

Andreas SCHARPF

Modellierung von Experimenten ausgewählter Naturphänomene der Region Dachsteingletscher und deren Veranschaulichung

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Education

im Studium Lehramt Sekundarstufe Allgemeinbildung

im Entwicklungsverbund Süd-Ost

vorgelegt an der Karl-Franzens-Universität Graz

Begutachter: Ass.-Prof. Dr. paed. Philipp Spitzer

Institut/Zentrum für: Chemie/Fachdidaktikzentrum für Chemie

Graz, 30. November 2024

Abstract - DE

Vorliegende Arbeit beschäftigt sich nach einer entsprechenden Regionalisierung^G des Untersuchungsgebietes „Dachsteinregion“ mit der fachlichen Klärung von ausgewählten Naturphänomenen dieser Region auf physiogeographischer Ebene, aber vor allem auch auf chemischer Ebene. Ziel ist es darauf aufbauend, mittels unterschiedlicher chemischer Methoden Experimente zu modellieren, die es ermöglichen, die vorab beschriebenen Naturphänomene zu veranschaulichen. Dabei erfolgt auch ein inhaltlicher Abgleich mit den österreichischen Lehrplänen der Sekundarstufe unter interdisziplinärer Fokussierung der Unterrichtsfächer Chemie und Geographie.

Die ausgewählten Naturphänomene für die im Dreiländereck Steiermark – Salzburg – Oberösterreich um den Dachsteinstock liegende Region nehmen Bezug auf Geologie, Karsterscheinungen, unterirdischen Abfluss sowie die Gletscher. Zur Veranschaulichung geologischer Gegebenheiten aus dem Untersuchungsgebiet werden Versuche aus dem Bereich der Analytischen Chemie präsentiert, währenddessen die Versuche zu Karsterscheinungen einerseits auf die Löslichkeit von Kalk eingehen, und andererseits auf die Modellierung der Karstformen Lösungsdoline sowie Karstrille. Das unterirdische Abflussverhalten und dessen Erforschungsgeschichte am Beispiel des verkarsteten Dachsteinmassivs werden mittels eines selbstkonstruierten Bergmodells veranschaulicht, mit welchem auch die Durchführung vereinfachter Tracerversuche simuliert werden kann. In Bezug auf die Gletscher wird insbesondere auf die Bewegung von Gletschern und deren Massenbilanz eingegangen.

Die Ausführungen dieser Arbeit erfolgen im Kontext des Projektes GlacierXperience.

Abstract - EN

This work aims to model experiments, which are able to visualize selected natural phenomena from the Dachstein area - an Austrian region, located at the border triangle of the federal states of Styria, Upper-Austria and Salzburg. Furthermore, this region is partly bordered by the main rivers Enns and Traun as well as some smaller rivers like the Grimmbach or the Martinsbach and some parts are covered by a number of eight glaciers. Before experiments are modeled, the natural phenomena should be cleared up by a physiogeographical, and especially chemical point of view. Additionally, the topics of the natural phenomena are associated with the curricula of Austrian secondary schools and should be placed under a focus of interdisciplinarity.

The selected natural phenomena refer to topics such as geology, karst, underground drainage and glacier movement. To visualize geological conditions of the research area, there will be presented experiments from the analytical chemistry discipline meanwhile karst-phenomena are visualized on the one hand by solvation experiments of marble by different solution environments and on the other hand by modeling karstic rills and sinkholes. The underground drainage and its research-history in the Dachstein area is imagined with the help of using a special mountain model which was built up as part of this master's thesis. At the end, the explanations about the glaciers focus on glacier movement and the mass balance.

The whole work is in context of the GlacierXperience project.

Inhalt

Abstract - DE	1
Abstract - EN	3
Einleitung.....	7
1. Lage und Eingrenzung des Untersuchungsgebietes Region Dachsteingletscher ..	9
2. Von der Beobachtung in der Natur zum Modellexperiment	14
2.1. Didaktische Aufarbeitung.....	14
2.1.1. Didaktische Rekonstruktion	14
2.1.2. Das Modellexperiment	15
2.2. Verortung im Lehrplan.....	17
2.2.1. Allgemeiner Teil.....	17
2.2.2. Chemie – Sekundarstufe I	17
2.2.3. Chemie – Sekundarstufe II	18
2.2.4. Geographie und Wirtschaftliche Bildung – Sekundarstufe I.....	18
2.2.5. Geographie und Wirtschaftskunde – Sekundarstufe II	19
2.2.6. Fazit zu den Lehrplaninhalten.....	19
3. Geologie.....	20
3.1. Chemische und Physiogeographische Grundlagen	20
3.2. Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes.....	20
3.3. Fachliche Klärung für ein Modellexperiment	23
3.4. Aufbereitung für ein Modellexperiment	26
3.4.1. Qualitative Analyse von Dachsteinkalk	26
3.4.2. Analyse mittels Teststreifen und weitere Nachweisreaktionen	33
3.5. Diskussion.....	38
4. Karst.....	40
4.1. Chemische und Physiogeographische Grundlagen	40
4.1.1. Voraussetzungen zur Entstehung von Karst	40
4.1.2. Chemische Vorgänge bei der Entstehung von Karstformen.....	42
4.1.3. Karstformen	43
4.1.4. Glaciokarst	45

4.2.	Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes.....	46
4.2.1	Karstformen in der Dachsteinregion.....	46
4.2.2.	Einfluss des Gletschers	47
4.3.	Fachliche Klärung für ein Modellexperiment.....	47
4.3.1.	Entstehung von Karren	48
4.3.2.	Entstehung von Dolinen.....	48
4.4.	Aufbereitung für ein Modellexperiment	50
4.4.1.	Lösungsversuche von Kalk	51
4.4.2.	Versuche zur Modellierung von Karstrillen	56
4.4.3.	Versuche zur Modellierung von Dolinen.....	60
4.5.	Diskussion.....	64
5.	Abfluss.....	66
5.1.	Chemische und Physiogeographische Grundlagen	66
5.1.1.	Formen des Abflusses	66
5.1.2.	Zusammenhang zwischen Karst und Abflusssystemen	66
5.2.	Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes.....	67
5.2.1.	Wasserwege.....	68
5.2.2.	Karstquellen	68
5.3.	Fachliche Klärung für ein Modellexperiment.....	69
5.3.1.	Sporentriftversuche (1953-1960)	69
5.3.2.	Markierungsversuche mit Fluoreszenzfarbstofftracern (1984-1986).....	71
5.4.	Aufbereitung für ein Modellexperiment	74
5.4.1.	Durchlässigkeit von Kalkgestein	74
5.4.2.	Simulation der Tracerversuche mittels Bergmodell	79
5.5.	Diskussion.....	82
6.	Gletscher.....	84
6.1.	Chemische und Physiogeographische Grundlagen	84
6.1.1.	Aufbau und Massenbilanz.....	84
6.1.2.	Bewegung des Gletschers, Entstehung von Gletscherspalten und Transport	86
6.2.	Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes.....	88

6.3. Fachliche Klärung für ein Modellexperiment	90
6.4. Aufbereitung für ein Modellexperiment	91
6.4.1. Basales Gleiten	91
6.4.2. Entstehung von Gletscherspalten	92
6.5. Diskussion.....	93
Fazit & Ausblick.....	94
Abbildungsverzeichnis	98
Tabellenverzeichnis	104
Literaturverzeichnis	105
Formelverzeichnis	111
Anhang – Teil I bis Teil VI	113
Abkürzungen & Glossar	
Friedrich Simony – Eine bemerkenswerte Persönlichkeit für die Dachsteinforschung	
Genese des Bergmodells	
Versuchsanleitungen	
Karten	
Worte des Danks	

Einleitung

Bereits Friedrich Simony – ein Geograph aus dem 19. Jahrhundert, dessen Lebensmittelpunkt der Dachstein gewesen ist – hat im Dachstein ein „*Schul- und Musterobjekt für Glazialstudien*“ (Lehr 1996, S. 24) gesehen. Die Gletscher des Dachsteins stehen auch im Zuge des EU-geförderten Projektes GlacierXperience neben dem Steindalsbreen Gletscher in Norwegen im Mittelpunkt und sollen im Zuge von GlacierXperience gemeinschaftlich von Universität Graz und Universität Siegen mittels digitaler Lernumgebungen in den Schulunterricht integrierbar gemacht werden. Mittels Experimenten aus Chemie, Physik und Geologie soll dort weiters die Bedeutung von Gletschern jungen Menschen näher gebracht werden können (Fachdidaktikzentrum für Chemie der Universität Graz 2024), weswegen die Dachsteinregion auch in vorliegender Masterarbeit das primäre Untersuchungsgebiet darstellt und konzeptionell auf das Projekt GlacierXperience ausgerichtet ist. Die Eignung des Dachsteins dafür ergeht nicht zuletzt auch aus dem Geleit aus Moser 1997 hervor, wonach dort folgendes geschrieben steht: „*Ob Geologie, Verkarstungserscheinungen, Höhlen, unterirdische Entwässerung oder Gletscherbewegung, der Dachstein bot genug Stoff für wissenschaftliche Studien.*“ woraus sich auch nun hohes didaktisches Potential schöpfen lässt. Eingebettet in diesen Kontext setzt sich vorliegende Masterarbeit zum Ziel, ausgewählte Naturphänomene der Dachsteinregion zu klären und durch Modellierung geeigneter Experimente zu veranschaulichen. Die Auswahl der zu klärenden Naturphänomene fällt dabei auf die vorgegebenen Bereiche der Karsterscheinungen, des unterirdischen Abflusses und der Bewegung von Gletschern. Dabei lautet die zentrale Forschungsfrage, die im Zuge dieser Arbeit beantwortet werden soll, folgendermaßen:

- ➔ Wie können ausgewählte Naturphänomene der Region Dachsteingletscher, wie das Fließverhalten des Gletschers, die Entstehung von Karstformen oder das unterirdische Abflussverhalten mittels Modellexperiment dargestellt und veranschaulicht werden?

Daraus abgeleitet ergeben sich schließlich noch nachfolgende Unterfragen, die auf Basis bestehender Fachliteratur für die Beantwortung ersterer notwendig zu bearbeiten sind:

- Wie wird die Region Dachsteingletscher geographisch lokalisiert?
- Wie sind Gletscher aufgebaut bzw. inwiefern bewegen sich diese? Wie sieht dieser Sachverhalt am Beispiel der Region Dachsteingletscher aus?
- Was ist Karst und wie entstehen Karstformen? Wie sieht dieser Sachverhalt am Beispiel der Region Dachsteingletscher aus?
- Was versteht man unter der Bezeichnung unterirdisches Abflussverhalten? Wie sieht dieser Sachverhalt am Beispiel der Region Dachsteingletscher aus?

- Wie wurden besagte Naturphänomene im Feldversuch experimentell untersucht? Lassen sich daraus Ideen für die Modellexperimente ableiten?
- Gibt es weitere Naturphänomene, die sich mittels Modellexperiment veranschaulichen lassen können?
- Wie können diese Inhalte lehrplanmäßig eingeordnet werden? Gibt es fächerübergreifendes Potential? Für welche Zielgruppe können diese Experimente aufgearbeitet werden?

Der Aufbau dieser Arbeit geht von einer geographischen Verortung des Untersuchungsgebietes aus, worauf die fachdidaktischen Grundlagen, denen diese Arbeit unterliegt, geklärt werden. Darauf aufbauend folgen die Ausführungen zum geologischen Aufbau der Dachsteinregion - ein weiteres, erst im Zuge der Ausarbeitungen identifiziertes geeignetes Fachgebiet, in welchem experimentell dann vor allem die Analytische Chemie eine wesentliche Rolle übernimmt. Dem geologischen Aufbau überhaupt erst bedingt, folgt das Kapitel über die Karsterscheinungen, welche wiederum den unterirdischen Abfluss begründen, welcher sodann in einem an das Karst-Kapitel anschließenden Kapitel behandelt wird. Abschließend folgt ein Kapitel über die Gletscher, welche das Dachsteingebiet beherbergt und auch in Wechselwirkung zum Karst stehen.

Die einzelnen Unterkapitel zu den vier übergreifenden Fachthemen erfolgen in ihrem Aufbau einheitlich, nämlich einleitend eine allgemeine, theoretisch fachliche Darstellung der physiogeographischen Eckpunkte sowie die in Verbindung stehenden, chemischen Bezugspunkte basierend auf Fachliteratur; eine darauf folgende Verortung der zuvor beschriebenen Theorie im Untersuchungsgebiet mithilfe von regionsbezogenen Berichten & Forschungsbeiträgen, worauf schließlich mittels fachlicher Klärung die Auslotung von Möglichkeiten für passende Modellexperimente folgt, um nicht zuletzt in je einem Unterkapitel jene experimentelle Laborarbeit dokumentarisch darzustellen, aus welcher sodann die im Anhang nachzulesenden Versuchsanleitungen für die Modellexperimente hervorgegangen sind. Abgeschlossen wird jedes der vier Fachkapitel mit einer Diskussion.

Weiters ist im Zeitraum der Erstellung dieser Masterarbeit im Zuge des Projektes GlacierXperience am 26. Mai 2024 eine eintägige Exkursion auf den Schladminger Gletscher erfolgt, die in Bezug auf die Masterarbeit ein Kennenlernen des Untersuchungsgebietes sowie die Entnahme von Gesteinsproben und das Anfertigen geeigneter Fotos ermöglichen sollte. Schließlich wird in vorliegender Masterarbeit auch auf Fotos aus dem Projektarchiv des Fachdidaktikzentrums für Chemie der Universität Graz zurückgegriffen sowie auf jene Fotos, die im Zuge der Laborarbeit für diese Masterarbeit entstanden sind und nicht zuletzt auch auf das persönliche Fotoarchiv des Erstellers dieser Arbeit, welches auf Basis langjährigen Betreibens geographischer Privatexkursionen des Autors gewachsen ist.

1. Lage und Eingrenzung des Untersuchungsgebietes

Region Dachsteingletscher

Das Dachsteingebirge, deren höchste Erhebung der Hohe Dachstein mit einer Höhe von 2996 Metern ist (Abbildung 1), liegt in den Nördlichen Kalkalpen. Das Gebirge bildet die südliche Grenze des Salzkammergutes und liegt in den Bundesländern Steiermark, Salzburg und Oberösterreich, welche im 2947 Meter hohen Gipfel des Torsteins zusammenfallen, wodurch der Torstein damit auch das Dreiländereck der drei zuvor genannten administrativen Einheiten bildet (Krobath & Lieb 2004, S. 76).



Abbildung 1: Hoher Dachstein vom Süden aus gesehen - westlich davon der Mitterspitz (eigene Aufnahme, Juli 2024).

Je nach Literatur und Forschungsarbeiten finden sich unterschiedliche Möglichkeiten der Begrenzung des besagten Gebietes. Auch Friedrich Simony hat in seinem Werk „Das Dachsteingebiet. Ein Charakterbild aus den österreichischen Nordalpen“ (1895) die Region anhand spezifischer Landschaftselemente definiert, was in nachfolgender Karte mitunter dargestellt werden soll. Deutlich aktueller allerdings ist die Alpenvereinseinteilung der Ostalpen (AVE), in welcher das Dachsteingebirge durch die Gebirgsgruppe 14 dargestellt wird und im Vergleich zu Simonys Darstellung in leicht geänderter Form eingegrenzt wird.

Laut AVE 14 umfasst das Dachsteingebirge den Dachsteinstock (Abbildung 1), Grimming, Gosaukamm und Sarstein (Abbildung 2) und wird nach Grassler (1984, S. 129f.) folgendermaßen umgrenzt:

„Rußbach – Paß Gschütt – Gosau – Gosaubach – Hallstätter See – Pötschenhöhe – Bad Aussee – Kainisch-Traun – Bad Mitterndorf – Klachau – Grimmingbach – Enns bis EM Weißenbach – Ramsaubach – Schildlehenbach – Kalte Mandling – Warme Mandling – Marcheggsattel – Fritzbach – Linbach – Neubach – Lungötz – Lammer bis EM Rußbach“.

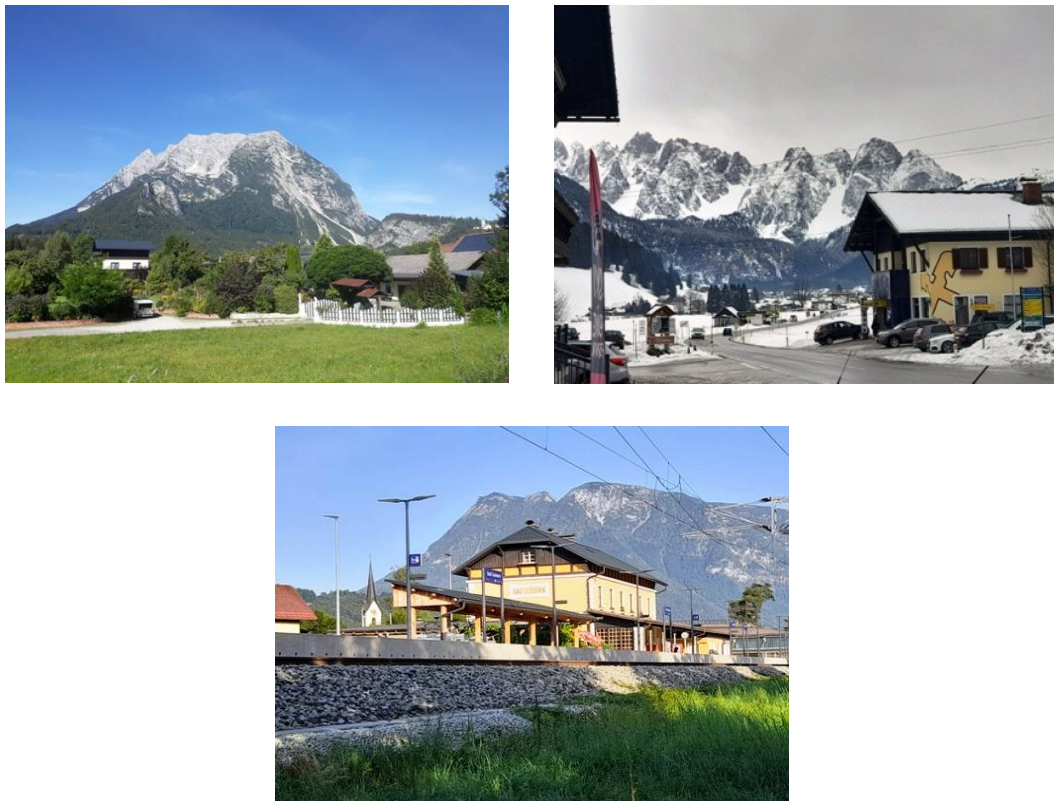


Abbildung 2: Links oben: Der Grimming aus dem Ennstal mit Blick Richtung Nordwesten, östlich davon die enge Schlucht des Grimmingbaches in Richtung des Mitterndorfer Beckens erkennbar; Rechts oben: Der Gosaukamm aus dem Gosauer Becken; Unten: der Sarstein südöstlich vom Bahnhofsgebäude von Bad Goisern emporstehend (eigene Aufnahmen, August 2020, Jänner 2024 & Juli 2024).

Vergleichend hat Simony (1895, S. 9f.) die Region anhand dieser Umgrenzungspunkte definiert:

„Mündung des Gosaubaches in den Hallstätter See – Mündung der Traun in den Hallstätter See – Traunbrücke am Beginn des Koppenthales – Mündung des Kainischbaches in die Traun – Oberes Ende des Kainischthales bei Ausser-Kainisch – Wasserscheide nächst Maria-Kumitz – Eisenbahnbrücke über die Salza westlich von Mitterndorf – Eisenbahnstation Klachau – Unteres Ende des Dorfes Unter-Grimming am Grimmingbach –

Verbreiteter Auslauf des Grimmingthales ins Ennstal bei Trautenfels-Neuhaus - nächst Pruggern – Ennsbrücke bei Schladming – E. B. St. Mandling – E. B. St. Radstadt – Ennsboden bei Oberndorf – Nordrand der Hochfläche bei Eben – Thalboden unter der Eisenbahnbrücke über den Fritzbach – Einmündung des Thales von St. Martin in das Fritzthal – Wasserscheide zwischen St. Martin und dem Karbachthal am Jägerhaus nächst dem Schwaighof – Mündung des Karbaches in die Lammer bei Lungötz – Annaberg im Lammerthale – Mündung des Russbaches in die Lammer – Der Pass Gschütt – Brandmühle im mittleren Gosauthale – Klaushof, im Uebergang aus dem mittleren in das untere Gosauthal – Mündung des Gosaubaches in den Hallstätter See“.

In vorangegangener Aufzählung ist Simonys Schreibweise des Tal-Begriffes mit „th“ aus der Originalliteratur beibehalten worden. Nachfolgend liegt in Abbildung 3 jene Karte vor, in der der Versuch unternommen worden ist, die Dachsteinregion entsprechend der zuvor genannten Regionalisierungen^G darzustellen. Die Erstellung der Karte ist mittels des Programms QGIS 3.16 (Version Hannover) erfolgt, wobei die beiden Layer auf Basis der Angaben der zuvor geschilderten Regionalisierungen erstellt worden sind unter Unterstützung auf Basis von OSM. Die Karte in Originalgröße findet sich im Anhang.

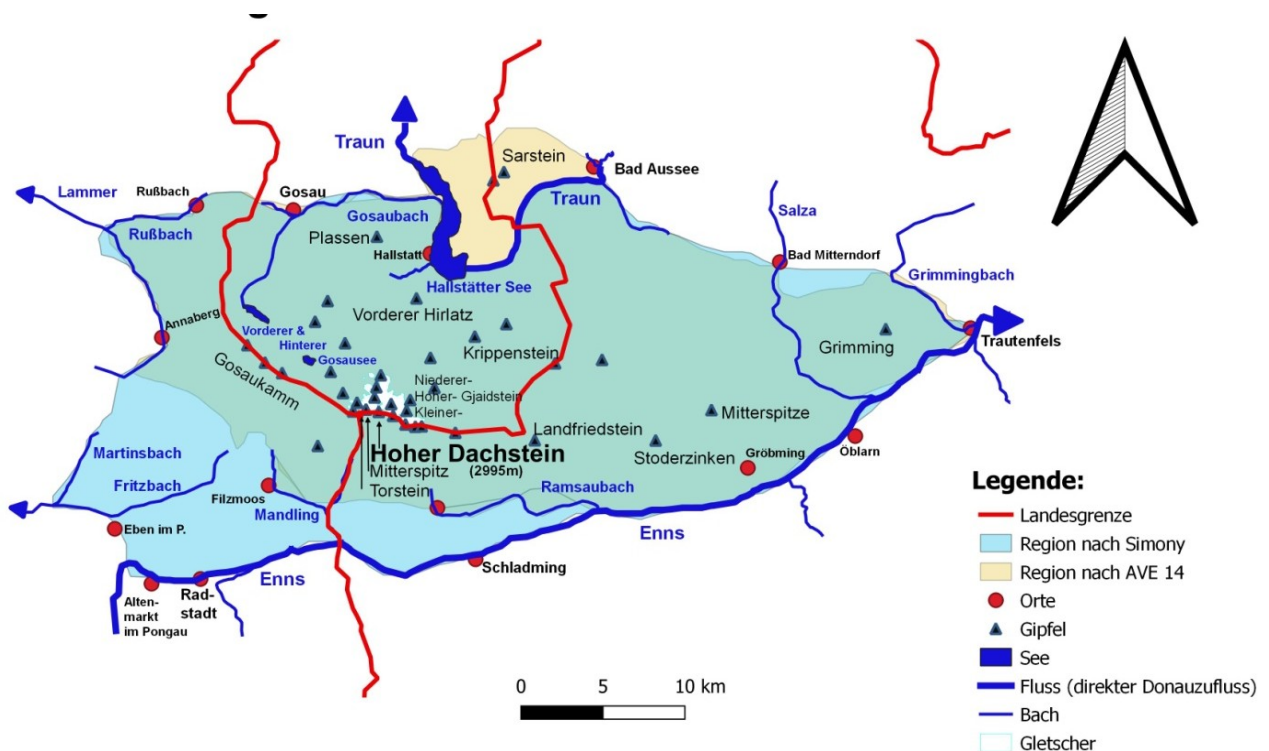


Abbildung 3: Regionalisierung der Dachsteinregion nach Simony & AVE 14 (eigene Darstellung mittels QGIS 3.16, OSM, Grassler 1984 & Simony 1895).

Vergleichend zeigt sich, dass sich die Regionalisierungen nach Simony und AVE 14 in weiten Teilen überlagern (dunkle Fläche = blau (Simony) und gelb (AVE) überlagert),

währenddessen sowohl nach Simony als auch nach AVE 14 Gebiete der jeweiligen Regionalisierung zugehören, die von der jeweils anderen Regionalisierungsvariante nicht mit eingeschlossen sind. So gehört nach der heutigen Alpenvereinsgliederung das Gebiet um den Sarstein mitsamt Pötschenpass der Dachsteinregion an, während Simony die nördliche Grenze bereits an der Traun gezogen und den Sarstein nicht mehr zur Dachsteinregion zugerechnet hatte. Eine weitere Unterscheidung findet sich im Süden – hier hat Simony auf gesamter Ost-West-Erstreckung die Enns zwischen Trautenfels und Altenmarkt im Pongau als südliche Grenze der Dachsteinregion definiert und zählt damit die Gebiete bis zum Martinsbach im Westen der Dachsteinregion zu, wohingegen nach AVE 14 die Grenzziehung im Süden bereits nahe Schladming dem Ramsaubach Richtung Nordwesten folgend zu streben beginnt und in weiterer Folge entlang warmer Mandling an Filzmoos vorbei erst südlich von Annaberg wiederum mit der Regionalisierung Simonys zu überlappen beginnt.

Damit zeigt sich, dass Simony vor allem die großen Flusstäler der Enns und der Traun, wo möglich, als Hilfsmittel für die Regionsabgrenzung genutzt hatte, währenddessen sich die Gliederung nach AVE 14 zwar auch zum Teil an diese, aber auch an andere Umgrenzungspunkte orientiert. Vergleichend mit den Geologie-Daten aus dem GIS Steiermark – Digitaler Atlas Steiermark - (Land Steiermark, Landesamtsdirektion, Referat Kommunikation Land Steiermark 2024) und dem GIS Oberösterreich – DORIS - (Land Oberösterreich, Abteilung Geoinformation und Liegenschaft 2024) ist festzustellen, dass der Sarstein ebenfalls noch aus Dachsteinkalk aufgebaut ist und dies damit in Verbindung mit der räumlichen Lage als Argument genutzt werden kann, den Sarsteinstock noch zum Dachsteingebiet zuzuordnen. Die in den nördlicheren Gebieten liegenden Regionen, die laut AVE 14 nicht mehr der Dachsteinregion zugezählt werden, bestünden - zumindest phasenweise - nämlich nicht mehr primär aus Dachsteinkalk. Ebenso an der südlichen Begrenzung entsteht der Eindruck, dass sich die Alpenvereinsgliederung neben Tälern auch an geologische Gegebenheiten orientiert. So besteht das im Westen nördlich der Enns, von Simony, jedoch nicht mehr von AVE 14 als zur Dachsteinregion dazugehörig definierte, liegende Gebiet aus Phyllit. Es darf aber nicht verschwiegen werden, dass auch die Regionalisierung nach AVE 14 zwingenderweise Gebiete umfasst, deren Aufbau nicht primär an Dachsteinkalk gebunden ist. Dies wären zum Beispiel die Ramsauterasse, die Gegend um Filzmoos oder Teile des Gosauer Beckens.

Charakteristisch für die Region sind auch die in einigen Gipfelbereichen vorhandenen Gletscher, die gesondert in Kapitel 6 behandelt werden. Im Gegensatz zu Abbildung 1, die die steilen Südwände des Dachsteinmassivs zeigt, zeigt Abbildung 4 die deutlich flacher fallenden Nordabhänge des Hohen Dachsteins mitsamt dem Hallstätter Gletscher.



Abbildung 4: Nordseite des Dachsteinmassivs mit Hallstätter Gletscher (eigene Aufnahme, Juli 2024).

2. Von der Beobachtung in der Natur zum Modellexperiment

Ziel dieses Kapitels ist es, jene Grundlagen zu erläutern, welche die chemiedidaktische Basis für die Aufarbeitung der Fachinhalte in dieser Arbeit bilden. Dies sind einerseits die didaktische Rekonstruktion, sowie andererseits das Modellexperiment. Nicht zuletzt sollen auch die Lehrpläne der Sekundarstufe in Hinblick auf die behandelten Fachinhalte analysiert und in Hinblick auf Interdisziplinarität diskutiert werden.

2.1. Didaktische Aufarbeitung

Im Nachfolgenden werden die Begriffe der didaktischen Rekonstruktion und der des Modellexperiments definiert und im, für die in anschließenden Kapitel nachfolgenden Ausführungen, notwendigen Umfang beschrieben und schließlich noch die in dieser Arbeit behandelten Fachinhalte mit den österreichischen Lehrplänen der Sekundarstufe in Verbindung gebracht.

2.1.1. Didaktische Rekonstruktion

Im Sinne der didaktischen Rekonstruktion sollen nach Kattmann et al. (1997, S. 3f.) Fachinhalte mit Schüler*innenvorstellungen in Verbindung gebracht werden, um daraus einen Unterrichtsgegenstand zu extrahieren, wobei die Fachinhalte desweiteren noch in *„umweltliche, gesellschaftliche und individuelle Zusammenhänge einzubetten“* sind (ebd., S. 3). Die Herstellung dieser Unterrichtsgegenstände erfolgt hierbei also nicht nur durch didaktische Reduktion (kleine Auswahl aus einer großen Fülle von Inhalten) sowie didaktischer Transformation (Anpassung der Darstellungsform an die Lernenden) sondern auch durch *„das Herstellen pädagogisch bedeutsamer Zusammenhänge, das Wiederherstellen von im Wissenschafts- und Lehrbetrieb verloren-gegangenen Sinnbezügen, wie auch den Rückbezug auf Primärerfahrungen sowie auf originäre Aussagen der Bezugswissenschaften.“* (Kattmann et al 1997, S. 4).

Daraus ergibt sich nach Kattmann et al. (1997, S. 4) das fachdidaktische Triplet, welches ein Beziehungsgefüge der drei Teile darstellt, auf denen didaktische Rekonstruktion basiert. Bei jenen drei Teilen handelt es sich um die fachliche Klärung, dem Erfassen von Schüler*innenperspektiven sowie der didaktischen Strukturierung. In diesem Triplet (Abbildung 5) werden die Schüler*innenperspektiven in Relation auf die Fachinhalte gestellt, woraus sich in Folge die didaktische Strukturierung ergibt.

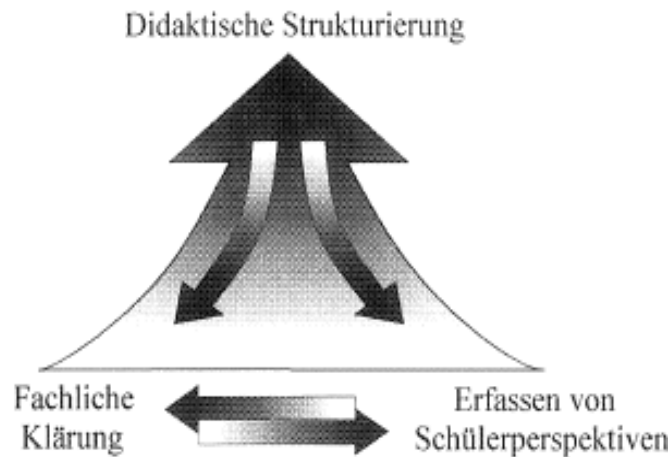


Abbildung 5: Fachdidaktisches Triplett (Kattman et al. 1997, S. 4).

Die fachliche Klärung der einzelnen Themengebiete erfolgt im Zuge dieser Arbeit in den jeweiligen, später nachfolgenden Hauptkapitel. Als vorrangige Methode zur didaktischen Strukturierung der dann dargestellten Fachinhalte werden in dieser Arbeit Modellexperimente gewählt. Deren Beschreibung und die Argumentation, diese als geeignetes Mittel zur Problemlösung der einleitend gestellten Forschungsfragen zu wählen, erfolgt im folgenden Unterkapitel.

2.1.2. Das Modellexperiment

Der Begriff Modellexperiment ist ein Komposita, bestehend aus den Begriffen Modell und Experiment (Sommer et al. 2019, S. 541). Dabei sind Modelle vereinfachte Abbildungen künstlicher oder natürlicher Originale, die je nach Zweck und Zielgruppe unterschiedlich aufbereitet sein können (Pfeifer & Sommer 2019, S. 520f.). Experimente wiederum werden zum Zwecke des Erkenntnisgewinns durchgeführt (Sommer & Pfeifer 2019, S. 71), wobei es nach Bader & Lühken (2019, S. 462ff.) zwischen Experiment in der Forschung und Experiment im Chemieunterricht zu unterscheiden gilt.

Modellexperimente werden dann eingesetzt, wenn der originale Sachverhalt aufgrund verschiedener Ursachen, wie zum Beispiel Komplexität, Gefahrenpotential, zu hoher Kosten oder aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit nicht greifbar ist (Sommer et al. 2019, S. 541.). In Bezug auf das Unterrichtsfach Chemie beschreiben Sommer et al. (2017, S. 14f.) für Modellexperimente drei Kriterien, die diese erfüllen müssen.

1. Bei einem Modellexperiment handelt es sich um ein Experiment, das zum Zwecke des Erkenntnisgewinns eingesetzt wird und unter Nutzung einer chemischen

Fachmethode (zum Beispiel Methoden zur Analyse und Synthese oder zum Erforschen von Stoffeigenschaften) erfolgt.

2. Ein Modell muss einen Bezug zu einem Original aufweisen, also Analogien zu diesem aufweisen.
3. Im Modellexperiment ist der untersuchte Gegenstand nicht das Original selbst, sondern wird mittels verschiedener Materialien modelliert.

Unter Modellieren versteht man allgemein Handlungen unter der Intention, wie es Stäudel (2019, S. 532) ausdrückt, nämlich: *„Eigenschaften und Vorgänge möglichst widerspruchsfrei erklären bzw. Schlussfolgerungen ziehen zu können, nachdem man bekannte Fakten in geeigneter Weise in Beziehung gesetzt hat.“* In Bezug auf den Chemieunterricht bedeute dies nach Stäudel (2019, S. 532), dass beim Prozess des Modellierens *„ein geistiges oder reales Modell eines stofflichen Zusammenhanges oder einer materiellen Struktur entwickelt wird“*.

Modellexperimente können nun in unterschiedlichen Modellierungsgraden vorliegen. Der Modellierungsgrad eines Experiments wird dadurch bestimmt, wie viele Merkmale des Modellexperiments in der Ausprägung Modell bzw. Original vorliegen, wobei zumindest eines der Merkmale als Modell vorliegen muss, da ansonsten das zuvor genannte Kriterium Nr. 3 nicht erfüllt werden würde. Die Merkmale sind Substanz (beteiligte Chemikalien), Material (jenes, das für den Bau des Modells erforderlich ist), Bedingungen (jene, die für das Durchführen des Experiments erforderlich sind, z.B. Temperatur oder pH-Wert) sowie Fachmethode (Klassifikation des Experimentes) (Sommer et al. 2019, S. 545).

Zuletzt zählen Sommer et al. (2019, S. 543f.) Klassifikationsmöglichkeiten für das Modellexperiment in Bezug auf den inhaltlichen Fokus auf, die da wären (1) Stoff-Struktur-Eigenschaft, (2) Großtechnische Prozesse und Technologien, (3) Arbeitssicherheit, (4) Komplexe Themen mit Chemie als Querschnittswissenschaft und (5) Fachmethoden. In Bezug auf (4) werden unter anderem geochemische Prozesse beispielhaft angeführt. Daraus kann abgeleitet werden, dass sich Modellexperimente für die Ziele dieser Arbeit im Besonderen eignen können.

Sommer et al. (2019, S. 546) merken jedoch an, dass Modellexperimente nicht per se wirken, sondern dass des Weiteren von Seiten der Lernenden eine Denkleistung erbracht werden müsse, um einen erfolgreichen Lernprozess aufzuweisen. Diese bestünde laut Sommer darin, das Modell mit dem Original zu vergleichen und dabei Analogien festzustellen. Dem wird durch die Formulierung von Aufgabenstellungen in den Versuchsanleitungen (Anhang) Rechnung getragen.

2.2. Verortung im Lehrplan

Für die Verortung im Lehrplan werden insbesondere die österreichischen Lehrpläne der Sekundarstufe I und Sekundarstufe II aus dem Unterrichtsfach Chemie berücksichtigt. Da die in dieser Arbeit behandelten Themen auch stark geographischen Charakter aufweisen, werden auch die Lehrpläne des Unterrichtsfachs Geographie und Wirtschaftskunde (bzw. Geographie und wirtschaftliche Bildung im Falle der neuen Lehrpläne für die Sekundarstufe I) berücksichtigt, um daraus ggf. auch fächerübergreifende Potentiale der Thematik auszuloten. Nach Sommer (2019, S. 294) ermögliche fachübergreifender sowie fächerverbindender Unterricht „*Orientierung an der Interdisziplinarität*“, wobei beim fächerübergreifenden Unterricht zwar die Inhalte eines Faches noch im Vordergrund stünden, jedoch Inhalte eines oder mehrerer anderer Fächer mit einbezogen werden. Je nachdem, ob auf den neuen Lehrplan der Sekundarstufe I oder den bestehenden Lehrplan der Sekundarstufe II eingegangen wird, wird im Nachfolgenden die jeweils entsprechende Bezeichnung des Unterrichtsfachs genannt, nämlich entweder Geographie und Wirtschaftskunde (bestehend) oder Geographie und wirtschaftliche Bildung (neu).

2.2.1. Allgemeiner Teil

Im allgemeinen Teil des Lehrplans finden sich in den allgemeinen Bildungszielen für die Oberstufe fünf sogenannte Bildungsbereiche, die als Grundlage für fächerübergreifenden bzw. -verbindenden Unterricht zu verstehen sind, wovon sich ein Bildungsbereich auf „Natur und Technik“ bezieht (Rechtsinformationssystem des Bundes 2024). Damit kann das Thema Gletscher oder Karst im Nachfolgenden fächerübergreifend und damit nicht nur auf Chemie, sondern auch auf Geographie und Wirtschaftskunde interdisziplinär betrachtet werden.

2.2.2. Chemie – Sekundarstufe I

Im neuen Lehrplan Chemie der Sekundarstufe I wird der Chemieunterricht laut Rechtsinformationssystem des Bundes (2024) unter anderem mit jenem Ziel beschrieben, „*Phänomene und Vorgänge aus Alltag, Technik und Umwelt zu erfassen und besser zu verstehen*“, wobei nach dieser Auffassung auch ein Gletscher oder die Verkarstung als ein Phänomen der Umwelt verstanden werden könne. Weiters beinhalten die didaktischen Grundsätze das „*Planen, Durchführen, Beobachten und Auswerten von Untersuchungen*“, was in Bezug mit denen in dieser Arbeit modellierten Experimenten ermöglicht werden kann. Schließlich wird es in den Ausführungen des neuen Lehrplans auch als sinnvoll erachtet, „*(...) die Chemie – auch fächerübergreifend – (...) erfahrbar zu machen*“, was aufgrund der Gletscherthematik oder der Verkarstung in Verknüpfung mit dem Unterrichtsfach Geographie

und Wirtschaftlicher Bildung ermöglicht wird, wie an späterer Stelle noch argumentiert werden wird.

Ebenso kann die Thematik in Kombination mit der Methodik einen Beitrag zur Erfüllung der Kompetenzbereiche erfüllen, nach denen die Lernenden nach Rechtsinformationssystem des Bundes (2024) *„Vorgänge und Phänomene in Natur, Umwelt und Technik sowie deren Auswirkungen beobachten, erfassen, beschreiben und benennen“* sowie *„zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Beobachtungen machen oder Messungen durchführen und diese beschreiben“*; *„zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen, Vermutungen aufstellen sowie passende Untersuchungen planen, durchführen und protokollieren“* und schließlich auch *„Beobachtungen, Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren.“* können sollen.

2.2.3. Chemie – Sekundarstufe II

Im aktuellen Lehrplan Chemie der Sekundarstufe II wird nach Rechtsinformationssystem des Bundes (2024) ebenfalls die *„Planung, Durchführung, Dokumentation und Deutung von Experimenten“* gefordert sowie die Verwendung naturwissenschaftlicher Modelle. In den Fachinhalten der 7. Klasse können die Punkte *„Funktion und Vernetzung natürlicher und anthropogener Stoffkreisläufe erklären“* sowie *„Entstehung und Wirkung von Schadstoffen beschreiben“* auf das Themenfeld Gletscher sowie Karst umgelegt werden.

2.2.4. Geographie und Wirtschaftliche Bildung – Sekundarstufe I

Im neuen Lehrplan für Geographie und wirtschaftliche Bildung der Sekundarstufe I finden sich zu den einleitenden Erläuterungen des Unterrichtsgegenstandes Geographie und wirtschaftliche Bildung unter anderem die Themenfelder *„naturräumliche und soziale Prozesse“* sowie *„Mensch-Umwelt-Beziehungen“*, die sich mit dem Themenkomplex Gletscher oder Verkarstung bzw. Unterirdischer Abfluss in Verbindung bringen lassen. Weiters wird als eine von mehreren Herausforderung des 21. Jahrhunderts der Klimawandel genannt, welcher auch auf Gletscher Auswirkungen zeigt. Aus den Fachinhalten finden sich in der 1. Klasse die Punkte *„wesentliche Charakteristika der räumlichen Umwelt erheben, beschreiben und individuell bewerten“*; *„Wechselwirkungen von Naturereignissen, Lebensqualität und Wirtschaften der Menschen anhand von Fallbeispielen beschreiben und erörtern“* sowie in der 3. Klasse unter dem Fokus *„Wirtschaftsstandort Österreich“* *„ein Blick auf Tourismusregionen“* und schließlich in der 4. Klasse der Punkt *„(...) Ausmaß des*

menschlichen Einflusses auf Natursysteme (...)“ (Rechtsinformationssystem des Bundes 2024), für welche sich allesamt das Themenfeld der Gletscher oder des Karsts zu deren Bearbeitung eignen kann.

2.2.5. Geographie und Wirtschaftskunde – Sekundarstufe II

Im aktuellen Lehrplan für Geographie und Wirtschaftskunde der Sekundarstufe II kann die Gletscherthematik ganz klar in Bezug auf die Basiskonzepte „*Geoökosysteme*“ und „*Mensch-Umwelt-Beziehungen*“ gebracht werden. Im Lehrstoff finden sich die Geoökosysteme in der 5. Klasse sowie erneut in der 7. Klasse, in welcher auch ein Fokus auf Österreich gelegt wird (Rechtsinformationssystem des Bundes 2024).

2.2.6. Fazit zu den Lehrplaninhalten

Generalisierend kann in Bezug auf die untersuchten Lehrpläne festgestellt werden, dass ausgehend vom Bildungsbereich Natur und Technik eine interdisziplinäre Betrachtung des Themenbereiches der Gletscher und deren Umfeld sowie des Karsts am Beispiel des Dachsteingebietes möglich ist und eine übergreifende Betrachtung aus Blickwinkeln der Chemie sowie Geographie und Wirtschaftskunde umsetzbar sein kann, wie die vorangegangenen Ausführungen zu den einzelnen Fachlehrplänen dargelegt haben. Insbesondere durch die Untersuchung eines naturräumlichen Prozesses bzw. von Elementen aus Geoökosystemen mittels chemischer (Modell)Experimente wird der interdisziplinäre Charakter einmal mehr verdeutlicht.

3. Geologie

Intention dieses Kapitels ist es, die Geologie des Untersuchungsgebietes grundlegend zu klären und darauf aufbauend Experimente aus dem Bereich der Analytischen Chemie zu modellieren, die es sich zum Ziel setzen, den Lernenden, auch im Zuge des Projektes GlacierXperience, die Geologie der Dachsteinregion zu veranschaulichen. Schließlich bedingt die Geologie zahlreiche weitere Naturphänomene, wie etwa die Verkarstung, wie zu einem späteren Zeitpunkt noch geklärt werden wird. Da der geologische Aufbau einer Region aufgrund natürlicher Entwicklungsprozesse vorgegeben ist, kann die Geologie in dieser Hinsicht auch als ein Naturphänomen bezeichnet werden.

3.1. Chemische und Physiogeographische Grundlagen

In der Geologie, die sich der Erforschung des Planeten Erde hingibt, kann zwischen physikalischer und historischer Geologie unterschieden werden. Während sich die historische Geologie mit der Entwicklung der Erde beschäftigt, legt die physikalische Geologie ihren Blickpunkt auf Prozesse, die sich auf (exogen) bzw. unter (endogen) der Erdoberfläche abspielen. Neben den Prozessen spielt auch die stoffliche Zusammensetzung der Erde eine Rolle (Tarbuck & Lutgens 2009, S. 3). Und eben diese stoffliche Zusammensetzung, nämlich konkret jene des Gesteins im Untersuchungsgebiet in den Blick nehmend, wird die chemische, experimentelle Aufarbeitung dieses Themenbereiches in die Fachdisziplin der Analytischen Chemie fallen, womit dieses Kapitel auch von besonderer Interdisziplinarität geprägt ist.

Wie in Kapitel 1 bereits erläutert, liegt die Dachsteinregion in den nördlichen Kalkalpen, womit im vorliegenden Gebiet insbesondere auch Kalk angetroffen werden kann. Ganz grundlegend besteht Kalkgestein nach Riedl & Janiak (2007, S. 511) primär aus Calciumcarbonat (CaCO_3), wobei auf den konkreten Aufbau und dessen Zusammensetzung im Dachsteingebiet im nachfolgenden Unterkapitel detaillierter eingegangen werden wird. Den mit Kalkgestein in Verbindung stehenden Verkarstungserscheinungen, wie auch den speziellen Abflussverhältnissen, die diese bedingen, werden jeweils eigene Hauptkapitel (Kapitel 4 & Kapitel 5) gewidmet.

3.2. Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes

Das Dachsteingebirge ist vorwiegend aus Dachsteinkalk aufgebaut (Abbildung 6), welcher in zwei Ausbildungen differenziert werden kann - nämlich einerseits in den geschichteten bzw.

gebankten Dachsteinkalk und andererseits in den ungeschichteten Dachsteinriffkalk (Spengler 1954a, S. 6).



Abbildung 6: Dachsteinkalk in der Dachsteinregion; Links gebankter Kalk; Rechts: Riffkalk (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).

