

# GEOLOGIE UND KARST-GEOMORPHOLOGIE IM GEBIET DER HUNDSALM (ANGERBERG, TIROL)

Masterarbeit in der Studienrichtung Erdwissenschaften  
Studienzweig Geologie  
zur Erlangungen des akademischen Grades  
Master of Science

eingereicht an der  
Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften  
Universität Innsbruck

von  
Patricia Rittig

Betreuung und Begutachtung:  
Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl

Innsbruck, August 2012



## *Danksagung*

Ich möchte mich bei all jenen Personen aufs Herzlichste bedanken, die mich in der Zeit meines Studiums begleitet und unterstützt haben. Dazu gehören meine Familie, die Institutsangehörigen, meine Studienkollegen, von denen ich viele mittlerweile als enge Freunde bezeichnen darf, und meine Freunde.

Folgenden Personen gebührt besonderer Dank:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl, der mich beim Verfassen dieser Masterarbeit mit außerordentlichem Engagement und großer Sorgfalt betreut hat. Ich konnte mich mit Fragestellungen jeglicher Art jederzeit an ihn wenden und erhielt stets sofort eine ausführliche Auskunft.

Allen Mitgliedern der Innsbruck Quaternary Research Group, insbesondere Gina Moseley, die uns beim Vermessen der Höhlen eine große Hilfe war.

Univ.-Doz. Dr. Werner Resch, der sich die Zeit nahm, mir bei der Analyse der Dünnschliffe mit seinem Wissen behilflich zu sein.

Frau Julia Wallraf für die rasche und qualitativ hochwertige Herstellung der Dünnschliffe.

Den Mitgliedern des Instituts für Mikrobiologie für die Zusammenarbeit in puncto Bergmilch.

Den Mitgliedern des Landesvereins für Höhlenkunde in Tirol für die aufgewendete Zeit und die Beratung bei der Einsicht ins Höhlenkataster.

Den Mitarbeitern der ÖBF Hopfgarten für die freundliche Unterstützung bei der Einsichtnahme ins Quellkataster.

Den Mitgliedern der Tiroler Landesregierung, Abteilung Geoinformation für die Zurverfügungstellung der Laserscan-Daten.

Alfred und Elisabeth Gasteiger für ihre herzliche Bewirtung auf der Buchackeralm.

Anton Bramböck von der Hundsalzalm, der mir einige Besonderheiten im Gebiet zeigen konnte.

Thomas Paschinger für seine Unterstützung während der Arbeit.

Eligio Rappold, der mir näheres Wissen zu den mikrobiologischen Methoden vermitteln konnte.

Meine engsten Freunde, für die ich während meiner Arbeit weniger Zeit fand, die mir aber durchwegs großes Verständnis entgegenbrachten und mich unterstützten.

Der größte Dank gebührt aber natürlich meinen Eltern Ing. Jürgen und Edith Rittig. Sie ermöglichten mir das Studium aus finanzieller Sicht und waren immer für mich da. Ich konnte mich bei allfälligen Problemen stets an sie wenden, sie ermutigten mich in schwierigen Phasen und trieben mich voran. Mit Geduld und großem Einsatz waren sie stets an meiner Seite und unterstützten mein Schaffen in jeglicher Hinsicht.

*DANKE!*

## *Zusammenfassung*

Die in den Brandenberger Alpen gelegene Guffert Pendling-Antiklinale baut sich aus einem Kern aus Wettersteinkalk/ -dolomit und einem Mantel aus Hauptdolomit auf. Im Untersuchungsgebiet, welches nördlich der Gemeinde Angerberg gelegen ist, streicht die Antiklinale SW-NE. Es ist die Lagunenfazies des Wettersteinkalk vertreten; der Hauptdolomit weist einen hohen Grad an Spröddefomation auf. Die dazwischen liegenden Raibler Schichten sind überwiegend tektonisch ausgequetscht. Ein größeres, zusammenhängendes Vorkommen von Karbonaten und Schiefertonen der Raibler Schichten ist in einem Graben nördlich der Buchackeralm aufgeschlossen. Im Scharnierbereich der Antiklinale stößt man auf kleinere Vorkommen der Gosau Gruppe. Diese sind an frühalpide Störungen gebunden, die vertretenen Lithologien sind vielgestaltig. So kommen basale, bauxitische Brekzien, Konglomerate, Kalksandsteine, Kalksteine und dünne Kohleeinschaltungen vor. An mehreren Stellen sind quartäre Ablagerungen (Grundmoräne, Hangschutt, lokale Torfablagerungen) aufgeschlossen, sind allerdings meist geringmächtig. Zahlreiche Störungen durchsetzen das Untersuchungsgebiet. Sie streichen überwiegend NW-SE, Dehnungsstrukturen im Scharnier der Antiklinale streichen SW-NE.

Die Quellen im Untersuchungsgebiet weisen größtenteils sehr geringe Schüttungen auf; es handelt sich durchwegs um seicht gelegene Aquifere. Quellen treten überwiegend im Grenzbereich zwischen Wettersteinkalk und Hauptdolomit auf. Diese beiden Lithologien sind gute Grundwasserleiter. Darüber hinaus haben die zahlreichen Störungen und insbesondere die intensive Verkarstung einen starken Effekt auf die Wasserwegigkeit.

Der Wettersteinkalk im Untersuchungsgebiet weist einen hohen Verkarstungsgrad auf. Besonders intensiv ist dieser im NNW-SSE-streichenden Bereich im Gebiet der Hundsalzm. In ihm sind zahlreiche Karren, Dolinen, Schwinden, Höhlen, Halbhöhlen und Schächte anzutreffen. Hierbei sei erwähnt, dass wesentlich mehr Höhlen aufgefunden wurden, als im Höhlenkataster des Vereins für Höhlenkunde in Tirol registriert sind, allerdings handelt es sich bei den neu aufgefundenen Objekten nur um Kleinsthöhlen.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie wurden Untersuchungen an Bergmilch aus der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei dieser Höhlenbildung um eine komplexe Vergesellschaftung von Calcit-Fasern, Wasser, organischen Polymeren und Mikroorganismen handelt. Die Gesellschaft der Kleinstlebewesen setzt sich aus Archaea, Bakterien und Pilzen zusammen.

## *Summary*

The Guffert-Pending anticline in the Brandenberg Alps is mainly composed of Wetterstein limestone/ -dolomite and Hauptdolomit. In the investigation area, which is situated north of the community of Angerberg, the anticline is striking in SW-NE direction. The Wetterstein limestone occurs as a lagoonal deposit. The Hauptdolomit shows a high degree of brittle deformation. The Raibl Formation, which is stratigraphically situated between these two units, is largely tectonically missing. One coherent outcrop of shales and carbonates of this formation is situated in a trench north of the Buchackeralm. Near the hinge of the anticline, sedimentary rocks of the Gosau Group can be found bound to early alpine faults. These rocks include bauxitic breccias, conglomerates, calcareous sandstones, limestones and thin coal seams. Quaternary deposits (basal till, talus and small peat deposits) can be found in the study area. A series of faults cross the investigation area. They strike mainly NW-SE. Extensional structures at the hinge of the anticline strike SW-NE.

The aquifers in the study area are shallow and most springs show low discharge. Springs occur preferentially at the border between Wetterstein limestone and Hauptdolomit. Both lithologies are good aquifers. In addition to the numerous faults the intensive karstification has a strong effect on the groundwater flow.

The Wetterstein limestone shows a high degree of karstification which is most intense in a NNW-SSE-striking area around the Hundsalzm. In this area many karren, dolines, sinkholes, caves and shafts can be found. Several new caves were found in this area, all of which, however, are very small.

In cooperation with the Institute of Microbiology, investigations on moonmilk samples from the Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle were carried out. The results show that this cave deposit is an association of calcite fibres, water, organic polymers and microorganisms. The community of microorganisms consists of archaea, bacteria and fungi.





## *Inhaltsverzeichnis*

Zusammenfassung	v
Abstract	vii
I. Einleitung	1
1. Zielsetzung und Vorgehensweise	1
2. Vorgenommene Arbeiten	1
3. Karstgeologie	2
3.1. Allgemein	2
3.2. Prozesse	3
3.2.1. Korrosion	4
3.2.2. Erosion	7
3.2.3. Inkasion	7
3.3. Karsthydrologie	9
3.4. Lithologie	12
3.5. Karren	13
3.5.1. Kreisförmiger Grundriss	15
3.5.2. Lineare, bruchkontrollierte Formen	17
3.5.3. Lineare, hydrodynamische Formen	17
3.5.4. Mehrfachformen	19
3.5.5. Karrenvergesellschaftungen	19
3.5.6. Weitere Formen	20
3.6. Dolinen	20
3.7. Höhenlagen des Vorkommens von Karstformen	22
4. Höhlen	23
4.1. Allgemein	23
4.2. Speläogenese	24
4.3. Speläomorphologie	26
4.3.1. Kleinformen	26
4.3.2. Großformen	27
4.4. Höhlensedimente	29
4.4.1. Allgemein	29
4.4.2. Speläotheme	30
4.4.3. Eis in Höhlen – Eishöhlen	37

II.	Untersuchungsgebiet	41
	1. Geographischer Überblick	41
	2. Regionale Geologie	42
	2.1. Die Nördlichen Kalkalpen	43
	2.2. Geologische Entwicklung	45
	2.2.1. Perm	45
	2.2.2. Trias	45
	2.2.3. Jura	47
	2.2.4. Kreide – Paläogen	48
	2.2.5. Quartär	49
	2.3. Stratigraphie	50
	2.4. Lithologien	52
	2.4.1. Wettersteinkalk und –dolomit	52
	2.4.2. Nordalpine Raibler Schichten	53
	2.4.3. Hauptdolomit	54
	2.4.4. Gosau-Gruppe	55
	2.5. Tektonik	57
	2.5.1. Großtektonische Einheiten	58
III.	Methodik	60
	1. Geologische und karstgeomorphologische Kartierung	60
	2. Computergestützte Arbeit	60
	3. Vermessung der Höhlen	61
	4. Petrographische Untersuchungen	61
	5. Hydrologische Recherchen	61
	6. Mikrobiologische Methoden	62
	6.1. Lebend-Kultivierungs-Ansatz	62
	6.2. Molekularbiologischer Ansatz	64
IV.	Ergebnisse	66
	1. Lokale Geologie	66
	1.1. Lithologie – makroskopische Beschreibung	66
	1.1.1. Wettersteinkalk und –dolomit	66
	1.1.2. Nordalpine Raibler Schichten	67
	1.1.3. Hauptdolomit	67

1.1.4. Gosau Gruppe	68
1.1.5. Quartäre Ablagerungen	69
1.2. Lithologie – mikroskopische Beschreibung	70
1.2.1. Wettersteinkalk und –dolomit	70
1.2.2. Nordalpine Raibler Schichten	74
1.2.3. Hauptdolomit	80
1.2.4. Gosau Gruppe	81
1.3. Lokaler tektonischer Überblick	88
1.4. Hydrogeologie	91
2. Karst Geomorphologie	95
2.1. Lösungsdenudation	97
2.2. Karren	98
2.2.1. Kreisförmiger Grundriss	98
2.2.2. Bruchkontrollierte Formen	98
2.2.3. Hydrodynamische Formen	100
2.3. Dolinen	102
2.4. Höhlen	102
2.4.1. Höhlen/ Halbhöhlen im Untersuchungsgebiet laut Kataster	102
2.4.2. Weitere vermessene Höhlen/ Halbhöhlen im Untersuchungsgebiet	119
2.4.3. Weitere Höhlen/ Halbhöhlen im Untersuchungsgebiet	123
3. Mikrobiologie der Bergmilch	129
V. Diskussion	133
VI. Literaturverzeichnis	139
VII. Anhang	150
VIII. Lebenslauf	151

## I. *Einleitung*

### 1. **Zielsetzung und Vorgehensweise**

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit war die Klärung einer breiten Palette geologischer Fragestellungen. Dabei erwies sich insbesondere das Thema Karst von großem Interesse. Ziel der im Gelände und im Labor durchgeführten Untersuchungen war die Erstellung einer detaillierten geologischen Karte. Die makroskopische Gesteinsansprache im Feld wurde durch eine mikroskopische Klassifizierung und Bestimmung unterstützt. Karstgeomorphologische Aspekte wurden detailliert aufgenommen und ergänzend der geologischen Karte hinzugefügt, außerdem wurde die genaue geographische Position der im Gebiet vorkommenden Höhlen ermittelt und viele Höhlen/ Halbhöhlen vermessen. Darüber hinaus wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie mikrobiologische Analysen der Bergmilch aus dem unteren Stockwerk der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle initiiert.

### 2. **Vorgenommene Arbeiten**

Ich beging an insgesamt 30 Geländetagen das Gebiet, die Aufnahme zahlreicher Aufschlüsse diente der Erstellung einer detaillierten geologischen Karte sowie einer genauen Aufnahme der karstgeomorphologischen Verhältnisse. Über das Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Geoinformation beantragte ich zur Unterstützung der karstgeomorphologischen Kartierung Laserscan-Daten.

Für weitere Untersuchungen von diversen Aufschlüssen mitgenommene Handstücke wurden mit Unterstützung von Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl gesägt und durch Präparatorin Julia Wallraf zu petrographischen Dünnschliffen weiterverarbeitet. Diese wurden mit freundlicher Unterstützung durch Herrn Univ. Doz. Dr. Werner Resch untersucht, um die makroskopische Gesteinsansprache durch einen aussagekräftigen mikropaläontologischen Befund untermauern zu können.

Der Eisteil der Höhle wurde in Summe sieben Mal befahren, hierbei sei dankend erwähnt, dass ich mich bei allfälligen Fragen stets sowohl an Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl als auch an diverse Höhlenführer wenden konnte. Der nicht

öffentlich zugängliche Teil der Höhle wurde insgesamt drei Mal mit Univ.-Prof. Mag. Dr. Christoph Spötl besucht, einmal unter Beisein von Dr. Yuri Dublyansky zur Entnahme von Bergmilchproben, einmal gemeinsam mit Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Birgit Sattler und MMag. Christoph Reitschuler zur neuerlichen Entnahme von Bergmilchproben.

Weitere kleinere Höhlen und Schächte wurden an mehreren Tagen begangen, um ihre genaue geographische Position mittels GPS zu bestimmen und sie zu vermessen, um im Anschluss daran Höhlenpläne erstellen zu können.

In den frühen 1990er Jahren wurden Quellen im Gebiet für das Quellkataster der Österreichischen Bundesforste durch die Herrn Krejci und Völkl aufgenommen, einige Wasserproben wurden durch Herrn Pavuza am Naturhistorischen Museum in Wien analysiert. Ich konnte durch freundliche Unterstützung der Mitarbeiter der ÖBF Sektion Hopfgarten Einblick in die Unterlagen nehmen und im Anschluss daran die Daten aufarbeiten.

### 3. Karstgeologie

Gegenstand dieses Wissenschaftszweiges ist die Untersuchung eines Phänomens, welches vor allem in Karbonatgesteinen anzutreffen ist: Verkarstung. Lösung erweist sich als die treibende Kraft, die zur Ausgestaltung karsttypischer Formen führt. Vor allem in Gebieten, die durch die Präsenz karbonatischer Gesteine geprägt sind, führt Verkarstung zur Erschaffung eines charakteristischen Landschaftsbildes – über und unter der Oberfläche.

#### 3.1. Allgemein

Das Wort Karst leitet sich aus dem prä-indoeuropäischen Wort ‚karra‘ bzw. ‚gara‘, die Bezeichnung für Stein, ab. Als Karst wird eine spezielle Landschaftsform bezeichnet, die sich durch unterirdische Wassersysteme und Höhlen auszeichnet. Als verkarstungsfähig erweisen sich Evaporite (Gips, Anhydrit, Halit), Karbonate (Kalk, Dolomit) und Quarzit (allerdings nur unter extremer, tropischer Feuchtigkeit).

Bei Karst handelt es sich um ein landschaftsformendes Element, welches global gesehen häufig und zum Teil großflächig vorzufinden ist – 20% der eisfreien

Erdoberfläche, über ein weites Spektrum an Breiten- und Höhenlagen, sind verkarstet. Karbonatkarst macht insgesamt gut 10 bis 15% der kontinentalen Bereiche aus. Auch aus ökonomischer Sicht ist die Bedeutung verkarsteter Gebiete groß, da 20 bis 25% der Weltbevölkerung ihr Grundwasser aus Karstgebieten beziehen (SWEETING 1972; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007).

In Bezug auf die Landschaftsentwicklung durch Umwelteinflüsse sind Klima, hydrologische Prozesse, vorherrschende Lithologie und dessen Struktur entscheidend. Das Abflussverhalten oberflächlicher Gewässer unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen. Weiters nehmen Temperatur-Schwankungen Einfluss auf die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen, dadurch bildet sich eine vertikale Lösungsverteilung aus (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Große Bereiche Europas sind verkarstet. Generell sind auf der nördlichen Hemisphäre Karbonatgesteine sehr stark vertreten, dennoch zeigt nicht jegliches Vorkommen Anzeichen der Verkarstung. Dies resultiert daher, dass Karst durch eine Kombination aus einer hohen Gesteinslöslichkeit und einer gut entwickelten sekundären – also durch Frakturen im Gestein bedingten – Porosität entsteht. Eine bestmögliche Verkarstung bedingt folgende Faktoren: Dichtes, massiges, feinkörniges und homogenes Karbonatgestein, welches sich zusätzlich durch eine hohe chemische Reinheit auszeichnet und Risse aufweist (BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007).

### 3.2. Prozesse

Die Morphologie eines Karstgebietes im Allgemeinen bzw. einer Höhle im Speziellen wird dadurch bestimmt, welche formenden Prozesse für ihre Entstehung von Bedeutung sind und damit verbunden auch, in welchem karsthydrographischen Bereich (3.3) die Formengestaltung stattfindet. Die Genese der verschiedenen Formen kann unterschiedlich komplex gestaltet sein. Als die drei wesentlichen Prozesse, die zur Ausbildung der verschiedenen Karsterscheinungen führen, sind Korrosion, Erosion und Inkasion zu nennen, die folgend näher erläutert werden sollen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

### 3.2.1. Korrosion

Für die Entstehung von Karst – oberflächlich als auch unterirdisch (3.3) – fungiert Lösung als wichtigster Prozess. So werden viele Karrenformen, aber auch Hohlraumscheinungen vollständig oder zumindest maßgeblich durch Lösung gebildet.

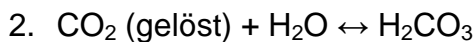
Korrosion beschreibt allgemein Reaktionen eines Stoffes mit seiner Umwelt, die eine Veränderung und Beeinträchtigung der Materialeigenschaften zur Folge haben. In der Geologie ist mit Korrosion die Auflösung von Gestein gemeint, die sich überwiegend vertikal in die Tiefe arbeitet.

Bei der Lösung von Gestein zerfallen seine Minerale in Ionen oder Moleküle, welche dann in das Lösungsmedium diffundieren. Die Lösungsintensität wird stark durch klimatische Gegebenheiten, vor allem Niederschlag, beeinflusst (ZÖTL 1974; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

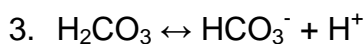
Um die Lösung von Karbonaten verstehen zu können, sollen die im System  $\text{CO}_2$  –  $\text{H}_2\text{O}$  –  $\text{CaCO}_3$  ablaufenden Prozesse kurz erläutert werden (Abbildung 1).



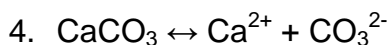
$\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre löst sich im Wasser und umgekehrt.



Aus der Verbindung von  $\text{CO}_2$  mit Wasser entsteht Kohlensäure.



Erster Dissoziationsschritt der Säure.



Wenn Wasser und (Karbonat-) Gestein in Kontakt kommen, werden Ionen aus dem Kristallgitter gelöst. Diese Reaktion ist langsam. Die Löslichkeit ist abhängig von der Anzahl an Fremdionen.



Das neu entstandene  $\text{CO}_3^{2-}$  verbindet sich mit  $\text{H}^+$  aus 3.

In diesem System kann  $\text{CO}_2$  ununterbrochen variieren. Luft ( $\text{CO}_{2\text{atm.}}$ , durchschnittlich 0,04%) und Boden ( $\text{CO}_{2\text{org.}} > \text{CO}_{2\text{atm.}}$ , bis zu mehreren %) stellen die wichtigsten  $\text{CO}_2$ -Quellen dar. Der partielle Kohlendioxid-Druck ( $p\text{CO}_2$ ) verändert sich je nach Höhe, überlagernder Wassersäule und organischer Aktivität

stark. CO<sub>2</sub>-gesättigtes Wasser kann pro Liter bis zu einige zehntel Gramm Kalk lösen (SWEETING 1972; NICOD 1975; BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007; KEMPE & ROSENDAHL 2008).

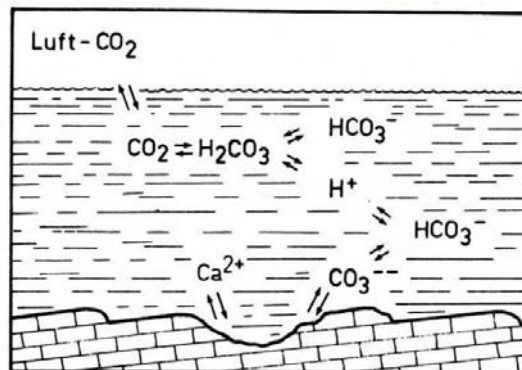


Abbildung 1 – Skizze mit den wesentlichen Lösungs-/ Dissoziationsprozessen im System Luft-Wasser-Karbonat; (BÖGLI 1980, S. 16)

Für die Lösung von Karbonaten sind Temperatur und Druck wichtige Parameter. So nimmt ihre Löslichkeit mit steigender Temperatur ab, was neben einem Höhen- auch einen Breitengradeneffekt zur Folge hat – vorausgesetzt, das Wasser gefriert nicht. In alpinen und kalt-temperierten Klimaten mit hohen Niederschlagsraten sind die höchsten Lösungsdenudationsraten anzutreffen. Nimmt der atmosphärische, lithostatische oder hydrostatische Druck zu, erhöht sich der pCO<sub>2</sub>-Wert und Karbonate können leichter gelöst werden. Überdies beeinflussen Permeabilität des Gesteins und Verweildauer des Wassers maßgeblich die Lösungsraten (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Nicht zu vernachlässigen ist der biotische Beitrag zur Verkarstung. Höhere Pflanzen, Algen und manche Bakterien produzieren durch Stoffwechsellvorgänge CO<sub>2</sub>. Dieses reichert sich in Böden an und führt zu einer gesteigerten Lösungsrate. Die Baumgrenze stellt einen Umschwung bzgl. der CO<sub>2</sub>-Werte im Boden dar.

Darüber hinaus können Organismen im direkten Kontakt zu Fels, diesen ätzen oder sprengen (Phytokarst). Dadurch steht der Korrosion eine größere, bereits vorgeschwächte Oberfläche zur Verfügung. Andererseits können Algen und Bakterien die Ausfällung von Calcit erleichtern (biologisch kontrollierte/ induzierte Fällung, BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).



Es lassen sich mehrere Korrosionsmechanismen unterscheiden. Für die Verkarstung als bedeutsam erweisen sich Mischungs-, Abkühlungs- und Kondensationskorrosion:

- ◆ *Mischungskorrosion*: Zwei gesättigte, d.h. sich im Gleichgewicht befindlichen Gewässer A und B werden gemischt, die  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentrationen sind unterschiedlich. Durch die Mischung verschiebt sich das Gleichgewicht, das ‚neue‘ Wasser C erweist sich wieder als korrosiv, da untersättigt. Es löst solange, bis es den neuen Punkt D auf der Sättigungskurve erreicht (Abbildung 2).

Die Mischungskorrosion ist für die Initiierung der Höhlenbildung in Karbonaten wichtig. Ohne sie wären die meteorischen Wässer nach nur wenigen Metern Fließweite gesättigt und es könnte nicht mehr korrodiert werden (BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988).

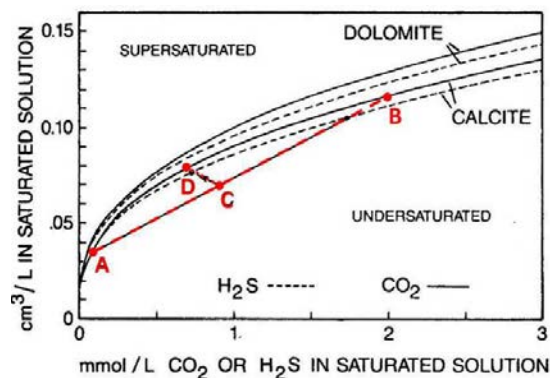


Abbildung 2 – Prinzip der Mischungskorrosion in gesättigten Lösungen; (BÖGLI 1980, S. 60, mod.)

- ◆ *Abkühlungskorrosion*: Mit sinkender Temperatur (bei unverändertem  $\text{pCO}_2$ ) wird wieder  $\text{CO}_2$  für die Kalklösung verfügbar – die Löslichkeit der Karbonate nimmt zu. Dieser Korrosionstyp hat eine geringere Wirksamkeit als die Mischungskorrosion und ist vor allem in den oberen, vadosen Regionen des Karst bedeutsam. Bei Eindringen in den Untergrund wird das Wasser zumeist abgekühlt, das Lösungspotential wird somit erhöht (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).
- ◆ *Kondensationskorrosion*: Diese Art erweist sich vor allem in Hohlräumen als bedeutsam. Der in der Höhlenluft enthaltene Wasserdampf kondensiert an den kalten Wänden. Das kondensierte Wasser verfügt über ein hohes Lösungspotential. Kleine Schwachstellen im Gestein werden bevorzugt

angegriffen. Korrosionserscheinungen bilden sich in Form sphäroidaler Taschen sowohl auf dem Muttergestein als auch auf Höhlenbildungen (Speläotheme) aus. Dieser Korrosionsprozess verläuft oft episodisch und ist vom Mikroklima der Höhle kontrolliert. Generell ist der Betrag dieses Typs von Verwitterung in den Eingangsbereichen am größten (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

### 3.2.2. *Erosion*

Die Erosion beschreibt den Prozess mechanischer Abtragung von Material. Ein in einem Transportmedium mitgeführtes ‚Schleifmittel‘ trägt Material oberflächlich ab. Abhängig vom Transportmedium werden mehrere Arten der Erosion unterschieden, für die Verkarstung ist vor allem die fluviatile Erosion bedeutend. Mit zunehmender Fließgeschwindigkeit vermag Wasser zunehmend mehr Material (Boden, Ton/ Silt, Sand oder Steine) von der Oberfläche oder auch unterirdischen Reservoirs mitzureißen – die erosive Wirkung erhöht sich (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Weiters sei Erosion durch *Frostsprenzung (Kryoklastik)* genannt, die besonders in kalten Regionen wie dem Alpenraum beträchtlich sein kann. Durch Frostsprennung können in Felswänden Halbhöhlen entstehen, die als ‚frost pockets‘ bezeichnet werden. Diese erweitern sich nach oben hin und ein gerundeter Bogen mit einer Höhe bis zu mehreren 10er m entsteht. Vor allem dünnbankiges und/ oder geklüftetes Gestein ist anfällig für Frostsprennung. Mit Frostsprennung verbunden kann Inkasion auftreten. Frostsprennung tritt auf der nördlichen Hemisphäre verstärkt an steilen Nordhängen auf, zusätzlich erweist sich eine östliche Exposition als günstig. Unter diesen Gegebenheiten kann Schnee länger liegen bleiben als in den stärker sonnenexponierten Bereichen. Außerdem fehlt die isolierende Vegetationsdecke über einen längeren Zeitraum (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; BLUME et al. 2010).

### 3.2.3. *Inkasion*

Bei der Inkasion handelt es sich um das natürliche Verstürzen von unterirdischen Hohlräumen, sie stellt ein Produkt von Korrosion und Erosion dar. Bei entsprechender Nähe zur Oberfläche können sich in dieser charakteristische

Formen ausbilden. Bei Inkasion handelt es sich zumeist um eine Alterserscheinung – das heißt, Erosion und Korrosion müssen so weit fortgeschritten sein, dass die Gesteinsfestigkeit überschritten wird. Es werden drei Versagensmechanismen unterschieden, die einzeln oder gekoppelt zum Versturz führen können:

- ◆ *Spannungsversagen*: Die Spannungen übersteigen die Festigkeit des Gesteins, es kommt zum Versagen durch Bruch.
- ◆ *Kluftkörperversagen*: Dieses tritt auf, wenn mehrere Trennflächen miteinander verschneiden. Dadurch werden Kluftkörper isoliert, die in den Hohlraum stürzen.
- ◆ *Balkenversagen*: Durch ihr Eigengewicht werden einzelne Gesteinspakete aus ihrem Verband gelöst und brechen ein.

Ihr Einsetzen hängt von lithologischen Eigenschaften und tektonischer Beanspruchung des Gesteins ab. Die Schichtdicke erweist sich als bedeutend – je dicker, umso stabiler. Durch wiederholtes Einstürzen nähert sich die Form der Decke allmählich der eines Doms an, da diese Form eine große Stabilität aufweist. Die Einsturzrate geht damit zurück.

Als die drei wichtigsten Voraussetzungen, die zu Inkasion in Höhlen führen, gelten:

- Die Entwässerung phreatischer Höhlen, durch welche es zu einer relativen Gewichtszunahme der zu tragenden Gesteinseinheiten kommt.
- Aggressive Sickerwässer, die das Gestein, insbesondere die tragenden Decken, schwächen.
- Bäche, welche die Passagen, die sie durchfließen, sehr stark ausweiten.

Ältere Strukturen können durch Inkasion zerstört oder durch Blockwerk verdeckt werden. Bei Frost kommt es verstärkt zu Inkasion (BÖGLI 1978; FILIPPONI 2003; FORD & WILLIAMS 2007).

### 3.3. Karsthydrologie

Ein besonderes Merkmal von Karst ist, dass die Entwässerung des betreffenden Gebietes nicht oberflächlich erfolgt – ausgeprägte Karstlandschaften entwässern zu 100% in den Untergrund. Gut entwickelter Karst weist nur wenige, dafür große aktive, unterirdische Wasserwege und dementsprechend wenige, dafür große Karstquellen auf. Karstquellen zeigen mitunter sehr große Schüttungen (SWEETING 1972; FORD & WILLIAMS 2007).

Für Karst kennzeichnend sind die Ausbildung einer charakteristischen Oberfläche (Exokarst) wie auch unterirdischer Erscheinungen (Endokarst). *Exokarst* als oberflächliches Karstphänomen entsteht durch den Lösungseffekt von Niederschlag. *Endokarst* lässt sich unterteilen in *Hyperkarst*, der durch meteorische Wässer entsteht und *Hypokarst*, der sich durch aggressive Tiefenwässer bildet. Meteorisches Gewässer inkludiert Niederschlags-, Boden-, Kondenswasser sowie Wasser oberflächlicher Gerinne. Da diese Wässer stets unterschiedliche Sättigungen aufweisen, findet immer Mischungskorrosion (3.2.1) statt. Als *Epikarst* bezeichnet man die oberste Lösungszone. Im Boden herrscht bedingt durch das Verrotten von Vegetation und anderen Prozessen rege mikrobielle Aktivität, welche die  $pCO_2$ -Werte bis auf mehrere % ansteigen lässt. Über Klüfte dringt das stark an  $CO_2$  angereicherte Wasser in das Gestein ein, die Verwitterungsprozesse werden beschleunigt (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

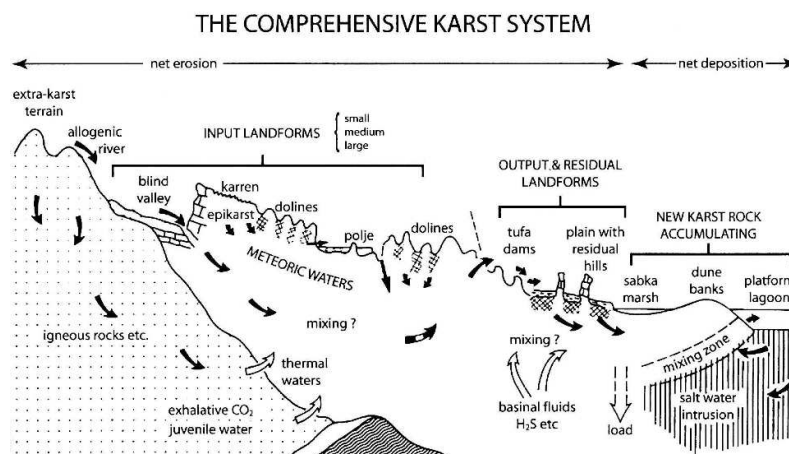


Abbildung 3 – Zusammenstellung der wichtigsten Phänomene innerhalb einer aktiven Karstlandschaft; (FORD & WILLIAMS 2007, S. 3)

Die freie Bewegung von Wasser – oder untergeordnet auch Wasserdampf – ist unabdingbar für die Entwicklung von Karst (Abbildung 3). Bewegung von Wasser

wird stets durch Druckdifferenzen verursacht. Karstwasserzirkulation ist daher nur dann möglich, wenn eine durchgehende, unterirdische Verbindung zwischen der oder den Eintritts- und der oder den Austrittsstelle(n) gegeben ist. Die mittlere Fließgeschwindigkeit im Karstgrundwasserkörper beträgt cm bis m pro Tag. Es lässt sich unterscheiden zwischen: Sickerwasser, freiem Gerinne, Druckgerinne, Karstwasserkörper. Es kommt zu Lösung entlang der Kontaktfläche Wasser-Gestein. Die leitenden Hohlräume werden stetig erweitert, was die Permeabilität des Gesteins steigert und somit die Wasserwegigkeit stetig erhöht. Stärker durchflossene Wasserbahnen werden stärker erweitert. Anzahl und Lichtweite der Klüfte nimmt nach der Tiefe hin ab. Morphologie der Oberfläche und Karstgrundwassersystem entwickeln und verändern sich im Laufe der Zeit andauernd (ZÖTL 1974; DREYBRODT 1988; WHITE 2002; FORD & WILLIAMS 2007; KLIMCHOUK 2007).

Der Karstgrundwasserkörper zeigt mehrere Eigenheiten, die ihn von einem herkömmlichen Grundwasserkörper unterscheiden:

- Eine zusammenhängende Grundwasserfläche fehlt – es kann mehrere Stockwerke geben (dynamischer Karstwasserkörper). Im Gegensatz dazu steht der statische Karstwasserkörper, bei welchem die lokalen piezometrischen Wasserflächen des Karstwasserkörpers und die des Vorfluters auf gleichem Niveau liegen.
- Die Bewegungen innerhalb des Wasserkörpers verlaufen sehr uneinheitlich, das Fließverhalten ist durch einige wenige Röhren bestimmt.
- Bedingt durch dieses Röhrenfließen bilden sich individuelle Potentialflächen aus.
- Der Durchmesser von karsthydrographisch wirksamen Hohlräumen variiert stark – von wenigen mm bis hin zu dm.
- Die verschiedenen Hohlraumnetze zeichnen sich durch beträchtliche Größenunterschiede aus (BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; WHITE 2002).

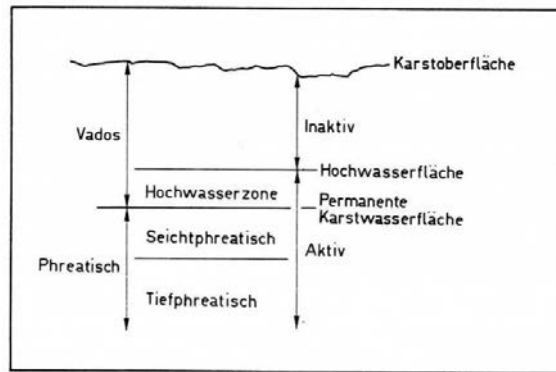


Abbildung 4 – Zonen des Karstes; (BÖGLI 1980, S. 101)

Im System Karst lassen sich mehrere hydrographische Zonen bestimmen (Abbildung 4):

- ◆ *Vadose Zone*: Diese ist luftefüllt, die Entwässerung erfolgt vertikal. Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt wird durch den Gleichgewichtsgehalt an  $\text{CaCO}_3$  im Wasser bestimmt. Bei zu geringem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt wird  $\text{CO}_2$  aufgenommen und Kalk gelöst, bei  $\text{CaCO}_3$ -Überschuss wird  $\text{CO}_2$  abgegeben und Kalk ausgeschieden (Sinterbildung). Erosion, Korrosion und Inkasion (Verstürzen) dominieren diesen Bereich.
- ◆ *Hochwasserzone*: In dieser epiphreatischen Zone herrscht ein Wechselspiel aus Luftefüllung (vados) in inaktiven Zeiten und Wassererfüllung (phreatisch) in aktiven Phasen. Vados und phreatisch angelegte Formen kommen gemeinsam vor.
- ◆ *Phreatische Zone*: Die Wasserfüllung ist permanent, die Zone wird als aktiv bezeichnet. Weiters kann man zwischen seicht- (stärkere Wasserbewegung), tiefphreatisch (geringere Wasserbewegung) und stagnierend (keine Wasserbewegung) unterscheiden. Es sei angemerkt, dass zu Beginn stets phreatische Bedingungen herrschen. Erst durch sukzessives Einschneiden kommt es zu einer Verlagerung der phreatischen Zone gegen tiefere Gefilde – ein vadoser Bereich darüber kann entstehen (BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007).

An der Oberfläche und im vadosen Bereich des unterirdischen Karstkörpers fließen Gewässer frei und schneiden durch Erosion und Korrosion in den Untergrund ein. Die Bewegungsformen sind mannigfaltig: Das Wasser kann im

herkömmlichen Sinne abfließen (laminar oder turbulent), es kann sickern, stürzen, stehen oder auch Aggregatzustandsänderungen (gefrieren, verdunsten, kondensieren) unterliegen. Auch ist bedeutend, ob es Fracht mit sich führt und wenn ja, wie es um diese bestellt ist. Bewegt sich die Fracht in einem Korngrößenspektrum von Sand bis Stein, wird die abtragende Wirkung (3.2.2) verstärkt. Sind die dominierenden Korngrößen Silt oder gar Ton, können bereits ausgewaschene Klüfte, Schichtflächen oder Kanälchen verstopft werden und damit in Hinblick auf die Wasserwegigkeit bedeutungslos werden.

Weiters ist im vadosen Bereich die Inkasion als formende Kraft wichtig. Sie kann direkt zwar nur unterirdische Bereiche betreffen, doch kann sie bei Durchbrechen an die Oberfläche auch stark zur Gestaltung dieser beitragen (z.B.: Dolinen, 3.6, BÖGLI 1978; WHITE 2002; FORD & WILLIAMS 2007).

Im phreatischen Bereich des Karstgrundwasserkörpers fällt die Inkasion als gestaltendes Element weg – die Ausbildung der Morphologie erfolgt nur durch erosive und korrosive Kräfte. Die korrosive Wirkung steigt durch den zunehmenden CO<sub>2</sub>-Partialdruck mit der Wassertiefe an. Das Wasser in dieser Zone wird meist durch Druckunterschiede in Bewegung versetzt – man spricht in diesem Fall von Druckfließen. Erfüllt es einen Hohlraum (quasi)statisch, kann es auch durch Dichteunterschiede zu zellulärer Konvektion kommen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

#### 3.4. Lithologie

Wie sich das karsthydrologische System entwickelt, wird von hydraulischen Parametern und Grenzbedingungen kontrolliert. Zu den Grenzbedingungen zählen geologische, topographische, klimatische und biologische Einflüsse. Einige geologische Einflussgrößen seien im Folgenden genannt.

- ◆ *Gesteinsreinheit:* In Karbonaten finden sich als häufigste unlösliche Unreinheiten Ton und Silikatminerale. Diese können sich bildende Proto-Kanäle leicht verstopfen. Am besten verkarstungsfähig sind Karbonate mit über 70% Karbonatgehalt.
- ◆ *Korngröße und Textur:* Es gilt, je feinkörniger, umso löslicher, da die für Korrosion anfällige Oberfläche relativ größer wird. Mikrite sind somit am besten

löslich. Auch beeinflusst die Textur den Lösungsprozess stark – Homogenität erweist sich als günstiger.

- ◆ *Gefügeporosität*: Sie setzt sich zusammen aus primärer (intragranular), sekundärer (Klüfte, Schichtung) und tertiärer (Wasserleitungen) Porosität. Die Summe dieser drei Teile bestimmt, in welchem Ausmaß ein bestimmtes Gestein wasserdurchlässig und verkarstungsfähig ist.

Klüfte und Schichtflächen fungieren als Ansatzpunkte karstmorphologischer bzw. speläogenetischer Prozesse. Schichtflächen in Karbonaten besitzen die für die Wasserwegigkeit günstige Eigenschaft, über große Bereiche durchgängig zu sein. Die zumeist senkrecht dazu ausgerichteten Klüfte wirken als verbindende Elemente. Dies zusammen ergibt ein gutes, der Entwässerung zur Verfügung stehendes Netz. Je nach ihrer Lichtweite werden sie unter unterschiedlichen Voraussetzungen durchflossen. Kapillar wirkende Trennflächen (>1 mm Lichtweite) können nur unter phreatischen Bedingungen der Wasserwegigkeit dienen. Trennflächen, die eine größere Lichtweite aufweisen, können sowohl unter phreatischen als auch unter vadosen Verhältnissen durchflossen werden.

- ◆ *Mechanische Stärke, Gesteinsfestigkeit*: Besonders mechanisch starke Gesteine – wie die meisten Karbonatgesteine – sind günstig für Verkarstung. (BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007)

### 3.5. Karren

Eine freiliegende Karbonatgesteinsoberfläche verkarstet schnell (innerhalb von Dekaden), es kommt zu Reliefbildung. Viele exponierte Gesteinsoberflächen sind von Bakterien, Pilzen, Algen oder Flechten besiedelt. Durch ihre ätzende Wirkung werden schwächere Körner gelöst, es kommt zur Ausbildung kleiner Mulden. Diese Grübchen können wiederum als Habitat dienen, die besiedelbare Oberfläche wird vergrößert und der Prozess der Verkarstung somit beschleunigt. (SWEETING 1972; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010)

In kühl-feuchten Gebieten wie den Alpen sind vor allem Karren als kleinmaßstäbliche Formen der Korrosion charakteristisch. Bei ihnen handelt es sich um Hohlformen an der Oberfläche und im Untergrund. Unterschieden wird



zwischen Mikrokarren (<1 cm), Karren (1-10 cm) und Karrenfeldern (größere Ansammlung von Karren). Für die differenzierte Ausbildung von Karren erweist sich die lithologische Beschaffenheit als bedeutsam. Die entscheidenden lithologischen Parameter, die bei der Entwicklung von Karren mitspielen sind: chemische Reinheit, Korngröße, textuelle Homogenität (inklusive Poren), Bankungsdicke und Kluftdichte. Viele spezielle Karrenformen entstehen nur dann, wenn das Gestein sehr feinkörnig und homogen ist. Karren entwickeln sich nicht auf instabilen Hängen oder auf Oberflächen, die starkem Frosteinfluss ausgesetzt sind. Auch eine zu hohe Kluftdichte wirkt sich negativ auf ihre Ausbildung aus. (FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010; KEMPE & ROSENDAHL 2008)

Für Entstehung von Karren ist die glaziale Überprägung von großer Bedeutung. In Folge der Abschleifung durch Gletscher entstanden Hänge, die frei von Lockermaterial und Vegetation sind und auf denen die Karrenbildung rasch ansetzen kann. Zwar nimmt in höheren Lagen die Dauer und Intensität organischer Aktivität und damit verbunden der CO<sub>2org.</sub>-Gehalt zwar ab, jedoch kann sich CO<sub>2</sub> im Schnee anreichern. Die Schmelzperioden dauern in höheren Bereichen länger – somit dauern auch die Lösungsperioden länger (BÖGLI 1975; VERESS 2010).

Bei der *genetischen Klassifizierung* der Karren kann man zwischen hydraulisch angelegten und geätzten Formen differenzieren. Dies lässt sich, je nachdem, ob der Fels nackt oder bedeckt war, weiter unterteilen. Des Weiteren spielt eine Rolle, wie es um die Beschaffenheit des gestaltenden Wassers und des Gesteins steht und wie stark der Hang, auf dem sich die Karren befinden, geneigt ist (Abbildung 5).

Bei Karrenerscheinungen, die durch fließendes Wasser gebildet werden kann man zwei Gruppen auseinander halten: Formen, die unter einem durchgängigen, dünnen Wasserfilm entstehen (Mikrorillen, Rillen-, Trittkarren, transversale Karren/ Lösungsrippel) und weiters Formen, die durch Rinnsale gebildet werden (Rinnen-, Wand-, Mäanderkarren). Für durch Lösung entstandene Formen erweist sich lediglich die mechanische Stärke des Gesteins von Bedeutung (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

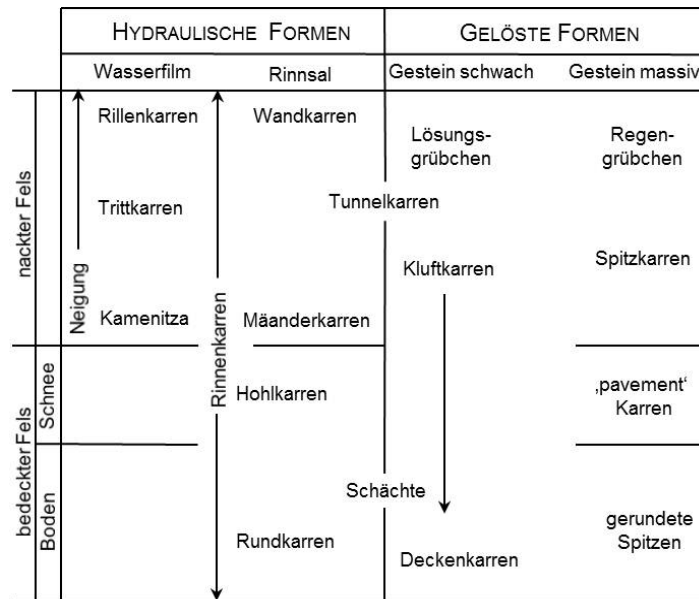


Abbildung 5 – Genetische Klassifizierung der Karren-Erscheinungen; (VERESS 2010; S. 5, mod.)

Es gibt noch verschiedene andere Ansätze zur Klassifizierung vom Karren. Im Folgenden soll die *morphogenetische Betrachtungsweise* zur Unterteilung und Erläuterung der unterschiedlichen Karrenformen dienen.

### 3.5.1. Kreisförmiger Grundriss

- ◆ *Mikrogrübchen und geätzte Oberflächen:* Diese Kleinformen weisen eine Fülle an Variationsmöglichkeiten auf, gemeinsames Charakteristikum ist ein Durchmesser von unter 1 cm.
- ◆ *Lösungsgrübchen:* Sie können einen kreisförmigen, ovalen oder unregelmäßigen Grundriss haben, ihr Boden kann sowohl gerundet als auch keilförmig gestaltet sein. Ihr Durchmesser liegt gewöhnlich bei 1-2 cm. Lösungsgrübchen sind oft bei Klüften lokalisiert und stellen gemeinsam mit Schächten – zu welchen sie Übergänge zeigen können – die häufigste Karrenform dar. Sie treten auf nackten oder (teil-) bewachsenen Felsoberflächen auf und sind vorherrschend, wenn das Gestein sehr heterogen aufgebaut ist.
- ◆ *Napfkarren:* Sie sind den Lösungsgrübchen ähnlich, werden allerdings nach unten hin weiter. Bodenbedeckung spielt bei ihrer Entwicklung eine entscheidende Rolle.

- ◆ *Lösungspfannen/ Kamenitzas*: Auch diese, sich aus Lösungsgrübchen entwickelnde Form, weist einen geschlossenen, kreisförmigen, ovalen oder unregelmäßigen Grundriss auf. Ihr Boden ist üblicherweise eben und horizontal. Ihr Durchmesser liegt zwischen 1 cm und mehreren m, die Korrosion schreitet seitwärts fort. Der flache Boden, welcher selten tiefer als 15 cm ist, entwickelt sich meist durch organische Bedeckung. Häufig weisen Lösungspfannen Überlaufkanäle auf.
- ◆ *Trittkarren*: Zur Entwicklung dieses relativ seltenen Phänomens kommt es, wenn ein ebener, nackter Fels vorliegt und leicht geneigt ist. Sehr feinkörniges, homogenes Gestein ist bevorzugt. Die Rückwand der Trittkarren ist halbkreisförmig und nur wenige cm hoch, ihr Boden flach und sie sind hangabwärts offen. Der Durchmesser beträgt normalerweise 10-30 cm. Sie entwickeln sich rückschreitend und treten in Gruppen auf.

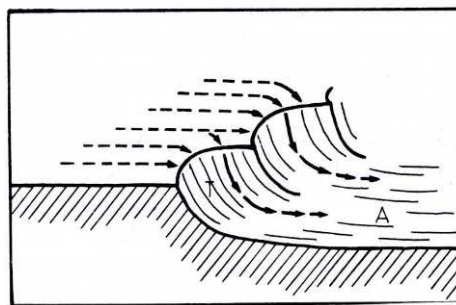


Abbildung 6 – Trittkarren (T) mit Ausgleichsfläche (A); (BÖGLI 1978, S. 56)

- ◆ *Karren-Schächte*: Sie entwickeln sich oft entlang von Klüften, Schichtflächen oder Calcit-Adern und verlaufen vertikal oder geneigt. Größe (cm bis mehrere m lang, bis zu 1 m im Durchmesser) und Form des Querschnitts variieren stark. An ihrem unteren Ende sind sie mit Protohöhlen verbunden.
- ◆ *Regengrübchen*: Dieses Phänomen tritt auf nacktem oder teilweise bedecktem Fels auf. Zwar ist diese Erscheinung selten, doch wenn vorhanden, treten Regengrübchen in einer großen Dichte auf. Sie sind kreisförmig und können mehrere cm tief und weit werden. Vermutlich ist für die Bildung die Präsenz organischer Säuren wichtig (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

### 3.5.2. Lineare, bruchkontrollierte Formen

- ◆ *Mikrorisse*: Sie orientieren sich an Mikroklüften und keilen in die Tiefe hin aus. Ihre Länge erreicht bis zu mehrere cm. Allerdings sind Mikrorisse für gewöhnlich nicht mehr als 1 cm tief.
- ◆ *Splitkarren*: Sie gehen aus Mikrorissen hervor, die durch eindringendes Sickerwasser erweitert werden. Ihre Länge variiert zwischen cm und m, sie sind aber nur wenige cm tief. In der Tiefe keilen sie ebenfalls aus. Sie können einzeln stehen, an ihren Enden in andere Karrenformen übergehen oder mit anderen Splitkarren verschneiden.
- ◆ *Kluftkarren*: Dies sind größere Lösungsspalten, die sich entlang von Brüchen und Störungen entwickeln. Daher schließen sie oft einen Winkel von 60°, 90° oder 120° ein bzw. bilden stern- oder netzförmige Muster. Sie können mit oder ohne Boden- oder Schneebedeckung entstehen und eine Länge von bis zu 10 m erreichen. In geschichteten Gesteinen reichen sie oft bis zur nächsten penetrierbaren Schichtfläche. Durch Kluftkarren isolierte Blöcke bezeichnet man als Flachkarren. Kluftkarren fungieren als Hauptabflüsse in den tieferen Epikarst, sie wirken sich maßgeblich auf die Gestaltung des oberflächlichen Abflusses aus.
- ◆ *Schichtfugenkarren*: Dieser Typ entwickelt sich wenn Sickerwasser direkt oder indirekt (z.B.: über Klüfte oder Risse) in Schichtfugen eindringt und diese erweitert. Beißen relativ seicht geneigte Schichtflächen an steilen Hängen aus, entwickeln sich Klussen, die einige cm hoch und 10er m lang sein können (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

### 3.5.3. Lineare, hydrodynamische Formen

- ◆ *Mikrorillen*: Bei ihnen handelt es sich um rund 1 mm weite, gerundete, dicht stehende Rillen, die auf geneigten Oberflächen auftreten. Das Fließverhalten des Wassers wird durch kapillare, gravitative Kräfte oder Wind bzw. durch Kombinationen dieser beeinflusst. In ihrem Verlauf können Mikrorillen gekurvt (auf flachen Oberflächen) oder gerade (auf steileren Oberflächen) sein.

- ◆ *Transversale Karren/ Lösungsrippel*: Sie entstehen auf steilen Flanken und sind parallel zueinander und normal zur Fließrichtung orientiert. Lösungsrippel bilden sich auf steilen Hängen. Ihre Entstehung ist vergleichbar mit der transversaler Sandrippel.
- ◆ *Rillenkarren*: Sie sind als direktes Produkt von als Wasserfilm abfließendem Regenwasser zu sehen, ihre Entstehung beginnt ganz oben an einer Gesteinskante. Sie keilen hangabwärts aus, da sich das ablaufende Wasser rasch sättigt. Rillenkarren stehen dicht gepackt, sind üblicherweise 1-3 cm breit und bis zu mehreren m lang. Ihre Länge nimmt mit einer Steigerung der Parameter Niederschlag, Temperatur und Gefälle zu, allerdings entstehen sie nicht auf zu flachen oder zu steilen Flanken. Ihr Querschnitt ist V- (wenig Abfluss) oder U-förmig (viel Abfluss). Auch die Entwicklung dieser Form wird durch feinkörnige, homogene Karbonate begünstigt. Eine andere Bezeichnung ist Firstkarren.

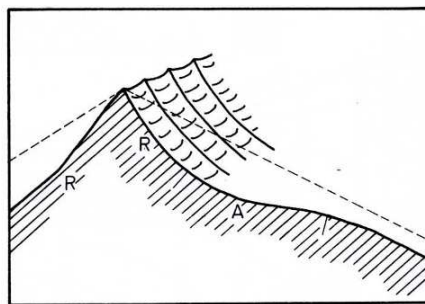


Abbildung 7 – Rillenkarren (R) mit Ausgleichsfläche (A); (BÖGLI 1978, S. 56)

- ◆ *Rinnenkarren*: Diese Form entwickelt sich auf nacktem Fels durch Lösung – abfließendes Wasser wird zu Strömen zusammengefasst. Rinnenkarren treten bei einer Hangneigung von 30-60° auf. Ihre Ränder erweisen sich als scharfkantig, der Boden ist flach oder gerundet.

Rillen- und Rinnenkarren verlaufen auf flachen Hängen gewunden und auf steileren Hängen zunehmend gerade. Beide Formen können große Flächen bedecken.

- ◆ *Wandkarren*: Diese Erscheinungen mit halbrundem Querschnitt treten parallel zueinander auf sehr steilen bis vertikalen Wänden (60-90°) auf. Jede einzelne Wandkarre wird separat punktförmig gespeist. Der Speisepunkt weist oftmals organische Bedeckung auf. Die Dimensionen von Wandkarren sind abhängig

von Menge und Azidität des abfließenden Wassers. Perennierende Schneereste sind für die Ausbildung großer Wandkarren bedeutsam.

