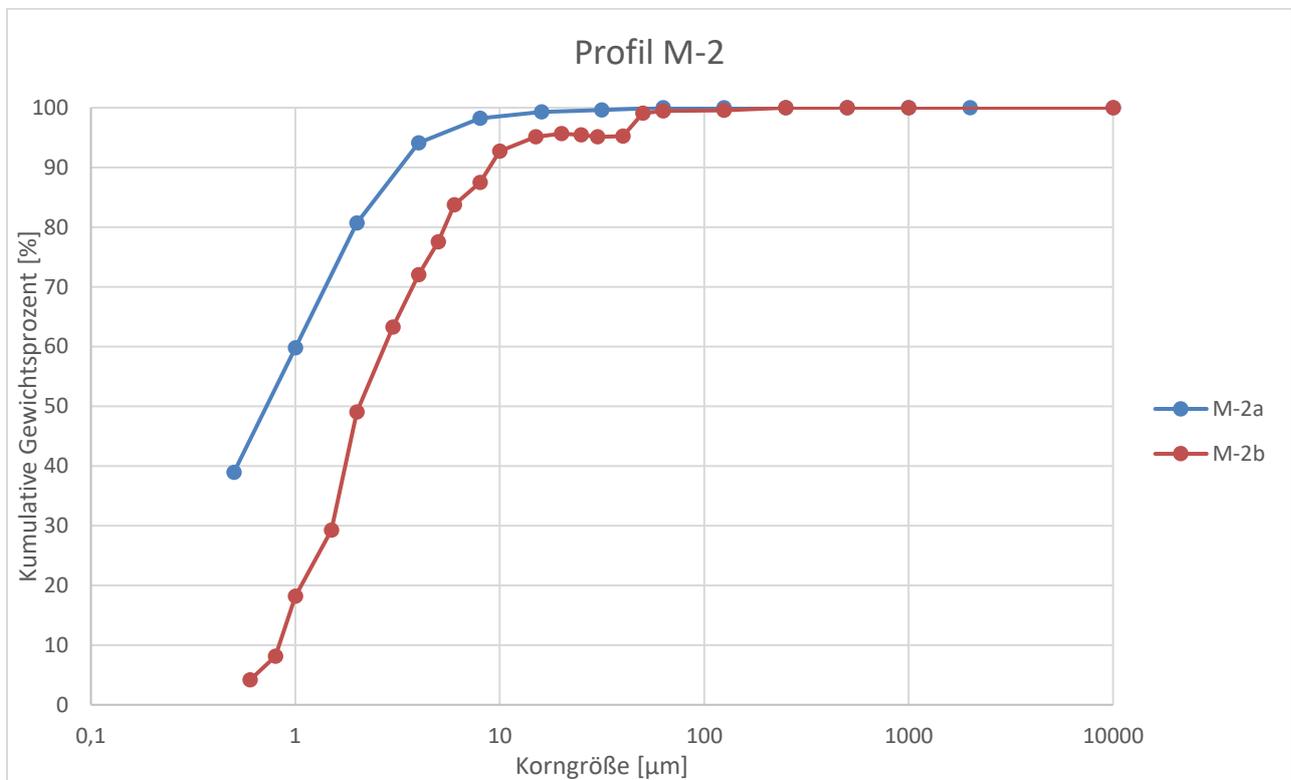


Abbildung 12: Kornsummenkurven der genommenen Proben in Profil M-02.

M-02a

Diese ist eine sehr feinkörnige Probe. Das Sieben zeigte, dass sie ausschließlich aus Silt und Ton besteht (Abb. 12). Der Sedigraph zeigt zudem, dass die Anteile zu den feineren Fraktionen hin zunehmen.

M-02b

Es gibt zwar Komponenten bis in den Bereich der Siebfraktion über 0,25 mm, allerdings ist deren Anteil verschwindend gering (Abb. 12). Der stark überwiegende Teil der Probe liegt im Silt- Tonbereich. Im Sedigraph zeigt sich recht deutlich, dass der Anteil des Siltes den des Tones deutlich übersteigt.

Profil M-06

Eine Zusammenfassung der Kornsummenkurven für Profil M-06 findet sich in [Abb. 13](#). Diese zeigt unterschiedliche Verläufe, die in der Folge erläutert werden.

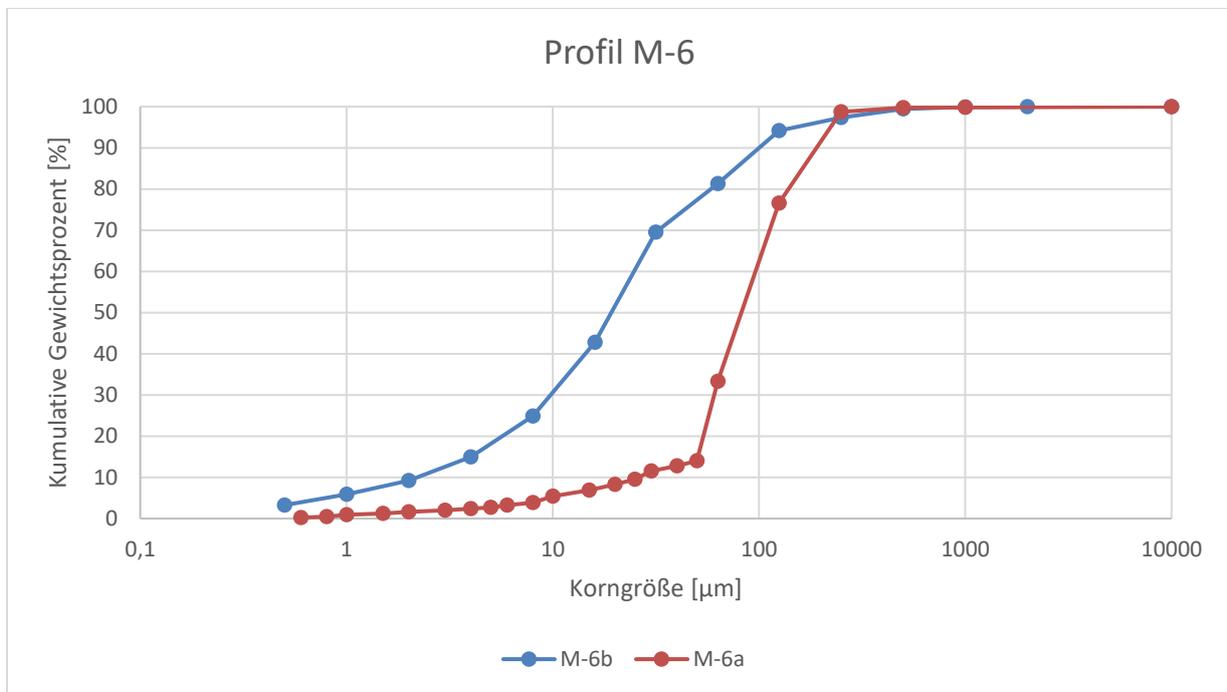


Abbildung 13: Kornsummenkurven der genommenen Proben im Profil M-06.

M-06a

Die Probe M-06a hat Anteile jeder Siebfraction ([Abb. 13](#)). Der Hauptteil der Fraktion ist in der Größe über 0,125 mm anzutreffen. Zu beiden Seiten hin wird der Anteil geringer. Im Sedigraph zeigt sich ein kleiner zweiter Peak im Feinsiltbereich.

M-06b

Die Probe M-06b ist eine Probe, die hauptsächlich aus Silt besteht ([Abb. 13](#)). Dabei ist keine herausstechende Siltfraction zu erkennen, sondern alle Siltfractionen sind zu in etwa gleichen Anteilen vorhanden. Innerhalb der Siebfraction ist der Feinsandanteil relativ hoch. Alle anderen Fraktionen sind vorhanden, haben aber sehr kleine Anteile am Gesamtgewicht der Probe.

Profil E-01

Eine Zusammenfassung der Kornsummenkurven für Profil E-01 findet sich in [Abb. 14](#). Diese zeigt unterschiedliche Verläufe, die in der Folge erläutert werden.

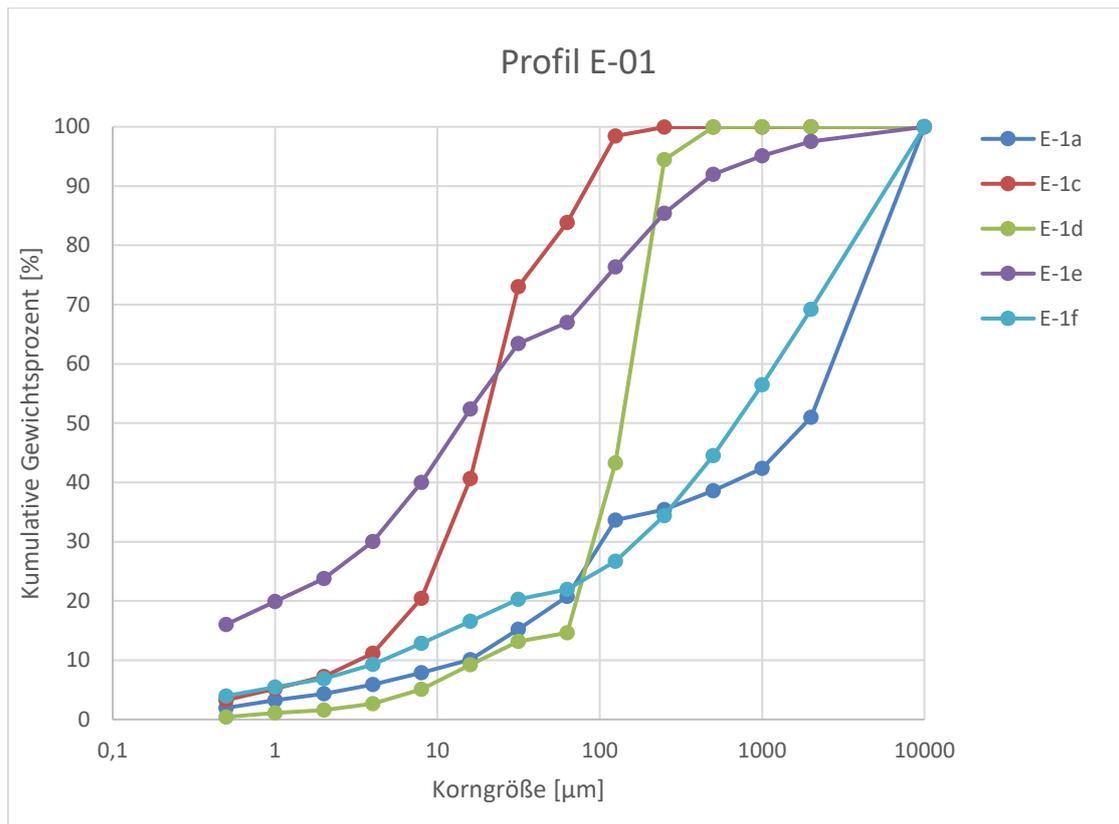


Abbildung 14: Kornsummenkurven der genommenen Proben in Profil E-01.

E-01a

Die Probe E-01a besteht hauptsächlich aus *Augensteinen*. Dies zeigt sich auch in der Siebung. Die größten Komponenten wurden schon aus der Probe entnommen und per Hand vermessen, sie scheinen also auch nicht in der größten Kategorie des Diagramms auf. Trotzdem zeigt sich in der Siebung ein stetig abnehmender Trend von der größten Fraktion über 2 mm bis zur Fraktion über 0,125 mm. Der Feinsandanteil (> 0,063 mm) ist hoch. Von ihm aus wieder nehmen die Fraktionanteile stetig ab (Abb. 14).

E-01c

Diese Probe besteht hauptsächlich aus Silt und Ton. Sie hat kaum gröbere Komponenten (Abb. 14). Nur ein paar Körner der Fraktion größer als 1-2 mm sind in dieser Schicht vorhanden. Anteile der Fraktionen 0,25 mm sind fast nicht vorhanden. Die größte Teilfraktion dieser Probe ist im Siltbereich zwischen 0,0315- 0,063 mm.

E-01d

Die Hauptfraktion der Probe E-01d ist die Fraktion 0,125 mm bis 0,250 mm. Die Probe ist relativ gut sortiert, wie die Kornsummenkurve zeigt (Abb. 14). Dieser Trend setzt sich auch in den Daten aus dem Sedigraph fort. Sie ist etwas reicher an kleineren Fraktionen als an groben Komponenten, wobei keine größer ist als 1 mm.

E-01e

Die Probe E-01e enthält Komponenten jeder Siebfraction. Ihre Anteile nehmen ins feiner werdende stetig zu, wobei die Silt-Tonfraktion den mit Abstand größten Teil stellt (Abb. 14).

Interessant ist, dass die Fraktionen zwischen den Größen $> 0,125$ mm und $> 0,004$ mm fast den gleichen Anteil stellen, mit einer Lücke in der Fraktion $0,0315$ mm – $0,063$ mm.

E-01f

Der Großteil der Probe ist grob fraktioniert (Abb. 14). Die Kurve beginnt mit dem größten Anteil der Fraktion über 2 mm und die Anteile der feineren Fraktionen nehmen ständig ab. Der Trend setzt sich auch in den Feinbereich der Probe fort und lässt sich gut in den Ergebnissen des Sedigraphs erkennen.

Profil E-02

Die bearbeitete Probe in Profil E-02 ist eine Probe mit weiter Streuung (Abb. 15). Die größten Komponenten dieser Probe wurden vor Ort vermessen. Die Siebung zeigt auch deutlich, dass sich die Fraktion über 2 mm deutlich heraushebt. Die Verwendung noch größerer Siebe für diese Probe würde wahrscheinlich zeigen, dass sich alle Komponenten auch weiter in den Steinbereich hinein gleichmäßig verteilen. Die Ergebnisse zeigen deutlich einen stetigen Anstieg in der Kornsummenkurve ohne weitere Ausreißer.

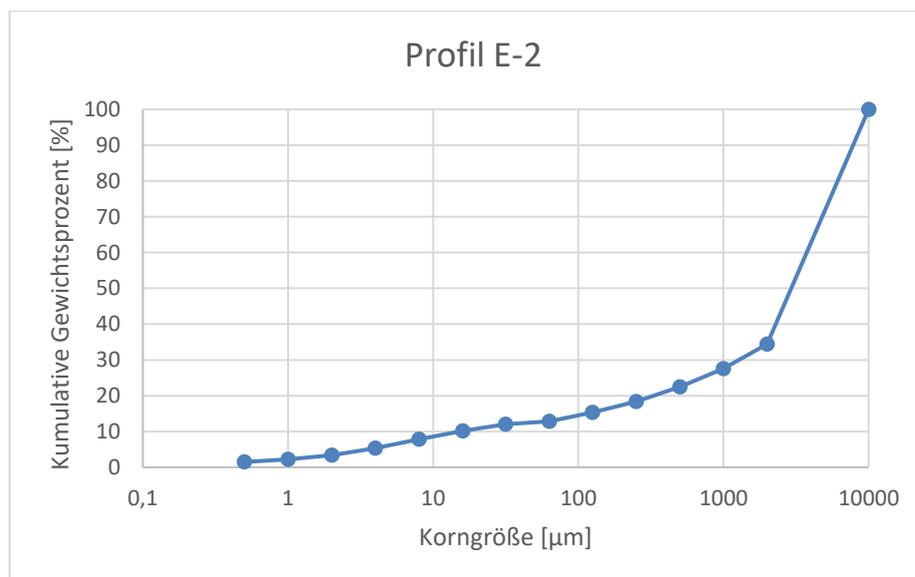


Abbildung 15: Kornsummenkurven der genommenen Proben im Profil E-02.

Organischer Anteil

Herausstechend hoch ist der Anteil an Organischem Material bei den Proben E-01e, M-01a, M-01d und M-02a wo er jeweils um die 10 % liegt (Tabelle 11). Besonders niedrig ist er bei den Proben E-01d, M-02b, M-06a und M-06b

Tabelle 11: Organischer Anteil in Gewichtsprozent. Werte größer 8 % sind grau hervorgehoben.

| Proben | E-01a | E-01c | E-01d | E-01e | E-01f | E-02 | M-01a | M-01d | M-01e | M-01g | M-01h | M-02a | M-02b | M-06a | M-06b |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % | 5 | 2 | 1 | 11 | 5 | 2 | 9 | 8 | 5 | 5 | 1 | 11 | 3 | 1 | 1 |

Röntgendiffraktometrie

Die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie werden in [Tabelle 12](#) zusammengefasst. Es wurden drei Häufigkeitsklassen unterschieden.