Am Plateau des Dachsteinstocks erreicht der Dachsteinkalk Mächtigkeiten von bis zu 1000 Metern, wobei der gebankte Dachsteinkalk in Form von Schichten mit Mächtigkeiten in Größenordnungen von wenigen Dezimetern bis hin zu mehreren Metern auftritt und aufgrund rhythmischer, wechselnder Sedimentation entstanden ist. Farblich erscheint dieser je nach Fazienbezirk^G grauweiß, weißlich oder gelblich, Beim Dachsteinriffkalk handelt es sich um ungeschichteten Korallenriffkalk (Ganss 1954, S. 55f), welcher durch Korallenriffbildung entstanden ist und zumeist etwas dunkler als der gebankte Dachsteinkalk ist (Spengler 1954b, S. 19). Simony (1895, S. 104) gibt für die Mächtigkeit der Bankungen konkret die Größenordnung von 0,3 bis 1,3 Meter an. Weiters lassen sich im Dachsteinkalk Megalodonten, 20-30 cm große Fossilien der sogenannten Kuhtrittmuschel, finden (Moser 1997, S. 15). Die Analyse „Probe Dachsteinkalk aus dem Gosaubach“ hat nach Porscher (1993), zitiert nach Umweltbundesamt (1994, S. 19) jene Zusammensetzung aus Tabelle 1 ergeben.

Tabelle 1: Zusammensetzung Dachsteinkalk, Probe Gosaubach, Porscher 1993 (Umweltbundesamt 1994, S. 19)

CaCO ₃	97,14%	MnO	0,01%
MgCO ₃	4,44%	SrO	154 ppm
Al ₂ O ₃	0,15%	PbO	6 ppm
Fe ₂ O ₃	0,03%	Rest	4,44%

Unterlagert wird der Dachsteinkalk von wasserundurchlässigen Schichten, den sogenannten Werfener Schichten, welche im Süden Seehöhen von 1800 Metern erreichen und (wie die Kalkmasse) gegen Norden geneigt sind und dadurch im Bereich Gosau/Hallstatt auch bis unter den Talboden reichen (Umweltbundesamt 1989, S. 4).

Weiters tritt in der Region Hallstätter Kalk auf, ein feinkristallines Gestein, „*meist weiß und stellenweise unregelmäßig von fleischroten Farbtönen geflammt.*“ (Ganss 1954, S. 56).

Korrodierender Kalkstein ist in einigen Fällen mit Rotablagerungen versehen (Abbildung 7), bei denen es sich um ein eisenreiches Tonerdesilikat handelt. Diese stellen einen Lösungsrückstand dar, deren Färbung aufgrund ihres hohen Eisengehaltes zu erklären ist (ebd., S. 55).



Abbildung 7: Rotablagerungen im Dachsteinkalk (eigene Aufnahme, Mai 2024).

Von Besonderheit sind schließlich noch Vorkommen von Augensteinen zu nennen. Augensteine bestehen nämlich nicht aus Kalk, sondern es handelt sich bei diesen um Gerölle unterschiedlichster Farbe, die aus Quarzen und anderen Materialien, wie Grauwackenschiefer, Phyllit oder Gneis bestehen können und über die Hochfläche des Plateaus verstreut auffindbar sind. Die Augensteine selbst stammen aus einer früheren Schotterdecke aus den Zentralalpen, die in die Region herangeführt und mehrfach umgelagert worden sind (Meier 1954, S. 68f.). Ein (mittlerweile in die Jahre gekommener)

Überblick über deren Fundstellen findet sich in Krieg (1953, S.96ff). Außerdem hat Krieg (1953, S. 95) die Augensteine in drei Größenordnungen bezüglich ihrer Korngröße eingeteilt – nämlich in Augensteine <5 cm, die ein stark poliertes Erscheinungsbild haben und aus Quarzit bestehen. Die zweite Gruppe entspricht vom Erscheinungsbild der ersteren mit jenem Unterschied, dass diese eine mittlere Größenordnung von 6-7 cm aufweisen und die dritte Gruppe, die Krieg als „*grobe, wenig polierte Gerölle*“ bezeichnet, bei denen einige Stücke auch Größen >15 cm aufweisen. Meier (1954, S. 68f.) gibt an, dass die Augensteine im Bereich von 1-3 cm am häufigsten sind, selten über faustgroß.

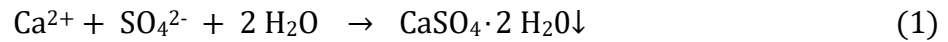
3.3. Fachliche Klärung für ein Modellexperiment

Dass sich die Geologie des Untersuchungsgebietes im besonderen Maße eignet, mittels Modellexperimente aufgearbeitet zu werden, hat sich erst während der Experimentalphase herausgestellt, sodass es sich als lohnenswert erwiesen hat, das Thema der Geologie in einem eigenen Kapitel zu fokussieren anstatt diese, wie ursprünglich geplant, nur kurz in einem Unterkapitel zur Geographie des Untersuchungsgebietes anzuschneiden. Dabei seien die einzelnen, zu untersuchenden Gesteinsproben als modellhafte Repräsentanten für die Geologie der Dachsteinregion zu sehen. Es hat sich gezeigt, dass sich die qualitative Analyse des Kalk- bzw. Karstgesteins dabei im besonderen Ausmaß dazu eignet, den geologischen Aufbau des Untersuchungsgebietes experimentell zu veranschaulichen. Hierbei kann der Fokus vor allem auf die Analyse von Calciumionen sowie Carbonationen gelegt werden. Desweiteren sollen mittels weiterer Methoden auch andere Elemente analysiert werden. Das sind zum einen Eisenionen, welche vor allem auch im genannten Rotschlamm oder speziell auch im Hallstätter Kalk auftreten. Zum anderen sollen auch Nachweise von Kupferionen erfolgen. Negative Carbonatnachweise regionaler Gesteinsproben etwa können auf Augensteine hinweisen, die aus Quarz bestehen und wie in Kapitel 3.2. erläutert, in der Dachsteinregion auftreten können.

Der Nachweis von Calciumionen erfolgt im Zuge der nachfolgenden Bearbeitung einerseits über die Flammenfärbung sowie andererseits über zwei Fällungsreaktionen.

Bei positiver Flammenfärbung verfärbt sich die Flamme einer nichtleuchtenden Bunsenbrennerflamme ziegelrot bzw. orangerot – charakteristische Spektrallinien finden sich bei 618 und 620 nm (orangerot) sowie bei 554 nm (grün), wobei für eine eindeutige Zuordnung ein Spektroskop erforderlich ist (Werner 2006, S. 34 & 129). Daher werden zwei weitere Nachweise beschrieben, nämlich nachfolgende Fällungsreaktionen einerseits als Calciumsulfat und andererseits als Calciumcarbonat.

Bei der Fällung als Calciumsulfat wird die Probe mit derselben Menge an verdünnter Schwefelsäure versetzt, sodass bei positiven Nachweis Calciumsulfatdihydrat in Form charakteristischer Nadeln ausfällt (ebd., S. 129):



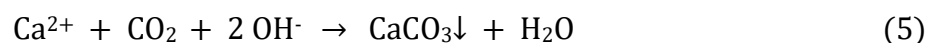
Bei der Fällung als Calciumcarbonat wird die Probe mit Ammoniumcarbonat- oder Alkalicarbonatlösung versetzt, woraufhin Calciumcarbonat ausflockt (ebd., S. 130):



Der Carbonatnachweis erfolgt klassisch nasschemisch durch Reaktion mit Säure unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Nach Werner (2006, S. 196) startet beim Versetzen von Carbonat oder einer carbonathaltigen Lösung mit Säure eine starke Gasentwicklung – nachfolgend die Reaktionsgleichung vereinfacht in zwei Schritten:



Ein weiteres Argument, um das Vorhandensein von Carbonationen belegen zu können, ist es, wenn das nach Versetzen der Probe mit Säure entstandene Gas (siehe Reaktionsgleichung (4)) analytisch auch als Kohlenstoffdioxid identifiziert wird, was durch Reaktion mit einer Calciumhydroxidlösung erfolgen kann. So bildet sich nach Werner (2006, S. 197) aus Kohlenstoffdioxid und Calciumhydroxidlösung weißes, flockiges Calciumcarbonat (welches sich bei weiterer Zuführung von CO_2 jedoch wieder lösen würde):



So es sich beim analysierten (regionalen) Gestein nicht um Carbonatgestein handelt, ist nicht auszuschließen, dass es sich um Augensteinvorkommen handeln könnte, wie bereits erwähnt.

Für den qualitativen Nachweis der Eisen- und Kupferionen werden sowohl halbquantitative Teststäbchen eingesetzt sowie zwei weitere, klassische Nachweismethoden. Für den Nachweis von Eisenionen (Fe^{3+}) soll die Reaktion mit Kaliumhexacyanoferrat(II) angewandt werden, wobei die Reaktionsgleichung nach Werner (2006, S. 99) folgendermaßen lautet und es sich beim Produkt um eine Ausfällung des sogenannten Berliner Blau handelt:



Die Kupferionen sollen durch Reaktion mit Hydroxidionen zu blassblauen Tetrahydroxocuprat(II) nachgewiesen werden, die Reaktionsgleichung lautet nach Werner (2006, S. 65):



Die Hydroxidionen für vorige Reaktion erhält man durch den Einsatz von Natronlauge oder durch den Einsatz einer konzentrierten Natriumcarbonatlösung, da das Carbonat nach Riedl & Janiak (2007, S. 623) in Wasser alkalisch reagiert und dabei Hydrogencarbonationen sowie Hydroxidionen freisetzt:



Eine weitere Möglichkeit zur Analyse bestimmter Elemente stellen Teststäbchen dar. Diese würden allgemein zwar halbquantitative Aussagen erlauben, da sie nach dem kolorimetrischen Prinzip je nach Konzentrationsbereich der Probe eine unterschiedliche Färbung bzw. Intensität dieser Färbung auf einem Testfeld aufweisen, weil aber im Zuge der Zielsetzung dieses Unterkapitels jedoch ausschließlich unvollständig gelöste Proben mit unbekannter Masse analysiert werden, kann mittels Teststreifen jedoch nur eine qualitative Aussage über den Gehalt oder Nicht-Gehalt eines bestimmten Elements in vorliegender Probe getätigt werden. Zum Einsatz kommen die Teststäbchen „Quantofix Gesamteisen 100“ für Eisenionen von Machery-Nagel sowie für Kupferionen „Quantofix Kupfer 100-300 mg/L Cu²⁺“, ebenso von Machery-Nagel.

Weder die Sicherheitsdatenblätter noch die Gebrauchsanleitungen für die jeweiligen Teststäbchen geben an, welche Substanz auf dem Testfeld reagiert. Entsprechend den Angaben auf der Homepage handelt es sich bezüglich der Methode zumindest bei Quantofix Eisen um „Eisen – Triazin“ bei Quantofix Kupfer um „Kupfer – Bichinolin“ (Machery-Nagel GmbH & Co. KG 2024a & Machery-Nagel GmbH & Co. KG 2024b).

Für die Eisentests muss die Probelösung in einem pH-Bereich von 1-7 vorliegen, vorhandene Schwermetallionen können eine ungewünschte Verfärbung herbeiführen. Beim Vorhandensein von Eisenionen verfärbt sich das Testfeld blau (Machery-Nagel GmbH & Co. KG 2024a).

Bei den Kupfertests muss die Lösung in einem pH-Bereich von 2-6 vorliegen und daher bei zu sauren Probelösungen entsprechend zuvor gepuffert werden. Beim Vorhandensein von Kupferionen verfärbt sich das Testfeld rotviolett (Machery-Nagel GmbH & Co. KG 2024b).

3.4. Aufbereitung für ein Modellexperiment

Die qualitative Analytik wird nachfolgend über zwei Varianten beschrieben, einerseits klassisch nasschemisch zum Nachweis der Calciumionen und andererseits ebenfalls nasschemisch, jedoch mittels apparativer Konstruktion, die es ermöglicht, mittels eines Versuchsdurchganges sowohl Calciumionen als auch Carbonationen und Eisenionen im Gestein nachzuweisen. Die Idee der dabei präsentierten Apparatur stammt aus den Versuchen, die Durchlässigkeit von Karstgestein zu modellieren, die später noch in Kapitel 5.4. erläutert werden wird, wobei die Apparatur für den Zweck der Analytik nochmals adaptiert worden ist. Zuletzt erfolgt auch eine Analyse von Eisen- und Kupferionen aus unterschiedlichen Gesteinsproben mittels weiterer Nachweisreaktionen und halbquantitativer Schnelltests, die allerdings in diesem Setting lediglich eine einfache und schnelle qualitative Analyse der genannten Ionen in verschiedenen Gesteinsproben ermöglichen und keine quantitativen Aussagen zulassen.

3.4.1. Qualitative Analyse von Dachsteinkalk

Für die ersten, testweisen Versuche zum Nachweis von Calciumionen sind Marmorstücke (d 1-2 cm) als Probe eingesetzt worden. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt die Versuchsdurchführung nur noch mit Originalproben von Dachsteinkalk aus dem Untersuchungsgebiet. Ionen aus der Probe für die Nachweisverfahren in Lösung zu bringen, ist anfangs über zwei Varianten erfolgt. Zum einen durch eine kohlensäurehaltige, wässrige Lösung (Einleitung des Gases einer iSi-Kapsel in 25 ml Wasser) – diese hat sich im weiteren Verlauf jedoch als nicht erfolgreich erwiesen - sowie zum anderen durch einmolare Salzsäure, wobei jeweils ein Probenstück im Becherglas mit 5cm Flüssigkeit für 2 Minuten überschichtet worden ist (Abbildung 8). Zweck der Verwendung von kohlensäurehaltigem Wasser ist es gewesen, bereits hier eine erste Verknüpfung zur Verkarstung herzustellen.



Abbildung 8: Probe Dachsteinkalk; Links: original; Rechts Reaktion unter Zugabe von Salzsäure (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 9: Die Probelösung verfärbt sich im Laufe des Lösungsvorganges grau (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die anschließend im Falle der Marmorstücke abdekantierten und im Falle der Dachsteinkalkproben zuvor stark grau verfärbten (Abbildung 9) und dann filtrierten Probelösungen sind auf je zwei Reagenzgläser aufgeteilt worden (Abbildung 10).

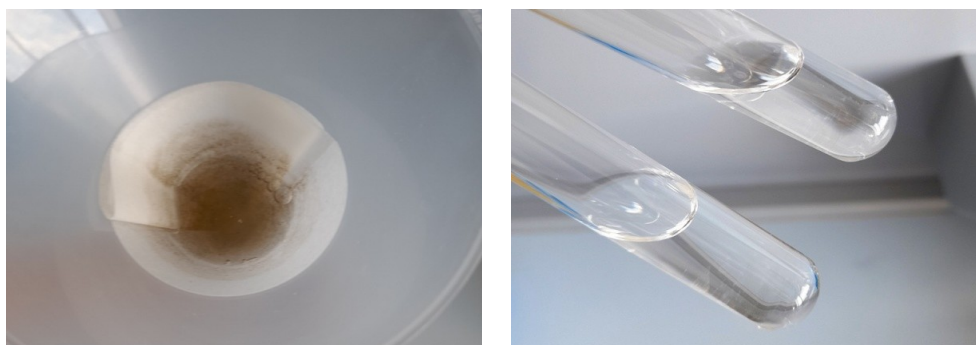


Abbildung 10: Nach dem Filtrieren der Probelösung erhält man ein sehr klares Filtrat (rechts), während links der Filtrerrückstand von grauer Beschaffenheit ist (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Je eine der beiden Probenfiltrate ist anschließend mit Natriumcarbonatlösung (15%) bzw. mit einmolarer Schwefelsäure versetzt worden.

Wie bereits angedeutet, ist bei der zuvor mit kohlensäurehaltiger Lösung versetzten Probe keine Beobachtung erfolgt im Gegensatz zu den Gesteinsproben, die in Salzsäure gelöst worden waren. Während sich bei der mit Natriumcarbonatlösung versetzten Probelösung sofort ein grober, flockiger und voluminöser weißer Niederschlag gebildet hat, ist bei der mit der Schwefelsäure versetzten Lösung zu Beginn noch keine Niederschlagsbildung festzustellen gewesen. Zeitlich versetzt, unter Zuhilfenahme eines Glasstabes, mit dem an der Reagenzglasinnenwand Reibung erzeugt worden ist, ist eine langsame Bildung eines feinpulvrigen Niederschlages festzustellen gewesen (Abbildung 11), ein Vorgehen nach

Moser (2006, S. 142), dass auch in Scharpf (2022) die Niederschlagsbildung beim Nachweis von Kaliumionen mittels Weinsäure gefördert hatte.

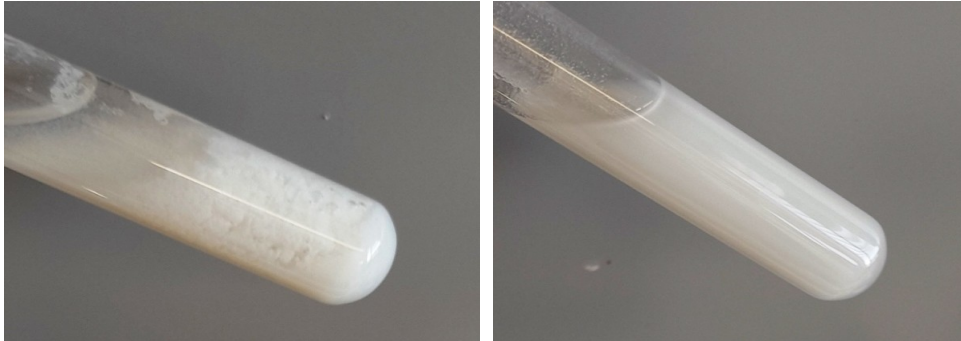


Abbildung 11: Links: Flockiger Niederschlag nach Zugabe von Natriumcarbonatlösung; Rechts: Fein verteilter Niederschlag nach Zugabe von Schwefelsäure – dieser bildet sich jedoch erst nach mehreren Minuten unter Zuhilfenahme eines Glasstabes, mit welchem an der Reagenzglasinnenwand gerieben wird (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Zusätzlich ist die sofortige Verfrachtung eines Tropfens jener Probe auf einen Objektträger erfolgt, die zuvor mit Schwefelsäure versetzt worden ist.

Mittels Lupe beobachtend ist festzustellen gekonnt worden, dass im zuvor klaren Tropfen nach rund 1 bis 3 Minuten erste Schlieren aufgetreten sind und dass der Tropfen nach spätestens 10-20 Minuten vollständig von einem feinen Niederschlag durchzogen worden war (Abbildung 12).

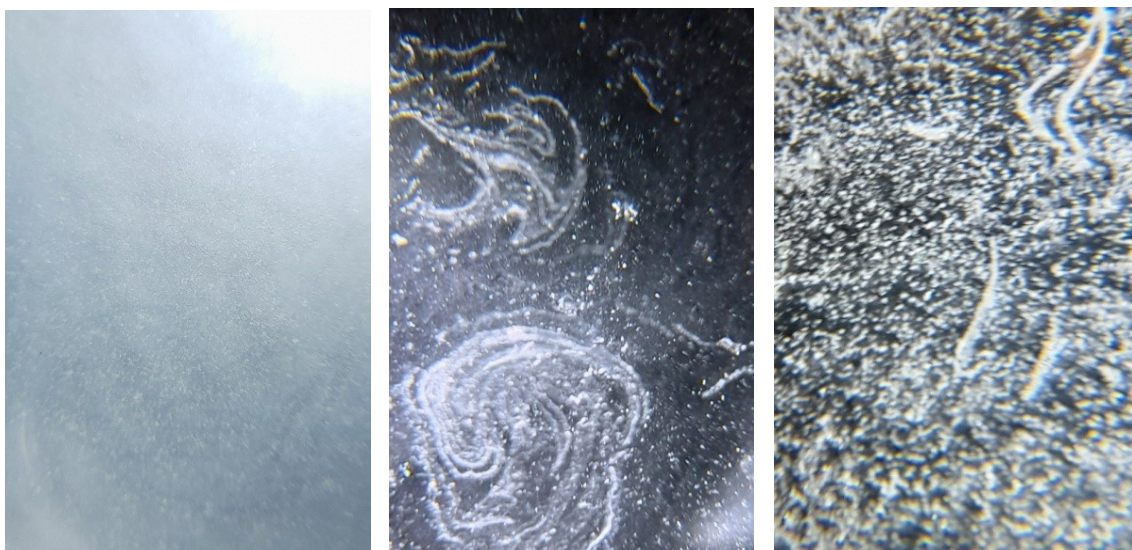


Abbildung 12: Einen Tropfen der Probelösung versetzt mit Schwefelsäure auf einem Objektträger unter der Lupe beobachtend; Links: Direkt nach Entnahme aus dem Reagenzglas; Mitte: Nach wenigen Minuten ist eine Schlierenbildung zu erkennen bis nach rund 5-10 Minuten im Tropfen ein fein verteilter Niederschlag vorliegt (rechts) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Im Anschluss daran sind die beiden Niederschläge filtriert und die Filtrerrückstände mittels Flammenfärbung einer weiteren Untersuchung unterzogen worden. Dabei ist jeweils eine kräftige, orange Färbung der Flamme aufgetreten, wobei die Färbung des Filtrerrückstandes bei der Fällung mittels Natriumcarbonatlösung eine deutlich stärkere Intensität aufgewiesen hatte, als es bei der Fällung mittels Schwefelsäure der Fall gewesen war (Abbildung 13). (Im Falle des Niederschlages durch die Fällung mit Natriumcarbonat könnte die Intensität allerdings auch durch eine Gelbfärbung durch Natriumionen verstärkt werden, auch wenn diese in der Theorie aufgrund deren Löslichkeit größtenteils im Filtrat vorliegen sollten).

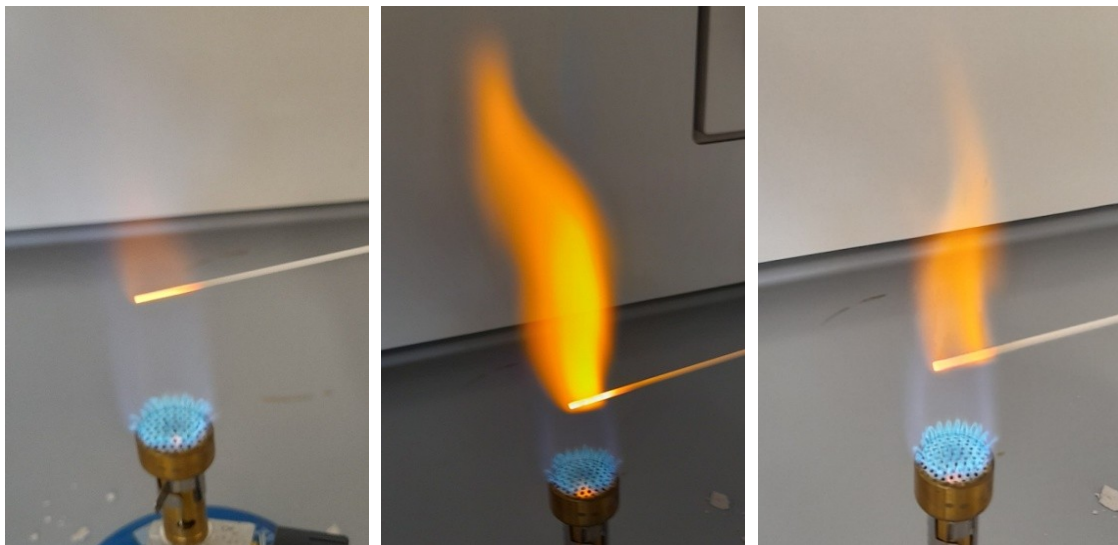


Abbildung 13: Links: Ungefärbte Flamme beim Ausglühen des Magnesiastäbchens; Mitte & Rechts: Flammenfärbung durch die Niederschläge, wobei zu erkennen ist, dass die Probe in der Mitte bei der Fällung als Carbonat eine intensivere Färbung ergibt, als jene Probe rechts bei der Fällung als Sulfat (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Inspiziert von der in 5.4. konstruierten Apparatur hat es sich erwiesen, diese auch für die Analytik des Dachsteinkalks in adaptierter Form einzusetzen, wie nachfolgend beschrieben werden wird. Zusätzlich ermöglicht es diese, das entstehende Gas zu identifizieren und unter Nutzung halbquantitativer Schnelltests auch Eisenionen in der Gesteinsprobe nachzuweisen.

Wie in Abbildung 14 & Abbildung 15 ersichtlich, besteht die Apparatur aus Einwegspritzen (1x zu 12 ml, & 2x zu 25 ml), die mittels Dreiwegeventil miteinander verbunden und mittels Stativklemmen am Stativ befestigt sind. Zur Befestigung am Stativ muss sowohl der Spritzenzylinder als auch der Spritzenkolben jener Einwegspritze, in welcher die Probe eingebracht vorliegt, am Stativ befestigt sein, sodass es sich um ein starres Gefäß handelt und das entstehende Gas aufgrund des konstanten Volumens dieser Einwegspritze über das Dreiwegeventil in die leere, aufgesetzte Spritze einströmen kann. Andernfalls würde der Spritzenkolben aus dem Zylinder getrieben werden, wie Vorversuche gezeigt hatten.

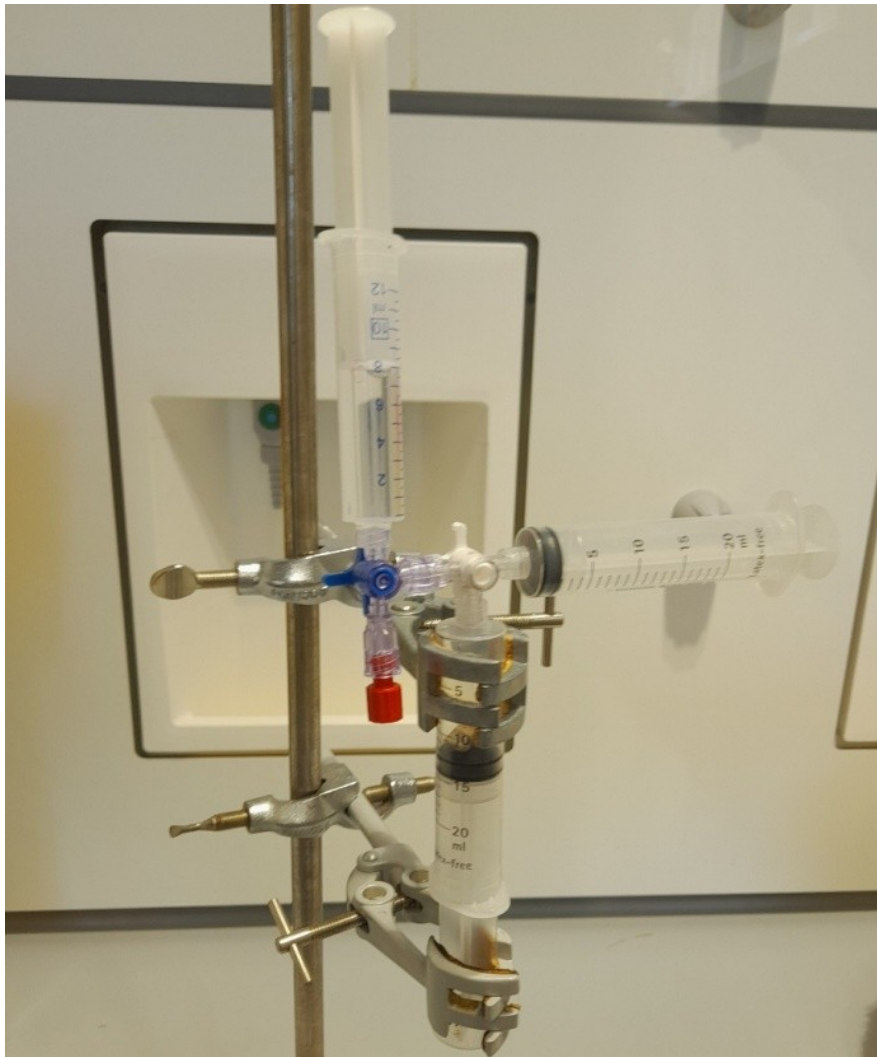


Abbildung 14: Analyseapparatur – 3 Einwegspritzen sind über zwei Dreiwegeventile verbunden. In der oberen Spritze liegt einmolare Salzsäure vor, in der unteren Spritze die Probe aus Dachsteinkalk. Die waagrechte Spritze in der Mitte dient zum Auffangen des entstehenden Gases. Alternativ kann diese bereits zu einem Viertel mit Calciumhydroxidlösung versehen sein, sollte in diesem Fall aber bereits zur Hälfte aufgezogen sein. Befestigt ist die Apparatur mit 2 Stativklammen am Stativ, wobei diese jeweils am Spritzenkolben sowie Spritzenzylinder der unteren Spritze mit der Probe angebracht sein müssen, damit deren Volumen trotz Gasentwicklung konstant bleibt (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die Gasentwicklung startet, sobald die Salzsäure in das Probengefäß eingespritzt worden ist, wozu es notwendig ist, zuvor mittels waagrechtter Spritze im Probengefäß einen Unterdruck aufzubauen.

Für den Nachweis mittels Calciumhydroxidlösung sind zwei Möglichkeiten erprobt worden – Abbildung 16 - entweder man hat in einem separaten Reagenzglas ca. 2 cm Calciumhydroxidlösung vorliegen und überführt mittels der Einwegspritze das bei der Reaktion aufgefangene Gas in das Reagenzglas und schwenkt dieses anschließend, oder – eleganter – man schließt direkt an die Apparatur eine Einwegspritze, die zu einem Viertel mit Calciumhydroxidlösung gefüllt ist und lässt in diese das entstehende Gas einströmen.

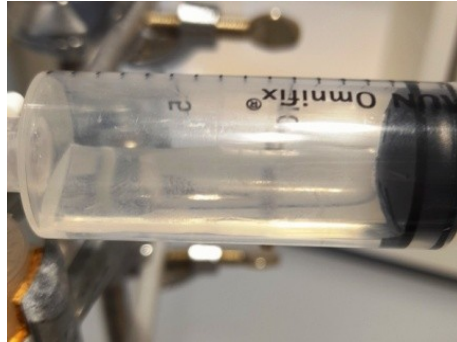
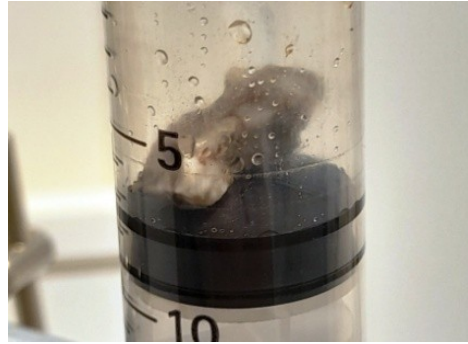


Abbildung 15: Links oben: Mit den Dreiwegeventilen kann die Zuführung der Säure und die Ableitung des entstehenden Gases reguliert werden – wesentlich ist, dass man die Entstehung eines Überdruckes verhindert, da dieser ein Risiko darstellen kann, da die Apparatur sowohl mit Säure und einer Base gefüllt ist. Sicherheitshalber ist im Abzug hinter Schutzglas gearbeitet worden; Rechts oben: Die Probe liegt in der unteren Spritze vor und enthält idealerweise auch Rotablagerungen; Unten: die waagrechte Spritze kann bereits mit Calciumhydroxidlösung versehen sein (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

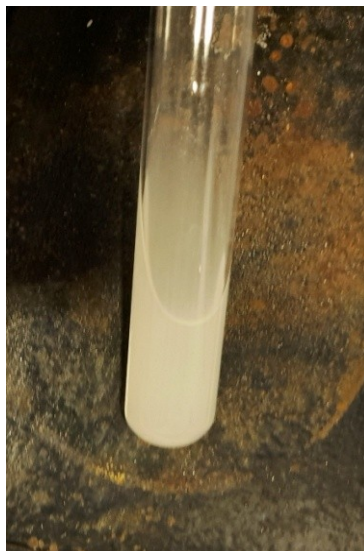


Abbildung 16: Links: Calciumhydroxidlösung; Mitte: Calciumhydroxidlösung, nachdem mittels Spritze das entstandene Gas in die das Reagenzglas eingebracht und geschwenkt worden ist; Rechts: Einwegspritze mit Calciumhydroxidlösung, die an der Apparatur angebracht worden ist und Reaktionsgas aufgenommen hat (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Vor allem bei Proben, die rote Einschlüsse beinhalten, zeigt sich in Abbildung 17, dass mittels halbquantitativer Schnelltests (Teststreifen) das Vorhandensein von Eisenionen in der Lösung gezeigt worden ist.



Abbildung 17: Links: Nach Zugabe der Salzsäure in die Probenspritze startet eine starke Reaktion unter Gasentwicklung, die Lösung erhält eine rot/graue Farbe; Mitte: Der Filtrerrückstand ist deutlich rot; Rechts: Das Testfeld des Schnelltests für Eisenionen verfärbt sich blau - näheres zu den Schnelltests findet sich im nachfolgenden Unterkapitel (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die Probenlösung selbst war grau bzw. je nach Eisengehalt rötlich gefärbt (vor allem wenn am Probenstück Rotschlamm abgelagert ist) und von feinverteilten Partikel durchzogen, weshalb nun eine Filtration der Lösung erforderlich gewesen war, um im Anschluss die Lösung auf zwei Reagenzgläser aufzuteilen. Sodann ist gleich verfahren worden, wie in voriger Abhandlung (Fällungsreaktionen, Reaktion auf Objektträger, Flammenfärbung) beschrieben - mitsamt denselben Resultaten, vgl. Abbildung 11, Abbildung 12 & Abbildung 13.

Bei der Apparatur ist es jedenfalls wichtig, dass in die mit Calciumhydroxidlösung gefüllten Gefäße keine Salzsäure gerät, weswegen nach dem Überführen der Salzsäure in das Probengefäß Rückstände aus dem Dreiwegeventil mit einer kleinen Einwegspritze entfernt werden müssen, bevor die eigentlich vorgesehene Einwegspritze in die Apparatur eingespannt wird. Die Gasentwicklung ist sehr ausgiebig - in beiden Varianten der Versuchsdurchführung ist jeweils eine deutliche Trübung der Calciumhydroxidlösung zu beobachten gewesen.

Um ein einfacheres Überführen der Probelösung aus dem Reaktionsgefäß in ein Reagenzglas zu ermöglichen, ist die Apparatur später mittels einer dritten Stativklemme befestigt worden. Dadurch ist bei der Überführung kein Auseinanderbauen der Apparatur mehr notwendig, sondern lediglich das Lockern der untersten Stativklemme, sodass die Lösung durch Betätigen des Spritzenzylinders über das Dreiwegeventil an ein daran gehaltenes Reagenzglas gedrückt werden kann.

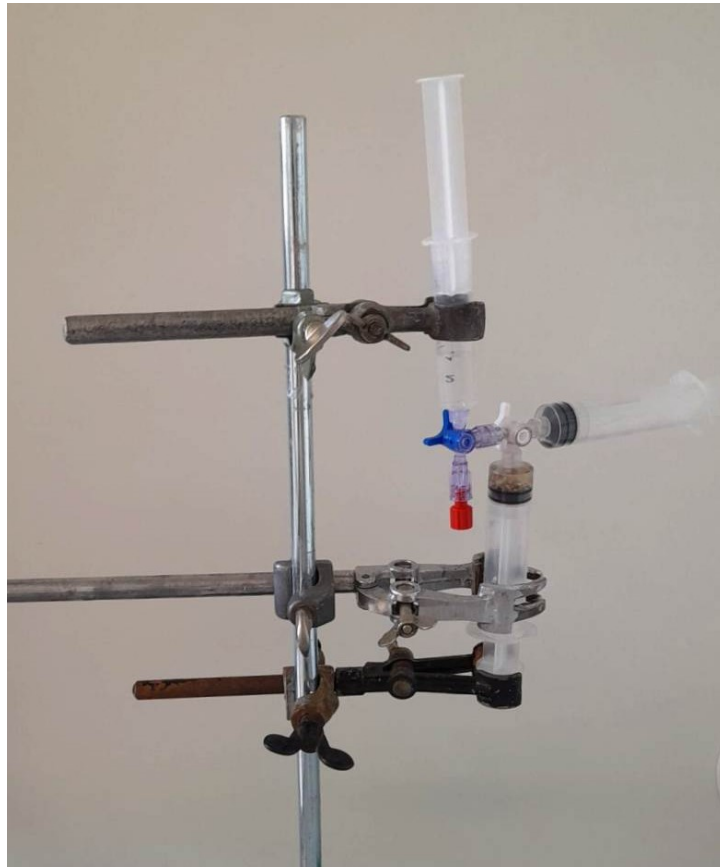


Abbildung 18: Adaptierte Apparatur mit 3. Stativklemme (eigene Aufnahme, September 2024).

3.4.2. Analyse mittels Teststreifen und weitere Nachweisreaktionen

Für die Analyse von Eisen- sowie zusätzlich auch Kupferionen mittels Teststreifen sind mehrere Gesteinsproben (Abbildung 19) direkt analysiert worden – darunter Marmor, Hallstätter Kalk, mit Rotschlamm überzogener Dachsteinkalk, Dachsteinkalk sowie zusätzlich auch Kupferschlacke und Malachit, wobei einzig erstere als auch letztere beiden Proben nicht dem Untersuchungsgebiet entstammen.

Die Analyse ist erfolgt, indem je ein Tropfen einmolare Salzsäure für eine Minute auf die Gesteinsprobe eingewirkt hat und anschließend diese Tropfen mit je einem Teststreifen „Quantofix Eisen“ untersucht worden sind. Für die zusätzliche Analyse von Kupferionen mit den Teststreifen „Quantofix Kupfer“ ist die Salzsäure zuvor mit Natriumcarbonatlösung auf

einen pH-Wert von 2-3 gepuffert worden – die Durchführung ist sodann gleich wie für die Eisenionen passiert. Abbildung 20 & Abbildung 21 zeigen die jeweiligen Resultate.



Abbildung 19: Oben von links nach rechts: Marmor – Hallstätter Kalk – Rotschlammablagerung auf Dachsteinkalk; Unten von links nach rechts: Dachsteinkalk, Kupferschlacke, Malachit (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 20: Schnelltest für Eisenionen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Aufgrund dieser Art der Versuchsdurchführung sind trotz halbquantitativer Teststäbchen jedoch primär nur qualitative Aussagen möglich, ob sich in der Probe entsprechende Ionen befinden oder nicht bzw. in Relation zwischen einzelnen Proben aufgrund der Farbintensität maximal, welche Proben ggf. deutlich höhere bzw. deutlich geringere Gehalte aufweisen.



Abbildung 21: Schnelltest für Kupferionen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Dabei hat sich gezeigt, dass in grünlichem bzw. bläulichem Malachit und in Kupferschlacke Kupferionen nachweisbar sind (Abbildung 21), währenddessen Eisenionen vor allem in Rotschlammablagerungen und rötlichem Hallstätter Kalk nachweisbar waren, in sichtlich geringeren Mengen (deutlich schwächere Färbung) auch in der Marmor- und Dachsteinkalkprobe (Abbildung 20). Die Graufärbung des Tests für Eisenionen bei der Malachit-Probe kann auf eine Störung durch Kupferionen zurückgeführt werden, welche laut Gebrauchsanleitung möglich ist.

In weiterer Folge ist auch die Untersuchung von Lösungen der Proben in Schnappdeckelgläsern mittels Teststäbchen sowie mit den Reagenzien Kaliumhexacyanoferrat(II) und Natriumcarbonatlösung erfolgt, wobei insbesondere Lösungen der Proben Rotschlamm (Abbildung 22) und Malachit (Abbildung 23) relevante Resultate gebracht hatten.

Dazu sind geringe Mengen von Rotschlamm und Malachit im Reagenzglas in 2-3 ml einmolarer Salzsäure gelöst worden, wobei sich die Proben innerhalb von 5 Minuten nicht vollständig gelöst hatten. Der Überstand wurde jeweils in ein Schnappdeckelglas dekantiert.

Im Anschluss erfolgt eine Untersuchung der Lösung „Rotschlammprobe“ mittels Teststäbchen auf Eisenionen – zusätzlich ist dieselbe Menge an Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lösung zugefügt worden. Die Probe „Malachitlösung“ ist mit einem Teststäbchen auf Kupferionen untersucht worden – zusätzlich ist im Anschluss daran dieselbe Menge an Natriumcarbonatlösung (15%) in das Probengefäß eingebracht worden.

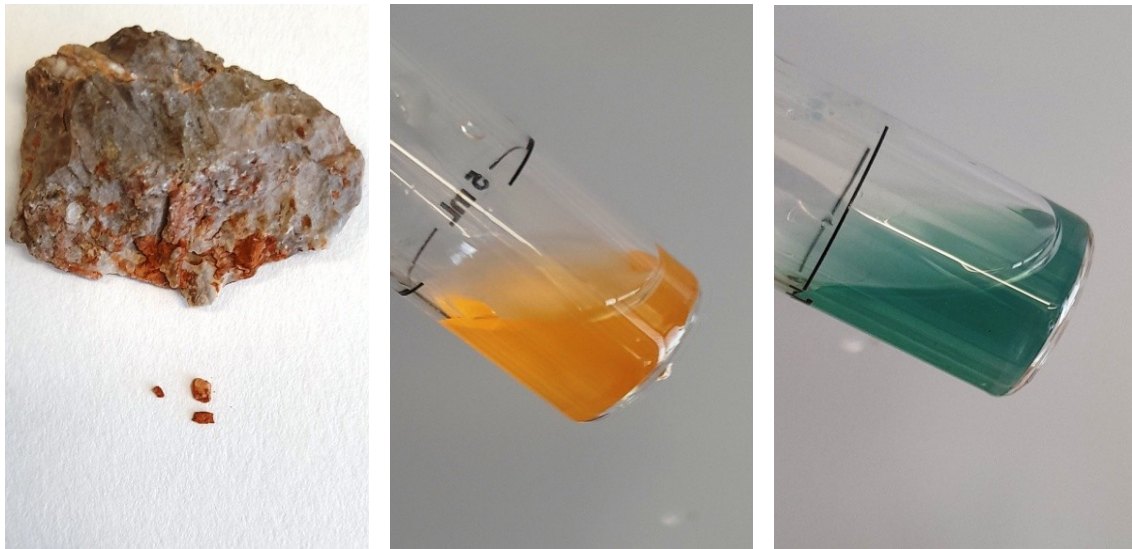


Abbildung 22: Nachweis von Eisenionen in Rotschlamm; Links: Rotschlammablagerung auf Dachsteinkalk; Mitte: Rotschlamm, gelöst in Salzsäure; Rechts: nach Zugabe von Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lösung (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 23: Nachweis von Kupferionen in Malachit; Links: Malachit; Mitte: Malachit-Lösung; Rechts: nach Zugabe von Natriumcarbonatlösung (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

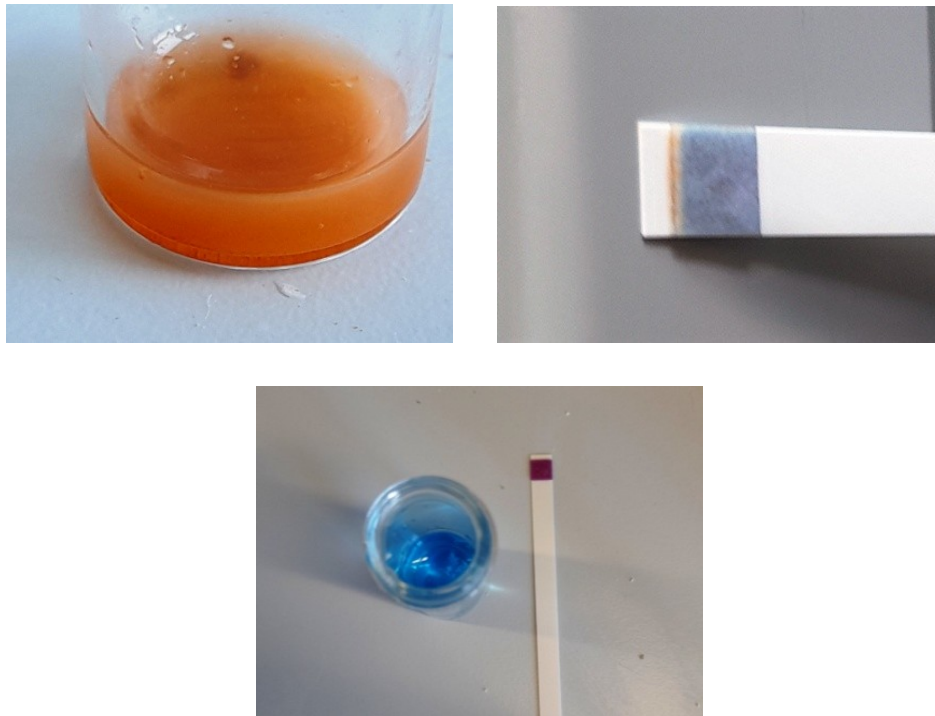


Abbildung 24: Untersuchung der Lösungen mittels Teststäbchen auf Eisen- bzw. Kupferionen; Links: Lösung von Rotschlamm in Salzsäure; Rechts: Der Eisenschnelltest färbt sich nach Untersuchung der Probelösung intensiv blau; Unten: Malachitlösung nach Zugabe von Natriumcarbonatlösung, der Kupferschnelltest färbt sich nach Untersuchung der Lösung violett (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Damit sind nun weitere Varianten gezeigt worden, um mittels der Analytik bestimmte Ionen im Gestein nachzuweisen und damit eine experimentelle Verbindung zur Geologie des Untersuchungsgebiet herzustellen – eine Gesamtübersicht über die Resultate zu den Versuchsdurchführungen mittels Schnelltests findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Gesamtresultate

Probe	Schnelltest auf Eisenionen	Schnelltest auf Kupferionen
Blindprobe (Salzsäure/gepuffert)	Negativ	Negativ
Marmor	Leicht Positiv	Negativ
Hallstätter Kalk	Positiv	Negativ
Rotschlamm	Positiv	Negativ
Dachsteinkalk	Positiv	Negativ
Kupferschlacke	Negativ	Positiv
Malachit	Nicht bestimmbar	Positiv
Rotschlamm in Salzsäure	Stark Positiv	Negativ
Dachsteinkalk in Salzsäure	Schwach Positiv	Negativ
Malachit in Salzsäure gepuffert	Nicht bestimmbar	Positiv

3.5. Diskussion

Mittels der beschriebenen Einstiegsversuche können Experimente vorgelegt werden, die eine hohe Gelingsicherheit aufweisen, um einfach Calciumionen bzw. Carbonationen in Dachsteinkalk nachzuweisen. Ersteres geschieht einerseits über zwei Fällungsreaktionen sowie über die anschließende Flammenfärbung. Über dieselben Nachweisreaktionen, aber über einen erweiterten Versuchsaufbau mittels der präsentierten Apparatur, kann neben den bereits genannten Nachweisen weiters auch das dabei entstehende Gas mittels Calciumhydroxidlösung untersucht werden sowie die Probe mittels Schnelltest zusätzlich auch auf das Vorhandensein von Eisenionen geprüft werden. Hierbei gilt, bei der Durchführung in der Praxis jedoch auf jene Sicherheitsaspekte zu achten, die dazu geeignet sind, um mit dem Risiko eines möglichen Über- bzw. Unterdruckes in der präsentierten Apparatur entsprechend umzugehen - nämlich auch in Anbetracht dessen, dass diese mit Salzsäure (einemolar) sowie ggf. auch Calciumhydroxidlösung gefüllt ist. Daher ist Arbeiten hinter der Abzugsscheibe neben der obligatorischen Schutzbrille von Vorteil.