- ◆ *Mäanderkarren*: Sie entstehen, wenn Wasser langsam aus einem Reservoir fließt und eine nicht zu stark geneigte Felsoberfläche hinunterläuft. Richtige Mäander zeigen einen asymmetrischen Querschnitt, es bilden sich Gleit- und Prallhang (Überhänge möglich) aus. Laut HUTCHINSON (1996) tritt mäandrieren in allen Rinnenkarren auf, wenn die Hangneigung 7-14° beträgt. Das Wasser muss turbulent fließen.
- ◆ *Rundkarren*: Dieser Typ entwickelt sich unter Vegetations- oder Bodenbedeckung. Da das Wasser im Boden nicht frei fließen kann, kommt es zur Ausbildung gerundeter Formen – Spitzen und Kanten werden weggelöst. Im Gegensatz zu Rinnenkarren können Rundkarren auf bis zu fast vertikalen Hängen entstehen. Bei Freilegung entwickeln sie sich zu scharfen Rinnenkarren.

Sowohl Rinnen- als auch Rundkarren werden nach unten hin weiter und tiefer, da die ablaufende Wassermenge nach unten hin stets zunimmt. An ihren Böden kann sich Bodenmaterial oder Moos sammeln, was zur Ausbildung von überhängenden Wänden führen kann. In diesem Fall werden sie mit dem Terminus *Hohlkarren* bezeichnet (HASERODT 1965; SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

#### 3.5.4. *Mehrfachformen*

Bedingt durch komplexe und zusammengesetzte Bildungsmechanismen können Mehrfachformen entstehen. So können Lösungskanäle eine weitere Differenzierung durch Grübchen, Pfannen, Splitkarren usw. erfahren. Andererseits können kleinere Formen auf größeren auftreten (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

#### 3.5.5. *Karrenvergesellschaftungen*

Dies ist ein genereller Term für exponierte Karren, die einen größeren Bereich prägend gestalten. Ein Terminus ist ‚Karrenfelder‘. Dieser beschreibt die Summe der (halb-) aufgeschlossenen Karren in einem Gebiet. Karrenfelder können wenige

hm<sup>2</sup> bis mehrere 100 km<sup>2</sup> an Fläche ausmachen. Die Ausgestaltung, auftretenden Formen und speziellen Bezeichnungen sind mannigfaltig. Häufig handelt es sich um Kluffkarren, die mit anderen Karrenformen kombiniert auftreten (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

### 3.5.6. Weitere Formen

- ◆ *Wurzelkarren*: Wurzelkarren können sich bei kompakter Bodenbedeckung ausbilden. Über Klüfte o.ä. können Wurzeln in den Gesteinskörper eindringen und das Gestein anätzen. Die entstehenden Wurzelkarren sind schmal und flach.
- ◆ *Spitzkarren*: Sie stellen ein Überbleibsel vorhergehender Karstformen dar. Durch Bodenbedeckung werden sie zugerundet. Spitzkarren können mehrere dm hoch werden. Im Falle der ‚Zingis‘ auf Madagaskar sogar noch höher (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; VERESS 2010).

### 3.6. Dolinen

Der sich aus dem slawischen Wort ‚dolina‘ (Tal) ableitende Term Doline bezeichnet trichterförmige, geschlossene Hohlform mit unterirdischem Abfluss. Sie sind die wohl typischste und weitverbreitetste Oberflächenform in Karstlandschaften. Sie zeichnen sich durch einen runden bis subrunden Grundriss aus und können Durchmesser im Bereich von wenigen m bis hin zu 1 km erreichen. Der Durchmesser ist stets größer als die Tiefe (bis zu 100 m). Sie treten einzeln, in Feldern oder kettenförmig auf. Die Prozesse, die Dolinen bilden, sind vielgestaltig: Lösung, Kollaps, Subsidenz und Suffosion. Dolinen entwickeln sich nicht, wenn der vertikale hydraulische Durchfluss zu groß, die vertikale Permeabilität zu homogen oder die Hangneigung steiler ist als 20°, da in diesem Fall die Entwässerung oberirdisch abläuft (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007; KEMPE & ROSENDAHL 2008).

- ◆ *Lösungsdolinen*: Für die Entwicklung dieses Dolinentyps ist die Fokussierung von Wasserfluss und Korrosion entscheidend. Das wiederum bedingt das Vorhandensein von Fissuren o.ä., die durch Lösung erweitert und somit der Wasserwegigkeit dienlich werden. Die sich entwickelnden Abflussröhren sind

vorzugsweise vertikal. Unterirdische Fließnetzwerke bilden sich aus – die durch Korrosion verlorene Masse wird abgeführt. Ist die Menge des als Niederschlag ins System gebrachten Inputs größer, als abgeführt werden kann, wird Wasser vorübergehend zurückgehalten. Eine solch zurückgehaltene Wassermasse – ob äußerlich sichtbar oder unsichtbar – bezeichnet man als getragenen Aquifer. Dieser entwässert radial zu einem Zentrum hin – mit der Zeit wird die Menge an fokussiertem Wasser immer größer, wodurch zunehmend mehr Lösung stattfindet. Zusätzlich bilden sich in den Depressionen oft dicke Böden, die infiltrierende Wässer noch aggressiver machen. Außerdem kann Schnee länger in den Senken verweilen. Das Erweitern der Abflusskanäle erlaubt eine höhere Durchflussgeschwindigkeit des Wassers, wodurch Boden und Steine mittransportiert werden können, sich dadurch also auch noch eine erosive Komponente hinzugesellt. Der Prozess verstärkt sich also selbst (Abbildung 8, A).

- ◆ *Suffosionsdolinen*: Dieser Typ stellt gewissermaßen ein Mittelding aus Lösungs- und Subsidenzdoline dar. Wird der Feinanteil von Lockersedimenten ausgeschwemmt und über Klüfte oder Lösungskanäle in den Festgesteinsuntergrund abtransportiert, spricht man von Suffosion. Die sich bildende Depression wird als Suffosionsdoline bezeichnet. Durch diesen Prozess können unzählige kleine Dolinen auf engem Raum entstehen (Abbildung 8, B).
- ◆ *Subsidenzdolinen*: Deformation in inkompetenten Gesteinen äußert sich als Subsidenz. Überliegende Schichten sacken in die entstandene Depression nach, eine Subsidenzdoline entsteht (Abbildung 8, C).
- ◆ *Kollapsdolinen*: Kollaps wird durch Bruchversagen in kompetenten Gesteinen hervorgerufen (siehe 3.2.3). Der entstehende Dolinentyp hat meist einen kleineren Grundriss und steilere Flanken als Lösungsdolinen. Vom Kollaps kann unterliegendes oder überdeckendes Festgestein als auch Lockergestein (unkonsolidierte Sedimente) betroffen sein. Der Kollaps ereignet sich zumeist abrupt (Abbildung 8, D; SWEETING 1972; BÖGLI 1980; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007).



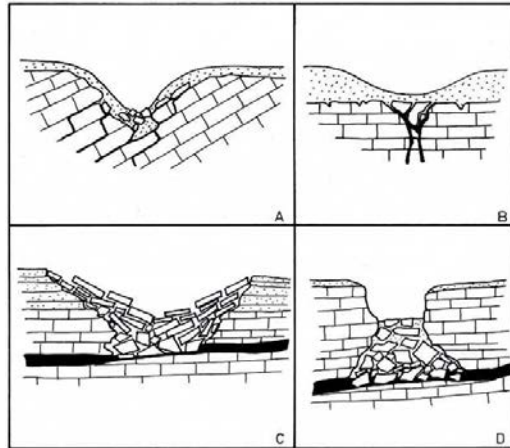


Abbildung 8 – Lösungsdoline (A), Suffosionsdoline (B), Subsidenzdoline (C), Kollapsdoline (D);  
(BÖGLI 1978, S. 63)

### 3.7. Höhenlagen des Vorkommens von Karstformen

Wie bereits in 3.2 erwähnt, ist die Ausbildung von Verkarstung in gewissem Maße auch von der Meereshöhe abhängig. Gewisse karstmorphologische Erscheinungen treten bevorzugt in bestimmten Höhenlagen auf, andere wiederum bilden sich höhenunabhängig aus. Nachstehende Graphik (Abbildung 9) soll einige wesentliche Höhenverteilungen von häufigen Karstbildungen aufzeigen.

So sind hydrodynamische Formen, die durch kanalisiertem Wasserfluss entstanden sind (Rinnen-, Rund-, Hohlkarren und Karren an Wasseraustritten) als höhendurchgängig zu betrachten. Auch die bruchkontrollierten Kluftkarren sind höhenunabhängig vertreten und können sogar über der Schneegrenze zu finden sein. Größtenteils über der Waldgrenze sind die häufigen Rillenkarren anzutreffen, eine noch höher gelegene Karrenform sind die Trittkarren.

Schächte und Dolinen erfassen jeweils ein sehr großes Höhenspektrum, übersteigen jedoch nur in Ausnahmefällen die permanente Schneegrenze (HASERODT 1965).

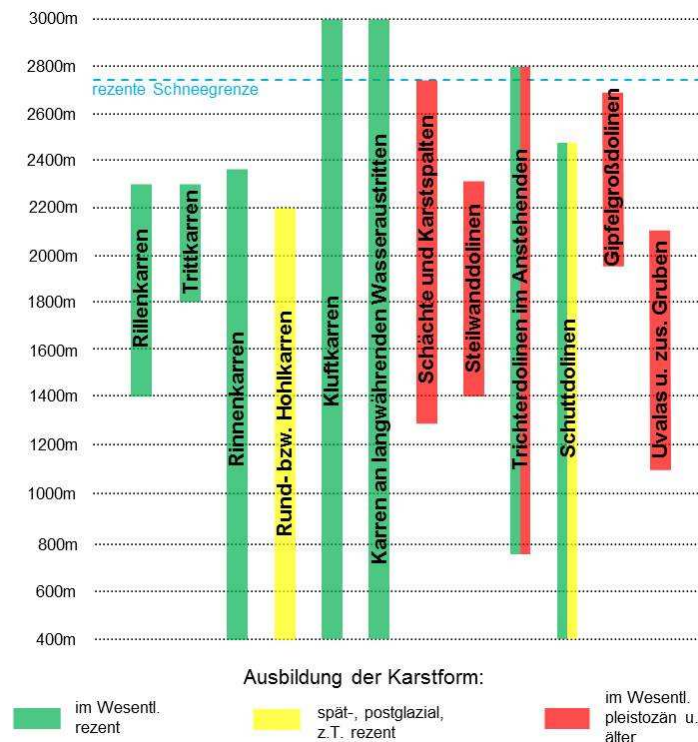


Abbildung 9 – Höhegebundene und höhenunabhängige Karstformen und Zeitraum ihrer hauptsächlich Ausbildung (nach HASERODT 1965, S. 95)

#### 4. Höhlen

Speläologie ist der Fachterminus für Höhlenkunde bzw. Höhlenforschung. Es handelt sich hierbei um eine interdisziplinäre Wissenschaft, die folgende Teilbereich vereint: Geologie, Hydrologie, Geographie, Biologie, Archäologie, Paläontologie und Klimatologie. Forschungen vielfältigster Natur haben zum Ziel, das System Höhle – jedes ist individuell – besser zu verstehen, bedeutende Prozesse zu erkennen und somit auch, für ihren nachhaltigen Schutz eintreten zu können. Die Untersuchungen dieser Wissenschaft umfassen sowohl Höhlen, als auch damit in Zusammenhang stehende Karsterscheinungen. Im Folgenden Kapitel soll auf Höhlen im Speziellen eingegangen werden.

##### 4.1. Allgemein

Durch Lösung entstandene Höhlensysteme gehören zu den kompliziertesten Landformen. Affektiert werden sie durch hydrochemische Faktoren, welche durch petrologische, tektonische, klimatische, biotische und pedologische Aspekte und Vorfluteränderungen, generiert werden.

Für die Entwicklung eines Höhlensystems – der Speläogenese – ist das Entstehen eines Netzes an verbundenen Röhren (conduits), welches sich durch Lösung des Festgesteins etabliert, ausschlaggebend. Das Muster dieser Röhren bestimmt im weiteren Verlauf das Verhalten des Karstaquifers. Generell unterscheidet sich das Verhalten eines (gut ausgebildeten) Karstaquifers maßgeblich von dem der Matrix- und Bruch-Typ-Aquifer (DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007).

#### 4.2. Speläogenese

Unter Speläogenese versteht man die Summe aller Prozesse, die die Entstehung und Entwicklung eines natürlichen unterirdischen Hohlraumes respektive einer Höhle bewirken. Die Prozesse sind eine Kombination aus Korrosion, Erosion und Inkasion (3.2). Die Entwicklung wird zudem stark durch lithologische und tektonische Einflussgrößen und den (mikro-) klimatischen Bedingungen gesteuert. Daraus resultiert eine enorme morphologische und hydrographische Vielfalt der unterirdischen Systeme (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988).

Als Höhle im eigentlichen Sinne bezeichnet man einen natürlichen Hohlraum, der groß genug ist, dass ein Mensch in ihn eindringen kann und der partiell oder vollkommen von Sedimenten, Wasser und/ oder Eis (4.4.3) erfüllt sein kann. In Bezug auf Größe und Komplexität lässt sich folgende Differenzierung vornehmen:

- ◆ Als *isolierte Höhlen* bezeichnet man Hohlräume, welche nicht mit Wasser-Input- oder Wasser-Output-Punkten in Verbindung stehen.
- ◆ *Protohöhlen* stellen das Initialstadium der Höhlensystembildung dar. Dem hydraulischen Gradienten folgende ‚primary tubes‘ werden herauspräpariert. Protohöhlen können zwar bereits eine durchgehende Verbindung zwischen Input und Output aufweisen, besitzen allerdings noch keine Höhlendimensionen. Sie entwickeln sich bevorzugt an Verschneidungen zwischen Schichtflächen und Klüften. Natürlich können die primary tubes bzw. conduits in ihrer Aktivität variieren (z.B.: schwankendes Wasserangebot) oder auch völlig stagnieren (z.B.: Plombierung mit Ton).
- ◆ Ein *durchgängiges Höhlensystem* verbindet In- und Output vollständig und besitzt Höhlendimensionen (in variierendem Ausmaß). Die Entwicklung wird durch das Conduit-System mit dem kürzesten Weg zur Quelle kontrolliert.

Betrachtet man die Entwicklung eines Hohlraums, kann man folgende Stadien unterscheiden (siehe auch Abbildung 10):

- ◆ *Vorphase*: Alle Hohlräume sind wassererfüllt, der Zustand bleibt unverändert.
- ◆ *Initialstadium*: Die Lage des Vorfluters ändert sich, sodass ein Druckgefälle entsteht. Durch die Wasserbewegung kommt es zur Fugenerweiterung. Diese Phase dauert sehr lange an.
- ◆ *Jugendstadium*: Die Hohlräume erweitern sich zu Höhlengröße. Das Wasser bewegt sich schneller, Erosion kommt als formende Komponente hinzu.
- ◆ *Reifestadium*: Die Querschnitte nehmen zu, bis Inkasion einsetzt. Phreatische oder vadose Bedingungen können gegeben sein.
- ◆ *Altersstadium*: Inkasion tritt allgemein auf, meist herrschen vadose Bedingungen.
- ◆ *Greisenalter*: Der Hohlraum zerfällt vollkommen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Wie in 3.4 erläutert, sind Klüfte und Schichtflächen für Verkarstung bzw. Ausbildung unterirdischer Hohlräume von größter Bedeutung. Karsthydrographische Systeme sind – zumindest zu Beginn – sehr komplex. Davon abhängig, wie die Gestalt des Initialnetzes ausgebildet ist, werden die Hohlräume in ihrer Entwicklung zu einfachen Gängen, Gangnetzen oder auch Labyrinthen geformt. Da Wasser stets den kürzesten Weg sucht, werden einige Einzelstrecken ausgeschieden, andere Bereiche des komplexen Initialnetzes können inaktiv werden und vollkommen stagnieren. Weiters ziehen Änderungen des Vorfluterniveaus sowie tektonische Beanspruchung eine Umgestaltung des Karstwasserniveaus mit sich, was sich beträchtlich auf die Ausbildung unterirdischer Hohlräume auswirkt. Strukturelle Effekte sind bedeutend für die Entwicklung des Höhlenlängsschnittes (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

#### 4.3. Speläomorphologie

Diese befasst sich mit der Beschreibung und Interpretation der durch Erosion, Korrosion und Inkasion (3.2) entstandenen Formen in einer Höhle. Die Formen lassen sich anhand ihrer Dimensionen in Klein- und Großformen einteilen.

##### 4.3.1. *Kleinformen*

Meist hat nur ein formender Faktor zu ihrer Entstehung beigetragen. Ein großer Formenreichtum entsteht vor allem durch Korrosion. Die resultierenden Formen finden sich überwiegend an Decken und Wänden. Durch Erosion entstandene Gebilde sind meist an unteren Wandteilen und der Gangsohle anzutreffen, können allerdings leicht durch Sedimente verdeckt werden.

- ◆ *Höhlenkarren*: Ein Großteil der in Punkt 3.5 angesprochenen Formen kann sich auch in Höhlen bilden. Als besondere Bildung seien die *Kondensationsgrübchen* genannt, die eine weit verbreitete Kleinform darstellen. Die vorwiegend Fingerabdruck-große Form entsteht durch sich an Decken oder an Überhängen sammelndes Kondenswasser, welches ein hohes Lösungspotential besitzt (3.2.1). Durch rasche Kondensation können sich tiefe Grübchen ausbilden. Sie sind durch scharfe Grate und Spitzen begrenzt. Fließt das Kondenswasser ab, bilden sich *Höhlenrillen*. Messerscharfe Formen können entstehen, wenn Schnee in Schächte eingeweht wird. Sie werden als *Höhlenspitzkarren* bezeichnet. Bildet sich durch Lösung ein Zapfen aus anstehendem Gestein an der Höhlendecke, spricht man von einem *Hängezapfen*.
- ◆ *Kolke*: Im phreatischen Stadium einer Höhle fungieren Korrosion und/ oder Erosion als formende Kraft. Demnach kann man zwischen Korrosions- und Erosionskolken unterscheiden. *Korrosionskolke* sind verbreitet an Decken und Wänden von Höhlen zu finden – demnach einteilbar in Decken- und Wandkolke. Mischungskorrosion kann eine beträchtliche Rolle spielen. Für die Bildung von *Erosionskolken* sind stationäre Wasserwirbel mit Sand- oder Kiesfracht verantwortlich. Sehr häufig sind in den Erosionskolken Steine gefangen, die durch den Wasserwirbel rotieren und so die mechanische Abtragung von Material verstärken.

- ◆ *Fließ- und Deckenfacetten*: Auch bei diesen morphologischen Erscheinungen sind Korrosion und Erosion als gestaltende Kräfte aktiv. Wie sich bereits aus der Namensgebung ableiten lässt, bilden sich diese Formen durch fließendes Wasser. Durch die Orientierung der Formen an Decke, Wand oder Sohle der Höhle kann sich die Fließrichtung des Wassers bestimmen lassen. Je nach Fließgeschwindigkeit kommt es zu kleineren oder größeren Verwirbelungen. Demnach sind die entstehenden Formen verschieden groß.
- ◆ *Lösungstaschen*: Diese im Grundriss runden oder ausgelängten Formen mit domförmiger Decke folgen meist Bruchlinien im Gestein. Viele Lösungstaschen sind multicuspat. Ihre Herkunft ist generell als phreatisch anzusehen – sie entstehen dort, wo zelluläre Zirkulation in quasi-statischem Gewässer gegeben ist. Mischungskorrosion und auch Kondensationskorrosion können von Belangen sein.
- ◆ *Lösungsfacetten*: Die löffelförmigen, sich häufig überlappenden Aushöhlungen (scallops) entstehen durch fließendes Wasser. Sie sind umso kleiner, je schneller der Wasserfluss ist. Sie sind in Fließrichtung ausgelängt und stark asymmetrisch. Ihre durchschnittliche Länge liegt zwischen 0,5 und 20 cm. Für die Entstehung der Facetten ist Homogenität der Korngröße des Gesteins entscheidend (BÖGLI 1978; ARMSTRONG et al. 2004; FORD & WILLIAMS 2007; KEMPE & ROSENDAHL 2008).

#### 4.3.2. Großformen

- ◆ *Gänge*: Höhlenstrecken, die (sub-) horizontal bis mäßig steil verlaufen, bezeichnet man als Gänge. Sie orientieren sich an Schichtflächen oder Klüften. Die Form ihres Querschnitts wird dadurch bestimmt, welche Prozesse unter welchen Grundwasserbedingungen für die Bildung verantwortlich sind, wie die Trennflächen orientiert sind (horizontal bis senkrecht) und ob die Bildung ein- oder mehrphasig verläuft. Umriss und Größe (bis zum Versturz) sind keine Grenzen gesetzt. Frühere Formen können durch spätere Prozesse zerstört werden. Man unterscheidet zwischen Ellipsengängen, Wirbelkanalgängen, Schluchtgängen, Rechteckgängen und Kluftgängen (Abbildung 10).

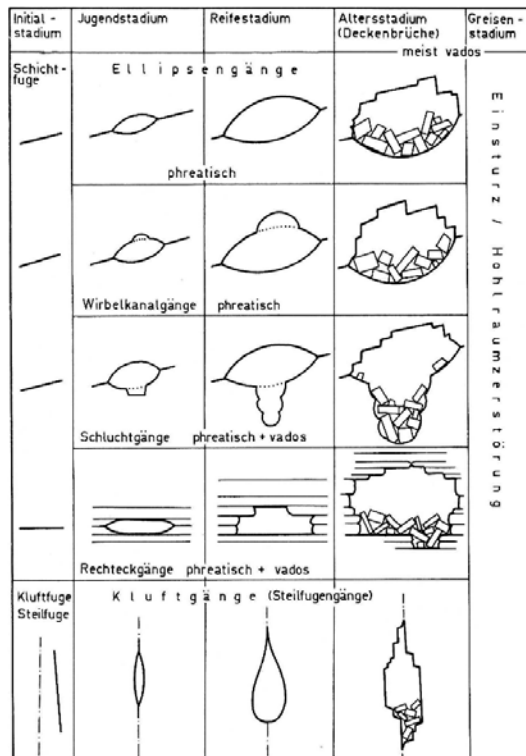


Abbildung 10 – Schema der Gangentwicklung; (BÖGLI 1978, S. 219)

- ◆ *Dom/ Glockenhöhle, Halle*: Ein großer Raum mit einer gewölbten Decke wird als Dom bezeichnet. Ist sein Querschnitt glockenförmig, wird die Bezeichnung Glockenhöhle benutzt. Eine Halle beschreibt ebenfalls einen großen Höhlenraum, allerdings mit flach verlaufender Decke. Dome und Glockenhöhlen entstehen bevorzugt in dünnbankigem, tektonisch stärker beanspruchtem Gestein und weisen meist viel Blockschutt auf. Nach oben hin setzen sie sich oft als Schacht fort. Hallen bilden sich in dickbankigem, tektonisch schwächer beanspruchtem Gestein.
- ◆ *Schächte*: Als Schächte bezeichnet man Höhlen mit stark abwärts gerichteter Wasserbewegung. Morphologisch unterscheidbar sind vertikale Schächte (65-90° geneigt), gestufte Schächte (von kürzeren Gangstrecken unterbrochen) und Glockenschächte (sich nach unten glockenförmig erweiternd). Aus genetischer Sicht lassen sich tektonische Schächte (Kluft gebunden), Einsturzschächte, Schluckschächte (einsickerndes Wasser), Quellschächte (aufquellendes Wasser), Piezometerschächte (Bewegungen des Wasserspiegels) und hydrothermal entstandene Schächte differenzieren

(SWEETING 1972; BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007; KEMPE & ROSENDAHL 2008).

#### 4.4. Höhlensedimente

Höhlen sind große Sedimentfallen, die Sedimente verschiedenartiger Natur beherbergen können. So finden sich neben klastischen auch organische und chemische Sedimente. Die Ablagerungsraten schwanken sehr stark. Aufgrund der Topologie eines Höhlenraumes erschließt sich, dass die Ablagerungen vertikal und lateral variieren können. Das Gesetz der Überlagerung von Sedimenten (jung auf alt) kann durch Prozesse wie z.B.: Inkasion verletzt werden. Höhlensedimente können durch vielerlei physikalische Prozesse beansprucht werden (mechanische Belastung, plötzliches Benetzen, Austrocknen). Bioturbation durch Kleinorganismen als auch durch Säugetiere stellt vor allem im Eingangsbereich ein wichtiges Element dar. Chemische Verwitterung verläuft langsamer als an der Erdoberfläche – chemische Fällung (v.a. Calcit) ist bedeutungsvoller (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

##### 4.4.1. *Allgemeines*

- ◆ *Klastische Sedimente*: In Höhlen erweisen sich Sedimente lokaler Einstürze und fluviatil transportierte Sedimente als dominierend. Das gesamte Korngrößenspektrum kann vertreten sein. Anhand der Korngrößenverteilungen und der Lage der Sedimente können Aussagen über die Fließverhältnisse in der Höhle getroffen werden. Zudem geben Klastika Auskunft über den Beginn der Sedimentation in einer Höhle und sind somit bei der Interpretation ihrer Entwicklungsgeschichte hilfreich. Generell kann man zwischen grob- und feinklastischen Sedimenten unterscheiden.
- ◆ *Grobklastische Sedimente*: Es kann sich hierbei um allochthone und autochthone (z.B.: Inkasionsschutt) Sedimente handeln. Der Transport erfolgt rollend und rutschend, Zurundung und Abreibung erfolgt in Höhlen recht schnell. Schutt, der durch Inkasion entstand, erweist sich als unsortiert, meist matrixgestützt und mit einem hohen organischen Gehalt.



- ◆ *Feinklastische Sedimente:* Höhlenlehm stellt eine sehr häufige Ablagerung in unterirdischen Hohlräumen dar. Oft sind Wechsellagerungen aus Silt und Ton vorzufinden. Da Silt und Ton in Suspension transportiert werden, sind Ablagerungen auch an Wänden und Decken zu finden, die meiste Akkumulation erfolgt jedoch am Boden. In Gebieten, in welchen die chemische Verwitterung von Gesteinen an der Oberfläche begünstigt ist, kommt es zu besonders viel Einschwemmung von feinem Material. Wie bereits darauf hingewiesen, erweisen sich vor allem sehr reine Kalke als gut verkarstungsfähig. Sie enthalten meist weniger als 5% lehmig-tonige Verunreinigungen – ein Großteil des Höhlenlehms muss daher aus allochthonen Komponenten bestehen. Die Herkunft der Feinsedimente ist verschieden – erodierte Böden, aufgearbeitete fluviatile und lakustrine Sedimente, äolischer Staub, Tephra und natürlich verwittertes Gestein können die Komponenten darstellen. Eine Mischung aus allochthonen und autochthonen Sedimenten bezeichnet man als Höhlenerde.
- ◆ *Organische Sedimente:* Sie bilden sich aus den Überresten von Pflanzen oder Tieren. Diese können vormals in der Höhle gelebt haben oder nach ihrem Ableben in diese eingeschwemmt worden sein.
- ◆ *Chemische Sedimente:* Sie bilden sich durch Fällung aus übersättigten Lösungen. Die ausgefällten Minerale (Sekundärminerale) können den Karbonaten (Calcit, Aragonit), Sulfaten (Gips) oder Halogeniden (Halit) zugehörig sein (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

#### 4.4.2. Speläotheme

Alle sekundären Mineralien in einer Höhle werden als Höhlenmineralien oder Speläotheme bezeichnet. In Karsthöhlen haben vor allem karbonatische Sekundärmineralen eine besondere Stellung. Sie werden nach folgender Reaktion gefällt:



Die Ausscheidung von Karbonaten erfolgt durch Reaktionen an der Grenzfläche 'flüssig-fest' im System  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$ . Änderungen des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks stellen die wichtigste Ursache für eine Störung des Gleichgewichts und daraus

resultierend Ausfällung (oder Korrosion, 3.2.1) dar (BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007; KEMPE & ROSENDAHL 2008).

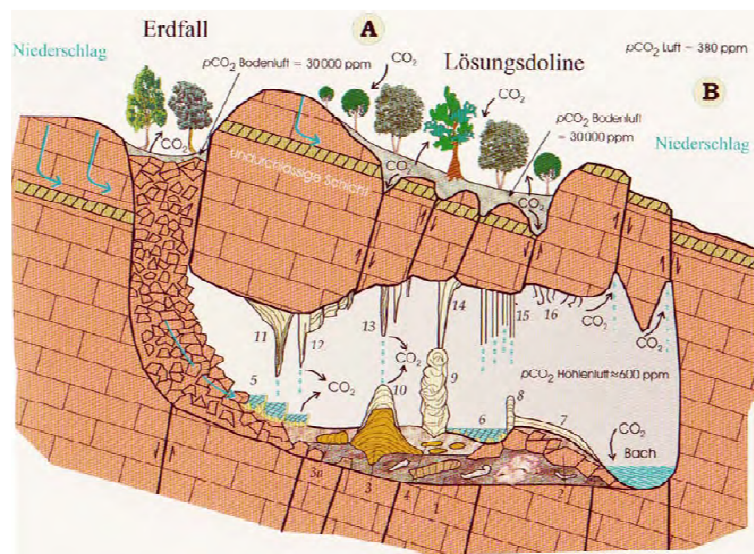


Abbildung 11 – Sinterentstehung, Sinterarten, CO<sub>2</sub>-Druckverteilung (KEMPE & ROSENDAHL 2008, S. 79)

Reine und einschlussfreie Calcite und Aragonite sind farblos und durchscheinend. Durch Flüssigkeitseinschlüsse werden sie weiß gefärbt und opak. Durch eingespülten Schlamm, der organische Säuren enthält, können Gelb-, Rot- und Brauntöne unterschiedlicher Intensität erzielt werden. Aber auch Ionen der Übergangsmetalle (z.B.: Fe<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>,) haben färbende Wirkung. Die Parameter, die die Bildungsrate von Calcit-Speläothemen beeinflussen sind sehr komplex und unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Kalksinter stellen sehr vielgestaltige Bildungen dar. Sie können durch Tropfwasser (Stalaktiten, Stalagmiten, Sinterfahnen und –vorhänge, Tropfsteinsäule), Fließwasser (Sinterdecken, Sinterbecken), kapillare Kräfte (Exzentriker, Knöpfchensinter), an und unter der Wasseroberfläche (Ablagerungen in einem Becken, Höhlenperlen) sowie unter mikrobieller Beteiligung (Bergmilch) entstehen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Wie Speläotheme in einer Höhle verteilt sind, hängt von Bruchverteilung, Epikarst, Umweltbedingungen und Mikroklima (insbesondere CO<sub>2</sub>-Partialdruck) ab. Gibt es in einer Höhle keinerlei Speläotheme, kann dies vier Gründe als Ursache haben.

- Die Höhle befindet sich in einem erosionalen Stadium.

- Im Boden befindet sich unzureichend  $\text{CO}_2$ , sodass infiltrierende Gewässer im Vergleich zur Höhlenluft nicht daran übersättigt sein können. Dieser Fall trifft auf viele alpine Höhlen zu.
- Über der Höhle befindet sich ein nicht-karbonatisches Gestein, welches die Infiltration meteorischer Wässer unterbindet.
- Es besteht keine hydraulische Verbindung zwischen dem Epikarst und der Höhle bzw. die Verbindung wurde unterbrochen (FORD & WILLIAMS 2007).

### *Bildung durch Tropfwasser*

- ◆ *Stalaktiten*: Wasser tritt über Fugen im Gestein aus. Wo das Wasser frei abtropfen kann, bildet sich ein Proto-Stalaktit. Liegt die Abtropfstelle nicht auf einer Fuge, entsteht ein so genannter Typ-1-Stalaktit. Er erweist sich im Querschnitt als massiv. Setzt der sich bildende Stalaktit an einer Fuge an, bildet sich ein 2-3 mm breiter Zentralkanal aus – man spricht in diesem Fall von einem Typ-2-Stalaktit (Abbildung 12). Als Ausgangsform wächst zunächst ein Sinterröhrchen – oder Strohhalm-/ Makkaroni-Stalaktit – heran. Calcit-Kristalle umschließen den Wasserspeisungskanal. Im Röhrchen selber kann kein  $\text{CO}_2$  abgegeben werden und damit auch kein  $\text{CaCO}_3$  gefällt werden. Am Tropfenrand bzw. am unteren Ende des Röhrchens erfolgt durch Übersättigung eine kranzförmige Ausfällung von  $\text{CaCO}_3$ .

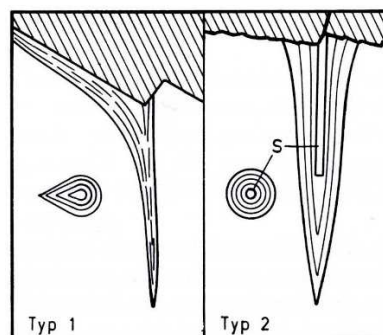


Abbildung 12 – Typ-1 und Typ-2-Stalaktiten; Längs- und Querschnitt; (BÖGLI 1980, S. 193)

Fließt Wasser auch über die Außenseite des Röhrchens, lagert sich  $\text{CaCO}_3$  auf dieser ab. Die Kalkausscheidung nimmt nach unten hin exponentiell ab – daraus erschließt sich die typische nach unten spitze konische Form. Der zentrale Förderkanal kann überwuchert und dadurch inaktiv werden, was

wiederum zu einem Typ-1-Stalaktit führt. Andererseits kann der Förderkanal blockiert werden, wodurch das Wasser gezwungen ist, durch die Röhrenwand durchzusickern. Dadurch nimmt die Wandstärke zu und es entsteht ebenfalls eine Kegelform.

Die Sinterröhren haben einen Durchmesser von etwa 5 mm. Sie können eine Länge von mehreren m erreichen, ehe sie unter ihrem Eigengewicht zusammenbrechen. Die Bildung wird durch geringe Abtropffrequenz begünstigt, da in diesem Fall genügend Zeit für die Wanderung der überschüssigen Ionen zu den Kristallisationskeimen zur Verfügung steht.

Die mögliche Größe eines Stalaktiten ist abhängig von der Stärke seiner Befestigung am Dach, der mechanischen Stärke des Dachfelsens und den Dimensionen der Höhle. Allerdings überschreiten sie nur selten eine Länge von 10 m und einen Durchmesser von 2 m.

- ◆ *Sinterfahnen und -vorhänge*: Diese bilden sich aus ablaufenden Tropfen an geneigten Wänden und überhängenden Abschnitten. Die Ablagerung erfolgt entlang der Fließstrecken. Zunächst bildet sich eine Wandsinterleiste, diese entwickelt sich zu Sinterfahnen oder –vorhängen weiter (Abbildung 13). Diese oft gebogenen Formen können mehrere m lang und breit sein, wobei sie in ihrer Dicke lediglich zwischen 0,25 cm und 1 cm variieren. Daher erweisen sie sich meist als durchscheinend. Je nach Abrinmuster ergibt sich auf ihrer Oberfläche eine verschiedengestaltige Bänderung. Eine Verunreinigung des Wassers kann Streifung mit sich bringen. Sinterdecken können an einem Überhang zu Sinterfahnen werden, welche sich abermals an ihrem unteren Ende zu einem Stalaktiten zusammenschließen können.

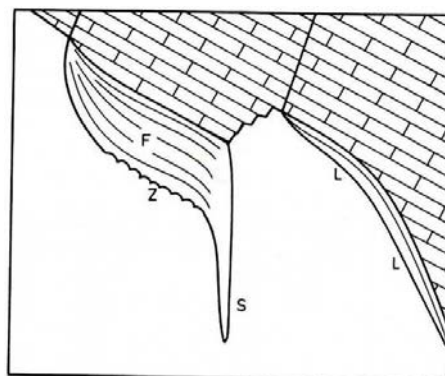


Abbildung 13 – Sinterfahne (F); Sägezahnsinter (Z), Typ-1-Stalaktit (S), Sinterleiste (L); (BÖGLI 1978, S. 194)

- ◆ *Stalagmiten*: Dieser Typ entsteht ebenfalls durch Tropfwasser – allerdings vom Boden als Säule aufstrebend. Sie wachsen verhältnismäßig am langsamsten. Der minimale Durchmesser von Stalagmiten liegt bei 3 cm, wobei sich der Durchmesser mit zunehmender Fallhöhe vergrößert. Stalagmiten sind aus Schichten aufgebaut, die sich haubenförmig übereinander anordnen (Abbildung 14). Sie können einen einheitlichen Durchmesser haben, nach oben hin spitz zulaufen oder auskragend aufgebaut sein. Bei geringer Fallhöhe ergibt sich eine konvexe Spitze, bei großer Fallhöhe ist die Spitze – bedingt durch den stärkeren Impact der Tropfen – konkav ausgebildet (Tropfbecher). In letzterem Fall spricht man auch von Tellerstalagmiten. Kann der Tropfen nicht mehr entkommen, wird die Weiterentwicklung vorübergehend gehemmt. Erst wenn sich der Grund wieder genügend erhöht, kommt es erneut zur Ausbildung eines Tellers. Stehen die Teller so weit über, dass an ihren Rändern kapillar aufsteigendes Wasser wirksam wird, bilden sich so genannte Palmenstammstalagmiten aus.

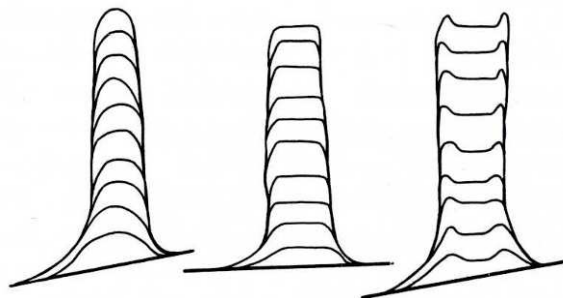


Abbildung 14 – Stalagmitenlängsschnitte, von links nach rechts zunehmende Fallhöhe; (BÖGLI 1978, S. 195)

- ◆ *Tropfsteinsäule*: Vereinigen sich Stalaktit und Stalagmit, bezeichnet man sie als Tropfsteinsäule (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007).

#### *Bildung durch Fließwasser*

- ◆ *Sinterdecken*: In dünnen Schichten über eine Unterlage fließendes Wasser weist eine große Oberfläche auf – CO<sub>2</sub> kann leicht entgasen, ein Sinter bildet sich. Vom Phänomen der Sinterdecke spricht man, wenn sich die Kalkausscheidung deckenförmig über ihre Unterlage ausbreitet. Durch

Schwebfracht oder ionische Verunreinigungen kann sich ein breites Spektrum an Farben ergeben. Sinterdecken entstehen auf Böden, leicht geneigten oder vertikalen Wänden und erreichen eine Dicke bis zu mehreren m.

- ◆ *Sinterbecken*: Sie bilden sich auf geneigten Wänden oder auf Sinterdecken, wo Unregelmäßigkeiten sind, die den Wasserfilm ausdünnen. Sie treten einzeln oder zu mehr auf, wobei ihre Anordnung in letzterem Fall meist stufenförmig ist. Bezüglich ihrer Größe zeigen sich Variationen vom mm- bis m-Bereich. Am Rand der Sinterbecken erfolgt die Ausfällung von  $\text{CaCO}_3$  am schnellsten, da dort der Wasserfilm die geringste Dicke aufweist. Die Beckenränder können gerade oder gebogen sein (SWEETING 1972; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

#### *Bildung durch kapillare Kräfte*

- ◆ *Exzentriker (Excentriques)*: Wie bereits der Name unschwer vermuten lässt, zeichnet sich dieser Speläothem-Typ durch ein ungewöhnliches Aussehen aus. Sie sind relativ klein (>10 cm), verzweigt bis strauchartig und wenden sich von Hindernissen weg. Sie umwachsen andere Exzentriker oder Sinter ohne sie zu berühren. Exzentriker sind von einem hauchfeinen Kanal durchzogen an dessen freiem Ende Wasser verdunstet und Calcit ausgeschieden wird. Die dort austretende Wassermenge ist so gering, dass die Oberflächenspannung größer ist als die Gravitation. Wird dieser Grenzwert überschritten (durch erhöhte Wasserzufuhr) kommt es zu Tropfenbildung, ein Sinterröhrchen bildet sich aus – der Exzentriker kann in einen Stalaktiten übergehen. Die gekurvte Form ergibt sich durch Verunreinigungen, Verzweigungen entstehen durch Blockaden im Kristallwachstum.
- ◆ *Knöpfchensinter*: Die Oberflächengestaltung dieser kleinen Sinterformen ist für ihre Namensgebung ausschlaggebend. So wird zwischen Karfiol-, Pilz-, Trauben-, Korallen- und Perlsintern unterschieden. Bei diesen Bildungen handelt es sich wie bei den Exzentrikern um die Ausscheidungen aus kapillar aufsteigendem kalkhaltigem Wasser – Verdunstung impliziert ihr Wachstum (Abbildung 15; SWEETING 1972; BÖGLI 1978).

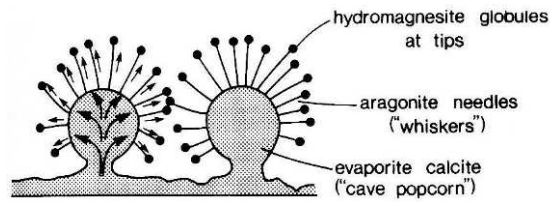


Abbildung 15 – Knöpfchensinter, (FORD & WILLIAMS 2007; S. 287)

### *Bildung an und unter der Wasseroberfläche*

- ◆ *Ablagerungen in einem Becken:* Die Sinter bilden sich durch Übersättigung in einem Becken und verfüllen dieses allmählich. An den Wänden wachsen sklenoedrische Calcite. Dünne Skelettkristalle können, von der Oberflächenspannung gehalten, an der Wasseroberfläche flottieren. Sie wachsen zu Kalkhäutchen heran. Durch Zusammenstoßen und Verschweißen miteinander können sich Sinterplättchen bilden. Sind sie zu schwer, sinken sie ab.
- ◆ *Höhlenperlen:* Höhlenperlen sind meist kugelförmige Sinterbildungen die in kalkreichen, flachen Höhengewässern entstehen, die durch Tropfwasser bewegt werden. Sie haben einen Durchmesser von gut 1 cm, besitzen eine glatte Oberfläche und treten lose auf. Ihre Bildungszeit kann stark variieren. Um einen Kern aus Fremdmaterial erfolgt eine regelmäßige schalige Akkretion von radialstrahlig wachsenden Calcit-Kristallen. Sie erreichen Durchmesser bis zu 15 mm. Irreguläre Formen können größer werden (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

### *Bildung unter mikrobieller Beteiligung:*

- ◆ *Bergmilch:* Diese Erscheinung mit nicht hinreichend geklärt Herkunft der Bezeichnung, kommt in Höhlen aller klimatischen Regime vor. Es handelt sich um ein Aggregat bestehend aus mikroskopisch kleinen Kristallen, organischen Polymeren, Mikroorganismen und Wasser. 95% der Bergmilch-Ablagerungen sind karbonatisch, die verbleibenden 5% sulfatisch, phosphatisch oder silikatisch. Die Wassergehalte liegen meist zwischen 35 und 70%. Die trockene Masse besteht aus Calcit, wobei es sich meist um lamellenförmige rhomboedrische und dünnadelige fibröse Kristalle (Varietät Lublinit) handelt. Die durchschnittliche Dicke der Kristalle liegt um 1 µm. Zusätzlich treten

Beimengungen in Form von Ton und organischen Stoffen auf. Zwischen 35 und 70% Wassergehalt verhält sich Bergmilch plastisch. Ab einem Gehalt von 70% ist sie übersättigt und gibt Wasser ab. Trocknet sie aus, bilden sich pulvrige Rückstände. Bergmilch wird einerseits durch herkömmliche Kalkausscheidung, andererseits durch Verwitterung von Sintern gebildet. Kleinstlebewesen tragen vermutlich stark zu ihrer Bildung bei. Bakterien bauen den herkömmlichen Calcit ab und fällen ihn als Mikrofasern wieder aus. Tonmineralien scheinen diesen Prozess zu fördern. Allerdings sind auch vollkommen anorganische Bergmilch-Ablagerungen bekannt.

Bergmilch sitzt auf Fels, klastischen Sedimenten oder auf inaktiven Speläothemen auf. Ihre Ausmaße variieren vom cm- bis m-Bereich, ihre Dicke kann mehrere dm erreichen (CHIRIENCO 2004; FORD & WILLIAMS 2007).

#### 4.4.3. *Eis in Höhlen – Eishöhlen*

Die Entstehung von Eis in Höhlen bedingt kalte Winter – für seine Konservierung sind kühle Sommer in humiden Klimaten erforderlich. Sich in Höhlen befindliches Eis kann saisonal und oder perennierend (dauerhaft) sein. Bezüglich ihres meteorologischen Verhaltens wird zwischen statischen und dynamischen Eishöhlen unterschieden.

- ◆ Von einer *statischen (Eis-)Höhle* spricht man, wenn eine Höhle als absteigendes Sackungsloch angelegt ist, aus welchem winterliche Kaltluft nicht mehr entweichen kann – es sich also um eine Kaltluftfalle handelt. Auch warme Luft kann gefangen bleiben (Abbildung 16). Dieser Typ von Eishöhle bildet sich oftmals unterhalb von Dolinen, die als Fangtrichter für kalte Luft wirken. Im Winter wird das Gestein durch die kalte Luft auf unter 0°C abgekühlt. Durch den im Frühjahr schmelzenden Schnee bildet sich dann ausgedehntes und permanentes Bodeneis. Dies ist die erste Eisbildungsphase. Erwärmt sich später die Luft in höher gelegenen Teilen der Höhle, schmilzt ein Teil des Eises. Im Spätherbst und Frühwinter wird die Höhle wieder vollständig von Kaltluft erfüllt. Aus dem Gestein sickert noch Wasser aus, es gefriert. Dies ist die zweite Eisbildungsphase. Im Hochwinter setzt die Wasserzufuhr aus, bis zum Frühjahr stagniert die Eisbildung. Nur eingewehter Schnee kann die Eismasse vergrößern. Das Phänomen der statischen Eishöhlen ermöglicht,



dass man dauerhaftes Eis auch in niedrigeren Höhen- und Breitenlagen finden kann als gewöhnlich (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

- ◆ *Dynamische (Eis-) Höhlen* weisen hingegen zwei oder mehrere Tagöffnungen auf. In der Höhle entsteht ein Luftfluss, der exogen oder endogen bedingt sein kann. Seine Richtung kann sich saisonal ändern. Die Luftbewegung trägt zur Bildung von Eis und zu seiner Erhaltung oder aber Zerstörung bei. Im Inneren dynamischer Höhlen ist die Temperatur (0,5-3°C) im Winterhalbjahr höher als die Außentemperatur (<<0°C). Die Luftmasse in der Höhle wird dadurch zum Aufsteigen gezwungen, kalte Luft von außen wird so nachgesogen. Damit unterkühlen diverse Bereiche der Höhle, die 0°C-Front wandert langsam höhleneinwärts. Im Sommerhalbjahr hingegen ist die Innentemperatur wesentlich geringer als die Außentemperatur – die relativ schwerere Luftmasse muss absinken. Nachschub ‚neuer‘ Luft erfolgt aus den diversen Tagöffnungen. Diese Luft wird an Schnee- oder Eisresten oftmals bis auf ~0°C abgekühlt. Die Bildungs- und Zerstörungsphasen von Eis sind in dynamischen Höhlen sowohl vom zeitlichen Aspekt als auch vom Ablauf her gleich wie in statischen Höhlen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).
- ◆ *Statodynamische (Eis-) Höhlen* zeigen eine Mischung beider Verhaltensweisen.

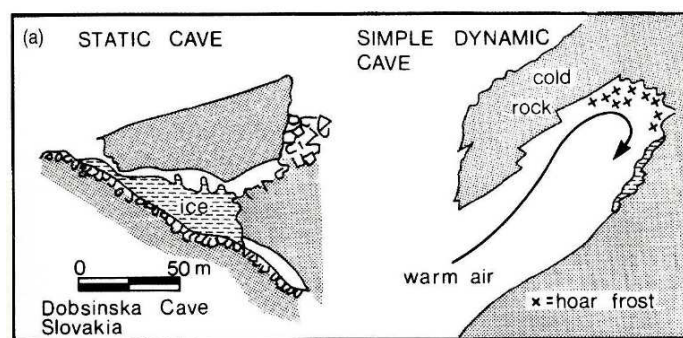


Abbildung 16 – a) Statische, b) einfach dynamische Eishöhle; (FORD & WILLIAMS 2007, S. 295)

Bezüglich des Verteilungsmusters von Eis in Höhlen, ist der Unterschied zwischen statischen und dynamischen Höhlen von Bedeutung. So kann das Eis in statischen und einfachen dynamischen Höhlen die gesamte Kältefall füllen. Systeme mit mehreren Eingängen verhalten sich wesentlich komplexer. Hierbei befindet sich das meiste Eis in den Eingangsbereichen. Besonders komplex wird

das Verteilungsmuster, wenn sich die Eingänge auf verschiedenen Höhenlagen befinden oder ihre Sonnenexposition deutlich unterschiedlich ist (Nordhang – Südhang; BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

Eis kann in Höhlen durch verschiedene Mechanismen entstehen, demnach lassen sich sieben verschiedene Eistypen differenzieren:

- ◆ Eine der häufigsten Erscheinungen sind *Eiszapfen* und *Eisüberzüge*, die imposante Formen bilden können. Sie bilden sich durch infiltrierende Gewässer, die gefrieren. Dieser Typ ist in perennierenden Eishöhlen vorherrschend. Das gebildete Eis ist klar bis opak und polykristallin.
- ◆ Von einem ‚*Glacière*‘ spricht man bei einem großen Eiskörper, der durch Verdichtung und Rekristallisation von Firn (altem Schnee), der sich in statischen Höhlen sammelte, geschaffen wurde. Glacières können auch infiltrierende Gewässer beinhalten und sind perennierend. Das Eis fällt durch seine bläuliche Farbe auf, es ist opak und enthält schmutzige Lagen. Die Verunreinigungen dieser Lagen werden durch Schmelzprozesse konzentriert. Glacières verhalten sich plastisch – sie fließen.
- ◆ Des Weiteren kann sich *Eis durch gestaute Wässer*, die gefrieren, bilden. Dieser Typ kann saisonal oder perennierend auftreten. Die kristallographischen c-Achsen der Eiskristalle sind horizontal angeordnet, das Eis ist grobkörnig und stark transparent. Eingeschlossene Luftbläschen führen zur Ausbildung von Mustern.
- ◆ Die facettenreichste Eisbildung ist *Raureif*. Dieser bildet sich durch Gefrieren von Wasserdampf in der Luft, er kann Fels oder Eis überziehen. Es bilden sich filigrane Kriställchen, Nadeln, Rosetten, hexagonale Platten, pyramidenförmige Kristalle mit hexagonalem Querschnitt oder dichte, ‚verschmolzene‘ Massen aus.
- ◆ *Extrudiertes Eis* ist ein seltenes Phänomen, das zur Ausbildung gebogener, faseriger Kristalle führt.
- ◆ Bei *intrusivem Eis* handelt es sich eigentlich um Gletschereis, das durch Druckschmelzen am Boden des Gletschers in Höhlen eindringt, um dort wieder zu gefrieren.

- ◆ *Bodeneis* findet sich in klastischen Sedimenten als dicke Masse, als Eislinsen (Segregationseis) oder als Nadel-Eis. Es ist der häufigste Eistyp in Höhlen (BÖGLI 1978; FORD & WILLIAMS 2007).

## II. Untersuchungsgebiet

### 1. Geographischer Überblick

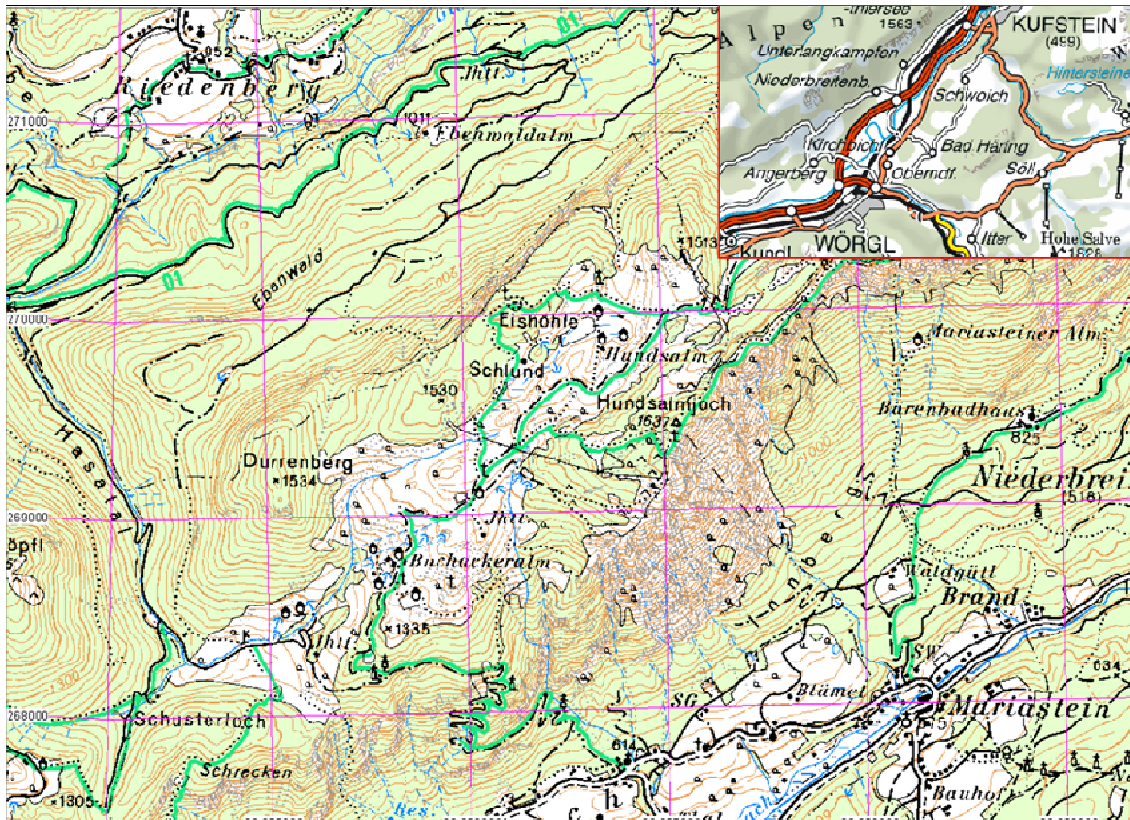


Abbildung 17 – Karte groß: Auszug aus ÖK 1:25000; Karte klein: Auszug aus ÖK 500;  
([www.austrianmap.at](http://www.austrianmap.at))

Das von mir im Rahmen meiner Masterarbeit behandelte Gebiet liegt im Gebirgszug der Brandenberger Alpen und befindet sich im Gemeindegebiet von Angerberg gut 6 km nordnordwestlich der Stadt Würgl (Abbildung 17).