Tabelle 12: Abschätzung der Mineralhäufigkeiten mittel XRD in den untersuchten Proben. 1...in Spuren, 2...wenig, 3...viel.

| Probe | Kalzit | Dolomit | Quarz | Chlinochlor | Muskovit | Albit | Spessartin | Rutil | Illit | Goethit |
|-------|--------|---------|-------|-------------|----------|-------|------------|-------|-------|---------|
| E-01a | - | 2 | 3 | 2 | 1 | - | - | - | - | - |
| E-01c | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | - | - | - | - |
| E-01d | - | - | 3 | 2 | - | 1 | - | - | - | - |
| E-01e | - | - | 3 | 2 | - | 1 | - | - | - | - |
| E-01f | - | - | 3 | 2 | - | 1 | - | - | - | - |
| E-05a | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| E-05b | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| E-05c | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| E-05d | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| M-01a | - | 1 | 3 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| M-01b | 3 | 1 | 3 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| M-01c | 3 | 1 | - | 1 | - | - | - | - | - | - |
| M-01d | 3 | 1 | 2 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| M-01e | - | - | - | 1 | - | - | - | - | 1 | 1 |
| M-01f | 3 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - | - |
| M-01g | 2 | 1 | 2 | 1 | - | - | - | 1 | - | - |
| M-01h | - | - | 3 | - | - | - | 2 | - | - | - |
| M-02a | 3 | - | 2 | - | 1 | - | - | - | - | - |
| M-02b | 3 | - | 2 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |
| M-06a | - | 2 | 3 | 2 | 2 | 1 | - | - | - | - |
| M-06b | - | 2 | 3 | 1 | 2 | - | - | - | - | - |
| M-13 | 3 | - | 1 | - | - | - | - | - | - | - |
| S-01a | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | - | - | - | - | - |
| S-01b | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | - | - | - | - | - |
| S-01c | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | - | - | - | - | - |

Profil M-01

Beschreibung: Die XRD-Diagramme des Profils M-01 sind recht eintönig, in den meisten Proben dominiert Kalzit oder Quarz ([Abb. 16](#), [Tabelle 12](#)), wobei ein Trend in den Einzelkomponenten nicht zu erkennen ist. Auffällig sind besonders die zwei Proben M-1h und M-01e, jeweils aus unterschiedlichen Gründen. Probe M-01h ist die einzige Probe mit Bohnerz

und die einzige mit sehr wenig Matrix und kiesgroßen Komponenten gab. Es zeigte sich, dass die Probe fast nur aus Quarz und dem genannten Bohnerz besteht, welches sich durch sehr ähnliche Peaks wie die Mineralphase Spinell auszeichnet. M-01e fällt durch das Fehlen von Quarz und Kalzit auf. Dadurch kam das Hintergrundrauschen besonders zum Vorschein.

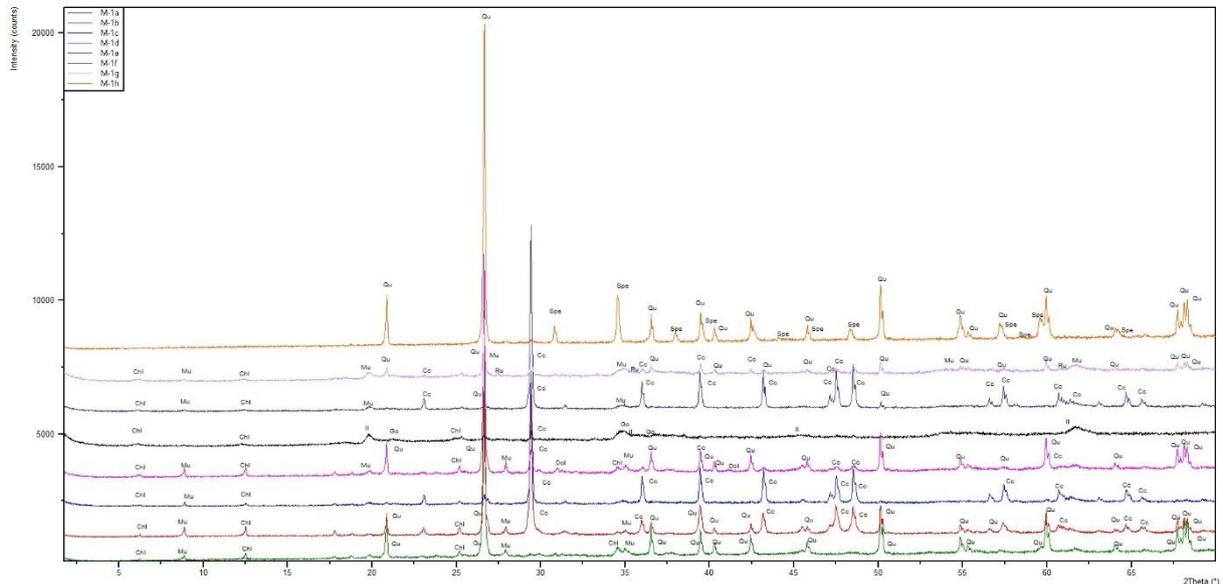


Abbildung 16: XRD Abbildung des Profils M-01.

Interpretation: Die Proben unterscheiden sich hauptsächlich durch den Anteil ihrer Hauptanteile zu den anderen Proben, vereinzelt kommen aber auch Begleitminerale in signifikanter Menge dazu. Die Probe M-01e zeigt ein Fehlen der Hauptminerale Quarz und Kalzit und ein starkes Hintergrundrauschen, welches durch das Fehlen der Hauptminerale oder durch einen hohen Eisenanteil zu erklären ist.

Profil M-02

Beschreibung: Beide Proben haben ein sehr ähnliches XRD- Diagramm, zusätzlich konnte bei der Probe M-02b auch noch Chlorid festgestellt werden (Abb. 17, Tabelle 12).

Interpretation: Der geringe Unterschied war zu erwarten, da es sich um zwei Proben von *Hellem Höhlenton* handelt, nur wurde einmal eine helle und einmal eine dunkle Schicht beprobt. Die dunklere Schicht M-02a zeigt einen höheren Tonanteil, allerdings konnte bei der Probe M-02b Chlorit festgestellt werden, was sehr verwunderlich ist, da M-02a die dunklere, grünlich schimmernde Schicht sein sollte.

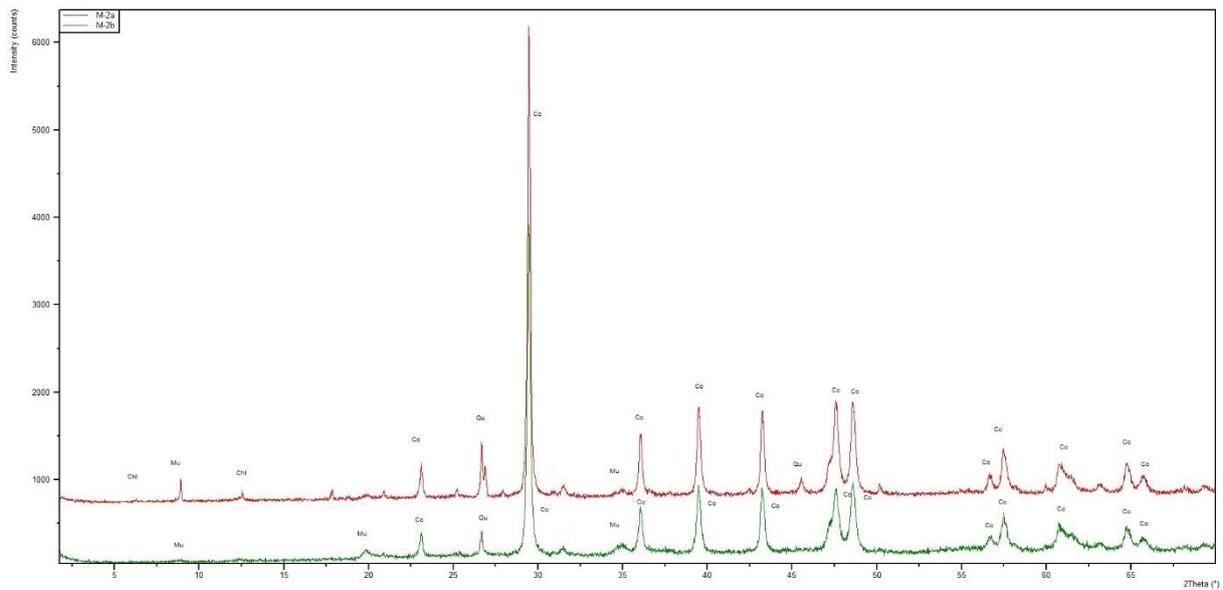


Abbildung17: XRD Abbildung des Profieles M-02.

Profil M-06

Beschreibung: Die Proben führen mit Ausnahme eines geringen Anteils von Albit in der Probe M-06a, dieselben Komponenten (Abb. 18, Tabelle 12).

Interpretation: Der Hauptunterschied liegt vor allem im Quarzanteil, der in der Probe M-06a deutlich höher ist als in der anderen. Dies war zu erwarten, da es sich um eine sandige Probe handelt, während die Probe M-06b eine schluffig-lehmige Probe ist.

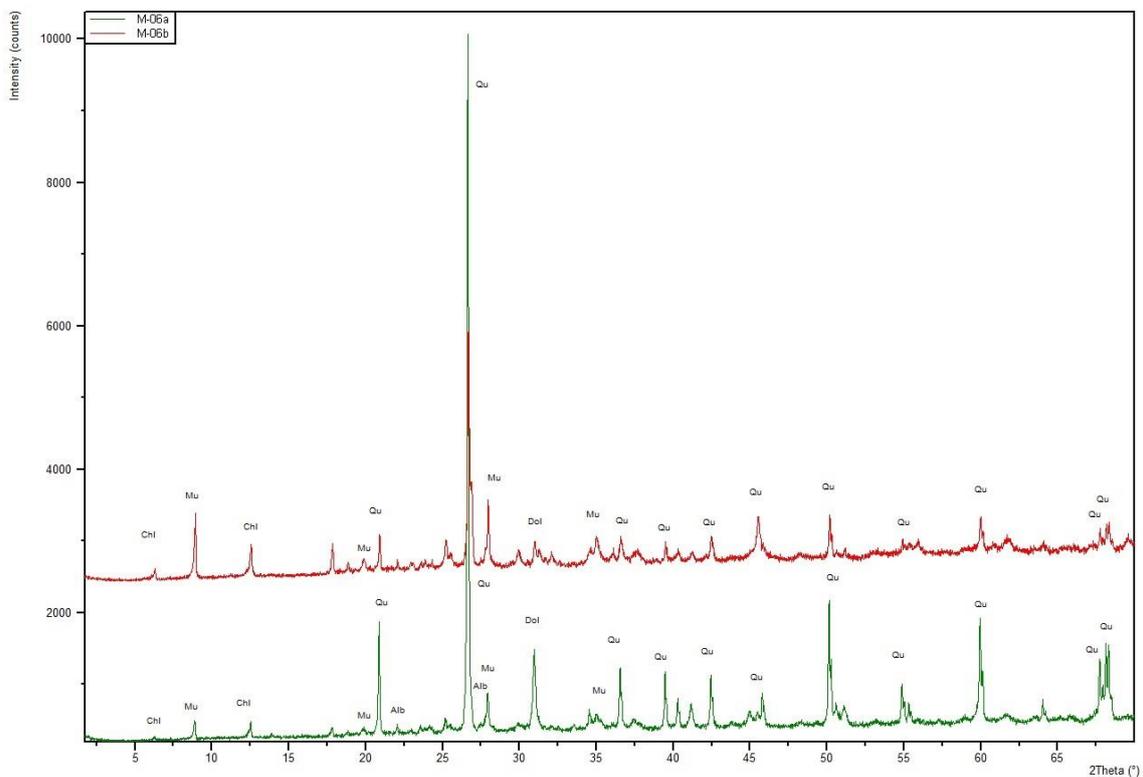


Abbildung18: XRD Abbildung des Profieles M-06.

Profil E-01

Beschreibung: Die genommenen Proben des Profils E-01 sind geprägt von drei Hauptmineralen: Quarz, Chlorit und Muskovit (Abb. 19, Tabelle 12), wobei der Quarz den Hauptanteil der Mineralasoziation ausmacht. Auffallend ist, dass sich die XRD-Analysebilder der einzelnen Proben kaum unterscheiden. Herausstechend ist nur die Probe E-01c bei der der Quarzanteil deutlich geringer ist als bei den übrigen Proben und zudem alle in dem Profil gefundenen (massenrelevanten) Minerale vorkommen. Bei allen übrigen Proben scheint sich die Komposition der Minerale auch in den Häufigkeitsanteilen kaum zu unterscheiden. Zudem konnten noch Dolomit (E-01a und E-01c), Albit (beziehungsweise Feldspat, E-01c und E-01d) und Kalzit (E-01c und E-01f) festgestellt werden. Ein eindeutiger Trend konnte allerdings für keine Komponente festgestellt werden.

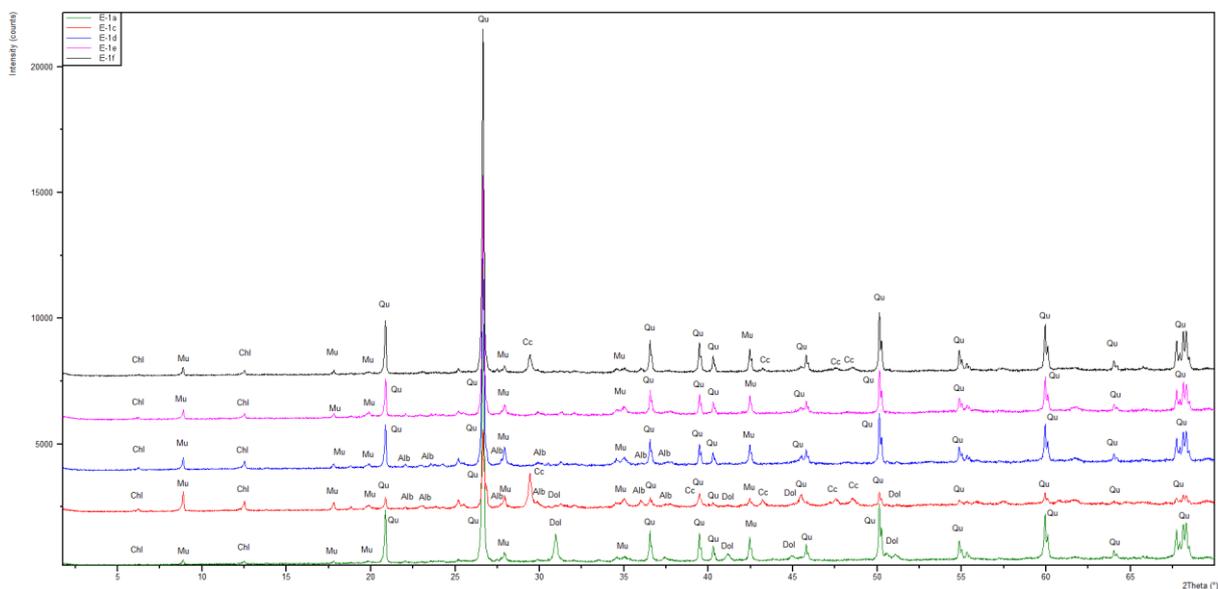


Abbildung 19: XRD Abbildung des Profils E-01 Bildbeschreibung gilt für alle XRD-Analysebilder: Intensity ist für alle Proben gleich gemessen worden, nur für die Abbildung wurden die Grundlinien rauf gesetzt; Qu...Quarz, Mu... Muskovit, Chl... Chlorite, Cc ...Kalzit, Dol... Dolomit, Alb... Albit, Spe... Spessartin, Go... Goethit, Il... Illit, Ru... Rutil.

Interpretation: Da sich das Mineralbild der einzeln genommenen Proben kaum unterscheiden lässt, ist davon auszugehen, dass sich während des gesamten dokumentierten Zeitraumes das Sedimentationsgeschehen im Sinne des Einzugsgebietes und der Ablagerungschemie kaum verändert hat. Die unterschiedlichen Korngrößen weisen allerdings darauf hin, dass sich das Fließverhalten (Fließgeschwindigkeit) während dieser Zeit verändert haben muss.

Profil E-05

Beschreibung: Die XRD-Diagramme des Profils E-05 unterscheiden sich nur minimal (Abb. 20). Das Hauptmineral der Proben ist Kalzit. Zudem kommen noch Quarz und Dolomit recht häufig vor. Muskovit und Chlorit sind etwas seltener (Tabelle 12).

Interpretation: Nach der Probennahme war zu erwarten, dass die harten, zementierten Proben direkt unter dem Flowstone stärker kalzifiziert sind als die Proben etwas tiefer, die

nicht mehr verfestigt waren. Aufgrund der XRD-Diagramme scheint dies scheinbar nicht der Fall zu sein, da die gemessenen Peaks von Kalzit (bzw. Dolomit) sich im Profil kaum verändern.