Aus den Versuchen mittels Teststreifen andererseits, bei denen neben eisenionenhaltigem Gestein auch kupferhaltiges Gestein untersucht worden ist, ergibt sich in weiterer Folge für Lernende auch jene Erkenntnis, dass Gesteine zumeist nicht „rein“ in Form einer Verbindung vorliegen, sondern in den meisten Fällen auch Beimengungen anderer Substanzen aufweisen, durch welche die Gesteine dann spezifische Farben erhalten. Diese sind im Falle von Kupfer(II)ionen zumeist grün/bläuliche Färbungen bzw. im Falle von Eisen(III)ionen orange/rote Färbungen. Entsprechend verhält es sich auch mit Dachsteinkalk, welcher nicht zu 100% rein aus Calciumcarbonat besteht. Wichtig ist dabei jedenfalls festzustellen, dass es sich trotz der halbquantitativen Schnelltests dennoch lediglich um qualitative Aussagen handelt und aufgrund der Einsatzmethode keine Konzentrationsbereiche festgestellt werden können – je nach Intensität maximal, dass es sich in Relation zu den anderen getesteten Proben um vergleichsweise höhere oder niedrigere Gehalte handelt. Nichts destotrotz handelt es sich um eine schnelle und einfache Methode, bestimmte Ionen ggf. sogar vor Ort im Gestein zu identifizieren, die in Bezug auf die Ionen von Eisen und Kupfer um zwei nasschemische Methoden erweitert werden können. Allerdings gilt es zu erwähnen, dass die in Abbildung 22 zu erkennende Blaufärbung nach Zugabe von Kaliumhexacyanoferrat(II) auf das Vorhandensein von Eisenionen in der Lösung aus Rotschlamm zurückzuführen ist und hierbei festzuhalten ist, dass dieser Nachweis nicht in allen Fällen gelungen ist oder die Blaufärbung nur sehr schwach war bzw. als Mischfarbe ins Grüne übergegangen ist. Die intensive Rotfärbung des gelösten Gesteins ließe jedenfalls Eisenionen vermuten.

Da es sich bei Malachit um Kupfer(II)-carbonathydroxid $[\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3]$ handelt (Riedl & Janiak 2007, S. 745), sind entsprechende Schutzmaßnahmen vorzusehen, da dieser Stoff

nach Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (k.A.) sowohl bei Verschlucken als auch beim Einatmen gesundheitsschädlich ist, schwere Augenreizungen verursachen kann und giftig für Wasserorganismen ist. Hierbei ist das Tragen von Handschuhen und das Vorbereiten der Probe (Abschlagen von Brösel) durch die Lehrperson, etwa unter dem Abzug vorstellbar, um die Arbeitssicherheit der Lernenden zu gewährleisten.

Abschließend zeigt dieses Kapitel für Lernende einfach handhabbare Möglichkeiten, ausgehend von der Beobachtung in der Natur in Bezug auf die vorhandene Geologie, diese anschließend im Labor mittels chemischer Verfahren zu analysieren. Hierbei sind die präsentierten Wege bereits genau abgestimmt auf die in den Proben vorhandenen Ionen – in weiterer Folge ist es aber auch denkbar, Lernpfade zu gestalten, denen es fortgeschritteneren Lernenden ermöglicht, die qualitative Analyse quasi bei 0 zu beginnen und über Probenaufschluss und Ionentrenngänge sowie Durchführung von in Literatur beschriebenen Nachweisverfahren die Zusammensetzung selbstständig zu ermitteln, im Setting eines Gletscherlabors als Lernumgebung unter Umständen auch die Probennahme.

In Bezug auf die zu analysierenden Ionen sei angemerkt, dass für die Calcium-, Carbonat-, sowie Eisenionen bereits in Kapitel 3.2. ein Bezug zum Untersuchungsgebiet hergestellt worden ist. Die Ausdehnung der Analyse auf weitere Ionen, wie hier im Falle der Kupferionen, ist aufgrund der Tatsache erfolgt, dass sich der Nachweis mittels Teststäbchen als eine didaktisch sehr spannende Methode herausgestellt hat, dessen Potential hier bereits diskutiert worden ist und deren weitere Testung auf externe Proben abseits des Untersuchungsgebietes dadurch begründet worden ist. Abschließende Recherchen haben jedoch aufgezeigt, dass auch bei der Analytik von Kupferionen in Gesteinsproben ein Bezug zur Dachsteinregion im Nachhinein ermöglicht wird. So führt Kümel (1954, S. 36f.) in den Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteinregion fokussierend auf Erzvorkommen aus, dass zu früheren Zeiten im Bergbau Hierzeck Kupferkies und in der Grube Meisslinger Halt Kupfererze abgebaut worden sind. Daraus ist auf Vorkommen von kupferhaltigem Gestein in der Dachsteinregion zu schließen und damit auch Versuche zum Nachweis von Kupferionen didaktisch potentiell auf ausgewählte, regionale Gesteinsproben anwendbar. Ergänzend sei noch anzumerken, dass Kümel (1954, S. 36f.) weiters auch noch Erzvorkommen von Zinkspat, Bleiglanz, Schwerspat, Limonit, Arsenkies, Kieselzinkerz, Schwefelkies, Eisenspat und Kies aufzählt, die in dieser Region vorzufinden sind, wobei sich Kümel hier aber auf Ausführungen von Professor Dr. O. Friedrich aus Leoben bezogen hat.

Die Versuchsanleitungen zu den aufgearbeiteten Experimenten finden sich im Anhang, wobei die klassischen qualitativen Nachweise in Dachsteinkalk unter 1.1., eben diese mittels des dargestellten apparativen Aufbau unter 1.2., Nachweise mittels Teststreifen unter 1.3. und schließlich die weiteren nasschemischen Nachweise unter 1.4. zu finden sind.

4. Karst

Der Begriff Karst leitet sich aus dem Namen einer Region zwischen Trieste und Ljubljana ab, welche, wie ein großer Teil der ostadriatischen Küste, aus Kalkstein mit für diese Region typischen, morphologischen sowie hydrologischen Gegebenheiten gekennzeichnet ist. Schließlich hat der Begriff Karst aber zwei Bedeutungen – einerseits bezeichnet er eben auch jene zuvor genannte Region, die durch Karst gekennzeichnet ist, und andererseits liegt die Bedeutung im Prozess der Verkarstung selbst (Pulido-Bosch 2021, S. 2), die im Weiteren dieses Kapitels beschrieben werden soll. Der Fokus gilt in diesem Kapitel den Grundlagen zur Karstentstehung sowie den oberirdischen Karstformen, welche in der Dachsteinregion ein wesentliches Naturphänomen darstellen und für Lernende mittels Modellexperimente veranschaulicht werden sollen. Abgrenzen werden sich die nachfolgenden Ausführungen von den ebenso durch Verkarstung entstandenen, in der Dachsteinregion zahlreich vorkommenden Höhlen. Karst, durch die zuvor dargestellten geologischen Verhältnisse bedingt, bedingt in weiterer Folge den im nachfolgenden Kapitel dargestellten unterirdischen Abfluss, der wiederum für die Wasserqualität der Region eine Rolle spielt.

4.1. Chemische und Physiogeographische Grundlagen

Karstregionen sind solche, deren Entstehung durch Lösung, Verwitterung und Abfuhr löslicher Gesteine erfolgt (Scholz 2020, S. 392). Es handelt sich demnach um einen chemischen Verwitterungsprozess, wobei man unter Verwitterung allgemein Prozesse versteht, die zur Zerlegung von Festgesteinen bzw. grobkörnigen Materialien in Lockergestein bzw. noch feinere Materialien führen und zur Bodenbildung und -abtragung beitragen (Faust & Kleber 2020, S. 373 & 376). An dieser Stelle sei noch kurz angemerkt, dass neben der Verkarstung auch zahlreiche weitere Formen der Verwitterung – sowohl auf Basis chemischer als auch auf Basis physikalischer Prozesse - existieren.

Allgemeines und sehr charakteristisches Kennzeichen für Karstregionen ist in den meisten Fällen auch das weitestgehende Fehlen eines oberirdischen Abflusses (Pulido-Bosch 2021, S. 2), da der Abfluss größtenteils unterirdisch erfolgt (Scholz 2020, S. 392). Diesem Umstand – nämlich dem unterirdischen Abfluss - ist in weiterer Folge das Kapitel 5 gewidmet.

4.1.1. Voraussetzungen zur Entstehung von Karst

Wie zuvor bereits erwähnt worden ist, spielen bei der Verkarstung Lösungsprozesse eine bedeutende Rolle. Daher ist zur Entstehung von Karstformen das Vorhandensein löslicher Gesteine unabdingbar. Desweiteren ist es erforderlich, dass sich diese möglichst mit

geringem Rückstand lösen, damit durch Lösung entstandene Fugen nicht sogleich wieder geschlossen werden. Als verkarstungsfähig gelten einerseits Evaporite wie Gips, Anhydrit oder Steinsalz sowie Carbonatgesteine wie Kalk und Dolomit (Bögli 1978, S. 1). Weiters nennt Bögli (1978, S. 1) auch Quarzit, welcher aber nur unter „*extrem humidtropischen Bedingungen*“ verkarstungsfähig sei. Da in weiterer Folge in Bezug auf das Untersuchungsgebiet vor allem Carbonatgestein von Bedeutung ist (vgl. Kapitel 3.2.), wird im Nachfolgenden das Augenmerk auf ebendieses, insbesondere Calciumcarbonat (Kalk), gelegt.

Da das Löslichkeitsprodukt von Calciumcarbonat nur 14 mg/L beträgt (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung k.A.), ist die Löslichkeit von Calciumcarbonat in reinem Wasser sehr gering. Daher sind sehr große Zeitspannen von Nöten, um Kalk durch Wasser zu lösen. So spielt bei der Löslichkeit von Kalkstein Kohlenstoffdioxid eine wichtige Rolle. In Wasser gelöstes Kohlenstoffdioxid reagiert hierin nämlich zu Kohlensäure, welche mit Kalkstein zu wasserlöslichen Bestandteilen reagieren kann (Neukirchen 2022, S. 67f). Die genauen chemischen Sachverhalte werden in Kapitel 4.1.2 noch formell dargestellt. Das Kohlenstoffdioxid entstammt etwa aus der Atmosphäre, wo es vor allem durch Regenwasser an das Gestein gelangen kann. Aufgrund der Wurzelatmung von Pflanzen besteht in Bodennähe eine höhere Kohlenstoffdioxidkonzentration, wodurch Bodenwasser deutlich effizienter darin ist, Kalk zu lösen (Neukirchen 2022, S. 68). Bögli (1978, S. 20) nennt für Bodenluft etwa einen 10-100 fachen Kohlenstoffdioxidgehalt in Relation zur Atmosphäre. Auf heute übertragen muss hierbei jedoch beachtet werden, dass der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre aufgrund anthropogener Einträge nochmals höher liegen muss, als zu damaligen Zeitpunkten.

Weiters hält Bögli (1978, S. 21) fest, dass auch die Temperatur und der Partialdruck des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre Einfluss darauf hat, wie viel Kohlenstoffdioxid in Lösung gelangen kann. Je höher der Partialdruck und umso niedriger die Temperatur, umso mehr Kohlenstoffdioxid löst sich. Daraus lässt sich schließen, dass sich bei niedrigeren Temperaturen mehr Kohlenstoffdioxid in Wasser löst und sich entsprechend mehr Kohlensäure bilden kann, die zur Karstbildung beiträgt. Nach Pulido-Bosch (2021, S. 57f.) ist die Temperatur jedoch ein zweiseitiges Schwert – denn einerseits gilt bei Anwesenheit von Kohlenstoffdioxid der zuvor genannte Schluss, andererseits steigt die Geschwindigkeit der Gleichgewichtsreaktion des Lösungsvorganges von Kalk in reinem Wasser wiederum bei steigender Temperatur.

Neben der bis nun skizzierten Bedeutung der Kohlensäure in karstbildenden Prozessen, die sich in zahlreicher Literatur findet und deren Chemie im nachfolgenden Unterkapitel näher erläutert werden wird, finden sich nach Studium diverser Literatur auch Hinweise zum

Einfluss von Huminsäuren auf den Verkarstungsprozess. Allgemein handelt es sich bei Huminsäuren um einen Teil der organischen Bodensubstanz, welche entsteht, wenn abgestorbene Pflanzenbestandteile zersetzt werden und sich im Zuge der Humifizierung zu Huminstoffen umwandeln, zu welchen neben den Huminsäuren auch Humine oder Fulvosäuren gehören (Faust 2020, S. 483). So beschreibt etwa Pulido-Bosch (2021, S. 59), dass neben anderen aber auch organische Säuren zur Verkarstung beitragen können, wie etwa Huminsäuren. Neukirchen (2022, S. 80) macht für die besonders ausgeprägte Verkarstung in tropischen Gebieten starken Pflanzenbewuchs und speziell deren Bildung von Huminsäuren verantwortlich und schließlich findet sich auch ein Hinweis in Stüwe (2018, S. 15), dass Verkarstung unter dem Einfluss von Huminsäuren besonders effizient sei. Auch Krieg (1953, S. 78) führt an, dass mit Kohlen- und Huminsäuren versetztes Wasser zu wirksamerer Kalklösung führt. Graf (1984, S. 18) nennt in seinen Ausführungen zu Karst in den bolivianischen Anden weiters auch noch Wurzelsäuren.

4.1.2. Chemische Vorgänge bei der Entstehung von Karstformen

Nachdem vorangegangen nun die Voraussetzungen sowie auch karstfördernde Bedingungen erläutert worden sind, sollen nun konkret die chemischen Vorgänge bei der Verkarstung von Kalkgestein formell dargestellt werden.

Allgemein handelt es sich bei Kalk um ein Material mit der chemischen Formel CaCO_3 (Bögli 1978, S. 4). Die Verkarstung von Kalk erfolgt in einem System, an dem mehrere chemische sowie physikalische Prozesse beteiligt sind und aufgrund des Zusammenspiels von Wasser, Gestein und Kohlenstoffdioxid Materialien in drei Aggregatzuständen vorliegen. Dies führt zu Massetransfers an den Grenzflächen Atmosphäre/Wasser/Gestein (Bögli 1978, S. 16).

Bögli (1978, S. 16ff.) beschreibt sechs Schritte, die im Zuge der Verkarstung vonstattengehen:

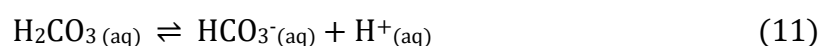
1. Interface Atmosphäre/Wasser: Kohlenstoffdioxid diffundiert ins Wasser und löst sich:



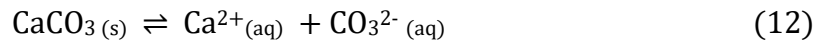
2. Das gelöste Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser zu Kohlensäure (0,75% bei 4°C):



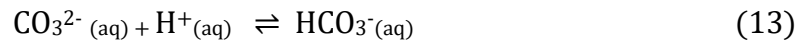
3. Kohlensäure dissoziiert – (die zweite Dissoziationsstufe könne vernachlässigt werden):



4. Interface Wasser/Kalkgestein: Ionen lösen sich aus dem Ionengitter des Kalks:

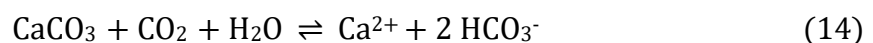


5. Das Carbonat aus (4) reagiert mit Wasserstoffionen aus (3) zu Hydrogencarbonat:



6. Durch den Schritt Nummer 5 nimmt der Gehalt an Carbonat in der Lösung am Interface Wasser/Kalkgestein ab. Um das chemische Gleichgewicht wieder herzustellen, wiederholt sich Schritt (4) und weiteres Kalkgestein geht in Lösung. Da in weiterer Folge (5) weitere Wasserstoffionen verbraucht werden, dissoziiert wiederum weitere Kohlensäure, um in Schritt (3) wiederum ein chemisches Gleichgewicht herzustellen, wodurch wiederum das Gleichgewicht in (2) gestört wird und weiteres Kohlenstoffdioxid aus der Luft ins Wasser diffundieren muss.

Dies wiederum bestätigt die Annahme aus Kapitel 4.1.1., dass für einen effizienten Verkarstungsprozess die Anwesenheit von Kohlenstoffdioxid sehr förderlich ist. In jener hier dargestellten Reaktionskaskade zeigt sich, dass Wasserstoffionen unabdingbar sind, Kalk effizient lösen zu können, die in diesem Fall aus der Kohlensäure durch in Wasser diffundiertes Kohlenstoffdioxid entstammen. Demnach sei auch an dieser Stelle auf die in 4.1.1. angeführten Hinweise verwiesen, dass ebenso Huminsäuren durch Dissoziation als Protonendonoren dienen könnten und in der Lage sein sollten, Wasserstoffionen für die effiziente Lösung von Kalk zur Verfügung zu stellen. Schlussendlich leitet Bögli (1978, S. 18) aus den vorhin von ihm erläuterten Schritten (1) – (6) eine Summengleichung für die Verkarstung ab:



4.1.3. Karstformen

Prinzipiell kann man zwischen Endokarst und Exokarst differenzieren. Währenddessen es sich beim Endokarst um unterirdischen Karst handelt (Bögli 1978, S. 74), werden oberirdische Karstformen als Exokarst bezeichnet (Bögli 1978, S. 51). Da die Bildung des erstgenannten an unterirdischen Abfluss gebunden ist (ebd.), wird auf diesen im Kapitel 5.1.2 (Zusammenhang zwischen Karst und Abflusssystemen) weiter eingegangen. Stehen oberirdische Karstformen mit unterirdischen Karstformen in genetischem Zusammenhang, so bezeichnet man dies als epigenen Karst; im Gegensatz zu dem Falle des rein unterirdisch vorkommenden, dann als hypogen bezeichneten Karsts (Spötl & Plan 2016, S. 5).

Bauer (1953, S. 53ff.) unterscheidet zwischen drei Formen des Oberflächenkarsts, nämlich den Skulpturformen, den Karren und den Hohlformen. Während Skulpturformen, wie zum Beispiel Firstrillen, lediglich die Oberfläche gegebener Gesteinsformationen beeinflussen, können Karren (Abbildung 25), (von denen wiederum unterschiedlichste Formen existieren) ganze Gesteinspakete zerlegen, indem sich fließendes Wasser entlang vorgegebener Klüfte oder rein durch Gravitation (teilweise tief) in die Kalkoberfläche einschneidet. Und schließlich die Hohlformen, wie zum Beispiel Dolinen (Abbildung 26), die durch Wasser entstehen, das in die Tiefe versinkt (ebd., S. 53, 55 & 57).



Abbildung 25: Beispiele für Karstrillen aus der Dachsteinregion (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).



Abbildung 26: Beispiele für Dolinen – diese können in verschiedener Größe und Dichte auftreten – hier zur Veranschaulichung allerdings aus der Region Hohe Veitsch (eigene Aufnahme, August 2024).

4.1.4. Glaciokarst

Landschaften, die einerseits durch Gletschererosion, und andererseits durch Karstbildung geprägt sind, werden als Glaciokarst bezeichnet (Neukirchen 2022, S. 79), die Teil dieses Unterkapitels sein sollen. Hierbei besteht eine Interaktion zwischen Gletscher und dem Karst. Beispielsweise, indem Schmelzwasser der Gletscher das Karstsystem speist (Smart 2004, zitiert nach Veress & Loczy 2019, S. 27). Weiters kann das Gletschereis zwei entgegengesetzte Wirkungen aufweisen. Einerseits kann es Kalkflächen unter Vegetations- und Schuttdecken freilegen und dadurch karstfördernd wirken, und andererseits kann es durch Ablagerung von Moränen^G Kalkflächen bedecken und dadurch karsthemmend wirken. Insbesondere auch Dolinen können von Moränenbedeckung betroffen sein (Moser 1997, S. 82). Abbildung 27 zeigt zur Verdeutlichung, dass sich in Dolinen – selbst wenn um diese herum kein Eis festzustellen ist, über längere Zeit Schnee, Firn bzw. Eis sammeln kann, wobei anzumerken ist, dass jene Abbildung lediglich zur Verdeutlichung dient und aus der Region Hohe Veitsch und nicht aus der Dachsteinregion oder von einem Gletscher stammt.

Wie einleitend bereits erwähnt, sind Karstlandschaften durch unterirdischen Abfluss geprägt. Dementsprechend finden sich in Karstmassiven kaum Täler, die durch Flüsse geformt worden sind und denen das Gletschereis abwärts folgen könnte. Dadurch bilden sich im Glaciokarst häufig Plateaugletscher mit nur kleinen Gletscherzungen (Neukirchen 2022, S. 79).



Abbildung 27: Eine mit Firn und Eis gefüllte Doline - zur Veranschaulichung aufgenommen jedoch auf der Hohen Veitsch (eigene Darstellung, August 2024).

4.2. Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes

Das Dachsteingebiet gehört mit einer verkarsteten Fläche von 423 km² zu den größten Karstmassiven Österreichs. Lediglich das Tote Gebirge (601 km²) sowie der Hochschwab (500 km²) weisen mehr verkarstete Flächen auf (Spötl & Plan 2016, S. 8). In Anbetracht dessen, dass Spötl & Plan (2016, S. 8) für das Dachsteinmassiv eine Gesamtfläche von 576 km² angeben, lässt sich schlussfolgern, dass Karst ein das Dachsteingebiet besonders prägendes Landschaftselement darstellt.

Wie aus dem Kapitel Geologie des Untersuchungsgebietes abzuleiten ist, stellt der in der Region reichlich vorhandene Dachsteinkalk die Basis für ausgeprägte Verkarstung dar, denn wie aus Kapitel 4.1.1. bereits bekannt ist, handelt es sich bei Kalk um ein stark verkarstungsfähiges Gestein. In diesem Kapitel wird nun lediglich auf oberirdische Karstformen eingegangen - auf den mit Karst verbundenen, unterirdischen Abfluss wird gesondert in Kapitel 5 eingegangen.

4.2.1 Karstformen in der Dachsteinregion

Die Karstlandschaft (Hochkarst) am Dachstein kann in zwei Stockwerke gegliedert werden. Das obere Stockwerk wird von Karren – im speziellen aus Rillenkarren und Kluftkarren, die sich zu Karrenfelder zusammenschließen - geprägt. Das untere Stockwerk wird durch Dolinen gekennzeichnet, welche bis zu 20 Meter tief sein und mit bis zu einer Dichte von 40-50 Stück pro Quadratkilometer auftreten können. Letzteres Stockwerk reicht bis auf eine Seehöhe von 1400 Metern herab, während Ersteres im Höhenbereich zwischen 1700 und 2100 Meter auftritt (Schauberger 1954, S. 65).

4.2.1.a. Karren:

Karren existieren in unterschiedlichen Formen und werden entsprechend nach ihrer jeweiligen Form benannt (Bögli 1978, S. 51). Am Dachstein treten vor allem Rillenkarren sowie Kluftkarren auf. Bauer (1953, S. 56) beschreibt weiters auch das Vorkommen von Mäanderkarren. Unter Vegetationsbedeckung existieren am Dachstein auch Rundkarren, Karrenbecken und Trittkarren (Behm et al. 2016, S. 572f.). Deren allgemeine Entstehung wird in Kapitel 4.3.1. näher beschrieben.

4.2.1.b. Dolinen:

Dolinen sind wannen-, schüssel- oder trichterförmige Karsthohlformen im Boden und sind eine besonders häufige Form der Verkarstung, wobei entwicklungsbedingt zwischen Lösungs- und Einsturzdoline unterschieden werden kann (Plan 2016, S. 26f.). Deren Entstehung wird in Kapitel 4.3.2. näher beschrieben und treten am Dachstein insbesondere auf einer Höhe von 1400-1700m auf (Schauberger 1954, S. 65).

4.2.2. Einfluss des Gletschers

Wie bereits in Kapitel 4.1.4. einführend erläutert, können zwischen Gletschern und Karstflächen Wechselwirkungen bestehen, was dann als Glaciokarst bzw. Karstgletscher bezeichnet wird – so auch am Dachstein.

Beispielsweise führt einerseits die Bedeckung von Dolinen durch (glaziales) Moränenmaterial auch am Dachstein zu „*Quell- und Kulturböden inmitten einer toten Landschaft*“ (Moser 1997, S. 85), was zur Existenz einiger fruchtbarer Almen in der Dachsteinregion führt, welche sich von der diesen Almen umgebenden Karstlandschaft deutlich hervorheben (ebd., S. 82). Über Vorkommen und Bedeutung dieser Almen in der Dachsteinregion findet sich zahlreiche Literatur – deren weitere Behandlung im Zuge dieser Arbeit würde Umfang wie auch Ziele dieser Arbeit jedoch bei weitem übertreffen.

Andererseits können Gletscher, wie zum Beispiel nach dem letzten großen Eisvorstoß vor 12 900 bis 11 700 Jahren eine starke erodierende Wirkung haben, sodass sich die Karstlandschaft am Dachstein erst nach deren Abschmelzen wieder bilden konnte. Dabei stellen insbesondere nun die Karren „*nacheiszeitliche Lösungsformen*“ dar (Behm et al. 2016, S. 572).

Angemerkt sei noch, dass bereits Friedrich Simony die Dachsteingletscher schon als Plateaugletscher klassifizieren konnte (Kretschmer 2004, S. 54).

4.3. Fachliche Klärung für ein Modellexperiment

Friedrich Simony hat sich seinerzeit auch der Verkarstung gewidmet und Schmelzwässer einstiger Gletscher für die Entstehung der Karren verantwortlich gemacht. Die Bedeutung von Säuren bei der Karstbildung ist ihm jedoch noch nicht bekannt gewesen (Grims 1996, S. 59). Gerade dieser Sachverhalt – nämlich nicht um die Bedeutung der Säure wissend - lassen nachfolgende Worte umso erstaunlicher anmuten, mit denen Friedrich Simony seine Beschreibungen jener Oberflächenformen metaphorisch dargestellt hat: „*Die Oberfläche*

alles Gesteins ist rauh [sic!] und ausgefressen, als wäre einst Säure darauf herabgeregnet“ (Simony 1847, zitiert nach Grims 1996, S. 59).

In Bezug auf Karst im Dachsteingebiet sei auch auf die Dissertation von Walter Krieg an der Universität Graz aus dem Jahre 1953 mit dem Titel „Geomorphologische Beobachtungen. Die Verkarstung des östlichen Dachsteinstockes und ein Beitrag zum Problem der Buckelwiesen“ verwiesen.

Nachfolgend soll kurz die Entstehung von Karren und Dolinen beschrieben werden, um daraus nachfolgend Möglichkeiten für Modellexperimente abzuleiten.

4.3.1. Entstehung von Karren

Die Formgebung der Karren wird insbesondere durch Lösungsvorgänge und Abflussweise geprägt (Bögli 1978, S. 51). Der Chemismus hinter dem Lösungsvorgang von Karsterscheinung allgemein ist bereits in Kapitel 4.1.2. erläutert worden. Bögli (1878, S. 54) unterscheidet drei Formen der Abflussweise – nämlich einerseits der freie Abfluss über nackte Kalkflächen sowie andererseits der Abfluss unter geschlossene Bodendecken. Als Zwischenform wird noch ein Abfluss bei lückenhafter Bodenbedeckung genannt.

4.3.2. Entstehung von Dolinen

Wie in Kapitel 4.2.1.b. bereits erwähnt worden ist, kann bei der Entstehung von Dolinen zwischen Lösungsdolinen und Einsturzdolinen unterschieden werden. Lösungsdolinen entstehen, indem unter einer Bodendecke Kalk gelöst wird und dadurch eine Fugenerweiterung stattfindet. Diese Vertiefung entwickelt sich kontinuierlich weiter, sodass sich über die Zeit durch Nachsinken von Schutt und Bodenbildung bzw. Wegspülen von Feinmaterial Trichterformen bilden können (Bögli 1978, S. 62). Einsturzdolinen wiederum entstehen durch oberflächennahen Einsturz einer Höhlendecke (ebd.).

Die Recherchen haben gezeigt, dass bis dato wenig Literatur über Schüler*innenvorstellungen existiert, die sich mit Vorstellungen zu Karst beschäftigen. Eine Veröffentlichung von Ritter & Reinfried (2008, S. 14-19) beschäftigt sich jedoch mit Schüler*innenvorstellungen zu Dolinen. Diese Vorstellungen beziehen sich in dieser Arbeit auf eine Grundschulklasse in der Schwäbischen Alb, einer stark verkarsteten Region mit Dolinen als Leitform, wo Dolinen in der Vergangenheit auch häufig als geeignete Löcher in der Landschaft zur Nutzung für Mülldeponien angesehen worden seien. Aufgrund der befragten Altersstufe hat man in keinem der Fälle als Antwort die kohlensäurebedingte

Lösungsverwitterung erhalten – die Erkläransätze haben sich dafür z.B. auf steinzeitliche Mammutfallen, Bombentrichter oder ausgetrocknete Seen bezogen (ebd., S. 15).

Als experimentellen Zugang haben Ritter & Reinfried (2008, S. 18f.) einen Versuch beschrieben, bei dem die Lernenden beobachten sollen was passiert, wenn jeweils eine Kalksteinprobe in destilliertes Wasser, Regenwasser bzw. Essigessenz eingelegt wird. Dies soll den Lernenden die Bedeutung der Säure im Verkarstungsprozess darlegen.

Auf die Chemie der Karstbildung wurde bereits in 4.1.2. eingegangen, wonach also Lösungsprozesse für die Karstbildung verantwortlich seien. Daher soll, bevor die Modellierung der beiden zuvor benannten Karstformen mittels später dargestellten Modellen besprochen wird, experimentell auf die Löslichkeit von Kalkgestein eingegangen werden – konkret auf die unterschiedliche Löslichkeit von Kalkgestein unter verschiedenen Bedingungen. Dies soll geschehen, indem Kalkproben eben unter verschiedenen, definierten Bedingungen gelöst werden und dabei die unterschiedliche Löslichkeit unter Zuhilfenahme der Gesamthärte-Schnelltests von Visocolor School indirekt ermittelt wird. Bei diesem handelt es sich um eine komplexometrische Titration, bei welcher die Calciumionen mittels EDTA als Chelatkomplexe gebunden werden. Sobald die vorliegenden Calciumionen vollständig in Form von Komplexen vorliegen, tritt eine Umfärbung eines vorab zugegebenen Metallindikators ein (Machery-Nagel GmbH & Co. KG k.A. S. 10ff.). Nach Machery-Nagel GmbH & Co. KG k.A., (S. 10) läuft die Komplexbildung nach folgendem Schema ab:



Zuvor dargestellte Ausführungen gelten entsprechend nach Machery-Nagel GmbH & Co. KG k.A. ebenso für die in der Gesamthärte auch relevanten Magnesiumionen, weshalb ebendort allgemein von M bzw. M^{2+} die Rede ist. Da allerdings für vorliegende Abhandlung lediglich Calciumionen von Bedeutung sind, ist Reaktionsgleichung (15) auf ebendiese konkretisiert worden. Die Struktur von EDTA sowie des EDTA-Komplexes findet sich in Abbildung 28, wobei EDTA nach Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung k.A. abgekürzt für **E**thylen**d**iamin**t**etra**e**ssigsäure steht. Für die Bestimmung kommt, wie weiters auch aus voriger Reaktionsgleichung hervorgeht und im Sicherheitsdatenblatt angeführt wird, deren Natriumsalz zum Einsatz. Dieses ist in Abbildung 29 dargestellt. Um welchen Metallindikator es sich bei der genutzten Bestimmung konkret handelt, geht jedoch weder aus der Gebrauchsanleitung noch aus dem Sicherheitsdatenblatt hervor. Aufgrund dessen wird es in der experimentellen Ausführung auch notwendig sein, Blindproben der entsprechenden

Lösungsmedien zu untersuchen, inwiefern deren Säuregehalte Auswirkungen auf den Indikator haben, um nötigenfalls die Lösungen vor der Bestimmung zu puffern.

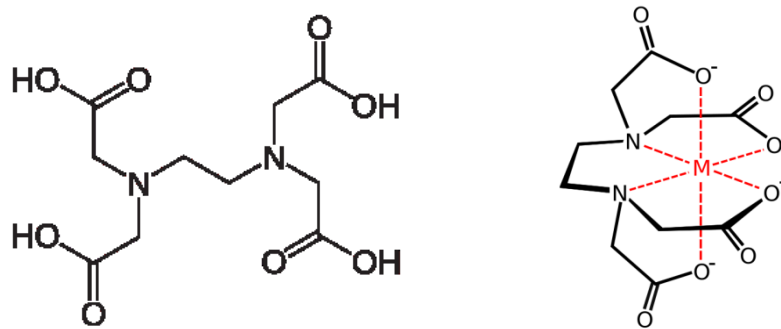


Abbildung 28: Strukturen EDTA (links) & Metall-EDTA Komplex (rechts) (wikimedia 2024a & wikimedia 2024b).

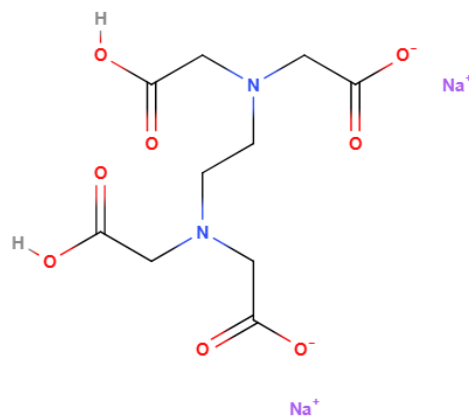


Abbildung 29: EDTA-Dinatrium-Salz (Molview 2024).

Die Durchführung des Tests an sich ist entsprechend der Ausführungen in Machery-Nagel GmbH & Co. KG k.A erfolgt.

Daraus ergibt sich die Möglichkeit indirekt festzustellen, unter welchen Lösungsbedingungen sich mehr oder weniger Kalk löst - je härter das Wasser bei der Messung, umso mehr Calciumionen sind zuvor in Lösung übergegangen - umso eher eignet sich das gegebene Lösungsmedium, Lösungsprozesse in Kalkgestein zu initiieren und damit ggf. einen Beitrag zur Karstbildung zu leisten.

4.4. Aufbereitung für ein Modellexperiment

Auf Basis voriger Erläuterungen sei es sich nachfolgend zum Ziel gesetzt, modellhaft zu zeigen, inwiefern sich Kalkgestein unter verschiedenen Bedingungen lösen lässt und mittels

Modellexperiment chemische Initiatoren der Karstbildung zu benennen und schließlich experimentell zu modellieren, wie Karstrillen bzw. Dolinen entstehen.

4.4.1. Lösungsversuche von Kalk

Für die Lösungsversuche sind eingangs als Kalkproben einerseits Calciumcarbonat in Pulverform sowie andererseits Marmorstücke (d 1-2 cm) eingesetzt worden wobei, abgeleitet aus den vorangegangenen Theoriekapitel, nachfolgend aufgezählte Lösungsmedien zum Einsatz gekommen sind. Nämlich destilliertes Wasser, Kohlensäure (Einleitung des Inhaltes einer iSi-Kapsel in 25ml dest. Wasser), Huminsäure-Aufschlammung (vgl. Abbildung 37), Mischung aus Huminsäure-Aufschlammung und Kohlensäure (1:1) und einmolare Salzsäure. Die genannten Medien sind weiters unter unterschiedlichen Temperaturbedingungen getestet worden, nämlich bei Raumtemperatur sowie bei ca. 10°C und ca. 60°C. Die eingesetzte Probenmenge lässt sich gut aus Abbildung 30 erschließen.

Die Einwaage beträgt dabei 1 Gramm beim Pulver (+/- 0,1 g) sowie 1,5 Gramm (+/-0,4 g) bei den Gesteinsproben. Von den Lösungsmedien ist jeweils 3cm hoch in die Reagenzgläser mit den Proben überführt worden. Nach 30 Minuten Einwirkzeit sind die Lösungen in Erlenmeyerkolben filtriert worden, wobei die Filtrate in den ersten Versuchsdurchgängen noch mit 500 ml dest. Wasser verdünnt worden sind – spätere Versuche haben gezeigt, dass auch 100 ml genügen (Ausnahme Salzsäure, diese Probe war bei Verdünnung auf 100 ml zu sauer). Versuche mit Verdünnungen auf 10 ml sind verworfen worden, da sich diese allgemein als zu sauer für die weiteren Untersuchungen herausgestellt haben.

Von den verdünnten Filtraten wurden je 5 ml in ein Wasserprobengefäß aus dem Visocolor School Analysekit überführt. Alle Proben sind sodann entsprechend der Anleitung dem Wasserhärte-Test unterzogen worden und mit zwei Tropfen GH-1 versehen worden. Im Anschluss daran ist langsames Zutropfen von GH-2 erfolgt, wobei die Anzahl der verbrauchten Tropfen den deutschen Härtegraden entsprechen würden, im Umkehrschluss also ein höherer Verbrauch an GH-2 eine größere Menge an gelösten Calciumionen entspräche und somit ein besseres Lösungsvermögen in Bezug auf das Lösungsmedium für das Kalkgestein bedeutet.

Abbildung 31 & Abbildung 32 zeigen die Marmor-Proben in den unterschiedlichen Lösungsmedien, wobei die Reaktion unter Salzsäureeinwirkung am stärksten ist – die Bildung von Gasbläschen allerdings auch unter der Kohlensäureeinwirkung – und hier vor allem in gekühlter Umgebung – bereits mit freiem Auge zu erkennen ist.

Die Filtration hat klare Filtrate hervorgebracht – einzig jenes Filtrat mit der Huminsäure-Aufschlammung zeigt noch eine leicht dunkle Trübung, die nach dem Verdünnen verblasst. Nach Zugabe von GH-1 stellt sich eine rote Färbung ein (Abbildung 33), die jedoch bei der Probe mit reinem Wasser schon fast in Richtung Grün übergeht.



Abbildung 30: Kalk bzw. Calciumcarbonat in Form von Pulver (links) sowie in Form von Marmor (rechts) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 31: Lösungsversuche von Marmor in verschiedenen Medien von links nach rechts: destilliertes Wasser - Kohlensäure warm (ca. 25°C) - Kohlensäure kalt (ca. 10°C) – Huminsäure - Salzsäure (einmolar) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 32: Gut zu erkennen ist die unterschiedlich starke Gasentwicklung je nach Lösungsumgebung – am stärksten ist diese in der Salzsäure rechts unten, ebenso noch deutlich zu erkennen in kalter Kohlensäure in der Mitte (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

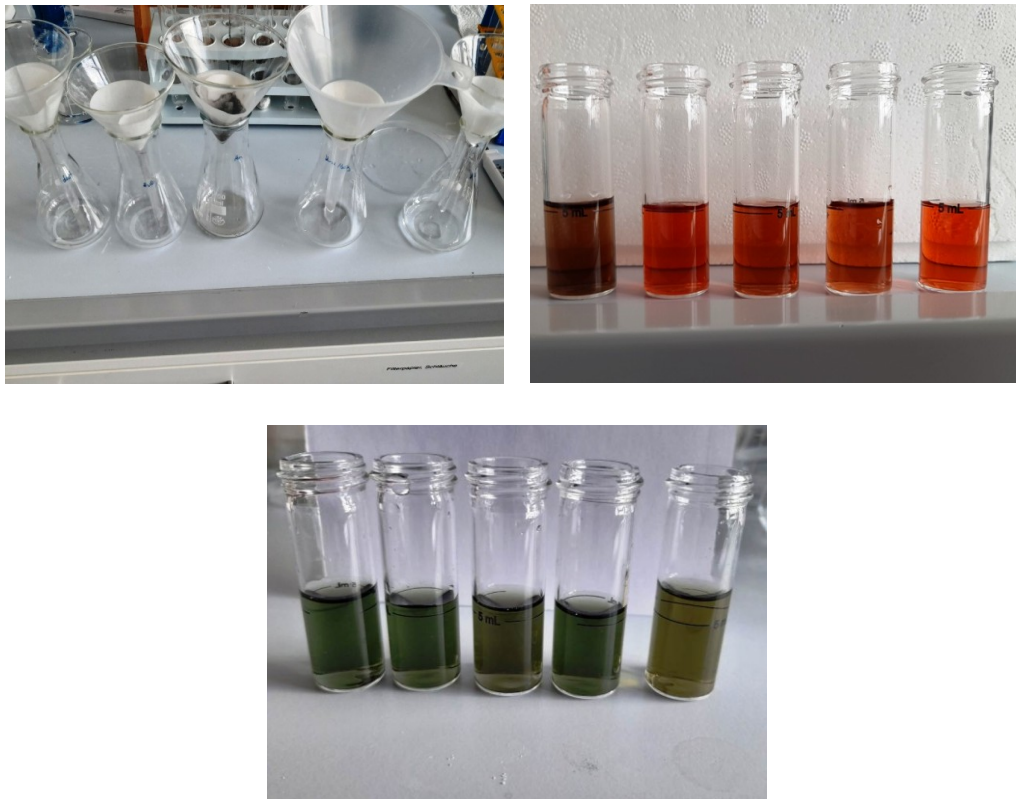


Abbildung 33: Links oben: Alle Lösungen werden filtriert und anschließend auf 100ml mit destilliertem Wasser verdünnt, wobei die in Salzsäure gelöste Probe auf 500 ml verdünnt wird; Recht oben: je 5 ml der Probelösungen versetzt mit je 2 Tropfen GH-1; Unten: Probelösungen nach Versetzen mit GH-2 (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024/September 2024).

Nach Zufügen einer entsprechenden Menge von GH-2 hat sich die Lösung grün verfärbt (Abbildung 33), sobald die gesamten Calciumionen komplexometrisch gebunden sind. Je größer die vorhandene Menge an gelösten Calciumionen, umso größer der Verbrauch an GH-2. Bei den Proben mit Kalk in Form von pulverigem Calciumcarbonat war festzustellen gewesen, dass durch die Filtration das Pulver nicht vollständig im Filter verblieb sondern Teile davon auch in die Filtrate gelangt sind.

Da, wie zu einem späteren Zeitpunkt noch zu präsentieren sein wird, mit den Marmorproben akzeptable Resultate erzielt worden sind, ist aus zuvor genanntem Grund von der Untersuchung der Calciumcarbonatproben im Pulverform Abstand genommen worden, da die Menge an mitgeschlepptem Pulver ins Filtrat nicht abschätzbar ist und damit unter Umständen nachteilige Auswirkungen auf die weitere Untersuchung möglich wären. Daher ist auch darauf verzichtet worden, das Vorgehen beispielsweise mittels feinporigeren Filtern oder durch Zentrifugieren zu optimieren, da im Vergleich Pulver – Marmor anzunehmender Weise lediglich zu zeigen wäre, dass bei Lösungsversuchen von Kalk in Pulverform aufgrund der größeren Oberfläche mehr Calciumionen in Lösung gingen als in Form des modellhaft verwendeten Marmorsteins. Zwar auch eine didaktisch nutzbare Erkenntnis – diese würde im

Kontext der im Zuge dieser Masterarbeit zu bearbeitenden Forschungsfragen aber keinen Mehrwert bringen.

Von den bereits in Vorversuchen zahlreich getesteten und an dieser Stelle nicht vollständig visualisierten Proben bzw. Bedingungen, eignen sich schlussendlich jene fünf Proben dazu, einen Trend zum unterschiedlichen Lösungsverhalten von Kalkgestein mittels eines Modellexperimentes darzustellen, wie eben zuvor dargestellt worden ist. Diese Proben bzw. deren Lösungsmedien sind destilliertes Wasser, Kohlensäure, Kohlensäure kalt, Huminsäure sowie Salzsäure – der durchschnittliche Verbrauch an GH-2 ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Verbrauch GH-2 (eigene Darstellung, 2024)

Lösungsumgebung	Verbrauch GH-2 in Tropfen
Destilliertes Wasser	0,5-1
Kohlensäure (~25°C)	1-2
Kohlensäure (~10-12°C)	2-2,5
Huminsäure-Aufschlammung	1-2
Salzsäure (1mol/L)	20-30

Abschließend ist auch die Untersuchung der reinen Lösungsmedien mittels GH-1 erfolgt, wobei hier festzustellen gewesen ist, dass auch in Abwesenheit von Calciumionen im sauren Milieu eine Rotfärbung erfolgt ist, was im Falle der Kohlensäure, Huminsäure (filtriert) sowie der Salzsäure zugetroffen hat. Diese Blindprobenuntersuchung ist allerdings ohne Verdünnung erfolgt – im anschließenden Blindprobenversuch bei Verdünnungen, die den Verdünnungen nach dem Lösungsvorgang bei Zugabe von GH-1 im Modellexperiment entsprechen, ist keine Rotfärbung mehr zu beobachten gekonnt worden, womit argumentiert werden kann, dass die Rotfärbung im Modellexperiment auch tatsächlich auf die Anwesenheit von Calciumionen zurückzuführen ist und nicht auf ein zu saures Milieu. Zumal die Zugabe von GH-2 im Modellexperiment auch tatsächlich zu einer Grünfärbung geführt hat im Gegensatz zu dem Fall, wenn die Rotfärbung nach Zugabe von GH-1 säurebedingt zu erklären gewesen war. Um eine säurebedingte Rotfärbung des Indikators zu verhindern, ist demnach die dargelegte, starke Verdünnung der Proben zur Durchführung zwingend erforderlich.