Als üblicher Ausgangspunkt zur Begehung des Gebietes dient der etwas über 1 km westsüdwestlich der Ortschaft Mariastein gelegene Weiler Thal. Von diesem aus gelangt man über einen sich in Serpentina die steile Hangflanke hinauf windenden Weg Richtung Hasatal, Buchackeralm (1340 m), Hundsalmjoch (1637 m) und Hundalm Eishöhle (1519 m; Abbildung 17, Abbildung 18).

Die Flanken südöstlich des Hundsalmjoches und nordwestlich der Hundalm Eishöhle fallen sehr steil ein und sind nur unvollständig von Vegetation bedeckt. Im Gegensatz dazu steht das seicht nach Südwesten einfallende sanfte Rücken, welcher sich von der Buchackeralm bis ca. 1 km östlich der Hundalm erstreckt.

Er ist durch hügelige Morphologie geprägt, bis auf einige Felsrippen durchgehend gut bewachsen und wird im Sommer für den Almbetrieb genutzt. Die Höhenlage dieses Plateaus variiert zwischen 1360 und 1460 m ü.A.

Als ungefähre Begrenzungen des Arbeitsgebietes sind das Hasatal im Westen, der Ebenwald im Nordwesten, der Nordostflanke des Frauensteins (Kuppe mit der Höhenmarkierung 1513 m im Osten) und der Innberg im Südosten zu nennen (Abbildung 17). Die untersuchte Fläche umfasst in etwa 15 km<sup>2</sup>.

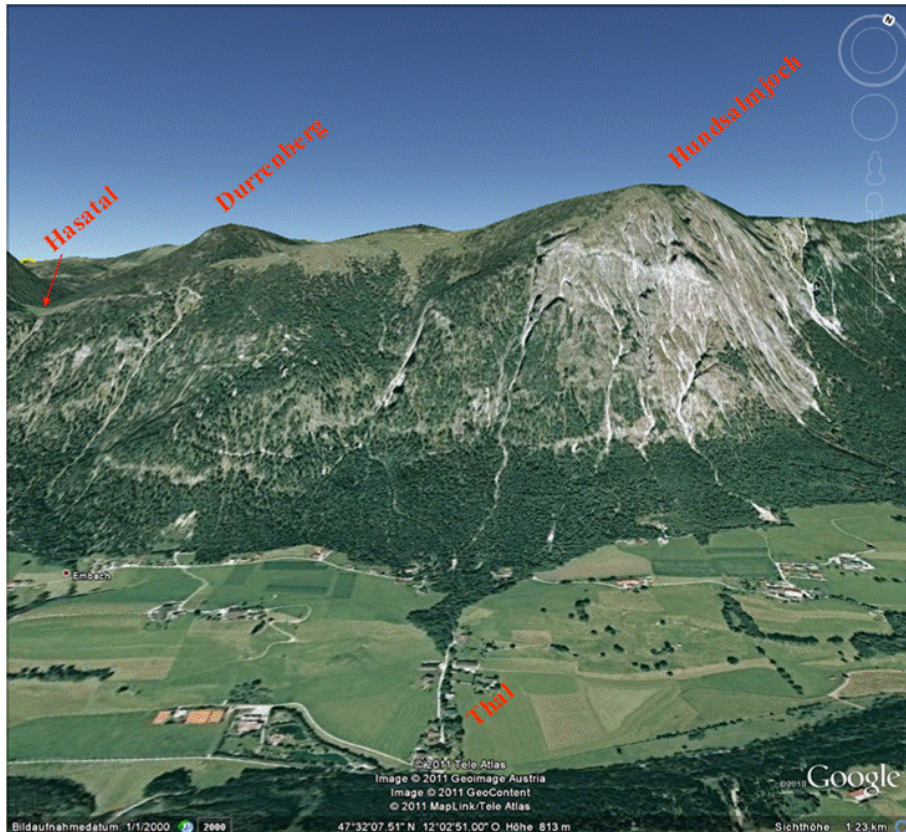


Abbildung 18 – Dreidimensional animierter Blick auf das Gebiet, Blickrichtung Nordwesten (GoogleEarth)

## **2. Regionale Geologie**

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den Brandenberger Alpen. Dieser Gebirgszug ist nördlich des Inns gelegen und erstreckt sich von Jenbach im Westen bis Kufstein im Osten. Die Brandenberger Alpen stellen somit einen Teil der Nördlichen Kalkalpen dar, die im Text der Einfachheit halber mit NKA abgekürzt werden sollen.

## 2.1. Die Nördlichen Kalkalpen

Dieser wichtige Bestandteil der Alpen, der dem Oberostalpin zuzurechnen ist, reicht in den Ostalpen mit einer Länge von über 500 km vom Rhein in Westen bis zum Wiener Becken im Osten. An seiner maximalen Nord-Süd-Ausdehnung misst er 50 km Breite. Bereits westlich des Wiener Beckens sinken die NKA in großen Staffeln in den Untergrund ab, ziehen von dort ausgehend gegen Nordosten in die West-Karpaten weiter, wo sie als Choč-Strážov-Gemeriden-Deckensystem wieder auftauchen. In den Ostalpen zeichnen sich die NKA durch ihre morphologische Geschlossenheit aus, wo hingegen ihre Vorkommen in den West-Karpaten diesen geschlossenen Charakter verlieren. Bezüglich ihrer Mächtigkeit erreichen die NKA bis zu 6,5 km (TOLLMANN 1976 a, b, 1985; OBERHAUSER et al. 1980).

Zur Veranschaulichung der großräumigen Verbreitung der NKA soll nachstehende Karte dienen (Abbildung 19). Die NKA sind in hellblau gehalten.

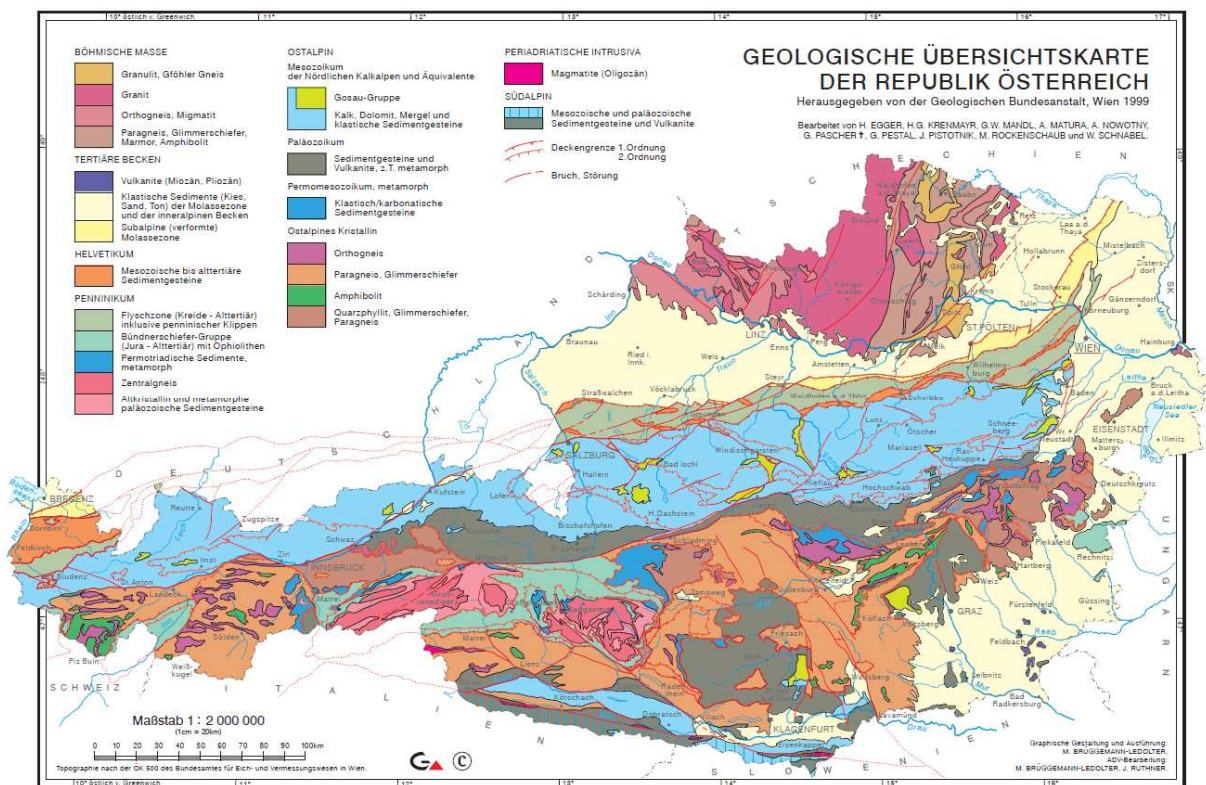


Abbildung 19 – Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich; ([http://www.np-gesaeuse.at/download/aktuelle\\_folder/GeolKarteAUT-deu-20.pdf](http://www.np-gesaeuse.at/download/aktuelle_folder/GeolKarteAUT-deu-20.pdf))

Der Gesteinsbestand der NKA reicht als altersmäßig zusammenhängende Serie vom Perm bis ans Ende der unteren Kreide. Im Anschluss daran folgt eine Schichtlücke, die mindestens das höhere Turon (Oberkreide) umfasst. Darüber

finden sich in zahlreichen Becken abgelagerte jüngere Sedimente mit altkretazischen und tertiären Altern.

Die NKA wurden von ihrem Entstehungsgebiet weit weg transportiert und von ihrem Untergrund fast vollständig abgeschert. Die NKA wurden über das Tauernfenster und tiefere ostalpine Einheiten geschoben. Sie sind dem Untergrund teils flach, teils muldenförmig aufgelagert. Ihr größter Tiefgang liegt in der mittleren Zone vor. An ihrem Nordrand (Überschiebungstirn) erweisen sie sich als flach bzw. sekundär versteilt auskeilend.

Überwiegend herrschten bei der Ablagerung der permomesozoischen Sedimente marine Bedingungen, es sind allerdings auch terrestrische Einschaltungen anzutreffen (OBERHAUSER et al. 1980; TOLLMANN 1976 a, 1985).

Es kommen – vor allem aufgrund der sehr differenzierten Trias (Hauptdolomit- und Dachsteinkalkfazies, 2.2.2) – viele Faziesräume vor. Die anzutreffenden Gesteine sind überwiegend karbonatischer Natur. Diese Karbonate setzen über den detritisch-salinaren Bildungen der permoskythischen (Oberperm – Untertrias) Basisserie ein und können in der besonders markant ausgeprägten Trias teilweise mehrere km Mächtigkeit erreichen. Untergeordnet sind pelitische und gröber detritische Einschaltungen anzutreffen. Im Jura entwickeln sich zunehmend Beckensedimente. Ab der Kreide findet die Bildung reiner Kalke nur noch stark eingeschränkt statt (TOLLMANN 1976, 1985; OBERHAUSER et al. 1980).

Der lithologische und morphologische Charakter der NKA wird vor allem durch die in der Trias abgelagerten, mächtigen Gesteinsfolgen – welche Kalke und Dolomite umfassen – ausgemacht.

Die kalkige Entwicklung der Trias-Stufe ist vor allem in den westlichen Kalkalpen zu finden sowie im Nordteil der mittleren und östlichen Kalkalpen. Sie wird auch ‚voralpiner Faziesbereich‘ (Bajuvarikum, Tirolikum) genannt.

Die als ‚hochalpine Faziesraum‘ (Juvavikum) bezeichnete, der dolomitischen Entwicklung entstammende mächtige Hauptdolomitmasse der mittleren Trias ist im Süd-, Mittel- und Ostabschnitt der Kalkalpen vertreten. Weiters finden sich Ramsau- und Wettersteindolomit, ab der Obertrias ist der bedeutende Dachsteinkalk vorherrschend. Die jurassischen und kretazischen Bildungen setzten sich in Bezug auf ihrer Fazies unabhängig von diesen älteren Zonen ab (TOLLMANN 1976 a; OBERHAUSER et al. 1980).

## 2.2. Geologische Entwicklung

Die Ablagerungsbedingungen verändern sich stetig. Dadurch ist sowohl vertikal als auch lateral ein ständiger Fazieswechsel feststellbar (TOLLMANN 1976; OBERHAUSER et al. 1980).

### 2.2.1. Perm

Rifting im oberen Perm leitet den alpinen Zyklus ein, der Meliata-Hallstatt-Ozean, öffnet sich. Im späten Perm einsetzende thermische Subsidenz ermöglicht die großräumige triassische Transgression in den alpinen Regionen.

Eine Gliederung und Einstufung des kalkalpinen Perm gestaltet sich schwierig, da seine kontinentalen und hypersalinaren Bildungen praktisch fossilifer sind. Zusätzlich ist eine starke tektonische Verschuppung ausgeprägt.

Bei den ersten Sedimenten, die bereits zur kalkalpinen Schichtfolge der NKA zu rechnen sind, handelt es sich um klastische Serien. Diese transgredieren über den variszisch verfalteten, eingeebneten Grundgebirgssockel. Im tiefsten Abschnitt finden sich detritische Serien (Alpiner Verrucano im Westen, Präbichlschichten im Osten), teilweise gibt es evaporitische Ablagerungen (Haselgebirge; TOLLMANN 1976, 1985; OBERHAUSER et al. 1980; STAMPFLI et al. 2002; PFIFFNER 2009).

### 2.2.2. Trias

Die triassischen Bildungen entstammen einem flachen Meer, dem Meliata-Hallstatt-Ozean, einem Back-Arc-Ozean der Paläotethys. Seine Öffnung und Schließung betrifft die gesamte alpidische Entwicklung. Die maximale Spreizungsrate wird in der mittleren Trias erreicht. Die Riftingphase endet im Karn (Obertrias), gleichzeitig mit dem Raibl Event. Die südwärts gerichtete Subduktion des Meliata-Hallstatt-Ozeans wird in der späten Trias eingeleitet, der Ozean wird von Ober-Trias bis Ober-Jura subduziert (BRANDNER 1984; CHANNEL & KOZUR 1997).

Durch ihre große Mächtigkeiten stellen die Ablagerungen der Trias einen Hauptbaustein der Karbonatserie der NKA dar. Der Ablagerungsraum befindet sich im Schelfbereich, Wassertiefen von 200 m wurden kaum überschritten (Abbildung 20). Es herrschen Ablagerungsbedingungen verschiedenartigster



Natur, die resultierenden Sedimente sind stark differenziert (TOLLMANN 1976, 1985; MOSTLER et al. 1989).

In der unteren Trias sind noch marine, detritische Ablagerungen anzutreffen (seichtes Meer im Westen: Buntsandstein; flaches, subtidales Milieu im Osten: Werfen-Formation). Im unteren Karn findet eine Regression statt, welcher vereinzelt terrigene Schüttungssedimente entstammen (TOLLMANN 1976, 1985; OBERHAUSER et al. 1980).

Mit einer Vertiefung des Ablagerungsraumes im Anis (Mittel-Trias) kommt es zum Absatz mächtiger Folgen in Form von Karbonatplattformen mit reicher Faziesvariation. Lebewesen der Lagunen und Riffe liefern einen Großteil der karbonatischen Masse. Im Ladin finden sich Riffkomplexe (riffnaher Wettersteinkalk, Wettersteindolomit) und geschichtete Lagunensedimente (rifferner Wettersteinkalk) als auch Ablagerungen aus Schwellen- und Beckenfazies. In der das Gebiet betreffenden Tiroler Fazies ist die Bildung von Wettersteinkalk (2.4.1) vorherrschend, Riff- und Lagunenbereiche verzahnen mit Beckenfazies (TOLLMANN 1976, 1985; OBERHAUSER et al. 1980; THÖNY 2003; PFIFFNER, 2009).

Im Karn kommt es in den NKA durch großräumige Hebungen zum Raibl Event, welches einen markanten Umschwung in Sedimentation, Flora und Fauna mit sich zieht. Damit kommt es zu einer Wandlung der Trias-Sedimentation – nach dem Zerschneiden der Wettersteinkalk-Plattform werden bei in drei Horizonten mächtige feinklastische Serien mit terrigenem Material geschüttet. In der Nordtiroler Fazies finden sich Mergel, Sandsteine, Kalke, Dolomite und Rauwacken. Diese Bildungen werden als Nordalpine Raibler Schichten (siehe 2.4.2.) zusammengefasst. Es herrscht eine starke fazielle Zersplitterung und ein rascher zeitlicher Wechsel der Sedimente vor (TOLLMANN 1976, 1985; BRANDNER 1978).

Die norischen Sedimente zeigen wesentlich größere Mächtigkeiten und eine größere Einheitlichkeit. Über weite Gebiete ist lagunäre Seichtwasserfazies vertreten (Hauptdolomit- und Dachsteinkalkplattform), außerdem gibt es erneut Riffbildung (Dachsteinkalk). Die Hauptdolomitfazies ist – außer im Westen, wo sie die gesamte Breite der Kalkalpen ausmacht – auf den Norden beschränkt und

setzt sich aus Hauptdolomit (siehe 2.4.3.) und Plattenkalk zusammen (TOLLMANN 1985).

Am Ende der Trias, im Karn, kommt es in den Bereichen der voralpinen Hauptdolomitifazies zu einer plötzlichen Entwicklung vorerst kleinräumiger, später immer mehr an Bedeutung gewinnender mergelreicher Sedimente aus intralagunären Becken und Becken des Vorriffbereichs (z.B. Partnach-, Zlambach- und Kössener Schichten; TOLLMANN 1985; THÖNY 2003).

Generell gibt es in der Trias weite Bereiche, die dem Prozess der Dolomitisierung unterliegen, diese ist jedoch bereits im Rhät untergeordnet vorzufinden und ab dem unteren Jura fehlt sie vollkommen. Salinare Bildungen kommen in der Trias in fünf Horizonten vor (TOLLMANN 1976; THÖNY 2003).

### 2.2.3. Jura

Im unteren Jura kommt es zur Öffnung der alpinen Tethys bzw. des penninischen Ozeans, welche/r einen Zweig des sich öffnenden atlantischen Ozeans darstellt. Die finale Schließung des Meliata-Hallstatt-Ozeans findet zu Beginn des Oberjura statt. Der Schließvorgang wird von Uplifting angrenzender Bereiche begleitet (KOZUR 1991; STAMPFLI et al. 2002).

Die triadischen Karbonatplattformen beginnen abzusinken. Faziell erfolgt eine relativ rasche Umstellung, die Jurafaziesdifferenzierung ist bald nicht mehr an die Faziesregionen der Trias gebunden und stellt sich einheitlicher dar. Darüber hinaus kommt es zu stärkerer Abtragung, größerer Lückenhaftigkeit und Kondensation im Zusammenhang mit der jungkimmerischen Phase (TOLLMANN 1976, 1985).

Die Öffnung des zentralen Atlantiks schreitet im Lias fort. Durch ein neues Riftereignis wird der westmediterrane Raum zerstückelt. Über den triadischen Riffstöcken kommt es zur Ausbildung von Seichtwassersedimenten (Hierlatzkalk), über den Becken kommt es zum Absatz mergelreicher Serien in gering tiefen Meeren (Adneter Kalk, Lias-Cephalopodenkalk, Abbildung 21). Die Schwellenbereiche erfahren in der altkimmerischen Gebirgsbildungsphase an der Wende vom Rhät (Obertrias) zum Lias (Unterjura) ein Auftauchen, im Lias werden triassische Spalten mit Rotkalken plombiert. Allgemein tritt die mergelige

Entwicklung stärker in den Vordergrund (THÖNY 2003; TOLLMANN 1976, 1985; MOSTLER et al. 1989).

Im Dogger ist die Verbindung zwischen Atlantik und Tethys hergestellt. Im unteren Malm (Oberjura) nimmt die Meerestiefe drastisch zu, sodass es zur Ablagerung von Radiolariten und pelagischen Feinschlammkalken kommt. In der jungkimmerischen Phase im Malm kommt es lokal an den emporgehobenen Zonen zur Bildung von Plattform-, Riff- und Riffschuttkalken (Plassenkalk), teilweise erfolgt eine Hebung über Meeresspiegelniveau. Zur gleichen Zeit bilden sich tiefe Meeresbereiche aus, weiträumige Überflutungen finden statt. Resultat dieser Vorgänge in Kombination mit deutlichen Bewegungen sind Trübestrome, Schlammströme und Gleitschollen-Brekzien (OBERHAUSER et al. 1980; TOLLMANN 1976, 1985; MOSTLER et al. 1989; PFIFFNER 2009).

#### *2.2.4. Kreide – Paläogen*

Die aus dem Malm (Oberjura) gegebenen Bedingungen halten sich zunächst noch, mit Beginn der austroalpinen Phase im Barrême (hohe Unterkreide) lassen sich erste gebirgsbildende Vorgänge in den Sedimenten feststellen, welche sich durch Ausbildung von Diskordanzen, Schichtlücken, wie auch durch Schüttung grober Sedimente und Flyschen äußern.

In der Oberkreide (mediterrane Phase) kommt es dann zu weiteren, kräftigen orogenetischen Bewegungen welche schlussendlich im höheren Turon – ‚vorgosauisch‘ – zu großräumigen Trockenlegungen, Deckenschüben, Erosionen und Verkarstungen im Kalkalpenraum führen. Als Zeugnis der Trockenlegungen und Verkarstungen treten hohlraumfüllende Bauxite und bauxitische Tone auf (TOLLMANN 1976, 1985, 1986; OBERHAUSER 1980; PFIFFNER 2009).

Nach dem ersten Höhepunkt der alpinen Orogenese kommt es gegen Ende der Kreide, im Coniac, zur Gosau-Transgression. Die Sedimente der Gosau-Serie – welche dem ostmediterranen Gebirgssystem eigen sind – transgredieren mit Konglomeraten als basalster Bildung. Die Gosau-Sedimentation setzt nicht überall gleichzeitig ein, sondern verläuft in verschiedenen Horizonten. Das vorstoßende Meer trifft auf einen vielfältig differenzierten Faziesraum, der sich noch weiterhin verändert. Die resultierenden Sedimente sind daher verschiedenartigster Natur

(Abbildung 22). Insgesamt werden vier Konglomerathorizonte geschüttet. Die Sedimente der Gosau-Gruppe reichen lokal bis ins mittlere Eozän (Abbildung 23). Ab dem späten Eozän bis ins Oligozän kommt es im Tiroler Unterinntal zur Ausbildung eines neuen Beckens, in dem die Ausläufer des Molassemeeres sedimentieren (Oberangerberger Schichten; TOLLMANN 1976, 1985; OBERHAUSER et al. 1980; PFIFFNER 2009).

#### 2.2.5. Quartär

Der heutige morphologische Charakter großer Bereiche der Ostalpen wurde stark durch die erosive Tätigkeit der Gletscher diverser Vereisungsphasen des Quartär bestimmt. Bei der jüngsten Phase bedeutender Vereisung im alpinen Raum handelt es sich um die Würm-Kaltzeit. Ihr Einsetzen vor 115 ka zog eine Abkühlung des Klimas mit sich. Das glaziale Klima war allerdings nicht stabil – es gab zahlreiche Schwankungen zwischen Stadialen und Interstadialen. Der Höhepunkt dieser Vereisungsphase war zwischen 24 ka und 21 ka und wird als Hochwürm oder ‚Last Glacial Maximum‘ bezeichnet. Während des Eishochstandes war das Unterinntal bis auf etwa 1800 m Seehöhe mit Eis verfüllt. Der Inntalgletscher bewegte sich quer zum Inntal, der Eispanzer reichte bis in den Raum von Rosenheim. Der gesamte Pendlingzug wurde daher von Eis überfahren. Die Talsohle wurde durch glaziale Erosion mehr als 300 m übertieft und später mit fluviatilen und lakustrinen Sedimenten verfüllt.

Auf den Höhepunkt der Würm-Vereisung folgt eine Phase – von 21 ka bis 19 ka – die sich durch einen raschen Verlust an Eisvolumen äußert. Später gab es allerdings wieder weitere Gletschervorstöße (z.B. während der Jüngeren Dryas, vor etwa 12 ka). Der letzte Eisvorstoß erfolgte in einer kühleren Periode, der ‚Kleinen Eiszeit‘, die vom 15. bis 19. Jahrhundert andauerte (VAN HUSEN 1987, 2004; PREUSSER 2004; IVY-OCHS 2005).

## 2.3. Stratigraphie

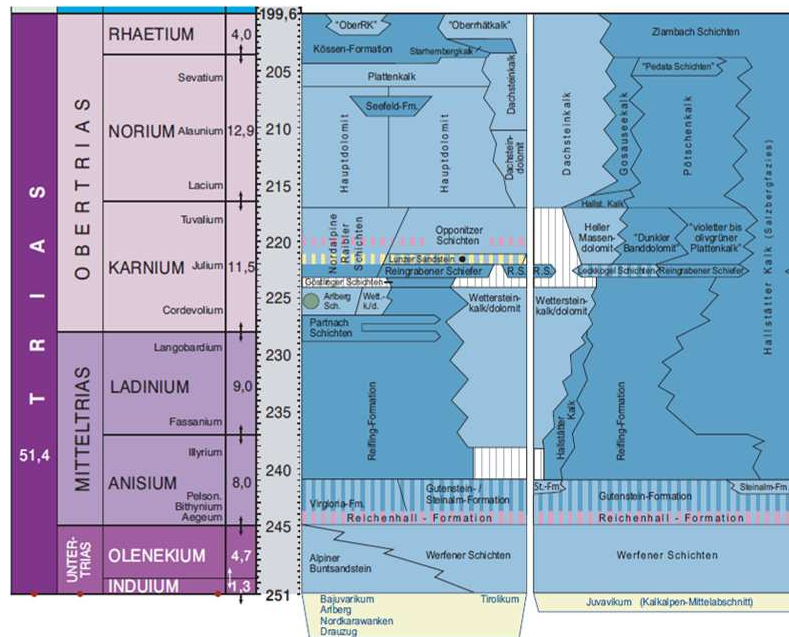


Abbildung 20 – Trias der NKA; 'Stratigraphische Tabelle von Österreich', modifiziert; ([http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische\\_Tabelle\\_von\\_Oesterreich\\_2004.pdf](http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische_Tabelle_von_Oesterreich_2004.pdf))

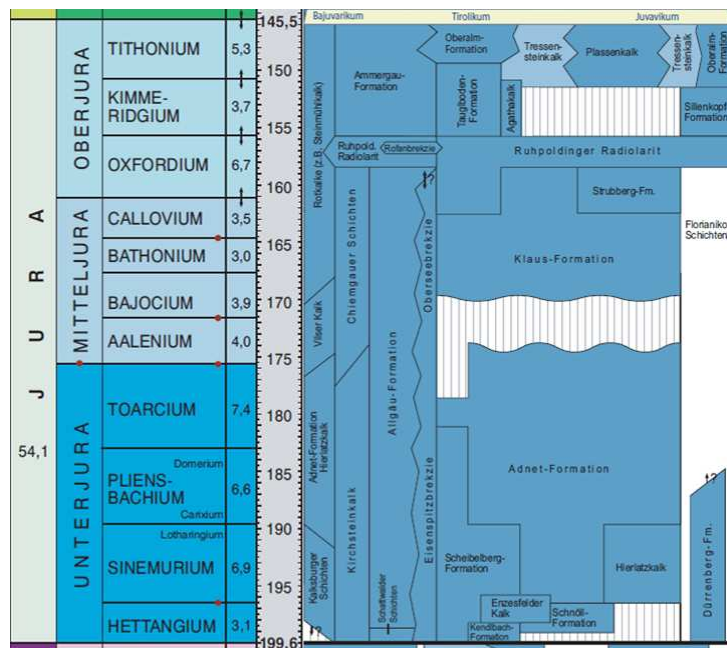


Abbildung 21 – Jura der NKA; 'Stratigraphische Tabelle von Österreich', modifiziert; ([http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische\\_Tabelle\\_von\\_Oesterreich\\_2004.pdf](http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische_Tabelle_von_Oesterreich_2004.pdf))

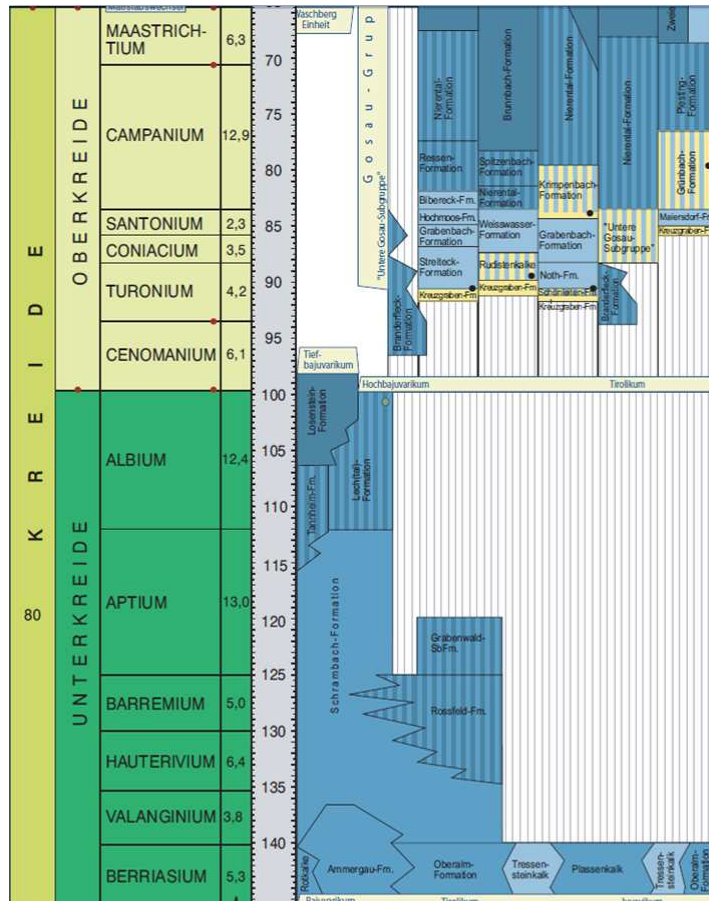


Abbildung 22 – Kreide der NKA; 'Stratigraphische Tabelle von Österreich', modifiziert; ([http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische Tabelle von Oesterreich 2004.pdf](http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische_Tabelle_von_Oesterreich_2004.pdf))

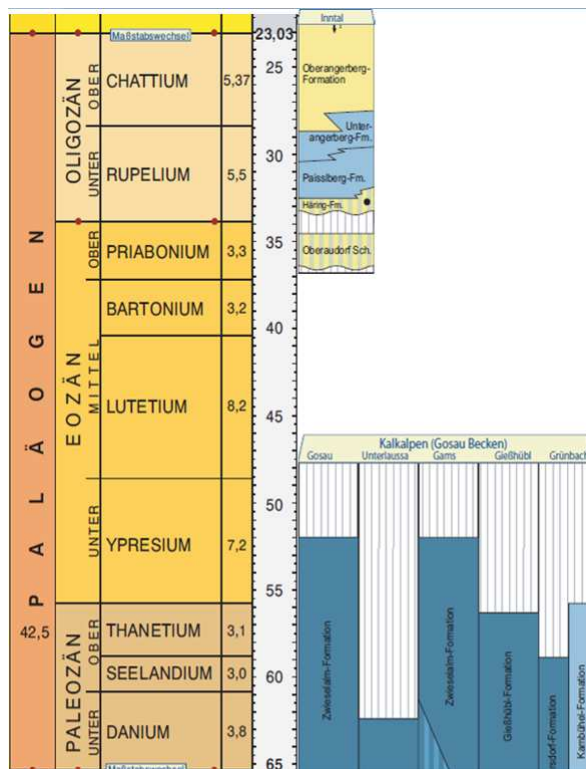


Abbildung 23 – Paläogen der NKA; 'Stratigraphische Tabelle von Österreich', modifiziert; ([http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische Tabelle von Oesterreich 2004.pdf](http://palstrat.uni-graz.at/Stratigraphische_Tabelle_von_Oesterreich_2004.pdf))

## 2.4. Lithologien

Im folgenden Abschnitt soll lediglich auf die Lithologien näher eingegangen werden, die auch im untersuchten Gebiet vorzufinden sind.

### 2.4.1. *Wettersteinkalk und -dolomit*

Im Nordtiroler Faziesraum, welcher sich vom Arlbergmassiv bis zu den Weyrer Bögen erstreckt, baut sich ab dem Ladin (Mittel-Trias) ein mächtiger Riffkomplex auf – stellenweise mit Beckenfazies (Partnach Schichten) verzahnend. Der dem Ladin bis Unterkarn entstammende Wettersteinkalk stellt den Hauptfelsbildner in den westlichen Kalkalpen dar. Es handelt sich dabei um seichte Riff- und Lagunenkalke (TOLLMANN 1976; OBERHAUSER et al. 1980).

Durch eine sich nach der Seite vorschiebende Riffbildung, kann eine vertikale, dreiteilige Gliederung des Wettersteinkalks vorgenommen werden.

Im unteren Abschnitt erweisen sich die hier etwas dunkleren Kalke als massig und undeutlich gebankt. Gut gebankte, helle Dasycladaceenkalke liegen im mittleren Abschnitt vor. Im Oberen Abschnitt finden sich helle Kalke, die sich als auffallend feinschichtig erweisen mit verschiedenfarbigen (schwarz, grau, rot), brekziösen Lagen, teilweise mit (grünlichen) Mergeleinschaltungen und Sedimentationsstrukturen, wie z.B. Kreuzschichtung. Das Zerbrechen der Wettersteinkalk-Plattform kündigt sich im oberen Wettersteinkalk durch Spaltenbildungen an. Kreidezeitlich kam es im oberen Wettersteinkalk zu Verkarstung. Diese wurde durch Freilegung gebildet und von transgredierenden Sedimenten (oftmals bauxitische Gosau-Sedimente) verfüllt.

Massige Kalke sind als Vertreter der Rifffazies anzusprechen, gebankte Kalke als Lagunenfazies. Stellenweise kann der Wettersteinkalk in dolomitierter Form vorliegen. Wettersteindolomit tritt vor allem in den westlichen Kalkalpen auf. Bei den Ablagerungen der Lagunenfazies des riffernen Hinterriffbereichs lässt sich ein Wechsel von kompakten, dichten Bänken (seichtes Stillwasser), Rotpelit-Infiltrationen (zeitweises Auftauchen über den Meeresspiegel) und loferitisch gebänderten, dünnlagigen Zwischenschichten mit Stromatolith-Algenmatten (Watt bis Hochwatt) feststellen. In der Lagunenfazies treten massenhaft Wirtelalgen – *Diplopora annulata* als typische Art – auf (TOLLMANN 1976, 1986; OBERHAUSER et al. 1980; KRÄINER 1985; MOSTLER et al. 1989; NITTEL 2004; GRUBER et al. 2009).

Nach der Ablagerung des Wettersteinkalks kam es im frühdiagenetischen Stadium zu einer Kompaktion und Umwandlung von Aragonit zu Calcit, weiters erfolgte Zementation und partienweise Dolomitisierung des Sediments, welche schichtgebunden ist. Nach Abschluss der Lithifikation führten spätdiagenetische Prozesse zu einer Kornvergrößerung (TOLLMANN 1976; MAUL et al. 1989; GRUBER et al. 2009).

#### 2.4.2. Nordalpine Raibler Schichten

Die zwischen Lech und Inn vorkommenden Nordalpinen Raibler Schichten liegen schichtkonkordant auf Wettersteinkalk/ -dolomit. Sie zeichnen sich durch eine dreifache Wiederholung von Tonschiefer-Karbonat-Serien aus, sind also ein Produkt wechselnder mariner und terrigener Sedimentation. Die Ursachen für die veränderten Sedimentationsbedingungen sind in tektonischen Bewegungen und eustatischen Meeresspiegel-Schwankungen zu suchen (NITTEL 2004; PFIFFNER 2009).

Es kommen Schiefertone, Tonmergel, Mergel und Sandsteine vor. Die Schieferserien beinhalten schwarz-braune, glimmerreiche Tonschiefer, feinkörnige Sandsteine, schwarze, bituminöse Mudstones, fossilreiche mergelige Kalke. In der breiten Palette an Karbonatgesteinen treten Mudstones, Dolomite, bituminöse, dolomitische Kalke, Dolosparite, Sandkalke und bioklastische Kalke auf. Die wie bereits erwähnten evaporitischen Bildungen treten als isolierte Vorkommen im Schichtverband mit dolomitischen Gesteinen auf (JERZ 1966; OBERHAUSER et al. 1980; KRAINER 1985; TOLLMANN 1985; GRUBER 1997; NITTEL 2004).

Die untere Schiefertonserie (Horizont 1a) erweist sich als am mächtigsten und konstantesten. Sie lagert sich konkordant über Wettersteinkalk ab, es kommt zu einem schnellen Ausgleich des untermeerischen Reliefunterschiedes. Die Sedimente entstammen bewegtem Flachwasser. Bei der unteren Karbonatgesteinsserie (Horizont 1b) handelt es sich um eine gelbliche, mürbe Kalk-Dolomit-Folge mit Wühlgefügen. Beim Dolomit handelt es sich sowohl um frühdiagenetische Bildungen mit Feinschichtung, als auch um Stromatolith-Dolomite. Dieser Horizont lagerte sich in einem sehr flachen, hyperhalinen Lagunenbereich ab. Die mittlere Schiefertonserie (Horizont 1c) ist in Längsrichtung nur im mittleren und südlichen Bereich ausgebildet und erreicht lediglich sehr



geringe Mächtigkeiten. Die Zusammensetzung erweist sich als stärker differenziert, es finden sich kalkige Schiefertone bis hin zu Fossilkalken.

Die mittlere Karbonatgesteinsserie (Horizont 2a) enthält vor allem Kalke und Dolomite und stellenweise dünne Mergellagen. Als eine Besonderheit dieses Horizontes treten Kalk-Dolomit-Rhythmite mit Bitumen- und Schwefelkiesgehalten auf (Lokalität: Zirler Klamm). Wie auch Horizont 1c fehlt die obere Schiefertonserie (Horizont 2b) in nördlichen Bereichen. Die Abfolge erweist sich als äußerst differenziert. Die letzte Serie der Nordalpinen Raibler Schichten, die obere Karbonatgesteinsserie (Horizont 2c) ist vielgestaltig und besteht aus Kalken, Schlickgeröllkalken, Dolomiten, Rauhwacken und lokal Evaporiten. Die Sedimente entstammen einem sich gegen oben hin verflachenden Ablagerungsraum mit zunehmender Salinität. Die Grenze zum nächsthöheren Hauptdolomit wird durch die Hauptdolomit-Basisbrekzie gebildet (JERZ 1966; OBERHAUSER et al. 1980; KRÄINER 1985; TOLLMANN 1985).

#### *2.4.3. Hauptdolomit*

In den westlichen Kalkalpen stellt der Hauptdolomit eines der Hauptgesteine dar – im Mittel- und Ostabschnitt der NKA herrscht Dachsteinkalkfazies vor. Die Sedimente des Hauptdolomits gehen – wie auch der Plattenkalk – aus einer sehr breiten, lagunären Seichtwasserzone im Norden (passiver Kontinentalrand der westlichen Tethys) hervor. Charakteristisch für die beginnende Hauptdolomit-Sedimentation ist ein steigender Dolomit- und Bitumengehalt sowie eine Zunahme der Korngröße. Der Hauptdolomit entwickelt sich aus den Raibler Schichten heraus durch Ausbleiben des terrigenen Einflusses. In seinem häufigsten Erscheinungsbild erweist er sich als gut gebankt von grauer Farbe. Generell lässt sich der Bildungsraum des Hauptdolomits als sehr seichte, weite, hyperhaline Lagune bzw. rifferne Flachwasserzone in der Gezeitenfazies klassifizieren. Die Dolomitisierung vollzog sich synsedimentär. Bedingt durch hyperhaline Bedingungen erweist sich der Hauptdolomit als fossilarm. In höheren Niveaus treten bituminöse Einschaltungen auf (TOLLMANN 1976 a, b; OBERHAUSER et al. 1980; DONOFRIO et al. 2003; GRUBER et al. 2009).

Der Hauptdolomit lässt sich in unteren, mittleren und oberen Teil einteilen, die Abgrenzungen sind allerdings nur unscharf, da keine größeren Faziesänderungen

stattgefunden haben. Im fossilarmen unteren Hauptdolomit, erweisen sich dunkle, bitumen- und pyritführende, feingeschichtete Dolosparite und Doloarenite als dominierend. Diese Bildungen entstammen einem Hochwatt. Bedingt durch entsprechendes Klima und einer Lage im mittleren Gezeitenhochwasser wurde eine frühe Dolomitisierung der abgelagerten Schlämme begünstigt.

Das Erscheinungsbild mächtigeren mittleren Hauptdolomits ist hell und fein- bis gröberbankig. Er ist reich an Detritus, *Megalodontiden* setzen ein, die auf ein flaches Meer hinweisen. Bereiche mit Algen und Stromatolithenrasen hingegen zeigen ein seichteres Wattenmeer an. Zwischendurch kommt es gelegentlich zum Auftreten von relativ geringmächtigen Brekzienlagen.

Die Grenze zum nächst höheren oberen Hauptdolomit wird durch einen schieferführenden, bituminösen Dolomithorizont dargestellt (Seefelder Schichten). Der obere Hauptdolomit zeichnet sich durch Fossilreichtum aus, der Bildungsbereich entsprach Watt bis Marschland. Bei den vertretenen Fossilien handelt es sich vor allem um *Dasycladaceen*, aber auch *Megalodonten*. Auffallend ist das endogene Auftreten von brekziösen Lagen, Algenstromatolithen und Onkolithen. Darüber hinaus sind messerstichförmige Hohlräume anzutreffen, die durch Lösung evaporitischer Komponenten entstehen (TOLLMANN 1976 a, b; OBERHAUSER et al. 1980; NITTEL 2004).

#### 2.4.4. Gosau-Gruppe

Die Gosau-Ablagerungen zeichnen sich durch mehrere Sedimentationszyklen aus. Sie sind nicht exakt zeitlich abzugrenzen. Lokal reichen die Gosau-Sedimente bis über die Kreide-Tertiär-Grenze hinaus, maximal bis ins Eozän. Bei den auf eine den gesamten Raum der NKA betreffenden Schichtlücke folgenden, im Turon (Oberkreide) einsetzenden Sedimenten handelt es sich um sehr unterschiedliche Lithologien die sich in rasch wechselnden Faziesbereichen ablagern. Die Basis der Sedimente ist oftmals durch bauxitische Bildungen geprägt. Die darauffolgenden Sedimente sind oft marin, es liegen allerdings auch Bildungen von Brack- und Süßwasser vor (OBERHAUSER et al. 1980; SANDERS 1998; PFIFFNER 2009).

Es herrscht ein Nebeneinander und Ineinandergreifen von verschiedenen Faziesausbildungen vor – verschiedenste Biotope finden sich auf engem Raum.

Generell ist aber ein warmes, mediterranes Klima festzustellen. Die auf ein in der mediterranen Phase angelegtes, ausgeprägtes Relief transgredierendes Sedimente bedecken nur relativ kleine Bereiche der NKA (ehemalige Becken). Weite Teile dieser bleiben subaerisch exponiert und liefern Schutt. Die in mehreren Horizonten geschütteten Konglomerate führen als Komponenten lokalen Schutt und exotische Gerölle. Letztere beinhalten Quarzporphyre, phyllit- und kristallreiche Vergesellschaftungen sowie Diabas und Mandelsteinassoziationen. Neben den Konglomerathorizonten gibt es als auffälliges Niveau Hippuritenhorizonte. Darüber hinaus ist eine *Actaeonellen*- und kohleführende Serie im Untercampan zu nennen (SANDERS 1998; GRUBER et al. 2009).

Erhalten wurden die Gosau-Ablagerungen in eingemuldeten und eingeschuppten Bereichen, daher treten sie gerne an Deckengrenzen und bereits früh angelegten, tektonischen Linien zu Tage. Der regionalen Gliederung zur Folge nach, fallen die im Gebiet vorliegender Masterarbeit vorkommenden Gosau-Sedimente in die ‚Brandenberger Gosau‘. Bei diesem handelt es sich um ein sehr fossilreiches Vorkommen im Raum von Brandenburg im Tiroler Unterinntal. Das Hauptvorkommen bei Brandenburg wird von kleineren Vorkommen nördlich und östlich davon begleitet. Die Abfolge setzt sich wie folgt zusammen: Basal, über dem Hauptdolomit, findet sich ein Bauxithorizont. Darüber findet sich eine kohleführende Serie mit *Actaeonellen* und *Nerineen*. Mit dem oberen Coniac setzt im Zuge einer Transgression hochmarines Milieu ein. Konglomerate, Sandsteine und Mergel sind anzutreffen. Es liegt tropischer Temperaturcharakter vor.

Eine zweite Transgression im Ober-Santon führt zu einer Beckenerweiterung, es kommt zur Ausbildung eines Basalbrekzien- und Konglomerathorizonts. Eine sandige bis mergelige Folge mit einem bis zu 3,5 m mächtigen Hippuritenriff bildet sich. Im unteren Campan erfolgt eine Regressionsphase, abgelagert werden brackische, gastropodenführende, klastische Sedimente wie auch geringmächtige Kohlenflöze. Mit dem Unter-Campan schließt die Gosasedimentation im Brandenberger Raum, eine mächtige, terrestrische Decke aus Hauptdolomitschutt folgt (TOLLMANN 1976; OBERHAUSER et al. 1980; SANDERS 1998; PFIFFNER 2009).

## 2.5. Tektonik

Als erste Vorboten der alpinen Orogenese fanden am Ende der Trias und zu Beginn des Jura mit dem Einsetzen der altkimmerischen Phase erste Krustenbewegungen statt. Lias und Malm sind durch die beginnende Öffnung des penninischen Ozeans durch Extension geprägt. Mit dem verbundenen einhergehenden Rifting kommt es im Lias zu einer Zerlegung der Hauptdolomit-Dachsteinkalk-Plattform. Schwellen- und Beckenbereiche bilden sich aus (TOLLMANN 1976; PFIFFNER 2009).

Ab dem Malm bis in die Unterkreide zeichnet sich eine aktive Hebungstektonik ab. Während der Unter-Kreide lässt sich zwischen der Austroalpinen und der Austrischen Phase unterscheiden. In der Austrischen Phase kommt es zu einer westvergenten Verfaltung der Karwendelplattform, Nord-Süd-streichende Faltenachsen bilden sich aus. Durch die Austroalpinen Phase zur Zeit der höheren Unterkreide kommt es zu Entstehung von Schichtlücken und Diskordanzen (THÖNY 2003).

Die kreidezeitlich einsetzenden Krustenbewegungen der altalpidischen Phase bewirkten eine fast vollständige Abscherung der NKA von ihrer kristallinen Unterlage, der paläozoischen Grauwackenzone (Ordovic bis Ober-Karbon). Diese ist nur vereinzelt am Südrand der Kalkalpen noch anzutreffen. Durch die Bewegungen kam es zur Ausbildung des nordvergenten, kalkalpinen Deckenstapels auf Einheiten des Unterostalpins. Deckenstapelungsereignisse gab es in unterer und höherer Oberkreide und im Alttertiär (OBERHAUSER et al. 1980; PFIFFNER 2009).

Ab dem Turon betrifft prä- und syngosauische Tektonik die Sedimente. Es kommt prägosauisch zur Ausbildung von Faltenachsen, zu denen auch die sich im untersuchten Gebiet liegende Guffert-Pendling-Antiklinale gehört (OBERHAUSER et al. 1980; THÖNY 2003).

Vor und nach dem Oligozän war die Aufstauung so groß, dass sich der kalkalpine Deckenstapel über Penninikum, Helvetikum und Teile des Molasseraumes hinweg bewegte. Liegende Reste im Süden wurden meist vollständig abgetragen.

Im Oligozän kam es in der jungalpidischen Phase zu einer Reaktivierung der früher angelegten Bewegungszonen, wiederum kam es zu einer Schuppung und Faltung der Sedimentgesteine (OBERHAUSER et al. 1980; PFIFFNER 2009).

### 2.5.1. Großtektonische Einheiten

Der Deckenbau der NKA entstammt den zwei Hauptgebirgsbildungsphasen. Zum einen vor allem der alpalidischen Orogenese in der unteren Oberkreide (Turon), zum anderen dem jungalpidischen Event im oberen Paläogen (Oligozän). Die tektonischen Großeinheiten Bajuvarikum, Tirolikum und Juvavikum wurden dadurch angelegt (TOLLMANN 1973; HOSCHEK et al. 1979; OBERHAUSER et al. 1980; THÖNY 2003; PFIFFNER 2009).

Die komplexe Deckenstapelung der NKA ist als ein Resultat des Nord-Südgerichteten Drucks zu betrachten, der zu einer Verkürzung zwischen 50 und 67% und Zerteilung der Schichtfolge führte. Durch den Druck kam es zur Anlegung von großen Querstrukturen. Tiefgreifende Störungen sind häufig in WNW und NW streichend. Es lässt sich neben dieser deckentektonischen Gliederung zusätzlich eine kräftige bruchtektonische Gliederung feststellen. Letztere umfasst vor allem jungalpidische Bruchstrukturen, teils aber auch alte Störungen, die wiederbelebt wurden (OBERHAUSER et al. 1980; THÖNY 2003; BEHRMANN & TANNER 2006).

Eine tektonische Gliederung des Deckenbaus der Kalkalpen lässt sich wie folgt vornehmen (Abbildung 24):

#### ◆ *Bajuvarikum – tiefere voralpine Einheiten*

Dieses zieht sich im Nordteil der NKA über die gesamte Länge durch, in ihrer Mitte liegt es tektonisch reduziert vor.

- Tiefbajuvarikum:  
z.B. Cenoman-Randschuppe
- Hochbajuvarikum:  
z.B. Lechtaldecke

◆ *Tirolikum – höhere voralpine Einheiten*

Es schließt südlich an das Bajuvarikum an. Vor allem im Mittelabschnitt der NKA entwickelt sich eine eher plattenförmige Struktur, bedingt durch die rigideren, triassischen Elemente.

- Z.B. Inntaldecke, Staufen-Höllengebirgsdecke

◆ *Juvavikum – hochalpine Einheiten*

- Tiefjuvavikum:

z.B. Hallstätter Zone

- Hochjuvavikum:

z.B. Berchtesgadener Decke (OBERHAUSER et al. 1980; TOLLMANN 1976)

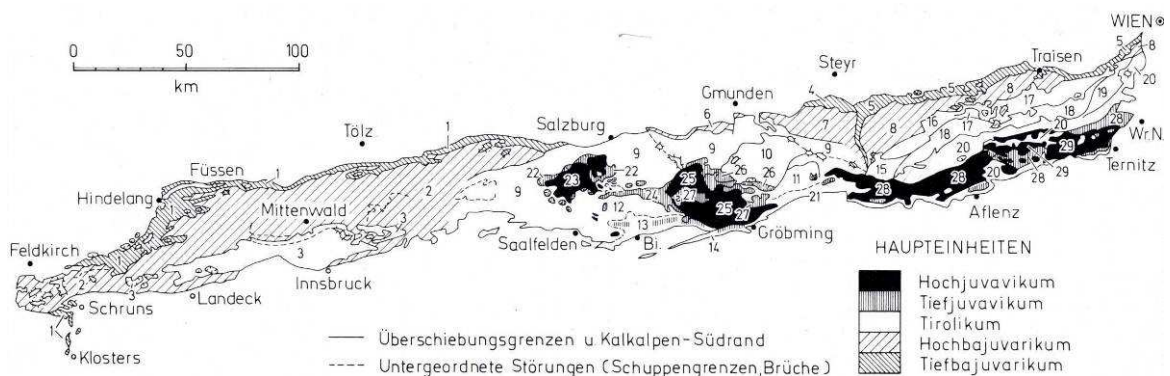


Abbildung 24 – tektonische Gliederung der NKA nach Tollmann, 1973; (TOLLMANN, 1976, S. 48):  
 1 – Allgäud., Cenoman-Schuppenz., Madrisaz., 2 – Lechtald., 3 – Inntal- u. Krabachjochd., 4 – Ternberger D., 5 – Frankenfesler D. u. Cenoman-Randschuppe, 6 – Langbath-Scholle, 7 – Reichraminger D., 8 – Lunzer D., 9 – Staufen-Höllengeb.-D., 10 – Totengebirgsd., 11 – Watscheneckd., 12 – Tennengebirgsscholle, 13 – Werfener Schuppenz., 14 – Mandling-Span, 15 – Reiflinger Scholle, 16 – Sulzbachd., 17 – Reisalpend., 18 – Unterbergd., 19 – Peilsteind., 20 – Göllerd. Samt Tribeinschuppe und Südrandzone, 21 – Admonter Schuppenz., 22 – Hallein-Loferer Hallstätter D., 23 – Berchtesgadener Decke, 24 – Lammerer-Eh., 25 – Dechsteind., 26 – Zlambachscholle, 27 – Sandlingd., 28 – Mürzalpen-Hohe Wand-D., 29 – Schneebergd.

### *III. Methodik*

#### **1. Geologische und karstgeomorphologische Kartierung**

Als Grundlage für die geologische Kartierung des Gebiets diente die Österreichische Karte des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Blatt Wörgl, 3213 – West, im Maßstab 1:25000V. Zur Unterstützung der karstgeomorphologischen Kartierung standen mir Laserscandaten des Landes Tirol und Unterlagen des Landesvereins für Höhlenkunde in Tirol (Auszug aus der Karte ‚Angath, Sheet 89/4, 1:25000‘) zur Verfügung. Darüber hinaus konnte ich Einsicht in das Höhlenkataster und in diverse Begehungsberichte nehmen.

Im Gelände wurde im Maßstab 1:5000 kartiert, beim Eintragen der Aufschlusspunkte auf die Karte dienten Höhenmesser, Kompass sowie ein GPS-Gerät der Marke Garmin, Modell Oregon 200. Die Erfassung struktureologisch relevanter Parameter erfolgte mit einem Gefügekompas von Brunton, Modell Geo Pocket Transit (0-360°) nach der CLAR-Methode.

Durch eine Kombination der durch die Kartierung erhaltenen Informationen, der digitalen Daten sowie einer makroskopischen wie auch mikroskopischen Gesteinsansprache wurden eine detaillierte geologische Karte sowie mehrere Profile erstellt.

#### **2. Computergestützte Arbeit**

Da im stellenweise recht dicht bewaldeten Gebiet diverse Karstphänomene, wie zum Beispiel Dolinen und geologische Strukturen schwer auszumachen sind, wurden Laserscanning-Karten beim Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung für Geoinformation angefordert. Ein digitales Geländemodell (DGM) sowie ein digitales Oberflächenmodell (DOM) wurden mir zur Verfügung gestellt. Beide Karten sind mit einem 1-m-Raster hochauflösend, die zusätzlich erhaltenen Höhenlinien verlaufen in 5 m Schritten.

Digitalisiert wurden die Karte und die Profile mithilfe der Software Adobe Illustrator CS4 14.0.0.