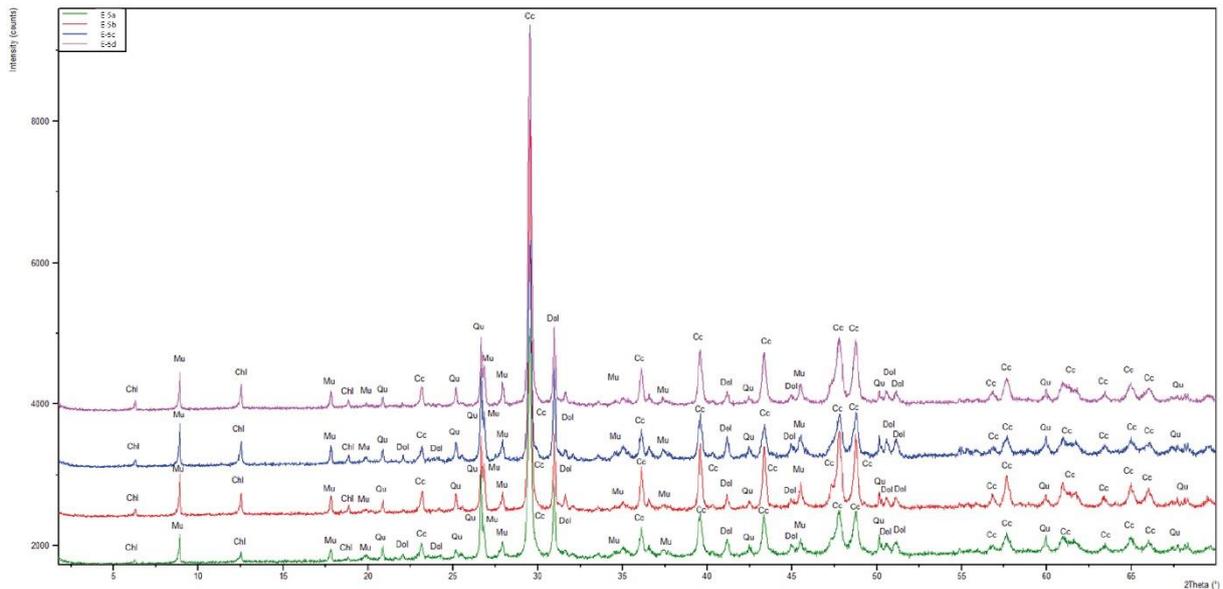


Abbildung 20: XRD Abbildung des Profiles E-05.

Profil S-01

Beschreibung: Wie bei den meisten genommen Proben aus denselben Profilen unterscheiden sich die XRD- Diagramme kaum voneinander, nur der Anteil der Hauptkomponenten Quarz und Kalzit schwankt (Abb. 21, Tabelle 12).

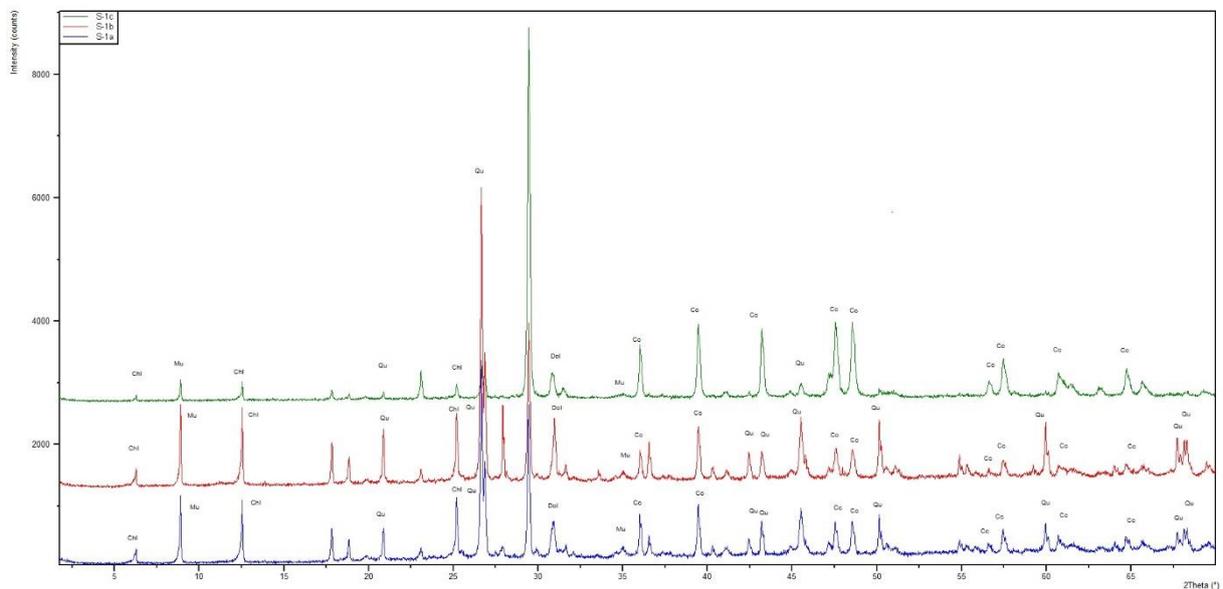


Abbildung 16: XRD Abbildung des Profiles S-01.

Interpretation: Wie die XRD-Diagramme des Profils M-06 anzeigen, nimmt der Anteil des Quarzes mit der Korngröße und des Transportweges zu. Im Gegenzug nehmen Muskovit, Chlorit und Kalzit ab.

Karbonatgehaltsbestimmung

Die Ergebnisse der Karbonatgehaltsbestimmung sind in [Tabelle 13](#) zusammengefasst. Die einzelnen Ergebnisse (in Gewichtsprozent) werden unten erläutert.

Proben E-01e und E-01f

Der Vergleich der zwei Proben zeigt deutliche Unterschiede, die bei bloßer Betrachtung im Gelände kaum unterschieden haben, sowohl in Konsistenz als auch bei der Korngröße. Die sandigere Probe E-01e hat einen Karbonatgehalt von etwa 2 %. Die tonlastigere Probe E-01f hat hingegen einen Karbonatgehalt von fast 30 %.

Proben M-02a und M-02b

Die zwei Proben M-02a und die etwas dunklere M-02b wurden ausgewählt, da der *Helle Höhlenton*, der überall in der gesamten Höhle anzutreffen ist und meist als abschließende Schicht auf allen Sedimenten ruht, in zwei Lagen unterteilt werden kann. Die hellere Schicht (M-02b) hat, wie schon nach optischer Betrachtung vermutet, einen höheren Karbonatanteil (79 %). Die dunklere und vermutlich glimmerreichere Schicht (M-02a) hat einen geringeren Karbonatanteil von nur 63 %.

M-13

Die Probe M-13 ist ebenfalls eine Lage des *Hellen Höhlentones*. Ihr fast weißliches Erscheinungsbild legt nahe, dass sie die karbonathaltigste Probe ist. Dies hat der Test mit der Karbonatbombe bestätigt. Ihr Karbonatgehalt liegt bei 88 %.

S-01c

Die Probe S-01c aus der SBH ist ebenfalls eine Probe des *Hellen Höhlentons*. Sie kommt der Probe M-02b am nächsten, sowohl optisch als auch im Karbonatgehalt (77 %).

Tabelle 13: Karbonatanalyse Tabelle der in ihr erwähnten Proben.

| Probe | E-01e | E-01f | M-02a | M-02b | M-13 | S-01c |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Karbonatgehalt [%] | 2,1 | 29,8 | 62,8 | 78,7 | 87,8 | 77,1 |

Interpretation

Die Ergebnisse lassen zwei Möglichkeiten zur Interpretation zu. Entweder sind sie zur gleichen Zeit (letzte abgelagerte Schicht in den drei untersuchten Höhlen) unter ähnlichen Bedingungen abgelagert worden oder sie waren Teil eines gemeinsamen Höhlensystems.

Der *Helle Höhlenton*, der die meisten Höhlensedimente bedeckt, wurde wahrscheinlich während der letzten Eiszeit abgelagert. Nach dem Modell von [Audra et al. \(2002\)](#) wurden die Quellen Eis versperrt, so dass kein Wasser ablaufen konnte und sich in der Höhlen „Rückstauseen“ gebildet haben, in denen sich der Ton abgelagert hat. Der hohe Karbonatanteil des *Hellen Höhlentones* stammt vermutlich aus dem Dachsteinkalk, den der Gletscher erodiert und mit den Schmelzwässern als suspension in die Höhle eingespült hat.

Schwermineralanalyse

Das dominante Mineral in allen ausgewerteten Proben ist Granat (mit Ausnahme der Probe E-05b). Granat kam entweder klar und durchsichtig mit einer deutlichen Isotropie vor oder er zeigte einem bräunlichen Überzug an der den Kristallen, die ihn bei gekreuzten Polarisatoren braun durchscheinen ließen. Zudem haben sich an ihm teilweise noch Glimmer oder andere Mineralien eingelagert. Als zweithäufigstes Mineral kam Zoisit bzw. Epidot vor. Zoisit mit stahlblauen und Epidot mit stark bunt variierenden Interferenzfarben. Hornblende (Amphibol) kam meist in der grünen Variante vor, aber die durchsichtige konnte auch nachgewiesen werden. Alle weiteren Minerale kamen eher sporadisch vor. Auffallend bei den Proben ist der hohe Anteil von opaken Gemeingeteilen. Opake Mineralien machen etwa die Hälfte aller gezählten Mineralien aus. Nur bei der Probe E-03 liegt er deutlich drunter. Hellglimmer, Biotit und Chlorit kommen in allen Proben in mehr oder weniger großen Anteilen vor. Im Einzelnen stellen sich die Ergebnisse wie folgt dar:

Probe M-01a

Die Probe M-01 besteht zum Großteil aus Granat. Als zweithäufigstes Mineral ist Zoisit zu nennen, der rund 20 % ausmacht. Zudem kommt Epidot und Hornblende noch in relevanten Mengen vor (Abb. 22). Die restlichen Minerale sind eher sporadisch anzutreffen. Es handelt sich um Zirkon und Rutil.

Probe E-01a

Der Anteil an Granat in der Probe E-01a ist extrem hoch (Abb. 22). Hornblende macht einen nicht zu kleinen Anteil der restlichen Schwerminerale aus. Diese sind Zoisit, Epidot, Turmalin und Rutil.

Probe E-01c

Auffällig bei dieser Probe sind der im Verhältnis zu den anderen Proben geringe Anteil an Granat und der hohe Anteil an Epidot, Zoisit und Hornblende (Abb. 22). Zudem wurden nur diese vier Minerale gefunden.

Probe E-01d

Die Probe E-01d wird von Granat dominiert (Abb.22). Auffallend ist auch der hohe Anteil von Hornblende. Epidot kommt auch relativ häufig vor. Zudem konnte auch Turmalin festgestellt werden.

Probe E-01e

Das häufigste Mineral ist wie in allen Proben Granat (Abb. 22). Als zweithäufigstes kommt Zoisit vor. Hornblende, Turmalin und Rutil kommen in geringen Mengen vor.

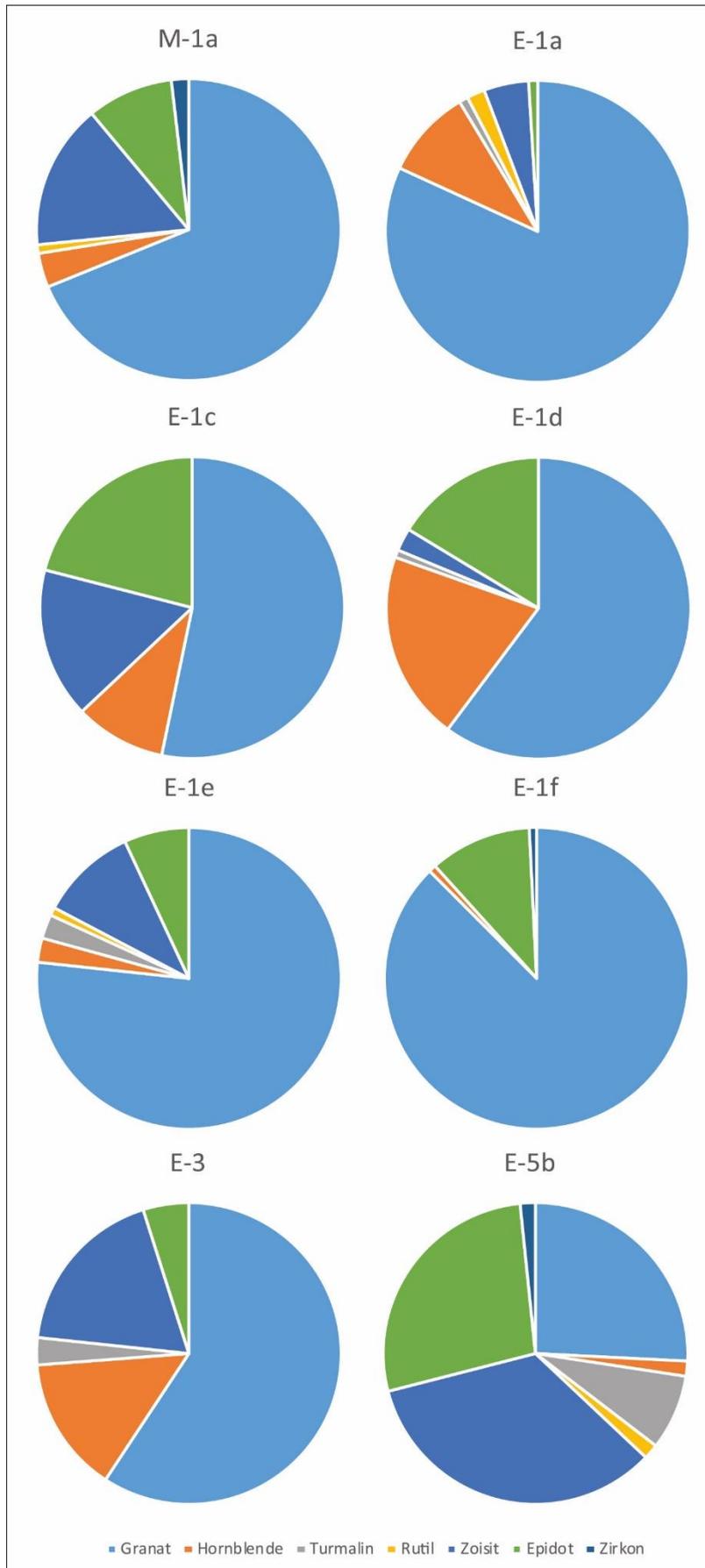


Abbildung 17: Tortendiagramme der Schwermineralverteilungen der Probe M-1a aus der DMH und 7 Proben aus der DRE.

Probe E-01f

In der Probe E-01f kommen fast ausschließlich Granat und mit ungefähr 10 % Anteil Epidot vor ([Abb. 22](#)). Hornblende und Zirkon konnten auch nachgewiesen werden.

Probe E-03

Die Hauptminerale des Schwermineralspektrums der Probe E-03 sind Granat, Hornblende und Zoisit ([Abb. 22](#)). Zudem konnten noch Epidot und Turmalin nachgewiesen werden.

Probe E-05b

Die Hauptminerale der Probe sind Zoisit und Epidot. Granat kommt auch häufig vor ([Abb. 22](#)). Zudem konnten auch Turmalin, Rutil, Hornblende und Zirkon nachgewiesen werden. Diese Probe unterscheidet sich allerdings in der Aufbereitung, da die gut verfestigte Sandsteinlage im Backenbrecher zerkleinert werden musste.

Interpretation der Schwermineralzusammensetzung

Die Proben zeigen im Wesentlichen ähnliche Schwermineralzusammensetzungen. Dieses Ergebnis war unerwartet. Sowohl die grünlichen Sande, die *Augenstein*-Lagen und ganz gräulich-gelben Sande zeigen ein ähnliches Bild.

Alle Proben bis auf E-05b (die sich methodisch etwas unterscheidet; siehe oben) werden von Granat dominiert. Dies deutet laut [Morton & Hallsworth \(1999\)](#) auf eine intermediäre Reife der Sedimente hin. Die Probe M-01a, die einzige aus der DMH, wurde mit den Schwermineralanalysen von [Seemanns \(1973\)](#) verglichen und ergibt große Ähnlichkeit. Er ordnete sie der *Augenstein-Fazies* innerhalb der Höhlensedimente zu.