In Bezug auf die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse lassen sich nun jene Aspekte mittels des Modellexperiments ableiten, die zuvor theoretisch in Bezug auf Lösungsprozesse in der Karstbildung erläutert worden sind. So geht aufgrund des geringen Löslichkeitsproduktes von Calciumcarbonat in Wasser in diesem nur eine sehr geringe Menge an Calciumionen in

Lösung, was sich auf Basis des sehr niedrigen Verbrauchs an GH-2 zeigen lässt bzw. dass die Probe nach Zugabe von GH-1 farblich bereits ins grüne schwankt. Dahingegen zeigt der hohe Verbrauch an GH-2 bei jener Probe aus dem vormals salzsauren Milieu, dass unter Säureeinwirkung Calciumcarbonat besonders gut löslich ist, wozu in vorangegangener Theorie auch bereits die entsprechenden Reaktionsgleichungen dargestellt worden sind. Entsprechend finden sich auch in den Proben aus der Kohlensäure sowie Huminsäure – die dem natürlichen Milieu entsprechender sind - Calciumionen, wenn auch nur deutlich weniger. Das zeigt wiederum, dass der Prozess der Verkarstung ein besonders langsamer ist. Weiters kann gezeigt werden, dass aufgrund des höheren Verbrauchs an GH-2 im Falle der Probe „Kohlensäure kalt“, Verkarstungsprozesse in kühleren Regionen beschleunigt ablaufen können, da sich Kohlenstoffdioxid in kaltem Wasser besser löst und daher mehr Kohlensäure für den Verkarstungsprozess verfügbar ist.

4.4.2. Versuche zur Modellierung von Karstrillen

Erste Ideen zur Modellierung von Karstrillen sind darin bestanden, den Einfluss von Säure auf möglichst glatt polierten Kalkstein sichtbar zu machen. Dies hat sich schließlich darin vertieft, Marmorplatten, die als Untersetzer vermarktet werden, für diese Versuche zu nutzen, da diese eine besonders glatte und einwandfreie Oberfläche aufweisen (Abbildung 34). Als Modellsäure ist Salzsäure eingesetzt worden. Dabei wird folgende Reaktion nach Riedl & Janiak (2007, S. 528, adaptiert) erwartet, bei welcher sich Kalk löst und entsprechende Lösungsformen zurück gelassen werden:

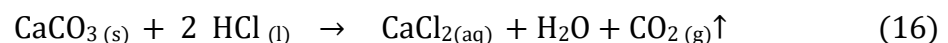


Abbildung 34: Marmorplatte zur Modellierung der Karstrillen-Genese (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Versuche, bei denen Säure auf möglichst glatte Dachsteinkalk-Proben aus dem Untersuchungsgebiet aufgetragen worden ist, haben zwar auch eine deutliche Reaktion - allerdings auf der Gesteinsoberfläche bei weitem nicht jene Reaktionsrückstände und Auswirkungen durch die Säure gezeigt, wie es bei der glatt polierten Marmorplatte der Fall gewesen ist. Dass Säure mit Calciumcarbonat reagiert, zeigt sich ganz deutlich bei der Bildung von Gasbläschen (Abbildung 35), bei denen es sich um Kohlenstoffdioxid handeln muss.



Abbildung 35: Gasentwicklung nach Zugabe einmolarer Salzsäure – Säure reagiert mit Calciumcarbonat unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Das ist in Form der Gasbläschen erkennbar (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Nach Entfernen des Säuretropfens hat sich deutlich gezeigt, dass Säure in der Lage dazu ist, die Oberfläche zu verändern (Abbildung 36). Im Gegensatz zur Fläche, die keinen Säurekontakt aufgewiesen hatte, sind an jener Stelle, auf welche zuvor die Säure tropfenartig eingewirkt hatte, Beschädigungen an der ansonsten glatt polierten Marmoroberfläche festzustellen gewesen.

Bei Salzsäure handelt es sich allerdings um eine starke Säure, in einem weiteren Schritt ist nun auch der Versuch unternommen worden, ob Reaktionsrückstände solchen Ausmaßes auch mit Säuren gezeigt werden können, die in Karstregionen für gewöhnlich auftreten. Dazu ist einerseits eine Huminsäure-Aufschlammung zubereitet worden (Abbildung 37) sowie eine kohlensäurehaltige Lösung. Zur Herstellung letzterer ist der Inhalt einer iSi-Kapsel vollständig in 25ml destilliertem Wasser eingeleitet worden.

Hierbei ist jedoch für beide Säuren festgestellt worden, dass beim Einwirken solcher kleinen Mengen in dieser kurzen Zeitspanne keine derartigen Reaktionsrückstände zu beobachten waren, wie es im Falle der Salzsäure gewesen war. Bei der Kohlensäure war es zumindest möglich, einzelne Gasbläschen beobachten zu können und damit zumindest eine Reaktion zwischen Kohlensäure und Marmoroberfläche festzustellen.



Abbildung 36: Nach Entfernen des Salzsäuretröpfchens ist eine „Beschädigung“ der vormals glatten Marmoroberfläche zu erkennen – wenn man sich nun kein punktuell Einwirken, sondern lineares Abfließen säurehaltiger Medien entlang von Gesteinspaketen aus Calciumcarbonat über einen längeren Zeitraum in Überlegung ruft, lässt sich daraus schließlich auch die Entstehung von Karstrillen imaginieren (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

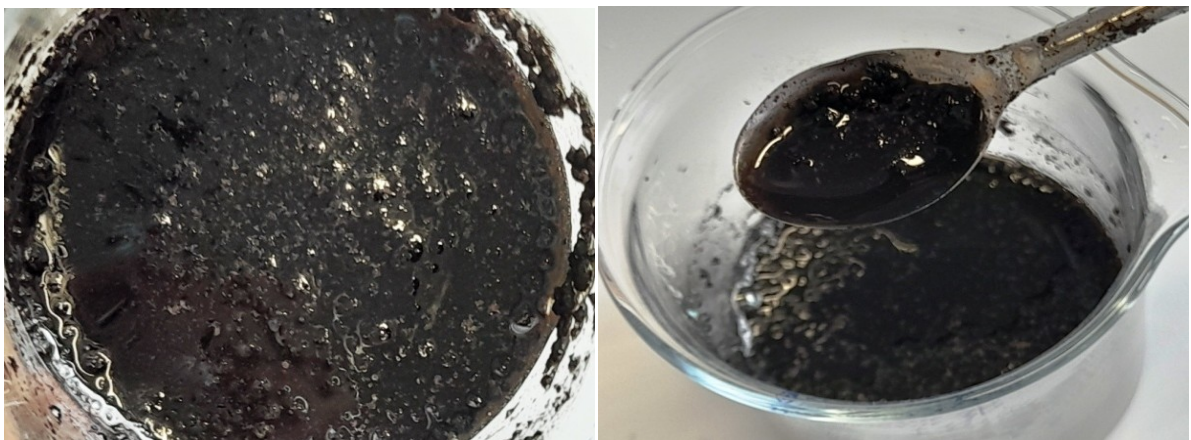


Abbildung 37: Herstellung einer huminsäurehaltigen Aufschlämmung – 3,5 g Huminsäure auf 100ml Wasser – die Zubereitung erfolgt mittels Magnetrührer (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Bisher ist lediglich gezeigt worden, dass die Säure punktuell Einfluss auf die Marmoroberfläche hat. In weiterer Folge soll aber auch gezeigt werden können, dass ein abfließendes, saures Medium eben auch jenen Einfluss auf den Stein ausüben kann, welcher zur Bildung der linienhaften Karstrillen beiträgt. Dazu ist die Marmorplatte zunächst in Schräglage am Stativ befestigt worden (Abbildung 38), um danach die einmolare Salzsäure am oberen Ende der Platte mittels Pipette aufzutragen. Getrieben durch die Schwerkraft konnte ein linearer Abfluss der Salzsäure beobachtet werden. Allerdings war die

Kontaktzeit zu kurz, als dass wie beim punktuellen Auftrag Reaktionen bzw. Veränderungen an der Oberfläche mit freiem Auge zu beobachten waren. Offen bleibt, inwieweit eine höher konzentrierte Säure Auswirkungen, nämlich in kurzer Versuchszeit, gezeigt hätte oder welche Konstruktionen ein längeres Einwirken der Säure vielleicht ermöglicht hätten.

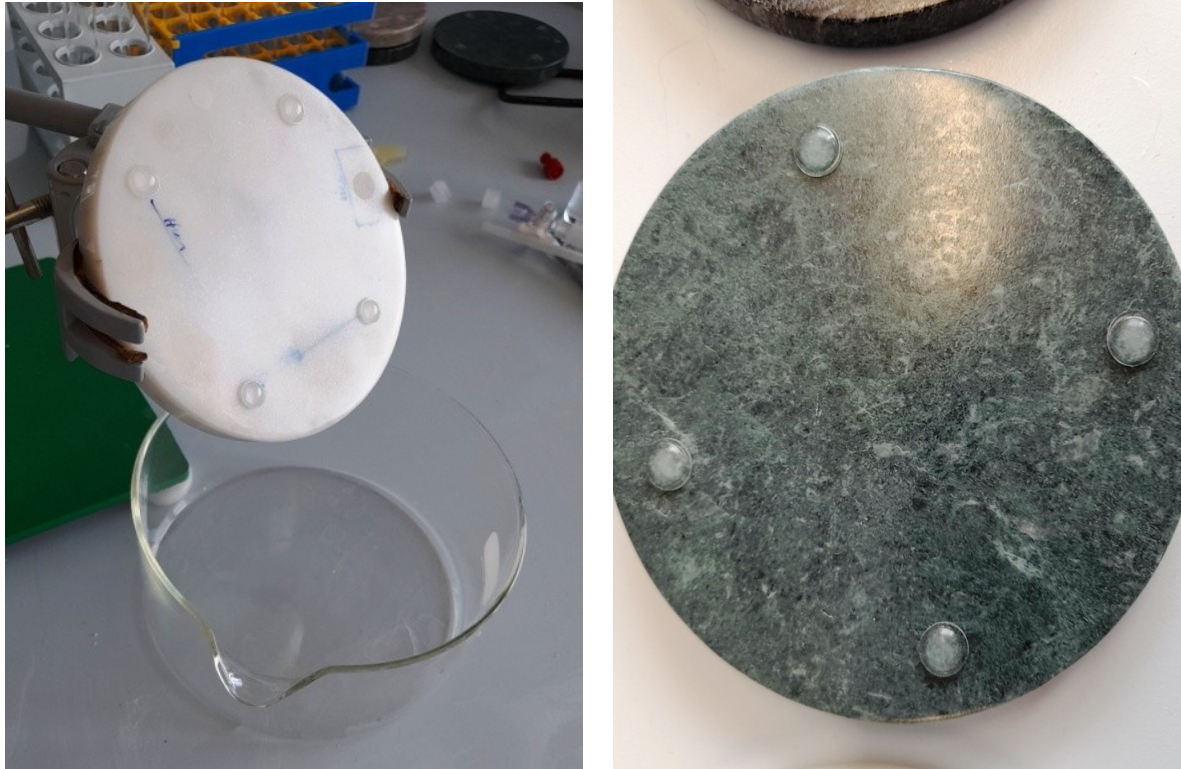


Abbildung 38: Links: Einspannen mittels Stativklemme ermöglicht zwar lineares Abfließen, allerdings ist die Einwirkzeit in Bezug auf das Modellexperiment zu kurz, um sichtbare Resultate zu erhalten; Rechts: Weitere Marmorprobe gefärbt (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Um die Kontaktzeit zwischen linienhafter Einwirkung der Säure auf die Gesteinsoberfläche zu erhöhen, ist die Neigung auf null gestellt und damit der Abfluss aus dem Modell weggelassen worden. Dazu ist eine weitere Marmorplatte in grünem Farbton ausgewählt worden (Abbildung 38), wobei die Reaktion der linienhaft aufgetragenen Säure auf die Platte in Abbildung 39 deutlich zu sehen ist, ebenso die linienhaften Rückstände an der Oberfläche nach dem Entfernen der Säure, die bei längerer Einwirkung nun sehr wohl eine Modellierung der Karstrillengenese visualisieren ließe.



Abbildung 39: Linearer Auftrag von Salzsäure auf die Marmorprobe; Links: ganz deutlich zu sehen die Entwicklung von Gasbläschen durch Reaktion der Säure mit dem Calciumcarbonat; Rechts: lineare Lösungsrückstände nach Entfernung der Säure ermöglichen ein Verständnis zur Genese von Karstrillen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die Reaktion selbst sowie der Unterschied zwischen den Bereichen mit und ohne Säureeinwirkung lassen sich besonders gut unter der Lupe, wie in Abbildung 40, betrachten.

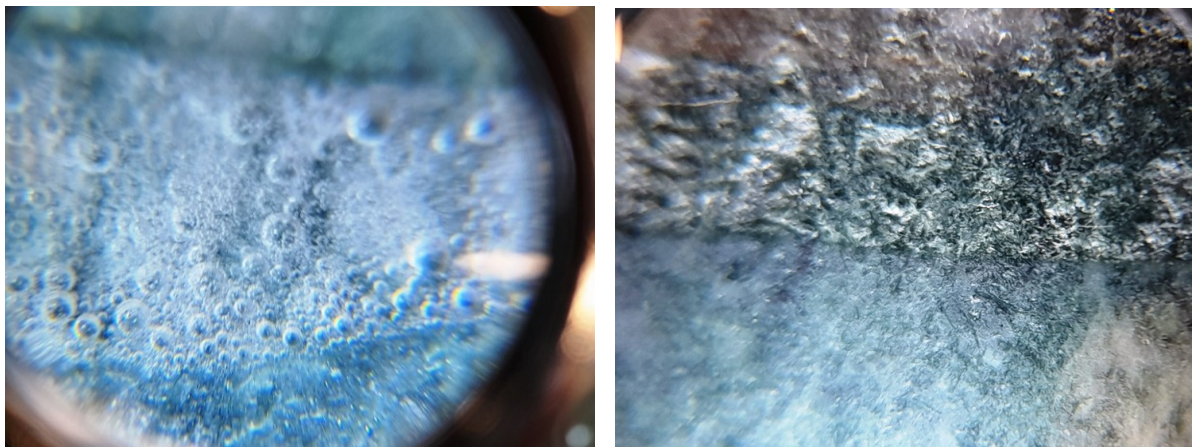


Abbildung 40: Abbildung 39 unter der Lupe; Links Gasentwicklung; Rechts scharfe Abgrenzung zwischen den Bereichen mit/ohne Säureeinwirkung – oberer Bereich mit vorangegangener Säureeinwirkung (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

4.4.3. Versuche zur Modellierung von Dolinen

Dieses Unterkapitel widmet sich den Versuchen zur Modellierung von Dolinen, und zwar im Speziellen von Lösungsdolinen in Karstgebieten. Als Untergrundmodell ist dafür eine Teelichtschale mit stecknadelgroßem Loch im Boden genutzt worden, welche mit Calciumcarbonat (Pulver) gefüllt war. Dieses ist mittels Löffelspatel fein gepresst bzw. verdichtet worden. Um zu zeigen, dass es sich tatsächlich um einen Lösungsprozess handelt

und nicht nur um eine mechanische Verfrachtung von Material, ist die Versuchsdurchführung ebenso mit einem mit Sand gefüllten Teelichtgefäß erfolgt (Abbildung 41).



Abbildung 41: Teelichtschale mit dicht gepressten Kalk in Pulverform links bzw. rechts Sand als Grundlage zur Modellierung der Genese von Lösungsdolinen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die beiden Teelichtgefäße sind zur weiteren Versuchsdurchführung jeweils mit einer Stativklemme an einem Stativ befestigt worden (Abbildung 42), wobei darunter eine Glasschale gestellt worden ist, um abtropfende Flüssigkeit auffangen zu können.

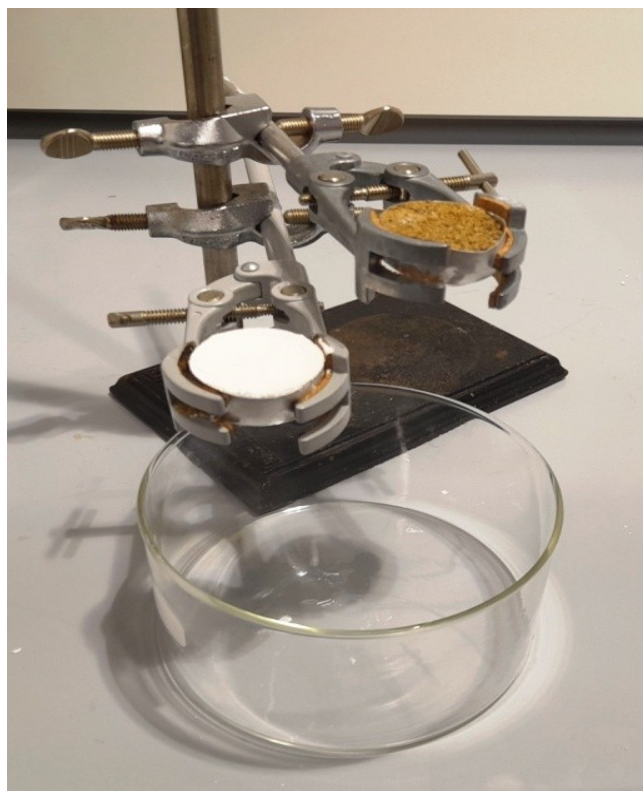


Abbildung 42: Die Teelichtschalen werden am Stativ eingespannt, darunter eine Glasschale zum Auffangen von „versickernder“ Flüssigkeit (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Anschließend ist mittels Pipette auf beide Teelichtgefäße mittig ein Tropfen einmolarer Salzsäure platziert worden wobei festzustellen war, dass die Salzsäure auf der glatten Kalkoberfläche reagiert und eine Verkrustung zurückgelassen hat, während jener Tropfen im Sand lediglich versickert ist und den Sand befeuchtet hat (Abbildung 43).

Anschließend sind abwechselnd mittig sowohl am Kalk als auch am Sand je 5 Tropfen Säure und je 5 Tropfen Wasser aufgetragen worden. Das Wasser hat dazu gedient, um Lösungsrückstände wegspülen zu können. Nach zwei bis drei Durchgängen ist durch beide Teelichtgefäße mittels Spritzenkanüle durch das zuvor eingebrachte Loch im Boden durchgestochen worden, sodass in beiden Modellen die Möglichkeit bestanden hat, überstehendes Wasser abfließen zu lassen – so wie es im Falle von Lösungsdolinen über Schlucklöcher passiert.



Abbildung 43: Zugabe eines Tropfens Salzsäure; Links: im Kalk zeigt sich ein deutlicher Reaktionsrückstand; Rechts: Sand wird durch die Säure lediglich feucht (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Abbildung 44 & Abbildung 45 verdeutlichen diesen Lösungsprozess, wobei ein klarer Unterschied zu erkennen ist, ob der Untergrund von carbonatischer oder silikatischer Beschaffenheit ist, wie in zugehörigen Abbildungsbeschreibungen erläutert wird.

Nachstehend die Modellierung einer Lösungsdoline – zuerst die Vergleichs- bzw. Blindprobe aus Sand und anschließend die Modellierung auf Kalkuntergrund.



Abbildung 44: Im Gegensatz zum Kalkuntergrund bildet sich bei selber Versuchsdurchführung im Sand keine Trichterform aus – der Boden quillt ob der Flüssigkeit lediglich auf (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

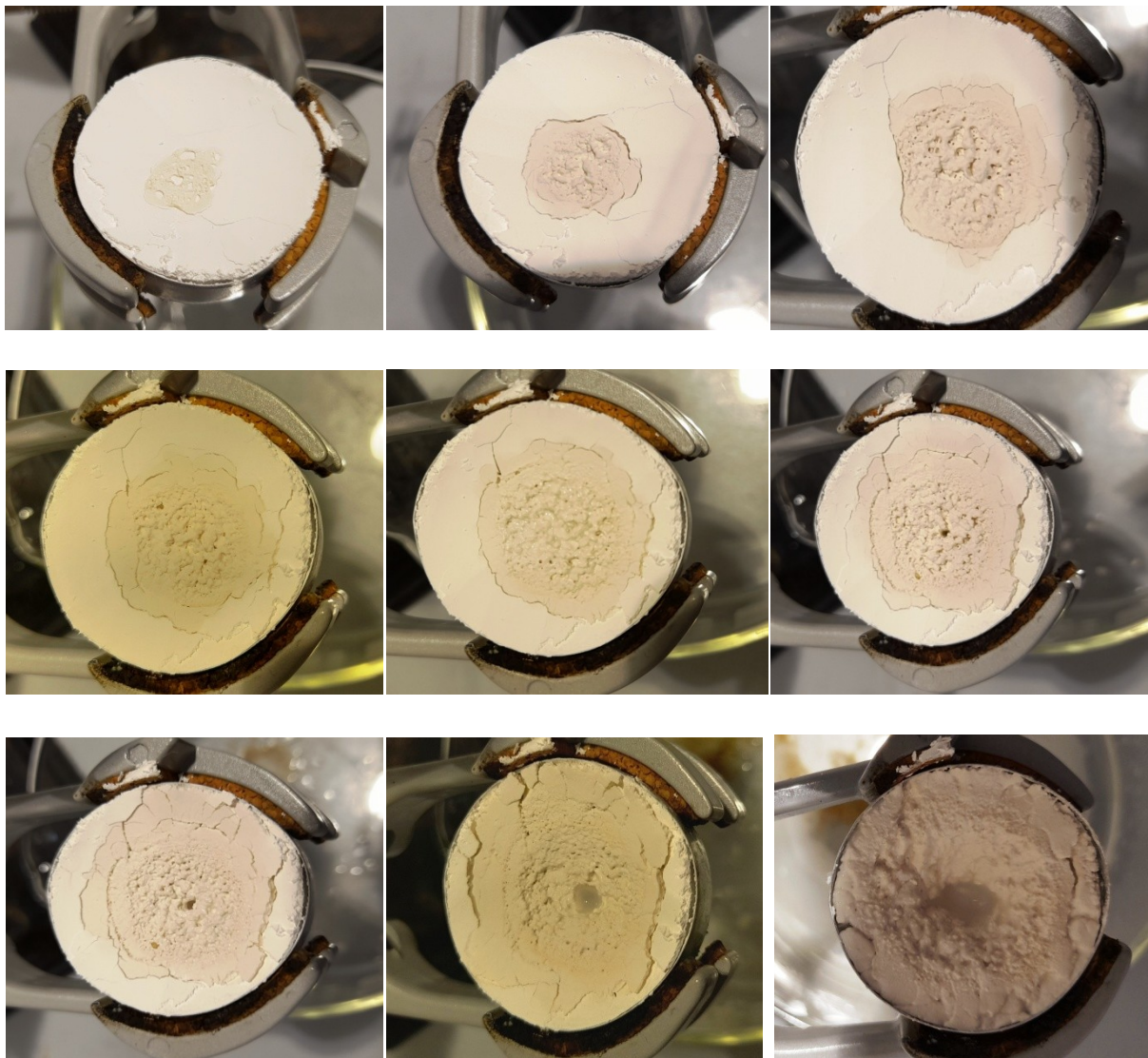


Abbildung 45: Zeitleiste Dolinenmodellierung: Abwechselnde Zugabe von Salzsäure und Wasser (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Nach Zuführung von ausreichend Säure ist im Laufe der Zeit auch im Modell eine Trichterform entstanden (Abbildung 46), vorausgesetzt, es handelt sich um carbonatischen Untergrund. Denn der Sand hat lediglich die Flüssigkeit aufgesogen bzw. hat diese durchsickern gelassen oder hat sich aufgebläht. Zwischenzeitig sind auch mechanische Formungen zu erkennen gewesen.

Unter der Annahme, dass sich in dieser modellierten Trichterform Humus ansammeln kann, wird daraus auch ersichtlich, weshalb Dolinen mit Vegetation versehen sein können, wie bereits früher dargestellt worden ist.



Abbildung 46: Vergleich der Kalk- bzw. Sandprobe nach Versuchsdurchführung: Während die Salzsäure im Kalkuntergrund eine deutliche Trichterform hinterlassen hat inkl. eines stark ausgeprägten Schluckloches, ist beim Sanduntergrund nichts dergleichen festzustellen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

4.5. Diskussion

Mit den einleitenden Lösungsversuchen können modellhaft Schlüsse auf die Lösungsprozesse bei der Karstbildung geschlossen werden, nämlich primär, dass der Lösungsprozess von Kalkgestein nicht alleine durch reines Wasser erfolgt, sondern insbesondere durch Säure. Hierbei stellt die eingesetzte Salzsäure, die auch bei den Modellierungen der Karstrillen sowie Dolinen eingesetzt worden ist, nicht jene Säure dar, die

für die natürliche Verkarstung verantwortlich ist, aber zur besseren Demonstration als Modellsäure eingesetzt werden kann. Schließlich ist es aber bei den allgemeinen Lösungsversuchen auch gelungen zu zeigen, dass auch Kohlensäure und Huminsäure – jene Säuren, die in der Verkarstung tatsächlich eine wesentliche Rolle spielen, imstande sind, Calciumcarbonat zu lösen sowie die Tatsache, dass sich aufgrund der besseren Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in kälterem Wasser in weiterer Folge durch die vermehrte Bildung von Kohlensäure auch temperaturabhängige Faktoren in der Karstbildung modellhaft bestätigen lassen.

In Bezug auf die Modellierung von Karstrillen sowie Lösungsdolinen ist die Herausforderung darin bestanden, die in der Natur über eine sehr lange Zeit andauernden Prozesse zeitlich auf ein schnell durchzuführendes Modellexperiment zu kürzen. Dies ist einerseits durch den Einsatz von Salzsäure als Modellsäure gelungen und andererseits dadurch, dass für die Modellierung der Lösungsdoline kein harter Stein herangezogen worden ist, sondern in Teelichtschalen gepresstes Pulver aus Calciumcarbonat, wobei durch den Vergleich mit Sand deutlich gezeigt werden kann, dass die entstandene, trichterförmige Hohlform tatsächlich auf Lösungsprozesse und nicht auf mechanisches Verfrachten des eingesetzten Materials zurückzuführen ist.

Bei der Modellierung der Karstrillen ist es zwar nicht gelungen aufgrund des Faktors Zeit tatsächliche Rillen zu modellieren – ferner ist es jedoch deutlich gelungen zu visualisieren, inwiefern Säure Einfluss auf die Oberfläche von Kalkgestein hat und damit modellhaft zumindest die Imagination zu schaffen, wie der Prozess der Karstrillenbildung bei über freiliegendem Kalkgestein abfließenden säurehaltigen Wässern vonstattengehen kann, wie die gezeigten Abbildungen auch untermauert hatten. Offen bleibt, inwiefern mittels einer Apparatur ein Aufbau erzielt werden könnte, mit dem es gelingt, Flüssigkeit über eine längere Zeitspanne auf der geneigten Marmoroberfläche unter ständigem Abfluss abrinnen zu lassen und dadurch die Modellierung im Falle von kontinuierlichem Abfließen zu optimieren, wie es in dieser Arbeit jedoch ohne verwertbaren Output getestet worden ist.

Die Versuchsanleitungen zu den aufgearbeiteten Experimenten finden sich im Anhang, wobei die allgemeinen Lösungsversuche unter 2.1., die Modellierung von Lösungsdolinen unter 2.2. sowie der Modellversuch zur Entstehung von Karstrillen unter 2.3. zu finden sind.

5. Abfluss

Der durch den Karst bedingte unterirdische Abfluss hat in der Dachsteinregion bereits eine umfangreiche Forschungsgeschichte hinter sich, wie sich in 5.3. zeigen wird und im Zuge des Kapitels auch für Lernende mittels entsprechender Modelle veranschaulicht werden soll.

5.1. Chemische und Physiogeographische Grundlagen

Das Wasser auf der Erde unterliegt einem ständigen Kreislauf an Orts- und Zustandsänderungen, bei denen die Hauptkomponenten Niederschlag, Abfluss und Verdunstung sind (DIN 4049-1, zitiert nach Hölting & Coldeway 2013, S. 74). Der Abfluss entspricht jenem Volumen, das vom Niederschlag nach erfolgter Verdunstung übrig bleibt (Hölting & Coldeway 2013, S. 92). Nach Strahler & Strahler (2009, S. 541) erhöht weiters auch die Schneeschmelze den Abfluss. Damit tragen auch Gletscher einen Beitrag zum Abfluss bei.

Der Komponente Abfluss soll in diesem Kapitel allgemeines Augenmerk geschenkt werden, da das Thema Abfluss für die Dachsteinregion eine wesentliche Rolle spielt, wie in Kapitel 5.2. und 5.3. noch ausgeführt werden wird.

5.1.1. Formen des Abflusses

Hölting & Coldeway (2013, S. 92) stellen oberirdischen Abfluss dem Unterirdischen gegenüber. Ersterer sei oberflächlich sichtbar und zudem auch messbar. Böhm und Schütt (2002), zitiert nach Schulte et al. (2020, S. 588) haben den Zusammenhang zwischen Abfluss, Niederschlag und Verdunstung verdeutlicht. Deren Ausführungen stark vereinfacht ausgedrückt kann Niederschlag, sofern dieser den Boden erreicht und nicht zuvor verdunstet, einerseits in Form oberirdischen Abflusses z.B. über Bäche und Flüsse abfließen. Andererseits besteht für den Niederschlag aber auch die Möglichkeit, im Boden zu versickern und der Schwerkraft folgend bis zu einer stauenden Schicht in Form von unterirdischen Abfluss abzufließen und zu einem späteren Zeitpunkt, an einem Ort, an welchem sich Erdoberfläche und unterirdischer Abfluss schneiden, als Quelle wieder zu Tage treten.

5.1.2. Zusammenhang zwischen Karst und Abflusssystemen

Wie in Kapitel 4.1. bereits erwähnt worden ist, ist es für Karstregionen besonders charakteristisch, dass kaum ein oberirdischer Abfluss gebildet wird, da der Abfluss primär

unterirdisch erfolgt. Das kann aufgrund der Löslichkeit und Durchlässigkeit des Kalkgesteins erklärt werden. Diese Durchlässigkeit wird nach Bögli (1978, S. 9) durch Porosität, Klüftung sowie Schichtfugen verursacht.

Hauptlieferant des Grundwassers in Karstgebieten sind Niederschlagswässer und allochthoner^G Zufluss (Scholz 2020, S. 393) oder aber auch im Falle von Glaciokarst Schmelzwasser von Gletschern. Jene Öffnungen, an denen Wasser in den Karstuntergrund abfließt, werden als Ponore, Schwinden oder Schlucklöcher bezeichnet (Plan 2016, S. 24). Eine solche ist in Abbildung 47 dargestellt.



Abbildung 47: Beispiel für eine Schwinde bzw. ein Schluckloch, hier abgebildet jedoch aus der Region Hohe Veitsch (eigene Aufnahme, August 2024).

Quellen in Karstlandschaften werden als Karstquellen bezeichnet, welche sehr stark auf Schwankungen in der Wasserzufuhr reagieren, was schließlich wiederum zu starken Schwankungen in deren Schüttung^G führt (Scholz 2020, S. 393f.).

5.2. Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes

Die Abflusssysteme am Dachstein sind aufgrund der starken Verkarstung primär durch unterirdischen Abfluss gekennzeichnet, wie im vorangegangenen Kapitel bereits stellenweise

angedeutet worden ist. Die einzigen Oberflächengewässer sind kleine Seelein, Tümpel oder Sickerwasserquellen im Plateaubereich. Ansonsten kommt das gesamte Regen-, Schmelz-, und Gletscherwasser über Klüfte direkt dem unterirdischen Abfluss zu (Umweltbundesamt 1989, S. 4). In diesem Kapitel soll eine kurze Darstellung des unterirdischen Abflusses in Bezug auf Wasserwege und Karstquellen erfolgen - jene Forschung, die zur Nachvollziehbarkeit des Abflusssystems beigetragen hat, wird in Kapitel 5.3. erläutert und dargestellt.

5.2.1. Wasserwege

Ursprünglich ist von einem in alle Richtungen, radialstrahlförmigen Abfluss ausgegangen worden – eine Annahme, die sich auf Dauer nicht halten hat können (Umweltbundesamt 1989, S. 59), vergleiche dazu auch Kapitel 5.3. Tatsächlich hat man es im Dachsteingebiet mit einem raschen, primär in Richtung Norden gerichteten, unterirdischen Abfluss zu tun. So liegen am Nordrand des Dachsteinmassivs einige Karstquellen (Umweltbundesamt 2001, S. 111), auf welche gesondert in Kapitel 5.2.2. eingegangen werden wird. Dieser nach Norden gerichtete Abfluss kann geologisch dadurch begründet werden, dass sowohl der stark verkarstete, zirka ein Kilometer mächtige Hauptaquifer^G des Dachsteinmassivs nach Norden hin fällt als auch die darunterliegende Dolomitschicht, die für das darüber wasserdurchlässige Gestein relativ gesehen eine Stauschicht darstellt (ebd.). Während im Südbereich diese Dolomitschicht stellenweise über weite Teile aufgeschlossen^G ist, liegt diese im Norden unter dem Talniveau (ebd., S. 117). Unter der Dolomitschicht liegt wiederum eine wasserstauende Basis aus Phylliten, Quarziten, Sandsteinen und Schiefern, sodass es auch im Süden des Dachsteinmassivs Quellen gibt (ebd., S. 121). Damit fließt zwar der Großteil des Abflusses vom Dachsteinmassiv in Richtung Norden, während es aber in sehr geringen Mengen auch einen Abfluss in Richtung Süden gibt (Umweltbundesamt 1989, S. 59). Die Bedeutung des Abflusses nach Norden zeigt sich aber auch selbst darin, dass der unterirdische Abfluss auch unabhängig von den orographischen^G Verhältnissen erfolgen kann. Denn es existiert beispielsweise auch ein Abfluss von der Dachstein-Südwandhöhle zu den nördlichen Karstquellen, womit der unterirdische Abfluss, daraus schlussgefolgert, sogar den Gipfelbereich unterqueren muss (ebd., S. 62).

5.2.2. Karstquellen

Die Quellen können in sieben hydrogeologische Bereiche unterteilt werden, wovon jene im Bereich Haus-Gröbming sowie Filzmoos-Ramsau südseitig des Dachsteinmassivs liegen

und die fünf anderen Bereiche (Hintertal, Plassen, Waldbachursprung-Koppenwinkel, Kainischtraun & Grubegg) nordseitig liegen (Umweltbundesamt 2001, S. 112).

Der Hallstätter Gletscher beispielsweise entwässert in die Quelle Waldbachursprung und weist eine minimale Durchlaufzeit von 1,5 Tagen auf. Wie für Karstquellen typisch, weist der Waldbachursprung starke Schüttungsschwankungen sowie hohe Maximalschüttungen von 20 L/s bis 12000 L/s auf (Umweltbundesamt 2001, S. 111 & S. 119). Die zuvor genannte Durchlaufzeit beruht auf der Einspeisung von 5 kg Rhodamin FB am Hallstätter Gletscher im Zuge der Markierungsversuche 1984, welches nach 1,5 Tagen Durchlaufzeit im Waldbachursprung wieder nachgewiesen werden konnte (Umweltbundesamt 1989, S. 12f.).

5.3. Fachliche Klärung für ein Modellexperiment

Auch Friedrich Simony hat schon erste Beweise dafür vorbringen können, dass die Quelle des Waldbachursprunges jene sein muss, die das am Dachstein versickernde Wasser wieder an die Erdoberfläche spült. Seine Beweisführung hatte dabei auf Beobachtungen der Wassertemperatur sowie der Oszillation der Wassermenge beruht (Kretschmer 2004, S. 54).

Versuche, unterirdische Abflusssysteme nachvollziehbar zu machen, erfolgen heutzutage mit Markierungsstoffen, sogenannten Tracern und daraus resultierende Durchgangskurven. Mögliche Markierungsstoffe können Salze, Farbstoffe, Radioisotope, durch Neutronenquellen aktivierbare Tracer, Duftstoffe und Detergentien sowie Triftstoffe sein, wobei für letztere ursprünglich Sägemehl, später Kunststoffpulver und schließlich Sporen und Bakterien zum Einsatz gekommen waren (Bögli 1978, S. 139ff.).

Am Dachstein hat es zwei große systematische Versuchsreihen gegeben, die sich auf Basis von Markierungsversuchen mit den unterirdischen Abflussverhältnissen beschäftigt hatten. Einerseits waren dies die Sporentriftversuche im Zeitraum von 1953 bis 1960 sowie andererseits die Markierungsversuche mit Fluoreszenzfarbstofftracern^G von 1984 bis 1986 (Umweltbundesamt 1989, S. 1). Dabei sind insgesamt 137,5 kg Sporen (14 Einspeisungen) sowie 125 kg Fluoreszenztracer (19 Einspeisungen) eingespeist worden (ebd., S. 55). Letztere sind in Form von insgesamt 1060 Litern Lösung per Hubschrauber zu den Einspeisungsstellen luftverfrachtet worden (ebd., S. 9).

5.3.1. Sporentriftversuche (1953-1960)

Erstmals ist die Sporentriftmethode 1953 von A. Mayr eingesetzt worden, weitere Versuche sind in den nachfolgenden Jahren von J. Zötl und F. Bauer nachgefolgt (Umweltbundesamt

Insgesamt hat sich über den Untersuchungszeitraum auf Basis der Sporentriftversuche für die Dachsteinregion ein radialstrahlförmiges Abflussverhalten ergeben, wie es in vorangegangener Abbildung aus Umweltbundesamt (1989, S. 37) für die Versuche des Jahres 1958 dargestellt ist, wobei S1 die Einspeisung am Schladminger Gletscher kennzeichnet.

Mit dem Ziel, das unterirdische Abflussverhalten soweit festzustellen, um auf dieser Basis eine Grundlage zu erstellen, die dazu dienen sollte, eine wasserrechtliche Schongebietsverordnung zu erlassen und um auch die Resultate der Sporentriftversuche zu überprüfen, sind in den Jahren 1984 bis 1986 weitere Markierungsversuche durchgeführt worden. Aufgrund des Vorfindens bakterieller Verunreinigungen im Waldbachursprung ist diesem Vorhaben damals besondere Priorität zugekommen (Umweltbundesamt 1989, S. 8). Schließlich stellen die Karstquellen um das Dachsteinmassiv eine wichtige Basis für die Trinkwasserversorgung der umliegenden Gemeinden dar, während die intensive touristische Erschließung des Dachsteingebietes das Potential einer Beeinträchtigung der Karstwässer durch Schadstoffe birgt (ebd., S. 1), was wiederum die engen Mensch-Umwelt-Beziehungen aufzeigt, die das Thema Karst mit sich bringt und dessen Relevanz unterstreicht.

5.3.2. Markierungsversuche mit Fluoreszenzfarbstofftracern (1984-1986)

Die Markierungsversuche mittels Fluoreszenztracern ist in drei Etappen vonstattengegangen – 1984 ist der Westabschnitt und 1985 der Ostabschnitt erfolgt, um 1986 mit dem mittleren Abschnitt abzuschließen. Erst nach intensiven Vorarbeiten wie Quellbegehungen und Auswahl der Einspeisestellen sind die eigentlichen Markierungsversuche erfolgt, die aus den Abschnitten Zielsetzung – Einspeisung – Beobachtungsprogramm & Probenuntersuchung/Ergebnis bestanden haben (Umweltbundesamt 1989, S. 8f.).

Die Einspeisungen (insgesamt 19, davon 17 im Juli/August und die anderen beiden im September/Okttober) sind in Schwinden sowie Schlucklöchern erfolgt, wobei im Bedarfsfall neben der Tracerlösung auch bis zu 2000 Liter Wasser per Hubschrauber herangeflogen worden sind, sofern der natürliche Abfluss zu gering gewesen sein sollte. Die Kanister für die Farbstofflösungen selbst waren mehrfach kontaminationssicher verpackt und die Bediensteten für die Einspeisung sind aus demselben Grund im weiteren Versuchsverlauf auch nicht weiter eingesetzt worden (ebd., S. 9).

In das Beobachtungsprogramm sind alle Gewässer aufgenommen worden, bei denen auch nur im Entferntesten an einem Traceraustritt zu denken gewesen war, sodass je nach Fragestellung 100-150 Austrittsgewässer untersucht worden sind. Die Beobachtung der

Austrittsgewässer ist durch Wasserproben direkt sowie auch indirekt über Aktivkohleproben geschehen. Die Wasserproben hatten den Zweck zur quantitativen Tracerbestimmung, während die Aktivkohleproben mit einer rund hundertfach erhöhten Empfindlichkeit zum qualitativen Nachweis der Tracer gedient hatten. Im Zeitraum der Markierungsversuche sind insgesamt ca. 9 300 Wasserproben sowie 2 300 Aktivkohleproben entnommen worden, wobei der Entnahmezyklus je nach Bedeutung des Gewässers bzw. Zeitpunkt im Versuchsdurchlauf von alle zwei Stunden hin bis zu einmal im Monat für die Wasserproben bzw. für die Aktivkohleproben nach mindestens einwöchiger Exposition bis hin zu monatlicher Entnahme gereicht hat (ebd., S. 10).

Zur Untersuchung sind die Proben schlussendlich in Form von Expressgut per Bahn in ein Wiener Labor befördert worden, sodass bereits am Folgetag Resultate an die Versuchsleitung telefonisch übermittelt worden sind, um das Beobachtungsprogramm ggf. darauf adaptieren zu können. Mittels Spektralfluorometer sind die Wasserproben direkt vermessen worden und von den Aktivkohleproben sind, nach vorangegangener Lufttrocknung und nachdem diese mit Dimethylformamid extrahiert worden waren, Fluoreszenzspektren aufgenommen worden (ebd., S. 11).

Die Daten bezüglich Menge des eingespeisten Materials, die Einspeisestellen sowie die Nachweisstellen der einzelnen Tracer sind in Umweltbundesamt (1989, S. 12 – 24) dargestellt. Als Fluoreszenzfarbstofftracer sind Eosin, Tinopal CBS-X, Rhodamin FB, Amidorhodamin G extra, Uranin, Rhodamin B, Natriumnaphtionat, und Basonyl Rot 540 zum Einsatz gekommen (ebd.).

Für den Nachweis selbst ist eine messbare Durchgangskurve an der Beobachtungsstelle erforderlich, denn der Nachweis einzelner Tracerspuren hat nicht als Nachweis eines Abflussverhältnisses gegolten und ist als nicht ausschließbare Tracerverschleppung gewertet worden (ebd., S. 25).

Die Resultate der Versuchsreihe zeigt nachfolgendes Abflussverhalten, welches sich deutlich von jenem aus den Sporendriftversuchen ermittelten unterscheidet. Anstatt eines radialen Abflusses hat sich auf Basis der Tracerversuche nun jenes, bereits in Kapitel 5.2. dargelegte Abflussverhalten gezeigt.

Die entsprechende Zuordnung der Einspeisungs- und Beobachtungsstellen zu den Buchstabensignaturen aus Abbildung 49 findet sich in Tabelle 4. Zu beachten gilt, dass das mit „*“ gekennzeichnete Geoobjekt je nach Wasserstand entweder sowohl als Quelle oder aber auch als Schwinde fungieren kann (ebd., S. 26).

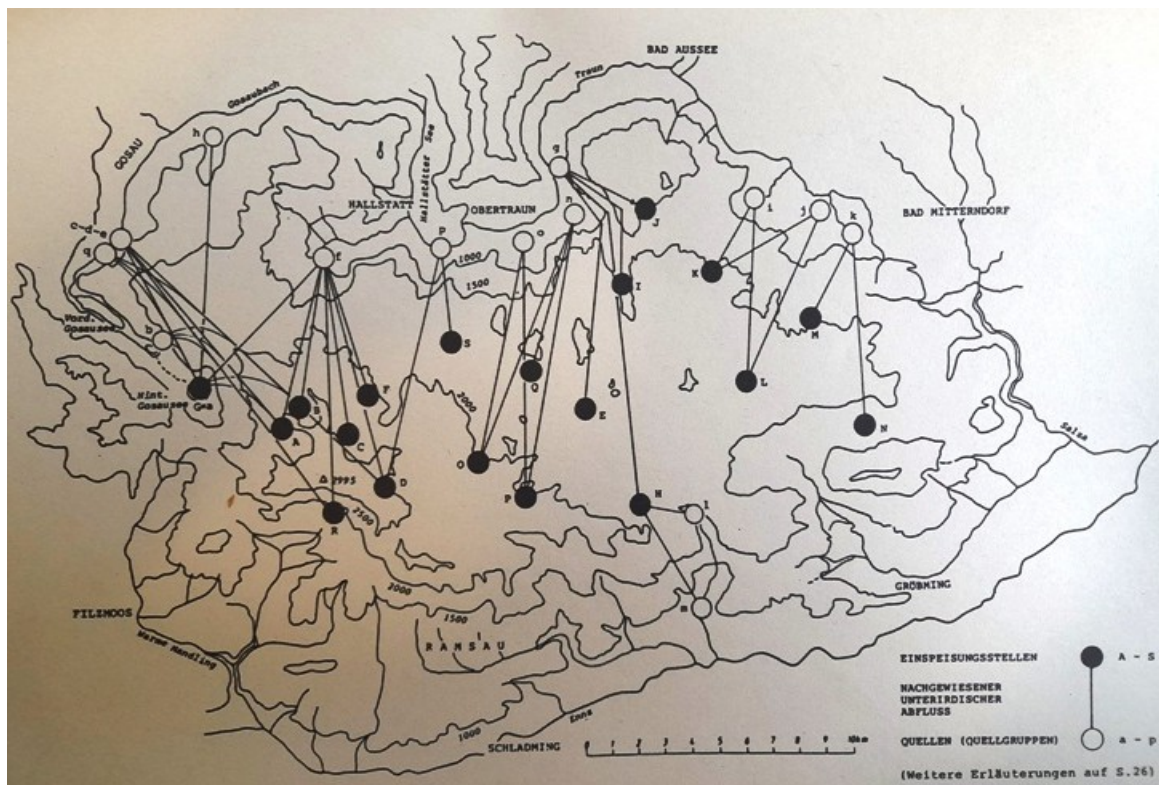


Abbildung 49: Ergebnisse der Markierungsversuche im Dachsteingebiet 1984-1986 (verzerrt) (Umweltbundesamt 1989, S. 27).

Tabelle 4: Erweiterte Legende zu Abbildung 49 (eigene Darstellung nach Umweltbundesamt 1989, S. 26).