### **3. Vermessung der Höhlen**

Mit Ausnahme der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle, wurden sämtliche bereits im Kataster registrierte, so wie auch einige bis dato nicht registrierte Höhlen- und Halbhöhlen bzw. Schächte neu aufgenommen. Unter Zuhilfenahme des bereits erwähnten GPS-Gerätes wurde die genaue geographische Lage nach UTM 33T und WGS 84 ermittelt.

Die Vermessungen selbst erfolgten mit DistoX, der mit einem Microsoft Windows-gestütztem PDA (Portable Digital Assistent) die Erstellung des Höhlenplans erleichterte. Die gewonnenen Daten und graphischen Informationen konnten zur weiterführenden digitalen Verarbeitung auf den herkömmlichen Arbeits-PC übertragen werden.

Die weitere Erstellung der detaillierten Höhlenpläne erfolgte wie auch die Digitalisierung der geologischen Karte und Profile mit dem Programm Adobe Illustrator CS4 14.0.0.

### **4. Petrographische Untersuchungen**

Aus allen im Gebiet anzutreffenden Lithologien wurden Handstücke zur weiteren Untersuchung mitgenommen. Die Entnahme der Handstücke erfolgte bevorzugt aus dem Anstehenden, in einigen Fällen mussten Lesesteine aufgelesen werden.

Die gewonnenen Proben wurden von Herrn Christoph Spötl mit der Gesteinssäge normal zur Schichtung geschnitten und von Frau Julia Wallraf wurden Dünnschliffe hergestellt. Die weitere Untersuchung der sedimentologischen Dünnschliffe erfolgte mittels Stereomikroskopen. Die in Abschnitt 1.2 dargestellten Fotos wurden mit einem Polarisationsmikroskop von Nikon, Typ Eclipse E 400 POL aufgenommen.

### **5. Hydrologische Recherchen**

In den Sommermonaten der Jahre 1989 und 1990 wurden Quellen in den Brandenberger Alpen (Bereich: Innberge) durch die Herrn Krejci und Herrn Völkl beprobt. Dabei wurden ihre genaue geographische Lage ermittelt und teilweise die Parameter Schüttung, Temperatur, Leitfähigkeit ermittelt, von einigen Quellen wurden Wasserproben mitgenommen. Außerdem fanden Färbeversuche statt, die



jedoch bedauerlicherweise offenbar nicht protokolliert wurden. Die Ergebnisse der Wassermessungen wurden damals mit wasserwirtschaftlichen Arbeitsnummern versehen ins Quellenverzeichnis eingetragen und den Österreichischen Bundesforsten zukommen gelassen. Darüber hinaus wurden im Jahr darauf die entnommenen Proben vom Naturhistorischen Museum im Wien analysiert, wobei der Gehalt verschiedener Ionen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) in mg/l ermittelt, der Kalkwasseranteil in % bestimmt und die Gesamtwasserhärte in deutschen Härtegraden berechnet.

Im Zuge meiner Recherchen durfte ich mit freundlicher Unterstützung durch Herrn Günther Krejci die Mitarbeiter der ÖBF Sektion Unterinntal AG Einblick in die Unterlagen des Quellkatasters nehmen. Zur Vervollständigung wurde das Wasserinformationssystem des Landes Tirol als Hilfe hinzugezogen ([www.tirol.gv.at/themen/umwelt/wasser/wis/](http://www.tirol.gv.at/themen/umwelt/wasser/wis/)). Die zusammengetragenen Werte wurden mithilfe des Programmes Adobe Illustrator in einer Karte zusammengeführt.

## **6. Mikrobiologische Methoden**

Im unteren, eisfreien Teil der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle gibt es Bergmilch-Ablagerungen (siehe 4.4.2). Aus dem Interesse heraus, mehr über die mikrobiellen Komponenten dieses speziellen Vorkommens zu erfahren, wurde eine Zusammenarbeit mit Herrn a.o. Univ.-Prof. Mag. Dr. Paul Illmer und MMag. Christoph Reitschuler vom Institut für Mikrobiologie veranlasst.

Es wurden die Proben aus den Bergmilch-Vorkommen in der Höhle entnommen. Die Probenentnahme erfolgte mit sterilen Werkzeugen, um eine Kontamination der Proben zu verhindern. Die Proben wurden auf Eis gekühlt wegtransportiert und in einem Kühlraum am Institut für Mikrobiologie bis zur weiteren Verarbeitung bei  $-20^\circ\text{C}$  gelagert. Um die Mikrobiologie der Proben zu entschlüsseln wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet, die nachstehend näher erklärt werden sollen.

### **6.1. Lebend-Kultivierungs-Ansatz**

Ziel dieses Ansatzes ist die gezielte Anzucht von Mikroorganismen. Hierfür müssen die Bedingungen von der Entnahme der Proben bis zu deren

Weiterverarbeitung so gewählt werden, dass man von einem Überleben der Organismen ausgehen kann.

In der Versuchsanordnung werden die Proben auf ein Nährmedium aufgetragen. Die Nährmedien setzen sich im Wesentlichen aus Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Phosphor (P) zusammen. Zumeist dienen Fleisch- oder Hefeextrakte ergänzt mit Spurenelementen als Nährmedium. Da zunächst noch keinerlei Aussagen über Artzugehörigkeit der potentiell lebensfähigen Organismen getroffen werden können, müssen verschiedene Medien und Nährstoffzusammensetzungen getestet werden, um ein optimales Wachstum erreichen zu können.

In unserem konkreten Fall wurden die unterschiedlichen Proben auf ein sehr universelles Nährmedium (Plate-Count-Agar) aufgetragen, welches das Wachstum sämtlicher Organismen ermöglichen soll. Die Wahl eines solch universellen Nährmediums ist sinnvoll, wenn man im Vorfeld noch keine Information über mögliche Organismenbestände zur Verfügung hat. Auf das Medium aufgetragen, wird der Versuch, die Mikroorganismen zu vermehren bei mehreren Temperaturregimen durchgeführt, da nicht alle Organismen bei den gleichen Temperaturen optimale Lebens- und Wachstumsbedingungen haben.

Um das Wachstum von Reinkulturen zu gewährleisten, wird vor der Anzucht probiert, einzelne Bakterienkolonien zu isolieren. Hierfür wird mithilfe des so genannten Vereinzelungsausstrichs (Abbildung 25) eine kleine Öse mit Probenmaterial befüllt, mehrfach über die Nährstoffplatte gezogen und so in einer dünnen Spur örtlich verteilt. Durch dieses Prinzip der örtlichen Verteilung von wenig Probenmaterial, steigt aus statistischer Sicht die Wahrscheinlichkeit, einzelne Kolonien in einer Bakterienkultur für eine Weiterverarbeitung isolieren zu können.

Der Vorteil des Lebend-Kultivierungs-Ansatzes besteht darin, dass theoretisch bereits eine lebensfähige Zelle ausreicht, um sie detektieren zu können. Der Nachteil ist, dass nur lebendige Zellen nachgewiesen werden können. Abgestorbenes Material kann nicht erkannt werden (mdl. Mitt. RAPPOLD 2012).

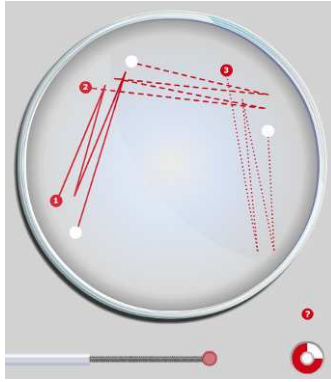


Abbildung 25 – Vereinzlungsausschreibung: Prinzip des Dreiosenausstrichs; Quelle: <http://flexikon.doccheck.com>

## 6.2. Molekularbiologischer Ansatz

Dieser Ansatz arbeitet über die Extraktion und Identifikation von DNS. Hierfür muss prinzipiell die vorhandene DNS zuerst zerkleinert (in ein flüssiges Medium gegeben), dann vervielfältigt und identifiziert werden.

Im konkreten Fall wurde die Vervielfältigung der DNS über die Methode der Polymerase-Kettenreaktion (PCR) erreicht. Die DNS setzt sich aus den vier Basen Adenin (A), Thymin (T), Guanin (G) und Cytosin (C) zusammen. Adenin und Thymin sowie Guanin und Cytosin wirken als Gegenspieler – über dieses Prinzip funktioniert das Abschreiben von aufgespaltenen DNS-Strängen (RNS). Hierfür muss der Doppelstrang der DNS per Erhitzen aufgespalten werden.

Nachdem ein zugegebener Primer an der gegengleichen RNS-Stelle angedockt hat, liest das dem flüssigen Medium zugegebene Enzym der Reihe nach die vorhandene RNS ab und baut die ebenfalls zugegebenen gegenspielenden Bausteine zusammen. Eine inverse Kopie des Einzelstranges entsteht. Die jeweiligen Einzelstränge fügen sich bei passenden Bedingungen wieder von alleine zu Doppelsträngen zusammen. Im Anschluss werden die DNS-Stränge zerlegt.

Um eine Identifikation von DNS durchführen zu können, muss diese nach gewissen Eigenschaften aufgetrennt werden. In unserem Fall wurde dies über die Durchführung einer Gel-Elektrophorese (GE) erlangt. Für diese wird das elektrische Potential, über das die gewissen DNS-Sequenzen verfügen, genutzt. Einer Gelplatte wird eine elektrische Spannung angelegt und die zuerst gewonnene DNS wird aufgebracht. Die DNS wandert die Platte entlang und es

bilden sich je nach vorhandener Sequenz charakteristische Linien, die so genannten Banden ab, die unter UV-Licht sichtbar gemacht werden können (Abbildung 26).

Die Sequenzen, die die jeweiligen Banden ausmachen, müssen dann identifiziert werden, um einen Abgleich mit Datenbanken vornehmen zu können. Durch den Datenabgleich wird die Bestimmung der vorhandenen Domäne ermöglicht. Um die Probe mikrobiellen Großgruppen (Archaea, Bacteria, Fungi) zuschreiben und die Artenvielfalt und –zusammensetzung bestimmen zu können, mussten sehr sensitive Methoden angewandt werden.

Der Vorteil des molekularbiologischen Ansatzes besteht darin, dass auch bereits abgestorbene Materie identifiziert werden kann, der Nachteil ist, dass sich die Methode aufwändig gestaltet und dass größere Mengen an DNS zur Detektion notwendig sind (mdl. Mitt. RAPPOLD 2012; REITSCHULER et al. 2012).

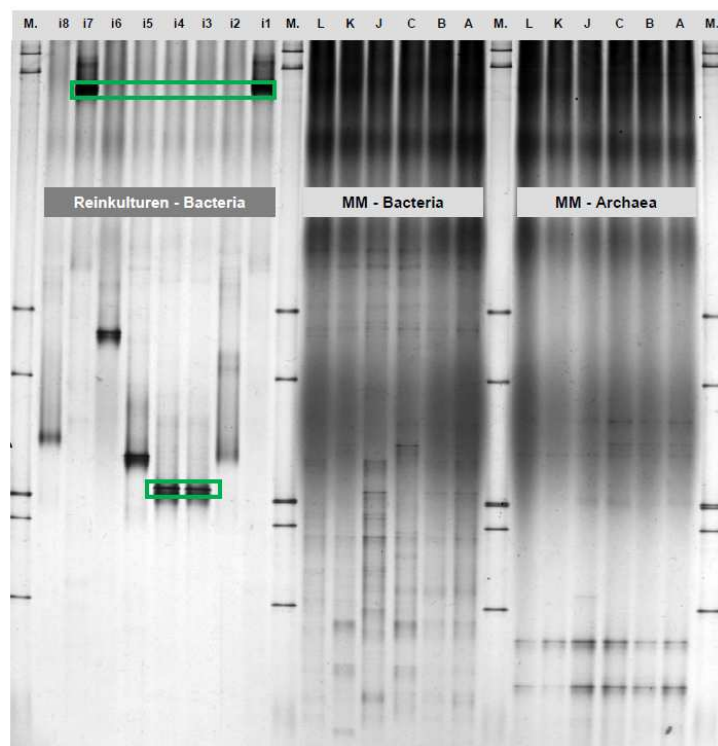


Abbildung 26 – Auftrennung von DNS-Spezies mittels GE (REITSCHULER 2011)

## IV. Ergebnisse

### 1. Lokale Geologie

Die geologische Karte befindet sich im Anhang. Zusätzlich wurden noch insgesamt vier Profile erstellt, die sich auch im Anhang befinden. Die Profile I (Spur grün) und II (Spur blau) verlaufen annähernd N-S und schneiden die Antiklinale etwas schräg an. Die Profile III (Spur rot) und IV (Spur gelb) verlaufen längs zur Antiklinal Struktur.

Sehr schön zeichnet sich in den erstellten Profilen die Antiklinal-Struktur ab. Der Kern aus Wettersteinkalk ist tektonisch größtenteils von Hauptdolomit überlagert. Die dazwischen liegenden Raibler Schichten sind weitestgehend ausgequetscht und nur reliktsch und an Störungen gebunden, vorhanden. Die Vorkommen von Gesteinen der Gosau Gruppe sind sehr klein und kommen auf dieser kleinen Darstellung fast nicht zur Geltung. Dies gilt auch für quartäre Ablagerungen. Zusätzlich wurden die an oder in unmittelbarer Nähe der Profilsuren austretenden Quellen in den Profilen vermerkt.

#### 1.1. Lithologie – makroskopische Beschreibung

##### 1.1.1. *Wettersteinkalk und -dolomit*

Die Vorkommen von Wettersteinkalk und -dolomit im Bereich der Pendling-Antiklinale zeichnen sich durch eine deutliche Bankung aus und sind somit der lagunären Fazies zuzurechnen. Die Bankung variiert zwischen mehreren dm und 2 m, liegt aber meistens um 0,5-1 m. Es dominiert zweifellos die kalkige Ausbildung, sekundär treten ebenfalls gebankte, geringmächtige Dolomitabfolgen auf.

Bei der kalkigen Ausbildung handelt es sich um gebankte Wechselfolgen von im frischen Anschlag weißen bis beige Kalken. Bis auf sehr selten erkennbare Bivalvenschalen sind makroskopisch keine Fossilien zu erkennen. Des Weiteren treten mm-Rhythmite mit stromatolithischen Gefügen auf, die sich im angewitterten Gestein gut abheben. Darüber hinaus kommen auch mittel- bis grobspätige Varianten vor, vereinzelt sind immer wieder dolomitierte Areale ausgebildet. Die Dolomitierung ist schichtgebunden und tritt im Wechsel mit

Kalken auf. Teilweise scheint die Dolomitisierung auch an Störungen gebunden zu sein (GRUBER et al. 2009). Bedingt durch das spröde Verhalten sind die dolomitischen Bereiche oft kataklastisch ausgeprägt. Die Mächtigkeit des Wettersteinkalk und –dolomit liegt in diesem Gebiet bei 800 bis 1000 m (THÖNY 2003). Nahezu alle Aufschlüsse zeigen mehr oder weniger intensive Verkarstung. Diese setzt bevorzugt an Klüften und Schichtflächen an. Man findet sowohl Kleinformen (Karren) als auch Großformen (Halbhöhlen, Höhlen) der Verkarstung (2).

### *1.1.2. Nordalpine Raibler Schichten*

Diese Schichtgruppe, die im Gebiet hauptsächlich durch Raibler Schiefer und verhältnismäßig untergeordnet durch Raibler Karbonate vertreten ist, erweist sich als stark spröde/tektonisch deformiert. Vor allem die Dolomite sind stark kataklastisch. In Störungszonen sind häufig Kakirite und feinkörnige Gesteinszerreißel anzutreffen.

Die klastischen Bereiche der Raibler Schichtgruppe sind im Gebiet zumeist durch dunkelbraune bis dunkelgraue Schiefer vertreten, die rostbraune Verwitterung aufweisen. Sie liegen stark deformiert und zerschert vor, die Schieferung ist allerdings dennoch erkennbar. Die karbonatische Entwicklung ist vor Ort durch Dolomite und Kalke vertreten. Der Dolomit kennzeichnet sich durch gelbbraunliche Färbung, starke Zerschierung und – wenn erkennbar – dünne Bankungsdicke aus. Aufgrund der starken lithologischen Ähnlichkeit der Raibler Dolomite zum Hauptdolomit lässt sich im Gelände jedoch keine eindeutige Unterscheidung vornehmen. Die Karbonate zeigen zum einen Bankung im dm-Bereich und weisen rote Färbung auf. Mit freiem Auge sind Fossilien erkennbar. Zum anderen gibt es gelbliche Kalke mit massigen Vorkommen der typischen Auster *Lophamontiscaprilis*. Diese Kalke wurden als Lesesteine, aber leider nicht anstehend gefunden. Die Gesamtmächtigkeit der Raibler Schichten erreicht im Gebiet bis zu 200 m (GRUBER et al. 2009).

### *1.1.3. Hauptdolomit*

Es sind hell- bis dunkelgraubraune, strukturlose Dolomikrite und -sparite vertreten, die im dm-Bereich gebankt sind. Weiters treten laminierte, stromatolithische

Dolomite auf, die vereinzelt schwachen Bitumengehalt aufweisen können (Geruch). Hauptdolomit zeigt bei tektonischer Beanspruchung sprödes Verhalten. Daher weisen die Hauptdolomitvorkommen im Gebiet ein sehr zerrüttetes, kataklastisches Erscheinungsbild auf. Tektonische Brekzien, Kataklastite und Kakirite sind häufig.

Aufgrund der schon angesprochenen starken lithologischen Ähnlichkeit zu Raibler Dolomit, ist eine exakte Abgrenzung zu diesem nicht möglich. Daher konnte auch die Basis des Hauptdolomits noch nicht ermittelt werden (GRUBER et al. 2009). Aufgrund der bisherigen offiziellen geologischen Karten wurde diese Abfolge dem Hauptdolomit zugeordnet. Der ansonsten sehr große Mächtigkeiten erreichende Hauptdolomit ist im Gebiet lediglich einige 100 m mächtig.

#### *1.1.4. Gosau Gruppe*

Die synorogenetischen Bildungen der Gosau-Gruppe, die sich diskordant auf dem eoalpin gefalteten, triassischen Untergrund absetzen, zeichnen sich durch ihre lithologische Vielfalt aus. Im Pendlingzug kommen Gesteine der Gosau-Gruppe nur vereinzelt und recht kleinräumig vor. In der Literatur wurde erwähnt, dass die Ablagerungen der Gosau Gruppe bevorzugt an Deckengrenzen und frühen tektonischen Linien erhalten blieben. Dies bestätigt sich im Gelände. Die Vorkommen sind an Dehnungsstrukturen im Scharnierbereich der antiklinalen Falte und Störungen gebunden.

Es finden sich rote Konglomerate, Kalksandsteine, Sandsteine, Kalke und Brekzien als auch mergelige und kohlige Erscheinungen. In Verbindung mit diesen Gesteinen bilden sich gute Böden, die hier zur Almnutzung beitragen.

Monomikte Brekzien sind als Erosionsrelikte der basalen Gosau zu interpretieren. Die sehr kleinen Vorkommen überlagern Wettersteinkalk und Hauptdolomit (?) diskordant, die Komponenten bestehen aus Wettersteinkalk und anderen Karbonaten. Die maximal wenige cm großen Klaster können angular bis subangular auftreten, die pelitische Matrix ist orange bis rot. Die Konglomerate mit grauer bis roter Matrix führen polymikte Komponenten, die bis zu mehrere cm groß und gut gerundet bis gerundet sind. Häufig handelt es sich bei den Komponenten um Porphyroide, in geringerem Ausmaß treten kristalline Komponenten auf (nach GRUBER et al. 2009: Untere Gosau-Subgruppe). An

größeren Aufschlüssen kann man Gradierungen bzw. einzelne Schüttungslagen erkennen. An wenigen Stellen enthalten die Konglomerate Gastropodenreste (*Actaeonella*, *Nerinea*). Die Kalksandsteine sind im frischen Anschlag grünlich braun bis rotbraun und weisen mehr oder weniger starken Kalkgehalt (Matrix und Komponenten) auf. Die Sandkomponenten bewegen sich im Fein- bis Mittelsandbereich.

Im frischen Bruch sind die Kalke beige bis hellbraun, stellenweise sind rote Bereiche ausgebildet. Eine Schichtung ist erkennbar, allerdings nicht deutlich ausgebildet. Die Vorkommen an Gosau-Kalken sind besonders fossilreich (Korallen), sie liegen als mikritische bis sparitische Packstones vor. Der Fossilbestand setzt sich aus Bivalven (typisches Hippuritenriff), Algenschutt, Korallen und Schalenresten zusammen. Nordwestlich der Hundsalz am Waldrand findet sich eine Fining-Upwards-Sequenz von Konglomeraten zu Kalken aufgeschlossen. Als für die Gosau Gruppe klassisch, befindet sich unweit des kleinen ‚Transgressionseignisses‘ ein Hippuritenriff.

#### *1.1.5. Quartäre Ablagerungen*

Die geringmächtigen quartären Auflagen sind aufgrund des flächendeckenden Bewuchses mit Gras, kleinen Büschen, Nadelbäumen etc. nur entlang von Bachläufen aufgeschlossen. Einige Vernässungszonen – vor allem im näheren Bereich der Hundsalz und an der nördlichen Grenze zwischen Wettersteinkalk und Hauptdolomit – deuten auf quartäre Unterlage hin, da Grundmoräne wasserstauende Eigenschaften besitzt. So neigen Mulden und Senken des Plateaus zur Moorbildung (SPÖTL 2011). An kleineren Gräben ist über der Grundmoräne Torf aufgeschlossen.

Mäßig bis stärker konsolidierte, diamiktische Ablagerungen sind als Grundmoräne des hochglazialen (Würm) Inntalgletschers anzusprechen (GRUBER et al. 2009). Die Diamikte sind grau bis graubraun, die Matrix schluffig bis tonig und das Gefüge ist typisch scherbilig. Bei den Komponenten handelt es sich vor allem um lokale Karbonate. Nur bei einem geringen Bestandteil (gut 5 %) des Geschiebes handelt es sich um Kristallin. Die karbonatischen Komponenten sind subangular bis kantengerundet, teilweise finden sich gekritzte Klaster. Die kristallinen Komponenten sind deutlich besser gerundet und bestehen aus Gneisen,



Amphiboliten, Glimmer- und Grünschiefern. Stellenweise findet man Findlinge (hauptsächlich Gneise), die mit bis zu 1 m<sup>3</sup> Größe förmlich ins Auge stechen.

Südwestlich der Ebenwaldalm liegt vermutlich eine Massenbewegung vor. Die sehr unruhige Morphologie spricht dafür. Auf Aktivität deutende Erscheinungen wie Nackentälchen, Bergzerreißung oder Säbelwuchs konnten nicht eindeutig festgestellt werden. Die Ausmaße betragen etwa 700 m Länge in NE-SW und eine Breite um 100 m. Im Gelände können die genauen Grenzen nicht festgestellt werden, da das Gebiet mit dichtem Jungwald bewachsen ist, es wurden Laserscanbilder des Landes Tirol zu Hilfe genommen.

## 1.2. Lithologie – mikroskopische Beschreibung

Die mikroskopische Untersuchung der erstellten Dünnschliffe erfolgte mit Hilfe von Herrn Dr. Resch. Für die taxonomische Klassifizierung waren mehrere Database im Internet dienlich ([www.eol.org](http://www.eol.org), [www.foraminifera.eu](http://www.foraminifera.eu), <http://paleodb.org>).

### 1.2.1. *Wettersteinkalk und –dolomit*

Durch die makroskopische Gesteinsansprache wurde der Wettersteinkalk einer lagunären Fazies zugeschrieben (Bankung im Meter-Bereich, stromatolithische Lagen). Der mikroskopische Befund bestätigt durch Biozönose (*Diplopora annulata*) und Sedimentstrukturen (stromatolithische Matten) diese Annahme. Es finden sich sowohl sehr seichte Ablagerungen, als auch ehemalige Sedimente, die etwas tiefere Bedingungen anzeigen. Aus fazieller Sicht sind die Gesteine (seichterer und tieferer) Lagunen- und Riffschutfazies zuzuordnen. Beim Lagunenfaziestyp sind häufig stromatolithische Matten (mit Geopetalgefgen in den Hohlräumen) als auch sedimentäre Brekzien ausgebildet. Teilweise finden sich kleine Onkoide, die ebenfalls auf bewegtes Flachwasser deuten.

Nach der Klassifizierung von Folk handelt es sich um schwach ausgewaschene Biosparite, locker und dicht gepackte Biomikrite und biogenführende Mikrite. Darüber hinaus wurde eine Probe genommen, die Anzeichen von Brekzierung zeigt und somit eventuell dem Oberen Wettersteinkalk zuzuteilen wäre (mdl. Mitt. RESCH, 2012). Die dolomitischen Partien zeigen vollkommene Umkristallisierung und große, zuckerkornfrmige Dolomite mit Zonarbau (Abbildung 30).

#### ◆ *Foraminiferen*

Die agglutinierenden Gattungen *Reophax* (Abbildung 27, links), *Glomospira* (Abbildung 27, rechts), *Textularia* (Abbildung 28, links) und Trochammina sind vertreten. Alle dieser Gattungen stellen keine besonderen Anforderungen an ihr Milieu und erweisen sich auch als unempfindlich gegenüber Schwankungen im Salzgehalt, was im Fall einer lagunären Fazies gegeben ist. Außerdem finden sich porzellanschalige Foraminiferen der Ordnung *Miliolida*. Diese Flachwasser bevorzugenden Formen besitzen aufgrund der Tatsache, dass sie ein kalkiges Gehäuse abscheiden, keine Toleranz gegenüber brackischem Wasser.

##### - *Reophax*

Biota → Chromista (Königreich) → Harosa (Subkönigreich) → Rhizaria (Infrakönigreich) → Foraminiferida (Stamm) → Polythalamea (Klasse) → Lituolida (Ordnung) → Hormosinidea (Großfamilie) → Hormosinidea (Familie) → *Reophax* (Gattung)

##### - *Glomospira*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminiferida (St.) → Polythalamea (Kl.) → Lituolida (Ord.) → Ammodiscoidea (Gf.) → Ammodiscidae (F.) → *Glomospira* (G.)

##### - *Textularia*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminiferida (St.) → Polythalamea (Kl.) → Textulariida (Ord.) → Textularioidae (Gf.) → Textulariidae (F.) → *Textularia* (G.)

##### - *Miliolida*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminifera (St) → Polythalamea (Kl.) → Miliolida (Ord.)

##### - *Trochammina*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamea (Kl.) → Trochamminida (Ord.) → Trochamminoidea (Gf.) → Trochamminidae (F.) → *Trochammina* (G.)

#### ◆ *Chlorophyten*

Die für den Laguentyp des Wettersteinkalk typische Grünalge *Diploporella annulata* ist vertreten (Abbildung 28, rechts), weiters auch *Thaumatoporella parvovesiculifera* (Abbildung 29, links). Die Art *Diploporella annulata* wächst optimal in sehr seichten Gewässern bis zu 5 m Tiefe, über der Sturmwellenwassertiefe. In

Bezug auf die Wasserbedingungen zeigt sich diese Alge tolerant, sie kann auch hypersalinare oder brackische Gewässer ertragen.

- *Diplopora annulata*

Biota → Plantae (Kr.) → Viridiaeplantae (Skr.) → Chloropyhta (Abt.) → Ulvophyceae (Kl.) → Dasycladales (Ord.) → Diploporaceae (F.) → Diplopora (G.) → Diplopora annulata (A.)

- *Thaumatoporella parvovesiculifera*

Biota → Plantae (Kr.) → Viridiaeplantae (Skr.) → Chloropyhta (Abt.) → Ulvophyceae (Kl.) → Thaumatoporellales (Ord.) → Thaumatoporellaceae (F.) → Thaumatoporella (G.) → Thaumatoporella parvovesiculifera (A.)

◆ *Cyanobacterien*

Die Cyanobakterien, die früher fälschlicherweise als Blaualgen bezeichnet wurden, sind durch die Gattungen *Zonotrichites* (Abbildung 29, rechts) und *Tubiphytes* vertreten. Beide Formen geben keine speziellen Hinweise auf ihr Milieu.

- *Zonotrichites*

Biota → Bacteria (Kr.) → Gracilicutes (Skr.) → Cyanobacteria (St.) → Cyanophyceae (Kl.) → Nostocales (Ord.) → Rivulariaceae (F.) → Zonotrichites (G.)

- *Tubiphytes*

Biota → Bacteria (Kr.) → Gracilicutes (Skr.) → Cyanobacteria (St.) → Cyanophyceae (Kl.) → Cyanophyceae ordo incertae sedis (Ord.) → Cyanophyceae familia incertae sedis (F.) → Tubiphytes (G.)

◆ *Arthropoden*

Die Gliederfüßer sind durch *Ostrakoden*, bei welchen es sich um Krebstiere handelt, vertreten. Die kleinen Schälchen finden sich des Öfteren, waren jedoch nicht näher zuzuordnen.

- *Ostracoda*

Biota → Animalia (Kr.) → Arthropoda (St.) → Crustacea (Ust.) → Ostracoda (Kl.)

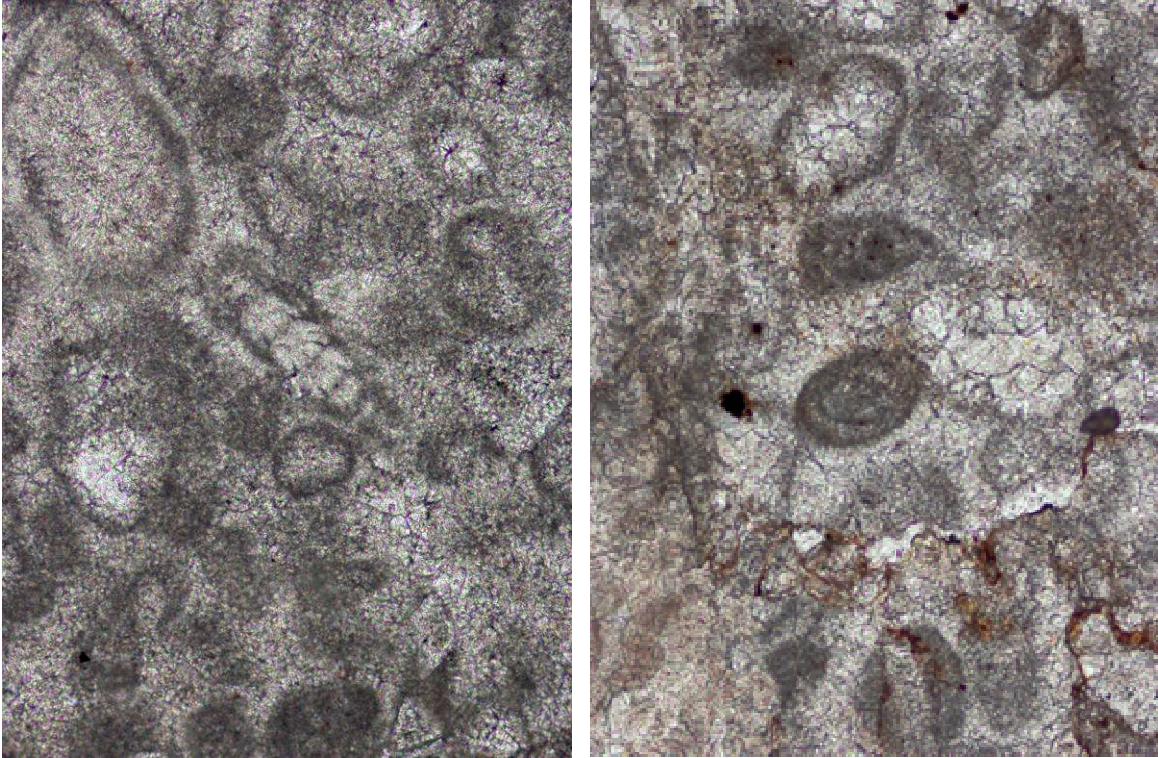


Abbildung 27 – links: Wettersteinkalk, Reophax (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Bildbaum bei Abzweigung zum Hasatal  
 rechts: Wettersteinkalk, Glomospira (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Hasatalgraben westlich der Buchackeralm

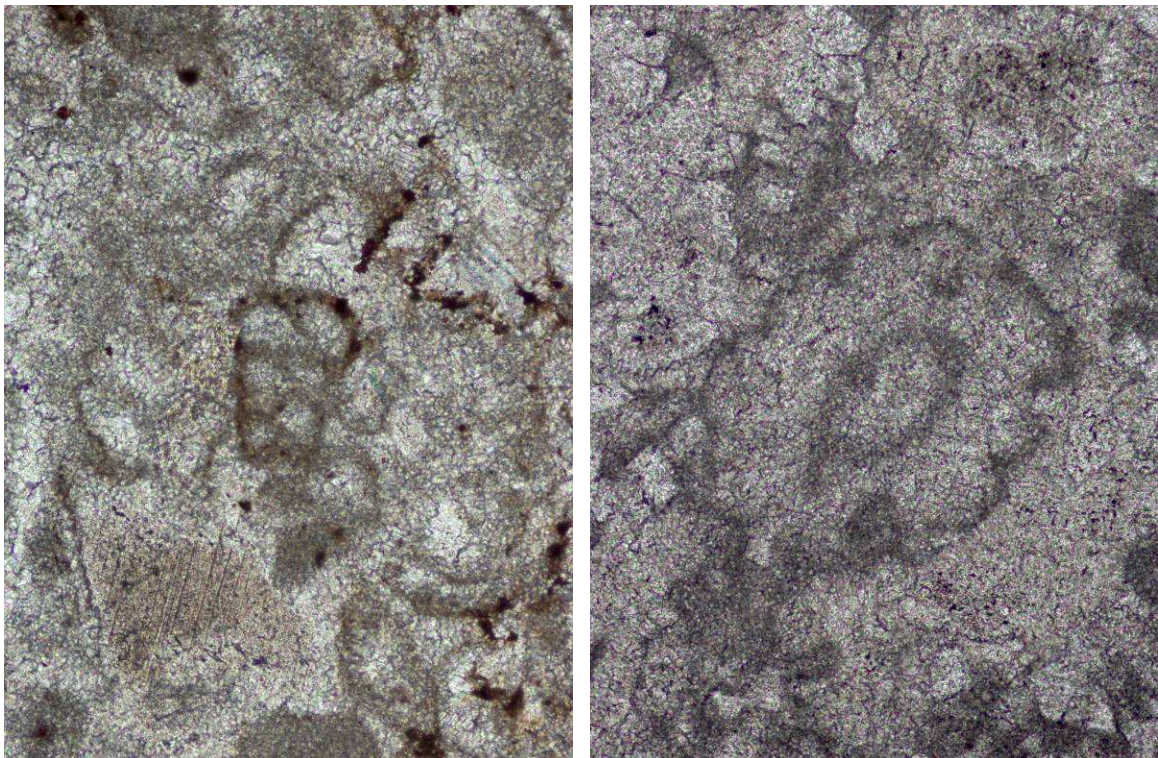


Abbildung 28 – links: Wettersteinkalk, Textularia (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Bildbaum bei Abzweigung zum Hasatal  
 rechts: Wettersteinkalk, Diplopora annulata (Chlorophyta), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Hasatalgraben westlich der Buchackeralm

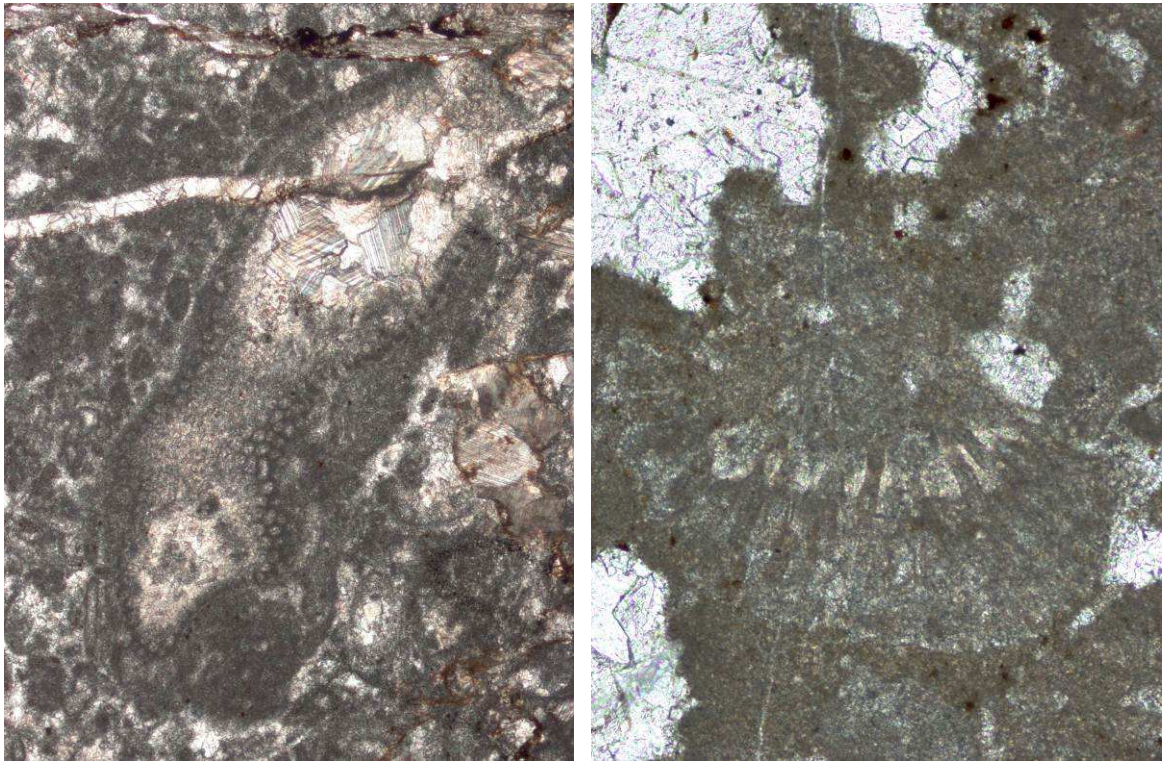


Abbildung 29 – links: Wettersteinkalk, *Thaumatoporella* par. (Chlorophyta), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Hasatalgraben westlich der Buchackeralm  
 rechts: Wettersteinkalk, *Zonotriches* (Cyanobacteria), Bildhöhe: 1,2 mm  
 Fundort: neben Weg östlich der Hundsalz

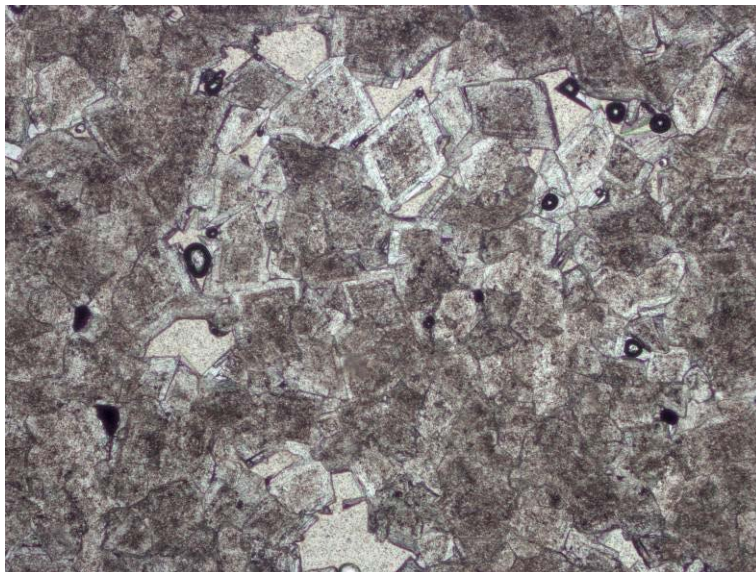


Abbildung 30 – Wettersteindolomit, zonierte Dolomit-Kristalle, Bildbreite 3 mm  
 Fundort: Bildbaum bei Abzweigung zum Hasatal

### 1.2.2. Nordalpine Raibler Schichten

Gesteine der Raibler Schichten weisen im Untersuchungsgebiet ein großes Spektrum an Aussehen und Zusammensetzung auf, es sind verschiedene Ausbildungen von terrigen-klastischen und marin-karbonatischen Serien vertreten.

Vorkommen der Muschel *Lopha montiscaprilis* deuten auf Obere Raibler Schichten (Obere Karbonatgesteinsserie) hin (mdl. Mitt RESCH, 2012). Dünnschliffe konnten nur von den Karbonaten erstellt werden.

Nach der Folk-Klassifikation handelt es sich bei den kalkigen Ausbildungen um dicht gepackte Biomikrite und nicht bis mäßig sortierte Biosparite. Die gute Zurundung der Komponenten und das Vorhandensein von Onkoiden sprechen für starke Wasserbewegung. Vereinzelt finden sich Komponenten terrigenen Ursprungs. Die dolomitischen Ausbildungen sind vollkommen umkristallisiert, die Kristallgröße jedoch kleiner als beim Hauptdolomit (Abbildung 36). Vereinzelt lassen sich – wenn auch undeutlich und daher nicht bestimmbar – Fossilienreste erkennen.

◆ *Foraminiferen*

An agglutinierenden Formen sind folgende Gattungen vertreten: *Glomospira* (Abbildung 31, links), *Tolypammia* (Abbildung 31, rechts), *Trochammia*. Die Gattung *Tolypammia* wächst gerne inkrustierend auf anderen Elementen auf. Außerdem sind kalkschalige Formen durch die Gattung *Lingulina* vertreten (Abbildung 32, links), porzellenschalige durch die Ordnung der *Milioliden*. Individuen letzterer waren nicht näher bestimmbar.

- *Glomospira*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminiferida (St.) → Polythalamea (Kl.) → Lituolida (Ord.) → Ammodiscoidea (Gf.) → Ammodiscidae (F.) → *Glomospira* (G.)

- *Tolypammia*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminiferida (St.) → Polythalamea (Kl.) → Lituolida (Ord.) → Ammodiscoidea (Gf.) → Ammodiscidae (F.) → *Tolypammia* (G.)

- *Lingulina*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminiferida (St.) → Polythalamea (Kl.) → Lagenida (Ord.) → Nodosarioidea (Gf.) → Nodosariidae (F.) → *Lingulina* (G.)

- *Miliolida*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Skr.) → Rhizaria (Ikr.) → Foraminifera (St) → Polythalamea (Kl.) → Miliolida (Ord.)

#### ◆ *Chlorophyta*

Die Grünalgen fanden sich durch *Poikiloporella duplicata* vertreten (Abbildung 32, rechts). Diese Form erweist sich als sehr tolerant und verträgt hypersalinare bis brackische Bedingungen

##### - *Poikiloporella duplicata*

Biota → Plantae (Kr.) → Viridaeplantae (Skr.) → Chlorophyta (Abt.) → Ulvophyceae (Kl.) → Dasycladales (Ord.) → Dasycladaceae (F.) → *Poikiloporella* (G.) → *Poikiloporella duplicata* (A.)

#### ◆ *Cyanobacteria*

Es ist wie auch bereits im Wettersteinkalk die Gattung *Zonotrichites* vertreten (Abbildung 33, links).

##### - *Zonotrichites*

Biota → Bacteria (Kr.) → Gracilicutes (Skr.) → Cyanobacteria (St.) → Cyanophyceae (Kl.) → Nostocales (Ord.) → Rivulariaceae (F.) → *Zonotrichites* (G.)

#### ◆ *Bivalvia*

Die für die Raibler Schichten typische *Lopha montiscaprilis* tritt auf (Abbildung 33, rechts). Diese Muschel gehört zur Familie der Austern. Sie stellt keine besonderen Anforderungen an ihr Milieu, so kann sie hypersalinaren bis brackischen Gewässern heimisch sein.

##### - *Lopha montiscaprilis*

Biota → Animalia (Kr.) → Mollusca (St.) → Bivalvia (Kl.) → Pteromorphia (Skl.) → Osteroida (Ord.) → Ostreoida (Gf.) → Ostreidae (F.) → Lophinae (G.) → *Lopha montiscaprilis* (A.)

#### ◆ *Scaphopoda*

Als weitere Weichtiere sind neben den Muscheln *Scaphopoden* (Kahnfüßer) vertreten.

##### - *Scaphopoda*

Biota → Animalia (Kr.) → Mollusca (St.) → Conchifera (Ust.) → Scaphopoda (Kl.)

#### ◆ *Echinoidea*

Für die Raibler Schichten ist charakteristisch, dass sie viele Echinodermen-Reste finden. So finden sich zahlreiche Bestandteile von Seeigeln (Abbildung 34, links).

Meist war es nicht möglich, sie näher zu bestimmen. Nur ein Stachel-Querschnitt konnte der Familie der *Cidaridae* zugeordnet werden (Abbildung 34, rechts).

- *Cidaridae*

Biota → Animalia (Kr.) → Echinodermata (St.) → Echinozoa (Sst.) → Echinoidea (Kl.) → Cidaroidea (Sk.) → Cidaroida (Ord.) → Cidaridae (Gf.) → Cidaridae (F.)

◆ *Holothuridea*

Auch Holothurien-(Seegurken)-Reste sind im Karn sehr häufig (Abbildung 35). Querschnitte der Plättchen, die in die Haut des Organismus eingearbeitet sind, kann man leicht an ihrer Struktur (wie gegengleiche Dreiecke) erkennen.

- *Holothuria*

Biota → Animalia (Kr.) → Echinodermata (St.) → Echinozoa (Sst.) → Holothuroidea (Klasse) → Aspidochirotida (Ordnung) → Holothuriidae (Familie) → *Holothuria* (Gattung)

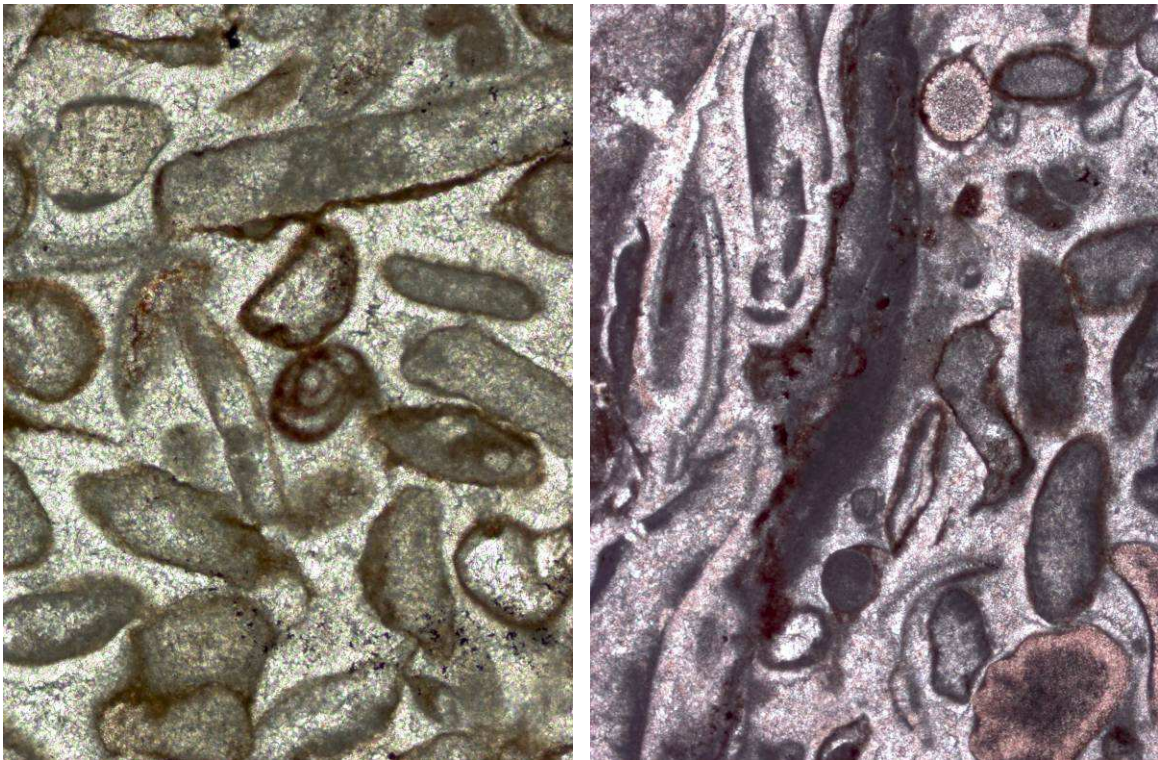


Abbildung 31 – links: Raibler Kalk, *Glomospira* (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm,  
Fundort: neben Tallner Bach östlich der Daxerhütte  
rechts: Raibler Kalk, *Tolypammina* (Foraminifera), Bildhöhe 3 mm  
Fundort: Graben nördlich der Buchackeralm



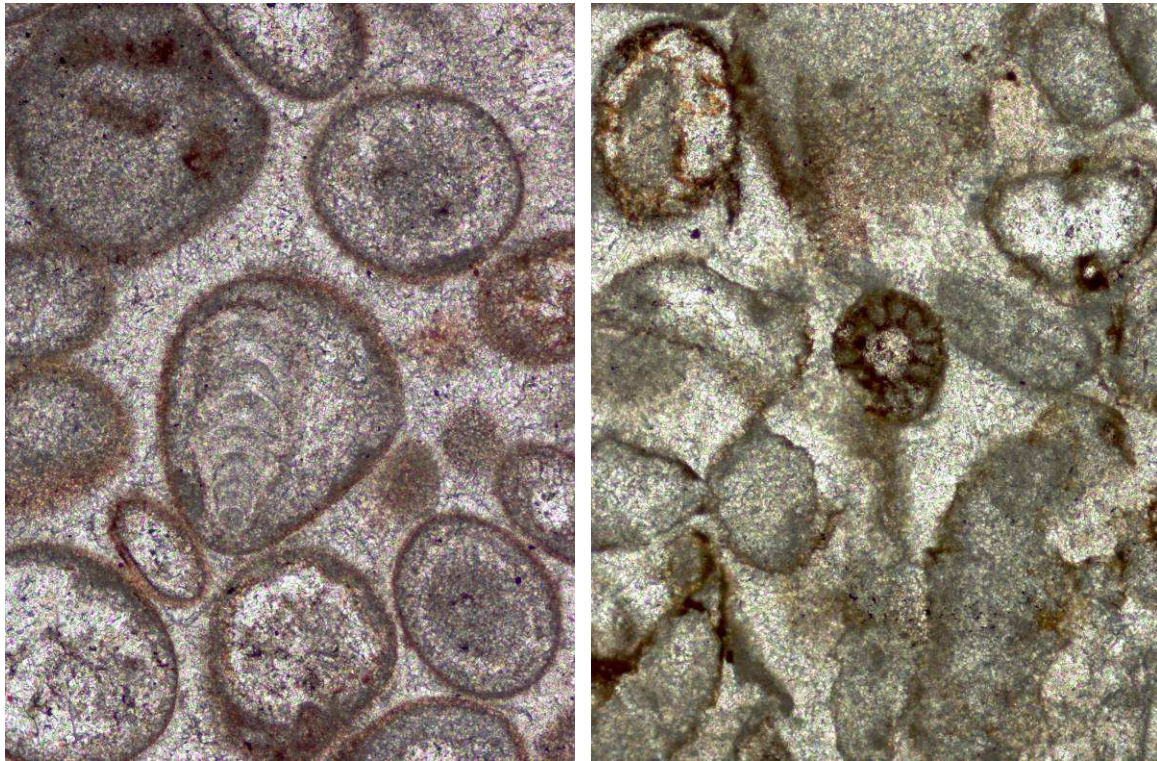


Abbildung 32 – links: Raibler Kalk, *Lingulina* (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Graben nördlich der Buchackeralm  
 rechts: Raibler Kalk, *Poikiloporella duplicata* (Chlorophyta), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: neben Tallner Bach nördlich der Daxerhütte

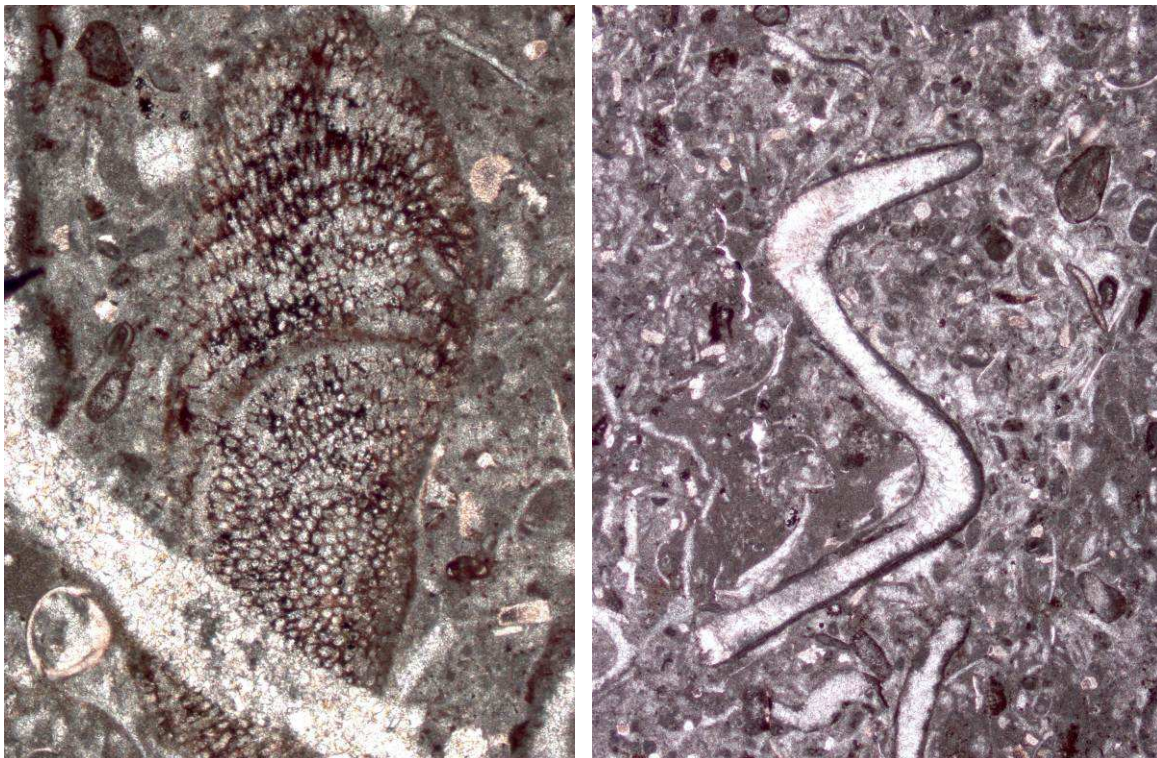


Abbildung 33 – links: Raibler Kalk, *Zonotrichites* (Cyanobacteria), Bildhöhe 3 mm  
 rechts: Raibler Kalk, *Lophamontiscaprilis* (Bivalvia), Bildhöhe 6 mm  
 Fundort (beide): Graben nördlich der Buchackeralm

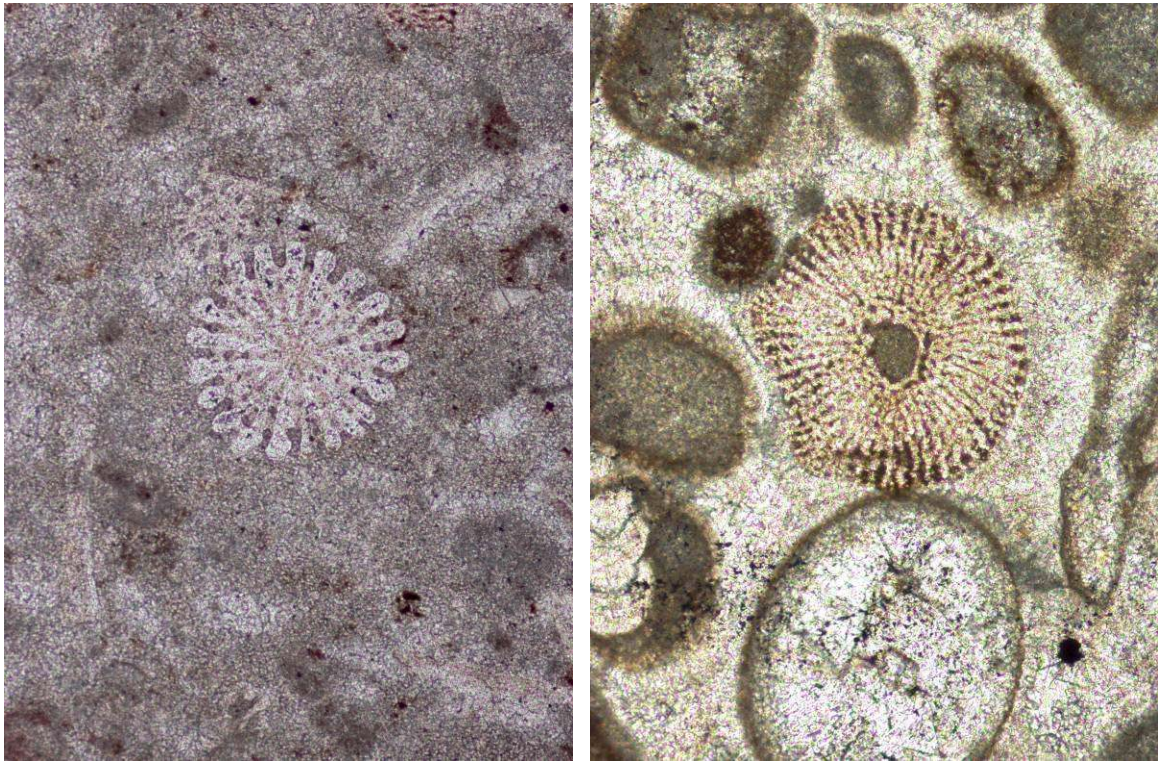


Abbildung 34 – links: Raibler Kalk, Echinoidea, Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: Graben nördlich der Buchackeralm  
 rechts: Raibler Kalk, Cidaridae (Echinoidea), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: neben Tallner Bach östlich der Daxerhütte

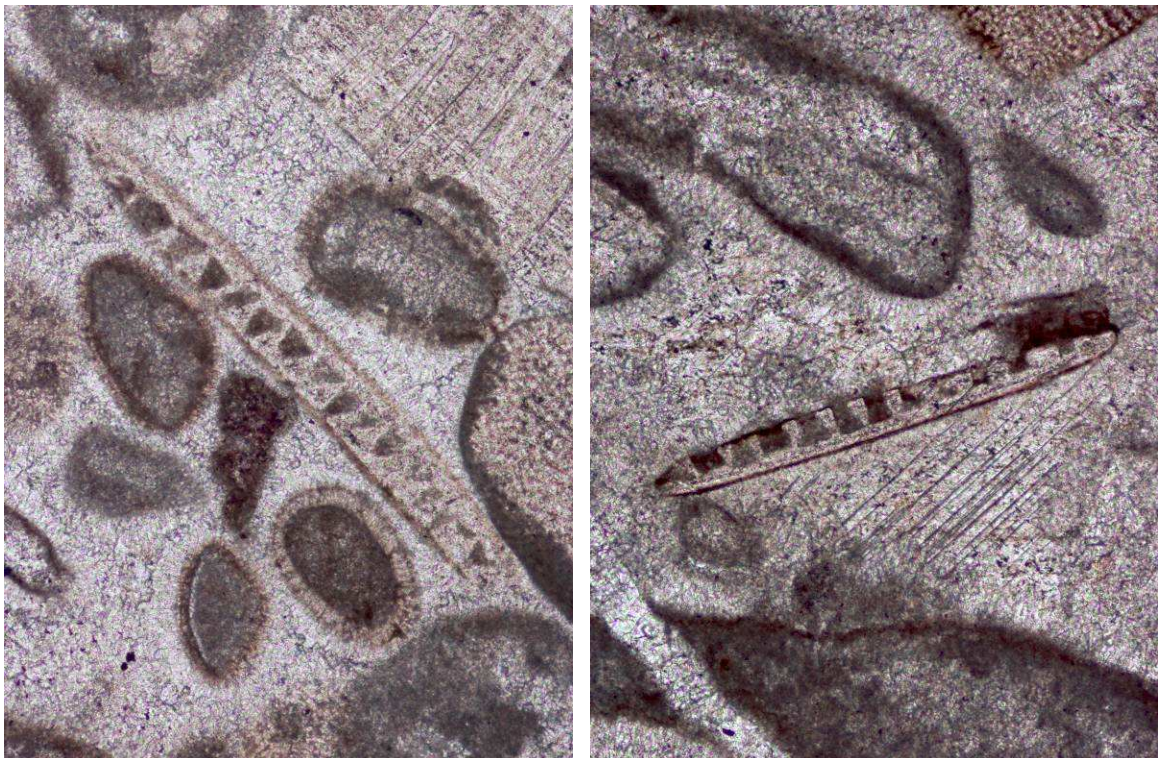


Abbildung 35 – Raibler Kalk, Holothuridea, Bildhöhe 1,2 mm  
 links: Fundort: neben Tallner Bach östlich der Daxerhütte  
 rechts: Fundort: Graben nördlich der Buchackeralm

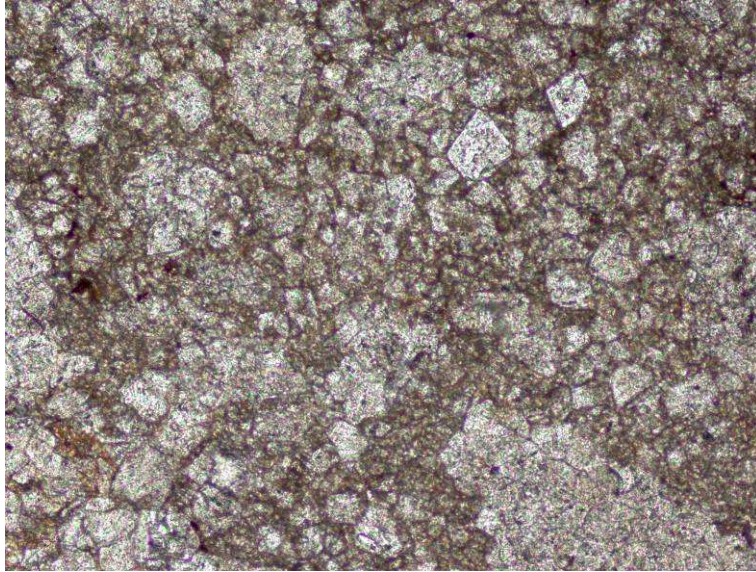


Abbildung 36 – Raibler Dolomit, Bildbreite 1,2 mm  
Fundort: Hasatalgraben westlich der Buchackeralm

### 1.2.3. *Hauptdolomit*

Aufgrund des starken Grades an Zerrüttung gestaltete sich die Probenentnahme und die weitere Verarbeitung als schwierig.