Alle weiteren Proben wurden in der Eishöhle entnommen und mit den Ergebnissen von [Seemann et al. \(1999\)](#) verglichen. Die Schwermineralzusammensetzungen sind jedoch deutlich unterschiedlich. Alle hier vorgestellten Proben weisen kaum Zirkon nach, während [Seemann et al. \(1999\)](#) ihn in fast allen Proben gehäuft gefunden haben. Besonders im Vergleich mit den Proben von [Seemann \(1973\)](#), die zum Teil sehr zirkonreiche Proben aufwiesen. So kamen [Seemann et al. \(1999\)](#) zum Schluss, dass die *Augensteine* in der Höhle sich mit den älteren Sedimenten vermischt haben müssen. Dies steht aber in einem Widerspruch zu den Funden in dieser Arbeit.

Dabei bezogen sich [Seemann et al. \(1999\)](#) auf Proben aus dem gesamten DRE-Komplex, wohingegen die hier untersuchten Proben hauptsächlich auf einem Profil aus der *Lehmhalle* kommen. [Seemann et al. \(1999\)](#) haben nur eine Probe aus diesem Bereich genommen.

Alle weiteren Minerale scheinen in ähnlichen Mengenverhältnissen wie bei [Seemann \(1973\)](#) als auch bei [Seemann et al. \(1999\)](#) zu stehen.

[Knierzinger \(2015\)](#) hat sich auch mit Schwermineralproben von *Augensteinen* beschäftigt, allerdings von Oberflächenproben. Er kam zu einem ähnlichen Ergebnis wie die Proben in meiner Arbeit. Zudem schrieb er den Sedimenten der Augensteinschotter des Hochschwabs und des Schneebergs der östlichen Grauwackenzone als Liefergebiet zu.

Th/U Datierung

Die Datierungsergebnisse der sind in [Tabelle 14](#) dargestellt.

Tabelle 14: Tabelle der U/Th Datierung der in ihr erwähnten Proben

| Sample | ^{238}U [$\mu\text{g/g}$] | \pm | ^{232}Th [ng/g] | \pm | $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ | \pm | $(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U})$ | \pm | age uncorrected [ka] | \pm | age corrected [ka] | \pm |
|--------|--------------------------------------|---------|-------------------------------------|-------|-----------------------------------|--------|------------------------------------|--------|----------------------|--------------|--------------------|--------------|
| M-07b | 0,04320 | 0,00026 | 164,8 | 2,0 | -17,6 | 2268,0 | -61,1 | 7591,6 | Out of range | ----- | Out of range | ----- |
| M-07a | 0,03390 | 0,00023 | 76,8 | 1,0 | 1,19 | 0,14 | 1,38 | 0,28 | Out of range | ----- | Out of range | ----- |
| M-08d | 0,11214 | 0,00074 | 1,884 | 0,023 | 0,9688 | 0,0023 | 0,9440 | 0,0091 | 472,9 | +163,2 -63,7 | 472,4 | +159,4 -64,9 |
| M-08b | 0,07567 | 0,00049 | 7,398 | 0,092 | 1,0137 | 0,0021 | 1,010 | 0,010 | 513,4 | +207,5 -81,6 | 510,7 | +214,5 -79,1 |
| M-09 | 0,8445 | 0,0051 | 10,25 | 0,11 | 1,0608 | 0,0024 | 1,0869 | 0,0063 | 824,8 | ±198,5 | 824,6 | ±199,9 |

M-07a und M-07b

Die Datierung der Proben aus dem Wasserschacht ergeben, dass sie nicht mittels dieser Methode bestimmt werden können. Dies zeigt sich an hohen ^{232}Th -Werten, welche ein Hinweis auf detritische Tone sind, welche den ^{232}Th -Anteil erhöht haben können, und das Ergebnis verfälscht haben.

M-08b und M-08d

Die beiden Sinterproben sind ebenfalls deutlich verunreinigt und die Ergebnisse weisen große Fehler auf ([Tab.- 14](#)). Die korrigierten Alter sind allerdings stratigraphisch korrekt und zeigen unter der Berücksichtigung des Fehlers Alter zwischen 407 und 715 ka.

M-09

Das Ergebnis der Probe M-09 liegt zwar theoretisch außerhalb des datierbaren Bereichs, hat aber rechnerisch ein Alter von 825 ± 199 ka ergeben, was als älter 600 ka interpretiert wird. [Abbildung 23](#) zeigt die Entnahmestelle der Probe M-09 am Bock-Stalagmiten.



Abbildung 18: Bockstalagmit mit Probenentnahmestelle M-09.

Diskussion

Die Profile der untersuchten Höhlensedimente sind oft gestört. Teilweise zeigt sich eine Umlagerung der Sedimente. Sedimentrelikte an Decken zeigen das heute zugängliche Höhlenteile zeitweise größtenteils oder völlig mit Sediment gefüllt waren. Trotzdem erlaubten die Daten, vier Haupttypen von klastischen Sedimenten zu charakterisieren (Abb. 24).

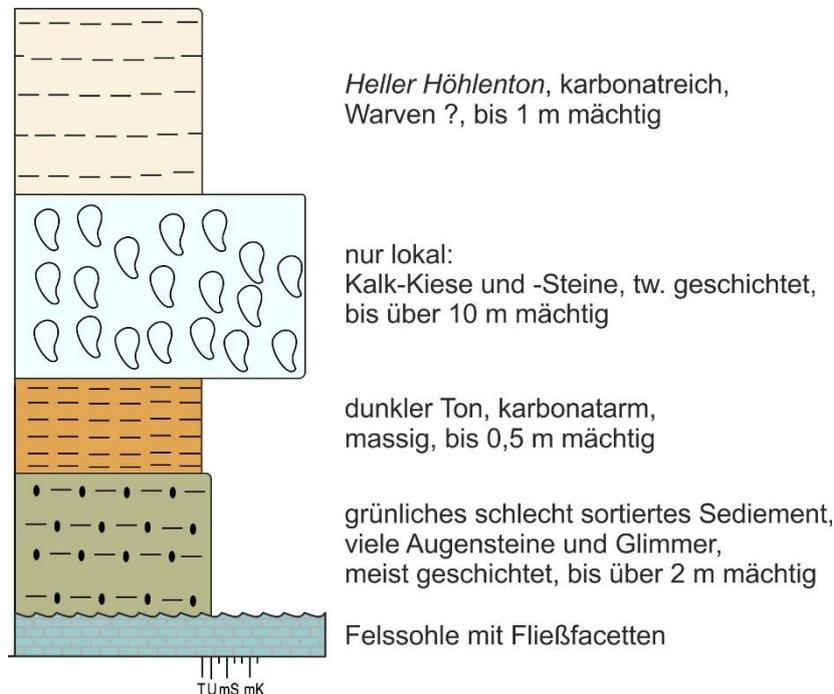


Abbildung 19: Ein idealisiertes Musterprofil wurde aus allen aufgenommenen Profilen der untersuchten Höhlen zusammengestellt. In dieses Musterprofil ist die im Gelände zu beobachtende nachträgliche Störungen und Umlagerungen nicht berücksichtigt.

1 Heller Höhlenton

Der *Helle Höhlenton* wurde von [Seemann \(1971\)](#) erstmals so bezeichnet. Er ist optisch ein sehr herausstechendes Sediment, nicht nur aufgrund seiner hellrosa-gelblich leuchtenden Farbe, sondern auch durch sein flächendeckendes Auftreten.

Der *Helle Höhlenton* bildet die abschließende Schicht in den meisten Profilen der DMH, der DRE und der SBH. Er kann nur wenige mm Dicke haben (z.B. Profil E-01 Lehmhalle), aber auch in seltenen Fällen mehr als 1 m mächtig sein (z.B. Profil M-15 Sklavengang). In vielen tiefer gelegenen Höhlen hat er eine noch größere Mächtigkeit wie z.B. Hierlatzhöhle, wo er bis zu 4 m Mächtigkeit erreicht ([Salomon et al 2018](#)). In sehr hoch gelegenen Höhlen fehlt er wie z.B. in der Günther-Stummer-Höhle (1547/260, Seehöhe um 1950 m, pers. Mitteilung L. Plan). Hier kann man annehmen, dass diese über dem Bereich des gletscherbedingten Rückstaus lag.

In seltenen Fällen ist über dem *Hellen Höhlenton* noch lokal ein schwarzer Belag zu finden. Dieser schwarze Belag wurde noch nicht genau untersucht. Untersuchungen unter Auflicht- und Elektronenmikroskop ergaben keine klaren Ergebnisse. Der schwarze Belag der mitgebrachten Proben erwies sich als zu dünn für das Handheld XRF, sie zeigten nur die Zusammensetzung des darunterliegenden Kalksteins. Weitere Untersuchungen in späteren Arbeiten wären zu empfehlen. Über den Ursprung des Belags wurden viele Vermutungen aufgestellt. Der Ruß eines Waldbrandes ([Schauberger 1957](#)), der in die Höhle hineingeweht

wurde oder eine Art Boden aufgrund der Aktivität von Mikroorganismen (speleosol; [Palmer 2007: 339](#)) sind Interpretationsmöglichkeiten.

Im Detail kann man beim *Hellen Höhlenton* zwei Schichten unterscheiden, die sich immer in Wechsellagerung befinden. Es handelt sich um eine helle und eine dunklere Schicht. Der helle Teil ist karbonatreicher, die dunkleren Schichten sind schichtsilikatreicher, welches aus den Karbonatgehalten abgeleitet werden kann. Zu den Schichtsilikaten gehören unter anderem Hellglimmer, Biotit und Chlorit. Der Karbonatgehalt der hellen Schicht reicht bis 88 %. Dieser Anteil ist höher als bei älteren Untersuchungen, wo der Karbonatanteil nur mit 56-67% angegeben wird ([Franke & Ilming, 1963](#)). [Audra et al. \(2002\)](#) beschrieben analoge Sedimente vom Tennengebirgs-Nordrand unterhalb 1000 m. Seehöhe. Sie bezeichnet sie als Warven. [Salomon et al. \(2018\)](#) kam zu dem gleichen Ergebnis.

Die Korngröße des *Hellen Höhlentones* beginnt im Mittelsiltbereich und reicht bis in den namensgebenden Ton hinein. In seltenen Fällen sind Kalkplatten in den Ton eingebettet, vermutlich aus herabgefallenen Steinen, die sich von der Decke gelöst haben. [Salomon et al \(2018\)](#) haben zudem gezeigt, dass man in mächtigeren Schichten des Höhlentones tektonische Ereignisse (*soft sediment deformations*) nachweisen kann (siehe bisherige Untersuchungen zur Höhlenentstehung). Ähnliche Strukturen wurden auch in M-15 beobachtet.

Als Herkunft des *Hellen Höhlentones* wird seit [Spöcker \(1925\)](#) davon ausgegangen, dass er sich in ruhigen, stehenden Rückstauseen während der Eiszeiten gebildet hat (siehe auch [Salomon et al., 2018](#)). Die Ablagerungsfazies ist der *Slack-Water-Fazies* nach [Bosh & White \(2004\)](#) zuzuordnen, wobei das Gletschereis ein Abfließen des Wassers verhindert hat. Die datierten Flowstones dieser Arbeit und dass der *Helle Höhlenton* in Höhlen oberhalb der Eisgrenze nicht anzutreffen ist, unterstützen diese Theorie.

2 Dunkler Höhlenton

Neben dem *Hellen Höhlenton* sind in der Mamuthöhle weitere Tone anzutreffen. Hierbei handelt es sich um Sedimente, die älter sind als der *Helle Höhlenton*. Er weist sich vor allem durch eine dunklere Farbe aus. Zudem zeigt er keine Lamination (massiges Auftreten). Er weist einen geringeren Karbonatanteil (2-30%) als der *Helle Höhlenton* (63-88%) auf. Zudem konnten auch Illit und Goethit in ihm nachgewiesen werden. Dies lässt die Interpretation der Einschwemmung von warmzeitlichen Bodenmaterial zu, da sich beide Minerale während Bodenbildungsprozessen anreichern ([Schachtschabel et al., 1984](#)).

Seine Mächtigkeit ist in den von uns betrachteten Profilen und Teilen der Höhle gering. Er wird lokal einige Dezimeter mächtig. In einigen tagfernen Profilen am Ostende des Krippensteinganges wird dieses Sediment zumindest 0,5 m mächtig (persönliche Mitteilung L. Plan).

In Höhlen oberhalb der ehemaligen Eisgrenze (z.B. Günther-Stummer-Höhle) stellt der dunkle Höhlenton aufgrund des Fehlens des *Hellen Höhlentons* das oberste Sediment dar (persönliche Mitteilung L. Plan).

Das Sediment kann man nicht genau einer einzelnen Fazies zuordnen, sondern muss von Profil zu Profil einzeln betrachtet werden. Oft handelt es sich um Sedimente der *Slack-Water-Fazies*, aber auch die *Backswamp-Fazies* kommt in Betracht.

3 Grünliche Sedimentgemenge

Hier werden die Charakteristika vieler Silte bis Kiese zusammengefasst. Die Sortierung der Silte und Sande reicht von schlecht bis zu sehr gut, dies kann auch innerhalb eines Profils stark schwanken. Es können jedoch auch Korngrößen von bis zu 8 cm erreicht werden.

Eine Einteilung kann aufgrund der Korngröße sehr leicht im Gelände vorgenommen werden. Die Farbe der Sande variiert stark von blassgrau bis grün. Die grünliche Farbe kommt vermutlich von einem erhöhten Anteil von Mineralen aus der Chloritgruppe (z.B. Klinochlor). Im Röntgendiffraktometer spiegeln sich die unterschiedlichen Farben jedoch kaum wieder. Die Farbe weist auch darauf hin, dass keine Oxidation über einen längeren Zeitraum stattgefunden hat, dass es also keine eingeschwemmten Böden sind.

Die Schwerminerale der Feinsandfraktion zeigen ein ähnliches Bild wie die von Proben der Augenstein-Formation ([Knierzinger, 2015](#)). Daher ist zumindest ein ähnliches Herkunftsgebiet auch bei den Sanden anzunehmen. Man kann davon ausgehen, dass es sich um eingeschwemmte *Augensteine* handelt. Oft werden nur die groben Anteile als *Augensteine* in der Höhle bezeichnet. Aufgrund der ähnlichen XRD-Bilder und auch der Schwermineralzusammensetzung lässt sich aber vermuten, dass es sich um dasselbe Ausgangsmaterial handelte, welches durch den Transport fraktioniert wurde.

Der Zeitpunkt des Einspülens in die Höhle lässt sich nicht nachweisen, aber es ist zu vermuten, dass es zumindest teilweise zu einem frühen Stadium der Höhlenentwicklung bereits erste Aufkommen gegeben haben muss. Teilweise treten sie an der Basis der Profile, bzw. über der Höhlensohle auf. Teilweise sind sie auch in Form von Konkretionen an Decken erhalten, was eine ehemalige vollkommene Verfüllung von Gängen mit diesem Material zeigt (z.B. Aufschluss E-03).

Die gut sortierten Sedimente, die oft nur aus Bohnerz und Quarz bestehen, und am Top der Profile anzutreffen sind, sind vermutlich oft umgelagert worden und Fraktionen des grünlichen Sedimentgemenges.

Die Korngröße der grünlichen Sedimentgemenge schwankt stark, wobei man hier von mehreren Schüttungen ausgehen kann. In etlichen Fällen lässt sich an ihnen anhand von Imbrikationen die Schüttungsrichtung ablesen. Sie zeigen an den untersuchten Profilen generell ein west-gerichtetes ehemaliges Fließen, was mit den morphologischen Beobachtungen von [Plan & Xaver \(2010\)](#) übereinstimmt.

Je nach Anzahl der Umlagerungen zeigt das grünliche Sedimentgemenge zwei Endglieder: eine späte, gutsortierte Phase aus fast nur Quarz und Bohnerz (z.B. Probe M-01h) und eine frühe Phase aus hauptsächlich Quarz und anderen Komponenten wie beispielsweise Glimmern in verschiedenen Korngrößen (z.B. Probe E-01a).

Die Minerale und Schwerminerale zeigen, dass sie das selbe Herkunftsgebiet wie die der Hierlatz-Höhlensedimente ([Salomon et al., 2018](#)), als auch der Proben der Höhlen des westlichen Toten Gebirges haben ([Kuffner, 1998](#)). Zudem stimmen die Schwermineralzusammensetzungen mit untersuchten Proben von den *Augensteinen* der NKA überein ([Knierzinger, 2015](#)). Dies würde nahelegen, dass es sich um geologisch ähnlich aufgebaute Herkunftsgebiete handelt.

Die Fazies des grünen Gemisches schwankt zwischen *Thalweg-* und *Channel-*Fazies, je nach Sortierung. Dies entspricht turbulentem bzw. schnell fließendem Wasser. Aufgrund der größten gefundenen Komponenten lässt sich nach [Hjulström \(1939\)](#) eine Fließgeschwindigkeit von 1-2 m/sec ableiten. Dies liegt etwas über den [von Plan & Xaver \(2010\)](#) errechneten Werten

aus Fließfassetten (0,2-0,9 m/sec) welcher einer gleichen frühen Phase zugeordnet wird. Es kann angenommen werden, dass diese Fließgeschwindigkeiten bei wenigen Katastrophenereignissen erreicht wurden, sich nicht aber in der Ausbildung der Fließfassetten widerspiegeln.