	Einspeisungsstelle		Beobachtungsstelle
A	Großer Gosaugletscher	a	Spaltquelle am hinteren Gosausee*
B	Schneelochgletscher	b	Quellgruppe Launigfall
C	Hallstätter Gletscher	c	Quellbezirk Brunnbach
D	Schladminger Gletscher	d	Geigerbach
E	Wurzkar	e	Beereiblbach
F	Nördlich der Simonyhütte	f	Quellbezirk Waldbachursprung
G	Kluftschwinde am Ht. Gosausee*	g	Quellbezirk Koppenbrüllerhöhle
H	Grafenbergalm	h	Brielgrabenbach
I	Lahnfriedalm	i	Quellbezirk Ödensee
J	Herrenalm-Almhütte	j	Quellbezirk Strummern
K	Finetsee	k	Quellbezirk Riedlbach
L	Hochstube	l	Quelle am Ahornsee
M	Achlesbrunn	m	Siebenbrunn
N	Miesbodensee-Schwinde	n	Quellbezirk Koppenwinkel
O	Schneebergseelein	o	Miesenbachquelle
P	Lackenmoosalm	p	Hirschbrunn
Q	Hirzkarseelein	q	Quelle der WV Gosau
R	Dachstein-Südwandhöhle		
S	Gjaidalm		

Dies hat dazu geführt, dass einige Ergebnisse aus dem Sporentriftversuch revidiert worden sind. So beachtlich und als Pionierleistung die Sporendriftversuche auch nach Umweltbundesamt (1989, S. 28f. & 34f.) anzusehen sind, so sind ebd. aber auch jene Punkte, die zum fälschlichen Bild eines radialen Abflusses geführt hatten, kurz dargelegt worden. Auf diese Ausführungen wird im Nachfolgenden Bezug genommen.

Diese Punkte liegen nun darin begründet, als dass die Sporentriftversuche bei geringstem Personal- und Materialaufwand durchgeführt worden sind. Da zum Teil sowohl Einspeisung als auch Probennahme und Untersuchung im Labor von denselben Personen durchgeführt worden sind, hat die Gefahr der Sporenverschleppung bestanden, weil Bärlappsporen eine sehr hohe Haftfähigkeit – insbesondere an Textilien – aufweisen. Außerdem ist es zur Wiederverwendung der Planktonnetze gekommen, bei denen ein vollständiges Auswaschen von Sporen nie garantiert werden kann. Ebenfalls hat bereits eine einzelne vorgefundene Spore als Nachweis eines Abflussverhältnisses gegolten (75% aller Nachweise sind bei Vorhandensein von weniger als 5 Sporen erfolgt), was auf Basis des heute bekannten Sachverhaltes der Sporenverschleppung nicht mehr gelten könne.

5.4. Aufbereitung für ein Modellexperiment

Auf vorangegangene Ausführungen aufbauend soll mittels Modellexperiment nun einerseits gezeigt werden, dass Kalkgestein aufgrund seiner Beschaffenheit wasserdurchlässig ist und andererseits sollen mittels eines selbst gebauten Bergmodells die Tracervesuche simuliert werden können, um dabei auch auf die geologischen Gegebenheiten des Dachsteingebietes Rücksicht zu nehmen.

5.4.1. Durchlässigkeit von Kalkgestein

Wie bereits in 5.1.2. geklärt, ist der unterirdische Abfluss auf die Durchlässigkeit des Kalkgesteins aufgrund dessen Porosität, Zerklüftungen und Löslichkeit (Verkarstung) zu erklären. Die Abbildung „saugender Karst“ aus dem Bildarchiv des Projektes „GlacierXperience“ vom Fachdidaktikzentrum für Chemie an der Universität Graz (Abbildung 50), zeigt eindrucksvoll die Wasseraufnahmefähigkeit von Karstgestein, bei welchem das Schmelzwasser des darunterliegenden Eisblocks aufgesogen wird.

Daraus ist die Idee entstanden, inwiefern mittels Modellexperiment durch Aufsetzen einer Wassersäule auf ein abgeflachtes Gesteinsstück (aus Dachsteinkalk bestehend) die Durchlässigkeit von Karstgestein gezeigt werden kann und damit eine der Voraussetzungen für den unterirdischen Abfluss modelliert werden kann. Um eine solche Wassersäule dicht

auf eine Gesteinsprobe aufsetzen zu können, sind mehrere Versuche erfolgt, welche in Abbildung 51 dargestellt sind.



Abbildung 50: Saugender Karst (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).



Abbildung 51: Verschiedene Varianten einer Wassersäule, aufgesetzt auf eine flache Karststeinprobe; Links: Messzylinder mit Gewebeband befestigt – undicht; Mitte & Rechts: Spritzenzylinder mit Heißkleber befestigt – nach zahlreichen Optimierungsversuchen ist damit ein wasserdichter Aufbau erzielt worden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Zur Versuchsdurchführung ist die Versuchsanordnung mittels Stativklemme am Stativ befestigt worden (Abbildung 52), wobei das Wasser mittels Kanüle in den Spritzenzylinder eingebracht worden ist.

Auch nach mehreren Stunden ist die Unterfläche der Gesteinsprobe vollkommen trocken geblieben. Abbildung 53 zeigt nochmals detailliert den Bereich der Befestigung zwischen Spritzenzylinder und Gesteinsprobe. Da die Versuche mit Wasser ohne Erfolg zu verbuchen waren, ist in einem weiteren Versuch die Durchführung mittels einmolarer Salzsäure erfolgt.



Abbildung 52: Die Versuchsdurchführung erfolgt eingespannt am Stativ (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Dazu ist, wie Abbildung 54 zeigt, die Apparatur adaptiert worden, wobei die Abbildung den Aufbau vor der Versuchsdurchführung zeigt. Für die Durchführung selbst muss die Apparatur um 180° um die Achse der Stativklemme gedreht werden. In Summe sind der ursprünglichen Apparatur zwei Spritzen sowie zwei Dreiwegeventile ergänzt worden, mittels derer es möglich ist, die Salzsäure durch Aufbau eines Unterdrucks im Reaktionsgefäß in dieses einleiten zu lassen bzw. während der Versuchsdurchführung durch Druckminderung im Reaktionsgefäß das Gleichgewicht auf die Seite der Produkte zu verschieben und damit den Lösungsprozess zu beschleunigen. Der Aufbau des Unterdruckes erfolgt durch Evakuieren der einen Spritze mithilfe der anderen Spritze über das Dreiwegeventil. Abbildung 55 zeigt die optimierte Apparatur inkl. einer Nahaufnahme der Dreiwegeventile.



Abbildung 53: Befestigung und Abdichtung Spritzenzylinder/Gesteinsoberfläche mittels Heißkleber (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

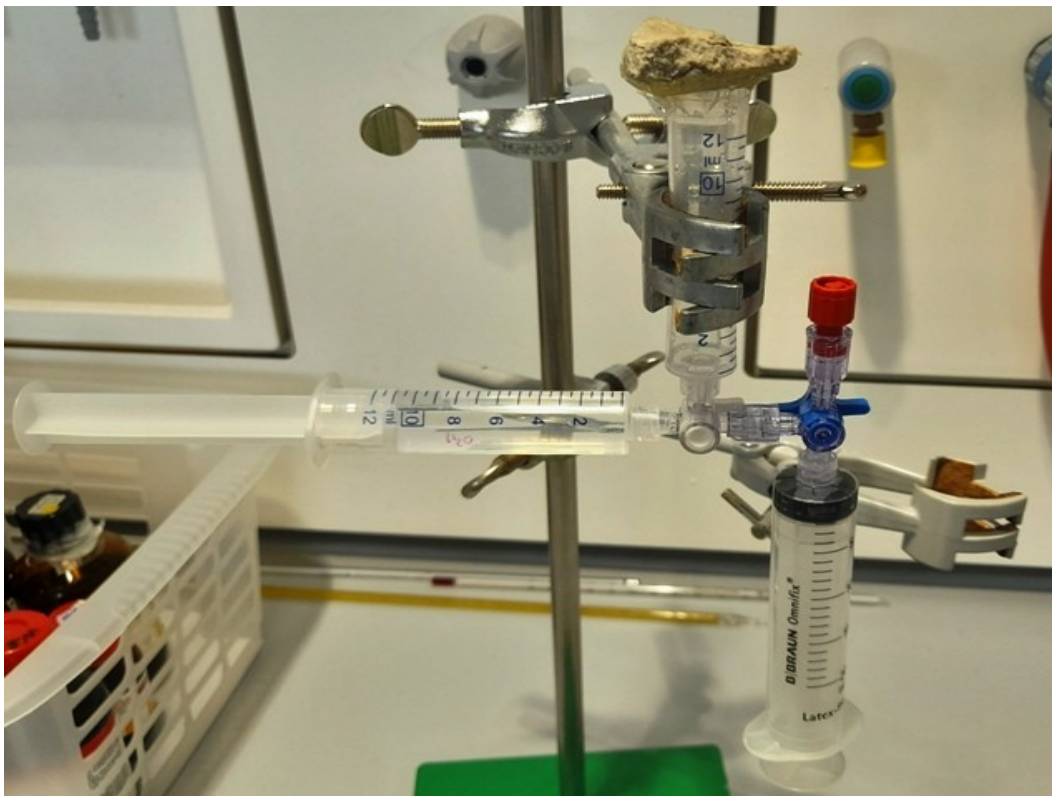


Abbildung 54: Optimierte Apparatur, vor Inbetriebnahme (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

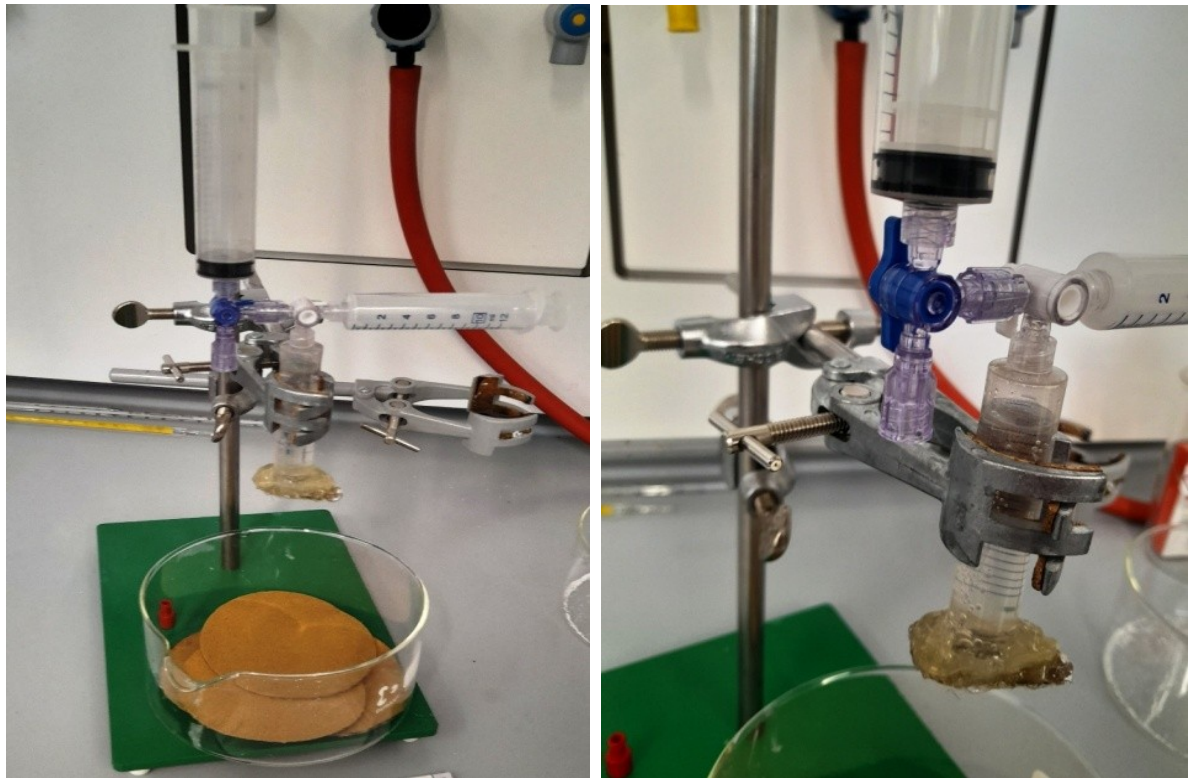


Abbildung 55: Optimierte Apparatur in Betrieb; Links: Überblick; Rechts: Detaillierter Blick auf die Dreiwegeventile (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Nach Einleiten der Salzsäure ist eine starke Gasentwicklung zu beobachten gewesen, die bei Minderung des Drucks durch Anziehen des Spritzenkolbens sichtlich verstärkt worden ist. Auch nachdem die Reaktion über Nacht laufen gelassen worden war, ist kein Durchsickern der Säure durch das Gestein zu erkennen gewesen entgegen der Vorstellungen, die durch den Versuch „Saugender Karst“ annehmbar gewesen wären. Nach mehreren Versuchswiederholungen ist die Versuchsdurchführung abgebrochen worden, da die Säure bereits so viel Gestein gelöst hatte, dass die Dichtheit zwischen Gestein und Klebermasse nicht mehr gegeben war. Nach Entfernen des Versuchsaufsatzes ist in der Gesteinsprobe eine deutliche Hohlform zu erkennen gewesen, welche die Säure aus der Gesteinsprobe herausgelöst hatte und in Abbildung 56 klar ersichtlich ist. Die Idee, die Durchlässigkeit des Karstgesteins zu modellieren, ist aufgrund dessen nun nicht mehr weiter verfolgt worden.



Abbildung 56: Links: Starke Reaktion unter Gasbildung bei Verwendung von Salzsäure, ein Durchsickern ist aber dennoch nicht erreicht worden, allerdings ist nach Entfernung des Aufsatzes eine deutliche Hohlform zu erkennen, die die Säure (rechts) ausgelöst hat (eigene Darstellung, Mai-Juni 2024).

5.4.2. Simulation der Tracerversuche mittels Bergmodell

In der Praxis wird es nicht möglich sein, eigenständig mit Lernenden im Gelände Tracer-Versuche durchzuführen. Sehr wohl aber könnten solche Tracerversuche mittels eines selbst konstruierten Bergmodells modelliert bzw. simuliert werden. Dabei muss dieses Bergmodell mehreren Anforderungen genügen. Einerseits muss die Möglichkeit bestehen, Tracerflüssigkeit in das Innere des Modells einzuleiten und andererseits müssen Quellen vorhanden sein, an denen die eingespeiste Flüssigkeit wieder zu Vorschein treten kann. Um die Komplexität der Relationen zwischen Schwinden und Quellen darstellen zu können, soll das Modell auch mehrere Schwinden wie auch Quellen besitzen – im konkreten Fall des nachfolgend präsentierten Modells sind es 6 Schwinden, 3 Quellen sowie 2 Gipfel. Die beiden Gipfel dienen dazu, um äquivalent zum Dachsteinmassiv einen Plateaubereich zu modellieren und in weiterer Folge das Modell auch so zu gestalten, dass neben den steilen Südabhängen auch die flacheren Nordabhänge, an denen sich auch die Gletscher befinden und schließlich tiefer gelegen eine Vielzahl an Quellen sowie auch der Hallstätter See, zu modellieren. Nicht zuletzt soll das Modell auch ein Sichtfenster aufweisen, damit auch die Vorgänge im Berg sichtlich durch Modellierung dargestellt werden können. Dies ist einerseits der vertikale Abfluss durch die wasserdurchlässigen Schichten wie auch dann der horizontal

fallende Abfluss entlang der wasserundurchlässigen Schichten hin zu den Quellen, bei denen die wasserundurchlässigen Schichten die Erdoberfläche erreichen.

Auf Basis der nun erläuterten Ausgangssituation erfolgt die Dokumentation der Genese des beschriebenen Bergmodells im Anhang. In Bezug auf das in dieser Arbeit konstruierten Bergmodell sieht der Abflussplan folgendermaßen, wie in Abbildung 57 skizziert, aus.

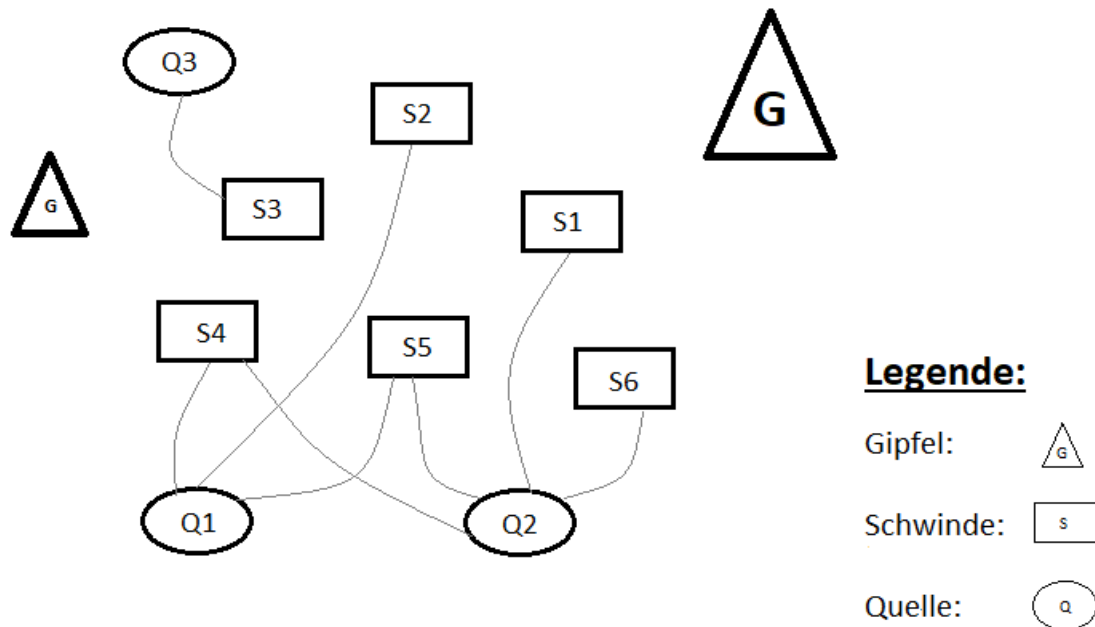


Abbildung 57: Abflussverhalten des Bergmodells zur Nachstellung der Tracerversuche: Relationen zwischen Einspeisungsstellen (Schwinden) und Quellen, wobei hier äquivalent zum Dachstein der Großteil des Abflusses in Richtung Norden passiert (gesüdetes Schema!) und die Einspeisung in die Schwinden (S2) den Gipfelplateaubereich unterschneidet. Desweiteren ist auch ein in Relation gesehen geringer Abfluss Richtung Süden eingebaut (S3->Q3) (eigene Darstellung).

Die Durchführung der Tracerversuchssimulation ist nun mittels wässriger Farblösungen, die mittels Spritze in die Schwinden eingebracht werden, erfolgt. Die Anleitungen dazu finden sich im Anhang. Insgesamt sind sechs unterschiedlich gefärbte Lösungen notwendig, die mit Lebensmittelfarbe hergestellt werden können, wobei im Test Farbpulver zum Färben von Hühnereiern in den Farben rot, blau, gelb und grün eingesetzt worden ist. Durch Mischen von blauer und grüner Lösung ist eine fünfte Farblösung – petrol – und durch Mischen von roter und blauer Lösung eine sechste Farblösung – violett – erzeugt worden. Anstatt Fluoreszenzfarbstoffe können also modellhaft Lebensmittelfarben eingesetzt werden. Abbildung 58 zeigt das Modell mit den auf die Schwinden aufgesetzten Spritzen, welche mit den entsprechenden Farblösungen gefüllt sind. Weiters zeigt diese Abbildung auch noch die in späterer Folge angebrachte Vorrichtung zum Absaugen der im „Auffangbecken“ (welches auch als Hallstätter See interpretiert werden könnte) eingebrachten Flüssigkeit. Während ersten Versuchen zur Erprobung des Modells hat sich gezeigt gehabt, dass eine solche

Vorrichtung von Vorteil wäre. Diese ist verwirklicht worden, indem jeweils an den tiefsten Punkten beider Seiten das Ende einer Butterflykanüle eingegipst und deren Schlauch jeweils bis über eine der Tablettecken geleitet und bis dorthin zur Stabilisierung vergipst worden ist. Die Vergipsung der Schlauchleitung bietet auch jenen Vorteil, dass der Schlauch quasi innerhalb des Modells nicht sichtbar ist – schließlich modelliert dieser keine in der Natur vorhandene Funktion. Aufgrund der Eingipsung sitzen die Schläuche genügend fest, dass diese während der Versuchsdurchführung über die Tischkannte mitsamt 100ml-Spritze herabhängen können. Die Spritze ist mittels Dreiwegeventil an das Schlauchende angeschlossen. Dadurch kann das in der Spritze stehende Wasser in ein großes Becherglas abgeleitet werden und dadurch weitere Flüssigkeit aus dem Modell abgesogen werden, ohne die Spritze vom Schlauch nehmen zu müssen mit der Folge, dass aufgrund des Konzeptes der kommunizierenden Röhren die restliche Flüssigkeit über den Schlauch auf den Fußboden abrinnen würde. Außerdem kann damit in der Spritze ein kleiner Unterdruck aufgebaut werden, um so einfacher restliche Flüssigkeitsreste aus dem Modell abzusaugen.



Abbildung 58: Fertiges Bergmodell bereit zur Versuchsdurchführung inkl. Absaugungsvorrichtung – Genese und Erläuterung des Modells inkl. Anleitung siehe Anhang (eigene Aufnahme, September 2024).

5.5. Diskussion

Das Ziel, abgeleitet vom Versuch „Saugender Karst“, nun mittels aufgesetzter Wassersäule (bzw. in weiterer Folge auch mit einmolarer Salzsäure) die Durchlässigkeit von Karstgestein zu modellieren, ist nicht erreicht worden. Zumindest aber die Löslichkeit von Kalkgestein in Säure ist einmal mehr eindrucksvoll präsentiert worden bzw. dient die eingesetzte Apparatur nun auch in leicht abgeänderter Variante als Vorbild für die Versuchsdurchführung in der Analytik (Kapitel 3.4.). Desweiteren ist denkbar, die präsentierte Apparatur in weiterer Folge didaktisch auch dadurch nutzbar zu machen, als dass mit dieser zu zeigen ist, inwiefern sich am Beispiel der Reaktion Kalk mit Säure die Reaktionsbedingungen durch Änderungen des Drucks verändern.

Die Genese des Bergmodells (Beschreibung im Anhang) hat sich äußerst positiv gestaltet, in vielen Fällen wurde auch spontan auf bereits im Labor vorhandene bzw. gelagerte Utensilien zurückgegriffen, womit nun ein Modell vorliegt, mittels dem nun zwei Funktionen ermöglicht werden. Diese wären einerseits als Demonstrationsversuch die Simulation der anno dazumal durchgeführten Tracerversuche im Dachsteingebiet zur Bestimmung der unterirdischen Abflusswege, wobei hier im Modellversuch modellhaft auf Lebensmittelfarbe zurückgegriffen werden kann (aber auch die Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen denkbar möglich wäre). Dabei ist es wesentlich, dass auch die einzelnen Bauteile des Modells, wie in der im Anhang vorzufindenden Beschreibung nachzulesen, erläutert werden und mit den in der Natur vorhandenen Gegebenheiten in Verbindung gebracht werden – insbesondere mit den im Inneren des Modells ersichtlichen Prozessen. Andererseits ermöglicht es das Modell Lernenden auch, nach gegebener Aufgabenstellung eigenständig im Sinne von Tracerversuchen mit entsprechenden Farbstofflösungen die hydrologischen Gegebenheiten des Bergmodells zu erforschen und schließlich einen Abflussplan zu skizzieren und damit das unterirdische Abflussverhalten modellhaft zu ermitteln – quasi äquivalent zu den tatsächlichen Tracerversuchen, lediglich kleinskaliert am Modell.

Als größter Schwachpunkt des Modells ist festzustellen, dass kontinuierlicher Abfluss – entstammend aus Schmelzwasser wie auch Regenwasser – sowie ein permanent vorhandener Grundwasserkörper fehlen und lediglich Tracerflüssigkeiten ins Modell eingespeist werden. Dadurch fehlt dem Modell eine wesentliche Komponente, die in der Realität sehr wohl auftritt und bei der Bearbeitung mit den Lernenden zumindest angesprochen werden sollte. Aber zumindest ein kontinuierliches Vorhandensein von Wasser kann angedacht werden, indem das Auffangbecken vor Versuchsdurchführung mit einer kleinen Menge ungefärbten Wassers befüllt wird. Andererseits stellt das Fehlen des kontinuierlichen Abflusses wiederum auch eine Elementarisierung dar, wenn es darum geht, dass Lernende selbstständig die Abflusswege ermitteln müssen, da aus den Quellen

schlussendlich rein die Tracerflüssigkeiten zu Tage treten und damit die Relationen zwischen Einspeisung und Quellaustritt im Modell klarer scheinen.

Schlussendlich ist auch festzuhalten, dass die genannten Prozeduren lediglich mit dem Original-Bergmodell dieser Masterarbeit nachgebildet werden können, womit das Vorhandensein desselben oder eines identen Nachbaus Voraussetzung wäre. Da Letzteres jedoch sehr viel Zeit in Anspruch nimmt, stellt dies für den Schulalltag kaum eine Option dar.

Große Stärke des Modells ist jedoch, dass der unterirdische Abfluss auf zweierlei Methoden dargestellt werden kann – wie bereits einleitend geklärt in Sinne einer demonstrativen Simulation oder andererseits durch eigenständiges, forschendes Lernen vonseiten der Lernenden durch Ermitteln von Abflussbeziehungen mittels Tracerversuchen am Modell selbst. Überhaupt wird diese Thematik durch das Modellexperiment aus organisatorischen Gründen und aufgrund des Maßstabes erst übersichtlich veranschaulicht und erfassbar. Schließlich ist neben einer möglichen, reinen theoretischen Abhandlung, eine praktische Durchführung von Tracerversuchen im schulischen Kontext im Gebirge freilich nicht möglich, was sich aus den im Kapitel 5.3. beschriebenen Eckpunkten zu den Tracerversuchen schlussfolgern lässt.

Zuletzt ermöglicht es diese Thematik den Lernenden auch Interdisziplinarität bewusst zu werden. Schließlich basiert die Technik der Tracerversuche, wie bereits beschrieben, auf chemischen wie auch physikalischen Grundlagen, die dann schlussendlich in anderen Disziplinen, wie hier der Hydrologie bzw. der Geographie wiederum Erkenntnisgewinn ermöglichen.

Insbesondere bei diesem Modell ist noch darauf zu verweisen, dass in Hinblick auf Schulklassen speziell die Abstraktion vom Modell auf die Natur in den Blick zu nehmen ist und für die Sicht der Lernenden jedenfalls klar zu machen ist, dass es sich beim unterirdischen Abfluss in der Realität natürlich nicht um Schläuche und Bahnen innerhalb eines Berges handelt, sondern dass diese im Modell lediglich dazu dienen, mit diesen die jeweils beschriebenen Sachverhalte entsprechend veranschaulichen zu können.

Die Versuchsanleitungen zu den aufgearbeiteten Experimenten finden sich im Anhang, wobei der Demonstrationsversuch zur Simulation des unterirdischen Abflusses in Karstgebirgen unter 3.1. sowie der Modellversuch zu den Tracerversuchen unter 3.2. beschrieben ist.

6. Gletscher

In Verbindung zu Karst stellen Karstgletscher eine eigene Naturerscheinung dar, weshalb in einem abschließenden Kapitel die Gletscher der Region dargestellt werden sollen, um zuletzt noch einmal mehr den Bezug zum Projekt GlacierXperience herstellen zu können.

6.1. Chemische und Physiogeographische Grundlagen

Unter Gletscher versteht man nach Winkler (2009, S. 9) „*große, hauptsächlich aus Schnee, Firn und Eis bestehende Massen, welche einer aktiven Bewegung unterliegen*“, wobei Gletscher auch Bestandteile wie Luft, Gesteinsfragmente und Schmelzwasser im Porenraum aufweisen können und von Eismassen ohne einer aktiven Bewegung, wie Wandvereisung, abgegrenzt werden müssen. Prägend ist die Dynamik – es muss im Winter mehr Schnee akkumuliert werden, als im Sommer wiederum abschmilzt, damit ein Gletscher entstehen bzw. bestehen kann (ebd.). Auf die Aspekte der Massenbilanz und der Gletscherbewegung sowie Gletscherspalten wird in den nachfolgenden Unterkapiteln eingegangen werden.

6.1.1. Aufbau und Massenbilanz

Gletscher bestehen aus einem höher gelegenen Akkumulationsgebiet (Akkumulation > Ablation) sowie einem tiefer gelegenen Ablationsgebiet (Ablation > Akkumulation). Jener Bereich, bei dem gilt Akkumulation = Ablation, wird als Gleichgewichtslinie bezeichnet und trennt Ablationsgebiet vom Akkumulationsgebiet (Winkler 2009, S. 39).

Unter Akkumulation versteht man die Massenzunahme eines Gletschers, welche primär durch winterlichen Schneefall erfolgt. Weitere Beiträge zur Akkumulation können in Hochgebirgsgletschern auch Windtrift sowie Lawinen von höheren Eisplateaus oder Wandvereisung liefern. Dagegen bezeichnet die Ablation den Massenverlust eines Gletschers. In Hochgebirgsgletschern erfolgt Ablation zum allergrößten Teil durch Abschmelzen (ebd., S. 36f.).

Der Grund für die zuvor beschriebene Unterteilung in Akkumulationsgebiet sowie Ablationsgebiet liegt darin begründet, dass sich Gletscher im Hochgebirge zumeist vertikal über viele Höhenmeter erstrecken und mit steigender Höhe einerseits die Temperatur sinkt, und andererseits aber die Niederschlagsmenge steigt. Dadurch findet man in höheren Lagen Gebiete vor, in denen über das Jahr gesehen die Akkumulation die Ablation übersteigt. Letztere läuft im Ablationsgebiet beschleunigt ab, da im Ablationsgebiet aufgrund der tieferen Lagen höhere Temperaturen auf zugleich eine geringere Schneemenge treffen (ebd., S. 39).

Dieser Sachverhalt kann nach Hansche et al. (2023, S. 14) mit nachfolgender Formel als Massenbilanz (B) dargestellt werden, wobei (C) der Akkumulation und (A) der Ablation entspricht.

$$B = C + A \quad (17)$$

Akkumulationsgebiet bzw. Ablationsgebiet werden auch als Nährgebiet bzw. Zehrgebiet bezeichnet – dieser Sachverhalt wird in Abbildung 59 dargestellt.

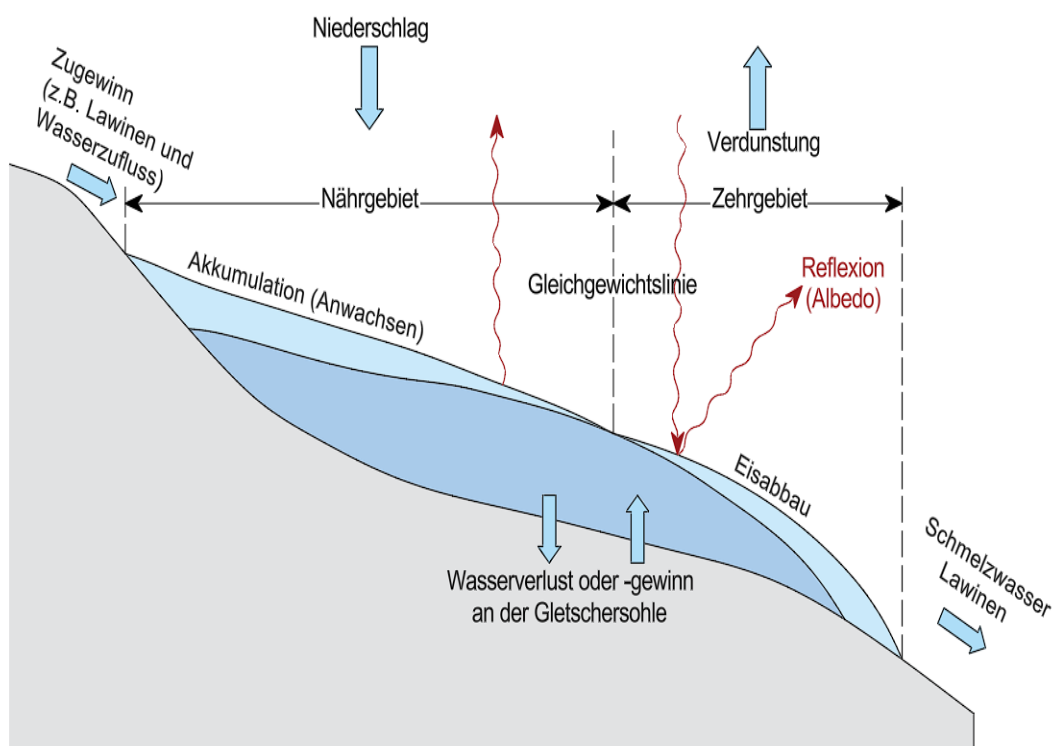


Abbildung 59: Schematische Darstellung des Gletscherhaushaltes (Muffat 2024, S. 33).

Um verschiedene Gletscher miteinander vergleichbar zu machen, wird die Massenbilanz durch die Gletscherfläche dividiert, um die spezifische Massenbilanz zu erhalten. Die Massenbilanz wird auf ein Jahr bezogen, wobei in Österreich das Haushaltsjahr von 1. Oktober bis 30. September des Folgejahres andauert und in eine Hälfte mit überwiegenden Massengewinn (Wintermassenbilanz von 1. Oktober bis 30. April) und eine Hälfte mit überwiegenden Massenverlust (1. Mai bis 30. September) geteilt wird (Hansche et al. 2023, S. 12).

6.1.2. Bewegung des Gletschers, Entstehung von Gletscherspalten und Transport

Wie bereits einleitend festgestellt, ist die aktive Gletscherbewegung definitionsgemäß ein für Gletscher relevantes Charakteristikum, welches nachfolgend kurz beschrieben werden soll. Grundsätzlich wird die Bewegung eines Gletschers aufgrund der Plastizität des Gletschereises ermöglicht (Hansche et al. 2023, S. 11) und findet ihre Ursache einerseits im Ungleichgewicht der Schneemassenverteilung zwischen Akkumulationsgebiet und Ablationsgebiet (vgl. auch Kapitel 6.1.) und andererseits in der Gravitation begründet (Winkler 2009, S. 22). Winkler (2009, S. 22 ff.) beschreibt drei Formen der Gletscherbewegung – nämlich Deformationsfließen, Basales Gleiten und Bewegung aufgrund von Deformation der unter Gletscher liegenden Sedimente. Als Folge der Bewegung von Gletschern entstünden Gletscherspalten (ebd., S. 27).

6.1.2.a. Deformationsfließen:

Da Gletschereis pseudoplastisches Verhalten aufweist – vgl. Fließgesetz von Glen^G – und nur bis zu einem bestimmten Druck elastisch reagieren kann, führt das Übersteigen einer bestimmten Schubkraft zur Deformation des Gletschereises. Je höher die Eismächtigkeit und steiler die Eisoberfläche ist, umso höher wird die Schubkraft. Sobald die Schubkraft 50 kPa überschreitet, tritt aufgrund der Massenungleichgewichte zwischen Akkumulations- und Ablationszone eine Gletscherbewegung auf, wobei die Deformation aufgrund von Gleitprozessen innerhalb der Eiskristalle auftritt (Winkler 2009, S. 23).

6.1.2.b. Basales Gleiten:

Wird an der Gletscherbasis der Druckschmelzpunkt von Eis erreicht, entsteht dort ein Wasserfilm mit einer Mächtigkeit von mehreren Millimetern. Auf diesem ist das darüber liegende Gletschereis imstande, zu gleiten und damit sich zu bewegen. Diese, als „Basales Gleiten“ zu bezeichnende Bewegungskomponente, wird dem Deformationsfließen hinzu addiert, womit man durch weiterer Addition der in 6.1.2.c. beschriebenen Komponente einen Gesamtbetrag für die Gletscherbewegung erhält (Winkler 2009, S. 23f.).

6.1.2.c. Bewegung aufgrund von Deformation der unter Gletscher liegenden Sedimente:

Voraussetzung für diesen Bewegungstyp ist ein Gletscheruntergrund aus Lockermaterial, bei dem die durch den Gletscher induzierte Schubkraft auch auf diese Sedimente wirkt und sich der Gletscher damit mit diesen in deren Richtung mit bewegt. Im Falle von Festgestein als Untergrund wäre dies aufgrund deren zu hohen Widerstandes gegenüber der Schubkräfte nicht möglich (Winkler 2009, S. 23).

Je geringer die Reibung am Gletscheruntergrund, umso effizienter gestaltet sich das Basale Gleiten. Reibung entstünde beispielweise durch Gesteinspartikel, währenddessen die Gleitgeschwindigkeit zunimmt, umso mächtiger bzw. reiner der Wasserfilm ist (ebd., S. 24).

6.1.2.d. Gletscherspalten:

Aufgrund von Spannungen im Gletschereis können Gletscherspalten entstehen, da die Fähigkeit zum plastischen Fließen nicht zu 100% gegeben ist. Dabei nimmt die Sprödigkeit des Eises mit sinkender Temperatur zu (Winkler 2009, S. 23). Die Ausprägung der Spalten beruht auf einer Kombination aus Relief des Gletscheruntergrundes und der unterschiedlichen Fließgeschwindigkeit der jeweiligen Eisschichten, wobei zwischen sogenannten A-Spalten sowie V-Spalten unterschieden werden kann (Moser 1997, S. 28).

V-Spalten entstehen, wenn das Eis über eine Gesteinsschwelle fließt. Dabei muss das Eis auf der Oberfläche eine weitere Strecke zurücklegen als tiefer im Untergrund, weshalb es im oberen Bereich V-förmig weiter aufreißt als in tiefer gelegenen Schichten (ebd.).

A-Spalten entstehen, wenn vom Gletschereis eine Mulde durchflossen wird. Hierbei tritt der gegenteilige Effekt auf, wonach das bodennahe Eis eine weitere Strecke zurückzulegen hat im Vergleich zu jenem, nahe der Oberfläche. In diesem Fall reißt eine Spalte in Form des Buchstaben A auf und die Spalte wird in der Tiefe breiter (ebd.). Abbildung 60 zeigt zwei Gletscherspalten aus der Region Dachsteingletscher.

Aufgrund der Bewegung des Gletschers stellt dieser zugleich auch ein Transportsystem dar, mittels dem in Kombination von Abtragung und Akkumulation Materialien über große Entfernungen transportiert werden können (ebd., S. 86). Schließlich führe die Bewegung bzw. der Transport durch den Gletscher zu unterschiedlichen Akkumulations- sowie Erosionsformen, deren Behandlung den Rahmen der Zielsetzung dieser Arbeit bei weitem übertreffen würde und etwa in Winkler (2009) in den Kapiteln 9 bis 12 nachzulesen sind.



Abbildung 60: Gletscherspalten in der Region Dachsteingletscher, das Gefälle führt jeweils in linke Richtung (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).

6.2. Kurzanalyse des Untersuchungsgebietes

Je nach Literatur findet sich eine unterschiedliche Zahl und Flächenausdehnungen für die Gletscher am Dachstein. Nach Moser (1997, S. 84) handelt es sich jedenfalls bei allen Gletschern am Dachstein um Karstgletscher. Auch Friedrich Simony hatte diese bereits als Plateau-Gletscher erkannt und diese in drei große (Hallstätter-, Schladminger- & Gosau-) sowie in drei kleine (Thorstein- Ramsauer- & Schneeloch-) Gletscher unterteilt (Kretschmer 2004, S. 54). Nach Mandl (2006, S. 203) existieren am Dachstein derzeit neun Gletscher. Diese Zunahme ist nicht aufgrund zusätzlicher Vergletscherung zu erklären, sondern dadurch, dass einstige Gletscher durch Abschmelzvorgänge oder ausgeaperte^G Gesteine geteilt worden sind. So ist etwa auch der Schmiedstockgletscher mittlerweile völlig abgeschmolzen. Nachfolgend sind die derzeitigen Gletscher (inkl. Schmiedstockgletscher) nach Größe geordnet (beginnend mit dem Größten), wie in Mandl (2006, S. 9) nachzulesen ist, und darauffolgend in Abbildung 61 kartiert:

Hallstätter Gletscher – Großer Gosaugletscher – Schladminger Gletscher – Schneelochgletscher – Kleiner Gosaugletscher – Untere Windlucke – Edelgriesgletscher – Nördlicher Thorsteingletscher – Südlicher Thorsteingletscher – Schmiedstockgletscher (abgeschmolzen).

(Die Karte in Originalgröße und unverzerrt findet sich im Anhang.)



1= Hallstätter Gletscher, 2= Großer Gosaugletscher, 3= Schladminger Gletscher, 4= Schneelochgletscher, 5= Kleiner Gosaugletscher, 6= Untere Windlucke, 7= Edlegrießgletscher, 8= Nördlicher Torsteingletscher, 9= Südlicher Torsteingletscher

Abbildung 61: Übersichtsdarstellung über die Dachsteingletscher (eigene Darstellung mittels QGIS 3.16 & OSM; Krobath & Lieb 2004 (S. 79), ennstalwiki 2024).

Nachfolgend wird der Hallstätter Gletscher exemplarisch als Größter und am besten Erforschter aus der Region kurz besprochen, wobei sich in Abbildung 62 Darstellungen des genannten Gletschers aus verschiedenen Perspektiven finden.

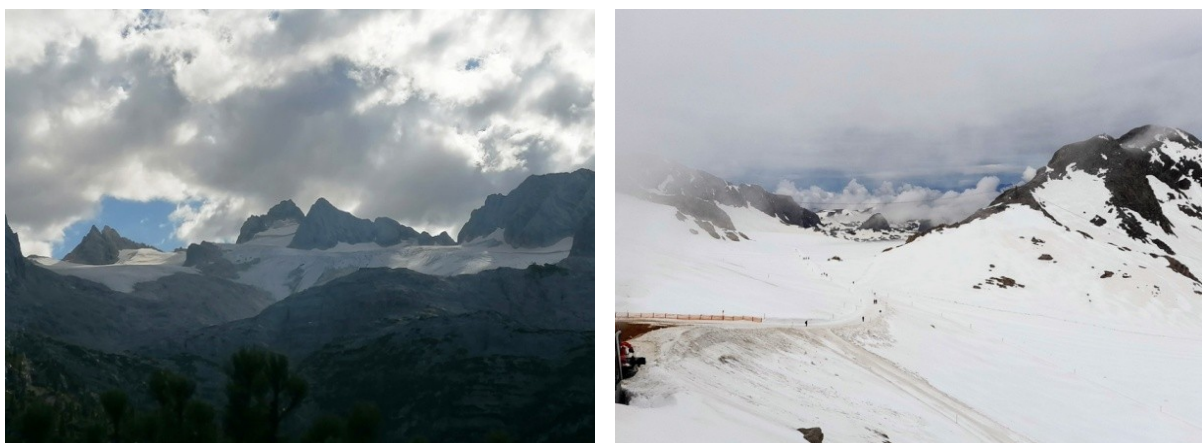


Abbildung 62: Hallstätter Gletscher; Links: Aufnahme vom Tal in Richtung Süden (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz); Rechts: Aufnahme vom Hunerkogel in Richtung Norden gerade aus in Richtung Hallstätter Gletscher, das Gefälle gegen Osten sind bereits Ansätze des Schladminger Gletschers (eigene Aufnahme, Mai 2024).

Der Gletscherhöchststand kann für das Jahr 1856 verortet werden, der dank Friedrich Simonys Aufzeichnungen auch kartographisch rekonstruiert gekonnt worden ist und eine Fläche von 525 ha, also 5,25 km² aufgewiesen hat (Böhm 1903, S. 357). In Tabelle 5 findet sich die Längen- und Flächenentwicklung seit dem Jahr 1850.

Tabelle 5: Gletscherlänge und Gletscherfläche des Hallstätter Gletschers, gerundet (Krobath & Lieb 2004 S. 83 & 88; Hansche et al. 2023, S. 91 & Böhm 1903, S.357)

Größe/Jahr	1850	1856	1958	2022
Gletscherlänge	3,8 km	-	2,5 km	1,5 km
Gletscherfläche	5,10 km ²	5,25 km ²	3,50 km ²	2,45 km ²

Auf Basis von seismischen Messungen sind für das Jahr 1967/68 auch Werte für Eisvolumen sowie Eismächtigkeit ermittelt worden. Das Eisvolumen hat sich zu diesem Zeitpunkt für den Hallstätter Gletscher auf 118,1 Mio m³ Eis (106,3 Mio m³ Wasser) mit einer mittleren Mächtigkeit von 33 Metern belaufen (Brückl et al. 1971, zitiert nach Krobath & Lieb 2004, S. 92). Diese Zahlen verdeutlichen, um welche Eismassen es sich handelt, wenn in der Massenbilanz 2021/2022 für den Hallstätter Gletscher nach Hansche et al. (2023, S. 94f) als Jahresbilanz der Wert von -2602 mm w.e. (1698 mm w.e. Sommerbilanz bzw. -4291 mm w.e.) genannt wird, was nach ebendieser Quelle einem Rückgang im Wasservolumen von 6,3 Mio. m³ und in der Eismächtigkeit von 3 m entspricht. Darin wiederum spiegeln sich die Auswirkungen des Klimawandels, zu dem bereits in den Ausführungen zu den Lehrplänen in Kapitel 2 Bezüge hergestellt worden sind.

6.3. Fachliche Klärung für ein Modellexperiment

Schüler*innenvorstellungen zeichnen in Bezug auf Gletscher häufig ein Bild, dass Gletscher ein statisches, starres Gebilde seien (Reinfried & Hug 2008, S. 42), weshalb der experimentelle Fokus im Weiteren auf die Gletscherdynamik gelegt werden soll. Bilder von Gletschern wurden in zitierter Studie von den Lernenden selten als Gletscher, sondern eher als z.B. schneebedeckte Straßen oder zugefrorene Flüsse fehlidentifiziert.

Erste Beobachtungen zu Größenveränderung und Bewegung des Hallstätter Gletschers hat schon Friedrich Simony aufgrund seiner 50-jährigen Gletscherbeobachtungen am Dachstein dokumentiert (Erstbesteigung 1840, Letztbesteigung 1890). In den 1840er Jahren ist von Friedrich Simony selbst noch ein Anwachsen des Gletschers festgestellt worden, welches er mit eigenen Sinnen zu hören vermocht hatte und nach Grims 1996 (S. 55) als „zweimalige, in

der lautlosen Stille des kalten Oktobermorgens deutlich hörbare dumpfe Krachen des Eiskörpers“ beschrieben hat. Außerdem hat er das Anwachsen durch in den Eisrand eingemeißelte Kreuze festgestellt, während er ab den späten 1850er-Jahren bereits wieder einen Rückgang des Gletschers feststellen zu müssen hatte (ebd., S. 55). Dem Abschmelzen hat er sich im Speziellen in seinem Werk „Das Schwinden des Karlseisfeldes nach fünfzigjährigen Beobachtungen und Aufnahmen“ nach seiner letzten Dachsteinbesteigung 1890 gewidmet (ebd., S. 22).