Oftmals ist Hauptdolomit im Untersuchungsgebiet als synsedimentäre und tektonische Brekzie vertreten (Abbildung 37). Eine genauere stratigraphische Zuordnung war nicht möglich. Die Kristallgröße ist gröber als bei Dolomiten der Raibler Schichten. Bei den stark umkristallisierten Spariten ist kein fossiler Inhalt mehr zu erkennen.



Abbildung 37 – Hauptdolomit, sedimentäre Brekzie, Bildbreite 6 mm  
Fundort: Graben nördlich der Buchackeralm

#### 1.2.4. Gosau Gruppe

Die Gesteine der Gosau Gruppe sind im Untersuchungsgebiet durch Porphyroid-haltige Konglomerate, Kalke und Kalksandsteine vertreten. Kalke und Kalksandsteine wurden anhand von Dünnschliffen untersucht.

Nach Folk handelt es sich bei der basalen Gosau um Brekzien mit locker gepackten Biomikrit-Komponenten (Abbildung 47), die Kalke sind locker bis dicht gepackte Biomikrite, biogenführende und bituminöse Mikrite. Die bituminösen Mikrite entstammen brackisch bis limnischem Ablagerungsmilieu. Bei den Kalksandsteinen handelt es sich um Quarz-Sublitharenite (Abbildung 45), die textuell als unreif anzusprechen sind. Das Gefüge ist korngestützt, die Zwischenräume sind sparitisch verfüllt. Auch die Arenite können bituminöse Lagen führen (Abbildung 46).

Ein feingeschichteter Vertreter der limnischen Fazies (Abbildung 44, rechts) mit Gastropoden-Resten und bituminösen Einlagen ist sehr ähnlich den Vorkommen bei der Zöttbachalm (nördlich der Kaiserklamm im Brandenberger Tal, mdl. Mitteilung RESCH 2012). Außerdem findet sich ein kleines Hippuritenriff in sandig bis mergeligen Kalken. Somit sind die Ablagerungen eindeutig der Brandenberger Gosau zuzuschreiben.

#### ◆ Foraminiferen

Agglutinierende Foraminiferen sind durch die Gattungen *Glomospira* (Abbildung 38, links), *Tolypamma* (Abbildung 39, links), Trochamminoides (Abbildung 39, rechts) und die Ordnung *Textulariida* (Abbildung 38, rechts) vertreten. *Tolypamma* kommt inkrustierend vor. Diese Formen sind nicht auf ein bestimmtes Milieu spezialisiert und vertragen Schwankungen im Salzgehalt des Meeres. An porzellanschalenigen Foraminiferen finden sich die Gattungen *Triloculina* (Abbildung 40, links) und *Quinqueloculina* (Abbildung 40, rechts), die zu den Milioliden gehören. Diese Formen vertragen normale und höhere Salinität, aber kein Brackwasser, sind daher rein marin. Sie bevorzugen warmes Flachwasser.

#### - *Glomospira*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Ukr.) → Rhiozaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamia (Kl.) → Lituolida (Ord.) → Ammodiscoidea (Üf.) → Ammodiscidae (F.) → *Glomospira* (G.)

- *Tolypammina*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Ukr.) → Rhiozaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamea (Kl.) → Lituolida (Ord.) → Ammodiscoidea (Üf.) → Ammodiscidae (F.) → Tolypammina (G.)

- *Trochamminoides*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Ukr.) → Rhiozaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamea (Kl.) → Lituolida (Ord.) → Lituotuoidea (Üf.) → Trochamminoidae (Fam.) → Trochamminoides (G.)

- *Textulariida*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Ukr.) → Rhiozaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamea (Kl.) → Textulariida (Ord.)

- *Triloculina*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Ukr.) → Rhiozaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamea (Kl.) → Miliolida (Ord.) → Miliolidea (Üf.) → Miliolidae (F.) → Triloculina (G.)

- *Quinqueloculina*

Biota → Chromista (Kr.) → Harosa (Ukr.) → Rhiozaria (Ikr.) → Foraminifera (St.) → Polythalamea (Kl.) → Miliolida (Ord.) → Miliolidea (Üf.) → Hauernidae (F.) → Quinqueloculina (G.)

◆ *Cyanobacteria*

Cyanobakterien sind durch die Klasse *Porostromata* vertreten (Abbildung 41, links), eine genauere Bestimmung war nicht möglich. *Porostromata* können in marinen Gewässern mit hohem bis niedrigem Salzgehalt, in brackischen Gewässern und in Süßwässern auftreten.

- *Porostromata*

Biota → Bacteria (Kr.) → Gracilicutes (Ukr.) → Cyanobacteria (St.) → Porostromata (Kl.)

◆ *Bivalvia*

Die Muscheln sind unter anderem durch die für die Gosau Gruppe typische Gattung *Plagioptychus* repräsentiert (Abbildung 41, rechts). Besonders auffällig für diese Form sind die Hohlräume im Schalenquerschnitt (Abbildung 41, rechts). Sehr typisch ist weiters die Gattung *Hippurites* (Abbildung 42), die gerne Riffe aufbaute. Ihre Schalen können durch Kieselschwämme angebohrt sein (Abbildung 43, links), die dadurch entstehenden charakteristischen Kanälchen werden als *Vioa* bezeichnet.

- *Plagioptychus*

Biota → Animalia (Kr.) → Mollusca (St.) → Bivalvia (Kl.) → Heterodonta (Ukl.) → Hippuritoida (Ord.) → Plagioptychicea (Üf.) → Plagioptychidae (F.) → Plagioptychus (G.)

- *Hippurites*

Biota → Animalia (Kr.) → Mollusca (St.) → Bivalvia (Kl.) → Heterodonta (Ukl.) → Hippuritoida (Ord.) → Hippuritacea (Üf.) → Hippuritidae (F.) → Hippurites (G.)

◆ *Echinoidea*

Untergeordnet finden sich Komponenten von Seeigeln.

- *Echinoidea*

Biota → Animalia (Kr.) → Echinodermata (St.) → Echinozoa (Sst.) → Echinoidea (Kl.) →

◆ *Holothuridea*

Auch Bestandteile von Seegurken finden sich in den Proben. Eine Besonderheit stellt ein genau getroffener Querschnitt von einem Holothurien-Rädchen dar, einer kleinen Struktur in der Haut der Tiere (Abbildung 43, rechts).

- *Holothuria*

Biota → Animalia (Kr.) → Echinodermata (St.) → Echinozoa (Ust.) → Holothuroidea (Kl.) → Aspidochirotida (Ord.) → Holothuriidae (F.) → Holothuria (G.)

◆ *Crinoidea*

Als dritte den Echinodermen zugehörige Klasse fanden sich auch Crinoiden – Seelilien – in den Proben vertreten.

- *Crinoidea*

Biota → Animalia (Kr.) → Echinodermata (St.) → Crinozoa (Ust.) → Crinoidea (Kl.)

◆ *Anthozoa*

Die so genannten Blumentiere sind durch Steinkorallen – *Scleractinien* – vertreten (Abbildung 44, links).

- *Scleractinia*

Biota → Animalia (Kr.) → Cnidaria (St.) → Anthozoa (Kl.) → Hexacorallia (Ukl.) → Scleractinia (Ord.)

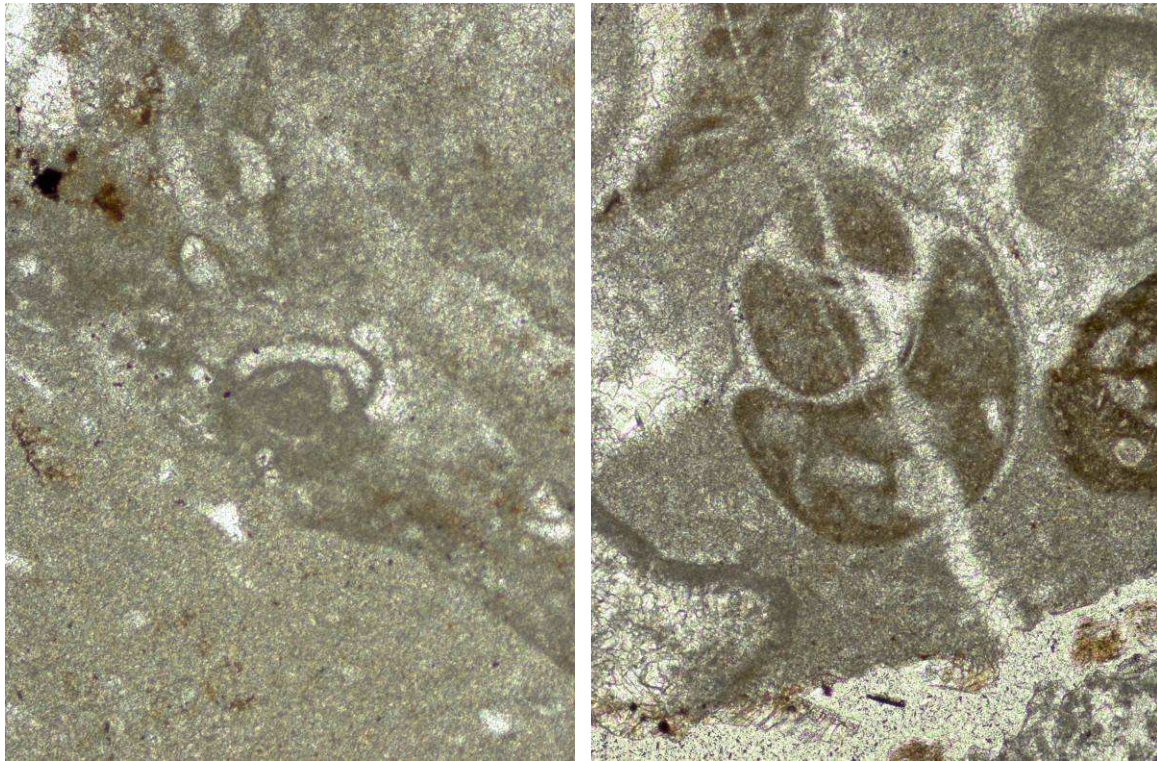


Abbildung 38 – links: Gosau Kalk, *Glomospira* (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 rechts: Gosau Kalk, *Textulariida* (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort (beide): neben Weg südlich der Hundsalz

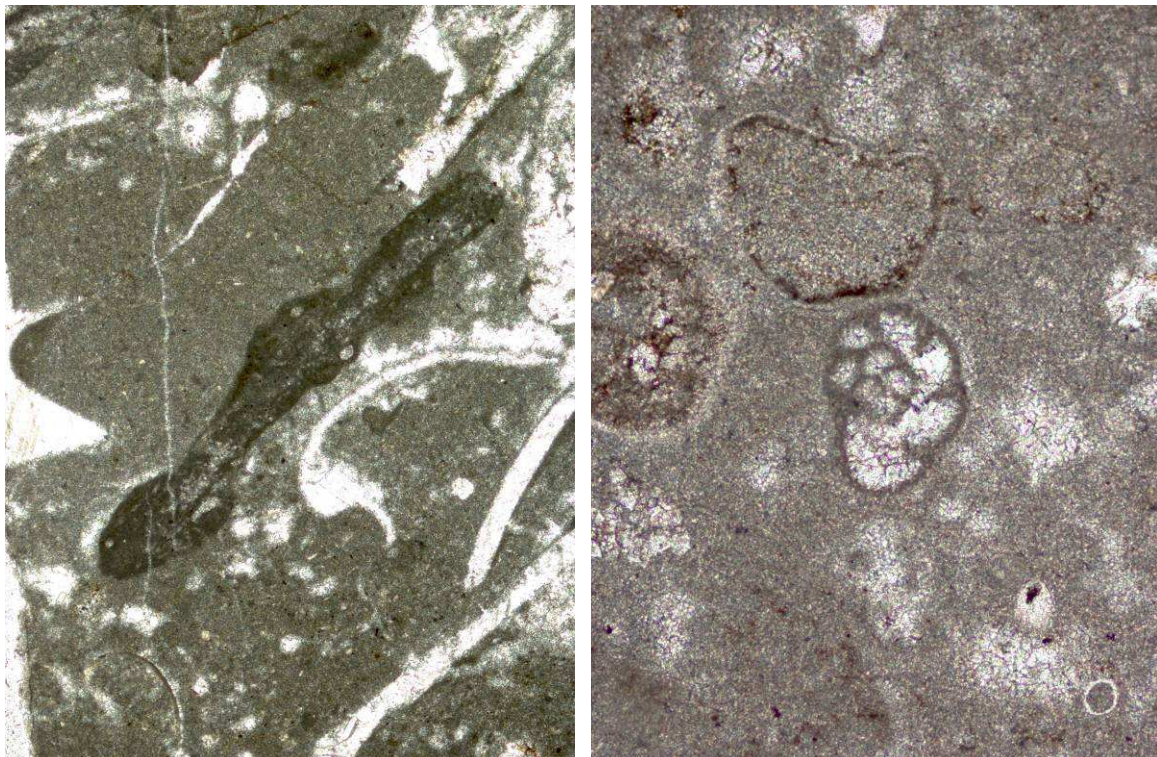


Abbildung 39 – links: Gosau Kalk, *Tolypammina* (Foraminifera), Bildhöhe 3 mm  
 Fundort: neben Weg südlich der Hundsalz  
 rechts: Gosau Kalk, *Trochamminoides* (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: östlich der Serpentine des Weges zur Hundsalz

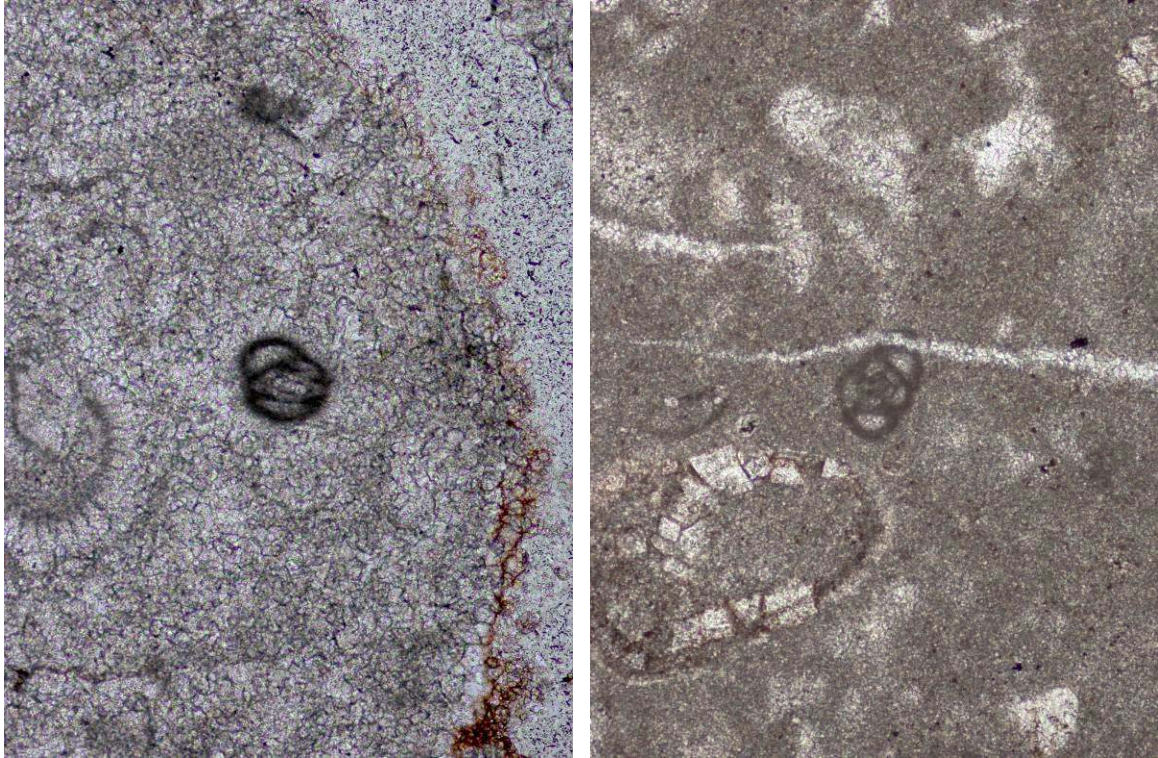


Abbildung 40 – links: Gosau Kalk, Triloculina (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: neben Tallner Bach östlich der Daxerhütte  
 rechts: Gosau Kalk, Quinqueloculina (Foraminifera), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: östlich der Serpentine des Weges zur Hundsalzm

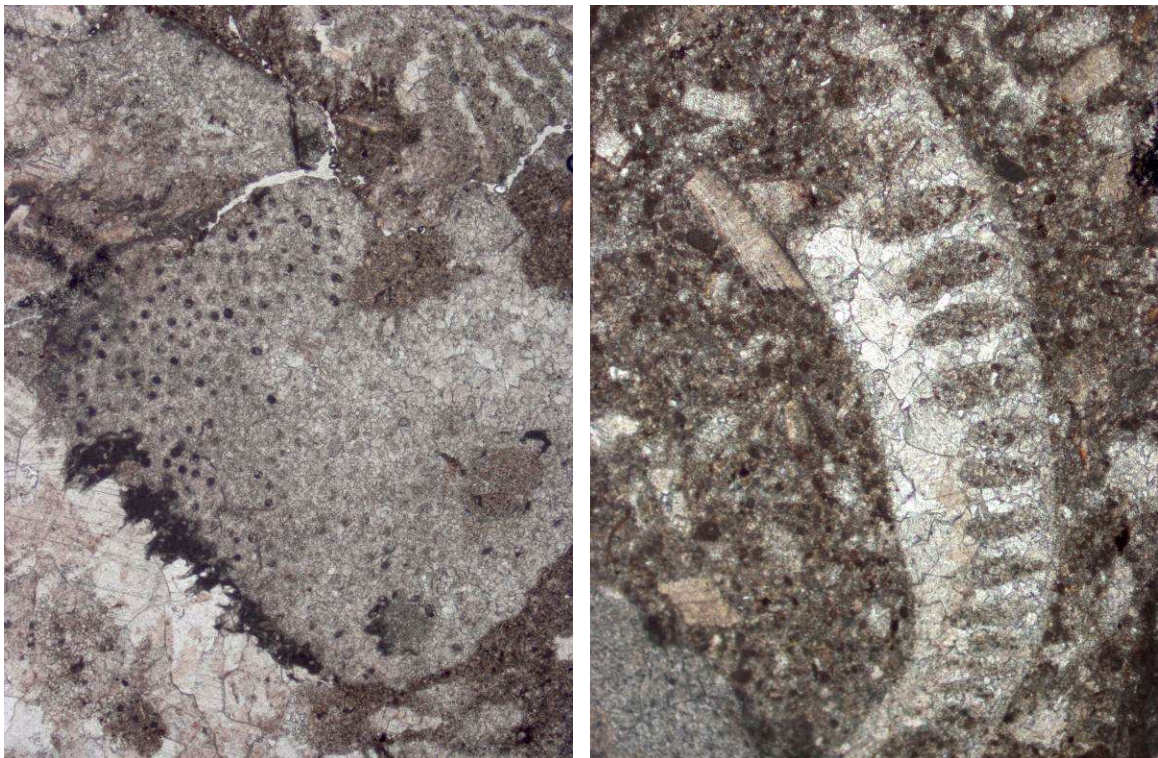


Abbildung 41 – links: Gosaukalk, Porostromata (Cyanobacteria), Bildhöhe 6 mm  
 rechts: Gosaukalk, Plagioptychus (Bivalvia), Bildhöhe 3 mm  
 Fundort (beide): neben Weg östlich des 1530m-Punktes



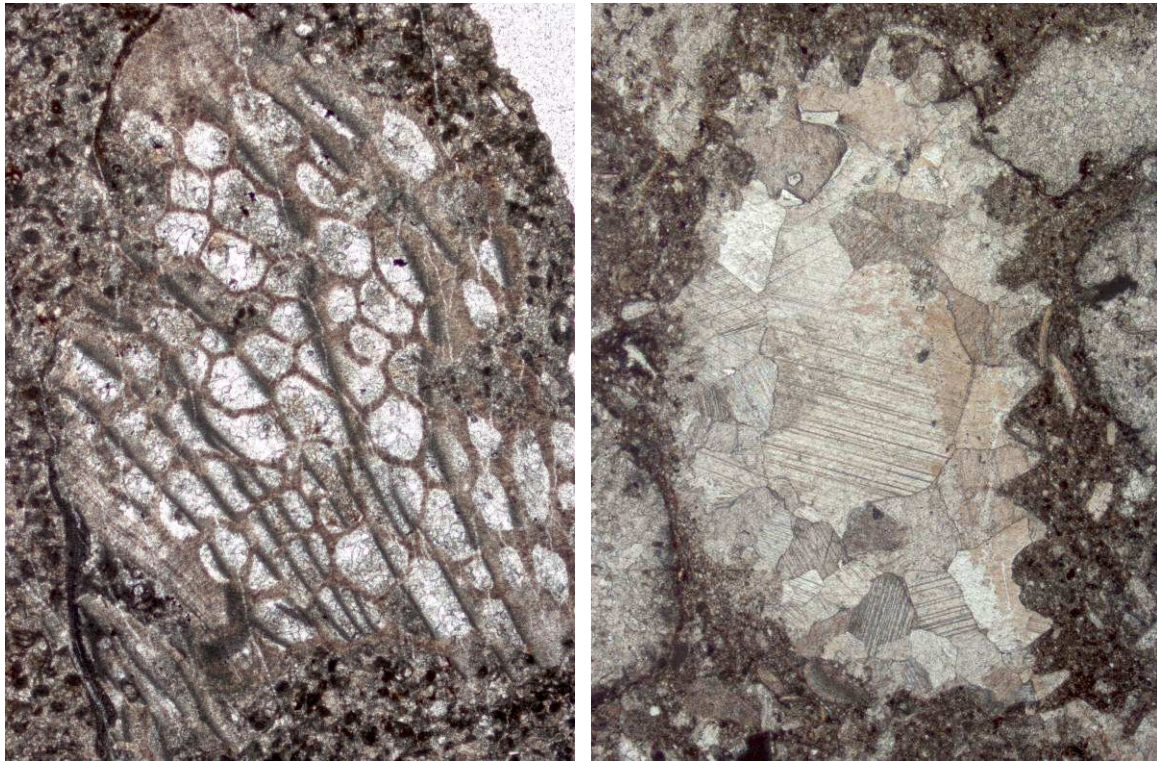


Abbildung 42 – links: Gosau Kalk, Hippurites (Bivalvia), Bildhöhe 3 mm  
 Fundort: neben Weg östlich des 1530m-Punktes  
 rechts: Gosau Kalk, Hippurites (Bivalvia), Bildhöhe 6 mm  
 Fundort: neben Weg östlich des 1530m-Punktes



Abbildung 43 – links: Gosau Kalk, Hippurites (Bivalvia), Bildhöhe 12 mm  
 Fundort: neben Weg östlich des 1530m-Punktes  
 rechts: Gosau Kalk, Holothuria (Holothuridea), Bildhöhe 1,2 mm  
 Fundort: östlich der Serpentine des Weges zur Hundsalzm

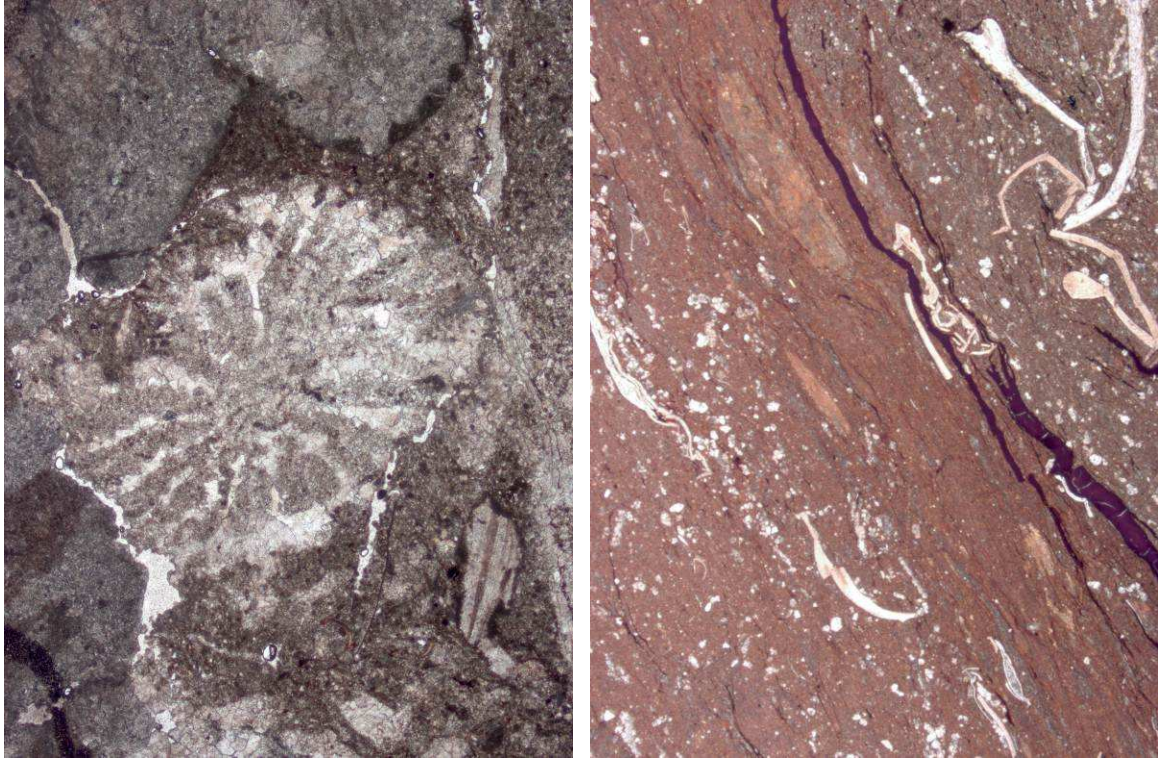


Abbildung 44 – links: Gosaukalk, Scleractinia (Anthozoa), Bildhöhe 6 mm  
 Fundort: neben Weg östlich des 1530m-Punktes  
 rechts: bituminöser Gosaukalk, Bildhöhe 6 mm  
 Fundort: Hasatalgraben nördlich der Buchackeralm

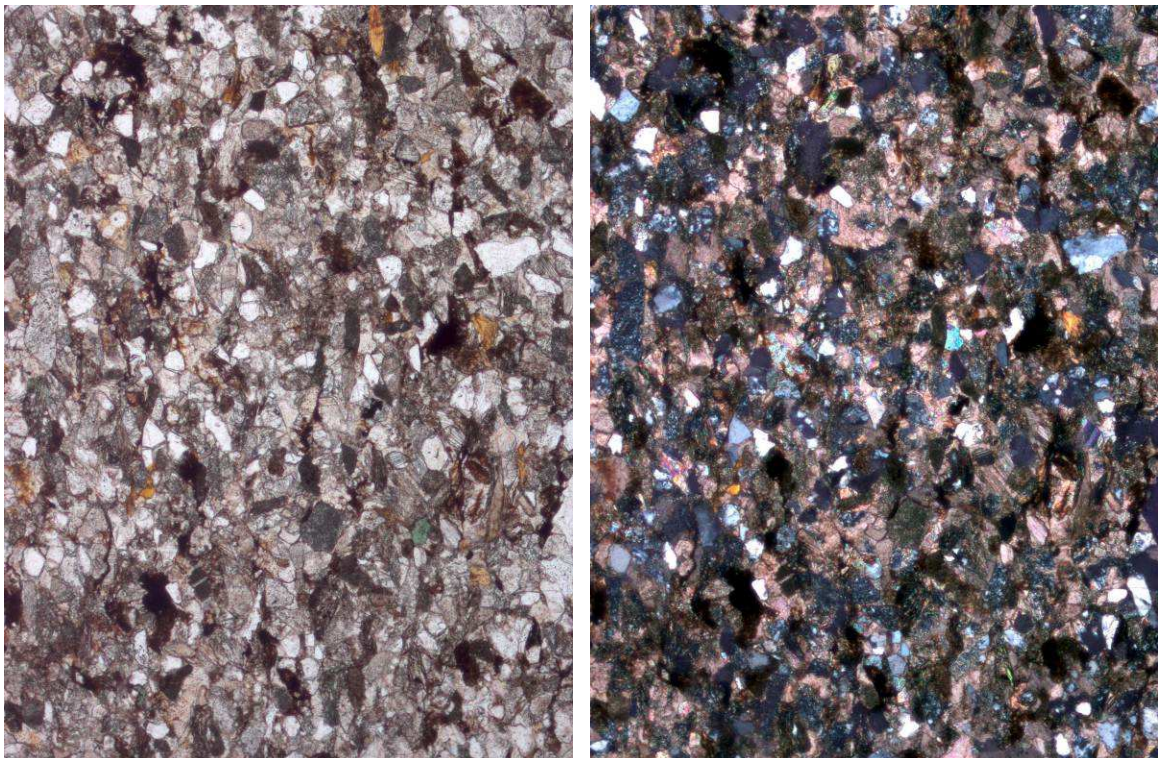


Abbildung 45 – links: Gosau-Kalksandstein, II N, Bildhöhe 3 mm  
 rechts: Gosau-Kalksandstein, X N, Bildhöhe 3 mm  
 Fundort: neben Weg nördlich der Daxerhütte

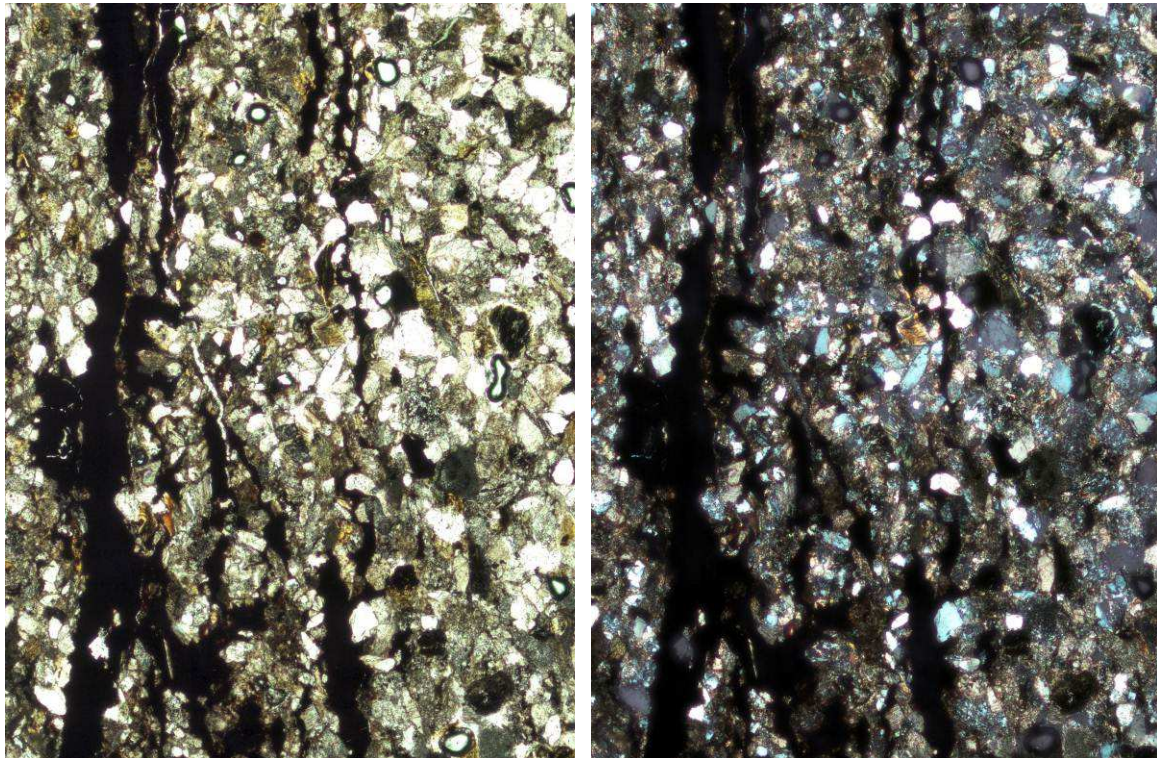


Abbildung 46 – links: bituminöser Gosau-Kalksandstein, II N, Bildhöhe 3 mm  
 rechts: bituminöser Gosau-Kalksandstein, X N, Bildhöhe 3 mm  
 Fundort: Hasatalgraben nördlich der Buchackeralm

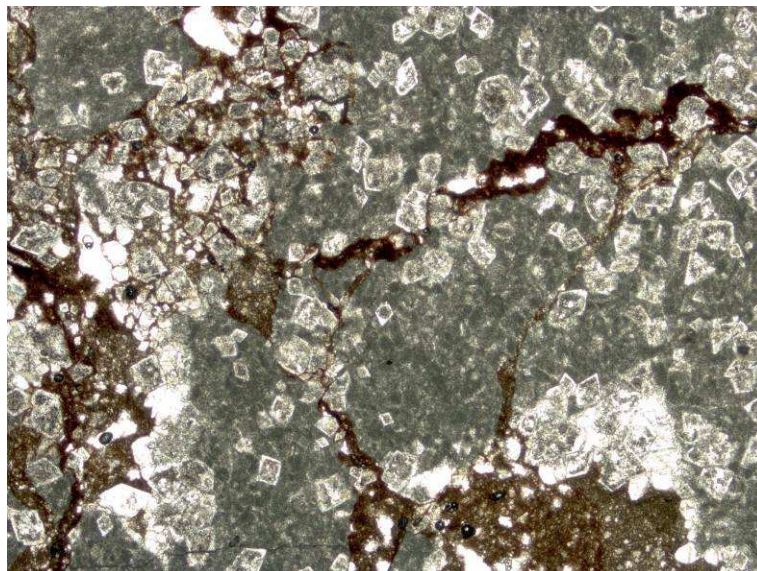


Abbildung 47 – Gosau-Basalbreckzie, Bildbreite 6 mm  
 Fundort: westlich des Hügels westlich der Schmiedalmquelle

### 1.3. Lokaler tektonischer Überblick

Das im Rahmen vorliegender Masterarbeit untersuchte Gebiet befindet sich in der Lechtaldecke, die im Süden (am Gaisberg 8 km westlich von Kitzbühel) noch mit der Grauwackenzone verbunden ist. Diese ist dem Bajuvarikum

(Hochbajuvarikum, Abbildung 48) zugehörig. Sie stellt in diesem System im Westen die sogenannte Stammdecke dar, welche die Hauptmasse des Gebirges ausmacht. Sie erweist sich als großtektonisch nicht weiter gegliedert und nur mäßig gefaltet und verschuppt. Die aus einer Nord-vergente Überschiebung resultierenden Faltenachsen streichen im Allgemeinen Ost-West. Außerdem treten Nordwest-Südost-orientierte Diagonalzerschersungsflächen auf, die ein jüngeres, tertiäres Störungssystem repräsentieren. Die bruchtektonischen Lineamente sind gemeinsam mit anderen tektonischen Elementen auf nachstehender Graphik dargestellt, das Gebiet der Masterarbeit ist markiert (Abbildung 48; HEIßEL 1951; TOLLMANN 1969; OBERHAUSER et al. 1980; EISBACHER & BRANDNER 1984).

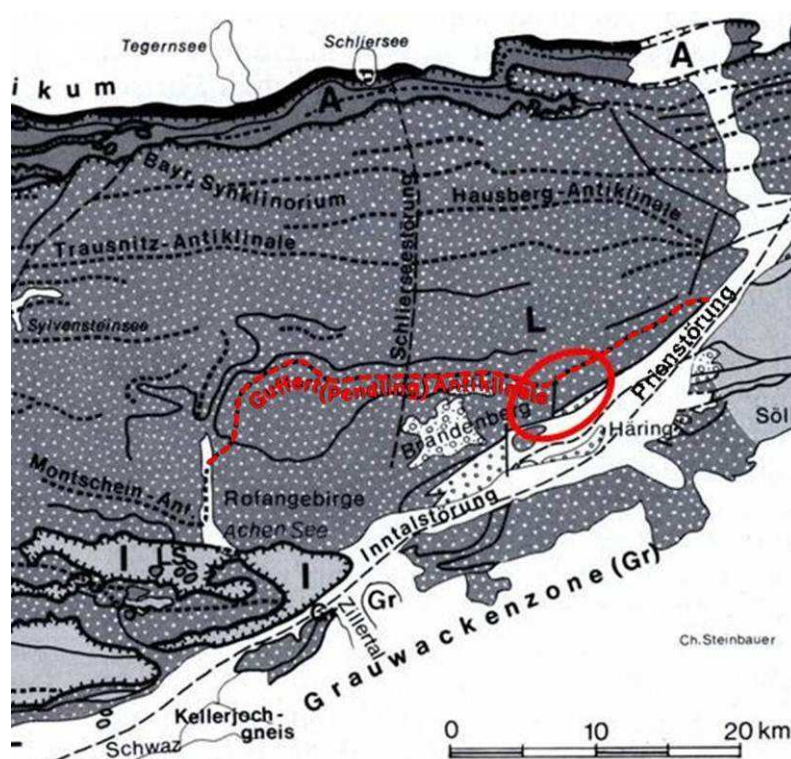


Abbildung 48 – Tektonische Kartenskizze der Kalkalpen; (OBERHAUSER et al 1980, S. 239)

Als den Aufbau des Gebiets prägend erweist sich die prägosauisch angelegte Unutz-Guffert-Pendling-Antiklinale, etwa W-E-streichend und WSW-abtauchend und mit einer Amplitude von mehreren km (Abbildung 48). Sie erstreckt sich von den Unutzen im Westen bis zum Pendling im Osten. Vom Unutz bis zum Hundsalmjoch streicht sie über eine Länge von 25 km in E-W, vom Hundsalmjoch bis zum Pendling für 10 km in NE-SW. Westlich von Kufstein verschwindet sie unter den quartären Ablagerungen des Inntals, sie ist dort durch die Inntal- und Prielstörung abgeschnitten. Die maximale Quereinengung befindet sich im Gebiet

des Achensees (SPENGLER 1956; HEIßEL 1957; EISBACHER & BRANDNER 1996; THÖNY 2003; AUER et al. 2003).

Nördlich der Pendling-Antiklinale befindet sich die neokome, E-W-streichende Thiersee-Synklinale. Diese Muldenstruktur erstreckt sich insgesamt von Mittenwald im Westen bis Kufstein im Osten. Bei Achenkirch ist ein Knie ausgebildet, welches vermutlich durch Auftauchen des Unutz-Guffert-Pendling-Gewölbes entstand. Südlich der Unutz-Guffert-Pendling-Antiklinale liegt die Brandenberger Synklinale. Am Nordrand des Pendling-Massivs ist eine große Hauptstörung ausgebildet. Bei dieser Störung handelt es sich um eine Abschiebung, für welche 2000 m Versatz angenommen werden (SPENGLER 1956; EISBACHER & BRANDNER 1996; HEIßEL 1957; TOLLMANN 1969; THÖNY 2003).

Der Kern der Pendling-Antiklinale besteht aus Wettersteinkalk, der von einem Mantel aus Hauptdolomit umhüllt wird. Die stratigraphisch dazwischenliegenden Nordalpinen Raibler Schichten erweisen sich weitgehend als tektonisch ausgequetscht. Kleine Reste von Gesteinen der Gosau-Gruppe sind – überwiegend an Störungsstrukturen gebunden – ebenfalls erhalten (AUER et al. 2003).

Es herrscht die Annahme vor, dass der gesamte Scharnierbereich der Guffert-Pendling-Antiklinale bereits bis zur Transgression der Unteren Gosau im Coniac (Ober-Kreide) stark erodiert war. Noch vor dem Einsetzen der Sedimentation der Unteren Gosau auf das Deckengebäude kommt es zum grabenartigen Einbrechen des Sattelbereiches der Antiklinale im unteren Santon (Ober-Kreide). Die entstandenen grabenartigen Strukturen lassen sich von der Hundsalm nach Osten verfolgen (EISBACHER & BRANDNER 1996; THÖNY 2003).

Im Gebiet fallen im südlichen Schenkel der Pendling-Antiklinale die Schichtflächen im unteren Bereich mit 60° ein, nach oben hin verflachen sie. Es handelt sich also um einen strukturellen Hang. Zahlreiche Störungen, die etwa in N-S bis NW-SE verlaufen, prägen den Südschenkel. Diese Störungen sind als konjugierte Störungen zur miozänen, ENE-WSW-streichenden, sinistralen Inntal-Scherzone zu sehen. Die Inntal-Scherzone bildete sich als kinematische Konsequenz der Exhumation des Tauernfenster heraus. Die Störungen waren wiederholt aktiv, als Abscherhorizont fungierten die inkompetenten Raibler Schichten, die man im Falle

der feinklastischen Schichtglieder auch als Maß für den Versatz heranziehen kann (ORTNER et al. 2006; GRUBER et al. 2009).

#### 1.4. Hydrogeologie

Die hydrogeologischen Verhältnisse werden im Wesentlichen durch folgende Parameter kontrolliert: Jahresniederschlag, Verdunstungsrate, Abfluss sowie Art und Beschaffenheit des Gesteinsuntergrundes. Im Untersuchungsgebiet liegt die Niederschlagsrate bei etwa 1300 mm/a und die Verdunstungsrate bei 550 mm/a. Der oberflächliche Abfluss beschränkt sich auf einige wenige kleine Gewässer, die als Rinnsale anzusprechen sind. Sie können im Falle nach längeren niederschlagsfreien Perioden beträchtlich an Schüttung verlieren bzw. in vereinzelt Fällen sogar ganz trocken fallen.

Je nach Grad der Durchlässigkeit können Gesteine ganz allgemein in Grundwasserleiter, -hemmer und -nichtleiter eingeteilt werden. Wettersteinkalk bzw. -dolomit und Hauptdolomit bilden die wesentlichen Lithologien des Untergrundes. Beide Lithologien erweisen sich als gute Grundwasserleiter. Die weiteren, in kleineren Ausmaßen vertretenen Gesteine der Raibler Schichten und der Gosau Gruppe können je nach Zusammensetzung und Zerklüftung als Grundwasserleiter oder Grundwasserhemmer fungieren. Die konsolidierten quartären Grundmoränen wirken grundwasserstauend. Da Raibler Schichten, Gosau Gruppe und quartäre Ablagerungen in nur kleinem und geringmächtigen Ausmaß vertreten sind, ist diesen lediglich ein geringer Einfluss auf die hydrogeologischen Verhältnisse zuzuweisen.

Darüber hinaus wird die hydrogeologische Situation von geologischen Strukturen und der morphologischen Beschaffenheit des Geländes bestimmt. So fungiert der Kammbereich der Guffert-Pendling-Antiklinale als lokale Wasserscheide. Der Oberflächenabfluss verläuft im südlichen Bereich zum Moosbach, im nördlichen Bereich zum Glemmbach. Die geologische Antiklinalstruktur entspricht der morphologischen Beschaffenheit des Geländes. Darüber hinaus besitzen Störungsstrukturen einen nicht unbeträchtlichen Einfluss auf die Wasserwegigkeit. Auftretende Quellen sind vielfach nicht auf einen Punkt konzentriert, sondern vor allem im Scheitelbereich der Antiklinale häufig mit Vernässungszonen

(stellenweise mit Moorbildung) kombiniert. Die grundwasserstauenden Vorkommen an Grundmoräne tragen dazu sicherlich ihren Teil bei.

Im Anhang befindet sich eine Karte, die grob die hydrogeologischen Verhältnisse im Gebiet darstellen soll. In ihr sind alle Quellen, Fließgewässer und Schwinden eingetragen und der vermutete Verlauf der Wasserwegigkeit im Untergrund ist dargestellt. Die Karte ist mit den vertretenen Lithologien hinterlegt. Die Quellen sind per Symbolik näher differenziert in Quellen, die auf der Karte eingetragen, nicht aber im Quellkataster vermerkt sind, und in Quellen, die im Quellkataster registriert sind. Hierbei lässt sich weiter unterscheiden zwischen Quellen ohne nähere Angabe und Quellen, zu welchen sich im Quellkataster bzw. im Wasserinformationssystem des Landes Tirol die Schüttung betreffende Informationen entnehmen ließen. Außerdem sind jene Quellen mit einem Sternsymbol (\*) versehen, die wie bereits in 5 erwähnt durch das Naturhistorische Museum analysiert wurden (Analytiker: R. PAVUZA).

Man kann in Abbildung 49, welche eine Zusammenstellung der Quellen mit Daten darstellt, erkennen, dass sich die meisten Quellen durch geringe Schüttungsmengen auszeichnen. Höhere Schüttungen sind vornehmlich in den tiefer gelegenen Niveaus der Hangflanken vorzufinden. Darüber hinaus ging aus den Messungen ein zum Teil drastischer Anstieg der Schüttungswerte nach starkem Regenfall hervor – eine Eigenschaft, die für die Ausprägung lediglich seichter Aquifere spricht. Quellen, die in den Messungen mehrfach untersucht wurden, zeigten allesamt einen Temperaturjahresgang im Bereich einiger °C. Dies weist auf eine geringe Verweildauer und eine nur geringe Durchmischung der Wässer hin. Ein Temperatursprung ist in vielen Fällen nach stärkeren Regenereignissen zu beobachten. Die Mineralisierung liegt mit durchschnittlich knapp unter 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  in einem für Karstwässer nicht untypischen Ausmaß. Bei der elektrischen Leitfähigkeit lässt sich durch Beimengung niedrig mineralisierter Wässer eine Abnahme nach Niederschlagsereignissen feststellen. Die Werte der Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit decken sich mit denen der Schüttung und untermauern so das Vorhandensein lediglich seicht gelegener Aquifere.

Arbeitsnummer	Name	Schüttung (l/s)	Temperatur (°C)	Leitfähigkeit (µS/cm)	pH-Wert	chemische Analysen
1	Daxeralmquelle					
2	Daxerquelle					
3	Schöntalquelle	0,5				
4	Steinerquelle					
5	Franzler-Hof-Quelle	1				
6	Gattererbrückenquellen	11				
7	Daxerhofquelle					
8	Gehängebachquellen	15				
9	Köpfquellen I + II	min. 5 max. 9				
10	Unterbach-Hagerquellen	min. 15 max. 22,9				
11	Kohlstattquellen I - III	1,5				
12	Lettenbichlquelle					
208	Hagerbachquelle					
211	Qu. D. Viktor-Büchel-Hütte	min. 0 max. 0,22	5,9			
212	Buchackerquelle	0,25	8,2			
213	Schreckenquelle	0,5				
217	Hungerwasser					
218 - 223	Thalerquellen	15	min. 8,6 max. 11,4	min. 210 max. 280	min. 7,6 max. 8,2	ja
224	Quellgruppe Daxerbachl	18				ja
225		7				ja
231 - 240						ja
247						ja
249						ja
403	Quelle im Hasatal	min. 1 max. 2,2	min. 5,8 max. 7,4	250	8,7	ja
404		0,16	6,6	330	8,1	
405		12,7	5,5	270	8,5	
406	Schmiedalmquelle	min. 0,09 max. 0,16	min. 5,7 max. 6,1	300	min. 7,4 max. 8,1	ja
408	Quelle oberhalb der Ebenwaldalm I	1	5,7	330	7,5	
409a	Quelle oberhalb der Ebenwaldalm II	min. 3,1 max. 41,2	4,6	320	6,8	ja
411a	Quelle unterhalb der Ebenwaldalm	min. 0,85 max. 6	min. 5,5 max. 5,8	min. 200 max. 280	min. 7,9 max. 8,4	ja
413	Moosquelle	1,4	6,3	190	8,1	
414	Quellgruppe Ebenwald	0,4	7,6	300	9,2	ja
415	Moosbründlquelle	0,5	7,5	320	9	ja
418						ja
420						ja
421	Quelle rechts im Hasatal I	min. 1 max. 2				ja
422	Quelle rechts im Hasatal II	min. 1 max. 2				ja
503	Quelle links im Hasatal I (Hang)	min. 5,9 max. 9,2	min. 5,7 max. 6,0	min. 210 max. 300	min. 8,2 max. 8,9	ja
504	Quelle links im Hasatal II (Straßengraben)	min. 0,5 max. 2,5	min. 6,7 max. 7,0	min. 260 max. 350	min. 8,2 max. 8,8	ja
511	Quelle östlich Riederberger Winterstube	1,13	6,8	190	8,9	

Abbildung 49 – Zusammenstellung der Quellen im Untersuchungsgebiet (Quellkataster der ÖBF; [www.tirol.gv.at/themen/umwelt/wasser/wis/](http://www.tirol.gv.at/themen/umwelt/wasser/wis/))



Bei den Wasseranalysen (Abbildung 50) wurden die Gehalte an Kationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), Anionen ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) in mg/ l ermittelt, weiters das Ca/Mg-Verhältnis und die Gesamtwasserhärte (°dH). Hierbei sind die Gehalte an  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{HCO}_3^-$  auf die jeweiligen lithologischen Verhältnisse zurückzuführen.  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$  sind mitunter in sehr geringem Ausmaße vertreten,  $\text{NO}_3^-$ -Werte über 10 mg/l (Bereich Buchackeralm) sind verdächtig für Düngung.