4 Karbonatische Kiese und Steine

Die karbonatischen Kiese und Steine (tw. Konglomerate, bzw. konglomeratische Brekzien) kommen in mehreren Höhlen vor, treten aber eher lokal auf. Wenn sie allerdings vorkommen, haben sie ein sehr markantes Erscheinungsbild. In dieser Arbeit werden vornehmlich die Aufschlüsse in der DMH im *Sklavengang* und an der sogenannten *Konglomeratwand* behandelt.

Die Grobklastika bestehen fast nur aus hellem Karbonatgestein, das vermutlich direkt von der Oberfläche des Dachsteins stammt, da die Aufschlüsse 10 bis 300 m unterhalb der Oberfläche liegen. Die Komponenten sind vermutlich fluviatil geschüttet und sie sind oft sehr gut geschichtet.

Der Aufschluss im *Sklavengang* (M-15) ist nur 0,9 m mächtig. Die Größe seiner Komponenten nimmt nach unten hin stark ab. Hier kann man auch einzelne *Augensteine* finden. Die Komponenten werden bis zu 20 cm groß und bestehen vornehmlich aus Kalkstein.

Der Aufschluss an der *Konglomeratwand* (M-16) ist über 10 m mächtig. Nur in diesem Aufschluss findet man auch eine Schichtung von rotem bzw. weißem Kalkkomponenten und des Zements. Der Ursprung dieser Farbänderung konnte nicht festgestellt werden. Hier konnten keine *Augensteine* gefunden werden. Die Komponenten werden hier von kalkigem Zement zusammengehalten. Die darüber liegende Schicht *Hellen Höhlentones* ist nur sehr dünn. Der Aufschluss im *Sklavengang* und die *Konglomeratwand* werden der *Diamicton-Fazies* zuordnen. Da sich ähnliche Sedimente oder Reste davon oberhalb in der *Steilen Rinne* und in weiteren geneigten bis fast an die Oberfläche führenden Teilen finden, werden einzelne Fluten mit vadosen Wässern als Transportmechanismus angenommen.

Ein Sonderfall stellt der tagnahe Aufschluss E-02 dar (DRE, *Schmetterlingsgang*, [Abb. 25](#)). Er hat Komponenten von bis zu 75 cm und ist sehr schlecht sortiert. Er ist vermutlich eine Art Moräne, die in die Höhle gepresst wurde.



Abbildung 20: Überblick über den Aufschlss E2 Schmetterlingsgang.

Schlussfolgerungen

Eine idealisierte grobe Altersabfolge lässt sich aus den in dieser Arbeit erhobene Daten (Sieb- und Sedigraphmessungen, Rundung, Imbrikation, XRD-Messungen, Mineralzusammensetzung) schließen:

- 1) Die ältesten Sedimente sind grünliche Gemenge aus schlecht sortierten Silten bis Grobkiesen. Nur wiederaufgearbeitete Schichten (z.B. Sand- oder reine Augensteinlagen) zeigen eine gute Sortierung. Die grünliche Färbung beruht auf Klinochlor. Die Mächtigkeit dieser Schicht kann über 2 m ausmachen. Meist kann diesem Typ *Channel-* bzw. *Thalweg-*Fazies zugeordnet werden; beides deutet auf schnell fließende Höhlenbäche hin. Der hohe Quarzanteil lässt schließen, dass es sich um Anteile der oligo- bis miozänen Augenstein-Formation handelt, die in die Höhle eingeschwemmt wurde. Die aus den Korngrößen abgeleiteten Paläo-Fließgeschwindigkeiten stimmen mit denen von Fließfacetten an den Höhlenwänden überein. Dies lässt darauf schließen, dass dieses Sediment in einer frühen Phase der Höhlenentstehung abgelagert wurde. In einem anderen Projekt erhobene Einschwemmalter (Al/Be-*burial-age-dating*) von über 4.4 Ma unterstützen eine obermiozäne bis pliozäne Ablagerung.
- 2) Darüber folgen meist massige, dunkle rötlich-braune Tone. Vermutlich handelt es sich um Paläoböden, die in die Höhle eingespült wurde, wobei der Zeitpunkt unklar ist. Diese Sedimente konnten hauptsächlich der *Slack-Water-*Fazies zugeordnet werden.
- 3) Vorwiegend Kiese und Steine, die fast ausschließlich aus hellem Kalk bestehen, bilden den dritten Typ. Sie treten nur lokal auf. Neben einem teils geringen Feinsand-Anteil kommen Steinen mit bis zu 0,2 m Größe vor. Die Schichtung in einem der Aufschlüsse (Konglomeratwand) legt fluviatilen Transport nahe. Komponenten aus dem Aufschluss E-02 Schmetterlinggang mit bis zu 0,8 m Durchmesser, die sehr nahe der Oberfläche lagern, wurden wahrscheinlich vom Gletscher in die Höhle geschoben.
- 4) Die jüngsten Sedimente sind Lehme von hellrosa-gelblicher Farbe. Diese wurden schon früher als *Heller Höhlenton* bezeichnet. Sie sind in den drei untersuchten Höhlen fast allgegenwärtig und schließen die meisten Profile ab. Die Mächtigkeit der Schichten kann rund 1 m betragen. In höher gelegenen Höhlen fehlt der *Helle Höhlenton* (Günther-Stummer-Höhle, 1950 m. S.h.), in tiefer gelegenen Höhlen (Hierlatzhöhle, 900 m S.h.) bildet er bis über 4 m mächtige Schichten. Auffällig ist seine Feinschichtung: die hellen kalkreicheren Lagen haben bis zu bis 88 % Karbonatanteil und die dunkleren sind silikatreicher. Es ist wahrscheinlich, dass es sich um Warven handelt, aber nicht nachzuweisen. Für die Entstehung dieses Sedimentes der *Slack-Water-*Fazies wird glaziale Erosion der Karbonate an der Oberfläche und gletscherbedingter Aufstau der Wässer in den Höhlen angenommen (*Pleistozene Backflooding*). Mittels $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierung von darunter oder darüber lagernden Sintern konnten eine Ablagerung zwischen 400 ka bis 700 ka festgestellt werden.

Dank

Michael Wagreich und Lukas Plan sei herzlich gedankt für die Betreuung der Arbeit, dem Aushelfen bei vielen Themen und guten Ratschlägen, Susanne Gier für die XRD-Untersuchung der Proben, Sabine Hruby-Nichtenberger und Maria Mezar für die Aufbereitung der Schwermineral-Proben. Denis Scholz für die Messung der $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten. Zudem bedanke ich mich bei Bernhard Neugeschwendner, Michael Öster und Pauline Oberender für Unterstützung im Gelände, Holger Gebhardt für Anregungen und bei Wolfgang Knierzinger für die Hilfe beim Auswerten der Schwermineralien.

Literatur

- Arnberger, E. (1955): Höhlen und Niveaus. - Die Höhle, 6 (1): 1-4.
- Arthofer P. & Thaler H. (1998): Gediegen Gold aus den Dachsteinhöhlen. – O.Ö. Geonachrichten Jg., 13: 7-10
- Audra, P., Quinify, Y. & Rochette, P. (2002): The genesis of the Tennengebirge karst and caves (Salzburg, Austria). – Journal of Caves and Karst Studies 64: 153-164.
- Bauer, F. (1954): Zur Paläohydrologie des Dachsteinstockes.- Die Höhle, 5 (3-4): 46-48.
- Bauer, F. (1961): Sedimentation und Konvakuationserweiterung in aufsteigenden Siphonstrecken. - Atti Symp. Internaz. Speleol., Varenna (Como), Rassegna Speologica Italiana, 5 (1): 171-175.
- Behm, M. & Plan, L. (2005): Sechzigster Kilometer in der Dachstein-Mammuthöhle (1547/9). – Die Höhle, 56: 77 - 84.
- Behm, M., Plan, L., Seebacher, R. & Buchegger, G. (2016): Dachstein. - In Spöttl, C., Plan L., & Christian, E. (Hrsg.): Höhlen und Karst in Österreich, Denisia, 37, Linz: 569-588.
- Biese, W. (1926): Vorläufiger Bericht über Untersuchungen in den Dachsteinhöhlen. - Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung, 1926 (1): 1-11 u. (2): 33-40.
- Bock, H. (1913a): Alte Höhlenstromläufe im Inneren des Mittagskogels. - In: Bock, H., Lahner, G. & Gaunersdorfer, G. (Hrsg.): Höhlen im Dachstein. - Graz (Verein für Höhlenkunde in Österreich): 72-88.
- Bock, H. (1913b): Der Karst und seine Gewässer. - Mitteilungen für Höhlenkunde, Graz, 6 (3): 1-23.
- Bosch, R.F. & White, W.B. (2004): Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. – In: Sasowsky, I.D., MyIroie, J. (Hrsg.): Studies of cave sediments. Physical and chemical records of paleoclimate. - New York (Kluwer Academic/Plenum): 1-22.
- Douglas, W. & McConchie, D. (1994): Analytical sedimentology. – New York (Chapman and Hall).
- Farrant, A.R. & Smart, P.L. (2011): Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis. – Geomorphology, 134: 79-93.
- Faupl, P. (2003): Historische Geologie: Eine Einführung. 2. Auflage. – Wien (UTB).
- Franke, H.W. (1974): Geheimnisvolle Höhlenwelt. - Stuttgart (Deutsche Verlagsanstalt).
- Franke, H.W. & Ilming H. (1963): Beobachtungen in der Dachstein-Mammuthöhle (Oberösterreich). – Die Höhle, 14: 36-40.
- Frisch W., Kuhlemann, J., Dunkl, I., Székely B., Vennemann, T. & Rettenbacher, A. (2002): Dachstein-Altfläche Augenstein-Formation und Höhlenentwicklung - die Geschichte der letzten 35 Millionen Jahre in den zentralen Nördlichen Kalkalpen. – Die Höhle, 53: 1 - 35.
- Gamsjäger, S. (1980): Die Schönberghöhle – Zubringer zu einem größeren Höhlensystem. – Die Höhle, 31: 81-84.
- Geological Society of America (1995): Rock color Chart (with genuine Musell color chips). – Geological Society of America, 8th printing.

- Hahn, F.F. (1913): Grundzüge des Baues der nördlichen Kalkalpen zwischen Inn und Enns: I. Teil. – Mitt. Geol. Ges. Wien, 6: 238–357.
- Häuselmann, P., Plan, L., Pointner, P. & Fiebig, M. (2020): Cosmogenic nuclide dating of cave sediments in the Eastern Alps and implications for erosion rates. – *International Journal of Speleology*, 49: 107-118.
- Hjulström, F. (1939): Transportation of detritus in moving water. - In: Trask, P.D. (Hrsg.): recent marine sediments. SEPM Special Publications, 4: 5-31.
- Knierzinger, W. (2015): Provenance Analysis of Lower Miocene Sediments in the Lower Austrian Molasse Basin. – Unveröffentl. Masterarbeit Univ. Wien.
- Krauthausen, B. (1989): Höhlen und Tektonik am Nordrand des Dachsteins zwischen Echerntal und Hageneck. - *Oberrhein. Geol. Abh.*, 35: 37-48.
- Kuffner, D. (1998): Höhlenniveaus und Altflächen im Westlichen Toten Gebirge. – *Die Höhle*, Beiheft 53.
- Kyrle, G. (1923): Grundriss der theoretischen Speläologie.- Wien (speläologisches Inst.)
- Lahner, G. (1937): Morphologie des Salzkammergutes: II. Die Karstlandschaft. - *Mitteilungen für Erdkunde (Linz)*, 6 (11/12): 123-154.
- Lahner, G. (1948): Die Dachsteinhöhlen. - Linz (OÖ-Landesregierung).
- Lehman, O. (1922): Die Auswaschung an Klammwänden und die Richtung des Wasserlaufes. - *Speläologisches Jahrbuch*, 3: 40-49.
- Lobitzer, H. (2017): Geologisch-geotouristische Highlights im inneren Salzkammergut. – In: Wimmer-Frey, I., Römer, A. & Janda, C, (Hrsg.): Arbeitstagung - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, Bad Ischl, Hallstadt, Gmunden: 38-41.
- Mandl, G. W., Brandner, R. & Gruber A. (2017): Zur Abgrenzung und Definition der Kalkalpinen Deckensysteme (Ostalpen, Österreich). - In: Wimmer-Frey, I., Römer, A., Janda, C, (Hrsg.): Arbeitstagung - Angewandte Geowissenschaften an der GBA, Bad Ischl, Hallstadt, Gmunden, 254-255.
- Morton, A.C. & Hallsworth, C.R. (1999): Process controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. - *Sedimentary Geology*, 124: 7-22.
- Palmer, A. (2007): Cave Geology. - *Daton (cave Books)*.
- Pettijohn, F.J. (1975): Sedimentary Rocks. – New York (Harper and Row).
- Plan, L. & Herrmann, E. (2010): Paläotraun? Der Wissenschaftsdisput um die Entstehung der Dachstein- Mammuthöhle. – *Die Höhle*, 61: 3-17.
- Plan, L. & Xaver, A. (2010): Geomorphologische Untersuchung und genetische Interpretation der Dachstein-Mammuthöhle (Österreich). – *Die Höhle*, 61: 18-38.
- Salomon, M.L., Grasemann, B., Plan, L., Gier, S. & Schöpfer, M.P.J. (2018): Seismically-triggered soft-sediment deformation structures close to a major strike-slip fault system in the Eastern Alps (Hirlatz cave, Austria). – *J. Structural Geology*, 110: 102-115.
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Hartge, K.-H. & Schwertmann, U. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).
- Schauberger, O. (1957): Die Hirlatzhöhle bei Hallstadt (Oberösterreich). – *Die Höhle*, 3: 65-67.

- Seeman, R., Brandstätter, F. & Hammer, V.M.F. (1999): Sedimente und Mineralneubildungen in der Dachstein-Rieseneishöhle. – Die Höhle, 50: 101-115.
- Seemann, R. (1973): Die Genese der Pyrite der Karstgebiete der Nördlichen Kalkalpen. – Unveröff. Diss. Univ. Wien.
- Smekal, A. (1923): Die Dachsteinhöhlen und ihre Bedeutung für die Geologie der nördlichen Kalkalpen. - Der Bergsteiger, 1923: 153.
- Spengler, E. (1918): Zur Talgeschichte des Traun- und Gosautales im Salzkammergut.- Verh. d. Geol. Reichsanst. 1918: 130-139.
- Spöcker, R.G. (1925): Die Mammuthöhle im Dachstein. – Mitt. über Höhlen und Karstforschung, 1925 (3): 70-79.
- Spötl, C. (2020): Speläo- Merkblätter C33a. -<https://hoehle.org/downloads/merkblaetter/einzeln/C33%20Hoehleinter.pdf> aufgerufen am 10.02.2020.
- Tollmann, A. (1985): Geologie von Österreich Band 2: Außerzentralalpiner Anteil. – Deuticke (Wien).
- Trimmel, H. (1955): Höhlen und Niveaus. - Die Höhle, 6 (1): 5-8.
- Winkler-Hermaden, A. (1957): Geologisches Kräftespiel und Landformung. Grundsätzliche Erkenntnisse zur Frage junger Gebirgsbildung und Landformung. - Wien (Springer).
- Žak, K., Richter, D. K., Filippi, M., Živor, R., Deininger, M., Mangini, A. & Scholz, D. (2012): Coarsely cryogenic cave carbonate – a new archive to estimate the Last Glacial minimum permafrost depth in Central Europe. – Climate of the Past, 8: 1821–1837.

Anhang

Probenpunkte

Dieser Anhang enthält Bilder, Tabellen mit den verwendeten Methoden und Kurzbeschreibung sowie auch solche von nicht in der Arbeit erwähnten Probenpunkten.