Qualitative Beobachtungen zur Bewegung von Gletschern können auch anhand einzelner Fallbeispiele gezeigt werden, die etwa in Moser (1997, S. 79) beschrieben sind. So beschreibt Moser, dass die Oberflächenbewegung im Firngebiet etwa sehr gering sei, was er anhand eines Hirschskeletts argumentiert. Dieses sei in 2665 Meter Höhe nahe dem Gjaidsteinsattel gelegen und war selbst nach einem Jahr Liegezeit örtlich unverändert, womit Moser auf eine geringe Geschwindigkeit der Bewegung geschlossen hatte. Deutlich andere Bedingungen beschreibt Moser mittels eines anderen Beispiels in tieferen Schichten des Gletschers. So seien 1947 während eines Gewitters sieben Schafe in eine Gletscherspalte gefallen und vier Jahre später stark deformiert an den Scherflächen des Zungeneises in Form von stark zertrümmerten und abgerundeten Skelettteilen wieder freigegeben worden.

Winkler (2009, S. 23) beschreibt wiederum, das Deformationsfließen sichtbar machen zu können, indem man Hohlräume in das Gletschereis schmelze, welche sich eben aufgrund des Deformationsfließens nach wenigen Tagen wieder selbstständig verschließen würden.

Modellexperimente, zu den zuvor theoretisch aufgearbeiteten Themen sollen nachfolgend einerseits mit Eis in Form von Eiswürfel selbst ausgestaltet werden als auch mittels Superabsorber, welcher als Modellmaterial dienen soll.

6.4. Aufbereitung für ein Modellexperiment

Experimentell soll die Thematik zur Bewegung von Gletschern sowie zur Entstehung von Gletscherspalten aufgearbeitet werden, wobei im Falle der Gletscherbewegung insbesondere das Basale Gleiten in den Blickpunkt gerät.

6.4.1. Basales Gleiten

Zum Modellieren des Basalen Gleitens ist Schleifpapier auf einem Zinkblechstreifen mittels Heißkleber fixiert worden. Dies soll im Modell den rauen Gesteinsuntergrund nachstellen. Mittels Eiswürfel ist der darüber liegende Gletscher modelliert worden. Entsprechend der

schwarzen Pfeile in Abbildung 63 ist mittels Finger durch Druck eine Kraft auf den Eiswürfel angewandt worden, nämlich zuerst vertikal nach unten gedrückt und unter dieser Druckausübung folgend versuchend, den „Gletscher“, also Eiswürfel, horizontal zu bewegen. Hierbei ist festzustellen gewesen, dass sich aufgrund der Reibung der Eiswürfel zuerst nicht bewegen lässt. Sobald jedoch aufgrund von Schmelzprozessen eine feine Wasserschicht zwischen Eis und groben Untergrund vorhanden war, ist festzustellen gekonnt worden, dass das Eis ohne Schwierigkeiten entlang der Basis gleitet, äquivalent zum Basalen Gleiten. Die einwirkenden Kräfte würden in der Natur hierbei jedoch durch die Gravitation und der Masse selbst erfolgen.

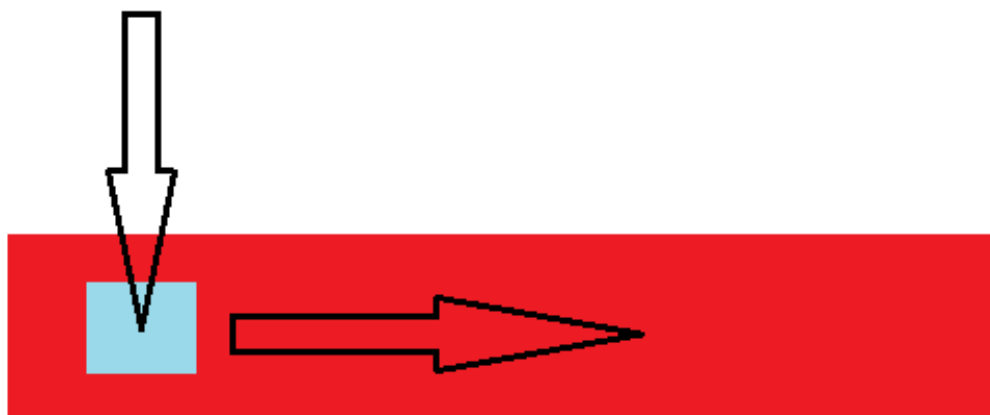


Abbildung 63: Versuchsaufbau zum Basalen Gleiten, in roter Farbe das Schleifpapier, in blauer Farbe der Eiswürfel, die Pfeile stellen die aufzuwendenden Kräfte dar (eigene Darstellung mittels MS-paint, September 2024).

6.4.2. Entstehung von Gletscherspalten

Die Entstehung von Gletscherspalten sollte durch Superabsorber, aufgetragen auf eine Gesteinsprobe – siehe Abbildung 64, modelliert werden, welcher dabei nach und nach mit Wasser betropft worden ist. Im Gegensatz zu Gletschereis, welches sehr spröde ist, weißt der Superabsorber eine deutlich andere Konsistenz bzw. Viskosität auf, aufgrund derer ein Modellieren von Gletscherspalten nur wenig erfolgreich verlaufen ist.

Nach Durchblick der zahlreichen Fotos in Serie zum Versuch zur Entstehung von Gletscherspalten hat sich daraus aber unerwartet die Frage eröffnen, inwieweit die Möglichkeit bestehen könnte, mittels Serienaufnahme auf digitalem Wege durch Verwendung von Superabsorber Themenbereiche wie Massenbilanz und Gletscherbewegung darstellen zu können, angelehnt an die Beschreibungen im Kontext zur Abbildung 59.



Abbildung 64: Versuche zur Entstehung von Gletscherspalten mittels Superabsorber (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

6.5. Diskussion

Das Modellieren jenes Beitrages zur Gletscherbewegung, welcher als Basales Gleiten bekannt ist, erfolgt mit einfachster Versuchsdurchführung. Für die Modellierung von Gletscherspalten eignet sich das genutzte Material aufgrund seiner konträren Eigenschaften zu spröden Gletschereis jedoch nur im begrenzten Maße, währenddessen schlussendlich offen bleibt, ob durch Aufnahme einer Serienfotografie jener beschriebenen Durchführung nicht etwa auf digitalen Wege eine Darstellung zu erarbeiten wäre, die es ermöglicht, die Gletscherbewegung inkl. Massenbilanz eines Gletschers zu modellieren, insbesondere, wenn man die Durchführung nicht nur auf einer einzelnen Gesteinsprobe vollzieht, sondern beispielsweise in das Gletschermodell nach Umweltbildungszentrum Steiermark (k.A.) einbettet.

Die Versuchsanleitung zum Modellieren des Basalen Gleitens findet sich im Anhang unter 4.1.

Fazit & Ausblick

Insgesamt konnten im Zuge dieser Arbeit schlussendlich zehn Anleitungen für Modellexperimente zur Veranschaulichung von Naturphänomenen aus der Region Dachsteingletscher in unterschiedlichen Modellierungsgraden verfasst werden. Diese umfassen nicht nur die in den ursprünglich definierten Forschungsfragen genannten Fachbereiche der Karsterscheinungen, des unterirdischen Abflusses und der Gletscherbewegung, sondern umfassen auch das im Zuge der Ausarbeitungen identifizierte Themenfeld der Geologie, welches mit vier Experimenten aus dem Bereich der Analytischen Chemie näher veranschaulicht werden konnte.

Im Speziellen zur Geologie werden zwei Versuche dargestellt, bei denen das in der Region vorherrschende Gestein, nämlich Dachsteinkalk, qualitativ analysiert wird. Dabei werden Calciumkationen nach Lösen der Probe mittels zweier Fällungsreaktionen - einerseits mit Natriumcarbonatlösung und andererseits mittels einmolarer Schwefelsäure - und anschließender Flammenfärbung durch die zuvor entstandenen Niederschläge identifiziert und die Carbonatanionen schließlich durch Reaktion mit Säure. Nicht zuletzt kann auch durch Nutzung einer geeigneten, hier präsentierten Apparatur aus Einwegspritzen das dabei entstehende Gas aufgefangen und als Kohlenstoffdioxid durch Reaktion mit einer Calciumhydroxidlösung bestätigt werden. Zwei weitere Versuchsanleitungen behandeln die Analytik von weiteren Elementen aus vorliegenden Gesteinsproben. Hierbei wird zunächst eine Methode präsentiert, mittels derer nicht nur im Labor Gesteinsproben, sondern auch direkt im Gelände Gesteine mittels halbquantitativer Schnelltests (Teststreifen) sowohl auf Eisen- als auch auf Kupferionen qualitativ analysiert werden können. Didaktisches Interesse besteht dabei vor allem darin, dass dadurch das Phänomen „bunter Gesteine“ durch Beimengung anderer Substanzen geklärt werden kann sowie auch veranschaulicht wird, dass Gestein eben nicht nur aus einer Verbindung besteht, sondern aus mehreren Komponenten aufgebaut ist. Denselben Zweck erzielt der Versuch Nummer vier, jedoch mit klassisch nasschemischen Methoden im Labor (Nachweis von Eisenionen in Rotschlammablagerungen mittels Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lösung sowie von Kupferionen in Malachit mittels Natriumcarbonatlösung).

Zum Themenbereich der Karsterscheinungen können abschließend drei Versuche dargelegt werden. Der erste Versuch dazu widmet sich allgemein der Löslichkeit von Kalkgestein und jener Gegebenheit, dass Säure eine der Voraussetzungen für die Verkarstung von Kalkgestein darstellt, wozu modellhaft Lösungsversuche von Marmorproben in unterschiedlichen Medien – reines Wasser, kohlensäurehaltiges Wasser (kalt), kohlensäurehaltiges Wasser (warm), einer Huminsäure-Aufschlammung und als Referenz in Salzsäure durchgeführt werden. Die gelöste Menge an Calciumionen wird dabei indirekt

mithilfe eines Schnelltests für die Gesamthärte, wie er etwa im Wasseranalysekoffer Visocolor School vermarktet wird, bestimmt, womit Rückschlüsse auf die chemischen Prozesse bei verschiedenen Bedingungen im Verkarstungsprozess gezogen werden können. Auf Karstformen beziehend ist es gelungen, experimentell die Modellierung von Lösungsdolinen darzustellen sowie Modellversuche zur Entstehung von Karstrillen zu formulieren, die mittels Salzsäure als Modellsäure sowie im Falle der zu modellierenden Dolinen mittels in Teelichtformen gepresstes Calciumcarbonat bzw. im Falle der zu modellierenden Karstrillen mittels polierten Marmorplatten als modellhaften Untergrund einfach durchgeführt werden können.

Bezüglich des vom Karst bedingten unterirdischen Abflusses, dem sich eigens ein Kapitel im Besonderen widmet, können in Form von zwei Experimenten mittels eines im Zuge dieser Masterarbeit konstruierten Bergmodells jene Gegebenheiten veranschaulicht werden, die für das unterirdische Abflussverhalten in Karstgebirgen, im Speziellen auch das der Dachsteinregion, verantwortlich sind und auch die im achten Zehntel des 20. Jahrhundert durchgeführten Tracerversuche zur Untersuchung der Abflussverhältnisse in der Dachsteinregion simuliert werden. Dabei ist es erweiternd möglich, dass Lernende - durch Vollziehung geeigneter Versuche am Bergmodell - eigenständig die Abflussverhältnisse dieses Modells ermitteln können und z.B. in Form einer Graphik darlegen. Damit führen die Lernenden modellhaft selbst Tracerversuche durch und erhalten damit besseres Verständnis von Bedeutung und Funktion des unterirdischen Abflusses sowie Einblick in (teils historische) hydrogeologische Forschung diesbezüglich. Als wesentlichste Elemente des Modells sind hierbei zu nennen, dass einerseits der vertikale Abfluss durch lösliches wie auch geklüftetes Karstgestein sowie andererseits der darauf folgende, horizontal abfallende Abfluss entlang wasserundurchlässige Schichten – die im Falle der Dachsteinregion ein bemerkenswertes Süd-Nord-Gefälle aufweisen – bis zu deren Erreichen der Erdoberfläche an Karstquellen entsprechend modelliert werden, wobei im Modell statt der Fluoreszenztracer auf Lebensmittelfarben als Modelltracer zurückgegriffen werden kann.

Das abschließende Kapitel zum Themenkomplex der Gletscherbewegungen bringt zumindest mit einem Experiment jene Möglichkeit hervor, mit einfachsten Mitteln in Form eines Eiswürfels und einer mit Schleifpapier versehenen Metallplatte eine der beiden Komponenten der Gletscherbewegung zu modellieren, nämlich das „Basale Gleiten“.

Zusätzlich zu jenen Naturphänomenen, die in Form von Anleitungen für Modellexperimente Einzug finden konnten, gesellen sich zwei weitere Versuche hinzu, die im Zuge der Labortätigkeit getestet wurden, für die es abschließend allerdings nicht sinnvoll möglich war, diese in Form von Versuchsanleitungen für Modellexperimente zu finalisieren. Dies ist zunächst der Versuch, durch die auf eine flache Karststeinprobe aufzusetzende

Wassersäule die Durchlässigkeit von Karstgestein zu veranschaulichen. Wenn auch dies zwar nicht gelang, konnte dann beim Einsatz von Salzsäure zumindest das Entstehen einer eindrucksvollen Hohlform in der Probe festgestellt werden. Außerdem musste der Ansatz des Modellierens der Entstehung von Gletscherspalten mittels Superabsorber verworfen werden. Dieser scheiterte nämlich daran, dass der Superabsorber von seiner Dynamik her sehr wohl zwar dem Ansinnen nach einen Gletscher modellhaft visualisieren könnte, es aufgrund seiner, im Gegensatz zum Gletschereis, nicht vorhandenen Sprödigkeit jedoch nicht ermöglicht, die Bildung von Gletscherspalten zu veranschaulichen.

Aus alledem ergeben sich jedoch auch Ausblicke auf potentielle Bereiche, die auf Ausführungen dieser Arbeit fußen und aufbauen können. Die da wären zunächst im Bereich der Geologie und der Analytischen Chemie zu finden und zwar einerseits die Möglichkeit, für die Analytik des Dachsteinkalks eine Lernumgebung so zu gestalten, welche nicht nur auf die hier spezifischen Nachweise für ganz bestimmte Elemente zurückgreift, um die Geologie des Untersuchungsgebietes modellhaft zu veranschaulichen, sondern, dass mit einem stärkeren Fokus auf die Disziplin der Analytischen Chemie geachtet, Dachsteinkalk als Realprobe eingesetzt wird und dieser klassisch mittels Aufschluss und Durchführung eines klassischen Ionentrennungsganges qualitativ analysiert werden kann mit für die Lernenden dadurch noch offenen Ausgang, welche Ionen das zu analysierende Gestein tatsächlich enthält.

Andererseits beruht ein weiterer potentieller Ausblick auf den Versuchen zur Modellierung von Gletscherspalten mittels Superabsorber. Dieser Versuch ist als solcher zwar nicht verwertbar, wie er hier beschrieben wurde, allerdings hat die mehr oder weniger als Zufallsbefund erkannte Dynamik nach Durchsicht auf den während der experimentellen Arbeiten im Labor entstandenen Fotoaufnahmen des genannten Versuchs die Fragestellung eröffnet, ob durch Auftragen von Superabsorber auf eine Gesteinsprobe (oder etwa auch auf das Gletschermodell nach Umweltbildungszentrum Steiermark (k.A.) und anschließend entsprechend digitaler Bearbeitung der Fotoaufnahmen nicht jenes Potential vorliegen könnte, darüber zumindest das dynamische Bewegen eines Gletschers besser veranschaulichen zu können. Dazu seien entsprechende Ausführungen allerdings nun ausständig. Für diese Ausführungen müssten Serienfotoaufnahmen generiert werden, während des nach und nach erfolgendem Zupipettieren von Wasser auf das modellhaft angenommene Nährgebiet im oberen Bereich des aufgetragenen Superabsorbers und des sich dabei veränderlichen Superabsorbers aufgrund des Wassereinflusses bzw. der damit verbundenen Massenzunahme.

Nicht zuletzt konnte eine interdisziplinäre Einordnung der Thematik auf Basis österreichischer Lehrpläne für den Schulunterricht erfolgen. Hierbei sind die

Unterrichtsfächer Chemie sowie Geographie und wirtschaftliche Bildung federführend. Dabei kommt als Zielgruppe jedoch nicht nur der Schulunterricht entsprechend der Schulstufen nach den Lehrplanbezügen in Frage, sondern es ist auch eine Anwendung der Versuche im Sinne eines Gletscherlabors im Zuge des Projektes GlacierXperience denkbar. Insbesondere aber die Experimente, die das Bergmodell zum Mittelpunkt haben, fokussieren sich aufgrund der Notwendigkeit, für diese das Modell zur Verfügung zu haben, im Speziellen auf das Gletscherlabor im Kontext des Projektes GlacierXperience.

Den interdisziplinären Charakter aus Geographie und Chemie prägt schließlich auch die gesamte Rahmung der Arbeit, welche von der ursprünglichen Regionalisierung des Untersuchungsgebietes Dachsteinregion ausgegangen ist, die insofern zusammenzufassen ist, als dass diese - im Dreiländereck zwischen der Steiermark, Salzburg und Oberösterreich liegend - aus Dachsteinstock, Grimmingstock, und Gosaukamm besteht. Entsprechend der jeweiligen Definition umfasst die Region diverse weitere Gebiete, nämlich nach AVE 14 auch den Sarsteinstock, nach der ursprünglichen Definition von Friedrich Simony auch im Südwesten entlang der Enns und dem Fritzbach liegende Gebiete bei Radstadt sowie Eben im Pongau.

Geprägt wird die Region auch durch das Vorhandensein von neun Gletschern, wobei relevante Flusssysteme durch Enns sowie Traun (Entwässerung in Richtung der Donau), und weiteren kleinen Bächen im Westen des Gebietes, die mittelfristig in die - nicht mehr durch die Dachsteinregion fließende - Salzach entwässern, gegeben sind. Darauf folgte eine Auswahl von in der Region typischen, geographisch wahrnehmbaren Naturphänomenen, die zuvorderst einer physiogeographischen und ggf. auch chemischen Klärung in den einzelnen Fachkapitel unterlagen, der anschließenden, speziellen Verortung im Untersuchungsgebiet, um diese dann schließlich nach einer fachlichen Hinführung mittels Modellexperimente auf chemischer Ebene und/oder mittels chemischer Methoden zu veranschaulichen. Als Output liegen nun eben diese Arbeit sowie im Anhang die dazugehörigen Versuchsanleitungen und zwei eigens gestaltete Übersichtskarten vor.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hoher Dachstein vom Süden aus gesehen - westlich davon der Mitterspitz (eigene Aufnahme, Juli 2024).	9
Abbildung 2: Links oben: Der Grimming aus dem Ennstal mit Blick Richtung Nordwesten, östlich davon die enge Schlucht des Grimmingbaches in Richtung des Mitterndorfer Beckens erkennbar; Rechts oben: Der Gosaukamm aus dem Gosauer Becken; Unten: der Sarstein südöstlich vom Bahnhofsgebäude von Bad Goisern emporstehend (eigene Aufnahmen, August 2020, Jänner 2024 & Juli 2024).....	10
Abbildung 3: Regionalisierung der Dachsteinregion nach Simony & AVE 14 (eigene Darstellung mittels QGIS 3.16, OSM, Grassler 1984 & Simony 1895).	11
Abbildung 4: Nordseite des Dachsteinmassivs mit Hallstätter Gletscher (eigene Aufnahme, Juli 2024).	13
Abbildung 5: Fachdidaktisches Triplet (Kattman et al. 1997, S. 4).	15
Abbildung 6: Dachsteinkalk in der Dachsteinregion; Links gebankter Kalk; Rechts: Riffkalk	21
Abbildung 7: Rotablagerungen im Dachsteinkalk (eigene Aufnahme, Mai 2024).	22
Abbildung 8: Probe Dachsteinkalk; Links: original; Rechts Reaktion unter Zugabe von Salzsäure (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	26
Abbildung 9: Die Probelösung verfärbt sich im Laufe des Lösungsvorganges grau (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	27
Abbildung 10: Nach dem Filtrieren der Probelösung erhält man ein sehr klares Filtrat (rechts), während links der Filtrerrückstand von grauer Beschaffenheit ist (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	27
Abbildung 11: Links: Flockiger Niederschlag nach Zugabe von Natriumcarbonatlösung; Rechts: Fein verteilter Niederschlag nach Zugabe von Schwefelsäure – dieser bildet sich jedoch erst nach mehreren Minuten unter Zuhilfenahme eines Glasstabes, mit welchem an der Reagenzglasinnenwand gerieben wird (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	28
Abbildung 12: Einen Tropfen der Probelösung versetzt mit Schwefelsäure auf einem Objektträger unter der Lupe beobachtend; Links: Direkt nach Entnahme aus dem Reagenzglas; Mitte: Nach wenigen Minuten ist eine Schlierenbildung zu erkennen bis nach rund 5-10 Minuten im Tropfen ein fein verteilter Niederschlag vorliegt (rechts) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	28
Abbildung 13: Links: Ungefärbte Flamme beim Ausglühen des Magnesiastäbchens; Mitte & Rechts: Flammenfärbung durch die Niederschläge, wobei zu erkennen ist, dass die Probe in der Mitte bei der Fällung als Carbonat eine intensivere Färbung ergibt, als jene Probe rechts bei der Fällung als Sulfat (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	29
Abbildung 14: Analyseapparatur – 3 Einwegspritzen sind über zwei Dreiwegeventile verbunden. In der oberen Spritze liegt einmolare Salzsäure vor, in der unteren Spritze die Probe aus Dachsteinkalk. Die waagrechte Spritze in der Mitte dient zum Auffangen des entstehenden Gases. Alternativ kann diese bereits zu einem Viertel mit Calciumhydroxidlösung versehen sein, sollte in diesem Fall aber bereits zur Hälfte aufgezogen sein. Befestigt ist die Apparatur mit 2 Stativklammern am Stativ, wobei diese jeweils am Spritzenkolben sowie Spritzenzylinder der unteren Spritze mit der Probe angebracht sein müssen, damit deren Volumen trotz Gasentwicklung konstant bleibt (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	30

Abbildung 15: Links oben: Mit den Dreivegeventilen kann die Zuführung der Säure und die Ableitung des Gases reguliert werden – wesentlich ist, dass man die Entstehung eines Überdruckes verhindert, da dieser ein Risiko darstellen kann, da die Apparatur sowohl mit Säure und einer Base gefüllt ist. Sicherheitshalber ist im Abzug hinter Schutzglas gearbeitet worden; Rechts oben: Die Probe liegt in der unteren Spritze vor und enthält idealerweise auch Rotablagerungen; Unten: die waagrechte Spritze ist mit Calciumhydroxidlösung versehen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	31
Abbildung 16: Links: Calciumhydroxidlösung; Mitte: Calciumhydroxidlösung, nachdem mittels Spritze das entstandene Gas in die das Reagenzglas eingebracht und geschwenkt worden ist; Rechts: Einwegspritze mit Calciumhydroxidlösung, die an der Apparatur angebracht worden ist und Reaktionsgas aufgenommen hat (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	31
Abbildung 17: Links: Nach Zugabe der Salzsäure in die Probenspritze startet eine starke Reaktion unter Gasentwicklung, die Lösung erhält eine rot/graue Farbe; Mitte: Der Filtrerrückstand ist deutlich rot; Rechts: Das Testfeld des Schnelltests für Eisenionen verfärbt sich blau - näheres zu den Schnelltests findet sich im nachfolgenden Unterkapitel (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	32
Abbildung 18: Adaptierte Apparatur mit 3. Stativklemme (eigene Aufnahme, September 2024).	33
Abbildung 19: Oben von Links nach Rechts: Marmor – Hallstätter Kalk – Rotschlammablagerung auf Dachsteinkalk; Unten von Links nach Rechts: Dachsteinkalk, Kupferschlacke, Malachit (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	34
Abbildung 20: Schnelltest für Eisenionen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	34
Abbildung 21: Schnelltest für Kupferionen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	35
Abbildung 22: Nachweis von Eisenionen in Rotschlamm; Links: Rotschlammablagerung auf Dachsteinkalk; Mitte: Rotschlamm, gelöst in Salzsäure; Rechts: nach Zugabe von Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lösung (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	36
Abbildung 23: Nachweis von Kupferionen in Malachit; Links: Malachit; Mitte: Malachit-Lösung; Rechts: nach Zugabe von Natriumcarbonat-Lösung (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	36
Abbildung 24: Untersuchung der Lösungen mittels Teststäbchen auf Eisen- bzw. Kupferionen; Links: Lösung von Rotschlamm in Salzsäure; Rechts: Der Eisenschnelltest färbt sich nach Untersuchung der Probelösung intensiv blau; Unten: Malachitlösung nach Zugabe von Natriumcarbonatlösung, der Kupferschnelltest färbt sich nach Untersuchung der Lösung violett (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	37
Abbildung 25: Beispiele für Karstrillen aus der Dachsteinregion (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).	44
Abbildung 26: Beispiele für Dolinen – diese können in verschiedener Größe und Dichte auftreten – hier zur Veranschaulichung allerdings aus der Region Hohe Veitsch (eigene Aufnahme, August 2024).	44
Abbildung 27: Eine mit Firn und Eis gefüllte Doline - zur Veranschaulichung aufgenommen jedoch auf der Hohen Veitsch (eigene Darstellung, August 2024).	45
Abbildung 28: Strukturen EDTA (links) & Metall-EDTA Komplex (rechts) (wikimedia 2024a & wikimedia 2024b).	50
Abbildung 29: EDTA-Dinatrium-Salz (Molview 2024).	50

Abbildung 30: Kalk bzw. Calciumcarbonat in Form von Pulver (links) sowie in Form von Marmor (rechts) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	52
Abbildung 31: Lösungsversuche von Marmor in verschiedenen Medien von links nach rechts: destilliertes Wasser - Kohlensäure warm (ca. 25°C) - Kohlensäure kalt (ca. 10°C) – Huminsäure - Salzsäure (einmolar) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	52
Abbildung 32: Gut zu erkennen ist die unterschiedlich starke Gasentwicklung je nach Lösungsumgebung – am stärksten ist diese in der Salzsäure rechts unten, ebenso noch deutlich zu erkennen in kalter Kohlensäure in der Mitte (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	53
Abbildung 33: Links oben: Alle Lösungen werden filtriert und anschließend auf 100ml mit destilliertem Wasser verdünnt, wobei die in Salzsäure gelöste Probe auf 500 ml verdünnt wird; Recht oben: je 5 ml der Probelösungen versetzt mit je 2 Tropfen GH-1; Unten: Probelösungen nach Versetzen mit GH-2 (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024/September 2024).	54
Abbildung 34: Marmorplatte zur Modellierung der Karstrillen-Genese (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	56
Abbildung 35: Gasentwicklung nach Zugabe einmolarer Salzsäure – Säure reagiert mit Calciumcarbonat unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid. Das ist in Form der Gasbläschen erkennbar (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	57
Abbildung 36: Nach Entfernen des Salzsäuretropfens ist eine „Beschädigung“ der vormals glatten Marmoroberfläche zu erkennen – wenn man sich nun kein punktuell Einwirken, sondern lineares Abfließen säurehaltiger Medien entlang von Gesteinspaketen aus Calciumcarbonat über einen längeren Zeitraum in Überlegung ruft, lässt sich daraus schließlich auch die Entstehung von Karstrillen imaginieren (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	58
Abbildung 37: Herstellung einer huminsäurehaltigen Aufschlammung – 3,5 g Huminsäure auf 100 ml Wasser – die Zubereitung erfolgt mittels Magnetrührer (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	58
Abbildung 38: Links: Einspannen mittels Stativklemme ermöglicht zwar lineares Abfließen, allerdings ist die Einwirkzeit in Bezug auf das Modellexperiment zu kurz, um sichtbare Resultate zu erhalten; Rechts: Weitere Marmorprobe gefärbt (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	59
Abbildung 39: Linearer Auftrag von Salzsäure auf die Marmorprobe; Links: ganz deutlich zu sehen die Entwicklung von Gasbläschen durch Reaktion der Säure mit dem Calciumcarbonat; Rechts: lineare Lösungsrückstände nach Entfernung der Säure ermöglichen ein Verständnis zur Genese von Karstrillen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	60
Abbildung 40: Abbildung 39 unter der Lupe; Links Gasentwicklung; Rechts scharfe Abgrenzung zwischen den Bereichen mit/ohne Säureeinwirkung – oberer Bereich mit vorangegangener Säureeinwirkung (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	60
Abbildung 41: Teelichtschale mit dicht gepressten Kalk in Pulverform links bzw. rechts Sand als Grundlage zur Modellierung der Genese von Lösungsdolinen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	61
Abbildung 42: Die Teelichtschalen werden am Stativ eingespannt, darunter eine Glasschale zum Auffangen von „versickender“ Flüssigkeit (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	61
Abbildung 43: Zugabe eines Tropfens Salzsäure; Links: im Kalk zeigt sich ein deutlicher Reaktionsrückstand; Rechts: Sand wird durch die Säure lediglich feucht (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	62

Abbildung 44: Im Gegensatz zum Kalkuntergrund bildet sich bei selber Versuchsdurchführung im Sand keine Trichterform aus – der Boden quillt ob der Flüssigkeit lediglich auf (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	63
Abbildung 45: Zeitleiste Dolinenmodellierung: Abwechselnde Zugabe von Salzsäure und Wasser (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	63
Abbildung 46: Vergleich der Kalk- bzw. Sandprobe nach Versuchsdurchführung: Während die Salzsäure im Kalkuntergrund eine deutliche Trichterform hinterlassen hat inkl. eines stark ausgeprägten Schluckloches, ist beim Sanduntergrund nichts dergleichen festzustellen (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	64
Abbildung 47: Beispiel für eine Schwinde bzw. ein Schluckloch, hier abgebildet jedoch aus der Region Hohe Veitsch (eigene Aufnahme, August 2024).	67
Abbildung 48: Sporentriftversuche 1958 (Bauer, Zötl & Mayer 1958, zitiert nach Umweltbundesamt 1989, S. 37).	70
Abbildung 49: Ergebnisse der Markierungsversuche im Dachsteingebiet 1984-1986 (Umweltbundesamt 1989, S. 27).	73
Abbildung 50: Saugender Karst (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).	75
Abbildung 51: Verschiedene Varianten einer Wassersäule, aufgesetzt auf eine flache Karststeinprobe; Links: Messzylinder mit Gewebeband befestigt – undicht; Mitte & Rechts: Spritzenzylinder mit Heißkleber befestigt – nach zahlreichen Optimierungsversuchem ist damit ein wasserdichter Aufbau erzielt worden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	75
Abbildung 52: Die Versuchsdurchführung erfolgt eingespannt am Stativ (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024). ..	76
Abbildung 53: Befestigung und Abdichtung Spritzenzylinder/Gesteinsoberfläche mittels Heißkleber (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	77
Abbildung 54: Optimierte Apparatur, vor Inbetriebnahme (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	77
Abbildung 55: Optimierte Apparatur in Betrieb; Links: Überblick; Rechts: Detaillierter Blick auf die Dreiwegeventile (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	78
Abbildung 56: Links: Starke Reaktion unter Gasbildung bei Verwendung von Salzsäure, ein Durchsickern ist aber dennoch nicht erreicht worden, allerdings ist nach Entfernung des Aufsatzes eine deutliche Hohlform zu erkennen, die die Säure (rechts) ausgelöst hat (eigene Darstellung, Mai-Juni 2024).	79
Abbildung 57: Abflussverhalten des Bergmodells zur Nachstellung der Tracerversuche: Relationen zwischen Einspeisungsstellen (Schwinden) und Quellen, wobei hier äquivalent zum Dachstein der Großteil des Abflusses in Richtung Norden passiert (gesüdetes Schema!) und die Einspeisungen in die Schwinde (S2) den Gipfelplateaubereich unterschneidet. Desweiteren ist auch ein in Relation gesehen geringer Abfluss Richtung Süden eingebaut (S3->Q3) (eigene Darstellung).	80
Abbildung 58: Fertiges Bergmodell bereit zur Versuchsdurchführung inkl. Absaugungsvorrichtung – Genese und Erläuterung des Modells inkl. Anleitung siehe Anhang (eigene Aufnahme, September 2024).	81
Abbildung 59: Schematische Darstellung des Gletscherhaushaltes (Muffat 2024, S. 33).	85
Abbildung 60: Gletscherspalten in der Region Dachsteingletscher, das Gefälle führt jeweils in linke Richtung (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz).	88
Abbildung 61: Übersichtsdarstellung über die Dachsteingletscher (eigene Darstellung mittels QGIS 3.16, OSM, Krobath & Lieb 2004 (S. 79), ennstalwiki 2024).	89

Abbildung 62: Hallstätter Gletscher; Links: Aufnahme vom Tal in Richtung Süden (Bildarchiv GlacierXperience Fachdidaktikzentrum Chemie, Uni Graz); Rechts: Aufnahme vom Hunerkogel in Richtung Süden gerade aus in Richtung Hallstätter Gletscher, das Gefälle gegen Osten sind bereits Ansätze des Schladminger Gletschers (eigene Aufnahme, Mai 2024).....	89
Abbildung 63: Versuchsaufbau zum Basalen Gleiten, in roter Farbe das Schleifpapier, in blauer Farbe der Eiswürfel, die Pfeile stellen die aufzuwendenden Kräfte dar (eigene Darstellung mittels ms-paint, September 2024).	92
Abbildung 64: Versuche zur Entstehung von Gletscherspalten mittels Superabsorber (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	93
Abbildung 65: Die Ausgangssituation für das Bergmodell: Tablett als Unterlage, zwei Rinnen aus Zinkblech geformt und mittels Gipsoberfläche versehen zur künftigen Modellierung wasserundurchlässiger Schichten sowie Holzstreben als Basis für das künftige Relief – mittels Marmorstein und Gips können Karstquellen modelliert werden und zugleich aus praktischen Gründen als Auffangbecken gestaltet werden.	120
Abbildung 66: Modellierte Karstquelle: Wasserundurchlässige Schicht (gegipste Zinkblechrinne) erreicht die Erdoberfläche – zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt noch die Einhausung der „unterirdischen“ Bereiche (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	121
Abbildung 67: Die Modellierung der künftigen Schwinden erfolgt mit Butterflykanülen, sodass die simulierte „Tracerflüssigkeit“ einfach mittels Spritze ins Bergmodell eingebracht werden kann. Zugleich dienen die in weiterer Folge dann unter der Bergmodelloberfläche befindlichen Schlauchteile zur Modellierung des vertikalen unterirdischen Abflusses hindurch wasserundurchlässiges Karstgestein zu den wasserstauenden Schichten, wozu die Schlauchenden an den vergipsten Zinkblechbahnen festgeklebt sind (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024). .	121
Abbildung 68: Überblicksdarstellung aller Schwinden, mittels Dreibegeventile ist es möglich, Schwinden mit mehreren Abflusswegen zu modellieren (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	123
Abbildung 69: Weitere Reliefgestaltung mittels Krepp, die modellierten Schwinden müssen entsprechend frei bleiben (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	123
Abbildung 70: Links: Reliefgestaltung mittels Krepp; Rechts: Detaillierter Blick auf die Befestigung der Schwinden sowie Wegleitung des vertikalen Abflusses – dabei basieren die Schlauchschlingen auf technischer Notwendigkeit, um Schlauchlänge zu verbrauchen und haben keinen Modellierungszweck (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	124
Abbildung 71: Links: Modellierte Karstquelle nach abgeschlossener Reliefgestaltung; Rechts: Überblick über die Schwinden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	124
Abbildung 72: Abgeschlossenes Relief; Links: Seitenansicht; Rechts: Frontalansicht (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	125
Abbildung 73: Modellierte Karstquelle am „Südabhang“ (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	125
Abbildung 74: Blick in das Seitenfenster zur Demonstration der Abläufe im Berginneren (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	126
Abbildung 75: Die Sandsteinmodellmasse ist zur Modellierung der Gesteinsoberfläche eines Kalkgebirges deutlich zu dunkel (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	127

Abbildung 76: Durch Strecken der Sandsteinmodellmasse mit Gips und grobgemörselter Kreide kann eine für Kalkgebirge farblich und texturierte adäquate Oberflächenmasse geschaffen werden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	127
Abbildung 77: Oberflächengestaltung im Bereich einer Schwinde – um einen Verschluss der Butterflykanüle durch die Modelliermasse zu verhindern, erfolgte deren Schutz mittels Schraubverschluss (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	128
Abbildung 78: Oberflächenmodellierung im Bereich der Karstquellen (links) und dem Karstplateau (rechts) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	128
Abbildung 79: Bergmodell, Sichtfensterseitig (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	129
Abbildung 80: Bergmodell Seitenaufnahme mit Gipfel im Hintergrund (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	130
Abbildung 81: Bergmodell frontal, vogelperspektivisch (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).	131

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Zusammensetzung Dachsteinkalk, Probe Gosaubach, Porscher 1993 (Umweltbundesamt 1994, S. 19)</i>	
.....	21
<i>Tabelle 2: Gesamtergebnisse</i>	37
<i>Tabelle 3: Verbrauch GH-2 (eigene Darstellung, 2024).....</i>	55
<i>Tabelle 4: Erweiterte Legende zu Abbildung 49 (eigene Darstellung nach Umweltbundesamt 1989, S. 26).</i>	73
<i>Tabelle 5: Gletscherlänge und Gletscherfläche des Hallstätter Gletschers, gerundet (Krobath & Lieb 2004 S. 83 & 88; Hansche et al. 2023, S. 91 & Böhm 1903, S.357)</i>	90
<i>Tabelle 6: Abkürzungen.....</i>	115
<i>Tabelle 7: Glossar</i>	115

Literaturverzeichnis

- Bader, H.; Lühken, A. (2019). Experiment im Chemieunterricht versus Experiment in der Forschung. S. 462 – 464. In: Sommer, K.; Wambacher-Laicher, J.; Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 2. Auflage. Hannover: Aulis Verlag im Friedrich Verlag. 783 Seiten.
- Bauer, F. (1953). *Verkarstung und Bodenschwund im Dachsteingebiet*. In: Mitteilungen der Höhlenkommission beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft. 8/1. S. 53 – 63.
- Behm, M.; Plan, L.; Seebacher, R.; Buchegger, G. (2016). Dachstein. S. 569 - 587. In: Spötl, C.; Plan, L.; Erhard, C. (Hrsg.) (2016): *Höhlen und Karst in Österreich*. Linz: Land Oberösterreich, Oberösterreichisches Landesmuseum. 752 Seiten.
- Bögli, A. (1978). *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 292 Seiten.
- Böhm, A. (1903). *Das Karlseisfeld einst und jetzt*. (Vortrag).
- Carl Roth (Hrsg.) (2024). *Sicherheitsdatenblatt Huminsäure, nativ*.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg.) (k.A.). *GESTIS Stoffdatenbank*. URL: <https://gestis.dguv.de> [Letzter Zugriff: 23.10.2024].
- Ennstalwiki (2024). *Untere Windlucke und Torsteinrinne*. URL: https://www.ennstalwiki.at/wiki/index.php/Datei:Untere_Windlucke_und_Torsteineisrinne.jpg [Letzter Zugriff: 27.09.2024].
- Fachdidaktikzentrum für Chemie der Universität Graz (Hrsg.) (2024). *GlacierXperience. Über uns*. URL: <https://glaciereducation.com/about-us/> [Letzter Zugriff: 30.09.2024].
- Faust, D. (2020). Bodenbestandteile. S. 481 – 485. In: Gebhardt, H.; Glaser, R.; Radtke, U.; Reuber, P.; Vött, A. (Hrsg.) (2020). *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland. 1272 Seiten.
- Faust, D.; Kleber, A. (2020). Verwitterung als Voraussetzung für Bodenbildung, Pflanzenwuchs und Reliefformung. S. 373 – 381. In: Gebhardt, H.; Glaser, R.; Radtke, U.; Reuber, P.; Vött, A. (Hrsg.) (2020). *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland. 1272 Seiten.
- Ganss, O. (1954). Das Plateau und der Nordabhang. S. 53 – 64. In: Ganss, O.; Kümel, F.; Spengler, E. (1954). *Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteingruppe*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. 82 Seiten.
- Graf, K. (1984). *Karstphänomene in den bolivianischen Anden*. In: Geographika Helvetika. 1. S. 17 – 25.

- Grassler, F. (1984). Alpenvereinseinteilung der Ostalpen (AVE). S. 215 – 224. In: Deutscher und Österreichischer Alpenverein und Alpenverein Südtirol, München, Innsbruck, Bozen (Hrsg.) (1984). *Berg '84. Alpenvereinsjahrbuch 108*. München: Bergverlag Rudolf Rother. 224 Seiten.
- Grims, F. (1996). Das wissenschaftliche Wirken Friedrich Simonys im Salzkammergut. S. 43 – 72. In: Land Oberösterreich, OÖ. Landesmuseum (Hrsg.) (1996). *Ein Leben für den Dachstein. Friedrich Simony – zum 100. Todestag*. Linz: OÖ. Landesmuseum. 355 Seiten.
- Haag, W. (2020). *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. 208 Seiten.
- Hansche, I.; Fischer, A.; Greilinger, M.; Hartl L.; Hartmeyer, I.; Helfricht, K.; Hynek, B.; Jank, N.; Kainz, M.; Kaufmann, V.; Kellerer-Pirklbauer, A.; Lieb, G.; Mayer, C.; Neureiter, A.; Prinz, R.; Reingruber, K.; Reisenhofer, S.; Riedl, C.; Seiser, B.; Stocker-Waldhuber, M.; Strudl, M.; Zagel, B.; Zechmeister, T. & Schöner, W. (2023): *KryoMon.AT - Kryosphären Monitoring Österreich 2021/22*. Kryosphärenbericht Nr. 1. 204 Seiten.
- Hölting, B.; Coldewey, W. (2013). *Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 438 Seiten.
- Kattmann, U.; Duit, R.; Gropengießer, H.; Komorek, M. (1997). *Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftliche Forschung und Entwicklung*. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften. 3/3. S. 3-18.
- Kretschmer, I. (2004). Friedrich Simony. Erforscher des Karls-Eisfeldes. Dachstein (Oberösterreich). S. 31-73. In: Brunner, K. (Hrsg.) (2004): *Das Karls-Eisfeld. Forschungsarbeiten am Hallstätter Gletscher*. München: Wissenschaftliche Alpenvereinshefte. 103 Seiten.
- Krieg, W. (1953). *Geomorphologische Beobachtungen. Die Verkarstung des östlichen Dachsteinstockes und ein Beitrag zum Problem der Buckelwiesen*. Dissertation. Karl-Franzens-Universität Graz. Institut für Geographie und Raumforschung.
- Krobath, M.; Lieb, G. (2004). Die Dachsteingletscher im 20. Jahrhundert. S. 75-101. In: Brunner, K. (Hrsg.) (2004): *Das Karls-Eisfeld. Forschungsarbeiten am Hallstätter Gletscher*. München: Wissenschaftliche Alpenvereinshefte. 103 Seiten.
- Kümel, F. (1954). Der mittlere Abschnitt der Südwände. S. 30 – 44. In: Ganss, O.; Kümel, F.; Spengler, E. (1954). *Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteingruppe*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. 82 Seiten.
- Land Oberösterreich, Abteilung Geoinformation und Liegenschaft (Hrsg.) (2024). *DORIS*. URL: <https://www.doris.at> [letzter Zugriff: 28.08.2024].
- Land Steiermark, Landesamtsdirektion, Referat Kommunikation Land Steiermark (Hrsg.) (2024). *Digitaler Atlas Steiermark*. URL: <https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/ziel/141979637/DE> [letzter Zugriff: 28.08.2024].

- Lehr, R. (1996). Friedrich Simony. (1813-1896). Ein Leben für den Dachstein. S. 9 – 42. In: Land Oberösterreich, OÖ. Landesmuseum (Hrsg.) (1996). *Ein Leben für den Dachstein. Friedrich Simony – zum 100. Todestag*. Linz: OÖ. Landesmuseum. 355 Seiten.
- Machery-Nagel GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2024a). *Halbquantitative Teststreifen QUANTOFIX Gesamteisen 100*. URL: <https://www.mn-net.com/de/halbquantitative-teststreifen-quantofix-gesamteisen-100-91344> [Letzter Zugriff 02.09.2024].
- Machery-Nagel GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2024b). *Halbquantitative Teststreifen QUANTOFIX Kupfer*. URL: <https://www.mn-net.com/de/halbquantitative-teststreifen-quantofix-kupfer-91304> [Letzter Zugriff 02.09.2024].
- Machery-Nagel GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2024c). *Visocolor School Analysekitoffen. Sicherheitsdatenblatt*
- Machery-Nagel GmbH & Co. KG (Hrsg.) (k.A.). *Visocolor School Handbuch*. Düren.
- Mandl, F. (2006). Der Hallstätter Gletscher. Alte und neue Forschungen. S. 202-216. In: Mandl, F. (Hrsg.) (2006). *ALPEN. Archäologie, Almwirtschaftsgeschichte, Altwegeforschung, Dendrochronologie, Felsbildforschung, Geomorphologie, Geschichte, Gletscherforschung, Umweltforschung, Volkskunde, Zoologie. Festschrift 25 Jahre ANISA*. Haus im Ennstal: ANISA, Verein für alpine Forschung. 282 Seiten.
- Meier, A. (1954). Augensteine und tertiäre Schotter. S. 68 – 70. In: Ganss, O.; Kümel, F.; Spengler, E. (1954). *Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteingruppe*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. 82 Seiten.
- MolView (2024). *Edta disodium salt*. URL: <https://molview.org/?cid=8759> [Letzter Zugriff: 15.10.2024].
- Moser, R. (1997). *Dachsteingletscher und deren Spuren im Vorfeld*. Hallstatt: Musealverein. 143 Seiten.
- Muffat, P. (2024). *Die Dachsteingletscher als Lernort. Umsetzung einer digitalen Lernumgebung am Dachstein unter Berücksichtigung der Bildung für nachhaltigen [sic] Entwicklung*. Bachelorarbeit. Universität Graz: Institut für Chemie.
- Neukirchen, F. (2022). *Bewegte Bergwelt. Gebirge und wie sie entstehen*. 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland. 521 Seiten.
- Pfeifer, P.; Sommer, K. (2019). Modelle und Erkenntnis. S. 519-524. In: Sommer, K.; Wambacher-Laicher, J.; Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 2. Auflage. Hannover: Aulis Verlag im Friedrich Verlag. 783 Seiten.
- Plan, L. (2016). Oberflächenkarstformen. S. 23 - 34. In: Spötl, C.; Plan, L.; Erhard, C. (Hrsg.) (2016): *Höhlen und Karst in Österreich*. Linz: Land Oberösterreich, Oberösterreichisches Landesmuseum. 752 Seiten.