Über die Ermittlung des Ca/Mg-Verhältnisses kann man auf die Herkunft der Quellwässer schließen, also im konkreten Beispiel, ob es sich um calcitisch oder dolomitisch dominierte Gewässer handelt. Je höher das Verhältnis, als umso stärker calcitisch geprägt erweist sich das Wasser. Die Quellgruppen 218 bis 223 (Thalerquellen bei Thal), 233 bis 240 (Buchackeralmquellen) und die Quelle 247 (im Hasatalgraben westlich des Gasthof Buchacker) sind dolomitisch geprägt, die restlichen Quellen besitzen mehr oder weniger starken calcitischen Charakter, was gut mit ihrer Lage und Speisung in Anbetracht geologischer Umstände übereinstimmt. Nicht außer Acht gelassen werden darf, dass insbesondere bei Quellen die an oder entlang geologischer Grenzen austreten, es zu einer Vermischung beider Regime kommen kann.

Die Quellgruppen der Buchackeralm befinden sich im Hauptdolomit. Geologisch und morphologisch bedingt verläuft der Weg des Wassers bis zu den Quellaustritten vollkommen in Hauptdolomit. Selbes gilt für die Quelle im Hasatalgraben. Die Quellgruppe der Thalerquellen befindet sich am Hangfuß. Variationen in Bezug auf Temperatur, Schüttung und elektrischer Leitfähigkeit lassen einen seichten Aquifer vermuten. Es ist anzunehmen, dass das Wasser lediglich den Hauptdolomit in der unteren Hälfte der Bergflanke durchfließt.

Arbeitsnummer	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Ca/Mg	°dH
218-223	32	20	191	6	<1	<5	1,6	9,1
224a	34	14	165	7	<1	<5	2,4	8,0
224b	35	19	166	28	<1	<5	1,8	9,3
224+225	36	9	163	21	<1	<5	4	8,7
225	36	9	153	<5	<1	<5	4	7,1
233	26	19	168	5	<1	<5	1,4	8,0
234	28	19	178	<5	<1	<5	1,5	8,3
235	28	23	200	<5	<1	<5	1,2	9,2
236	29	18	180	<5	4	10	1,6	8,2
237	27	28	218	<5	3	10	1,0	10,2
238	37	24	229	<5	<1	<5	1,5	10,7
239	26	32	230	8	5	<5	0,8	11,0
240	32	19	168	<5	5	25	1,7	8,9
247	34	21	210	<5	<1	<5	1,6	9,6
249	48	8	186	<5	7	<5	6	8,6
403	43	10	178	<5	<1	<5	4,3	8,3
406	46	5	153	10	<1	<5	9,2	7,6
409	36	15	175	8	<1	<5	2,4	8,5
411	36	10	153	6	<1	<5	3,6	7,3
414	35	10	149	6	<1	<5	3,5	7,2
415	30	13	159	<5	<1	<5	2,3	7,2
418	49	8	183	5	<1	<5	6,1	8,7
420	31	12	149	5	<1	<5	2,6	7,1
421	51	9	191	8	<1	<5	5,7	9,2
422	49	9	195	<5	<1	5	5,5	8,9
503	49	7	183	<5	<1	5	7	8,5
504	43	10	180	<5	<1	<5	4,3	8,3

Abbildung 50 – Ergebnisse der Wasseranalysen (Quellkataster der ÖBF)

## 2. **Karst Geomorphologie**

Das Gebiet ist durch eine Vielzahl an relativ kleinmaßstäblichen Verkarstungsformen geprägt. So finden sich Karren als häufigste Erscheinungsform, doch auch Dolinen, Schwinden, Schächte und Höhlen sind bereichsweise gehäuft anzutreffen (Abbildung 51). Bei den Höhlen handelt es sich größtenteils um Halb- und Kleinhöhlen.

Auf nachstehendem Ausschnitt eines Laserscan DGM sind die Bereiche, die besonders durch die Präsenz von Karstphänomenen geprägt sind, in Rot gehalten. Alle Karsterscheinungen sind im Wettersteinkalk zu finden. Karren findet man zwar im gesamten Gebiet relativ häufig, jedoch treten auch sie in den markierten Bereichen noch häufiger auf (2.2). Aus hydrogeologischer Sicht interessante Schwinden treten bevorzugt an der Grenze zwischen Hauptdolomit und Wettersteinkalk auf und stehen nahe beieinander (vergleiche mit geologischer Karte im Anhang). Des Weiteren gibt es – vor allem in dem roten Bereich im

Norden – einige Dolinen (2.3). Von Bedeutung ist auch, dass es sehr viele kleine Höhlen in den beiden roten Gebieten gibt. Die meisten dieser Hohlräume besitzen allerdings nur unbedeutende Ausmaße (2.4).

Stellt man sich die Frage, wieso besonders in den markierten Arealen viele karstmorphologische Phänomene vorhanden sind, zeigt einem die eingehendere Betrachtung des digitalen Geländemodells eindeutig, dass das gesamte Gebiet von Störungen durchzogen ist. Die markantesten Störungen verlaufen NNW-SSE. Es fällt auf, dass die gekennzeichneten Bereiche von mehreren Störungen dominiert werden. Der dadurch geschwächte Gesteinsverband besitzt somit eine gute Grunddisposition für die Ausbildung von Karst.

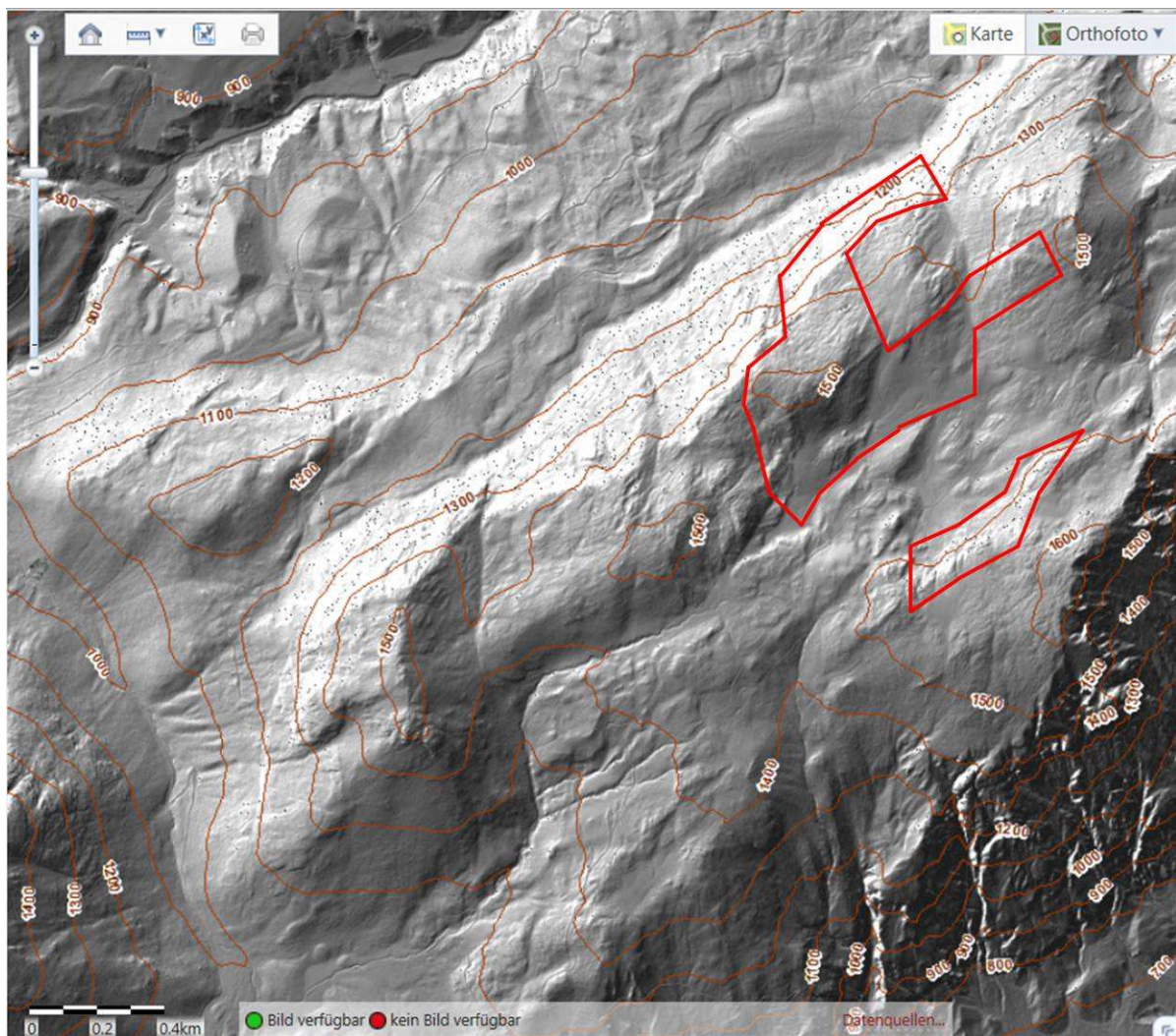


Abbildung 51 – Digitales Geländemodell, Bereiche mit Häufung von Karsterscheinungen rot markiert; <http://gis.tirol.gov.at/LBAWeb/luftbilduebersicht.show>

## 2.1. Lösungsdenudation

Wie bereits in 3.2.1 erwähnt, sind in alpinen und kalt temperierten Region die höchsten Kalk-Denudationsraten zu erwarten. Der Niederschlag kontrolliert die Bilanz stärker als die herrschende Temperatur. Außerdem kommt auch den lithologischen und morphologischen Gegebenheiten eine signifikante Bedeutung zu. Als klimaunabhängiger Faktor sei die Azidität des Wassers genannt, die natürlich ebenfalls die Lösungsdenudation stark beeinflusst.

Für das von mir untersuchte Gebiet sind folgende Bedingungen anzunehmen:

- eine Jahresdurchschnittstemperatur von  $4,3^{\circ}\text{C}$  (auf 1520 m Seehöhe), diese Daten entstammen der meteorologischen Messstation bei der Viktor-Büchel-Hütte
- die Niederschlagsmenge für diesen Bereich beträgt 1200 bis 1400 mm/a, d.h. durchschnittlich bei  $1300\text{ mm/a}$
- die Verdunstungsrate liegt bei 500 bis 600 mm/a, d.h. durchschnittlich bei  $550\text{ mm/a}$
- die Differenz aus Niederschlag und Verdunstung ergibt  $750\text{ mm/a}$
- der  $\text{CO}_2$ -Partialdruck beträgt  $0,3315\text{ hPa}$ , das entspricht  $10^{-2,5}\text{ bar}$

Demnach macht die mittlere Kalkdenudationsrate  $43\text{ mm/ka}$  aus (rote Pfeile in Abbildung 52; DREYBRODT 1988; FORD & WILLIAMS 2007; [www.tirolatlas.uibk.ac.at](http://www.tirolatlas.uibk.ac.at))

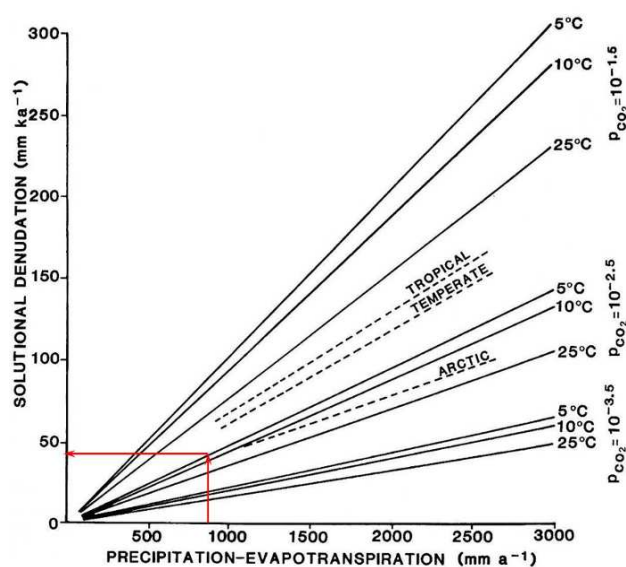


Abbildung 52 – Theoretische Beziehung zwischen der Lösungsdenudation von Kalkstein und Wasserüberschuss bzw.  $\text{CO}_2$ -Verfügbarkeit (FORD & WILLIAMS 2007; S. 81, mod.)

## 2.2. Karren

Zur systematischen Erläuterung der vorkommenden Karrenerscheinungen, soll nach derselben Gliederung wie in 3.5 vorgegangen werden.

### 2.2.1. Kreisförmiger Grundriss (3.5.1)

Viele der freiliegenden Felsrippen mit günstiger Exposition in Bezug auf Sonneneinstrahlung und Niederschlag, sind von Flechten (z.B. Landkartenflechten) Moos und Algen besiedelt. Sie ätzen die Oberfläche an, was besonders gut erkennbar ist, wenn man kleine Bereiche des pflanzlichen Überzugs entfernt. Diese kleinen Formen von kleinsten *Mikrogrübchen* oder die größeren *Lösungsgrübchen* sind sicherlich an sehr vielen günstig gelegen Aufschlüssen vertreten, erschließen sich dem Beobachter – wenn überhaupt – aber erst bei genauerer Betrachtung.

In einige Höhlen – insbesondere dem Glocken- und dem Grete-Ruth-Schacht – finden sich zahlreiche *Kondensationsgrübchen*. Die schräfkantig begrenzten Formen können relativ große Areale gestalten

### 2.2.2. Bruchkontrollierte Formen (3.5.2)

Wettersteinkalk ist durch sein sprödes Verhalten in einer guten Grunddisposition zur Ausbildung von Klüften. Zusätzlich kommt hinzu, dass der Scharnierbereich der Pendling-Antiklinale stark beansprucht wurde, was die Ausbildung vieler Störungs- und Bruchstrukturen zur Folge hatte. Daher finden sich im Gebiet im Allgemeinen sehr viele Karstformen, die an Brüchen orientiert sind.

So sind die Grundformen *Mikrorisse* – *Splitkarren* – *Kluftkarren* sehr zahlreich vertreten. Oftmals trifft man auf Kluftkarren, die durchwegs 2-3 cm breit sind. Häufig handelt es sich allerdings nur um kleine Aufschlüsse, die nur wenig höher sind als der Boden. Daher sind die Kluftkarren vielfach mit Bodenmaterial verfüllt, was natürlich zum einen bedeutet, dass sich die korrosive Wirkung verstärkt, zum anderen aber der Tiefgang unbekannt bleibt.

An den steilen Schenkeln der großen Antiform sind häufig die Schichten des Wettersteinkalk günstig angeschnitten, dass man in vereinzelt auf *Schichtfugenkarren* trifft. Ihre Höhe bewegt sich gewöhnlicherweise im Bereich

einiger cm, jedoch stößt man in der steileren Nordflanke auf das interessante Phänomen, dass sich Schichtfugenkarren über mehrere 10er m erstrecken und in ihrer Höhe mitunter stark variieren. Betrachtet man den Verlauf einer solchen Karre über mehrere 10er m, so gibt es Bereiche, die nur wenige cm hoch sind und dann lateral mehr oder weniger drastisch an Höhe zunehmen, bis diese Werte um 1 m und mehr annimmt und damit eigentlich schon die Bezeichnung Höhle zutreffend ist. Diese sich offenbar aus Schichtfugenkarren entwickelnden Kleinhöhlen sind auf der geologischen Karte (siehe Anhang) als Höhlen eingetragen und in 2.4.3 näher beschrieben.

Als bruchkontrollierte Form sei hier auch noch das Phänomen der *frost pockets* genannt. Zwar ist die Zuordnung zu den Karstformen in erster Linie nicht korrekt, da diese durch Frostsprengung entstehen und somit auch in Gesteinen auftreten können, die nicht verkarstungsfähig sind. Doch ist für deren Ausbildung notwendig, dass das Wasser in den Fels eindringen kann, um diesen zu sprengen. Dringt Wasser über Risse in verkarstungsfähiges Gestein ein, erfahren diese eine stete Erweiterung. Das impliziert, dass mit der Zeit das Wasser in größeren Mengen und zunehmend tiefer in den Fels gelangt und sich dadurch der Prozess der Frostsprengung verstärkt. Frost pockets finden sich gehäuft am steilen Nordabhang des Gebiets (Abbildung 53). Ihre Höhe variiert zwischen 0,5 und etwa 2 m, in ihrer Breite erreichen sie bis zu mehrere m. Auch am NE-exponierten Hang des Frauensteins im nordöstlichen Teil des Gebiets treten einige kleinere Formen auf. Weiters befinden sich am nordfallenden Hang nördlich des Kammes rund um das Hundsalmjoch mehrere kleinere frost pockets.



Abbildung 53 – frost pocket

### 2.2.3. Hydrodynamische Formen (3.5.3)

*Mikrorillen* sind zu finden, wenn auch nicht besonders häufig. Dagegen sind an etwas spitzwinkligeren ‚Graten‘ gerne *Rillenkarren* ausgebildet. Allerdings sind diese nur klein und keilen meist bereits nach wenigen cm aus. Auch in Bezug auf die Breite sind die Rillenkarren nur gering bedeutend, Breiten von 1 cm werden selten überschritten. Vor allem in den Bereichen des Gebiets, wo das Einfallen des Wettersteinkalks relativ flach ist und größere Areale exponiert sind, sind durch abfließendes, kanalisiertes Wasser *Rinnenkarren* entstanden. Meist verlaufen sie sanft gebogen, mitunter stößt man aber auch auf *Mäanderkarren*. Das Mäandrieren ist aber meist auf kurze Strecken beschränkt.

Nahe dem Kontakt zum Hauptdolomit ist eine steil stehende Störungsfläche (80-85°) im Wettersteinkalk aufgeschlossen. An dieser sind schöne *Wandkarren* ausgebildet. Diese treten über eine Breite vom knapp 10 m auf und sind bis zu 3 m hoch. Die Störung bildet sozusagen eine kleine Stufe, darüber befindet sich organisches Material in Form von relativ dicker Erdbedeckung (bis zu 20 cm), Gras und kleineren Gewächsen. Dieses reichlich vorhandene organische Material verstärkt das Lösungspotential der abfließenden meteorischen Wässer.

Vielfach ist im plateau-ähnlichen Weidebereich des Gebiets der Wettersteinkalk lediglich in Form kleinerer Rippen aufgeschlossen, die die Grasnarbe oft nicht stark überragen. So heben sich viele der Felsrippen nur mit knapp einem halben

m von ihrer Umgebung ab. Auf zahlreichen dieser kleinen Rippen sind Karren entwickelt, bei denen es sich um freigelegte *Rundkarren* handeln muss. Relativ markante ‚Kanäle‘ mit bis zu 10 cm Durchmesser sind entwickelt. Durch die Verbreiterung des Weges zur Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle im Sommer 2011 wurden einige subkutane Rundkarren entlang des Weges freigelegt.



Abbildung 54 – Rillen- und Rinnenkarren



Abbildung 55 – Rundkarren



### 2.3. Dolinen

Dolinen befinden sich vor allem dem auf Abbildung 51 rot markierten Bereich im Norden. Zumeist befinden sie sich nahe der Grenze Hauptdolomit-Wettersteinkalk. Vereinzelt treten sie auch weiter nördlich auf. Ihr Durchmesser beträgt durchschnittlich 5 m, ihre Tiefe überschreitet selten 3 m.

In der folgenden Tabelle soll eine Übersicht über Lage und Ausmaße von Dolinen im Gebiet gegeben werden:

Doline #	Gauß-Krüger-Koordinaten		Seehöhe	Ausmaße
1	N 47°32,510'	E 12°01,562'	1443 m	Ø 3 m
2	N 47°32,521'	E 12°01,581'	1437 m	9 x 4 m
3	N 47°32,560'	E 12°01,625'	1436 m	Ø 5 m
4	N 47°32,545'	E 12°01,642'	1427 m	Ø 4 m
5	N 47°32,562'	E 12°01,525'	1478 m	Ø 20 m
6	N 47°32,554'	E 12°01,505'	1465 m	Ø 6 m
7	N 47°32,543'	E 12°01,648'	1428 m	Ø 4 m
8	N 47°32,534'	E 12°01,660'	1432 m	Ø 4 m
9	N 47°32,619'	E 12°01,750'	1415 m	Ø 3 m
10	N 47°32,563'	E 12°01,474'	1477 m	Ø 8 m
11	N 47°32,727'	E 12°01,899'	1428 m	Ø 3 m
12	N 47°32,764'	E 12°02,014'	1412 m	Ø 4m
13	N 47°32,732'	E 12°02,031'	1422 m	Ø 4 m

Abbildung 56 – Dolinen im Untersuchungsgebiet

### 2.4. Höhlen

#### 2.4.1. Höhlen/ Halbhöhlen im Untersuchungsgebiet laut Kataster

Die Pläne der aufgenommenen Höhlen sind im Anhang zu finden. Die Vermessungen erfolgten im Oktober/ November 2011 mit Unterstützung durch Christoph Spötl und Gina Moseley.

##### ◆ 1266/1 – Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle

*Koordinaten:* N 47°32,715', E 12°01,584' (WGS84), Seehöhe: 1495 m

*Ausmaße:* Länge: 264 m, Höhe: 51 m, horizontale Erstreckung: 88 m

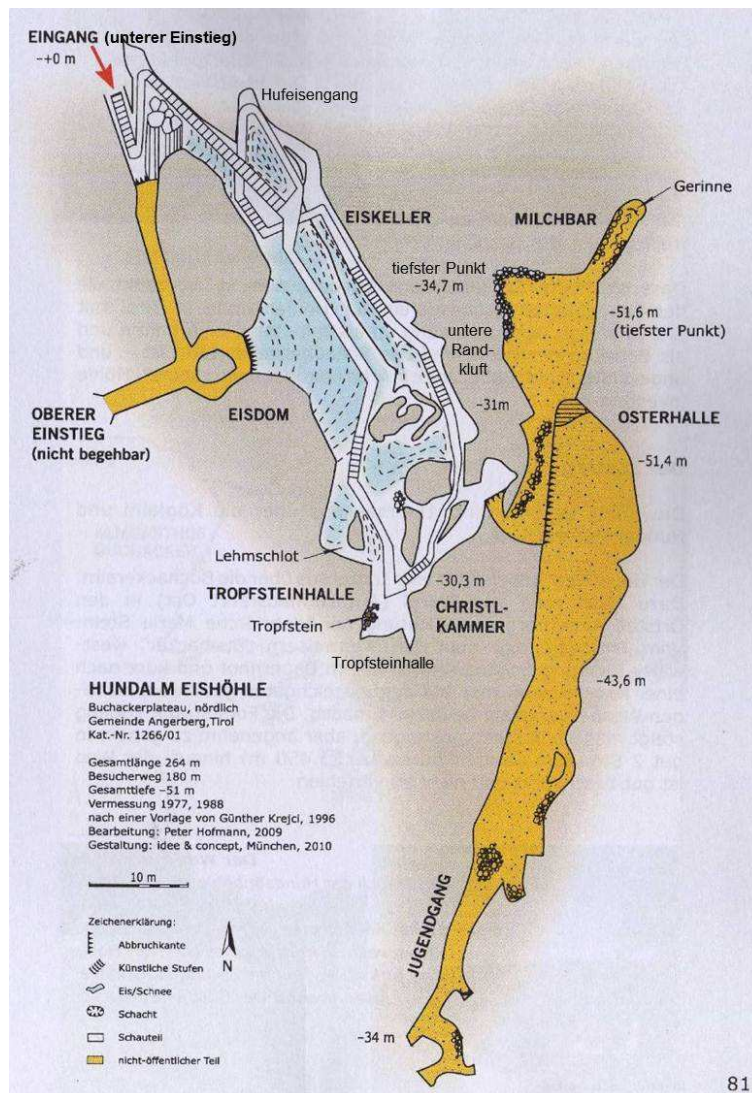


Abbildung 57 – Hundalm Eishöhle, vereinfachter Grundriss (HOFFMANN, 2010, S. 81, mod.)

- *Oberer, eisführender Teil der Höhle*

Der eisführende Teil der Hundalm Eishöhle streicht NNW-SSE. Die Höhle ist entlang einer Störung angelegt. Diese verläuft NW-SE und fällt steil nach NE ein. Die Schichtung des Wettersteinkalks fällt in diesem Bereich mit 60° nach NW bis NNW ein.

Über den ‚Unteren Einstieg‘ am nördlichsten Ende der Höhle gelangt man über Metallstufen bequem in den Höhlenraum. Der Boden verläuft für circa 20 m horizontal, weiter im Süden leicht geneigt. An der steilen, der Störung folgenden Felsflanke, welche die westliche Begrenzung der Höhle darstellt, finden sich im oberen Teil inaktive Versinterungen. Einige Meter weiter südlich befindet sich ein gut 3 m breiter Eiseinlass. Auch an der gegenüberliegenden Felswand tritt an

einem Loch Eis aus (Abbildung 58, links), etwa 5 m südlich davon ist ein weiterer Eiseinlass gegeben, bei welchem sich schöne Eissäulen gebildet haben (Abbildung 58, rechts). Außerdem findet man Zeugnisse der phreatischen Phase der Höhle, welche meist in Form von (Wand- oder Decken-) Kolken und Lösungstaschen vorliegen (Abbildung 59).

Unmittelbar südlich des zuerst genannten Eiseinlasses an der Flanke im Westen befindet sich der ‚Obere Einstieg‘, über welchen man – bevor der untere Einstieg mit Stiegen ausgebaut wurde – in die Höhle gelangte.

Etwas südlich des oberen Einstiegs sind ebenfalls inaktive Versinterungen zu vermerken (Abbildung 60, links), unmittelbar daneben gibt es einen Durchstieg zur ‚Unteren Randkluff‘ im östlicheren Teil der Höhle. An dieser Stelle zeigen sich an der Ostflanke erneut phreatische Formen als auch ein weiterer Eiseinlass. Gegenüberliegend, an der Westflanke, stößt man am Boden auf Eisstalagmiten und Eissäulen (Abbildung 60, rechts).

Im südlichsten Drittel ist eine kleine Abzweigung, der ‚Lehmschlot‘. In diesem findet man einen kleinen Eisfall mit 1,5 m Breite und etwa 3 m Höhe. In der so genannten ‚Tropfsteinhalle‘ befindet sich eine Schar aus kleinen Eisstalagmiten. Außerdem stößt man wiederum auf phreatische Formen (vor allem Kolke) und inaktive Versinterungen (Abbildung 61). Unter den Sinterbildungen findet man auch kleine Tropfsteine, deren Ausmaße die eines Strohhalmstalaktiten knapp überschreiten. An ihrem unteren Ende hängen manches Mal Tropfen (Abbildung 62). Ob dies allerdings auf Wachstumsaktivität hindeutet, ist aufgrund der tiefen Temperaturen um den Gefrierpunkt fraglich.

Über eine Stiege gelangt man in den unteren Bereich der Eishöhle. Wiederum finden sich inaktive, teils abgebrochene Sinter und phreatische Rundformen. An dieser Stelle gabelt sich der weitere Verlauf: ein Gang zweigt nach NNE ab und verläuft zunächst subhorizontal, ein weiterer, sehr schmaler Gang fällt mäßig steil nach NE ein. Über den zuerst genannten Gang kann man den Rundgang durch den Eisteil der Höhle fortsetzen, über den zweiten, schmalen Schlurf (‚Christkammer‘) gelangt man in den unteren, eisfreien Teil der Höhle (s.u.).

Der weitere Verlauf der Eishöhle dreht also zunächst nach NNE, dann nach N und bei der unteren Randkluff nach NW. Der Verlauf des Bodens gestaltet sich vorerst

noch subhorizontal, zur unteren Randkluft hin fällt er jedoch mäßig steil ab, bis zum ‚Tiefsten Punkt‘. Hier in diesem tiefsten Bereich befinden sich die dicksten Bodeneisbildungen. Das Eis hier ist lagig aufgebaut (Abbildung 63). Darüber hinaus finden sich viele phreatische Formen unterschiedlicher Durchmesser. Die größten dieser Formen weisen einen Durchmesser von bis zu einem halben Meter auf.

Vom tiefsten Punkt ausgehend steigt der weitere Verlauf der Höhle wieder mäßig steil an. Nach weiteren Stiegen gelangt man zum ‚Eiskeller‘. Auch in diesem Bereich ist das Bodeneis noch immer mehrere m mächtig und besitzt lagigen Aufbau. Der eigentliche Verlauf der Höhle setzt sich über einen kleinen Gang im Westen weiter nach N bis NW bis zum ‚Hufeisengang‘ fort. Für den Rundgang wurde jedoch ein künstlicher Eistunnel angelegt, der zuerst horizontal nach WSW verläuft und anschließend über eine Treppe mittelsteil nach NW ansteigt. Dieser Eistunnel befindet sich etwa unterhalb des untersten Bereichs der langen Stiege am Eingang. Nach der Stiege im künstlichen Eistunnel verläuft der weitere Weg bis zum Hufeisengang subhorizontal nach Norden. An der nördlichsten Spitze des Hufeisenganges ist ein vertikaler Schlot angelegt, von dem etwa 3 m aufgeschlossen sind. Nach unten hin ist dieser Schlot durch Schutt verschlossen.



Abbildung 58 – Hundalm Eishöhle, Eisdom, Eiseinlässe an der Ostflanke im Norden

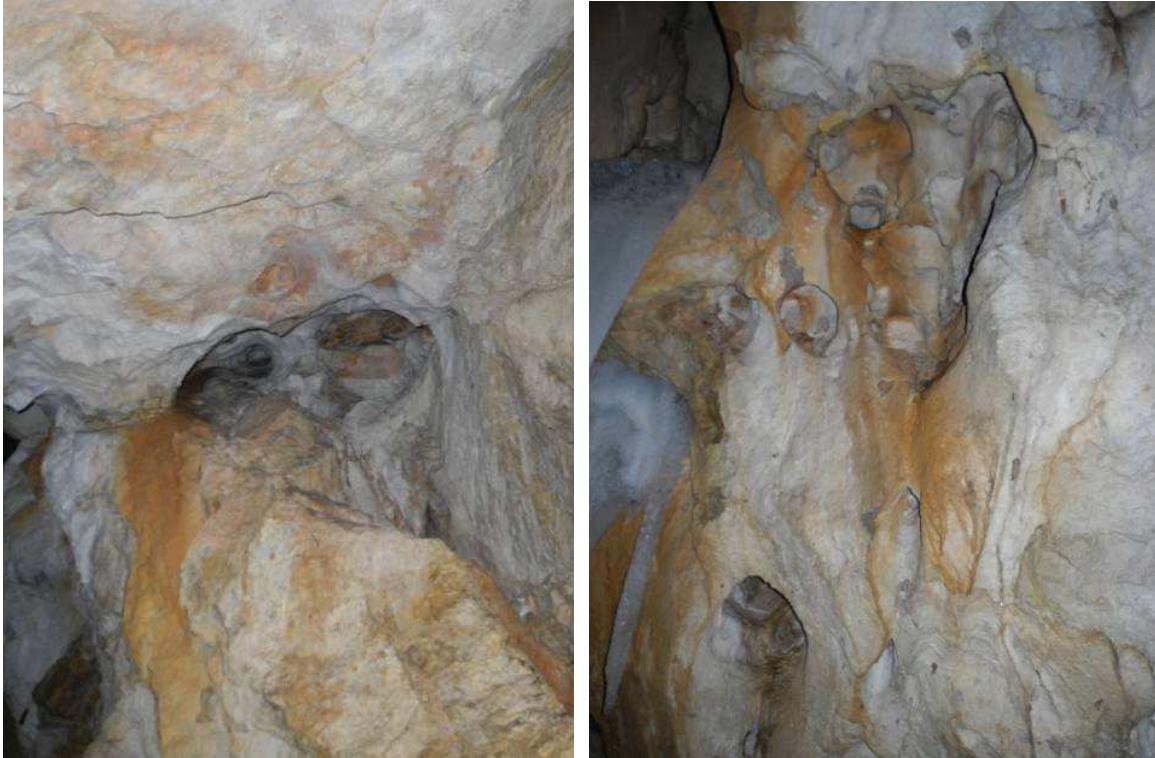


Abbildung 59 – Hundalm Eishöhle, Eisdom, phreatische Formen in der nördlichen Hälfte



Abbildung 60 – Hundalm Eishöhle, Eisdom, inaktive Versickerungen, Eisstalagmiten



Abbildung 61 – Hundalm Eishöhle, Tropfsteinhalle, Kolke und Versinterungen



Abbildung 62 – Hundalm Eishöhle, Tropfsteinhalle, kleine Tropfsteine



Abbildung 63 – Hundalm Eishöhle, Eiskeller, lagig aufgebautes Eis im tiefsten Punkt

- *Unterer, eisfreier Teil der Höhle*

Der untere Teil der Hundalm Höhle streicht im nördlichen Bereich in N-S, im südlichen Bereich in NNE-SSW. Im Süden fällt sie mit 40° am steilsten nach Norden ein, gegen Norden hin wird das Einfallen flacher (bis 15°).

Der Zustieg erfolgt über einen schmalen, mäßig steilen bis steilen Schlurf, die ‚Christlkkammer‘, welche nach NE abzweigt. Der Schlurf war ursprünglich durch Schutt versperrt und musste erst frei gelegt werden. Um einen Luftaustausch mit dem eisführenden Teil zu verhindern, wurde die ehemals natürliche Barriere durch eine Styroporplatte ersetzt. Man gelangt über den Schlurf in das nördlichste Drittel der Höhle.

Der nördlichste Teil dieses unteren Stockwerks ist durch Bergmilchvorkommen geprägt, daher der Name ‚Milchbar‘. So werden die Wände im Westen und Norden über große Bereiche von diesen mehrere dm mächtigen Bildungen bedeckt (Abbildung 64). Auch Sinter treten auf. Als Besonderheit sei eine kleine Stelle genannt, die durchgehend von flachem Wasser (etwa 20 cm tief) bedeckt ist und wo sich die Bergmilch subaquatisch zu bilden scheint (Abbildung 65). Die nach Osten begrenzenden Wände sind frei von Bergmilch. An Wänden und Decke

finden sich phreatische Formen. Der Boden ist in diesem Bereich durchgängig von lehmigem Material und etwas Schutt bedeckt.

Die so genannte ‚Osterhalle‘ stellt den Hauptraum dieser Höhle dar. In ihrem nördlichsten Bereich ist ein kleiner See, dessen Wasserstand und Klarheit von vorangegangenen Niederschlagsereignissen abhängt. Sowohl an der westlichen als auch an der östlichen Felsflanke finden sich an einigen Stellen unterschiedlich mächtige Bergmilch-Vorkommen an den Wänden (Abbildung 66). Weiters stößt man vor allem an der Flanke im Osten auf Stalaktiten, Stalagmiten und Sinter, die gegen Süden vermehrt auftreten. Vielerorts finden sich markante Spuren aus der phreatischen Geschichte dieses Höhlenteils. So treten vor allem Wand- und Deckenkolke auf (Abbildung 67). Die Bodenbedeckung setzt sich aus Lehm, Schutt und untergeordnet abgebrochenen Sinterbildungen zusammen.

Gegen Süden hin wird die Osterhalle zunehmend niedriger und schmaler und setzt sich im Jugendgang fort. Dieser ist sehr niedrig und überwiegend frei von Bergmilch. An einigen Stellen wachsen recht kleine Tropfsteine. Der Boden ist auch in diesem Bereich durch sehr feinkörnige Sedimente und Schutt bedeckt.



Abbildung 64 – Hundalm Höhle, unterer Teil, Milchbar, Bergmilch an Wänden





Abbildung 65 – Hundalm Höhle, unterer Teil, Milchbar, Bergmilch subaquatisch



Abbildung 66 – Hundalm Höhle, unterer Teil, Osterhalle, Bergmilch und Sinter an Wänden



Abbildung 67 – Hundalm Höhle, unterer Teil, Osterhalle, Wandkolke

◆ 1266/2 – Glockenschacht

*Koordinaten:* N 47°32,727', E 12°01,565' (WGS84), Seehöhe: 1488 m

*Ausmaße:* Länge: 50 m, Höhe: 34 m, horizontale Erstreckung: 24 m

Über eine kleine, schmale Öffnung, die mit einem Gitter zugedeckt ist, gelangt man in den WSW-ENE-verlaufenden Hauptraum dieses Schachtes, der seinen Namen durch seine sich nach unten hin glockenförmig erweiternde Gestalt erhalten hat (Abbildung 69, links). Die Flanken fallen sehr steil ein, der Boden in 19 m Tiefe ist stark von etwa faustgroßem Schutt und Humusresten bedeckt. Die Wand im untersten Teil des Hauptraumes weist Sinter- und Bergmilchbildungen auf (Abbildung 68, Abbildung 69, rechts). Es gibt zwei Abzweigungen im unteren Teil des Hauptraumes: einen etwa 3 m kurzen Gang, stellenweise mit Bergmilchablagerungen, der nach SSW verläuft und leicht ansteigt und des Weiteren einen schmalen, steilen Schlurf, über welchen man in den unteren Raum gelangt.

Um sich in den unteren Teil abseilen zu können, wurde ein zweites, kürzeres Seil mitgenommen und ein Anker gebohrt. Der Schlurf ist schmal und um 70° steil. Die untere Kammer verläuft in NW-SE, Wände und Decke sind an vielen Stellen von teils mehrere dm mächtiger Bergmilch bedeckt. Der Boden dieses Raumes verläuft in seinem untersten Teil annähernd horizontal, ansonsten steigt er über eine Länge von 8 m mit 30° Richtung SE an. Der Boden ist von Schutt, Sanden

und Lehm bedeckt. Am obersten Ende des Anstiegs fällt ein schmaler Gang vertikal nach SSW ab. Gröberer Schutt verdeckt eine mögliche Fortsetzung nach unten hin.



Abbildung 68 – Glockenschacht, Fossiler Sinter am Schachtgrund



Abbildung 69 – Glockenschacht, Blick Richtung Eingangsbereich hinauf, Bergmilch am Schachtgrund

◆ 1266/3 – Doppelbrückenschacht

*Koordinaten:* N 47°32,736', E 12°01,674', Seehöhe: 1479 m

*Ausmaße:* Länge: - m, Höhe: 9 m, horizontale Erstreckung: 19 m

Der Schacht setzt sich im Wesentlichen aus einer Senke im Norden (Abbildung 70) und einem Schacht im Süden (Abbildung 71) zusammen. Über die Senke verläuft eine Gesteinsbrücke (erste Brücke), der Schacht ist von der Senke durch einen Festgesteinsriegel getrennt (zweite Brücke). Aus den zwei „Brücken“ ergibt sich der Name des Schachts.

Der tiefste Punkt der Senke befindet sich unterhalb der Gesteinsbrücke in 9 m Tiefe. Der Verlauf des gras- und schuttbedeckten Bodens ist relativ flach bis 45° steil. Die Wände des Schachts verlaufen annähernd vertikal. Der Boden des Schachts liegt in 10 m Tiefe. Der Boden ist von Schutt, Humus und untergeordnet Vegetation bedeckt. Ein sehr schmaler Gang setzt sich vom Boden des Schachtes fort. Er fällt mit 30° nach NW ein und endet nach 2 m.



Abbildung 70 – Doppelbrückenschacht, Senke im Norden



Abbildung 71 – Doppelbrückenschacht, Schacht im Süden

◆ 1266/4 – Grete-Ruth-Schacht

*Koordinaten:* N 47°32,577', E 12°01,633' (WGS83), Seehöhe: 1435 m

*Ausmaße:* Länge: 142 m, Höhe: 39 m, horizontale Erstreckung: 46 m

Beim Abseilen in den generell N-S-verlaufenden Schacht gelangt man in gut 14 m Tiefe auf einen Zwischenhang, von welchem ausgehend man sich weiter abseilen kann. In rund 24 m Tiefe kommt man auf einem Klemmblock zu stehen, es empfiehlt sich, den weiteren Abseilvorgang in Richtung des tieferen Teils, also Richtung Norden vorzusetzen.

Großteils ist der Boden des weitestgehend eher feuchten Hauptraumes mit bis zu kindskopfgroßem Schutt, Humus und auffallend vielen Tierknochen bedeckt. Im Hauptteil des Schachts ist der Boden zwischen 30° und 35° geneigt und fällt nach Norden ein. Geht man im tiefsten Teil des Hauptraumes unter einer kleinen Felsbrücke hindurch, gelangt man zu einem kurzen Gegenanstieg, der vollkommen durch meist trockene, feinkörnige Sande bis Lehme bedeckt ist. Diese bereits von Beginn an nur wenig breite und hohe Fortsetzung wird bereits nach wenigen Metern unerschließbar.

Relativ genau unter dem großen Klemmblock befindet sich bodennah der kleine Zugang zu einem unteren Teil des Schachtes. Der schmale Hauptgang fällt auf 18m Länge mit 25° bis 45° Gefälle Richtung SW ein, dann biegt er um 180° um und fällt mit einer Neigung von bis zu 10° nach NE ein. Genau an der Stelle, wo

der Gangverlauf umbiegt, zweigt ein kleinerer Gang ab. Dieser verläuft mit 45° Steigung nach Norden, zuoberst befinden sich kleine Stalaktiten. Das oberste Drittel des nach SW einfallenden Hauptgangabschnitts ist mit bis zu faustgroßem Schutt, Knochen und untergeordnet Lehm bedeckt. Darunter besteht die Bodenbedeckung wiederum aus relativ trockenen Sanden und Lehmen, wie sie bereits im nördlichsten Teil des Schachthaupttraums angetroffen wurden. An Decken und Wänden finden sich vielerlei phreatisch angelegte Formen (Abbildung 72). Horizontal verlaufende Lehmlagerungen an den Wänden im untersten Bereich lassen sich als ehemalige Pegelstände interpretieren und legen den Schluss nahe, dass dieser Bereich episodisch geflutet war (Abbildung 73).

Am höchsten Teil des Hauptraumes gelangt man über einen zwar recht kurzen, aber sehr schmalen und steilen Überstieg in einen weiteren Raum, der relativ trocken ist und NNE-SSW verläuft. Dieser stellt die südlichste Fortsetzung dar. Der Boden fällt mit 50° nach SSW ein und ist nur in den tiefsten Bereichen mit Schutt und feinkörnigem Material bedeckt. Weiter oben befindet sich eine Felsbrücke, die ebenfalls mit Schutt bedeckt ist. An der Decke dieser Kammer treten Stalaktiten auf.



Abbildung 72 – Grete-Ruth-Schacht, unterer Gang, Deckenkolke, Gangquerschnitt (Bildbreite gut 1,2 m)



Abbildung 73 – Grete-Ruth-Schacht, unterer Gang, horizontale Wasserstandsmarken

◆ 1266/5 – Dreiecksschacht

*Koordinaten:* N 47°32,541', E 12°01,690' (WGS84), Seehöhe: 1439 m

*Ausmaße:* Länge: - m, Höhe: 5 m, horizontale Erstreckung: 3 m

Sein dreieckiger Grundriss ist für diesen Schacht namensgebend. Aufgrund der geringen Ausmaße und der vollkommenen oberirdischen Aufgeschlossenheit, wurde von einer Vermessung abgesehen. Der tiefste Punkt des Dreiecksschachts befindet sich in der südlichen Spitze des Dreiecks und erreicht etwa 5 m Tiefe. Zu diesem Punkt hin fallen die schuttbedeckten und vollkommen bewachsenen Hänge mit 35° Neigung ab. In den oberen Bereichen finden sich nur wenige aufgeschlossene Felsflanken, im unteren Bereich begrenzen nahezu senkrechte Wände den südlichen Teils des Schachts. Störungen sind erkennbar, die in Richtung zu beiden Seiten liegender Schwinden weiterlaufen und in Verbindung mit diesen und deren Entstehen stehen dürften.

◆ 1266/6 – Durrenberghöhle

*Koordinaten:* N 47°32,0921', E 12°00,3948' (WGS84), Seehöhe: 1260 m

Diese Höhle ist zwar im Kataster aufgenommen, konnte aber trotz mehrerer Geländebegehungen nicht ausfindig gemacht werden.

◆ 1266/7 – Schafgufel

*Koordinaten:* N 47°32,4912', E 12°02,0976', Seehöhe: 1553 m

*Ausmaße:* Länge: 12 m, Höhe: - m, horizontale Erstreckung: 9 m

Der Schafgufel befindet sich unmittelbar neben dem Nixloch, eine Verbindung dieser zwei ist nicht auszuschließen. Vom Eingang ausgehend erstreckt sich der Schafgufel für etwas mehr als 5 m horizontal Richtung Süden, danach biegt sie ab und verläuft ebenfalls horizontal für 7 m Richtung Westen. Der Boden erweist sich als durchgängig von Schutt und feinkörnigen Sedimenten bedeckt. Der Eingangsbereich ist zwar etwas mehr als 2 m breit, jedoch weniger als einen m hoch. Gegen Ende des südlichen ziehenden Teiles erweitert sich die Höhle jedoch zunehmend nach oben hin, die maximale Höhe der Decke liegt bei 2,5 m. Decke und Teile der Wände sind von Bergmilch bedeckt. Die Deckenhöhe vermindert sich im westlichen Verlauf zunächst drastisch auf gut 1 m, erweitert sich jedoch gleich wieder auf ebenfalls 2,5 m Höhe. In diesem Bereich finden sich keine Höhlenbildungen, gegen Ende hin befindet sich sehr viel, auch größerer Schutt. Der Höhlenraum ist weitestgehend trocken.

◆ 1266/8 – Nixloch

*Koordinaten:* N 47°32,4912', E 12°02,0976' (WGS84), Seehöhe: 1553 m

*Länge:* 14 m, Höhe: 7 m, horizontale Erstreckung: 12 m

Das Nixloch, dessen Name sich von ‚Nix‘, der umgangssprachlichen Bezeichnung für Bergmilch ableitet, verläuft im Großen und Ganzen von Ost nach West. Über den 2 m breiten und 1 m hohen Eingang gelangt man in den Höhlenraum, der zwischen 1 und 2,5 m hoch ist, mit 25-40° nach Westen ansteigt und in seinem Grundriss in der hinteren Hälfte keilförmig ist. Der Boden ist durchgehend mit Schutt und Lehm bedeckt und feucht bis trocken. Im vordersten Drittel der Höhle befindet sich keine Bergmilch, wo hingegen sie im hinteren Bereich sehr



flächendeckend auf Wänden und Decke auftritt. Die Ablagerungen dürften stellenweise Mächtigkeiten von mehreren dm erreichen.

◆ *1266/9 – Ziegenloch*

*Koordinaten:* N 47°32,496', E 12°02,0934' (WGS84), Seehöhe: 1520 m

*Ausmaße:* Länge: 5 m, Höhe: - m, horizontale Erstreckung: 5 m

Der Eingangsbereich des Ziegenloches ist 3 m breit und misst an seiner höchsten Stelle etwa 1 m. Der maximal 2 m hohe Hauptraum steigt flach an und verläuft grob Richtung SSE. Der Innenraum ist trocken, der Boden von Schutt und feinkörnigen Sedimenten bedeckt. Am südlichsten Punkt des Hauptraums zweigt ein schmaler Schlurf ab, dieser fällt mit etwa 15° in Richtung SW ein. Der Schlurf ist weniger als 1 m breit und nur etwa einen halben Meter hoch, gegen Ende hin ist er zunehmend mit feinkörnigen Sedimenten verfüllt.

◆ *1266/15 – Frauensteinhöhle*

*Koordinaten:* N 47°32,8692', E 12°02,0256' (WGS84), Seehöhe: 1418 m

*Länge:* 37 m, Höhe: 8 m, horizontale Erstreckung: 22 m

Von einigen Nadelbäumen umsäumt beginnt der Eingangsbereich der SW-NE-verlaufenden Höhle noch ober Tage. Der Boden dieses etwa 10 m langen oberirdischen Teils ist stark mit Gras bewachsen, die ihn umschließenden Felsflanken sind relativ steil und etwas mehr als 2 m hoch. Der Eingangsbereich zur Höhle ist 1,5 m hoch. Gleich beim Eingang gibt es eine Gabelung: ein 2 m kurzer schmaler Gang zweigt mit 20° Steigung in ENE ab, der Hauptteil der Höhle verläuft in nach NE. Bis zu einem Klemmblock fällt die Höhle über eine Länge von 7 m mit 25° Gefälle ab, ab dem Klemmblock gestaltet sich der Verlauf für rund 15 m subhorizontal. In diesem Bereich ist der Boden von Schutt und feinkörnigerem Material bedeckt. Der Querschnitt des Ganges ist V-förmig. Die südöstliche Flanke ist sehr großflächig von Bergmilch bedeckt, die nordwestliche Flanke erst im hinteren Teil. Auch die Decke ist vielerorts von Bergmilch bedeckt. Am Ende des subhorizontalen Abschnitts befindet sich bodennah eine sehr kurze Fortsetzung nach SSE, darüber liegt eine 65° steile Flanke. Über dieser befindet sich eine kurze Fortsetzung Richtung Norden, der schmale aber relativ hohe Gang ist stark

durch Bergmilch bedeckt, am Boden befinden sich ebenfalls Schutt und Sand bzw. Lehm. Der gesamte Höhlenraum ist relativ feucht, vielerorts gibt es Tropfstellen.

◆ *1266/16 – Rappenloch*

*Koordinaten:* N 47°32,0805', E 12°02,2040' (WGS84), Seehöhe: 1274 m

◆ *1266/17 – Rappenloch*

*Koordinaten:* N 47°32,0947', E 12°02,2196' (WGS84), Seehöhe: 1370 m

◆ *1266/18 – Rappenloch*

*Koordinaten:* N 47°32,0971', E 12°02,2395' (WGS84), Seehöhe: 1306 m

◆ *1266/19 – Rappenloch*

*Koordinaten:* N 47°32,1189', E 12°02,2589' (WGS84), Seehöhe: 1333 m

Die Rappenlöcher befinden sich allesamt in der Steilwand südlich der Hundsalml. Da das Gelände in diesem Bereich praktisch senkrecht abfällt, wurden die Höhlen nicht von mir aufgesucht. Den Aufnahmen aus dem Jahre 1971 kann man entnehmen, dass es sich bei diesen um Halbhöhlen mit großem Portal und unbedeutenden Höhlenraum handelt.

◆ *1266/20 – Augenschacht*

*Koordinaten:* N 47°32,580', E 12°01,635', Seehöhe: 1461 m

In Berichten des Landesvereins für Höhlenkunde in Tirol finden sich aus dem Jahre 1971 Aufzeichnungen über den Augenschacht. In diesen wird er mit 4 m Tiefe und starken Laugungserscheinungen beschrieben. Diese Aufschlussverhältnisse sind heute leider nicht mehr anzutreffen. Der Schacht ist vollkommen bewachsen. Entweder ist er verbrochen oder er wurde mit Material, z.B. Baumschnitt zugeschüttet, um weidendes Vieh vor dem Hineinstürzen zu bewahren.

#### *2.4.2. Weitere vermessene Höhlen/ Halbhöhlen im Untersuchungsgebiet*

◆ *Humushöhle*

*Koordinaten:* N 47°32,385', E 12°01,935' (WGS84), Seehöhe: 1525 m

*Ausmaße:* Länge: 8 m, Höhe: 4 m, horizontale Erstreckung: 7 m.

Ihren Namen erhielt diese Kleinhöhle aufgrund des massenhaft den Boden bedeckenden Humus. Dieser gelangt über einen Schlot in die Höhle, der vollständig von Humus und Vegetation in Form von Gras überdeckt ist. Stärkere Regenfälle dürften einen Teil des Humus und Erdreichs ausschwemmen und so in die Höhle ableiten.

Das Portal zur Humushöhle, die von Nord nach Süd verläuft, ist etwa 1,5 m breit und erreicht 0,5 m Höhe. Nach 2,5 m, die man kriechend bewältigen muss, erweitert sich der Höhlenraum nach oben hin. Gleichzeitig endet der horizontale Verlauf, dessen Boden stark mit Schutt und Erdreich bedeckt ist. Eine Felsflanke steigt mit 50° an und ist knapp 2 m hoch. Oberhalb des Fußes der Steilstufe befindet sich der oben genannte, relativ schmale Schlot, der etwa 4 m nach oben reicht und es erlaubt, Boden von unten zu betrachten. Der Boden sowie die steile Wand sind an dieser Stelle von viel Humus bedeckt. Oberhalb der Steilstufe verläuft der Höhlenboden für gute 3 m mit 25° nach Süden ansteigend. In diesem Bereich ist der Boden nur mehr von kleinerem Schutt und relativ viel feinkörnigem Material bedeckt. Der höchste Punkt der Decke liegt in diesem Bereich ebenfalls bei 4 m. Allerdings trennt ein Felsriegel diesen Teil des Höhlenraumes vom Schlot. Der Höhlenraum ist im vorderen Teil nass, im hinteren Teil oberhalb der Steilstufe trocken.



Abbildung 74 – Humushöhle, Blick von oberhalb der Steilstufe zum vorderen Teil der Höhle hinunter



Abbildung 75 – Humushöhle, Blick den Schlot zum hängenden Boden hinauf (Bildbreite ca. 1 m)

◆ *Halbhöhle Hundsalzm 1*

*Koordinaten:* N 47°32,5104', E 12°02,1402' (WGS 84), Seehöhe: 150 1 m

*Ausmaße:* Länge: 3 m, Höhe: 3 m, horizontale Erstreckung: 3 m

Es handelt sich hierbei um eine recht kleine Höhlenbildung entlang einer Schichtfläche, die mit 50° Richtung NW einfällt. Die Halbhöhle verläuft Richtung NE und ist 3 m lang. Der Eingang ist fast 2 m breit und gute 2,5 bis 3 m hoch. Die Ausmaße des Eingangs entsprechen denen des Innenraumes. Der Boden ist von Schutt und Erde bedeckt.