Abkürzungen für Tabelle

Erklärung der Abkürzungen (Methoden): Karbonatgehalt-Kg, Kornsummenkurve-Ksk, Kornform-Kf, Röntgendiffraktometrie-XRF, Gesteinsfragmente-Gf, Schwerminerale-Sm, Organisches Karbonat-Ok, Chemische Untersuchung-Cu, Alterstdatierung-U/Th, Elektronenmikroskopie-SEM

Dachstein-Mamuthöhle

M-01 Paleotraun, niedrigste Stelle

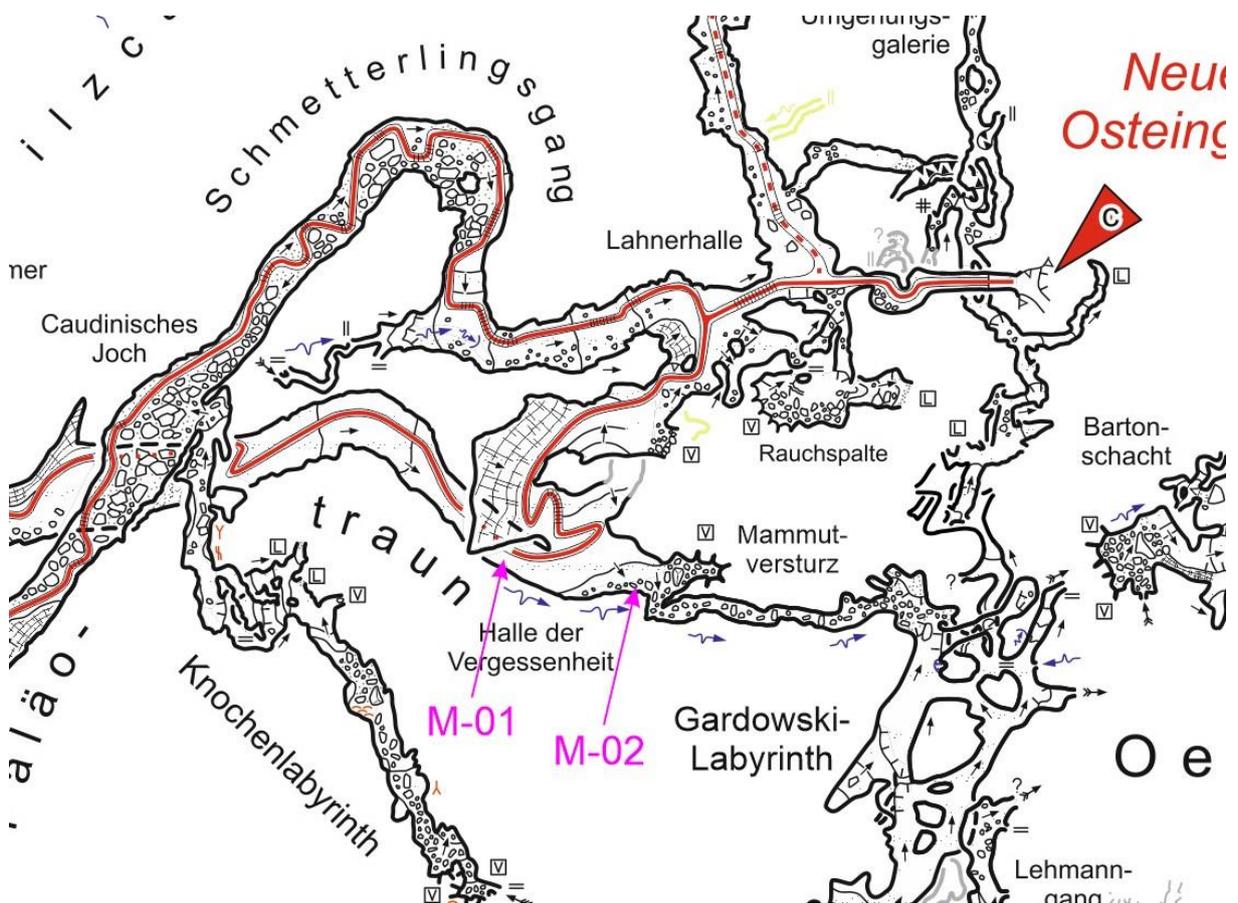


Abbildung 21: Deteillageplan der Probenpunkte M-01 und M-02.(verändert nach Xaver, Kula & Plan)

Tabelle 15: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-1.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|--------------|----------------------------|
| M-01a | Ksk, XRD, Sm | unverfestigter grüner Sand |
| M-01b | XRD | Konkretion in 1 a |
| M-01c | XRD | gelbliche Zwischenschicht |
| M-01d | Ksk, XRD | gelbbraune siltige Lage |
| M-01e | Ksk, XRD | krümlig bräunliche Lage |
| M-01f | XRD | Konkretion in 1 e |
| M-01g | Ksk, XRD | dunkelbraune krümlige Lage |
| M-01h | Ksk, XRD | Augensteine, viel Bohnerz |



Abbildung 22: Profil M-01 mit markierten Probeentnahmepunkten.



Abbildung 23: Führungsweg Paläotraun mit Aufschluss M-01 auf linker Seite.

M-02 Halle der Vergessenheit

Tabelle 16: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-02.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|--------------|----------------------------------|
| M-02a | Kg, Ksk, XRD | dunklere Lage Hellen Höhlentones |
| M-02b | Kg, Ksk, XRD | helle Lage Hellen Höhlentones |

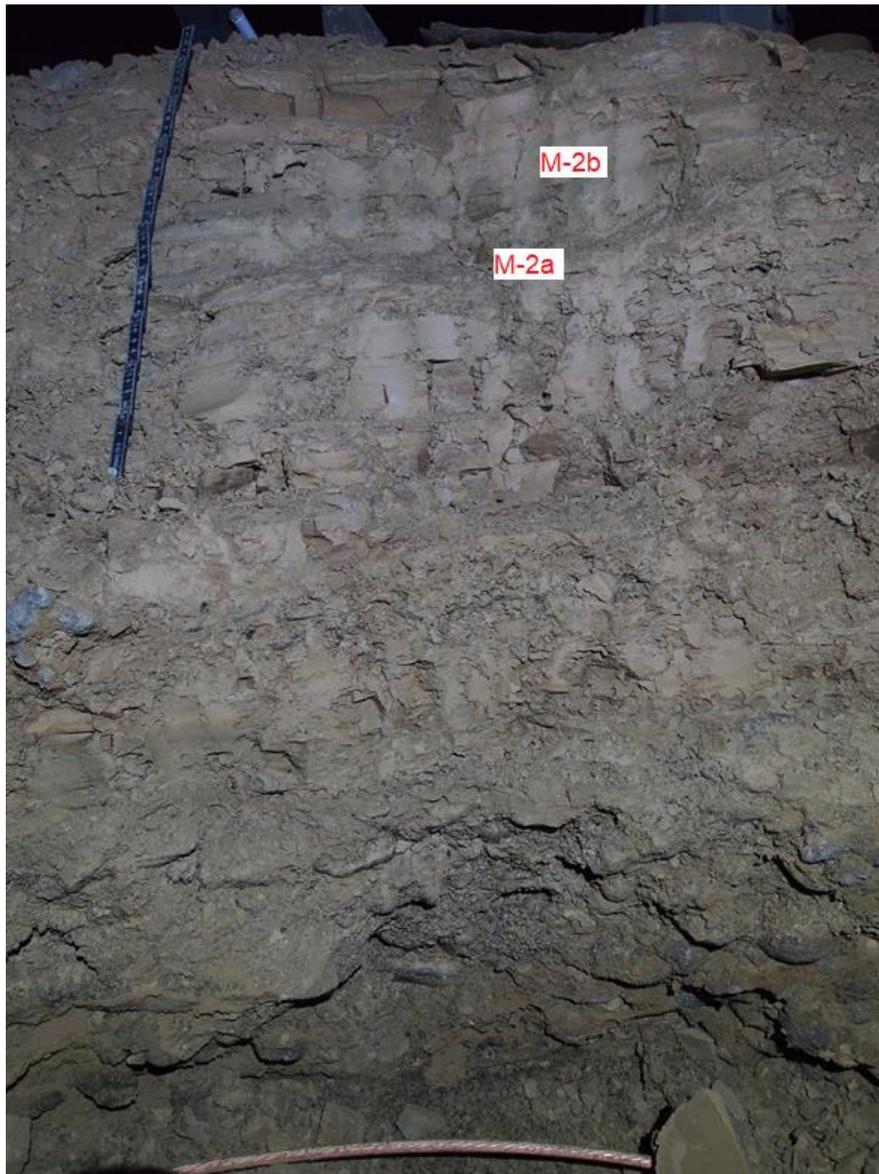


Abbildung 24: Profil M-02 mit markierten Probeentnahmepunkten.

M-03 Edelweißlabyrinth, Schwarzer Gang (oben bei Spaltung des Ganges)

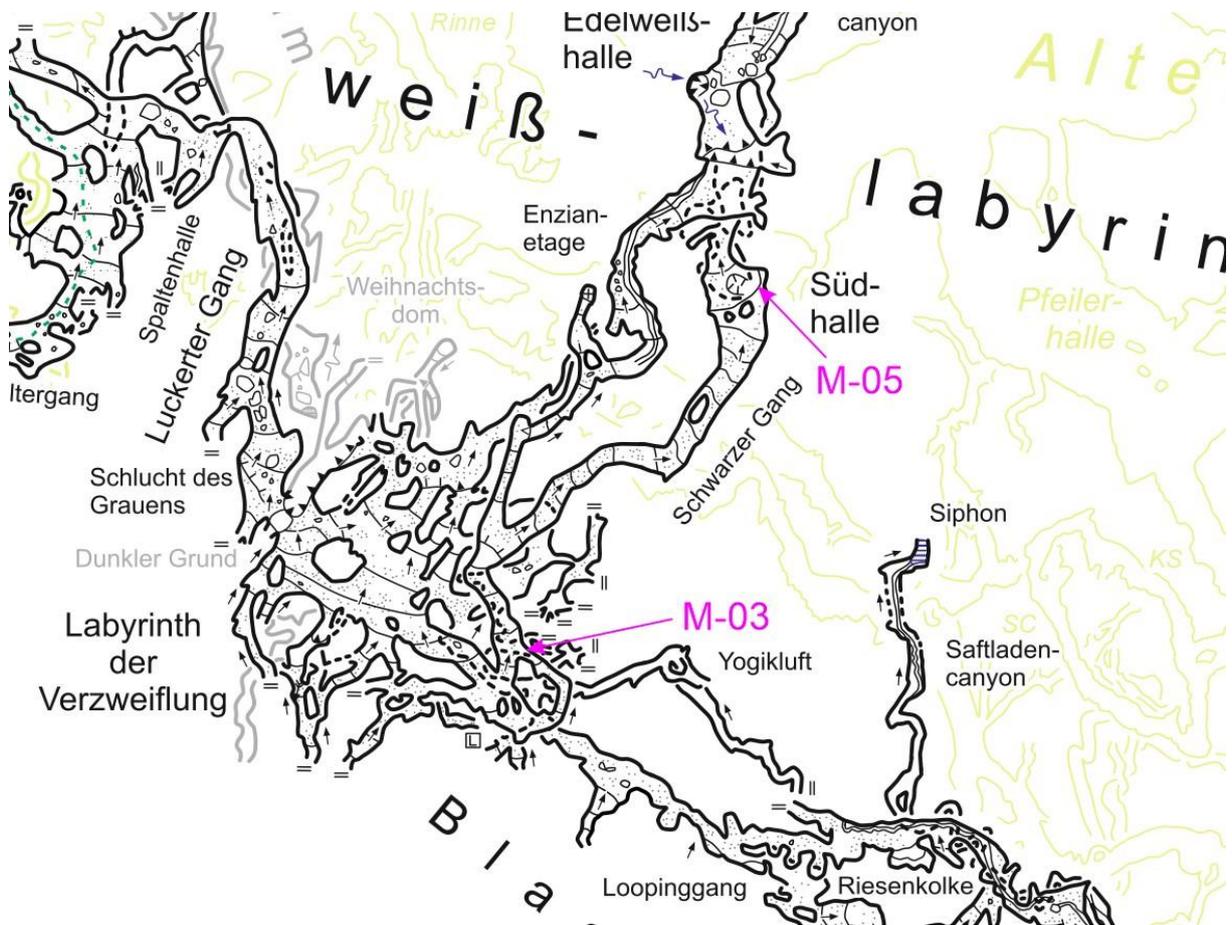


Abbildung 25: Detaillageplan der Probenpunkte M-03 und M-05. (verändert nach Xaver, Kula & Plan)

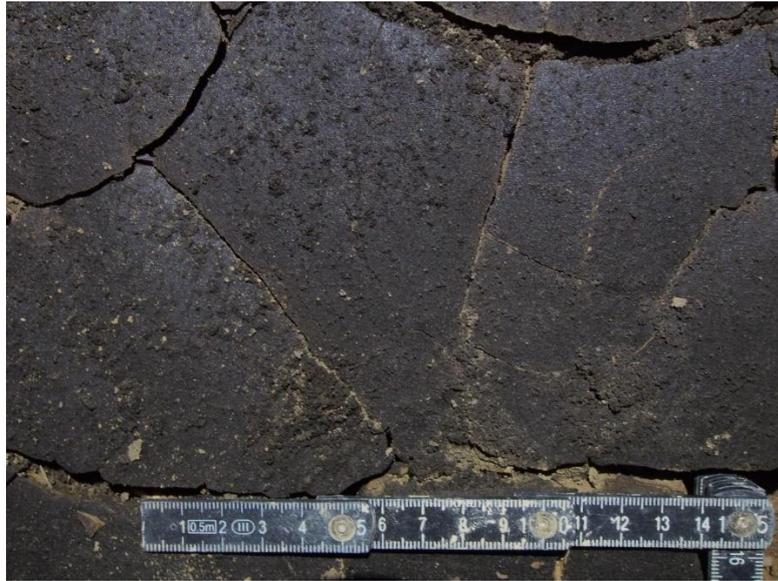


Abbildung 26: Detailansicht des schwarzen Belags am Probenpunkt M-03.

Tabelle 17: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-03.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|----------------------------------|
| M-03a | | schwarzer Überzug auf Tonplatten |
| M-03b | | Überzug Abgekratzt |

M-05 Edelweißlabyrinth, Schwarzer Gang (VP 111)

Tabelle 18: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-05.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|--|
| M-05 | | schwarze Zwischenschicht im Sedimentkörper |



Abbildung 27: Schwarze Zwischenschicht im Ton Probenpunkt M-05.

M-06 Lehmhalle großer Dom

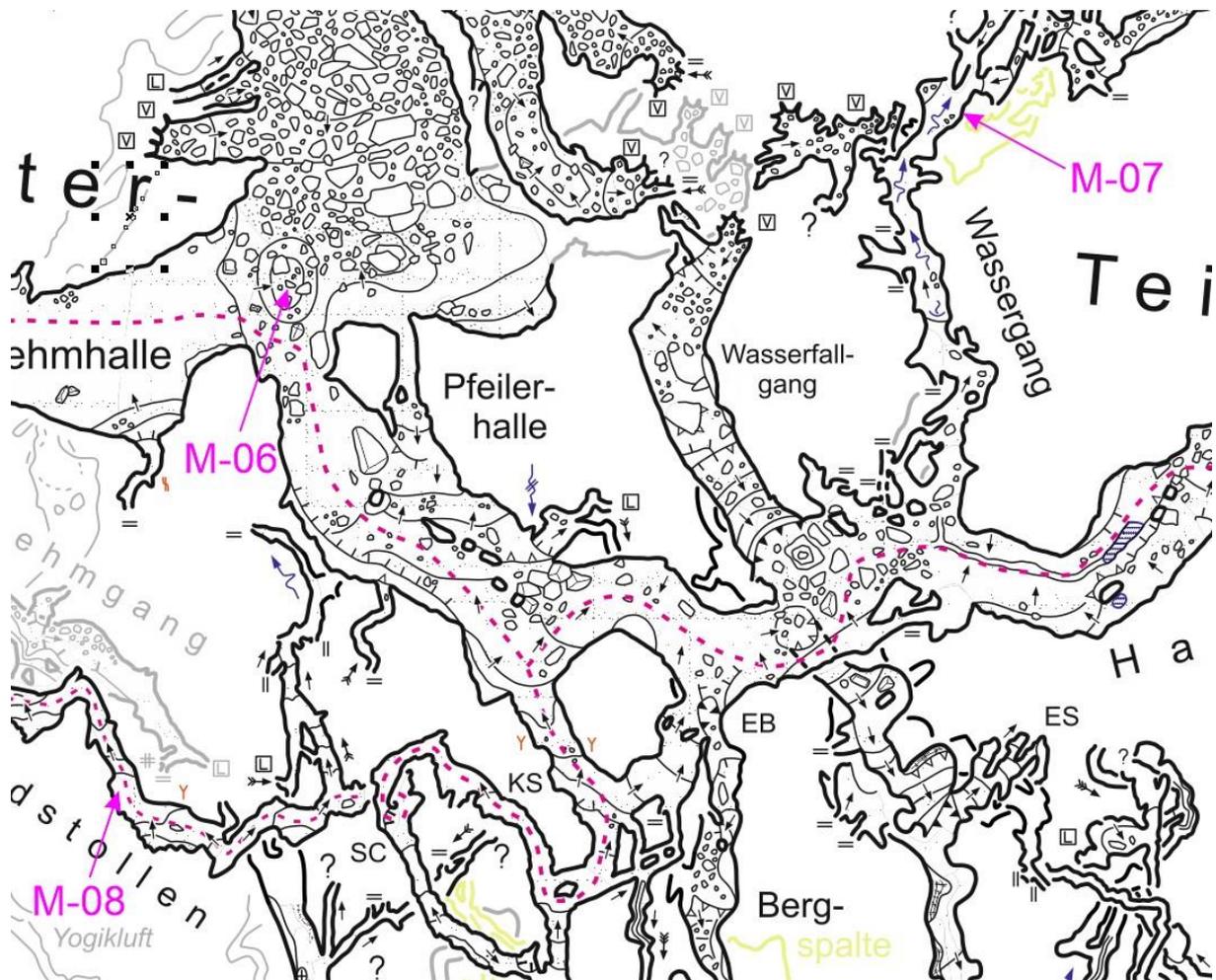


Abbildung 28: Deteillageplan der Probenpunkte M-06, M-07 und M-08. (verändert nach Xaver, Kula & Plan)

Tabelle 19: m Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-06.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|---------------------|
| M-06a | Ksk, XRD | sandige Lage |
| M-06b | Ksk, XRD | speckige grüne Lage |



Abbildung 29: Lehmhalle, Umgebung des Probenpunktes M-06.