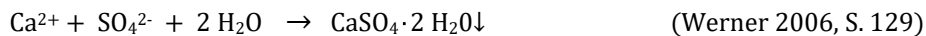
- Pulido-Bosch, A. (2021). *Principles of Karst Hydrogeology*. Cham: Springer Nature Switzerland. 369 Seiten.
- Rechtsinformationssystem des Bundes (2024). *Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen*. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568> [letzter Zugriff: 24.04.2024].
- Reinfried, S. & Hug F. (2008). *Von Eisklumpen, Eismeerern und Strömen aus Eis*. In: *Geographie heute*. 2008. 265. S. 40-47.
- Riedl, E.; Janiak, C. (2007). *Anorganische Chemie*. 7. Auflage. Berlin-New York: de Gruyter. 961 Seiten.
- Riedl-Dorn, Ch. (1996). Die Sammlungen F. Simonys am Naturhistorischen Museum. S. 199 - 266. In: Land Oberösterreich, OÖ. Landesmuseum (Hrsg.) (1996). *Ein Leben für den Dachstein. Friedrich Simony – zum 100. Todestag*. Linz: OÖ. Landesmuseum. 355 Seiten.
- Ritter, M. & Reinfried, S. (2008). *Wie entsteht eine Karstlandschaft?* In: *Geographie heute*. 265. S. 14-19.
- Scharpf, A. (2022). *Aspekte der Lebensmittelchemie und Lebensmittelanalytik für den Chemieunterricht am Beispiel ausgewählter, kaliumhaltiger Lebensmittel*. Bachelorarbeit. Pädagogische Hochschule Steiermark.
- Schauberger, O. (1954). Hochkarst und Höhlenbildung am Dachstein. S. 65 - 67. In: Ganss, O.; Kümel, F.; Spengler, E. (1954). *Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteingruppe*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. 82 Seiten.
- Scholz, D. (2020). Formbildung durch Lösungsprozesse. S. 392 – 395. In: Gebhardt, H.; Glaser, R.; Radtke, U.; Reuber, P.; Vött, A. (Hrsg.) (2020). *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland. 1272 Seiten.
- Schulte, A.; Schütt, B.; Möller, C.; Imjela, R. (2020). Wasserkreislauf und Wasserhaushalt. S. 582 – 596. In: Gebhardt, H.; Glaser, R.; Radtke, U.; Reuber, P.; Vött, A. (Hrsg.) (2020). *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland. 1272 Seiten.
- Simony, F. (1895). *Das Dachsteingebiet. Ein Charakterbild aus den österreichischen Nordalpen*. Wien: Verlag von Ed. Hölzel. 152 Seiten.
- Sommer, K.; Toschka, C.; Schröder, L.; Schröder, T.; Steff, H.; Fischer, R. (2017). *Modellexperimente im Chemieunterricht. Beitrag zur Definition des Begriffes Modellexperiment zur Bestimmung des Modellierungsgrades*. In: CHEMKON 24 Nr. 1. S. 13 – 19.

- Sommer, K. (2019). Unterrichtskonzeption und Unterrichtsverfahren. S. 262 – 301. In: Sommer, K.; Wambacher-Laicher, J.; Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 2. Auflage. Hannover: Aulis Verlag im Friedrich Verlag. 783 Seiten.
- Sommer, K.; Pfeifer, P. (2019). Experiment und Erkenntnis. S. 70 - 88. In: Sommer, K.; Wambacher-Laicher, J.; Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 2. Auflage. Hannover: Aulis Verlag im Friedrich Verlag. 783 Seiten.
- Sommer, K.; Steff, H.; Toschka, C. (2019). Modellexperimente. S. 541 – 547. In: Sommer, K.; Wambacher-Laicher, J.; Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 2. Auflage. Hannover: Aulis Verlag im Friedrich Verlag. 783 Seiten.
- Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft m b H (2023a) (Hrsg.). *Lexikon der Geowissenschaften*. URL: <https://www.spektrum.de/alias/lexikon/lexikon-der-geowissenschaften/570830> [Letzter Zugriff: 08.11.2024].
- Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft m b H (2023b) (Hrsg.). *Lexikon der Geographie*. URL: <https://www.spektrum.de/alias/lexikon/lexikon-der-geographie/587359> [Letzter Zugriff: 08.11.2024].
- Spengler, E. (1954a). Allgemeiner Teil. S. 5 – 12. In: Ganss, O.; Kümel, F.; Spengler, E. (1954). *Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteingruppe*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. 82 Seiten.
- Spengler, E. (1954b). Gosaukamm und Rettenstein. S. 16 - 30. In: Ganss, O.; Kümel, F.; Spengler, E. (1954). *Erläuterungen zur geologischen Karte der Dachsteingruppe*. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner. 82 Seiten.
- Spötl, C.; Plan, L. (2016). Karst und Höhlen. S. 1 - 10. In: Spötl, C.; Plan, L.; Erhard, C. (Hrsg.) (2016): *Höhlen und Karst in Österreich*. Linz: Land Oberösterreich, OÖ Landesmuseum. 752 Seiten.
- Stäudel, L. (2019). Modellieren. S. 532 – 541. In: Sommer, K.; Wambacher-Laicher, J.; Pfeifer, P. (Hrsg.) (2019). *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. 2. Auflage. Hannover: Aulis Verlag im Friedrich Verlag. 783 Seiten.
- Strahler, A.; Strahler, A. (2009). *Physische Geographie*. 4. Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer. 688 Seiten.
- Stüwe, K. (2018). *Geologie der Steiermark – relevante Aspekte für die Botanik*. S. 11 – 32. In: Berg, C., Magnes, M., Schwager, P.; Stüwe, K.; Zernig, K.; Drescher, A. (Hrsg.) (2018). *Tuexenia. Mitteilungen der Floristisch-soziologischen Arbeitsgemeinschaft*. Graz. 11. 192 Seiten.
- Tarback, E.; Lutgens, F. (2009). *Allgemeine Geologie*. [EARTH: AN INTRODUCTION TO PHYSICAL GEOLOGY] 9. Auflage. (Bearb. von Lammer, B. & Übers. von Logan, T.D.). München: Pearson Studium. 877 Seiten.

- Umweltbildungszentrum Steiermark (k.A.). *Bau eines Gletscher-Modells*. Verfügbar unter URL: <https://www.ubz-stmk.at/materialien-service/downloads/natur-lebensraeume/#:~:text=Zu%20unseren%20diversen%20Bereichen%20des%20Themas%20Natur/Lebensräume%20finden%20Sie%20hier> [Letzer Zugriff: 27.09.2024].
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (1989). *Die unterirdischen Abflussverhältnisse im Dachsteingebiet und ihre Bedeutung für den Karstwasserschutz*. Wien: Umweltbundesamt. 73 Seiten.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (1994). *Pilotprojekt „Karstwasser Dachstein“. Band 1: Karstwasserqualität*. Wien: Umweltbundesamt. 233 Seiten.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2001). *Pilotprojekt „Karstwasser Dachstein“. Band 2: Karsthydrologie und Kontaminationsrisiko von Quellen*. Wien: Umweltbundesamt. 155 Seiten.
- Veress, M.; Loczy, D. (2019). General Description of Glaciokarsts. S. 23 – 70. In: Veress, M.; Telbisz, T.; Toth, G.; Loczy, D.; Ruban, D.; Gutak, J. (2019). *Glaciokarsts*. Cham: Springer Nature Switzerland. 516 Seiten.
- Werner, W. (2006). *Qualitative anorganische Analyse*. 4. Auflage. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart. 309 Seiten.
- Wikimedia (2024a). *EDTA*. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EDTA.svg> [letzer Zugriff: 13.09.2024].
- Wikimedia (2024b). *Metal-EDTA*. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal-EDTA.svg> [letzer Zugriff: 13.09.2024].
- Winkler, S. (2009). *Gletscher und ihre Landschaften*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 183 Seiten.

Formelverzeichnis (Reaktionsgleichungen)

(1): Fällung von Calciumionen mittels Schwefelsäure



(2): Fällung von Calciumionen mittels Natriumcarbonatlösung



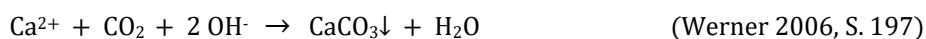
(3): Bildung von Kohlensäure



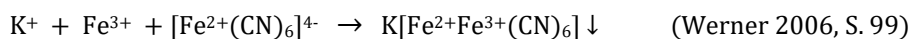
(4): Zerfall der Kohlensäure



(5): Nachweis von Kohlenstoffdioxid mittels Calciumhydroxidlösung



(6): Nachweis von Eisen(III)-Ionen mittels Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lösung.



(7): Nachweis von Kupfer als Tetrahydroxocuprat



(8): Alkalische Reaktion von Natriumcarbonat in Wasser



(9): Verkarstung Schritt 1



(10): Verkarstung Schritt 2



(11): Verkarstung Schritt 3



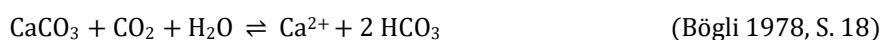
(12): Verkarstung Schritt 4



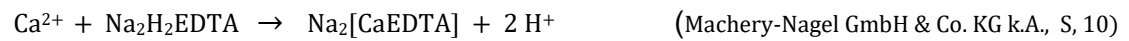
(13): Verkarstung Schritt 5



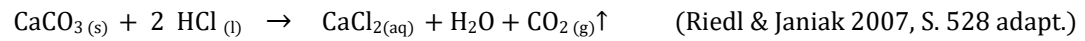
(14): Verkarstung Summengleichung



(15): Bildung des Calcium-EDTA-Komplexes



(16): Reaktion von Kalk mit Salzsäure



(17): Massenbilanz (B) des Gletschers (wobei C=Akkumulation & A=Ablation)

$$B = C + A \quad (\text{Hansche et al. 2023, S. 12})$$

Anhang – Teil I bis Teil VI

→ **Teil I: Abkürzungen & Glossar** (ab Seite 115):

→ **Teil II: Friedrich Simony – Eine bemerkenswerte Persönlichkeit für die Dachsteinforschung** (ab Seite 116):

→ **Teil III: Genese des Bergmodells** (ab Seite 120):

→ **Teil IV: Versuchsanleitungen** (ab Seite 132):

Gliederung:

1 (Geologie - Qualitative Analyse)

1.1. Klassische qualitative Nachweise in Karstgestein

1.2. Apparative Durchführung qualitativer Nachweise in Karstgestein

1.3. Analytik ausgewählter Metallionen mittels Teststreifen in unterschiedlichen Gesteinsproben

1.4. Nasschemische Nachweise ausgewählter Metallionen in unterschiedlichen Gesteinsproben

2 (Karst & Karstformen)

2.1. Löslichkeit von Kalkgestein unter verschiedenen Bedingungen

2.2. Modellversuch zur Entstehung von Lösungsdolinen

2.3. Modellversuch zur Bildung von Karstrillen

3 (Unterirdischer Abfluss)

3.1. Simulation des unterirdischen Abflusses in Karstgebirgen - Demonstrationsversuch

3.2. Modellversuch zu den Tracerversuchen des unterirdischen Abflussverhaltens im Dachsteingebiet

4 (Bewegung von Gletschern)

4.1. Modellversuch zum Basalen Gleiten

(Die Ausführungen in den Versuchsanleitungen bezüglich Sicherheit, insbesondere die tabellarische Zuschreibung der H-Sätze zu den einzelnen Gefahrenstoffen ist mittels Recherche in der GESTIS-Stoffdatenbank (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung k.A.) sowie mit den zugehörigen Sicherheitsdatenblättern erfolgt (Machery-Nagel 2024a, 2024b, 2024c & Carl Roth 2024), wobei für deren direkte Wiedergabe in den Versuchsanleitungen aus Gründen der besseren Leserlichkeit auf kursive Schreibweise und Anführungszeichen verzichtet worden ist).

→ Teil V: Karten

Karte – Regionalisierung der Dachsteinregion nach Simony & AVE 14 überlagert

Karte – Die Dachsteingletscher

→ Teil VI: Worte des Danks

Abkürzungen & Glossar:

Tabelle 6: Abkürzungen

adapt.	adaptiert	ggf.	gegebenenfalls
Anm.	Anmerkung	GIS	Geoinformationssystem
AVE 14	Alpenvereinsgliederung der Ostalpen Gebirgsgruppe 14 - Dachsteingruppe	k.A.	Keine Angabe
bzw.	beziehungsweise	Lsg.	Lösung
ca.	zirka	Mio.	Millionen
CLP	EU-Chemikalienverordnung („ <i>Classification, Labelling and Packaging</i> “)	MS	Microsoft
dest.	destilliert bzw. entionisiert	OSM	Open-Street-Map
ebd.	ebendort	vgl.	vergleiche
E.B.St	Eisenbahnstation	w.e.	Wasseräquivalent
EM	Einmündung	z.B.	zum Beispiel

Tabelle 7: Glossar

allochthon	„auf fremdem Untergrund oder in fremder Umgebung liegend.“ (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Aquifer	Aquifer bezeichnet einen Grundwasserleiter (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Aufschluss (Geologie)	„Stelle im Gelände, an der ein Gestein unverhüllt zu Tage tritt.“ (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
ausapern	„langsames Abtauen einer geschlossenen Schneedecke (...)“ (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Fazies	„Summe aller primären organischen und anorganischen Charakteristika einer Ablagerung an einem Ort“, - umfasst alle während der Sedimentation gebildeten Merkmale des Gesteins, jedoch nicht jene, die erst nach der Sedimentation gebildet worden sind (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Fließgesetz von Glen	Eine aus Experimenten abgeleitete empirische Gleichung die besagt, dass die Fließfähigkeit von Gletschereis mit steigender Belastung und Temperatur zunimmt (Haag 2020, S. 36).
Fluoreszenzfarbstoff	„fluoreszierender Stoff (z.B. Uranin, Eosin), der zur Markierung von Fließbewegungen eingesetzt wird.“ (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Moräne	„vom Eis (Gletscher oder Inlandeis) transportiertes und abgelagertes Material (...)“ (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Orographie	„beschreibende Darstellung des Reliefs ohne Berücksichtigung genetischer oder chronologischer Aspekte“, (Spectrum der Wissenschaftsverlagsgesellschaft mbH 2023b), wobei das Relief die „Oberflächengestalt der Erde“ beschreibt (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).
Regionalisieren	„(...) Untergliederung eines Raumes in kleinere Teilgebiete (Regionen) (...)“ entsprechend definierter Kriterien (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023b).
Schüttung	„pro Zeiteinheit austretende Wassermenge aus einer Quelle“ (Spectrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 2023a).

Friedrich Simony – Eine bemerkenswerte Persönlichkeit für die Dachsteinforschung

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, hat Friedrich Simony (*1813 in Böhmen, +1896 in der Steiermark) die Dachsteinregion als „*Schul- und Musterobjekt für Glazialstudien*“ (Lehr 1996, S. 24) bezeichnet, welcher schließlich sein Leben dem Dachsteingebirge gewidmet hat und zahlreiche Werke über dieses verfasst hat. Dabei hat er vor allem den Gletschern besondere Aufmerksamkeit zukommen lassen (Moser 1997, Zum Geleit). Friedrich Simony ist unweigerlich mit der Dachsteinregion verbunden, weshalb im Laufe dieser Arbeit regelmäßig auf ihn Bezug genommen worden ist und ihm die nachfolgenden Absätze über sein Wirken unter jener Prämisse gewidmet seien, seine große Bedeutung und seinen Verdienst für die Region und für die Dachsteinforschung mittels Auszügen aus seinem Schaffen darzustellen, auch wenn dies in Zuge dieser wenigen Zeilen sicher nur ansatzweise gelingen kann.

Geboren ist Friedrich Simony am 30. November 1813 in Hrochoweteinitz (Nordböhmen) worden und als uneheliches Waisenkind an verschiedenen Orten bei unterschiedlichen Verwandten aufgewachsen. Trotz dessen ist es ihm gelungen, eine Karriere als Universitätsprofessor einzuschlagen, was in Anbetracht der Umstände für die damaligen Verhältnisse einem „*Märchen*“ gleicht, wie es Lehr (1996, S. 12) beschreibt. Ab dem Alter von 12 Jahren ist er von einem seiner Onkel an das Gymnasium Nikolsburg geschickt worden - vier Jahre später eine Lehre als Apothekengehilfe im damaligen Ungarn startend - war er später als Laborant in Znaim tätig. Seinen Plan, Naturwissenschaften zu studieren, hat er nach intensiven Lernens der Fächer Chemie und Botanik und dem anschließenden Ablegen eines Magister-Rigorosums 1835 in Wien in die Tat umzusetzen gekonnt, wobei es zuvor noch eine weitere Hürde zu überwinden gegolten hat. Es war ihm nämlich notwendig gewesen, die fehlenden Gymnasialjahre nachzuholen, was wiederum nur mit Genehmigung über den Gnadenweg möglich gewesen war. Dank eines Empfehlungsschreibens des Naturforschers und Arztes Joseph Franz Freiherr von Jacquin, der Professor für Botanik und Chemie an der Universität Wien gewesen war, hat Friedrich Simony die Erlaubnis von Erzherzog Ludwig erhalten, die fehlenden Gymnasialjahre nachzuholen, um schließlich tatsächlich das gewünschte Studium absolvieren zu können (Lehr 1996, S. 11-15).

Wie eingangs erwähnt, hat sein späteres Leben vor allem dem Dachsteingebiet und den dortigen Gletschern gegolten, wobei sich Nachfolgendes auf Ausführungen nach Lehr (1996, S. 18-26) bezieht. Denn in Summe beträgt die Zahl von Simonys selbstständig veröffentlichten Arbeiten 199, wovon über einem Drittel alleine dem Dachsteingebirge zuzuordnen sind. Seine erste Dachsteinbesteigung ist im Jahre 1840 zu verorten, als er 27 Jahre alt gewesen war. Diese hat Friedrich Simony im Zuge einer Fußtour durch die österreichischen Kalkalpen unternommen, wobei Ausgangspunkt der eigentlichen

Besteigung - gemeinsam mit dem bekannten Bergführer Johan Wallner - Hallstatt war. 1843 auch mit Übernachtung am Berg. In dieser Zeit hat sich Hallstatt, welches er 1840 erstmals besucht hatte, zu seiner zweiten Heimat entwickelt. Den Dachstein hat er schließlich fast jährlich besucht. Trotz aller Warnungen der Bevölkerung ist von ihm in den 1840er-Jahren auch die erste Besteigung im Winter erfolgt, und zwar mit dem Ziel zu beweisen, „daß [sic] ein Winteraufenthalt im Hochgebirge nicht tödlich ist!“ (ebd., S. 23). Nach seiner letzten Besteigung des Gletschers im Jahre 1890, als er bereits 77 Jahre alt war - vom Dachsteingipfel verabschiedet hatte er sich bereits fünf Jahre zuvor - hat Friedrich Simony das Werk „Das Schwinden des Karlseisfeldes nach fünfzigjährigen Beobachtungen und Aufnahmen“ verfasst. Diesen letzten Besuch des Gletschers hat er noch mit einem Festessen am Berg beschlossen, wobei es Speck, Brot, Tee und Schnaps gegeben haben soll. Damit existiert seinerseits eine genaueste Beobachtung des Gletschers über genau 50 Jahre, einem halben Jahrhundert, hinweg, bei dem er selbst noch das Vorrücken des Gletschers erlebt hatte – was er, zitiert nach Grims (1996, S. 55) als *„zweimalige, in der lautlosen Stille des kalten Oktobermorgen deutlich hörbare dumpfe Krachen des Eiskörpers“* beschrieben hatte; aber später dann auch stets den Rückzug des Gletschers festzustellen vermusst hatte und im Zuge seiner Veröffentlichung „Das Schwinden des Karlseisfeldes (...)“ wie eben beschrieben, dargelegt hat. Größenänderungen des Gletschers festzustellen ist ihm bereits früh mit entsprechenden Messungen gelungen, wozu er Kreuze in den Gletscher gemeißelt sowie Moränen^G beobachtet hat (Grims 1996, S. 56). Durch die Identifikation von Moränen entlang des Trauntales hat Friedrich Simony bereits damals auf viel kältere Phasen in der Frühzeit geschlossen, womit er zu den ersten Eiszeitforschern gehört und auch das Werk „Über die Spuren vorgeschichtlicher Eiszeit im Salzkammergut“ (ebd.) verfasst hat.

Das allergrößte Vermächtnis Friedrich Simonys ist sein Dachsteinwerk – eine Monographie namens *„Das Dachsteingebiet. Ein geographisches Charakterbild aus den österreichischen Nordalpen. Nach eigenen photographischen und Freihandaufnahmen illustriert und beschrieben von Dr. Friedrich Simony, k. k. Hofrat und em. Universitätsprofessor“*. Erste Pläne für ein solches Werk sind bereits 1846 in der Wiener Zeitung veröffentlicht worden – die Lieferung der drei Teile ist in den Jahren 1889, 1893 und 1895 erfolgt. Der letzte Teil ist wenige Monate vor Friedrich Simonys Tod erschienen (Lehr 1996, S. 19).

Auch die touristische Erschließung des Dachsteingebietes kann auf Friedrich Simonys Handeln zurückgeführt werden. So hat er die von ihm ausfindig gemachten Wege markiert oder den ersten gesicherten Steig in den Ostalpen errichtet, indem er mit *„Leitern, Eisenzapfen, Ringen und Seilen von der Randkluft zum Dachsteingipfel“* einen solchen befestigt hat (ebd., S. 18).

Die große Anzahl an schriftlichen Publikationen von Friedrich Simony ist bereits erwähnt worden. Nicht verborgen soll auch seine große Begabung für die Malerei und später auch Photographie bleiben. Im Teilnachlass von Friedrich Simony, der heute im Archiv des naturhistorischen Museums in Wien liegt, finden sich 1109 Bilder, die Friedrich Simony eigenständig angefertigt hatte. Weiters werden 485 Glasplattennegative aufgelistet. Methodisch hat es Friedrich Simony sehr breit gefächert angelegt. In der Inventarliste finden sich neben Bleistiftskizzen etwa auch Aquarelle, Tuschskizzen, Federzeichnungen, Sepia-Skizzen, photographische Aufnahmen wie auch Photogramme, Radierungen, Lichtdrucke, Lithographien, Chemotypen, Holzschnitte, Photozinkotypen oder Photolithographien - und das allesamt auch auf zum Teil sehr unterschiedlichen Trägern (Riedl-Dorn 1996, S. 203ff.). In Bezug auf die Photographien bleibt auch im Hinterkopf zu behalten, welchen Aufwand es zu dem damaligen Zeitpunkt bedeutet hatte, ein Foto anzufertigen und eben dieses umfangreiche Equipment auch mit auf den Berg zu tragen. So kann Friedrich Simony nach Lehr (1996, S. 10) auch als Begründer der darstellenden Methode und der wissenschaftlichen Zeichnung in der Geographie gelten sowie als Pionier zur Nutzung der *„Fotografie als Hilfsmittel der geografischen Landschaftsdarstellung“* (Lehr 1996, S. 19).

Auch wenn sein Leben vornehmlich dem Dachstein gegolten hat, sind neben den zahllosen Aktivitäten in Bezug auf das Dachsteingebirge auch noch weitere, bemerkenswerte Punkte festzuhalten. So ist 1851 an der Universität Wien die erste Lehrkanzel für Geographie errichtet worden (Lehr 1996, S. 10), an welcher Friedrich Simony noch im selben Jahr von Kaiser Franz Joseph I. zum Professor für Geographie ernannt worden war (ebd., S. 15), womit es erstmals eine Professur für Geographie an einer Hochschule im damaligen Österreich gegeben hat. Desweiteren gilt Friedrich Simony auch als Gründungsmitglied der k.k. Geographischen Gesellschaft, welche 1856 hervorgetreten ist (Kretschmer 2004, S. 47).

Zu alledem legte Friedrich Simony außerdem auch didaktisches Geschick an den Tag. So beschreibt Grims (1996, S. 44ff), dass es Friedrich Simony auch gelungen ist, die Ergebnisse seiner Forschungen für Laien sprachlich gut zu formulieren oder etwa auch einen Text über das Karstgebiet für das „Deutsch-Lesebuch für allgemeine Volksschulen 1889“ zu verfassen. Zwecks Anschaulichkeit hat er aus der Region für Vorträge und Unterricht an der Universität auch zahlreiches Material, wie etwa Gesteins- Mineralien- und Karrenproben oder sogar Gletscherschliffe, mitgenommen. Zur Erläuterung von klimatischen Verhältnissen etwa auch „Stammstücke und Stammquerschnitte“ (ebd.). Wenn man so möchte, kann man Friedrich Simony auch bereits als einen frühen Verfechter Außerschulischer Lernorte interpretieren - nicht nur, dass er nach Grims (1996, S. 44) mit seinen Studierenden bereits Exkursionen unternommen hatte; in einem seiner Werke schrieb er bereits 1872 über Vorzüge Außerschulischer Lernorte. Auch wenn er die Bezeichnung „Außerschulische

Lernorte“ nicht als solche gebraucht hatte, ist diese dazu dennoch geeignet, seine Ausführungen mittels dieser Begrifflichkeit zu bezeichnen, wozu nun seine Schilderungen hierzu an dieser Stelle direkt wiedergegeben werden sollen, zitiert nach Grims (1996, S. 45):

„Insbesondere aber möchte der Verfasser das Schuttländ der Aufmerksamkeit all jener Lehrer empfohlen haben, welche sich nicht bloß darauf beschränken wollen, das Gedächtnis ihrer Schüler mit Daten von mehr oder minder problematischen Wert über nahe und ferne Länder zu belasten, sondern nebenbei auch bestrebt sind, den Blick der Jugend auf all dasjenige hinzulenken, was die sie unmittelbar umgebende nähere Heimat an Lehrreichem und Wissenswerthem bietet. Für einen solchen Lehrer wird es kaum irgendwo an instructivem Demonstrationsobjekten in der freien Natur fehlen.“

Es gäbe nun noch so manch beeindruckend Ding über Friedrich Simony zu sagen, etwa, dass auch er es gewesen war, der den Begriff „Dachsteinkalk“ in die Literatur eingeführt (Lehr 1996, S. 40), die Höhe des Dachsteins mit dem Barometer ermittelt, 1848 für sechs Wochen für eine Panoramazeichnung auf dem Schafberg verweilt (Grims 1996, S. 44) oder 1844 mittels 400 Tiefenmessungen am Hallstätter See das Seebecken visualisiert hatte (Lehr 1996, S. 26). Nichts destotrotz skizzieren vorangegangene Zeilen recht eindrucksvoll Friedrich Simonys Verdienst rund um, wie ihn Lehr (1996, S. 22) bezeichnet, seinen Lebensberg - den Dachstein - auf welchem die Simonyhütte auch heute noch an ihn erinnert.

Was post scriptum noch zu erwähnen sei - nicht zufällig ist die Einreichung dieser Arbeit mit 30. November (2024) erfolgt, so handelte es sich doch bei diesem Tag um Friedrich Simonys 211. Geburtstag – kein Tag mutet wohl besser an, als der Geburtstag des bedeutungsvollsten Dachsteinpioniers, um mit einer solchen Arbeit abzuschließen, die abgesehen von den Inhalten dieses Exkurses selbst noch zehn weitere Verweise auf Friedrich Simony enthält, die eigens nochmal im nachfolgenden Verzeichnis zusammengefasst dargestellt sind. Festzuhalten ist außerdem, dass die Auseinandersetzung mit Friedrich Simonys Wirken ganz zu Beginn der Recherchen für diese Arbeit durch das Werk „*Ein Leben für den Dachstein. Friedrich Simony – zum 100. Todestag.*“ – eher ein Zufallsfund aus der Fachbibliothek für Geographie und Raumforschung – die Ausführungen dieser Arbeit sicherlich auch auf eine ganz bestimmte Art und Weise geprägt haben wird.

S.:	Thema:	Quelle:
S. 7	Dachstein als „Schul- und Musterobjekt für Glacialstudien“	(Lehr 1996, S. 24)
S. 9f.	Gebietsdefinition der Dachsteinregion nach Simony	(Simony 1895, S. 9f.)
S. 21	Mächtigkeit der Bankungen im Dachsteinkalk angegeben	(Simony 1895, S. 104)
S. 47	Dachsteingletscher als Plateaugletscher identifiziert	(Kretschmer 2004, S. 54)
S. 47	Überlegungen zur Entstehung von Karst & Säure-Metapher	(Grims 1996, S. 59)
S. 69	Erste Beweise für Relation Sickerwasser Dachstein -> Waldbachursprung	(Kretschmer 2004, S. 54)
S. 88	Simonys Einteilung der Dachsteingletscher in 3 große & 3 kleine Gletscher	(Kretschmer 2004, S. 54)
S. 90	Simonys präzisen Aufzeichnungen ermöglichten Rekonstruktion Gletscherfläche	(Böhm 1903, S. 357)
S. 90	Simonys Gletscherbeobachtungen über 50 Jahre hinweg	(Grims 1996, S. 55)
S. 90	Simonys Beschreibung des Gletscherwachstums & Schwindens	(Grims 1996, S. 22 & 55)

Genese des Bergmodells:

Als Grundlage für das Bergmodell haben ein einfaches Metall-Tablett, von der Firma NOCH das „Terra-Form Basis-Set“ sowie Geländekrepp und Sandstein-Modelliermasse gedient. Zusätzlich ist die Verwendung von Gips, Silikonmasse, Marmorsteinen ($d=1-2\text{ cm}$), zwei Zinkblechstreifen, 8 Flügelkanülen inkl. Schlauch, Spritzen, Gewebepband und Heißkleber erfolgt.

In einem ersten Schritt ist, wie in Abbildung 65 ersichtlich ist, die Relieflegung mittels Holzstreben, Verbinder und Pfeileroberplattem erfolgt inkl. der Formung und dem Vergipsen sowie der Verlegung der Zinkblechbahnen, welche in weiterer Folge wasserundurchlässige Schichten modellieren werden sollen. Ebenso in Abbildung 65 erkennt man bereits, dass mittels Marmorsteinen sowie Gips ein Auffangbecken für abfließendes Wasser modelliert worden ist, welches in weiterer Folge im Modell als See interpretiert werden kann, welcher mit den modellierten Karstquellen in Verbindung steht. Die Karstquellen sind dort positioniert, wo die wasserundurchlässigen Schichten die Erdoberfläche erreichen (in Form des Metalltablets modelliert).



Abbildung 65: Die Ausgangssituation für das Bergmodell: Tablett als Unterlage, zwei Rinnen aus Zinkblech geformt und mittels Gipsoberfläche versehen zur künftigen Modellierung wasserundurchlässiger Schichten sowie Holzstreben als Basis für das künftige Relief – mittels Marmorstein und Gips können Karstquellen modelliert werden und zugleich aus praktischen Gründen als Auffangbecken gestaltet werden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Um das Auffangbecken abzudichten bzw. um zu verhindern, dass abgeflossenes Wasser später in das Innere des Bergmodells eintritt und dort (neben Unordnung) dazu führt, dass die mit Heißkleber befestigten Bauteile destabilisiert werden, ist Silikonmasse in Verwendung

gelangt. In Abbildung 66 ist eine detaillierte Aufnahme einer der modellierten Karstquellen dargestellt, wobei zu einem späteren Zeitpunkt noch eine Einhausung der unterirdischen Bereiche erfolgen wird.



Abbildung 66: Modellierter Karstquelle: Wasserundurchlässige Schicht (gegipste Zinkblechrinne) erreicht die Erdoberfläche – zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt noch die Einhausung der „unterirdischen“ Bereiche bzw. realistische Einfärbung des Untergrundes (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 67: Die Modellierung der künftigen Schwinden erfolgt mit Butterflykanülen, sodass die simulierte „Tracerflüssigkeit“ einfach mittels Spritze ins Bergmodell eingebracht werden kann. Zugleich dienen die in weiterer Folge dann unter der Bergmodelloberfläche befindlichen Schlauchteile zur Modellierung des vertikalen unterirdischen Abflusses hindurch wasserdurchlässiges Karstgestein zu den wasserstauenden Schichten, wozu die Schlauchenden an den vergipsten Zinkblechbahnen festgeklebt sind (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die Schwinden sind modelliert worden, indem Butterflykanülen inkl. Schlauch an Holzstreben mittels Heißkleber und zum Teil auch mit Gewebeband befestigt sind. Deren Schläuche sind so gelegt worden, dass deren Enden in die Zinkblechbahnen einmünden – mittels Dreiwegeventile sind einzelne Schwinden so gelegt, dass deren Ausläufe auf beide Bahnen geleitet werden.

Mittels Querverstrebungen sind die einzelnen Holzstreben noch verstärkt worden, um einer höheren Last standhalten zu können. Abbildung 67 zeigt die Modellierung der Schwinden detailliert, Abbildung 68 zeigt alle Schwinden im Überblick. Abbildung 57 in Kapitel 5 stellt übersichtlich die Relationen zwischen den Schwinden und Quellorten graphisch dar, wobei auch eine Schwinde eingebaut worden ist (S3), die nicht über die beiden Zinkbahnen entwässert, sondern auf der Rückseite des Modells entwässert. Hierbei dient wiederum der Dachstein als Vorbild, bei dem zwar an sich auch der Großteil in Richtung Norden entwässert (vgl. Gefälle der wasserundurchlässigen Schicht in Richtung Norden) und nur eine sehr geringe Menge in Richtung Süden entwässert, womit dem auch hier Rücksicht geboten worden ist. Außerdem kann nun durch die im Modell notwendigen Schläuche auch der vertikale Abfluss durch das verkarstungsfähige, wasserdurchlässige Kalkgestein materiell modelliert werden.

Zusätzlich ist eine der Schwinden (S2), äquivalent zum Vorbild Dachstein, südlich des Gipfelbereiches angebracht worden, die aber dennoch in Richtung Norden entwässert und entsprechend den Gipfelbereich unterschreitet. Wie Abbildung 68 verdeutlicht, erfolgt die Speisung der Schwinden mittels Spritzen, die einfach in die Butterflykanülen eingesetzt werden können. Alle Versuche erfolgen jedoch ohne Nadel! Abbildung 69 zeigt eine der modellierten Schwinden, nachdem das Relief des Bergmodells mittels Modellkrepp modelliert, jedoch noch bevor die Oberfläche mittels Gipsmasse texturiert worden ist.

Zur Herstellung der Tracerflüssigkeiten sind vier Bechergläser mit 50 ml Wasser befüllt worden, in denen jeweils ein Spatel Lebensmittelfarbe zum Färben von Hühnereiern in den Farben grün, blau, gelb und rot gelöst worden ist. In je einem weiteren Becherglas sind dann je 15 ml der blauen und roten Lösung zur Herstellung einer fünften Tracerlösung (violett) sowie je 15 ml der blauen und grünen Lösung zur Herstellung einer sechsten Tracerlösung (petrol) vermischt worden.



Abbildung 68: Überblicksdarstellung aller Schwinden, mittels Dreiwegeventile ist es möglich, Schwinden mit mehreren Abflusswegen zu modellieren (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 69: Weitere Reliefgestaltung mittels Krepp, die modellierten Schwinden müssen entsprechend frei bleiben (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 70: Links: Reliefgestaltung mittels Krepp; Rechts: Detaillierter Blick auf die Befestigung der Schwinden sowie Wegleitung des vertikalen Abflusses – dabei basieren vorhandene Schlauchschlingen auf technischer Notwendigkeit, um Schlauchlänge zu verbrauchen und haben keinen Modellierungszweck (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen bis nun erläuterte Modellbestandteile noch einmal im Detail, ebenso ist die Reliefgestaltung mittels Modellkrepp bereits abschätzbar sowie durch Vogelperspektive die Verteilung der Schwinden ersichtlich.



Abbildung 71: Links: Modellierter Karstquelle nach abgeschlossener Reliefgestaltung; Rechts: Überblick über die Schwinden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Abbildung 72 zeigt das Bergmodell nach abgeschlossener Reliefgestaltung aus unterschiedlichen Perspektiven, wobei Abbildung 73 jene Karstquelle am Südhang im Detail

zeigt. Zu deren Stabilisierung ist diese auf ein Stück Zinkblech aufgesetzt, welches mittels Heißkleber an einer Holzstrebe befestigt worden ist.



Abbildung 72: Abgeschlossenes Relief; Links: Seitenansicht; Rechts: Frontalansicht (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 73: Modellierter Karstquelle am „Südabhang“ (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Die in Abbildung 74 präsentierte Seitenfront wird auch beim fertiggestellten Bergmodell in geöffneter Form verbleiben, um damit die modellierten, innerhalb eines Karstgebirges, ablaufenden Prozesse erläutern zu können. Die da wären einerseits der vertikale Abfluss durch wasserdurchlässiges Kalkgestein, welcher im Modell eben mit den Schläuchen modelliert ist und andererseits der horizontale Abfluss entlang der von Süd nach Nord fallenden wasserundurchlässigen Schichten hin zu den Karstquellen, modelliert in Form der aus Zinkblech gebogenen und vergipsten Rinnen. Zur Stabilisierung und zur kontrollierten Ausleitung der Flüssigkeit aus den Schläuchen auf die Rinnen sind die Schlauchenden mittels Gewebeband sowie Heißkleber entsprechend an den Rinnen befestigt worden, wie insbesondere der rechte Abbildungsausschnitt zeigt.

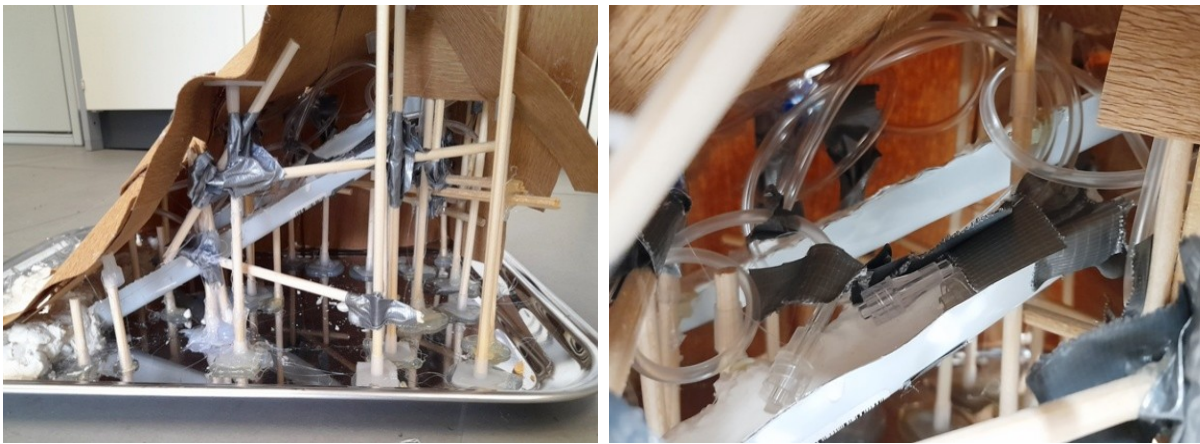


Abbildung 74: Blick in das Seitenfenster zur Demonstration der Abläufe im Berginneren (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Im nächsten Schritt ist die Texturierung der Oberfläche realisiert worden. Erste Versuche dazu sind mit der Sandsteinmodellierungsmasse der Firma Noch durchgeführt worden. Dabei geht aus Abbildung 75 jedoch klar hervor, dass diese Masse zur Modellierung von Kalkgestein deutlich zu dunkel ist, weshalb die Masse einerseits mit Gips gestreckt worden ist, um eine hellere Farbe zu erzielen und andererseits, um grob gemörserte Kreide (Weiß) ergänzt worden ist, um eine entsprechend ansprechendere Textur zu erzielen, was schließlich in Abbildung 76 ersichtlich ist.



Abbildung 75: Die Sandsteinmodellmasse ist zur Modellierung der Gesteinsoberfläche eines Kalkgebirges deutlich zu dunkel (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 76: Durch Strecken der Sandsteinmodellmasse mit Gips und grobgemörserter Kreide kann eine für Kalkgebirge farblich und texturierte adäquate Oberflächenmasse geschaffen werden (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Beim Auftragen der Oberflächenmasse ist insbesondere darauf Rücksicht genommen worden, dass die Schwinden nicht nur insoweit frei bleiben, als dass in späterer Folge noch die entsprechenden Spritzen eingesetzt werden können sondern auch darauf, dass die Schwinden – also die Butterflykanülen – nicht verstopfen, wozu diese während der Oberflächengestaltung mit Schraubverschlüssen verschlossen worden waren. Dies ist detailliert in Abbildung 77 dargestellt. Eine überblicksmäßige Darstellung bezüglich Oberflächenmodellierung sowohl im Bereich der modellierten Schwinden als auch im Bereich der modellierten Karstquellen liefert Abbildung 78.



Abbildung 77: Oberflächengestaltung im Bereich einer Schwinde – um einen Verschluss der Butterflykanüle durch die Modelliermasse zu verhindern, erfolgte deren Schutz mittels Schraubverschluss (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 78: Oberflächenmodellierung im Bereich der Karstquellen (links) und dem Karstplateau (rechts) (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Abbildung 79, Abbildung 80 & Abbildung 81 zeigen das quasi fertige Bergmodell aus unterschiedlichen Perspektiven. Die entsprechenden fachlichen Ausführungen dazu finden sich im dazugehörigen Fachkapitel 5 inkl. der Graphik zum unterirdischen Abflussplan des Bergmodells, welche in Kapitel 5.4. in Abbildung 57 dargestellt ist.



Abbildung 79: Bergmodell, Sichtfensterseitig (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 80: Bergmodell Seitenaufnahme mit Gipfel im Hintergrund (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).



Abbildung 81: Bergmodell frontal, vogelperspektivisch (eigene Aufnahme, Mai-Juni 2024).

Versuchsanleitung



Material

- kl. Becherglas
- 3 Filtertrichter
- 4 Reagenzgläser
- Glasstab
- Lupe
- Objektträger
- Pinzette/Pipette
- 2 Magnesiastäbchen
- Gasbrenner

Chemikalien

- Salzsäure (1 mol/L)
- Schwefelsäure (1 mol/L)
- Natriumcarbonat-Lsg. (15%)

Proben

- Karstgestein (z.B. Dachsteinkalk, ca. 3 cm je Länge reichen)



Durchführung

1. Gib die Karstgesteinsprobe in ein Becherglas.
2. Übergieße diese mit Salzsäure (einemolar) und lass die eintretende Reaktion ca. 3 Minuten laufen.
3. Filtrierte und teile das Filtrat auf zwei Reagenzgläser auf.
4. Füge zum ersten Filtrat dieselbe Menge Schwefelsäure und zum zweiten Filtrat dieselbe Menge Natriumcarbonat-Lsg. hinzu.
5. Entnimm vom ersten Filtrat einen Tropfen und betrachte diesen auf einem Objektträger unter der Lupe.
6. Reibe währenddessen mit dem Glasstab an der Reagenzglasinnenwand der Probe mit der zugesetzten Schwefelsäure und beobachte die Veränderung. Beobachte auch mittels Lupe die Veränderung des Tropfens auf dem Objektträger.
7. Filtrierte den Inhalt beider Reagenzgläser und untersuche die Filtrerrückstände jeweils mit separatem Magnesiastäbchen mittels Flammenfärbung.

SICHERHEIT

Salzsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.
Schwefelsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
Natriumcarbonat		H319: Verursacht schwere Augenreizung.

Vorsicht: Natriumcarbonat reagiert in Lösung besonders alkalisch!

Entsorgung:

Lösungen stark verdünnt über den Abfluss, Filter und Magnesiastäbchen über den Hausmüll.

Klassische qualitative Nachweise in Karstgestein

Auswertungsblatt



Beobachtung

Nach dem Zufügen der Salzsäure startet eine Reaktion, die zu starker Gasbildung führt. Die Lösung färbt sich aufgrund des sich zersetzenden Gesteins gräulich bzw. beinhaltet die Lösung weiters auch eine nicht geringe Menge an Schwebefracht, welche durch das Filtrieren im Filter zurückbleibt, sodass das Filtrat schließlich klar ist.

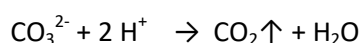
Beim Zufügen der Natriumcarbonat-Lsg. bildet sich sofort ein intensiver Niederschlag, beim Zufügen der Schwefelsäure ist anfangs nichts zu erkennen. Im Tropfen auf dem Objektträger bildet sich mit der Zeit eine kristalline, unlösliche Substanz in Form von Schlieren, die gut mit der Lupe zu erkennen ist. Nach mehreren Minuten findet sich ein intensiver Niederschlag im Tropfen. Im Reagenzglas bildet sich nach längerem Reiben mit dem Glasstab ebenso ein intensiver weißer Niederschlag.

In der Flammenfärbung zeigen beide Niederschläge eine intensiv orange Färbung, wobei der Niederschlag aus der Fällung mit Natriumcarbonat-Lsg. intensiver ist und bereits auch nach deutlich kürzerer Zeit auftritt.

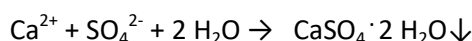
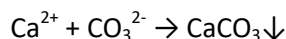


Erkenntnis

Die Gasentwicklung durch Säure lässt folgern, dass die Probe carbonathaltig ist:



Die Fällungsreaktionen mit Schwefelsäure sowie mit Natriumcarbonat-Lsg. deuten auf Calciumionen hin:



Die intensiv orange Flammenfärbung stellt schließlich ein weiteres Indiz für das Vorhandensein von Calciumionen dar. (Im Falle des Niederschlages durch die Fällung mit Natriumcarbonat könnte die Intensität allerdings auch durch eine Gelbfärbung durch Natriumionen verstärkt werden, auch wenn diese in der Theorie aufgrund deren Löslichkeit größtenteils im Filtrat vorliegen sollten)

Im Falle dessen, dass kein Carbonatgestein vorliegen würde, käme es zu keiner Gasentwicklung nach Zugabe von Salzsäure.



AUFTRÄGE

1. Zeige mittels Fällungsreaktionen sowie Flammenfärbung, dass die Gesteinsprobe unter anderem aus Calciumionen besteht.
2. Nenne auf Basis dieses Versuches ein Argument, welches dafür spricht, dass die Probe ebenso Carbonationen und damit schließlich Calciumcarbonat enthält.
3. Erläutere, wie Nichtcarbonatgestein (z.B. Augensteine) von Carbonatgestein unterschieden werden könnte.

1.2. Apparative Durchführung qualitativer Nachweise in Karstgestein

Versuchsanleitung



Material

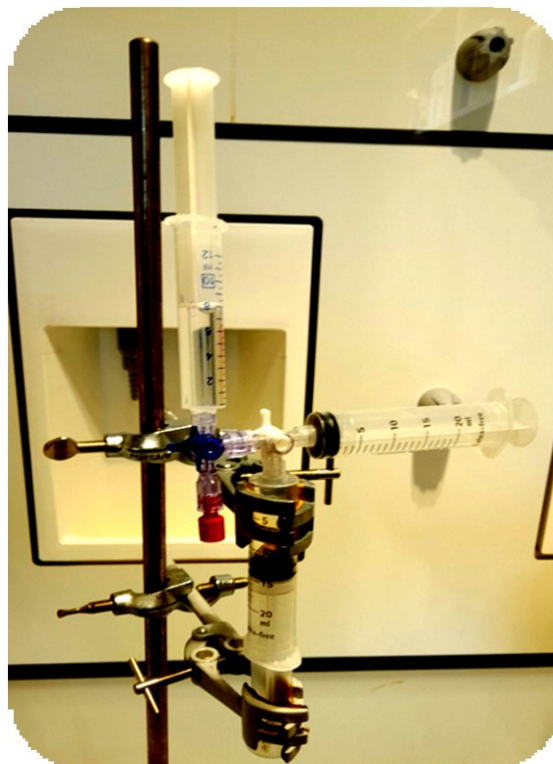
- 3 Spritzen (25 ml)
- 2 Spritzen (12 ml)
- 2 Dreiwegeventile inkl. Verschluss
- 5 Reagenzgläser
- Reagenzglasgestell
- 3 Filtertrichter
- Pinzette/Pipette
- 2 Magnesiastäbchen
- Stativ, 3 Stativklammern & -muffen
- Gasbrenner
- Glasstab & Lupe
- Objektträger
- Feuerzeug

Chemikalien

- Calciumhydroxid-Lsg.
- Salzsäure (1 mol/L)
- Schwefelsäure (1 mol/L)
- Natriumcarbonat-Lsg. (15%)
- Teststäbchen für Eisenionen (Machery-Nagel)

Probe:

- Karstgestein (z.B. Dachsteinkalk mit roten Einschlüssen, Größe für Spritzenzylinder passend)



Durchführung

1. Baue die Apparatur entsprechend der oben gezeigten Abbildung auf und gib die Probe wie in der Abbildung in die untere, große Spritze. An dieser Spritze werden zwei Stativklammern befestigt, eine am Kolben, die andere am Zylinder, sodass durch spätere Druckänderungen das Volumen konstant bleiben kann.
2. Eine dritte Stativklemme (in der Abb. nicht gezeigt) befestigt die kleine, senkrecht stehende Spritze am Spritzenzylinder, welche mit 12 ml einmolarer Salzsäure gefüllt ist. Halte eine leere 25 ml sowie eine leere 12 ml-Spritze bereit. Eine weitere 25 ml-Spritze wird zu einem Viertel mit Luft und zu einem weiteren Viertel mit Calciumhydroxid-Lsg. gefüllt.
3. Bereite auch ein Reagenzglas vor, welches zu 3 cm hoch mit Calciumhydroxid-Lsg. gefüllt ist.
4. Schalte die Dreiwegeventile nun so, dass mit der waagrechten großen Spritze das Probengefäß evakuiert werden kann. (3x). Schalte die Dreiwegeventile anschließend so, dass die Salzsäure aufgrund des Druckunterschiedes in das zuvor evakuierte Probengefäß einströmen kann.
5. Saug nun mit einer kleinen, waagrecht angebrachten Spritze jene Salzsäure auf, welche noch im Leitungssystem vorliegt – diese darf nämlich nicht in eines der Reaktionsgefäße mit der Calciumhydroxid-Lsg. gelangen.
6. Setze nun wieder die leere, große Spritze waagrecht auf und fange das entstehende Gas auf. Überführe das aufgefangene Gas in das Reagenzglas mit der Calciumhydroxid-Lsg. und schwenke dieses leicht.
7. Setze schließlich die Spritze mit der Calciumhydroxid-Lsg. auf die waagrechte Spritzenposition auf und fange etwas Gas auf. Vorsicht: Spritze unbedingt absetzen, bevor durch einen Überdruck der Kolben abspringt und Calciumhydroxid-Lsg. austritt!



Durchführung - Fortsetzung

8. Löse nach der Reaktion die Apparatur von den unteren beiden Stativklammern, sodass diese nur noch an der obersten Stativklemme befestigt ist. Überführe nun die Flüssigkeit aus dem Probengefäß durch Andrücken des Kolbens über das entsprechend eingestellte Dreiwegeventil in ein Reagenzglas.
8. Die Lösung kann mit einem entsprechenden Teststreifen auf Eisenionen getestet werden.
9. Filtrierte nun und teile das Filtrat auf zwei Reagenzgläser auf.
10. Füge in das erste Filtrat dieselbe Menge Schwefelsäure und zum zweiten Filtrat dieselbe Menge Natriumcarbonat-Lsg. zu.
11. Entnimm vom ersten Filtrat einen Tropfen und betrachte diesen auf einem Objektträger unter der Lupe. Reibe währenddessen mit dem Glasstab an der Reagenzglasinnenwand der Probe mit der Schwefelsäure und beobachte die Veränderung. Beobachte auch mittels Lupe die Veränderung des Tropfens auf dem Objektträger.
13. Filtrierte den Inhalt beider Reagenzgläser und untersuche die Filtrerrückstände jeweils mit separatem Magnesiastäbchen mittels Flammenfärbung.

SICHERHEIT

Salzsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.
Schwefelsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
Natriumcarbonat		H319: Verursacht schwere Augenreizung
Calciumhydroxid		H315: Verursacht Hautreizungen. H318: Verursacht schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.

Entsorgung:

Lösungen stark verdünnt über den Abfluss entsorgen.

Filter, Teststreifen und Magnesiastäbchen über den Hausmüll entsorgen.



AUFTRÄGE

1. Baue gezeigte Apparatur auf und zeige, dass Dachsteinkalk unter anderem aus Calciumionen wie auch aus Carbonationen besteht.
2. Stelle fest, ob die Probe weiters auch Eisenionen enthält.



Beobachtung

Nach Starten der Reaktion und Auffangen des Reaktionsproduktes entsteht sowohl im Reagenzglas als auch in der Spritze in der zuvor klaren Calciumhydroxid-Lsg. eine deutliche Trübung.

Das Testfeld auf dem Teststreifen für Eisenionen verfärbt sich nach dem Testen des Filtrates blau.

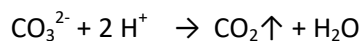
Beim Zufügen der Natriumcarbonat-Lsg. bildet sich sofort ein intensiver Niederschlag, beim Zufügen der Schwefelsäure ist anfangs noch nichts zu erkennen. Im Tropfen auf dem Objektträger bildet sich nach wenigen Minuten eine kristalline, unlösliche Substanz, die gut mit der Lupe zu erkennen ist - nach mehreren Minuten findet sich ein intensiver Niederschlag im Tropfen. Im Reagenzglas bildet sich nach längerem Reiben mit dem Glasstab an der Innenwand ebenso ein intensiver, weißer Niederschlag.

In der Flammenfärbung zeigen beide Niederschläge eine intensiv orange Färbung, wobei die Färbung durch den Niederschlag aus der Fällung mit Natriumcarbonat-Lsg. intensiver ausfällt und bereits auch nach deutlich kürzerer Zeit auftritt.

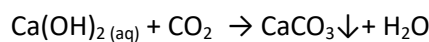


Erkenntnis

Die Trübung, die durch das Einleiten des Reaktionsproduktes in die Calciumhydroxid-Lsg. entsteht, ist ein Nachweis für CO_2 . Dieses entsteht durch Reaktion zwischen Säure und Carbonat, aus dem die Probe offensichtlich besteht:

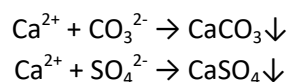


Die Trübung kommt dadurch zustande, da das Calciumhydroxid mit dem Kohlenstoffdioxid zu schwer löslichem Calciumcarbonat reagiert, welches als Trübung ersichtlich wird:



Die Blaufärbung des Testfeldes am Teststreifen weist auf das Vorhandensein von Eisenionen hin. Diese sind auch der Grund für die rot gefärbten Einschlüsse im Gestein.

Die Fällungsreaktionen mit Schwefelsäure sowie Natriumcarbonat-Lsg. weisen auf Calciumionen hin:



Die intensiv orange Flammenfärbung stellt schließlich ein weiteres Indiz für das Vorhandensein von Calciumionen dar. (Im Falle des Niederschlages durch die Fällung mit Natriumcarbonat könnte die Intensität allerdings auch durch eine Gelbfärbung durch Natriumionen verstärkt werden, auch wenn diese in der Theorie aufgrund deren Löslichkeit größtenteils im Filtrat vorliegen sollten)

1.3. Analytik ausgewählter Metallionen mittels Teststreifen in unterschiedlichen Gesteinsproben

Versuchsanleitung



Material

-Petrischale

Chemikalien

- Salzsäure (1 mol/L)
- Salzsäure, mit Natriumcarbonat auf pH >2 eingestellt
- 7 Teststreifen für Eisenionen
- 7 Teststreifen für Kupferionen

Proben

- Marmor
- Dachsteinkalk
- Hallstätter Kalk
- Rotschlamm
- Kupferschlacke
- Malachit



Durchführung

1. Gib auf jede Probe einen Tropfen einmolarer Salzsäure.
2. Teste jeweils anschließend, nach ca. einer Minute, jede der Proben mit einem Teststreifen für Eisenionen. Ggf. den Tropfen von der Probe auf das Testpapier abrinnen lassen. Teste zusätzlich auch die Salzsäure als Blindprobe.
3. Gib nun auf jede Probe einen Tropfen der auf einen pH-Wert >2 eingestellten Salzsäure.
4. Teste jeweils anschließend jede der Proben inkl. der Salzsäure als Blindprobe mit einem Teststreifen für Kupferionen.

SICHERHEIT

Salzsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.
Natriumcarbonat		H319: Verursacht schwere Augenreizung.
Quantofix Kupfer 100-300 mg/L	-	Keine Gefahrenklasse laut SDB.
Quantofix Eisen 2-100 mg/L	-	Keine Gefahrenklasse laut SDB.

Beim Hantieren mit den Gesteinsproben Handschuhe benutzen!

Entsorgung:

Die Teststreifen im Hausmüll entsorgen, die Tropfen mit Küchenrolle abwischen und die Küchenrolle ebenfalls über den Hausmüll entsorgen.



Beobachtung

Probe	Test auf Eisenionen	Test auf Kupferionen
Marmor	Keine Verfärbung*	Keine Verfärbung
Hallstätter Kalk	Blaufärbung	Keine Verfärbung
Dachsteinkalk	Blaufärbung	Keine Verfärbung
Rotschlamm	Blaufärbung	Keine Verfärbung
Kupferschlacke	Leichte Grau-Färbung	Lilla-Färbung
Malachit	Leichte Grau-Färbung	Lilla-Färbung
Blindprobe	Keine Verfärbung	Keine Verfärbung

Bei Rotschlammproben (aber teils auch bei einzelnen Dachsteinkalkproben) treten zum Teil sogar intensive Blaufärbungen auf, *wenige Marmorproben zeigten jedoch auch schwache Blaufärbungen.



Erkenntnis

Die zuallermeist fehlende Verfärbung der Teststreifen beim Marmor zeigt, dass dieser maximal einen entsprechenden Ionengehalt unter der Nachweisgrenze besitzt. Die Lila-Färbung beim Malachit bzw. bei der Kupferschlacke lässt auf das Vorhandensein von Kupferionen schließen. Deren Graufärbung bei den Teststreifen für Eisenionen kann dadurch erklärt werden, dass diese durch die Kupferionen gestört werden können. Weiters zeigt sich mittels der Teststäbchen, dass sowohl Dachsteinkalk als auch der Hallstätter Kalk wie auch der Rotschlamm Eisenionen enthält. Bei letzteren Beiden sind diese auch für die Rotfärbung des Materials verantwortlich, wie es auch die Kupferionen für die jeweilige Grünfärbung sind.

Die intensiven Blaufärbungen des Schnelltests bei einzelnen Proben weisen auf einen höheren Gehalt an Eisenionen hin als bei Proben mit schwächerer Blaufärbung.



AUFTRÄGE

1. Teste die Proben mittels Quantofix Eisen 2-100 mg/L auf das Vorhandensein von Eisenionen.
2. Teste die Proben mittels Quantofix Kupfer 100-300 mg/L auf das Vorhandensein von Kupferionen.

1.4. Nasschemische Nachweise ausgewählter Metallionen in unterschiedlichen Gesteinsproben

Versuchsanleitung



Material

- 3 Reagenzgläser & 3 Schraub/Schnappdeckelgläser
- Reagenzglasgestell
- Pinzette

Chemikalien

- Salzsäure (1 mol/L)
- Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lsg.
- Natriumcarbonat-Lsg. (15%)
- 3 Teststreifen für Eisen- bzw. Kupferionen

Proben

- Marmor, Rotschlamm (Dachstein) & Malachit



Durchführung

1. Löse sowohl die Marmor-, Malachit als auch Brösel der Rotschlammprobe im Reagenzglas in einem cm hoch einmolarer Salzsäure. Dieselbe Menge an Malachitprobe in „Salzsäure, mit Natriumcarbonat auf pH >2 eingestellt“ lösen.
2. Nach ca. 5 Minuten alle 3 Lösungen im Schnapp/Schraubdeckelglas jeweils mit beiden Teststreifen testen.
3. Der Marmor- und Rotschlammprobe zusätzlich eine Pipettenfüllung Kaliumhexacyanoferrat-Lsg. zufügen, der Malachitprobe eine Pipettenfüllung Natriumcarbonat-Lsg. zufügen.

SICHERHEIT

Salzsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.
Natriumcarbonat		H319: Verursacht schwere Augenreizung.
Kaliumhexacyanoferrat (II)		H412: Schädlich für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung. EUH032: Entwickelt bei Berührung mit Säure sehr giftige Gase.
Quantofix Kupfer 100-300 mg/L	-	Keine Gefahrenklasse laut SDB.
Quantofix Eisen 2-100 mg/L	-	Keine Gefahrenklasse laut SDB.
Kupfer(II)-carbonathydroxid (Malachit)		H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. H332: Gesundheitsschädlich bei Einatmen. H319: Verursacht schwere Augenreizung. H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.

Malachit und Kupferschlacke sollten nur mit Handschuhen berührt werden – Staubbildung unbedingt vermeiden!

Entsorgung:

Die Teststreifen im Hausmüll entsorgen, die Tropfen mit Küchenrolle abwischen und Küchenrolle ebenfalls über den Hausmüll entsorgen. Die Lösungen selbst im Abfallbehälter für Schwermetallsalze entsorgen.



Beobachtung

Die Proben sind in der Säure gut löslich, die Lösung mit der Rotschlammprobe färbt sich intensiv rot.

Bei der Marmorprobe liefern die Schnelltests negative Resultate, bei der Rotschlammprobe liefert der Teststreifen für Eisenionen, bei der Malachit-Probe der Teststreifen für Kupferionen ein positives Resultat.

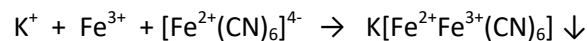
Die RotschlammLösung verfärbt sich mit Kaliumhexacyanoferrat(II)-Lsg. nach Zuwarten grünlich bis bläulich, während sich die Malachitlösung durch die Natriumcarbonat-Lsg. hellblau verfärbt.



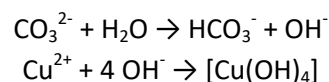
Erkenntnis

Entsprechend der Teststreifen enthält die Rotschlammprobe Eisenionen und die Malachitprobe Kupferionen.

Die Reaktion mit Kaliumhexacyanoferrat(II) weist unter Bildung von Berliner Blau (sehr schwache grünlich/bläuliche Färbung als Mischfarbe zwischen roter Lösung und geringen Mengen gebildeten Berliner Blau) ebenfalls Eisenionen im Rotschlamm nach:



Die Reaktion mit Natriumcarbonat-Lsg. weist Kupferionen in der Malachit-Probe nach:



AUFTRÄGE

1. Weise mittels Teststreifen und weiterer nasschemischer Verfahren Eisen- sowie Kupferionen in den Gesteinsproben nach.

2.1. Löslichkeit von Kalkgestein unter verschiedenen Bedingungen

Versuchsanleitung



Material

- 2 Bechergläser
- 5 Reagenzgläser & Reagenzglasgestell
- 5 Trichter
- 5 Filter
- 4 Erlenmeyerkolben 100 ml
- 1 Erlenmeyerkolben 500 ml
- 5 Wasserprobengefäße (Visocolor School)
- Thermometer & Heizplatte

Chemikalien:

- Visocolor School Wasseranalytikset (GH-1 & GH-2)
- Dest. Wasser (kalt ~10-12°C & Raumtemperatur ~ 25°C)
- Huminsäure-Aufschlammung (3,5% Massenanteil)
- CO₂-Kapsel „iSi“ inkl. Aufsatz zum Herstellen von Kohlensäure (eine Kapsel für 25 ml dest. Wasser)
- Salzsäure (1 mol/L)
- 5 Marmorproben (d= 1-2 cm)



Durchführung

1. Stelle 5 Reagenzgläser nebeneinander auf und platziere in jedem eine Marmorprobe.
2. Stelle nun die Kohlensäure-Lsg. frisch her, indem jeweils der Inhalt einer iSi-Kapsel in 25 ml destilliertem Wasser mit der jeweils beschriebenen Temperatur in einem Becherglas eingeleitet wird (mit Thermometer nachmessen und ggf. vorher mittels Heizplatte anwärmen).
3. Füge nun nachfolgend aufgelistete Lösungsmedien ca. 3 cm hoch zu je einer der Proben:
 - destilliertes Wasser
 - Kohlensäure Raumtemperatur (~25°C)
 - Kohlensäure kalt (~10-12°C)
 - Huminsäure-Aufschlammung
 - Salzsäure
4. Nachdem die Lösungsmedien 30 Minuten auf die Marmorproben einwirken konnten, werden die Reaktionsansätze in separate Erlenmeyerkolben filtriert, wobei jener Ansatz mit der Salzsäure in den großen Erlenmeyerkolben filtriert wird.
5. Anschließend werden die Ansätze auf 100 ml bzw. jener mit Salzsäure auf 500 ml verdünnt und gut geschüttelt.
6. Nachfolgend werden von jedem Filtrat 5ml in ein Wasserprobengefäß überführt.
7. Jeder Probe werden 2 Tropfen GH-1 zugefügt und durch Schwenken gleichmäßig in der Probe verteilt.
8. Schließlich werden jeder Probe bis zum eindeutigen Farbumschlag Tropfen vom Reagenz GH-2 zugefügt, wobei die Zahl der nötigen Tropfen gezählt werden muss.



AUFTRÄGE

1. Ermittle das unterschiedliche Lösungsverhalten von Kalkgestein am Beispiel Marmor unter verschiedenen Bedingungen.
2. Erläutere die Schlussfolgerungen daraus für die Entstehung von Karstformen.

SICHERHEIT

Salzsäure	 	H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.
Huminsäure	-	-
Visocolor School GH-1	 	H226: Entflammbar H315: Verursacht schwere Augenreizung. H319: Verursacht Augenreizungen
Visocolor School GH-2	-	Keine Gefahrenklassen

Weiters zu beachten:

Vorsicht beim Umgang mit den CO₂-Kapseln. Diese müssen fest im dafür vorgesehenen Aufsatz sitzen und dürfen nur in diesem entleert werden. CO₂-Kapseln nur völlig restentleert aus dem Aufsatz entfernen und der Wertstoffsammlung zuführen.

Entsorgung:

Die Wasserproben können über den Abfluss entsorgt werden.

Abgespülte Gesteinsproben können wiederverwendet werden.

Abfälle mit GH-1 und GH-2 müssen in einem eigenen Abfallbehälter gesondert gesammelt werden.

Restliche Huminsäure-Aufschlammung filtrieren und Filter inkl. Rückstand über den Hausmüll entsorgen.



Beobachtung

In der Probe mit destilliertem Wasser sind vereinzelt Gasbläschen zu erkennen, in den Proben mit Kohlensäure lässt sich vermehrt Gasentwicklung feststellen. Die Probe mit Salzsäure lässt eine sehr starke Gasentwicklung erkennen. Aufgrund der farblichen Trübung in der Probe mit zugesetzter Huminsäure kann hier aus optischen Gründen nicht festgestellt werden, ob eine Gasentwicklung zu beobachten wäre.

Nach Zufügen von GH-1 färben sich die Probenfiltrate Rot bis Rosarot, nach Zufügen der entsprechenden Menge GH 2 dunkelgrün.

Tabelle 1: Verbrauch von GH-2:

Marmorprobe/Lösungsmedium	Tropfen GH-2
Destilliertes Wasser	0,5-1
Kohlensäure Raumtemperatur	1-2
Kohlensäure kalt	2-2,5
Huminsäure-Aufschlammung	1-2
Salzsäure	20-30



Erkenntnis

Die unterschiedliche Menge an Verbrauch von GH-2 zeigt, dass in den verschiedenen Lösungen unterschiedliche Mengen an Calciumionen gelöst worden sind. Daraus kann schlussgefolgert werden, dass die Bildung von Verkarstung bzw. die Löslichkeit von Kalkgestein von unterschiedlichen Bedingungen abhängig sind.

So zeigt der geringe Verbrauch an GH-2 in der Probe mit Lösungsmedium Wasser, dass in reinem Wasser sehr wenig Kalk gelöst wird und demnach Verkarstungsprozesse kaum bis gar nicht erfolgen würden. Der hohe Verbrauch an GH-2 in der Probe mit Lösungsmedium Salzsäure, trotz sehr starker Verdünnung zeigt, dass Kalk im sauren Medium besonders gut löslich ist und demnach Säuren stark zur Verkarstung beitragen können. In der Natur ist dies insbesondere die Kohlensäure, die durch in Wasser gelöstes Kohlenstoffdioxid entsteht. Der Modellversuch zeigt, dass sich in den Kohlensäureproben mehr Kalk gelöst hat, als in reinem Wasser. Da sich in kaltem Wasser mehr Kohlenstoffdioxid löst und entsprechend mehr Kohlensäure entsteht, löst sich darin auch mehr Kalk, wie der höhere Verbrauch an GH-2 gezeigt hat. Ebenfalls tragen Huminsäuren zur Verkarstung bei, wie der Modellversuch zeigt, was bedeutet, dass Vegetation, die in weiterer Folge Huminsäuren produziert, ein karstbildender Faktor sein kann.

2.2. Modellversuch zur Entstehung von Lösungsdolinen

Versuchsanleitung



Material

- Stativ
- 2 Stativklappen
- Kristallisierschale
- 2 leere Aluschälchen von Teelichtern
- Spatel & Schere
- Spritzenkanüle

Chemikalien

- Kalk
- Sand
- Wasser
- Salzsäure (1 mol/L)



Durchführung

1. Stich mittels Schere je ein kleines Loch in den Boden der beiden Aluschälchen.
2. Befülle jeweils ein Aluschälchen mit Kalk bzw. mit Sand. Presse das Material mittels Löffelspatel zusammen, sodass es möglichst verdichtet und kompakt ist sowie eine möglichst glatte Oberfläche aufweist.
3. Solange Kalk bzw. Sand nachfüllen, bis kein Verdichten bzw. Nachfüllen mehr möglich ist.
4. Spanne die Aluschälchen am Stativ mittels Stativklappe ein und stelle darunter eine Kristallisierschale.
5. Tropfe auf die beiden Materialien nun jeweils abwechselnd einen Tropfen Salzsäure und einen Tropfen Wasser und beobachte jeweils.
6. Wenn das Material gut durchfeuchtet ist, stich mit der Kanüle (ggf. später noch einmal wiederholen) von oben nach unten durch das gesamte Material hindurch das Loch im Boden, sodass überstehende Flüssigkeit abtropfen kann.
7. Später kann vom tröpfchenweisen Zufügen der Flüssigkeiten auf ganze (Einweg-)pipettenfüllungen übergegangen werden.

SICHERHEIT

Kalk	-	Kein gefährlicher Stoff nach CLP
Salzsäure		H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein. H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden. H335: Kann die Atemwege reizen.

Besondere Vorsicht beim Umgang mit Spritzenkanülen – Gefahr von Stichverletzungen!

Entsorgung:

Entstandene Abfälle können über den Hausmüll entsorgt werden.



Modellversuch zur Entstehung von Lösungsdolinen

Auswertungsblatt



Beobachtung

Im Gegensatz zu Sand reagiert der gepresste Kalk unter Gasbildung mit der Salzsäure und löst sich dabei. Durch abwechselndes Zutropfen von Wasser und Salzsäure entsteht über die Zeit eine trichterförmige Einebnung, welche beim Sand nicht entsteht.



Erkenntnis

Die Trichterformbildung hier im Modell steht äquivalent zur Entstehung von Lösungsdolinen in der freien Natur. Mittels desselben Versuchsaufbaues mit Sand wird demonstriert, dass die Trichterformbildung hierbei nicht aufgrund der mechanisch getätigten Einflüsse erfolgt, sondern auf Basis der chemischen Lösung des Kalks durch Säure und durch Abtransport von Lösung mit Wasser.

Die Trichterform entsteht durch kontinuierliches Nachlösen von Kalk und damit verbundener Fugenerweiterung – in der Realität jedoch deutlich langsamer.



AUFTRÄGE

1. Modelliere mittels der gegebenen Materialien die Morphogenese einer Lösungsdoline.
2. Zeige, dass dafür als Ausgangsmaterial Kalk vonnöten ist

2.3. Modellversuch zur Bildung von Karstrillen

Versuchsanleitung

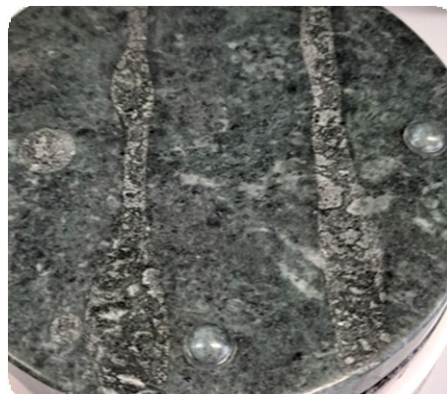


Material

- Marmorplatte
- Pipette
- Lupe
- Papiertuch

Chemikalien

- Salzsäure (1 mol/L)



Durchführung

1. Tropfe mittels Pipette einen Tropfen Salzsäure auf die Marmorplatte und beobachte auch mittels Lupe.
2. Lass den Tropfen mehrere Minuten einwirken und wische diesen anschließend mit einem Papiertuch auf. Beobachte die Stelle, auf welche der Salzsäuretropfen eingewirkt hat - nimm auch die Lupe zur Hilfe.
3. Trage mittels Pipette Salzsäure linear über die gesamte Marmorplatte auf und lass diese mehrere Minuten einwirken.
4. Wische dann die Säure mittels Papiertuch weg und vergleiche die Stelle, an der zuvor die Salzsäure linear aufgetragen war, mit der Umgebung ohne Säureeinfluss - nimm auch die Lupe zur Hilfe.

SICHERHEIT

Salzsäure



H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.
H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
H335: Kann die Atemwege reizen.

Entsorgung:

Papiertücher werden über den Hausmüll entsorgt, Marmorplatten können nach Abwaschen wiederverwendet werden.



Modellversuch zur Bildung von Karstrillen

Auswertungsblatt



Beobachtung

Die Salzsäure reagiert unter Bläschenbildung mit der Marmoroberfläche. Nach Entfernen des Salzsäuretropfens ist darunter ganz klar eine „Beschädigung“ des Materials erkennbar im Vergleich zur umliegenden Oberfläche. Solche „Beschädigungen“ des Materials zeigen sich auch großflächig entlang des linienhaften Säureauftrages.



Erkenntnis

Man erkennt, dass Säure in Carbonatgestein Lösungsvorgänge vorantreibt. Was hier im Modell gezeigt wird, kann auf die Natur übertragen werden, wo Kohlenstoffdioxid gelöst in Wasser Kohlensäure bildet. Diese wiederum rinnt gemeinsam mit dem Wasser linear entlang der Gesteinsflächen ab und bildet dort mit der Zeit Lösungsformen in Form von Karstrillen, welche hier im Modell lediglich in Form der linearen „Beschädigungen“ der Gesteinsoberflächen modelliert werden konnten.



AUFTRÄGE

1. Beschreibe die Wirkung von Säure auf Carbonatgestein und erlautere daraus schlussfolgernd die Bedeutung von Säuren auf die Entwicklung von Karst bzw. die Entstehung von Karstrillen.

3.1. Simulation des unterirdischen Abflusses in Karstgebirgen - Demonstrationsversuch

Versuchsanleitung



Material

- Bergmodell
(Beschreibung und Erläuterung des Bergmodells siehe Ausführungen der Masterarbeit).
- 6 Bechergläser

Chemikalien

- Wasser
- Lebensmittelfarben (rot, blau, gelb und grün)
- (Alternativ auch Fluoreszenzfarbstoff)



Durchführung

1. In 6 Bechergläsern wird Wasser mittels Lebensmittelfarbe eingefärbt (Rot, Blau, Gelb und Grün), wobei die fünfte und sechste Farbe durch Mischen hergestellt wird (Grün + Blau = Petrol und Rot + Blau = Violett) womit die „Tracer“ hergestellt sind.
2. Mittels der Spritzen können die „Tracer“ über die „Schwinden“ in das Bergmodell eingespeist werden, wobei über das offene Seitenfenster und den Quellaustritten das Abflussverhalten demonstriert erläutert und die Einspeise-Quellort-Relationen veranschaulicht werden können.
3. Dabei ist wesentlich, dass auch festgehalten wird, dass es sich bei den durch das Fenster sichtbaren Schläuchen um abstrakte, modellhafte Darstellung der vertikalen, wasserdurchlässigen, verkarsteten (Kalk)-Gesteinsschichten handelt und bei den beiden, schräg abfallenden, vergipsten Bahnen um die wasserstauenden bzw. wasserundurchlässigen Gesteinsschichten handelt und die Quellen schließlich jene Orte sind, bei denen das Wasser wieder die Erdoberfläche betritt.

SICHERHEIT

Keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen erforderlich – Vorsicht, der Einsatz von Lebensmittelfarbe führt gerne zu farbintensiven Verunreinigungen.

Entsorgung:

Über den Abfluss mit viel Wasser nachspülen.

3.2. Modellversuch zu den Tracerversuchen des unterirdischen Abflussverhaltens im Dachsteingebiet

Versuchsanleitung



Material

- Bergmodell
(Beschreibung und Erläuterung des Bergmodells siehe Ausführungen der Masterarbeit).
- 6 Bechergläser
- Spatel

Chemikalien

Wasser

- Lebensmittelfarben (rot, blau, gelb und grün)
- (Alternativ auch Fluoreszenzfarbstoff)



Durchführung

1. In 6 Bechergläsern wird Wasser mittels Lebensmittelfarbe eingefärbt (Rot, Blau, Gelb und Grün), wobei die fünfte und sechste Farbe durch Mischen hergestellt wird (Grün + Blau = Petrol und Rot + Blau = Violett) womit die „Tracer“ hergestellt sind.
2. Mittels der Spritzen können die Flüssigkeiten („Tracer“) über die „Schwinden“ in das Bergmodell eingebracht werden.
3. Durch das Tracing an den Quellorten kann das Abflussverhalten bzw. die unterirdischen Abflusswege des Bergmodells analysiert werden.

SICHERHEIT

Keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen erforderlich – Vorsicht, der Einsatz von Lebensmittelfarbe führt allerdings gerne zu farbintensiven Verunreinigungen.

Entsorgung:

Über den Abfluss mit viel Wasser nachspülen.



Beobachtung

Je nachdem, an welcher Einspeisungsstelle (Schwinde) Tracerflüssigkeit eingespeist wird, tritt diese an nachfolgenden Quellen wiederum zu Tage:

Schwinde 1: Quelle 2

Schwinde 2: Quelle 1

Schwinde 3: Quelle 3

Schwinde 4: Quelle 1 & Quelle 2

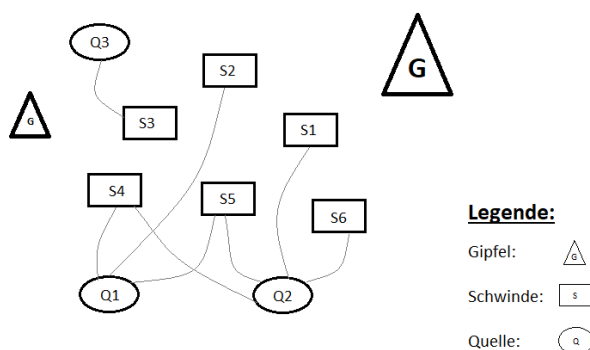
Schwinde 5: Quelle 1 & Quelle 2

Schwinde 6: Quelle 2



Erkenntnis

Aus den Beobachtungen der Tracerversuche kann für das Bergmodell nachfolgendes Abflussverhalten skizziert werden:



AUFTRÄGE

1. Ermittle mittels einfacher „Tracerversuche“ das Abflussverhalten des „stark verkarsteten“ Bergmodells und zeichne einen schematischen Abflussplan.

4.1. Modellversuch zum Basalen Gleiten

Versuchsanleitung



Material

- Zinkblech (10cm x 3cm)
- Schleifpapier
- Heißkleber
- Eiswürfel



Durchführung

1. Klebe ein passend großes Stück Schleifpapier auf ein Zinkblech (10 cm x 3 cm) (=Modellierung eines rauen Gesteinsuntergrundes). Abkühlen lassen.
2. Nimm einen Eiswürfel (=Modellierung eines Gletschers) und drücke diesen so fest wie möglich auf den modellierten Gesteinsuntergrund.
3. Versuche sogleich (unter Druck) diesen auf der Unterlage hin und her zu verschieben.
4. Drücke den Eiswürfel länger auf die Unterlage. Versuche den Eiswürfel weiterhin auf dieser hin und her zu verschieben, bis sich ein leichter Wasserfilm aufgrund des sich schmelzenden Eiswürfels gebildet hat.

SICHERHEIT

Keine speziellen Sicherheitsvorkehrungen notwendig. Vorsicht vor auf den Boden gefallene Eiswürfel – Rutschgefahr!!

Entsorgung:

Eiswürfel im Waschbecken abschmelzen lassen, Modell trocknen und wiederverwerten.

Bewegung des Gletschers





Modellversuch zum Basalen Gleiten

Auswertungsblatt



Beobachtung

Auf der rauen Unterlage kann der Eiswürfel kaum hin und her verschoben werden. Sobald der Eiswürfel angetaut ist und sich auf der rauen Unterlage ein Wasserfilm gebildet hat, gelingt dies jedoch sehr gut.



Erkenntnis

Auf der rauen Unterlage, mit Hilfe derer steiniger Untergrund modelliert wird, bewegt sich das Eis kaum. Schmilzt das Eis, wie auf einem Gletscher jedoch aufgrund des Erreichens des Druckschmelzpunktes oder aufgrund von Temperaturerhöhung leicht an, erleichtert der entstandene Flüssigkeitsfilm an der Basis die Bewegung des Eises.

Dies wird äquivalent dazu bei der Bewegung eines Gletschers als „Basales Gleiten bezeichnet und stellt neben dem Deformationsfließen eine wichtige Komponente im Bezug auf die Bewegung eines Gletschers dar.

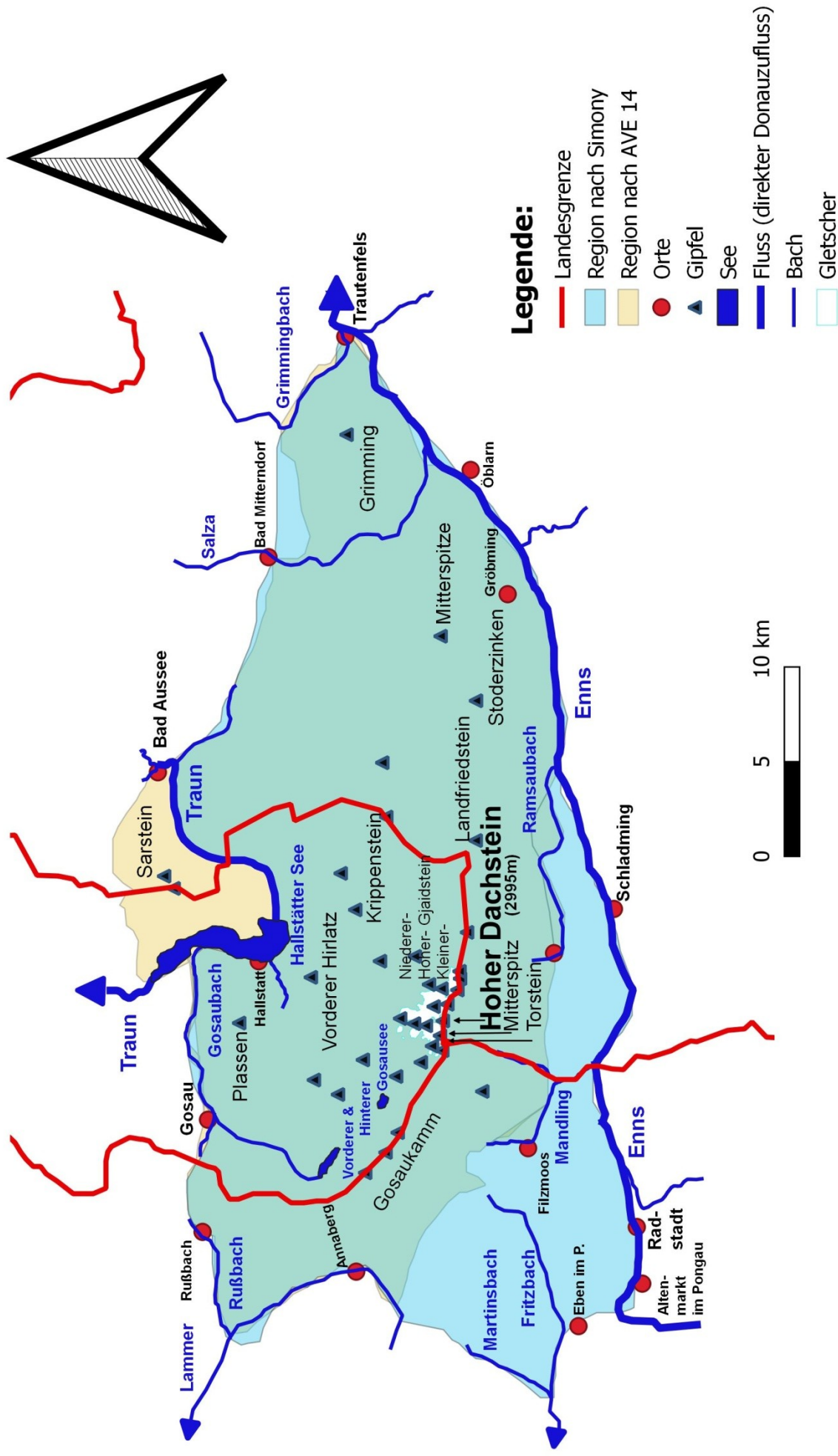


AUFTRÄGE

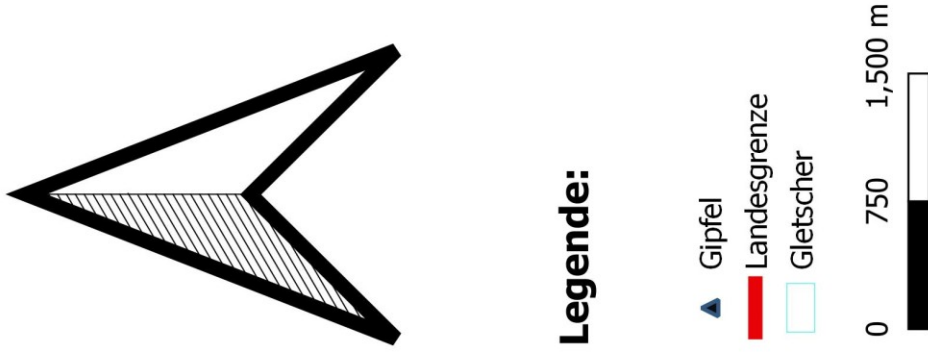
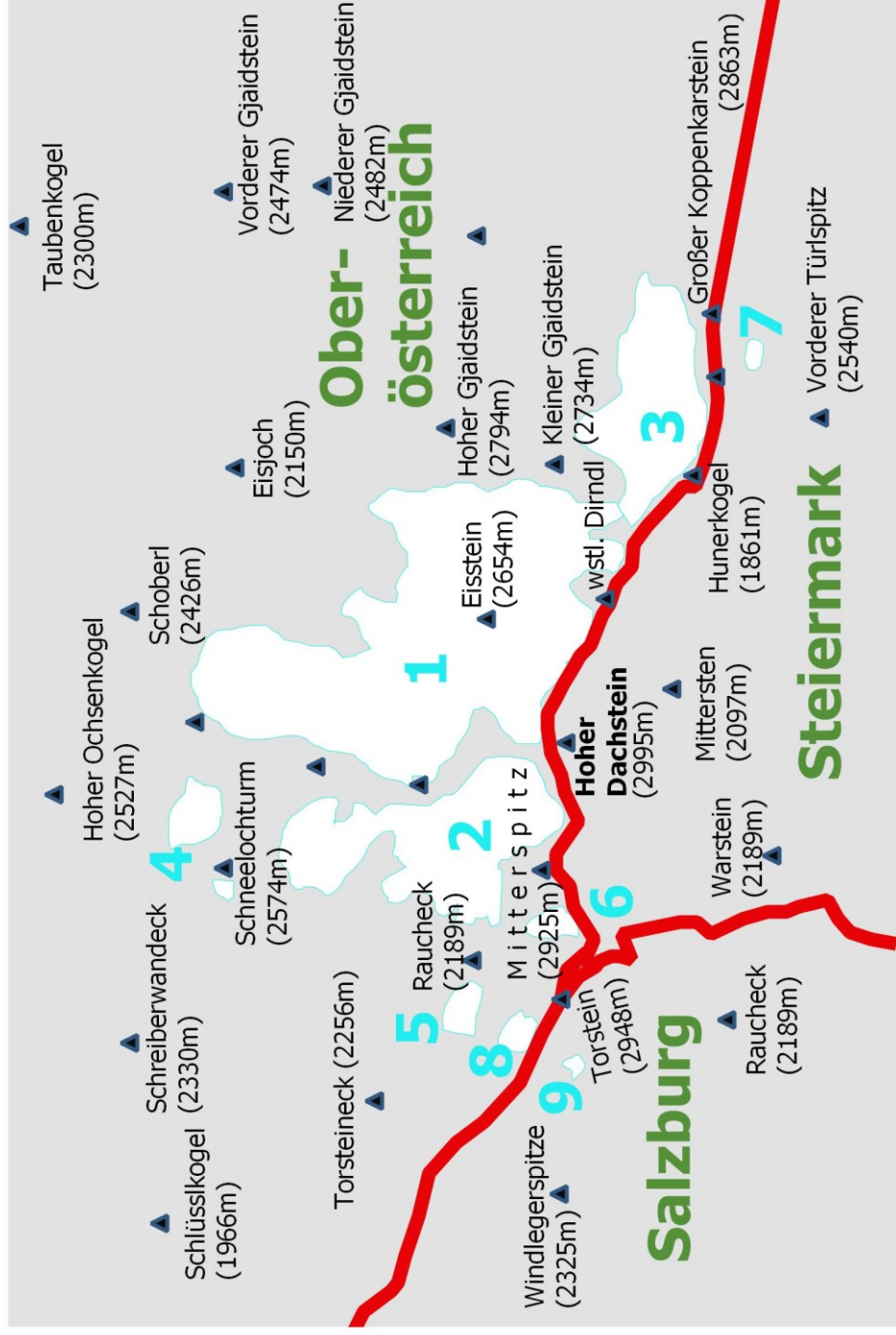
1. Ermittle den Unterschied, inwiefern sich der Eiswürfel auf dem rauen Untergrund mehr oder weniger leicht bewegen lässt.
2. Ziehe daraus eine Schlussfolgerung im Bezug auf die Bewegung von Gletschern.

Dachsteinregion - Regionalisierung nach Simony & AVE

14 überlagert



Die Dachsteingletscher - Übersicht



1= Hallstätter Gletscher, 2= Großer Gosaugletscher, 3= Schladminger Gletscher, 4= Schneelochgletscher, 5= Kleiner Gosaugletscher, 6= Untere Windlucke, 7= Edlegrießgletscher, 8= Nördlicher Torsteingletscher, 9= Südlicher Torsteingletscher

Worte des Danks:

An dieser die Masterarbeit abschließenden Stelle soll ein großer Dank an all jene Personen ausgesprochen werden, ohne deren Unterstützung gegenwärtige Ausführungen bei weitem nicht in jenem umfangreichem Ausmaße möglich gewesen wären, in welchem dieses Werk nun vorliegt.

Größter Dank gilt meinem Betreuer, Ass.-Prof. Dr. paed. Philipp Spitzer - zum Einen für die Möglichkeit, meine Masterarbeit in einem Themenbereich zum Projekt GlacierXperience zu verfassen und die damit verbundene Offenheit, diese Arbeit nicht nur auf chemischen Wege zu bestreiten, sondern auch aus einer stark geographisch geprägten Sichtweise, die schlussendlich zu dieser durchwegs interdisziplinären Abhandlung geführt hat und sogleich auch meine beiden Unterrichtsfächer im Zuge dieser Abschlussarbeit gewissermaßen vereinigt. Zum Anderen aber auch für die vielen interessanten Gespräche, aus denen ich sehr wertvolle Ideen und Feedback für das Vorgehen in meiner Arbeit schöpfen konnte. Außerdem sei auch für die Organisation einer Exkursion in das Untersuchungsgebiet herzlich zu danken, sowie für das zur Verfügung stellen des Fotoarchives des Projektes GlacierXperience zu Zwecken dieser Arbeit und eines perfekt ausgestatteten Laborplatzes am Fachdidaktikzentrum für Chemie an der Universität Graz, an dem ich mich mit großer Freude mit den Experimenten für diese Arbeit beschäftigen konnte und nicht zuletzt auch für das umfangreiche Material, dass im Zuge des Experimentieren genutzt werden konnte, wobei in dieser Hinsicht vor allem auch für die Materialien für das Bergmodell zu danken ist.

Weiters möchte ich aus dem Team des Fachdidaktikzentrums für Chemie in Graz Alina Majcen, Sebastian Tassoti und Martin Sigot danken, die mir bei Bedarf quasi jederzeit die Laborräumlichkeiten zugänglich gemacht haben.

Gebührenden Dank möchte ich auch an Doris Eibinger richten für Ihre Zeit, mir regelmäßig Materialien zugänglich zu machen, die aus organisatorischen Gründen im großen Praktikumslabor gelagert sind.