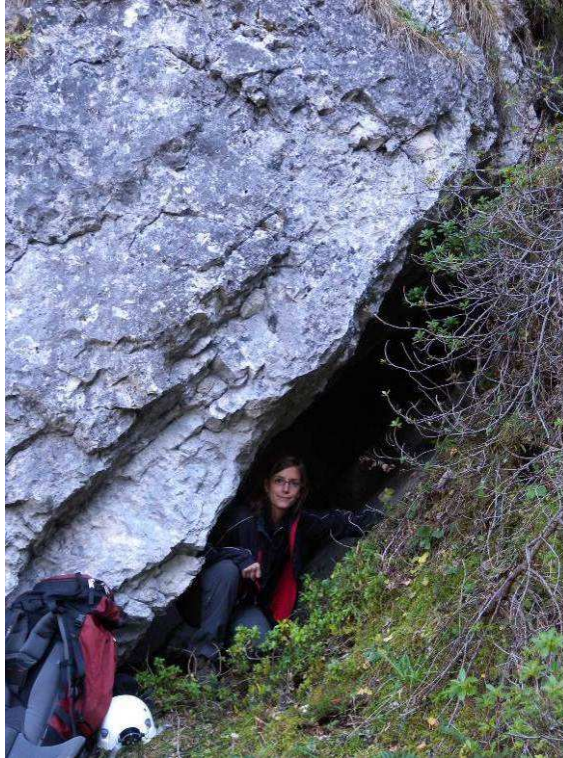


Abbildung 76 – Halbhöhle Hundsalzm 1, Eingangsbereich

◆ *Schwinde 2*

*Koordinaten:* N 47°32,6208', E 12°01,77' (WGS84), Seehöhe: 1411 m

*Ausmaße:* Länge: 4 m, Höhe: 2 m, horizontale Erstreckung: 4 m

Im Gebiet der Hundsalzm befinden sich mehrere Schwinden. Die Schwinden 1 bis 5 sind 220 m westlich des Hundsalzm Hauptgebäudes gelegen, die große Schwinde 6 liegt wenige m nordöstlich des Gebäudes. Schwinde 2 kann begangen werden, wenn man einen Block wegräumt, der den Eingangsbereich versperrt.

Das Portal von Schwinde 2 ist groß genug, um hineinzukriechen, sie verläuft nach NW. Der Querschnitt ist V-förmig. Direkt nach der Felsflanke im NE zweigt ein nach Osten verlaufender, recht schmaler und knapp 2 m langer Gang ab. Wasser tritt in Schwinde 2 über den schließbaren Eingang ein, biegt in den Seitenarm ab und versickert am dessen Ende wiederum.



Abbildung 77 – Schwinde 2, Eingangsbereich nach Entfernung des darüber liegenden Blockes

◆ *Frauensteinhöhle 2*

*Koordinaten:* N 47°32,898', E 12°02,084' (WGS84), Seehöhe: 1447 m

*Ausmaße:* Länge: 8 m, Höhe: 2 m, horizontale Erstreckung: 9 m

Der Eingangsbereich der Frauensteinhöhle 2 ist nur etwa 0,5 m niedrig und 3 m breit. Stellenweise finden sich an der im Norden gelegenen Wand kleine inaktive Knöpfchensinter. Der Hauptraum der Höhle, deren Boden mit Schutt und feinkörnigen Sedimenten bedeckt ist, verläuft für 4 m Richtung Osten ansteigend. Dort wird der weitere Verlauf durch eine Felsflanke geprägt. In südlicher Richtung kommt von schräg oben ein kleinerer Zugang hinzu, durch welchen Tageslicht dringt. Nach Norden hin verschmälert sich der nun mit 20° abfallende Hauptraum und biegt nach 3 m Richtung NE in einen schmalen Gang um. Der Verlauf des Bodens wird subhorizontal. Gegen Ende des schmalen Ganges bedeckt größerer Schutt den Boden.

*2.4.3. Weitere Höhlen/ Halbhöhlen im Untersuchungsgebiet*

Neben den bisher beschriebenen Höhlen, finden sich noch zahlreiche andere, meist jedoch recht kleine Hohlräume im Gebiet. Ihre Position wurde ebenfalls per GPS-Gerät ermittelt, von einer Vermessung bzw. Zeichnung eines genauen Höhlenplans wurde jedoch aufgrund der geringen Ausmaße abgesehen.

◆ *Kleinhöhle Hundsalz 1*

*Koordinaten:* N 47°32,398', E 12°01,948' (WGS84), Seehöhe: 1523 m

*Ausmaße:* Höhe: 0,4 m, Breite: 3 m, Tiefe: 3,5 m

Diese Höhle ist schichtparallel angelegt, die Höhe des Innenraums nimmt mit zunehmender Tiefenerstreckung ab. Die Decke ist brüchig, Schutt bedeckt den Boden. Direkt vor dem Mundloch ist ein kühlerer Luftzug zu verspüren. Fellspuren und Geruch deuten darauf hin, dass diese kleine Höhle zumindest zeitweise von Tieren – vermutlich Dachsen – bewohnt wird.

◆ *Kleinhöhle Hundsalz 2*

*Koordinaten:* N 47°32,387', E 12°01,941' (WGS84), Seehöhe: 1536 m

*Ausmaße:* Höhe: 0,4 m, Breite 4 m, Tiefe: 4 m

Auch diese Höhle ist schichtparallel angelegt. Der Innenraum ist sehr niedrig und der Boden stark durch Schutt der brüchigen Decke bedeckt.

◆ *Kleinhöhle Hundsalz 3*

*Koordinaten:* N 47°32,429', E 12°01,994' (WGS84), Seehöhe: 1513 m

*Ausmaße:* Höhe: 1 m, Breite 4 m, Tiefe: 6 m

Aus dieser schichtparallel verlaufenden Höhle tritt ein deutlicher Luftzug aus. Der Boden ist durchgängig von Humus und Steinen bedeckt. Der Innenraum an sich reicht etwa 3 m tief in den Fels hinein, entlang einer Störung zieht jedoch ein niedriger Schlurf noch 3 m weiter.

◆ *Kleinhöhle Hundsalz 4*

*Koordinaten:* N 47°32,441', E 12°02,021' (WGS84), Seehöhe: 1528 m

*Ausmaße:* Höhe: 0,5 m, Breite: 3,5 m und 2 m, Tiefe: 2 m

Hier befinden sich zwei kleine Höhlen unmittelbar nebeneinander. Die Tatsache, dass sie derselben Schichtfläche folgen und dass sie nur 0,7 m lateral voneinander entfernt sind, legt den Schluss nahe, dass sie eine Verbindung miteinander haben könnten. Die Höhe und der Tiefgang sind bei beiden

Kleinhöhlen gleich groß, lediglich in ihrer Breite besteht ein Unterschied. Der Boden ist in beiden Fällen ausschließlich von Schutt bedeckt.

◆ *Kleinhöhle Hundsalz 5*

*Koordinaten:* N 47°32,441', E 12°02,093' (WGS84), Seehöhe: 1550 m

*Ausmaße:* Höhe: 0,4 m, Breite: 1,7 m, Tiefe: 2,5 m

Der Boden dieser wiederum dem Schichtverlauf folgenden Höhle ist stark durch Humus bedeckt. Der starke Geruch lässt auf eine aktuelle Bewohnung der Höhle durch Tiere schließen.

◆ *Halbhöhle Nordwand 1*

*Koordinaten:* N 47°32,538', E 12°00,871' (WGS84), Seehöhe: 1330 m

*Ausmaße:* Höhe: 1,7 m, Breite: 8 m, Tiefe: 5 m

Diese Höhle verläuft entlang der steil nach NW einfallenden Schichtung (Abbildung 78). Die Höhe des Innenraums bleibt mit zunehmender Tiefe in etwa gleich.



Abbildung 78 – Halbhöhle Nordwand 1

◆ *Halbhöhle Nordwand 2*

*Koordinaten:* N 47°32,518', E 12°00,891' (WGS84), Seehöhe: 1295 m

*Ausmaße:* Höhe: 2 m, Breite: 7 m, Tiefe: 2,5 m



Auch diese Halbhöhle verläuft schichtungsparell. Relativ viel größere Brocken liegen im Eingangsbereich (Abbildung 79).

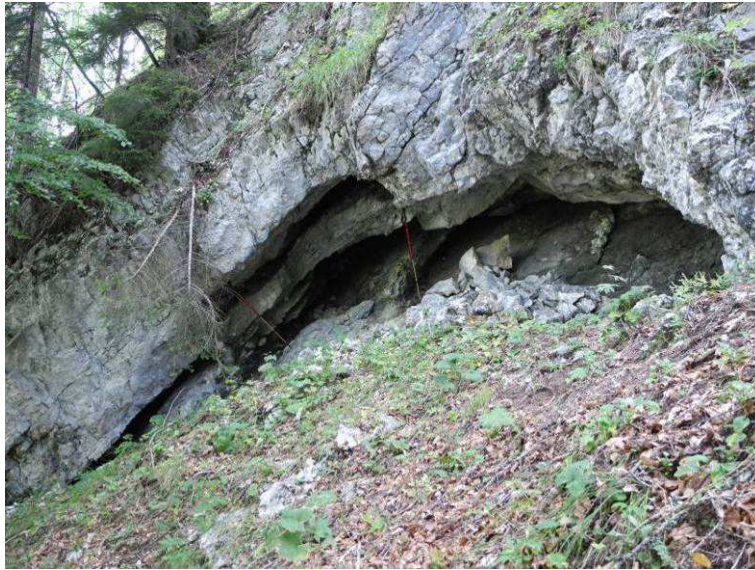


Abbildung 79 – Halbhöhle Nordwand 2

◆ *Halbhöhle Nordwand 3*

*Koordinaten:* N 47°32,949', E 12°01,694' (WGS84), Seehöhe: 1251 m

*Ausmaße:* Höhe: 2 m, Breite: 4 m, Tiefe: ? m

Die Koordinaten bezeichnen einen Punkt rund 15 Höhenmeter unterhalb dieser Halbhöhle. Die Höhle ist gut ersichtlich, wurde jedoch aufgrund der schwierigen Geländebeziehungen nicht erreicht.

◆ *Halbhöhle Nordwand 4*

*Koordinaten:* N 47°32,941', E 12°01,693' (WGS84), Seehöhe: 1231 m

*Ausmaße:* Untere Höhle: Höhe: 1,7 m, Breite: 2 m, Tiefe: 2 m

*Ausmaße:* Obere Höhle: Höhe: 1,5 – 3 m, Breite 15 m, Tiefe: min. 5 m

In diesem Bereich befinden sich gleich mehrere Höhlenercheinungen. Alle Höhlen verlaufen schichtparell. Die Koordinaten entsprechen der relativ kleinen, unteren Höhle (Abbildung 80).

Rund 20 Höhenmeter oberhalb des aufgenommenen Punktes befindet sich eine größere Erscheinung. Auch diese konnte aufgrund des sehr steilen Geländes nicht erreicht werden. Sie erstreckt sich mit variierender Höhe über eine Breite von etwa

15 m. In den am weitesten im Osten gelegenen Bereich kann man bis zu 5 m weit einsehen (Abbildung 81). Ein relativ starker, kalter Luftzug deutet allerdings auf eine noch größere Tiefe hin.



Abbildung 80 – Halbhöhle Nordwand 4, untere Höhle



Abbildung 81 – Halbhöhle Nordwand 4, obere Höhle

◆ *Halbhöhle Nordwand 5*

*Koordinaten:* N 47°32,898', E 12°01,653' (WGS84), Seehöhe: 1281 m

*Ausmaße:* Höhe: 1,5 m, Breite: 4,5 m, Tiefe: 3 m

Auch der Verlauf dieser Erscheinung orientiert sich an der NW-fallenden Schichtung des Gesteins (Abbildung 82).



Abbildung 82 – Halbhöhle Nordwand 5

◆ *Halbhöhle Nordwand 6*

*Koordinaten:* N 47°32,870', E 12°01,603' (WGS84), Seehöhe: 1262 m

*Ausmaße:* Höhe: 2 m, Breite: 8 m, Tiefe: 4 m

Form und Verlauf der Höhle entsprechen denen von Halbhöhle Nordwand 2.

◆ *Halbhöhle Nordwand 7*

*Koordinaten:* N 47°32,846', 12°01,868' (WGS84), Seehöhe: 1265 m

*Ausmaße:* Höhe: 2 m, Breite: 15 m, Tiefe: ? m

Der GPS-Punkt entspricht der Lage gute 30 Höhenmeter unterhalb der Höhle, die aufgrund der Steilheit des Geländes schwierig zu erreichen ist.

◆ *Kleinhöhle Eishöhle 1*

*Koordinaten:* N 47°32,796', 12°01,017' (WGS84), Seehöhe: 1451 m

*Ausmaße:* Höhe: 1,1 m, Breite: 1,5 m, Tiefe: 2 m

Die Entstehung dieser sehr kleinen Höhle dürfte störungskontrolliert sein.

◆ *Kleinhöhle Frauenstein 1*

*Koordinaten:* N 47°32,931', E 12°02,080' (WGS84), Seehöhe: 1419 m

*Ausmaße:* Höhe: 0,5 m, Breite: 2,5 m, Tiefe: 2,5 m

Die Höhle verläuft parallel der Schichtung. Der Boden des trockenen Innenraumes ist stark von Schutt bedeckt. Man kann vermuten, dass die Höhle noch tiefer in das Gestein reichen würde, allerdings ist der Hohlraum nach etwa 2 m verbrochen.

◆ *Kleinhöhle Frauenstein 2*

*Koordinaten:* N 47°32,922', E 12°02,096' (WGS84), Seehöhe: 1465 m

*Ausmaße:* Höhe: 1 m, Breite: 1 m, Tiefe: 1,5 m

Das Eingangsportal ist fast kreisrund und schmaler wie auch niedriger als der Innenraum. Die Decke ist brüchig, viel Schutt liegt am Boden.

◆ *Halbhöhle Frauenstein 1*

*Koordinaten:* N 47°32,8900', E 12°02,3917' (WGS84), Seehöhe: 1400 m

*Ausmaße:* Höhe: 1,2 m, Breite: 4 m, Tiefe: 3,5 m

Auch diese Höhle verläuft schichtparallel.

### **3. Mikrobiologie der Bergmilch**

Bergmilch besteht generell aus mikroskopisch feinsten CaCO<sub>3</sub>-Fasern (monokristalline Stäbchen bis polykristalline rhomboedrische Ketten), organischen Polymeren, Mikroorganismen und zu einem hohen Anteil aus Wasser (40 – 96%). Überwiegend stark plastisch überzieht sie Höhlenwände, -decken und -böden. Es wird angenommen, dass Mikroorganismen eine wesentliche Rolle bei der Bildung von Bergmilch spielen. Der Prozess, bei dem Mikroorganismen an der Bildung eines Minerals beteiligt sind, wird allgemein als Organomineralisation bezeichnet.

Bergmilch kommt im eisfreien Teil der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle bevorzugt auf Wänden und Decken vor (Abbildung 64, Abbildung 66). An einigen wenigen Stellen finden sich auch Bergmilch-Bildungen am Boden. In ihrer äußeren Erscheinung tritt die Bergmilch als leicht verformbarer, nasser, popcorn- oder watteartiger Überzug auf. Die Ablagerungen sind überwiegend schneeweiß. An einigen Stellen finden sich jedoch auch farbige Bildungen (gelb bis rotbraun). Ihre Farbe ist auf Verunreinigungen durch nicht-karbonatisches Material zurückzuführen. Untergeordnet sind auch trockenere und härtere (durch

Dehydrierung), tropfsteinförmige Bildungen vorhanden. Eine Besonderheit stellt eine subaquatische Ausbildung dar, die in einem kleinen, permanenten See auftritt (Abbildung 65). Subaquatische Bergmilch zeigt eine andere kristalline Ausprägung als herkömmliche Bildungen am Interface Fels-Luft.

Mikrobiologische Analysen – wobei sowohl ein Kultivierungs- als auch ein molekularbiologischer Ansatz angewendet wurden – ergaben, dass es sich bei der Bergmilch des eisfreien Teils der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle um eine komplexe Gemeinschaft aus dominierend heterotrophen (organische Verbindungen als Energiequellen verwendenden) und psychrophilen (kälteliebenden) Archaea, Bacteria und Pilzen handelt. Die Vergesellschaftung von Organismen in sogenannten Biofilmen ist nichts Ungewöhnliches. Der enge Zusammenschluss verschiedener (Kleinst-)Lebensformen mit unterschiedlichen Spezialisierungen und Fähigkeiten ermöglicht das Erreichen von Leistungen – wie etwa im konkreten Fall die Besiedelung eines extremen Habitats – zu welchen ein Individuum (respektive eine einzige Spezies) allein nicht fähig wäre. Außerdem spendet der Zusammenschluss in einem Biofilm den Mikroorganismen Schutz vor mechanischen und/ oder chemischen Belastungen.

Die Herkunft der Mikroorganismen, die in Bergmilch auftreten, lässt sich über verschiedene Ansätze erklären. So treten im vorliegenden Fall die Bergmilchvorkommen bevorzugt an Rissen, über welche Wasser in den Höhlenraum eindringen kann, auf. Zusätzlich erscheint auch ein Eintrag über Tiere realistisch, da bereits öfters Fledermäuse bzw. deren Hinterlassenschaften in der Höhle gesichtet worden sind. Es ist noch nicht geklärt, wie Fledermäuse ins Innere der Höhle gelangen. Es ist nur der Zugang über den Eisteil der Höhle bekannt. Dieser ist artifiziell verschlossen und scheidet somit als Zutrittsmöglichkeit für die Tiere aus. Es liegt also auf der Hand, dass es eine bislang unbekannte Verbindung zur Außenwelt geben muss. So ist es weiters auch möglich, dass Mikroorganismen von draußen per Luftstrom in die Höhle gebracht werden.

Wie bereits in 6.1 beschrieben, wurde auf dem Wege der Lebend-Kultivierung versucht, Reinkulturen heranzuzüchten. Die Anzüchtungen lieferten zwar gute Ergebnisse, jedoch ist zu beachten, dass es sich bei den Mikroorganismen, die sich in der Bergmilch befinden, um Lebensformen handelt, die an sehr geringes Angebot an Nährstoffen (oligothrophe Lebensweise) gewohnt sind. So können

diese im Falle einer Anzucht auf einem nährstoffreichen Medium überfordert sein. Dies kann dazu führen, dass nur einige wenige Arten gut wachsen und es dadurch zu einer Unterschätzung der Diversität kommt. Infolgedessen empfiehlt es sich, mit optimierten Wachstumsmedien zu arbeiten, die weniger Nährstoffkonzentration aufweisen und denen  $\text{CaCO}_3$  und weitere Zusatzstoffe hinzugefügt werden, um dadurch Keimzahlen und Diversität zu erhöhen. Vor allem die Zugabe von  $\text{CaCO}_3$  zeigte einen positiven Effekt (REITSCHULER et al. 2012).

Es gelang mithilfe des Kultivierungs-Ansatzes über ein Dutzend Reinkulturen anzuzüchten, bei welchen es sich überwiegend um Bacteria handelt. Allerdings konnten über diesen Ansatz auch Pilze nachgewiesen werden, bei denen der molekularbiologische Nachweis nicht gelang. Im Gegensatz dazu stehen Archaea, die zwar molekularbiologisch nachgewiesen, aber nicht kultiviert werden konnten.

Beim Kultivierungs-Ansatz wurden verschiedene Bebrütungstemperaturen angewendet. Die Kulturen zeigten Wachstum in einem Temperaturbereich von 0 bis 25°C. Ein erstaunlich schnelles Wachstum erfolgte bei niedrigen Temperaturen. Es handelt sich somit um psychrophile bzw. psychrotolerante Kulturen. Dies ist nahe liegend, da die durchschnittliche Temperatur der Höhle der lokalen Jahresdurchschnittstemperatur entspricht und bei 4,3°C liegt. Interessant ist, dass sich bei den herangezogenen Reinkulturen ein häufiges Vorkommen stark pigmentierter Arten (gelb, rot, blau, schwarz) feststellen lässt. Dies legt eine Herkunft aus einem oberflächlichen, lichtexponierten Habitat – dem Boden – nahe.

Mit den in 6.2 erklärten Methoden wurde über den molekularbiologischen Ansatz genomische DNS isoliert und vermehrt. Dieser wurde sowohl auf die originalen Bergmilch-Proben als auch auf die per Anzuchtung gewonnenen Reinkulturen angewendet. Quantität und Qualität wurde mittels spezieller Methoden ermittelt.

Die quantitativen Untersuchungen ergaben, dass in allen Proben Individuen auftreten. Die Individuenzahl variierte zwischen einigen Hundert bis zu über einer Million, im Extremfall bis zu 10 Millionen Individuen pro ml Bergmilch. Sehr hohe Individuenzahlen (> 1 Million pro ml Bergmilch), sind durchaus mit den hohen Zahlen in Böden oder Oberflächengewässern vergleichbar. Die subaquatischen Vorkommen zeigten deutlich geringere Keimzahlen.

Im Zuge qualitativer Analysen wurde versucht, die DNS mikrobiellen Domänen der Prokaryoten (Archaea, Bacteria) bzw. Eukaryoten (Fungi) zuzuordnen. Diese Untersuchungen zeigten eine sehr diverse Organismenzusammensetzung bei Bacteria, Archaea sind artenärmer bzw. einige Spezies sehr dominant vertreten. Des Weiteren wurde auch das Vorkommen einiger kurzkettiger, einfacher organischer Säuren festgestellt. Diese können als Folge von Stoffwechselaktivität mikrobiellen Ursprungs sein oder eine externe Quelle haben und unter Umständen die Grundlage mikrobieller Aktivität sein (REITSCHULER et al. 2012).

Im Folgenden sollen die detektierten Gattungen samt den zugehörigen Abteilungen aufgelistet werden. Dabei sind jene Gattungen mit einem Stern gekennzeichnet, die in vergleichbaren Studien über höhlenbewohnende Kleinstlebewesen bisher noch nicht beobachtet wurden. Bei den detektierten Bakterien handelt es sich durchwegs um solche, die weit verbreitet in Böden und/oder oberflächlichen Gewässern vorkommen, oftmals sehr tolerant im Bezug auf ihre Lebensbedingungen sind und zudem in einigen Fällen eine Vielzahl an Substanzen abbauen können ([www.microbewiki.kenyon.edu](http://www.microbewiki.kenyon.edu)).

- *Bacteria*
  - *Actinobacteria*  
Arthrobacter, Micrococcus, Rhodococcus, Streptomyces
  - *Alphaprotobacteria*  
Brevundimoas\*, Sphingomonas\*
  - *Bacteroidetes*  
Flavobacterium
  - *Firmicutes*  
Exiguobacterium, Paenibacillus\*, Paenisporosarcina\*, Sporosarcina\*
  - *Gammoprotobacteria*  
Pseudomonas
- *Fungi*
  - *Ascomycota*  
Illosporium
  - *Basidiomycota*  
Rhodotorula

## V. *Diskussion*

In den folgenden Seiten soll versucht werden, eine Synthese der gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse zu erstellen. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die gewonnenen Erkenntnisse punktweise diskutiert.

### ◆ *Geologische Kartierung*

Folgend soll ein Vergleich meiner Erkenntnisse mit der geologischen Karte des Untersuchungsgebiets von AMPFERER (1925) erstellt werden.

- Die Grenze zwischen den beiden dominierenden Lithologien im Scheitelbereich (Wettersteinkalk und Hauptdolomit) deckt sich zum größten Teil, verläuft stellenweise jedoch leicht verändert.
- Gesteine der Gosau Gruppe beschränken sich auf der Karte von Ampferer auf ein einziges, SW-NE-streichendes Vorkommen im westlichen Teil des Ebenwaldes. Dieses entspricht in seiner Lage meinen Beobachtungen, nicht aber in seinen Ausmaßen. So wurde im Zuge meiner Feldarbeiten lediglich ein Vorkommen mit einem guten Drittel der in Ampferers Karte dargestellten Ausmaße festgestellt.
- Es wurden einige, meist sehr kleine Aufschlüsse von Raibler Schichten, Gosau Gruppe und quartären Ablagerungen im Scheitelbereich der Guffert-Pendling-Antiklinale entdeckt, die nicht eingetragen sind.
- Die vermutete Massenbewegung im Bereich des Ebenwaldes ist nicht in der Karte vermerkt. Durch die mithilfe von Profilen gewonnenen Erkenntnisse ist anzunehmen, dass es sich hierbei vermutlich um eine relativ flachgründige Massenbewegung handelt.

Nachstehend sollen die im Gebiet vertretenen Lithologien kurz umrissen werden.

#### - *Wettersteinkalk und –dolomit*

Im Untersuchungsgebiet handelt es sich größtenteils um den deutlich gebankten Lagunen-Faziestyp. Für den Lagunenbereich des Wettersteinkalk typisch tritt die Wirtelalge *Diplopora annulata* auf. Eher unerwartet hingegen fanden sich auch der Riffschutt-Faziestyp und sedimentäre Brekzien vertreten.



Das Auftreten von Brekzien spricht für den Oberen Wettersteinkalk (mdl. Mitt. RESCH 2012). Durch Mikrofossilien werden sehr seichte Bedingungen angezeigt, vereinzelt finden sich Fossilien, die etwas tieferer Verhältnisse anzeigen. Die bereichsweise auftretende Dolomitisierung erwies sich als schichtgebunden. Ein Punkt, dem besonderes Interesse galt, war die auftretende Verkarstung (s.u.).

- *Raibler Schichten*

Laut Literatur erweisen sich die Raibler Schichten in diesem Bereich als weitestgehend tektonisch ausgequetscht. Es ist jedoch festzuhalten, dass sich einem bei genauerer Betrachtung immer wieder überwiegend reliktsche Vorkommen dieser Schichtgruppe in Form von Lesesteinen offenbaren. Ein größeres zusammenhängendes Vorkommen ist in einem zum Hasatalgraben hinunterziehenden Graben nördlich der Buchackeralm aufgeschlossen. Zuunterst besteht diese Abfolge aus gelblichen, stark zerscherten Dolomiten. Darüber folgen relativ mächtigere grauschwarze Schiefer, die rostig verwittern und ebenfalls stark zerschert sind. Zuoberst sind relativ dünnbankige, rote Kalke mit *Lopha montiscaprilis* aufgeschlossen. Das Vorkommen dieser Auster ist typisch für die Obere Karbonatgesteinsserie der Raibler Schichten (mdl. Mitt. RESCH 2012). Zusätzlich und für Raibler Schichten typisch, fanden sich bei mikroskopischer Betrachtung zahlreiche Echinodermenreste.

- *Hauptdolomit*

Der Hauptdolomit im Untersuchungsgebiet erweist sich als stark tektonisch zerschert und nur schwer näher bestimmbar. Vielfach treten synsedimentäre und tektonische Brekzien auf.

- *Gosau Gruppe*

Die Gesteine der Gosau Gruppe sind vielgestaltig (Basalbrekzie, Konglomerate, Kalke, Kalksandsteine) und treten bevorzugt an früh angelegten Dehnungsstrukturen im Scharnierbereich der Antiklinale auf. Durch kreidezeitliche Freilegung verkarsteter Wettersteinkalk ist mancherorts von basaler, bauxitischer Gosau verfüllt (THÖNY 2003). Überdies sind Konglomerate mit porphyroidischen Komponenten aufgeschlossen, an wenigen Stellen finden sich Bruchstücke von *Actaeonellen* und *Nerineen* in den Konglomeraten. Beides weist auf das Vorhandensein von Unterer Gosau

Subgruppe hin, wie bereits in GRUBER (2009) beschrieben. Ein Vorkommen bituminöser, brackisch-limnischer Mikrite ähnlich denen der Zöttbachalm bestätigt die Zugehörigkeit zur Brandenberger Gosau. Außerdem wurden die für die Gosau typischen Bivalven *Plagioptychus* und *Hippurites* gefunden.

- *Quartäre Ablagerungen*

An einigen Stellen sind im unbewaldeten Scheitelbereich an kleinen Gräben und entlang von Bachläufen quartäre Ablagerungen aufgeschlossen. Die mäßig bis stark konsolidierten, diamiktische Sedimente werden als Grundmoräne interpretiert. Durch deren wasserstauenden Eigenschaften kommt es häufig zur Ausbildung von Vernässungszonen und an einigen Stellen zu Moorbildung. Neben den kleinen Aufschlüssen von Grundmoräne sind vielerorts mehr oder weniger große Findlinge (v.a. Gneise) vorhanden. Darüber hinaus befinden sich auch im Hasatal quartäre Ablagerungen. Überraschend ist, dass trotz der vollständigen Eisbedeckung der Guffert-Pendling-Antiklinale im LGM nicht mehr quartäre Ablagerungen im Gebiet anzutreffen sind.

Die *lokale Tektonik* gestaltete sich wie in früheren Arbeiten beschrieben (SPENGLER 1956; EISBACHER & BRANDNER 1996; HEIßEL 1957; TOLLMANN 1969; THÖNY 2003). Die der Lechtaldecke zugehörige Guffert-Pendling-Antiklinale streicht in diesem Bereich SW-NE und taucht sanft nach WSW ab. Das Gebiet ist von zahlreichen, überwiegend NW-SE-streichenden Störungen durchzogen, die als konjugierte Störungen zur Inntal-Scherzone zu sehen sind. Im Sattelbereich der Antiklinale verlaufen zudem einige kleinere Störungen in SW-NE.

Im Zuge der *hydrogeologischen Recherchen* wurden Daten des Quellkatasters der ÖBF und des Wasserinformationssystems des Landes Tirol ausgewertet. Es zeigte sich, dass die Schüttung der meisten Quellen im Gebiet gering und stark von meteorologischen Umständen beeinflusst ist. Einige Quellen sind perennierend, einige intermittierend. Alles spricht für die Ausbildung eher seichter Aquifere:

- Es treten nur wenige oberflächliche Gewässer auf, bei denen es sich durchwegs um Rinnsale handelt.

- Die meisten Quellen im Scheitelbereich sind im Hauptdolomit bzw. nahe der Grenze Wettersteinkalk-Hauptdolomit gelegen und sehr gering schüttend.
- Die Quellen im Hasatal befinden sich im Wettersteinkalk. Sie zeigen ebenfalls eine nur geringe Schüttung.
- An der Nordflanke treten Quellen erst ab dem Bereich der Ebenwaldalm und nahe dem Glemmbach aus, was für die Ausbildung der angesprochenen Massenbewegung sprechen würde.
- An der Südflanke befinden sich einige wenige Quellen im Wettersteinkalk, die meisten Quellaustritte liegen an der Grenze zum Hauptdolomit und im Hauptdolomit am Hangfuß. Letztere weisen zum Teil größere Schüttungen auf und werden genutzt.
- Die dominierenden Lithologien Wettersteinkalk und –dolomit und Hauptdolomit fungieren als sehr gute Grundwasserleiter. Stauend wirkende Gesteine der Raibler Schichten, der Gosau Gruppe und des Quartärs sind nur in kleinem Ausmaß vertreten und spielen daher in Bezug auf die hydrogeologischen Verhältnisse eine nur untergeordnete Rolle.
- In Bezug auf die Wasserwegigkeit spielen die zahlreichen Störungen vermutlich eine entscheidende Rolle, da sie die Wasserwegigkeit verbessern.
- Schon bei Betrachtung der vielen Karren, Dolinen, Höhlen und Schwinden offenbart sich ein hohes Maß an Verkarstung des Wettersteinkalk im Gebiet (s.u.). Vergleicht man die als Differenz von Niederschlag und Verdunstung verbleibende Wassermenge mit den Schüttungen der Quellen und Fließgewässer, erschließt sich, dass der Verkarstung ein wesentlicher Beitrag am Abfluss aus dem Gebiet zukommen muss. Weiterführende hydrogeologische Untersuchungen – insbesondere Tracerversuche – würden weitere, wertvolle Erkenntnisse zum Grad der unterirdischen Verkarstung liefern.

◆ *Karstgeomorphologie*

Im Untersuchungsgebiet sind viele verschiedengestaltige Anzeichen der Verkarstung anzutreffen. So sind in Form von Karren und Dolinen zahlreiche die

Oberfläche gestaltende Elemente vertreten. Die unterirdische Verkarstung gestaltet sich durch Dolinen und Schwinden, Höhlen und Schächte verschiedenen Ausmaßes. Wie bereits oben erwähnt, ist die hydrogeologische Situation im Untersuchungsgebiet stark durch Verkarstung beeinflusst.

- Bei den oberflächlichen Verkarstungserscheinungen handelt es sich um postglazial entstandene Formen. Viele der unterirdischen Formen müssen in Anbetracht ihrer Ausmaße wesentlich früher angelegt worden sein. An einigen Stellen finden sich Hinweise, die die Verkarstung durch kreidezeitliche Freilegung (Paläokarst) bestätigen: mit basaler Gosau verfüllte Spalten im Wettersteinkalk (THÖNY 2003).
- Laut Höhlenkataster befinden sich 15 Höhlen und Schächte im untersuchten Gebiet. Darüber hinaus wurden 19 weitere kleinere Höhlen bzw. Halbhöhlen im Zuge der Geländearbeiten entdeckt; es gibt also um eineinviertel Mal mehr Höhlen als bisher bekannt. Zusammen mit den insgesamt 21 aufgefundenen Dolinen und Schwinden ergibt sich das Bild einer intensiven Verkarstung.
- Auf das gesamte Gebiet bezogen befinden sich durchschnittlich 6,5 Höhlen pro km<sup>2</sup>. Besonders viele Verkarstungserscheinungen liegen im Streifen Nordwand – Hundalm Eishöhle – Hundalm – Hundalmjoch vor, in welchem durch zahlreiche Störungen der Prozess der Verkarstung erleichtert wird. Für diesen gut 1,5 km<sup>2</sup> umfassenden Bereich ergibt sich eine Höhlendichte von 17 Objekten/ km<sup>2</sup>, was für den weniger verkarstungsfreudigen Lagunenfaziestyp des Wettersteinkalks durchaus beträchtlich ist (PLAN 2004).
- Die Verkarstung im Untersuchungsgebiet unterliegt stark strukturgeologischen Vorgaben Das Verhältnis schichtgebundener zu störungsgebundenen Höhlen liegt bei 3:2. Größere Höhlen bzw. Schächte sind durchwegs an Störungen angelegt.

◆ *Mikrobiologie der Bergmilch*

In einigen Höhlen sind Speläotheme anzutreffen. Dabei handelt es sich um aktive und inaktive Tropfsteine und um aktive und inaktive Bildungen von Bergmilch. Bergmilch findet sich im Neuteil der Hundalm Höhle, im Grete-Ruth-Schacht, dem Schafgufel, dem Nixloch und der Frauensteinhöhle.

In Kooperation mit dem Institut für Mikrobiologie wurden Bergmilch-Proben aus dem Neuteil der Hundalm Höhle entnommen und untersucht. Dazu wurden ein Lebend-Kultivierungs-Ansatz und ein molekularbiologischer Ansatz unternommen (REITSCHULER et al. 2012). Die Ergebnisse dieser ersten Studie zu Bergmilch aus den Alpen zeigten, dass es sich bei der Bergmilch um einen durchaus sehr interessanten Punkt handelt, weitere Untersuchungen durch das Institut für Mikrobiologie werden folgen.

Bei der Bergmilch handelt es sich um eine komplexe Vergesellschaftung von feinsten  $\text{CaCO}_3$ -Fasern, Wasser, organischen Polymeren (organische Säuren) und Mikroorganismen. Die Gemeinschaft der Mikroorganismen setzt sich aus Archaea, Bacteria und Pilzen zusammen. Die Bakterien sind kälteliebende Formen, das heißt dass das beste Wachstum der Kolonien bei niedrigen Temperaturen gewährleistet ist, wie sie im unteren Stockwerk der Hundalm Höhle gegeben sind. Die vertretenen Bakteriengattungen sind weit verbreitet in Böden und Oberflächengewässern, mitunter sehr tolerant und fähig, eine Vielzahl von Substanzen zu verstoffwechseln. Das Vorkommen pigmentierter Arten unterstreicht die Herkunft aus einem oberflächlichen, lichtexponierten Habitat. Die Individuenzahl pro mg Bergmilch ist mitunter mit den hohen Keimzahlen von Böden und Oberflächengewässern vergleichbar. Interessanterweise wurden einige Bakterien aufgespürt, die in vergleichbaren Studien über Bergmilch noch nicht detektiert wurden.

Interessant wäre, in weiteren Studien andere Bergmilch Vorkommen im Gebiet zu beproben, um so Vergleiche zwischen den Ergebnissen ziehen zu können.

## VI. Literaturverzeichnis

- Alma, F. (1926): Eine Fauna des Wettersteinkalkes bei Innsbruck. – Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien, Bd., 40, S. 1 – 9, 1 Tafel, Wien
- Amgiolini, L. (2007): Brachiopods and other fossiles from the Permo-triassic boundary beds off the Antalya nappes (SW-Taurus, Turkey). – Geobios, Bd. 40, Heft 6, S. 715 – 729, Milano
- Ampferer, O. (1925): Geologische Spezialkarte der Republik Österreich, Blatt Kufstein, Topographische Spezialkarte Nr. 4948, Zone 15, Kol. VI, Maßstab 1:75000
- Ampferer, O. (1941): Tektonische Nachbarschaft Karwendel-Sonnwend-Gebirge. – Sitzungsberichte d. Akad. D. Wiss. In Wien, Math.-naturw. Klasse, Abt. 1; Bd. 150, 7. – 10. Heft, S. 181-199, 9 Fig.; Wien
- Armstrong, R., Osborne, L. (2004): The Troubles with Cupolas. – Acta Carsologica, Bd. 33/2, 1, S. 9-36; Ljubljana
- Auer, M., Eisbacher, G.H. (2003): Deep structure and kinematics of the Northern Calcareous Alps (TRANSALP Profile). – Int. Journal of Earth Sciences, Bd. 92, S. 210 - 217
- Bechstädt, T. (1978): Faziesanalyse permischer und triadischer Sedimente des Drauzuges als Hinweis auf eine großräumige Lateralverschiebung innerhalb des Ostalpins. – Jb. Geol. B.-A., Bd. 121, Heft 1, S. 1 – 121, 17 Abb., Wien
- Behm, M. (2002): Koordinatenumrechnung; [www.hoehle.org/downloads.php](http://www.hoehle.org/downloads.php)
- Behrmann, J.H., Tanner, D.C. (2006): Structural synthesis of the Northern Calcareous Alps, TRANSALP segment. – Tectonophysics, Bd. 414, S. 225 – 240
- Bögli, A. (1975): Die wichtigsten Karrenformen der Kalkalpen. – In: Gams, I. (Hrsg.): Karst Processes and relevant Landforms. – 211 S., Ljubljana, 1975

Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – 292 S., 160 Abb., 12 Tafeln, Berlin

Brandner, R. (1978): Tektonisch kontrollierter Sedimentationsablauf im Ladin und Unterkarn der westlichen nördlichen Kalkalpen. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 8, S. 317 – 354, Innsbruck

Brandner, R. (1984): Meeresspiegelschwankungen und Tektonik in der Trias der NW-Tethys. – Jb. Geol. B.-A., Bd. 126, Heft 4, S. 435 – 474, 25 Abb., Wien

Channel, J., Kozur, H. (1997): How many oceans? Meliata, Vardar and Pindos oceans in Mesozoic Alpine paleogeography. – Geology, Bd. 25, S. 183 - 186

Chirienco, M. (2004): The crystalline phase of the carbonate moonmilk: a terminology approach. – Acta Carsologica, 33/1, 17, S. 257-264; Ljubljana

Delago, L. (2005): Geologie des Streifens Törl – Hinterhornalm, Nördliche Kalkalpen, Tirol. – 138 S., 123 Abb., 2 Karten; Innsbruck

Desch, A. (2010): Die Geologie der Kozakhöhle im Vellachtal, Kärnten. – 144 S. Innsbruck

Dietrich, V.J. (1976): Plattentektonik in den Ostalpen. Eine Arbeitshypothese. – Geotektonische Forschungen, Zeil, W. (Hrsg.), Heft 50; S. 1-84, 4 Abb., 3 Tab., 1 Karte; Stuttgart

Dietrich, V.H., Franz, U. (1976): Ophiolith-Detritus in den santonen Gosau-Sedimenten (Nördliche Kalkalpen). – Geotektonische Forschungen, Heft 50, S. 85-109, 7 Abb., 2 Tab., 1 Profiltafel; Stuttgart

Donofrio, D.A., Brandner, R., Poleschinski, W. (2003): Conodonten der Seefeld-Formation: Ein Beitrag zur Lithostratigraphie der Hauptdolomit-Plattform (Obertrias, westliche Nördliche Kalkalpen, Tirol). – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 26, S. 91-107, 7 Abb., 4 Fototafeln, Innsbruck

Dreybrodt, W. (1988): Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry and Geology. – 288 S., 184 Abb., Berlin

Dullo, W.-C., Flügel, E., Lein, R., Riedel, P., Senowbari-Daryan, B. (1987): Algen, Kalkschwämme und Mikroproblematika aus unterkarnischen Riffkalken des Bosruck-Gipfels (Nördliche Kalkalpen, Österreich). – Jb. Geol. B.-A., Band 129, Heft 3 + 4, S. 525 – 543, Wien

Eisbacher, G., Brandner, R. (1995): Role of high-angle faults during heteroaxial contraction, Inntal thrust sheet, Northern Calcareous Alps, Western Austria. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 20, S- 389 – 406, 7 Abb., Innsbruck

Eisbacher, G., Brandner, R. (1996): Superposed fold-thrust structures and high-angle faults, Northwestern Calcareous Alps, Austria. – Eclogae Geologicae Helvetiae, Bd. 89, Heft 1, S. 553 – 571, Basel

Filipponi, M. (2003): Bruchmechanismen der Inkasion. – AGS Info 2/03, 8 S., [http://www.swiss-cave-diver.org/PDF-dateien/Inkasion\\_AGS-Info\\_2-03.pdf](http://www.swiss-cave-diver.org/PDF-dateien/Inkasion_AGS-Info_2-03.pdf)

Filipponi, M. (2009): Spatial Analysis of Karst Conduit Networks and Determination of Parameters controlling the Speleogenesis along preferential lithostratigraphic Horizons. – 305 S., Diss. Univ. Lausanne

Ford, D., Williams, P. (2007): Karst Hydrology and Geomorphology. – 562 S., Chichester

Formayer, H., Clementsitsch, L., Hofstätter, M., Kromp-Kolb, H. (2008): Vor Sicht Klimat! Klimawandel in Österreich, regionale betrachtet, Schwerpunkt: Tirol und der alpine Raum. – Global 2000, Wien

Gerbande, H., Castellarin, A., Lüschen, E., Millahn, K., Neubauer, F. (2006): TRANSALP – A transect through a young collisional orogen: Introduction. – Tectonophysics, Bd. 414, S. 1 – 7

Gruber, A. (1997): Stratigraphische und strukturelle Analyse im Raum Eiberg (Nördliche Kalkalpen, Unterinntal, Tirol) unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung in der



Oberkreide und im Tertiär. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 22, S. 159-197, 17 Abb., 10 Profile, 1 geol. Karte; Innsbruck

Gruber, A., Strauhal, T., Prager, Ch., Reitner, J.M., Brandner, R., Zangerl, Ch. (2009): Die ‚Butterbichl-Gleitmasse‘ – eine große fossile Massenbewegung am Südrand der Nördlichen Kalkalpen (Tirol, Österreich). – Swiss Bull. Angew. Geol., Vol. 14/ 1+2, S. 103 – 134

Haas, J., Kovács, S., Krystyn, L., Lein, R. (1995): Significance of Late Permian-Triassic facies zones in terrane reconstructions in the Alpine-North Pannonian domains. – Tectonophysics, Vol. 242, S. 19 - 40

Harsch, W. (1968): Lithofazielle, sedimentologische und paläogeographische Untersuchungen in den Raibler Schichten der Nördlichen Kalkalpen zwischen Fernpass und Rhein sowie verschiedener Vorkommen in Graubünden. – Diss. Univ. München

Haserodt, K. (1965): Untersuchungen zur Höhen- und Altersgliederung der Karstformen in den Nördlichen Kalkalpen. – Münchner Geographische Hefte, Heft 27, 114 S., 18 Abb., 10 Fig., 1 Karte, 2 Tab., Regensburg

Heißel, W. (1951): Grauwackenzone der Kitzbühler Alpen. – Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt: Sonderheft, Nr. A, S. 110 – 112, Wien

Heißel, W. (1957): Zur Tektonik der Nordtiroler Kalkalpen. – Mitt. d. Geol. Ges. Wien, Bd. 50, S. 95-132, 2. Abb., 1 Tafel; Wien

Heißel, G. (1976): Neues zur Deckentektonik im nördlichen Karwendel. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 5, 5, S. 1-35, Innsbruck

Heißel, G. (1991): Die Abhängigkeit der hydrogeologischen von den geologisch-tektonischen Verhältnissen des Karwendelgebirges, aufgezeigt am Beispiel der Mühlauer Quellen (Tirol, Österreich). – Veröff. Tiroler Landesmuseum Ferdinandeum, S 17 - 81

Hoffmann, P. (2010): Inntaler Unterwelten – vier Wege, vier Höhlen, vier Erlebnisse. – 95 S., Norderstedt

Hoschek, G., Kirchner, E.Ch., Mostler, H., Schramm, J.M. (1980): Metamorphism in the Austroalpine Units between Innsbruck and Salzburg (Austria). – A Synopsis. – Mitt. Österr. Geol. Ges. 71/72, S. 335-341, 1 Abb.; Wien

<http://andiebert.gmxhome.de/diplomarbeit/rseite3.html>

Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Maisch, M., Christl, M., Kubik, P.W., Schlüchter, C. (2009): Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. – Quaternary Science Reviews, Vol. 28, S. 2137 - 2149

Jerz, H. (1966): Untersuchungen über Stoffbestand, Bildungsbedingungen und Paläogeographie der Raibler Schichten zwischen Lech und Inn (Nördliche Kalkalpen). – Geologica Bavarica, Nr. 56, S. 6-102, 32 Abb., 2 Tab., 1 Tafel, 5 Beilagen; Bayr. Geolog. Landesamt (Hrsg.), München

Kempe, S., Rosendahl, W. (2008): Höhlen: Verborgene Welten. – 168 S., Darmstadt, Primus Verlag

Klimchouk, A. (2007): Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. – National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, 106 S. Carlsbad, NM

Kogler, H. (Red.), Feldkircher, H. et al. (1992): 40 Jahre Landesverein für Höhlenkunde in Tirol, 25 Jahre Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle. – 70 S.; Wörgl

Kosina, M., Poulouva, D., Laichmanova, M., Sedlacek, I., Stelcl, J. (2008): Calcite Moonmilk from Caves in the Moravian Karst: Microbiological and Geological Aspects. – Karst Research Institute Zrc Sazu, 120 S., Postojna

Köster, J. (1989): Organische Geochemie und Organo-Petrologie kerogenreicher und bituminöser Einschaltungen im Hauptdolomit (Trias, Nor) der Nördlichen Kalkalpen. – 262 S. – Clausthal

Kozur, H. (1991): The evolution of the Meliata-Hallstatt ocean and its significance for the early evolution of the Eastern Alps and Western Carpathians. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 87, S. 109 - 135

Krainer, K. (1985): Beitrag zur Mikrofazies, Geochemie und Paläogeographie der Raibler Schichten der östlichen Gailtaler Alpen (Raum Bleiberg – Rubland) und des Karwendel (Raum Lafatsch/ Tirol). – Arch. f. Lagerst.forsch Geol. B.-A., Bd. 6, S. 129-142, 9 Abb., 5 Tab; Wien

Krejci, G. (1998): Ein „Kühlloch“ bei der Schmiedalm. – Wörgl (unpubl. Manuskript)

Krejci, G. (1999): Der Werdegang der Hundalm-Eis- und Tropfsteinhöhle als Schauhöhle. – Die Höhle, Heft 4, 50 Jahrgang, S. 199-200, Wörgl

Krieg, W. (1980): Karst, Höhlen, Natur- und Umweltschutz – geschützte Höhlen in Vorarlberg. – Dornbirn

Kroner, U., Stanek, K, Ratschbacher L. (2010): Regionale Geologie Europas. – [www.geo.tu-freiberg.de](http://www.geo.tu-freiberg.de)

Lobitzer, H. (2008): Die Erforschung des Gosau-Vorkommens von Rußbach am Pass Gschütt vom 18. Jahrhundert bis heute. – Berichte der Geol. Bundesanstalt, Bd. 72, S. 60-61, Wien

Maul, B., Schweizer, T., Zeeh, S., Bechstädt, T. (1989): Zementation und Korrosion im Wettersteinkalk und in den Arlberg-Schichten (Ladin/ Cordevol, westliche Ostalpen). – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 16, S. 169-172; Innsbruck

Mostler, H. (1971): Beiträge zur Mikrofazies und Stratigraphie von Tirol und Vorarlberg. – 569 S.; Innsbruck

Mostler, H., Krainer, K., Stingl, V. (1989): Überlegungen zur jurassischen Beckenentwicklung in den Nördlichen Kalkalpen. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, Bd. 16, S. 81-83, Innsbruck

Nicod, J. (1975): Variations du CO<sub>2</sub> dans les sols. – In: Gams, I. (Hrsg.): Karst Processes and relevant Landforms – 211 S., Ljubljana, 1975

Nittel, P. (2004): Strukturell-stratigraphische Neubearbeitung und mikrofazielle Untersuchungen in der Mittel-Trias des Kalkalpensüdrandes in der Umgebung von Innsbruck (Tirol, Österreich). – 165 S.; Dipl. Arbeit Univ. Innsbruck

Oberhauser, R., Bauer, F.K. et al. (1980): Der geologische Aufbau Österreichs. – Geologische Bundesanstalt (Hrsg.), Wissenschaftliche Redaktion: Oberhauser, R. – S. 218 – 262, Wien, New York, (Springer)

Ortner, H. (2003): Deformation of the Northern Calcareous Alps through Alpine Orogeny – brittle structures and synorogenic sediments. – 136 S., 255 Abb., 1 Tab.; Habilitationsschrift; Innsbruck

Ortner, H., Reiter, F., Brandner, R. (2006): Kinematics of the Inntal shear zone-sub-Tauern ramp fault systems and the interpretation of the TRANSALP seismic section, Eastern Alps, Austria. – Tectonophysics, Bd. 414, S. 241 – 258

Ott, E. (1967): Segmentierte Kalkschwämme (Sphinctozoen) aus der alpine Mitteltrias und ihre Bedeutung als Riffbildner im Wettersteinkalk. – Abhandlungen/ Bayrische Akademie der Wissenschaften, Math.-naturwiss. Kl., N.F., Heft 131; 96 S, 9 Abb., 5 Tab., 10 Tafeln, München (Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften)

Pavuzza, R., Traindl, H. (1985): Zur Hydrochemie und Bakteriologie alpiner Karstwässer. – Die Höhle, Bd. 36, Heft 4, S. 123 - 143

Pavuzza, R., Spötl, C. (2000): Neue Forschungsergebnisse aus der Hundalm-Eishöhle (1266/1). – Höhlenkundliche Mitteilungen des Landesvereins für Höhlenkunde in Tirol, Heft 51, S. 3-10; Wörgl

Pfeffer, K.-H. (1998): International Atlas of Karst Phenomena/ Union Internationale de Spéléologie. – Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 109, Sheets 13 – 17; 104 S., 49 Abb., 8 Tabellen, 5 geol. Karten, Berlin

Pfiffner, A. (2009): Geologie der Alpen. – 359 S., 158 Abb., Bern, Haupt Verlag

Pietersteiner, K. (2012): Hochalpiner Karst im westlichen Karwendel. – 159 S.; Dipl. Arbeit Univ. Innsbruck

Plan, L. (2004): Speläologische Charakterisierung und Analyse des Hochschwab-Plateaus. – Die Höhle, Bd. 55, Heft 1 – 4, S. 19 - 33

Preusser, F. (2004): Towards a chronology of the Late Pleistocene in the northern Alpine foreland. – Boreas, Bd. 33, S. 195 - 210

Reitner, J.M. (2007): Glacial dynamics at the beginning of the Termination I in the Eastern Alps and their stratigraphic implication. *Quaternary International*, Bd. 164-165, S. 64 – 84

Reitschuler, C., Schwarzenauer, T., Lins, P., Wagner, A.O., Spötl, C., Illmer, P. (2012): Zur Mikrobiologie von Bergmilch. – Die Höhle, 63. Jg., Heft 1-4, S. 3 - 17

Sanders, D.G. (1998): Tectonically controlled Late Cretaceous terrestrial to neritic deposition (Northern Calcareous Alps, Tyrol, Austria). – *Facies*, Bd. 39, S. 139 – 178, 16 Abb., 1 Tab., Tafeln 29 – 31, Erlangen

Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S., Welp, G. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. – 569 S., Heidelberg, Spektrum Verlag

Senowbari-Daryan, B., Rashidi, K., Saberzadeh, B. (2011): Dasycladacean green algae and some problematic algae from the Upper Triassic of the Nayband Formation (northeast Iran). – *Geologica Carpathica*, Bd. 62, Nr. 6, S. 501 – 517

Spitzer, R. (2005): Die Angerberg Terrasse: Von quartärgeologischem Rahmen zu hydrogeologischem Modell. – 125 S., Dipl. Arbeit Univ. Innsbruck

Spötl, C. (2005): Datierungen von Tropfsteinen aus der Hundalm Eis- und Tropfsteinhöhle. – Höhlenkundliche Mitteilungen des Landesvereins für Höhlenkunde in Tirol, Heft 57, S. 5-9; Wörgl

Spötl, C. (2011): Altes Holz im Moor: Hinweise auf die Landschaftsebtwicklung im Gebiet der Hundalm. – Höhlenkundliche Mitteilungen des Landesvereins für Höhlenkunde in Tirol, Jg. 50, Heft 64, S. 55 – 61, Wörgl

Stampfli, G., Borel, G., Marchant, R., Mosar, J. (2002): Western Alps geological constraints on western Tethyan reconstructions. – In: Rosenbaum, G., Lister, G. (2002): Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan Orogen; Journal of the Virtual Explorer, Vol. 7, S. 75 - 104

Sulzbachner, C. (2010): Hydrogeologische Untersuchungen am Tschirgant unter besonderer Berücksichtigung stabiler Isotope. – 91 S, Dipl. Arbeit Univ. Innsbruck

Spengler, E. (1956): Versuch einer Rekonstruktion des Ablagerungsraumes der Decken der Nördlichen Kalkalpen, II. Teil: der Mittelabschnitt der Kalkalpen. – Jahrbuch Geol. B.-A., Bd. 99, 1. Heft, S. 1 - 75