Abbildung 30: Profil M-06 mit markierten Probeentnahmepunkten.

M-07 Wassergang

Tabelle 20: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-07.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|------------------------|
| M-07a | U/Th | Flowstonelage |
| M-07b | U/Th | Flowstone aus Bachbett |



Abbildung 31: Profil M-07 mit markiertem Probeentnahmepunkt.



Abbildung 32: Flowstone in Höhlenton beim Probenpunkt M-07 Detailaufnahme.

M-08 Windstollen

Tabelle 21: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-08.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|------------------|
| M-08b | U/Th | Flowstone |
| M-08c | | Grünliche Lage |
| M-08d | U/Th | Flowstone |



Abbildung 33: Aufnahmepunkt M-08 Flowstone überdeckt von Hellem Höhlenton.

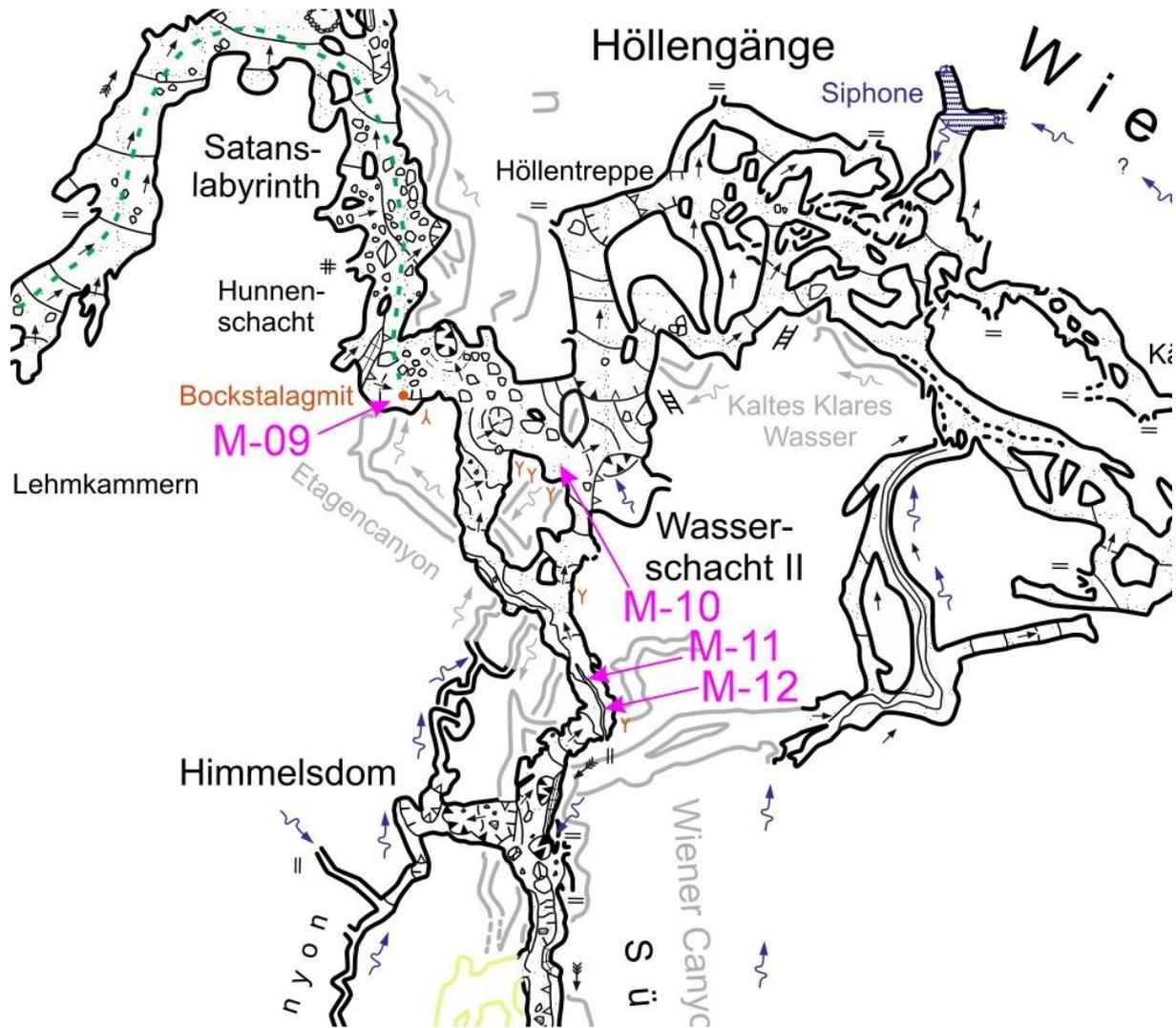


Abbildung 34: Detaillageplan der Probenpunkte M-09, M-10, M-11 und M-12. (verändert nach Xaver, Kula & Plan)

M-09 Bockstalagmit (Minotauruslabyrinth)



Abbildung 35: Bockstalagmit mit Probenentnahmepunkt M-09.

Tabelle 22: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-09.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|--|
| M-09 | U/Th | Bockstalagmit (Hinten entnommen, nicht sichtbar) |

M-10 Minotauruslabyrinth Höllentor

Tabelle 23: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-10.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|-----------------------------|
| M-10a | | schwarze Schicht |
| M-10b | | grünlich bräunliche Schicht |



Abbildung 36: Detailansicht der Probeentnahmepunkte M-10a und M-10b im Minotauruslabyrinth (Höllentor).

M-11 Südsystem nach Einstieg Hexenrutsche

Tabelle 24: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-11.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|-------------------------------|
| M-11 | | schwarze Schicht auf Karbonat |



Abbildung 37: Schwarzer Belag auf Kalkstein beim Probenpunkt M-11.

M-12 Südsystem (Canyon eingegraben)

Tabelle 25: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Untersuchungspunktes M-12.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|---|
| | | frisch eingegraben Channel, wahrscheinlich noch aktiv in Hochwasserzeit |



Abbildung 38: Profilaufnahme der Untersuchungspunktes M-12.

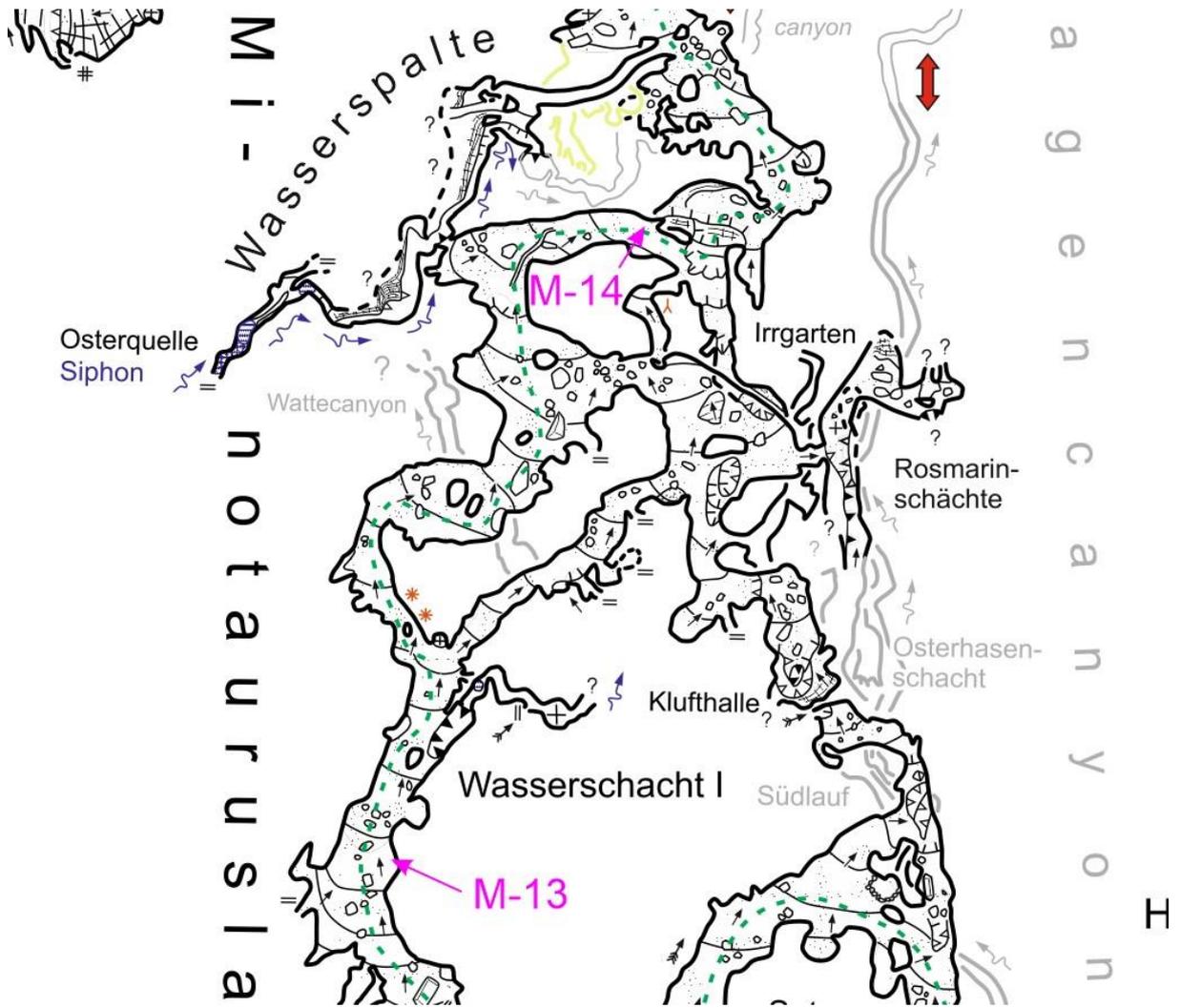


Abbildung 39: Detaillageplan der Probenpunkte M-13 und M-14. (verändert nach Xaver, Kula & Plan)

M-13 Minotaurusgang, knapp oberhalb Wasserschacht 1

Tabelle 26: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-13.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|------------------------------------|
| M-13 | Kg, XRD | sehr helle Lage hellen Höhlentones |



Abbildung 40: Untersuchungspunkt M-13 mit markiertem Probeentnahmepunkt.

M-14 Minotaurusgang, oberhalb der Kletterstelle unterhalb Hydromagnesit

Tabelle 27: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-14.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|--------------------------------|
| M-14 | | schwarze Schicht von der Decke |



Abbildung 41: Untersuchungspunkt M-14: Schwarze Schicht an der Decke.

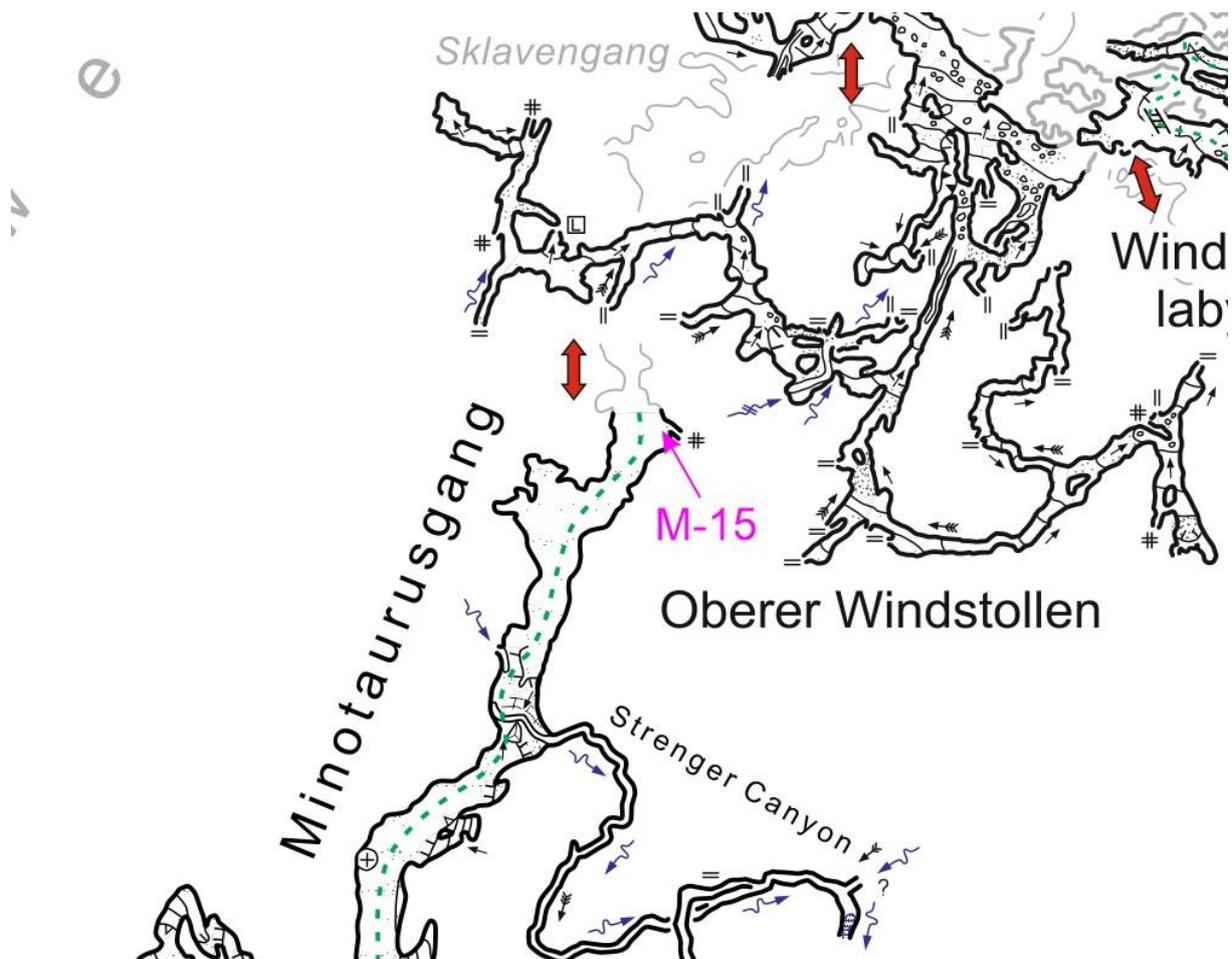


Abbildung 42: Detaillageplan des Probenpunktes M-15. (verändert nach Xaver, Kula & Plan)

M-15 Sklavengang

Tabelle 28: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-15.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|--|
| M-15a | | grünliche Lage mit braunen Zwischenschichten |
| M-15b | Ksk, XRD | hauptsächlich bräunliche Lage mit grünen Lagen |



Abbildung 43: Profil des Untersuchungspunktes M-15, Ansicht von der Seite.



Abbildung 44: Detailansicht des Profilpunktes M-15 mit markierten Probenentnahmestellen.



Abbildung 45: Heller Höhlenton im Profil M-15, mit gefalteter Lamination.