Sweeting, M.M. (1972): Karst Landforms. – 362 S., 127 Abb., London, Macmillan

Thöny, W. (2003): Analyse der Pendling-Antiklinale sowie der Thiersee-Mulde im Bereich nordwestlich von Kufstein (Tiroler Unterinntal) unter Verwendung sedimentologischer, strukturgeologischer und paläomagnetischer Arbeitsmethoden. – 120 S.; Dipl. Arbeit Univ. Innsbruck

Tollmann, A. (1961): Die Rolle des Ost-West-Schubes im Ostalpenbau. – Mitt. D. Geol. Ges. in Wien, Bd. 54, S. 229 – 247, Wien

Tollmann, A. (1967): Tektonische Karte der Nördlichen Kalkalpen, 1. Teil: Der Ostabschnitt. – Mitt. d. Geol. Ges. in Wien, Bd. 59, Heft 2, S. 231 – 253, Wien

Tollmann, A. (1968): Tektonische Karte der Nördlichen Kalkalpen, 2. Teil: Der Mittelabschnitt. – Mitt. d. Geol. Ges. in Wien, Bd. 61, S. 124 – 181, Wien

Tollmann, A. (1969): Tektonische Karte der Nördlichen Kalkalpen, 3. Teil: Der Westabschnitt. – Mitt. Geol. Ges. in Wien, Bd. 62, S. 78 – 170, Wien

Tollmann, A. (1973): Monographie der Nördlichen Kalkalpen – Teil I: Grundprinzipien der alpinen Deckentektonik: Eine Systemanalyse am Beispiel der Nördlichen Kalkalpen. – 404 S., Wien (Deuticke)

Tollmann, A. (1976): Monographie der Nördlichen Kalkalpen – Teil II: Analyse des klassischen nordalpinen Mesozoikums: Stratigraphie, Faune und Fazies der Nördlichen Kalkalpen. – 580 S., 256 Abb., 3 Tafeln; Wien (Deuticke)

Tollmann, A. (1976): Monographie der Nördlichen Kalkalpen – Teil III: Der Bau der Nördlichen Kalkalpen, orogene Stellung und regionale Tektonik. – 449 S., 130 Abb., 7 Tafeln; Wien (Deuticke)

Tollmann, A. (1985): Geologie von Österreich: Band II – Außerzentralalpiner Anteil; 710 S., 27 Tab., 286 Abb.; Wien (Deuticke)

Tollmann, A. (1986): Geologie von Österreich, Band 3. – 718 S., 145 Abb., 8 Tab., 3 Falttafeln; Wien (Deuticke)

Van Husen, D. (1987): Die Ostalpen in den Eiszeiten. – Geologische Bundesanstalt, 24 S., Wien

Van Husen, D. (2004): Quaternary glaciations in Austria. – In: Ehlers, J., Gibbard, P.L. (Hrsg.): Quaternary Glaciations – Extents and Chronology. – Development in Quaternary Science, Bd. 2, S. 1 – 13, Amsterdam (Elsevier)

Veress, M. (2010): Karren environments – Karren Formation in High Mountains. – 230 S., Heidelberg, Springer

Vogt, T. (1989): Croûtes calcaires d'origine cryogénique. – Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 75, S. 115 – 135, 1 Abb., 13 Fotos, Berlin

Wagreich, M., Faupel, P. (1994): Palaeogeography and geodynamic evolution of the Gosau Group of the Northern Calcareous Alps (Late Cretaceous, Eastern Alps, Austria). – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 110, S. 235 - 254

Wagreich, M. (2003): The Grabenbach-Formation (Gosau-Group, Santonian – Lower Campanian) in the Lattengebirge (Germany): Lithostratigraphy, biostratigraphy and Strontium-isotope-stratigraphy. – In: Piller, W.E. (Hrsg.) (2003): Stratigraphica Austriaca. – S. 141-150, 3 Fig., 1 Tab.; Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien

Wagreich, M., Lukeneder, A., Egger, H. (2008): Cretaceous history of Austria. – Berichte der Geologischen Bundesanstalt, Bd. 74, S. 12 – 30; Wien

White, W.B. (2002): Karst hydrology: recent developments and open questions. – Engineering Geology, Bd. 65, S. 85 – 105

White, W.B. (2007): Cave sediments and paleoclimate. – Journal of Cave and Karst Studies, Bd. 69, Nr. 1, S. 76 – 93

Zacher, W., Lupu, M. (1999): Pitfalls on the race for an ultimate Tethys model. – International Journal of Earth Sciences, Bd. 88, S. 111 - 115

Zorn, H. (1976): Über den Lebensraum fossiler Wirtelalgen in der Trias der Alpen. – Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Frankfurt/ Main, 4 S., Frankfurt

Zötl, J.G. (1974): Karsthydrogeologie – 291 S., 144 Abb., 2 Tafeln, Wien, Springer



## VII. Anhang

Reihenfolge der im Anhang eingefügten Karten und Pläne:

1. Profil 1
2. Profil 2
3. Profil 3
4. Profil 4
5. Glockenschacht, Grundriss
6. Glockenschacht, Längsschnitt
7. Doppelbrückenschacht, Grundriss
8. Doppelbrückenschacht, Längsschnitt
9. Grete-Ruth-Schacht, Grundriss
10. Grete-Ruth-Schacht, Längsschnitt
11. Schafgufel, Grundriss
12. Schafgufel, Längsschnitt
13. Nixloch, Grundriss
14. Nixloch, Längsschnitt
15. Ziegenloch, Grundriss
16. Ziegenloch, Längsschnitt
17. Frauensteinhöhle, Grundriss
18. Frauensteinhöhle, Längsschnitt
19. Humushöhle, Grundriss
20. Humushöhle, Längsschnitt
21. Halbhöhle Hundesalm 1, Grundriss
22. Schwinde 2, Grundriss
23. Schwinde 2, Längsschnitt
24. Frauensteinhöhle 2, Grundriss
25. Frauensteinhöhle 2, Längsschnitt
26. Geologische Karte
27. Hydrologische Karte

## VIII. *Lebenslauf*

Patricia Rittig  
Außerkristen 4a  
A-6094 Axams

Geboren am 02.01.1984 in Innsbruck

Nationalität: Österreich

1990-1994 Volksschule Leitgeb I, Pradl, Innsbruck

1994-2002 Bundesrealgymnasium Sillgasse, Innsbruck

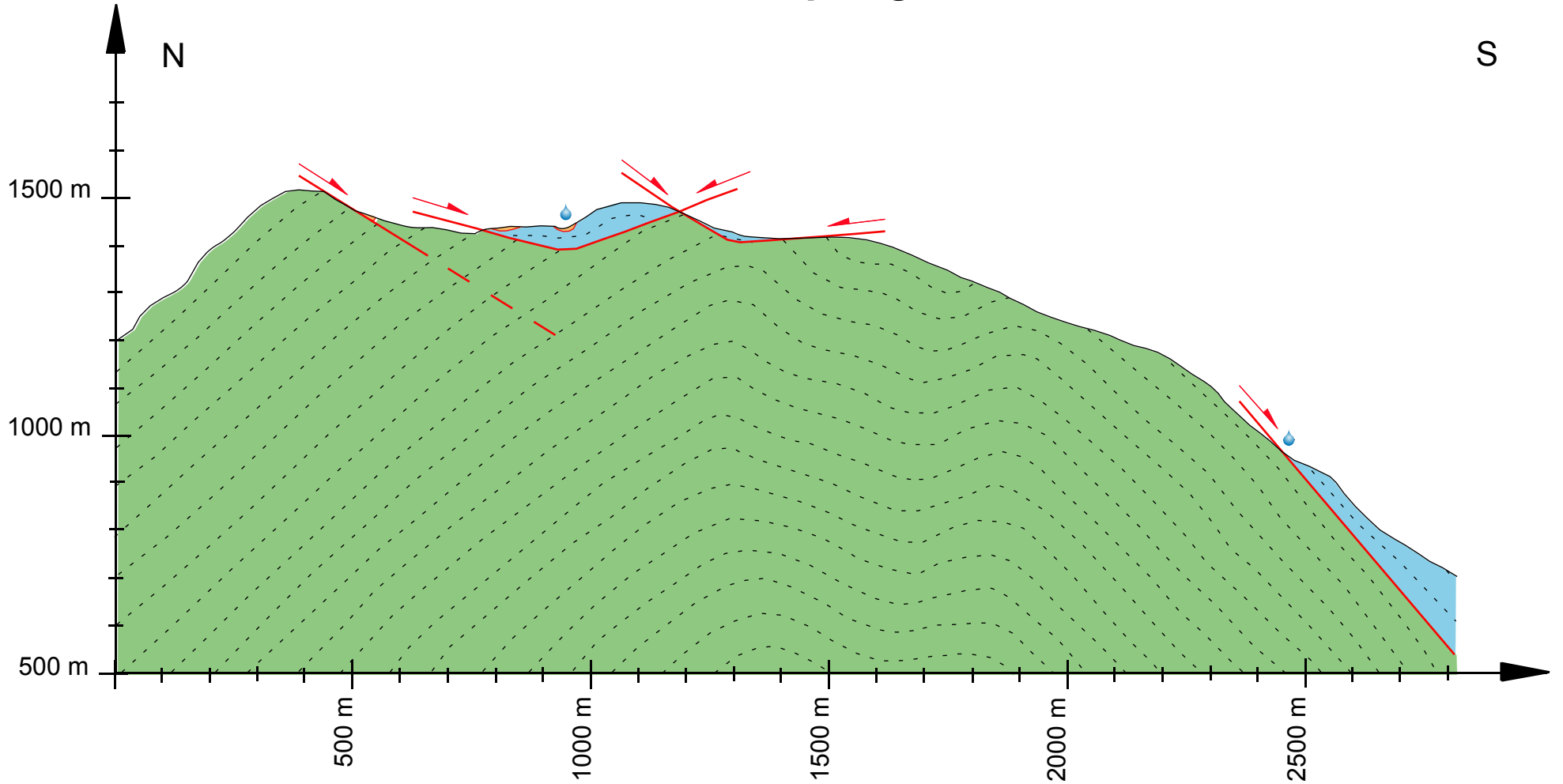
2002-2005 Volksschullehrerausbildung an der Pädagogischen Akademie des Bundes in Tirol

2005-2006 Tätigkeit als Fremdsprachenassistent in Ecoles maternelles und Ecoles primaires in Vernon, Frankreich






2006-2012 Studium der Erdwissenschaften, Studiengang Geologie an der Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck






# Profil I - Spur grün



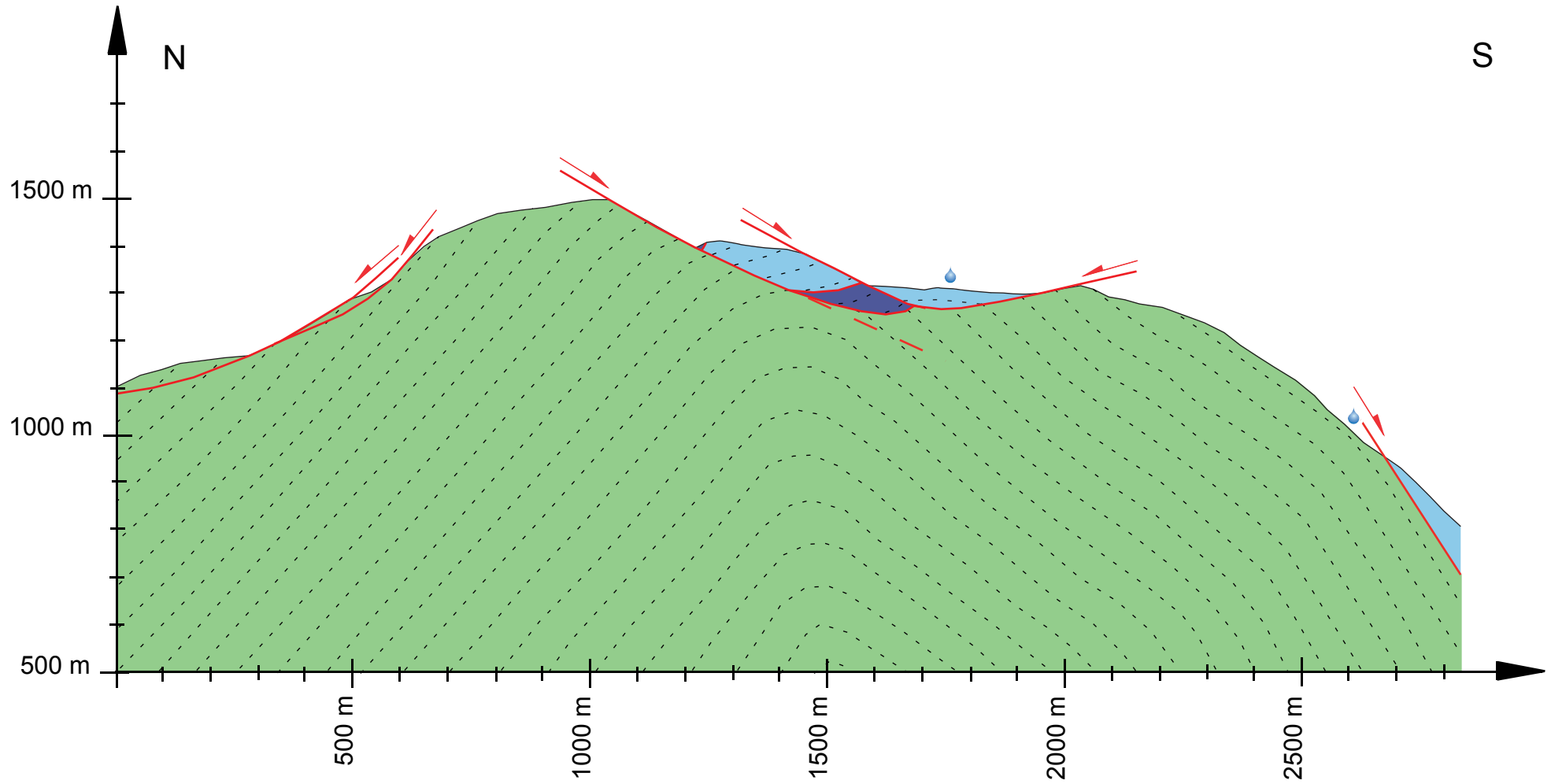
## Lithologien:

- |   |  |
|---|--|
|  Wettersteinkalk   |  Gosau-Gruppe |
|  Raibler Schichten |  Quartär      |
|  Hauptdolomit      |  |

## Strukturen:

- |   |
|---|
|  Kontakt sedimentär          |
|  Kontakt diskordant/ Störung |
|  Schichtung                  |

# Profil II - Spur blau



## Lithologien:



Wettersteinkalk



Raibler Schichten



Hauptdolomit



Gosau-Gruppe



Quartär

## Strukturen:



Kontakt sedimentär

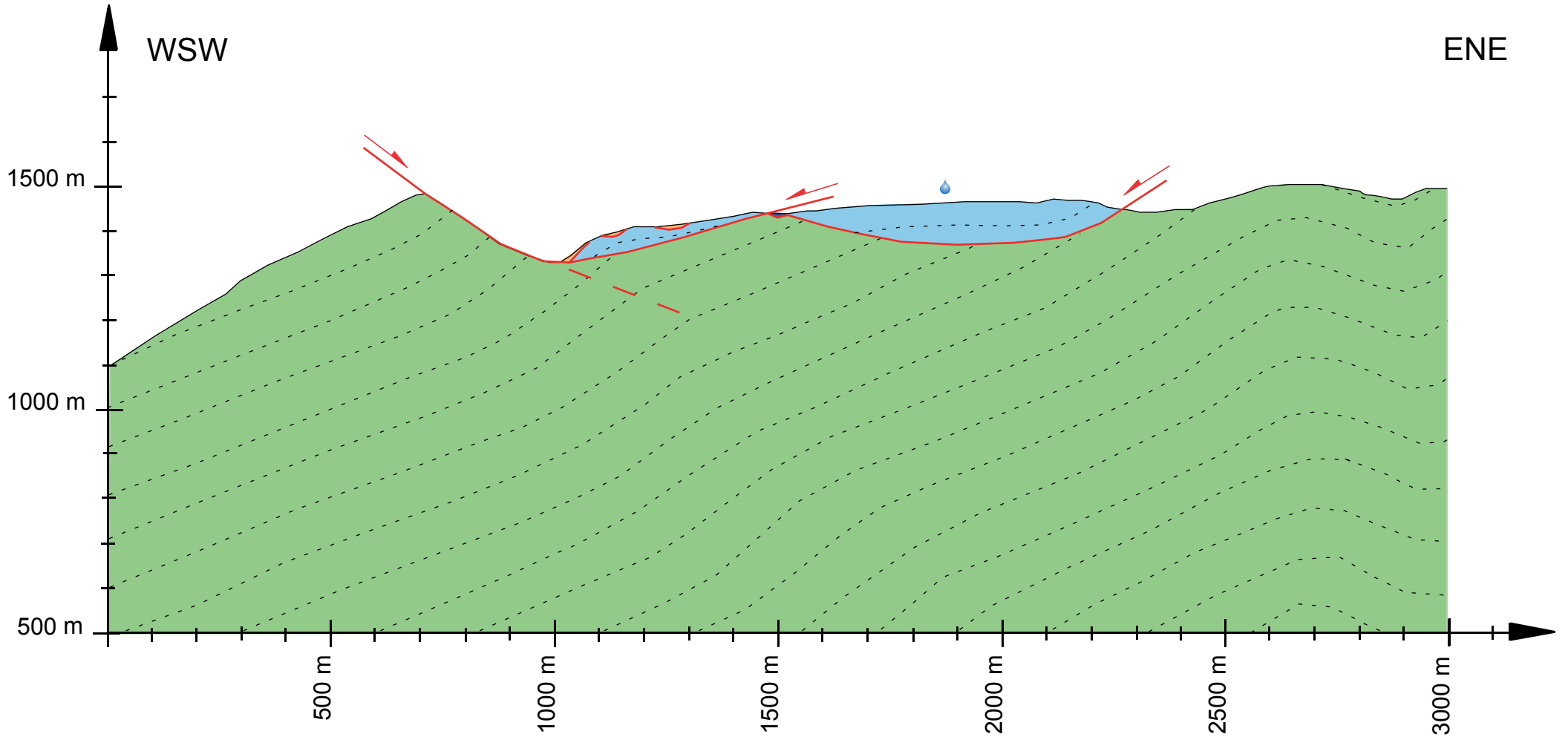


Kontakt diskordant/ Störung



Schichtung

# Profil III - Spur rot



## Lithologien:



Wettersteinkalk



Raibler Schichten



Hauptdolomit



Gosau-Gruppe



Quartär

## Strukturen:



Kontakt sedimentär

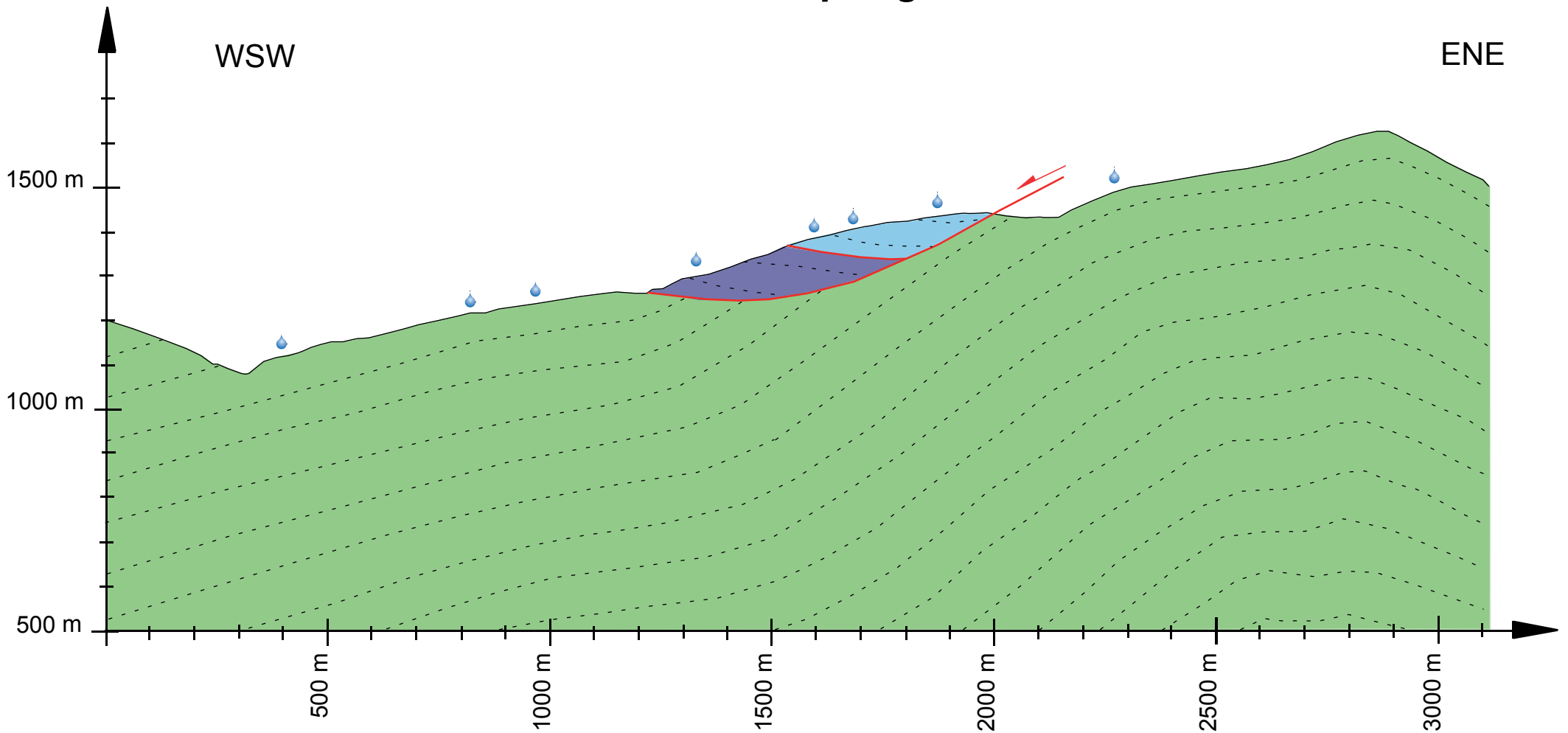


Kontakt diskordant/ Störung



Schichtung

# Profil IV - Spur gelb



## Lithologien:

Wettersteinkalk

Raibler Schichten

Hauptdolomit

Gosau-Gruppe

Quartär

## Strukturen:

Kontakt sedimentär

Kontakt diskordant/ Störung

Schichtung

# Glockenschacht

Kat. Nr.: 1266/2

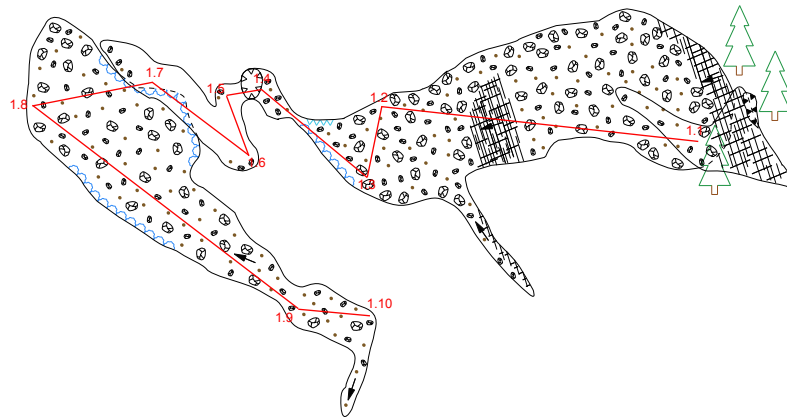
L: 50 m, H: 34 m, Hor. Erstreckung: 24 m

N 47° 32,727', E 12° 01,565' (WGS84), Sh: 1488 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl, G. Moseley am 19.10. und 26.10. 2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss





# Glockenschacht

Kat. Nr.: 1266/2

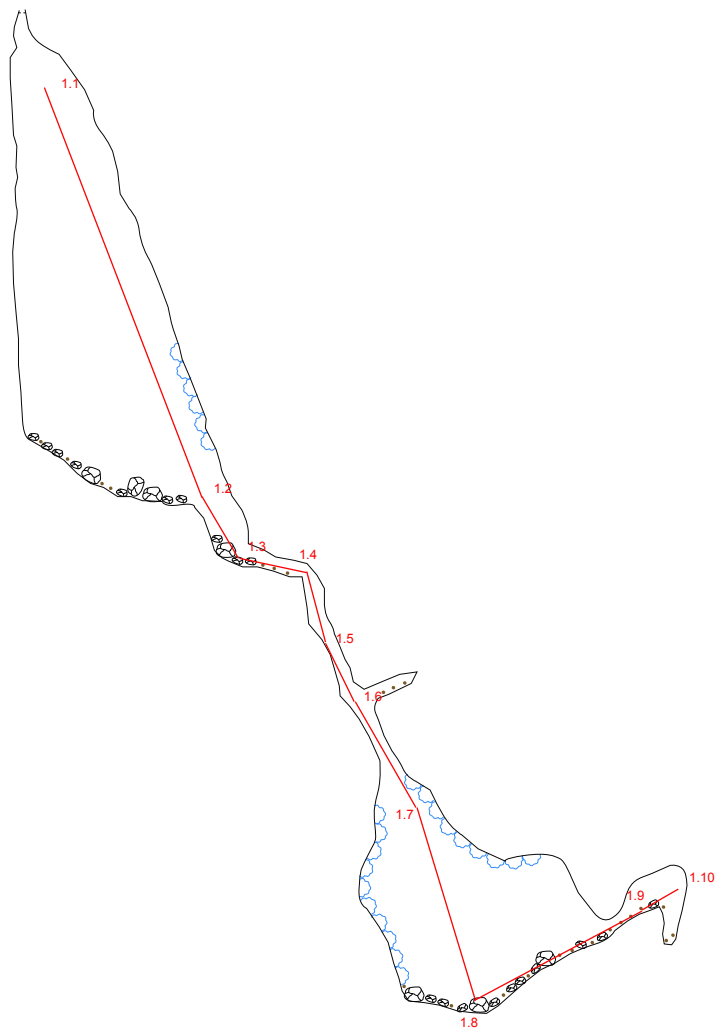
L: 50 m, H: 34 m, Hor. Erstreckung: 24 m

N 47° 32,727', E 12° 01,565' (WGS84), Sh: 1488 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl, G. Moseley am 19. 10. und 26.10.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt

0 5m

# Doppelbrückenschacht

Kat. Nr.: 1266/3

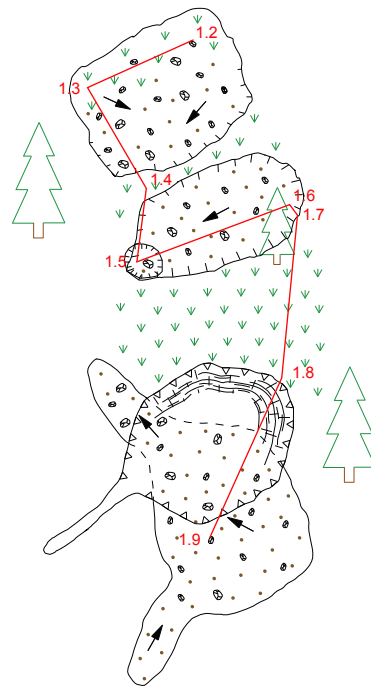
L: - m, H: 9 m, Hor. Erstreckung: 19 m

N 47° 32,736', E 12° 1,674' (WGS84), Sh: 1479 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl, G. Moseley am 19.10.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss



## Doppelbrückenschacht

Kat. Nr.: 1266/3

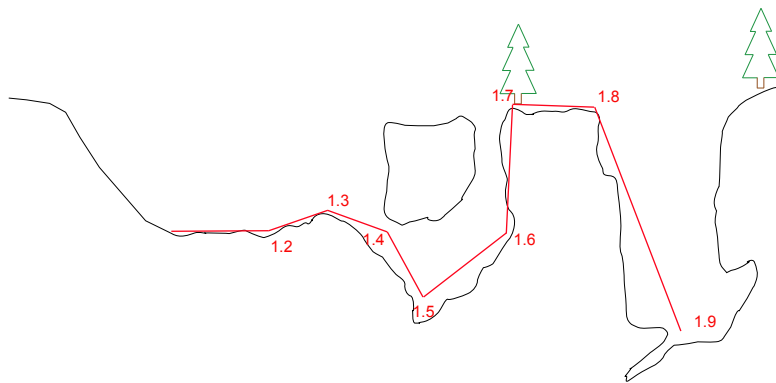
L: - m, H: 9 m, Hor. Erstreckung: 19 m

N 47° 32,736', E 12° 01,674' (WGS84), Sh: 1479 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl, G. Moseley am 19.10.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



# Grete-Ruth-Schacht

Kat. Nr.: 1266/4

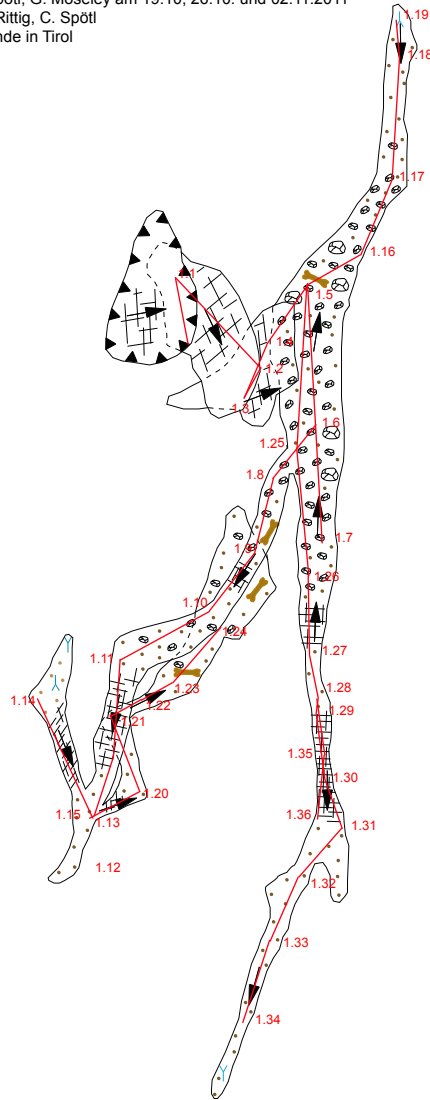
L: 142 m, H: 39 m, Hor. Erstreckung: 46 m

N 47° 32,557', E 12° 01,633' (WGS84), Sh: 1435 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl, G. Moseley am 19.10, 26.10. und 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss



# Grete-Ruth-Schacht

Kat. Nr.: 1266/4

L: 142 m, H: 39 m, Hor. Erstreckung: 46 m

N 47° 32,557', E 12° 01,633' (WGS84), Sh: 1435 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl, G. Moseley am 19.10, 26.10. und 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Schafgufel

Kat. Nr.: 1266/8

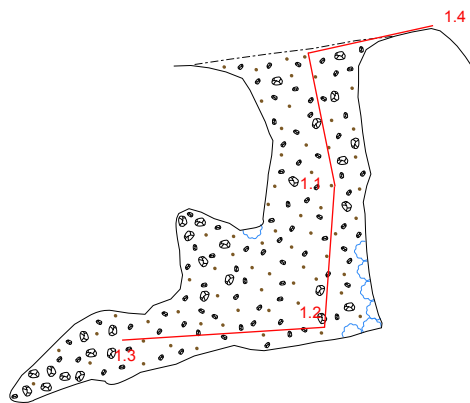
L: 12 m, H: 3 m, Hor. Erstreckung: 9 m

N 47° 32,4912', E 12° 02,0976', Sh: 1533 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss



## Schafgufel

Kat. Nr.: 1266/8

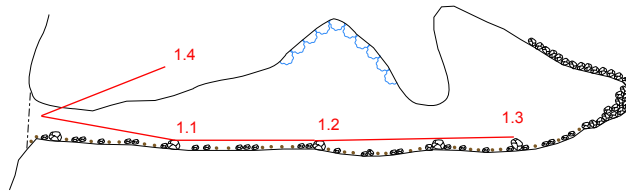
L: 12 m, H: 3 m, Hor. Erstreckung: 9 m

N 47° 32,4912' , E 12° 02,0976' (WGS84), Sh: 1533 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Nixloch

Kat. Nr.: 1266/8

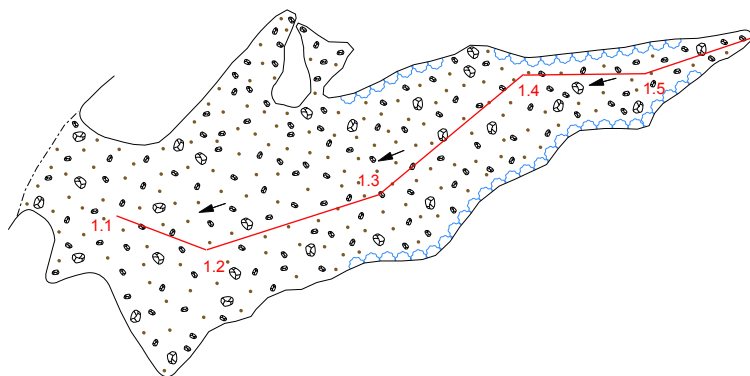
L: 14 m, H: 7 m, Hor. Erstreckung: 12 m

N 47° 32,4912', E 12° 02,0976' (WGS84), Sh: 1533 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss





## Nixloch

Kat. Nr.: 1266/8

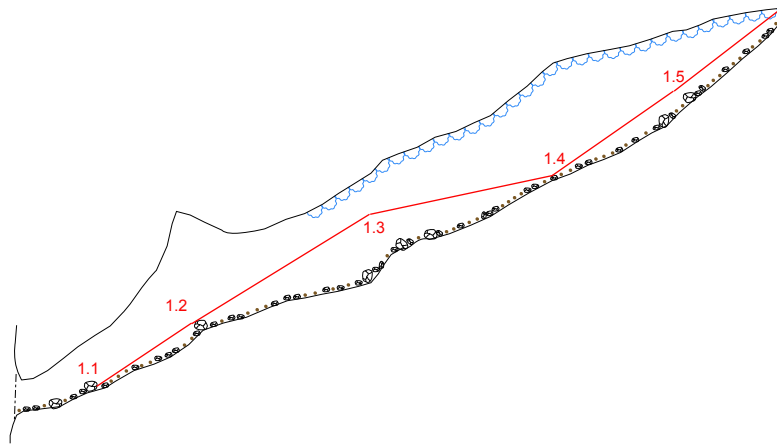
L: 14 m, H: 7 m, Hor. Erstreckung: 12 m

N 47° 32,4912', E 12° 02,0976' (WGS84), Sh: 1533 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Ziegenloch

Kat. Nr.: 1266/9

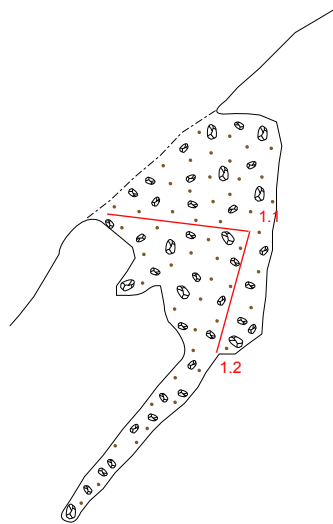
L: 10 m, H: 2 m, Hor. Erstreckung: 9 m

N 47° 32,496', E 12° 02,0934' (WGS84), Sh: 1520 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



## Ziegenloch

Kat. Nr.: 1266/9

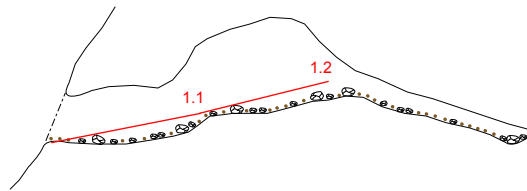
L: 10 m, H: 2 m, Hor. Erstreckung: 9 m

N 47° 32,496', E 12° 02,0934' (WGS84), Sh: 1520 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Frauensteinhöhle

Kat. Nr.: 1266/15

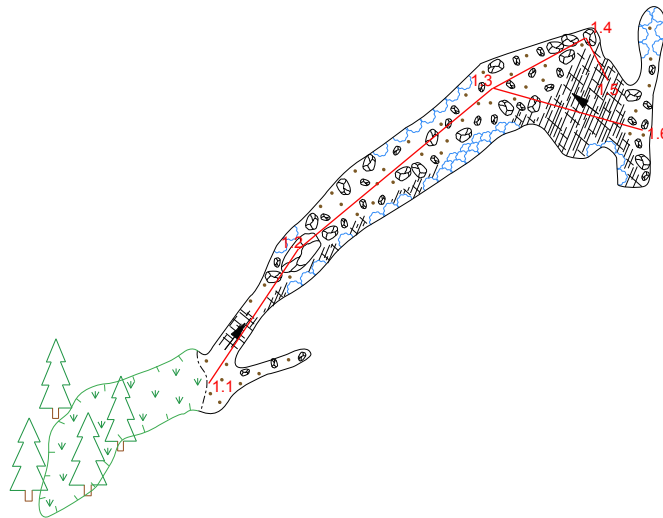
L: 37 m, H: 8 m, Hor. Erstreckung: 22 m

N 47° 32,8692', E 12° 02,0526' (WGS84), Sh: 1418 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 26.10.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss



## Frauensteinhöhle

Kat. Nr.: 1266/15

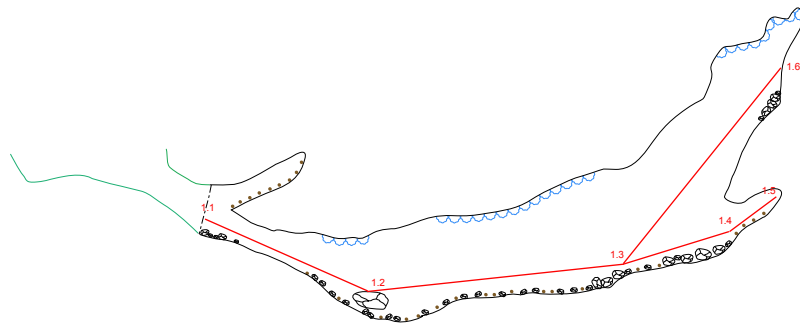
L: 37 m, H: 8 m, Hor. Erstreckung: 22 m

N 47°32', 8692', E 12° 02,0526' (WGS84), Sh: 1418 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 26.10.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Humushöhle

Kat. Nr.: 1266/

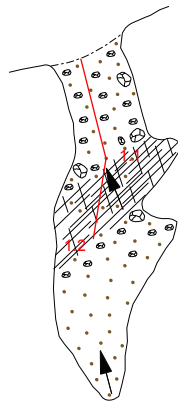
L: 4 m, H: 8 m, Hor. Erstreckung: 7 m

N 47° 32,385', E 12° 01,935' (WGS84), Sh: 1525 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss



# Humushöhle

Kat. Nr.: 1266/

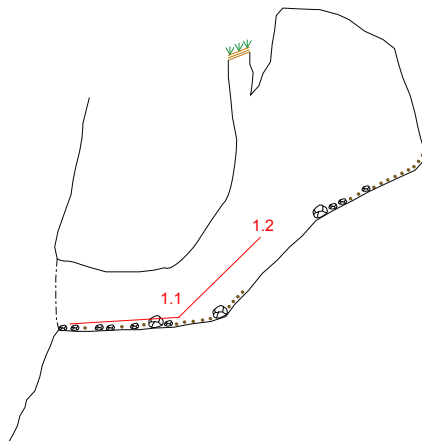
L: 4 m, H: 8 m, Hor. Erstreckung: 7 m

N 47° 32,385', E 12° 01,935' (WGS84), Sh: 1525 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Halbhöhle Hundsalzm 1

Kat. Nr.: 1266/

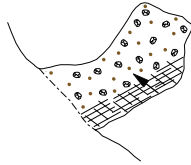
L: 3 m, H: 3 m, Hor. Erstreckung: 3 m

N 47° 32,5104', E 12° 02,1402' (WGS84), Sh: 1501 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss





## Schwinde 2

Kat. Nr.: 1266/

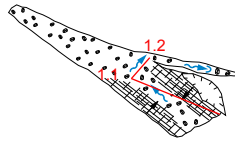
L: 4 m, H: 2 m, Hor. Erstreckung: 4 m

N 47° 32,6208', E 12° 01,77' (WGS84), Sh: 1411 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



## Schwinde 2

Kat. Nr.: 1266/

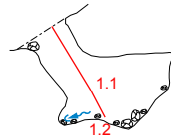
L: 4 m, H: 2 m, Hor. Erstreckung: 4 m

N 47° 32,6208', E 12° 01,77' (WGS84), Sh: 1411 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 02.11.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt



## Frauensteinhöhle 2

Kat. Nr.: 1266/

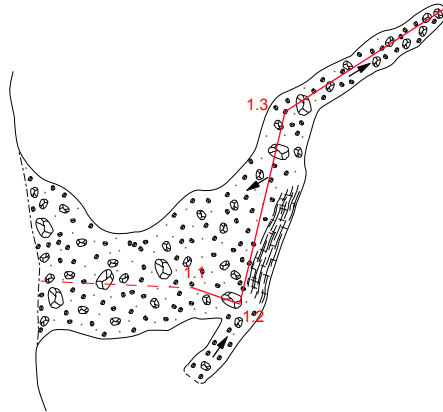
L: 8 m, H: 2 m, Hor. Erstreckung: 9 m

N 47° 32,9052', E 12° 02,0892' (WGS84), Sh: 1440 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 26.10.2011

Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Grundriss



## Frauensteinhöhle 2

Kat. Nr.: 1266/

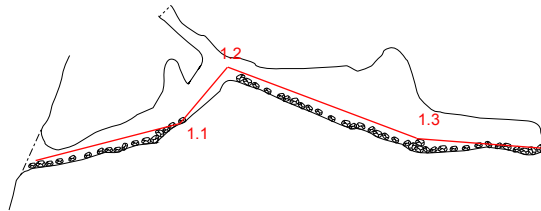
L: 8 m, H: 2 m, Hor. Erstreckung: 9 m

N 47° 32,9052', E 12° 02,0892' (WGS84), Sh: 1440 m

Vermessung: P. Rittig, C. Spötl am 26.10.2011

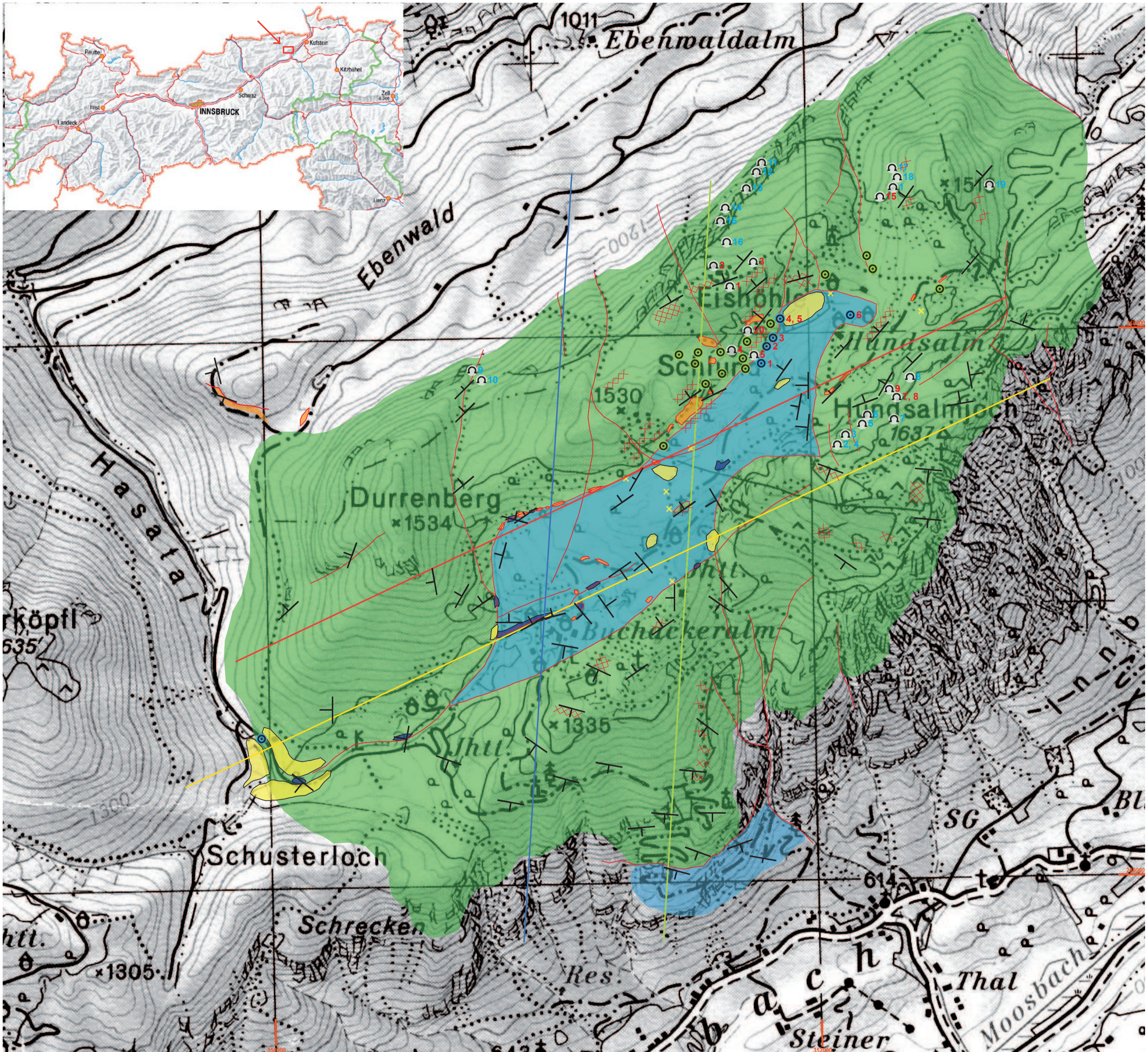
Entwurf und Zeichnung: P. Rittig, C. Spötl

Landesverein für Höhlenkunde in Tirol



Längsschnitt





Geologische Karte des Untersuchungsgebietes - Ausschnitt aus ÖK50, Blatt 89-Angath

**Legende:**

**Lithologien:**

- Wettersteinkalk
- Raibler Schichten
- Hauptdolomit
- Gosau-Gruppe
- Quartär
- Findling

**Streichen-Fallen:**

- Fallen 0-30°
- Fallen 31-60°
- Fallen 61-90°

**Lineamente:**

- Kontakt sedimentär
- Kontakt diskordant/ Störung

**Profilspuren:**

- Profil I
- Profil II
- Profil III
- Profil IV

**Karstphänomene:**

- # Schwinde
- Doline
- Karren
- # Höhle; Kat.-Nr.
- # Höhle; Nr.

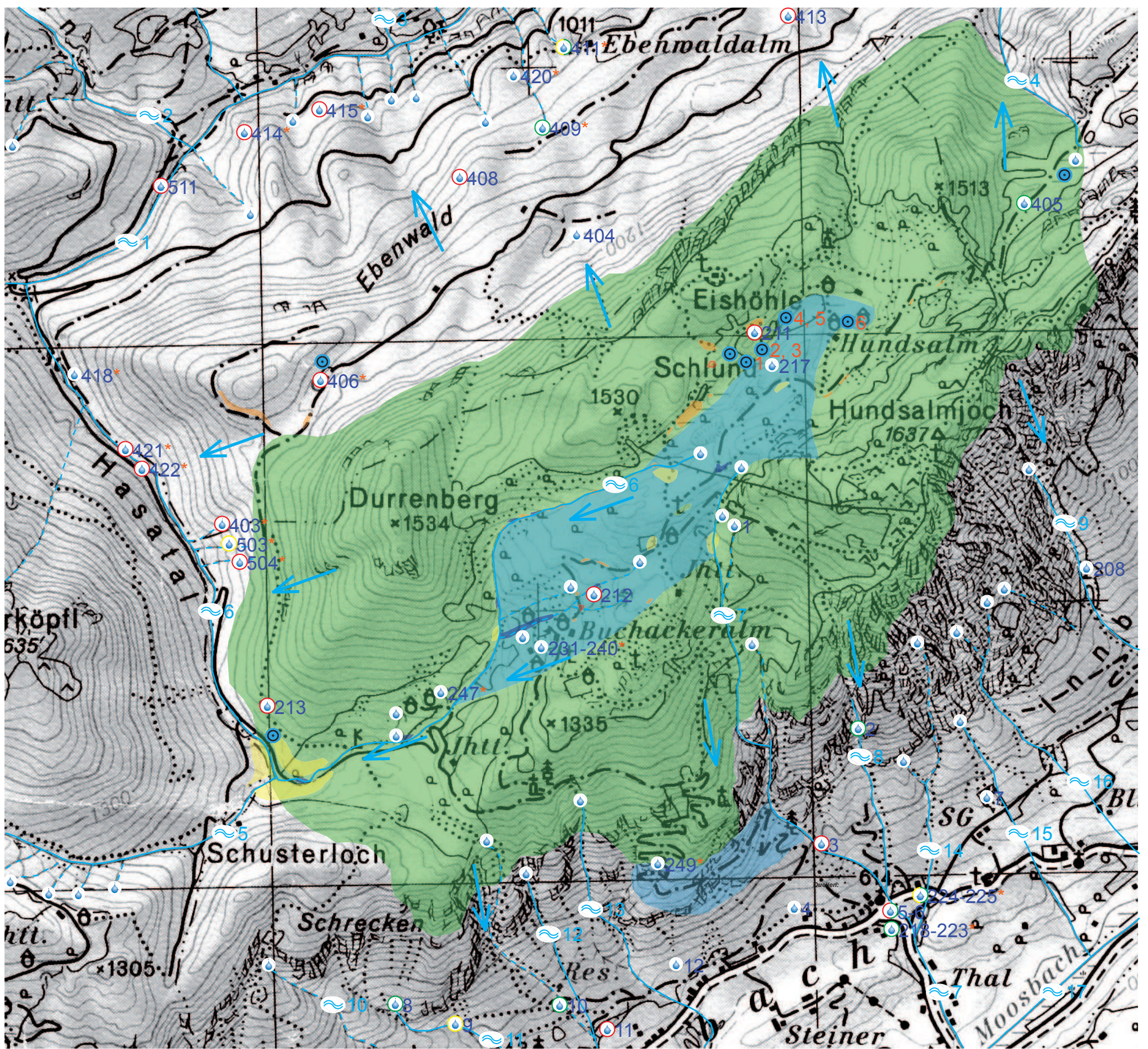
**Höhlen/ Schächte:**

- 1 Hundalm Eis- u. Tropfsteinhöhle.; 1266/01
- 2 Glockenschacht; 1266/02
- 3 Doppelbrückenschacht; 1266/03
- 4 Grete-Ruth-Schacht; 1266/04
- 5 Dreiecksschacht; 1266/05
- 7 Schafgufel; 1266/07
- 8 Nixloch; 1266/08
- 9 Ziegenloch; 1266/09
- 15 Frauensteinhöhle; 1266/15
- 20 Augenschacht; 1266/06
- 1 Frauensteinhöhle 2
- 2 Humushöhle
- 3 Kleinhöhle Hundsalm 1
- 4 Kleinhöhle Hundsalm 2
- 5 Kleinhöhle Hundsalm 3

0 500m



- 6 Kleinhöhle Hundsalm 4
- 7 Kleinhöhle Hundsalm 5
- 8 Halbhöhle Hundsalm 1
- 9 Halbhöhle Nordwand 1
- 10 Halbhöhle Nordwand 2
- 11 Halbhöhle Nordwand 3
- 12 Halbhöhle Nordwand 4
- 13 Halbhöhle Nordwand 5
- 14 Halbhöhle Nordwand 6
- 15 Halbhöhle Nordwand 7
- 16 Kleinhöhle Eishöhle 1
- 17 Kleinhöhle Frauenstein 1
- 18 Kleinhöhle Frauenstein 2
- 19 Halbhöhle Frauenstein 1



Hydrologische Karte des Untersuchungsgebiets - Ausschnitt aus ÖK 50, Blatt 89-Angath

**Legende:**

**Symbole:**

- ♣ Quelle lt. Karte
- ♣# Quelle lt. Kataster; ohne Angabe
- ♣# Quelle; Schüttung <5 l/s
- ♣# Quelle; Schüttung 5-10 l/s
- ♣# Quelle; Schüttung >10 l/s
- ♣#\* Quelle; Wasseranalyse
- ♣# Schwinde
- ➔ Wasserwegigkeit

**Lithologien:**

- Wettersteinkalk
- Raibler Schichten
- Hauptdolomit
- Gosau-Gruppe
- Quartär

**Fließgewässer:**

- ~1 Glemmbach
- ~2 Karnertalbach
- ~3 Riedenbergbach
- ~4 Bärenalgraben
- ~5 Reispalbach
- ~6 Hasatalgraben
- ~7 Tallner Bach
- ~8 Schönberggraben
- ~9 Gießbach
- ~10 Bacher Bach
- ~11 Kenglbach
- ~12 Kesselklambach
- ~13 Wurmtalerbach
- ~14 Taxerbach
- ~15 Wartlsteinergraben
- ~16 Wassertalgraben
- ~17 Nasenbach

**Quellen:**

- ♣1 Daxeralmquelle
- ♣2 Daxerquelle
- ♣3 Schöntalquelle
- ♣4 Steinerquelle
- ♣5 Franzler-Hof-Quelle
- ♣6 Gattererbrückenquellen
- ♣7 Daxerhofquelle
- ♣8 Gehängebachquelle
- ♣9 Köpfquellen I + II
- ♣10 Unterbach-Hagerquellen
- ♣11 Kohlstattquellen I - III
- ♣12 Lettenbichlquelle
- ♣208 Hagerbachquelle
- ♣211 Qu. d. Viktor-Büchel-Hütte
- ♣212 Buchackerquelle
- ♣213 Schreckenquelle
- ♣217 Hungerwasser
- ♣218-223\* Thalerquellen
- ♣224\* Quellgruppe Daxerbachl
- ♣225\* -
- ♣231-240\* -
- ♣247\* -
- ♣249\* -
- ♣403\* Qu. i. Hasatal
- ♣404 -
- ♣405 -
- ♣406\* Schmiedalmquelle
- ♣408 Quelle oberhalb Ebenwaldalm I
- ♣409a\* Quelle oberhalb Ebenwaldalm II
- ♣411a\* Quelle unterhalb Ebenwaldalm
- ♣413 Moosquelle
- ♣414\* Quellgruppe Ebenwald
- ♣415\* Moosbründlquelle
- ♣418\* -
- ♣420\* -
- ♣421\* Qu. re. i. Hasatal I
- ♣422\* Qu. re. i. Hasatal II
- ♣503\* Qu. li. i. Hasatal I (Hang)
- ♣504\* Qu. li. i. Hasatal II (Straßengraben)
- ♣511 Qu. östl. Riedenberger Winterstube

0 500m