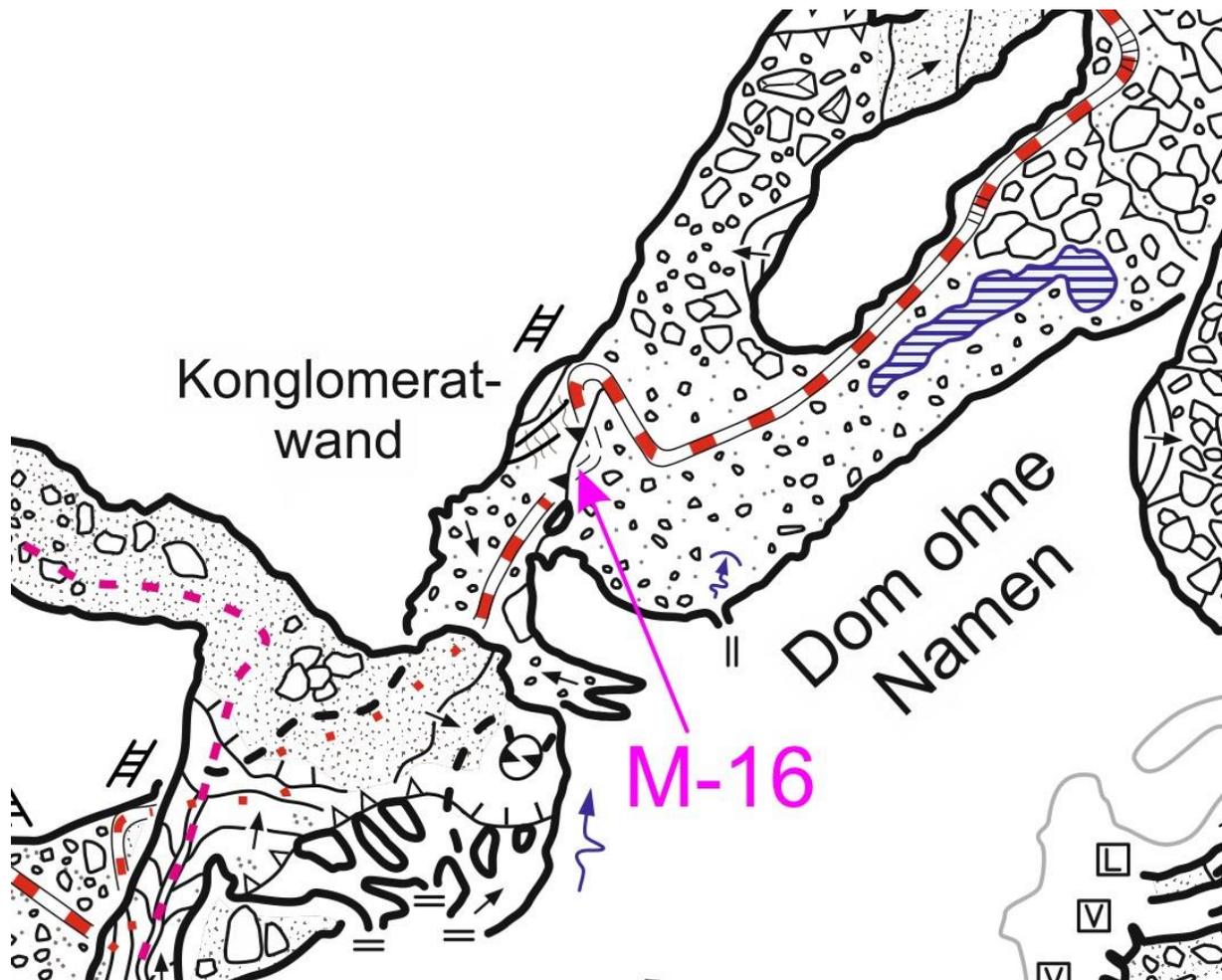


Abbildung 46: Detaillageplan des Probenpunktes M-16. (verändert nach Xaver, Kula & Plan)

M-16 Konglomeratwand, bei der Metalltreppe

Tabelle 29: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes M-16.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|-------------------------------|
| M-16 | | rötliche Schicht rausgekratzt |



Abbildung 47: Profilpunkt M-16 mit markiertem Probeentnahmepunkt.



Abbildung 48: Detailaufnahme der Konglomeratwand M-16 (Verfestigung durch Eis).



Abbildung 49: Detailaufnahme der Konglomeratwand M-16 (Verfestigung durch Karbonat).

Dachstein-Rieseneishöhle

E-01 Lehmgang

Tabelle 30: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes E-01.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|------------------|--------------------------------------|
| E-01a | Ksk, XRD, Sm | Augensteinlage |
| E-01b | Kf, | Große Augensteinlage- Imbrikation |
| E-01c | Ksk, XRD, Sm | Silt mit Zwischenlagen |
| E-01d | Ksk, XRD, Sm | Gut sortierte Sande |
| E-01e | Kg, Ksk, XRD, Sm | Speckige, lehmige Sande |
| E-01f | Kg, Ksk, XRD, Sm | Speckige Lehme mit Sand anteilen |



Abbildung 50: Profilpunkt E-01 mit markierten Probeentnahmepunkten.

E-02 Schmetterlingsgang

Tabelle 31: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes E-02.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|------------------|
| E-02 | Ksk | Moräne |



Abbildung 51: Detailansicht des Untersuchungspunktes E-02, vermutete Moränenablagerung.



Abbildung 52: Untersuchungspunkt E-02 mit markiertem Probeentnahmepunkt E-2.

E-03 Iwanlabyrinth

Tabelle 32: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes E-03.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|-------------------------|
| E-03 | | Ablagerung an der Decke |



Abbildung 53: Untersuchungspunkt E-03 mit grünlichem Belag an der Decke.

E-04 Iwanhalle

Tabelle 33: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes E-04.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|---|
| E-04 | | Steine mit schwarzem Belag an Tropfstelle |

E-05

Tabelle 34: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes E-05.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|---------------------------------------|
| E-05x | | durchsichtige weiße Kristalle (Gips?) |
| E-05a | XRD,Sm | Tonlage kaum verfestigt |
| E-05b | XRD | verfestigte grüne Sandsteinlage |
| E-05c | XRD | unverfestigte grüne Sandsteinlage |
| E-05d | XRD | verfestigte grüne Sandsteinlage |

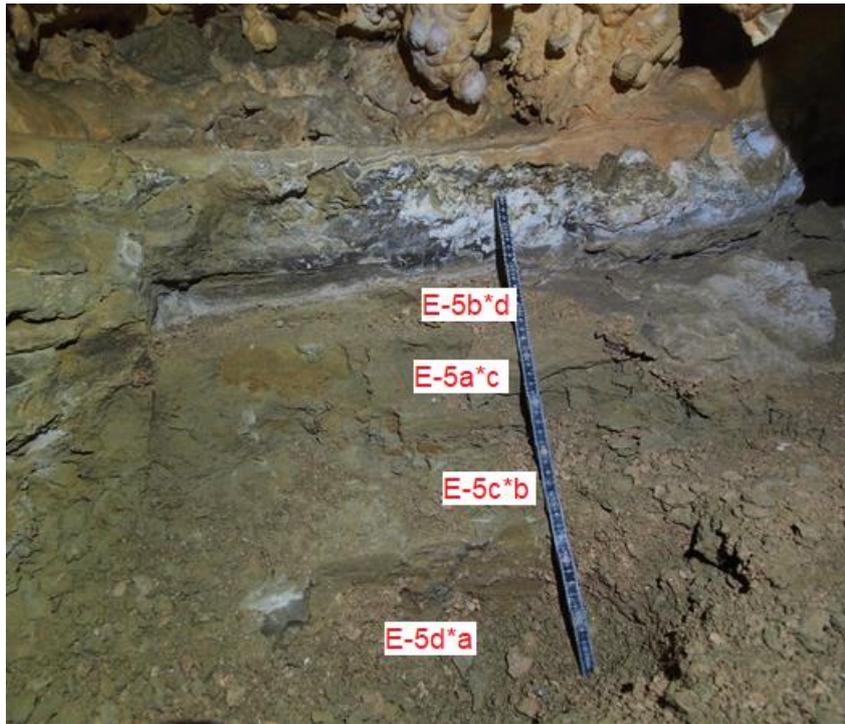


Abbildung 54: Untersuchungspunkt E-05 mit markierten Probeentnahmepunkten.

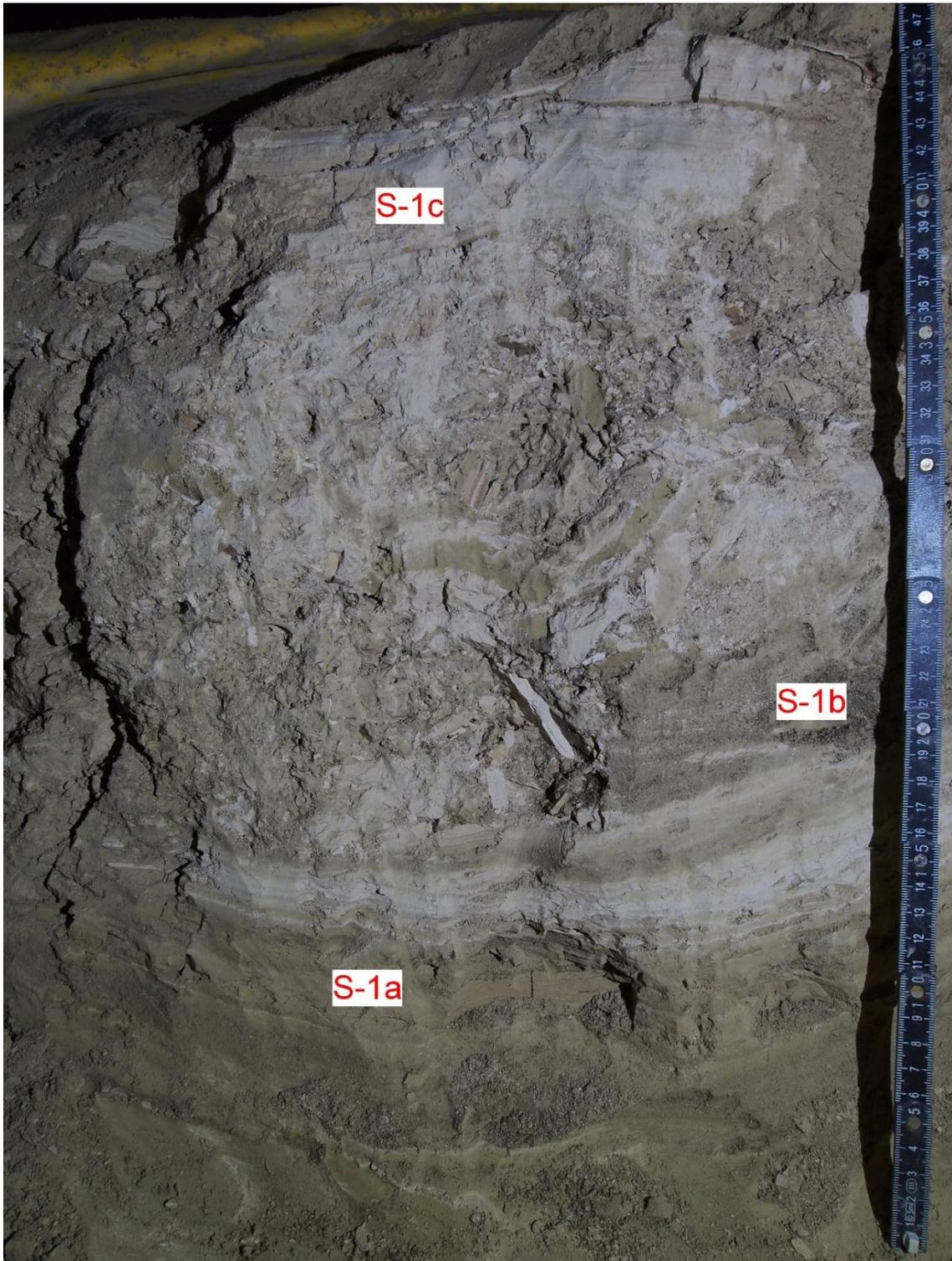


Abbildung 56: Detailaufnahme des Probenpunktes S-01 mit markierten Probeentnahmepunkten.

S-02 Hauptgang nahe VP-18

Tabelle 36: Auflistung der Methoden und Eigenschaften des Probenpunktes S-02.

| Proben | Methoden | Kurzbeschreibung |
|--------|----------|-------------------|
| S-02a | | dunkelbraun tonig |
| S-02b | | Grobsand schwarz |



Abbildung 57: Detailaufnahme des Probenpunktes S-02 mit markierten Probeentnahme punkten.

Tabellen der Korngrößenanalyse

Tabelle 37: Korngrößentabelle der Proben E-01a, E-01c, E-01d, E-01e, E-01f, E-02, M-01a, M-01d, M-01g, M-01h, M-02a und M-06b aufsteigend nach kumulativer Gewichtsverteilung.

| Proben Korngröße (µm) | E-01a | E-01c | E-01d | E-01e | E-01f | E-02 | M-01a | M-01d | M-01g | M-01h | M-02a | M-06b |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,5 | 2,0 | 3,3 | 0,4 | 16,0 | 4,0 | 1,5 | 1,4 | 8,6 | 37,1 | 2,3 | 38,9 | 3,3 |
| 1 | 3,3 | 5,2 | 1,1 | 19,9 | 5,5 | 2,2 | 1,8 | 11,4 | 43,6 | 3,3 | 59,8 | 5,9 |
| 2 | 4,3 | 7,2 | 1,6 | 23,8 | 6,9 | 3,4 | 2,8 | 13,1 | 49,4 | 4,5 | 80,7 | 9,2 |
| 4 | 5,9 | 11,2 | 2,7 | 30,0 | 9,3 | 5,3 | 4,7 | 15,0 | 57,2 | 5,5 | 94,1 | 14,9 |
| 8 | 7,9 | 20,4 | 5,1 | 40,0 | 12,9 | 7,8 | 9,6 | 18,6 | 67,7 | 6,1 | 98,2 | 24,9 |
| 16 | 10,1 | 40,7 | 9,3 | 52,4 | 16,6 | 10,2 | 18,0 | 25,0 | 80,4 | 6,5 | 99,3 | 42,8 |
| 31,5 | 15,2 | 73,0 | 13,2 | 63,4 | 20,3 | 12,0 | 26,3 | 33,7 | 92,1 | 7,0 | 99,6 | 69,6 |
| 63 | 20,8 | 83,9 | 14,6 | 67,0 | 22,0 | 12,9 | 29,5 | 37,3 | 96,5 | 7,3 | 100,0 | 81,3 |
| 125 | 33,6 | 98,4 | 43,3 | 76,4 | 26,7 | 15,3 | 45,3 | 52,1 | 98,9 | 8,0 | 100,0 | 94,2 |
| 250 | 35,4 | 100,0 | 94,5 | 85,4 | 34,4 | 18,4 | 68,7 | 71,5 | 99,6 | 9,5 | 100,0 | 97,4 |
| 500 | 38,6 | 100,0 | 100,0 | 92,0 | 44,5 | 22,5 | 92,5 | 87,9 | 99,9 | 12,9 | 100,0 | 99,4 |
| 1000 | 42,4 | 100,0 | 100,0 | 95,1 | 56,5 | 27,5 | 98,1 | 94,6 | 100,0 | 18,8 | 100,0 | 99,9 |
| 2000 | 51,0 | 100,0 | 100,0 | 97,5 | 69,2 | 34,5 | 99,3 | 97,6 | 100,0 | 35,5 | 100,0 | 100,0 |
| 10000 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Tabelle 38: Korngrößenverteilung der Proben M-01e, M-02b und M-06a aufsteigend nach kumulativer Gewichtsverteilung.

| Proben Korngröße (µm) | M-01e | M-02b | M-06a |
|--------------------------|-------|-------|-------|
| 0,6 | 6,7 | 4,2 | 0,2 |
| 0,8 | 10,8 | 8,1 | 0,4 |
| 1 | 18,1 | 18,2 | 0,9 |
| 1,5 | 26,3 | 29,2 | 1,2 |
| 2 | 37,4 | 49,0 | 1,6 |
| 3 | 43,6 | 63,3 | 2,0 |
| 4 | 48,2 | 72,0 | 2,4 |
| 5 | 51,6 | 77,5 | 2,7 |
| 6 | 57,0 | 83,7 | 3,3 |
| 8 | 62,2 | 87,5 | 3,9 |
| 10 | 72,3 | 92,7 | 5,4 |
| 15 | 80,6 | 95,1 | 6,9 |
| 20 | 87,4 | 95,7 | 8,3 |
| 25 | 92,4 | 95,5 | 9,5 |
| 30 | 97,6 | 95,1 | 11,6 |
| 40 | 98,5 | 95,2 | 12,8 |
| 50 | 98,5 | 99,1 | 14,0 |
| 63 | 99,3 | 99,5 | 33,3 |
| 125 | 99,6 | 99,6 | 76,6 |
| 250 | 99,8 | 100,0 | 98,7 |
| 500 | 99,9 | 100,0 | 99,7 |
| 1000 | 99,9 | 100,0 | 99,8 |
| 2000 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |