

Gletscher erlebbar machen: Entwicklung von
Modellexperimenten zur Vermittlung naturwissenschaftlicher
Phänomene alpiner und glazialer Regionen im Rahmen des
GlacierXperience-Projekts

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Education

im Studium Lehramt Sekundarstufe Allgemeinbildung im Entwicklungsverbund Süd-Ost

eingereicht an der Universität Graz

Vorgelegt von

Eva REICHMANN

Am Institut: Fachdidaktikzentrum Chemie, Institut für Chemie

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

Mitbetreuer: Dr. rer. nat. Sebastian TASSOTI BSc MSc

Graz, Mai, 2024

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich während dieser intensiven Zeit unterstützt und begleitet haben.

Großer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Philipp Spitzer, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an diesem Projekt mitarbeiten zu dürfen und Teil eines tollen Teams zu sein. Ich danke ihm für das Vertrauen, das er mir entgegengebracht hat.

Ebenso möchte ich mich bei meinem Co-Betreuer Dr. Sebastian Tassoti herzlich bedanken, der mich zu einer Masterarbeit in Chemiedidaktik ermutigt und stets an mich geglaubt hat. Seine wertvollen Hinweise haben mir sehr geholfen, die Herausforderungen dieser Arbeit zu meistern.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen der GIBS (Graz International Bilingual School) und insbesondere beim Mathe-Department herzlich bedanken. Ihre Unterstützung und ihr Verständnis haben es mir ermöglicht, diese Arbeit erfolgreich während meines ersten Dienstjahres abzuschließen. Der kollegiale Austausch und die Hilfsbereitschaft im Team haben mir sehr geholfen, die Balance zwischen Beruf und Studium zu meistern. Dafür bin ich sehr dankbar.

Spezieller Dank gilt meinen Eltern, Martin und Sabine, die mir das Studium ermöglicht haben und in all meinen Entscheidungen stets hinter mir gestanden sind. Ihre bedingungslose Liebe und ihr Vertrauen in mich haben mich stets motiviert, mein Bestes zu geben. Ohne sie wäre ich nicht da, wo ich heute bin.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meiner Schwester Lisa. Mit ihrer Fähigkeit, mich selbst in anstrengenden Zeiten zum Lachen zu bringen, hat sie mir immer wieder geholfen durchzuhalten. Ihr offenes Ohr und ihre unerschütterliche Unterstützung haben mir oft den nötigen Antrieb verschafft.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Mann Jürgen ein ganz besonderes Dankeschön aussprechen. Seine liebevolle Unterstützung und grenzenlose Geduld haben mich durch die anstrengendsten Phasen dieser Arbeit getragen. Danke, dass du immer an mich geglaubt hast – vor allem dann, wenn ich es nicht getan habe.

Kurzzusammenfassung

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weltweit sind sich einig, dass die globalen Durchschnittstemperaturen steigen und sich Gletscher auf dem Rückzug befinden. Dies ist mit einer Vielzahl von Herausforderungen wie anhaltenden Dürreperioden und Wasserknappheit verbunden, welchen sich die Menschheit in der Zukunft stellen muss. Dennoch sieht nur knapp die Hälfte der in Österreich lebenden Personen den Klimawandel als ein ernstzunehmendes Problem an. Die Notwendigkeit einer verstärkten Sensibilisierung der Österreicherinnen und Österreicher für die Dringlichkeit des Klimaschutzes ist klar ersichtlich. Umweltthemen in den Unterricht zu integrieren, stellt daher einen entscheidenden Schritt zur Bildung und Aufklärung der Bevölkerung dar. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung unterrichtstauglicher Experimente, die Gletscher und die durch den Klimawandel hervorgerufenen Herausforderungen in den Fokus rücken.

Dafür wurden basierend auf dem Konzept der Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) vier praxistaugliche Experimente aufbereitet, welche den Schülerinnen und Schülern unterschiedliche Facetten von Gletschern sowie deren Bedeutung für das globale Klima und deren Bedrohung durch die Klimaerwärmung näherbringen.

Ein Experiment beschäftigt sich mit den Auswirkungen dunkler Ablagerungen auf Eisflächen auf die Albedo und damit auf die Schmelzrate von Gletschern. Weiters wird die Zusammensetzung von Kryokonit analysiert, indem der organische Anteil durch Veraschung bestimmt wird. In einem weiteren Experiment wird der Beitrag der Gletscherschmelze zum Anstieg des Meeresspiegels untersucht, indem im Rahmen eines Vergleichsexperiments der Einfluss des Schmelzens von Wasser- und Landeismassen auf die Änderung des Wasserpegels untersucht wird. Darüber hinaus wurde eine Experimentierreihe zur sogenannten Acid Rock Drainage entwickelt. Im Rahmen dieser Reihe wird eine der Auswirkungen der Permafrost- und Gletscherschmelze erforscht. Dabei wird untersucht, welche Rolle Schmelzwasser bei der Pyritoxidation spielt und danach die dadurch ausgelöste Versauerung und Kontamination von Frischwasser durch Schwermetalle aufgezeigt. Begleitet werden die Experimente durch Arbeitsaufträge aus der Lebenswelt der Lernenden, die unter anderem die Verbreitung von falschen Informationen in sozialen Medien und andere medienpräzente Umweltphänomene aufgreifen.

Durch die Experimente und die begleitenden Arbeitsaufträge wird die Grundlage für die Reflexion des eigenen Handelns geschaffen, um die Lernenden dazu zu befähigen, im Sinne der BNE informierte Entscheidungen zum Schutz der Umwelt und künftiger Generationen zu treffen.

Abstract

Scientists around the world agree that average global temperatures are rising, and glaciers are retreating. This is associated with a number of challenges, such as prolonged periods of drought and water shortages, which humanity will have to face in the future. Nevertheless, just less than half of the Austrian population consider climate change to be a serious problem. Therefore, Austrians need to be made more aware of the urgency of climate protection. Integrating environmental topics into the classroom is therefore a decisive step towards educating the people. The aim of this work is to develop experiments that focus on glaciers and the challenges posed by climate change.

Based on the concept of Education for Sustainable Development (ESD), four experiments were prepared to familiarise pupils with the different facets of glaciers, their significance for the global climate and the threat posed by global warming.

One experiment deals with the effects of dark deposits on ice surfaces on the albedo and thus on the melting rate of glaciers. Furthermore, the composition of cryoconite is analysed by determining the organic content through ashing. In a further experiment, the contribution of melting glaciers which lead to rising sea levels is analysed. This is done by comparing the influence of the melting of sea ice masses and land ice masses on the change in water level. In addition, a series of experiments on acid rock drainage has been developed. As part of this series, one of the effects of permafrost and glacier melting is being explored. The role of meltwater in pyrite oxidation is analysed and the resulting acidification and contamination of fresh water by heavy metals is then demonstrated. The experiments are accompanied by work assignments based on the learners' life values, which address issues such as the spread of false information in social media and other environmental phenomena present in the media.

The experiments and accompanying work assignments create the basis for students to reflect on their own actions in order to enable them to make informed decisions to protect the environment and future generations.

Inhalt

Danksagung.....	iii
Kurzzusammenfassung.....	v
Abstract	vi
1. Einleitung	1
2. Gletscher – ein Überblick.....	2
2.1. Begriffsabgrenzung	2
2.2. Vom Neuschnee zum Gletschereis: Entstehung und Veränderung von Gletschern.....	2
2.2.1. Voraussetzungen für die Gletscherentstehung	2
2.2.2. Schneemetamorphose	3
2.3. Die Massenbilanz: ein Zusammenspiel von Akkumulation und Ablation	4
2.4. Bedeutung für den Menschen.....	5
2.5. Gletscher und Klima.....	7
3. Experimente und deren didaktische Umsetzung	8
3.1. Der Einfluss der Albedo auf die Gletscherschmelze	8
3.1.1. Theoretischer Hintergrund.....	8
3.1.2. Experimentelles	10
3.1.3. Didaktische Umsetzung.....	11
3.2. Kryokonit: Kleine Partikel, große Wirkung	12
3.2.1. Theoretischer Hintergrund.....	12
3.2.2. Experimentelles	14
3.2.3. Didaktische Umsetzung.....	15
3.3. Wenn Eismassen schmelzen: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Anstieg des Meeresspiegels	16
3.3.1. Theoretischer Hintergrund.....	16
3.3.2. Experimentelles	19
3.3.3. Didaktische Umsetzung.....	20
3.4. Acid Rock Drainage: was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben	21
3.4.1. Theoretischer Hintergrund.....	21

3.4.2. Experimentelles	24
3.4.3. Didaktische Umsetzung.....	27
4. Didaktische Aspekte.....	30
4.1. Bildung für Nachhaltige Entwicklung.....	30
4.2. Lehrplanbezug.....	31
4.3. Lernziele und Kompetenzen.....	33
5. Conclusio und Ausblick	37
6. Literaturverzeichnis.....	39
7. Anhang	47
7.1. Arbeitsblatt: Der Einfluss der Albedo auf die Gletscherschmelze	47
7.2. Arbeitsblatt: Kryokonit: Kleine Partikel, große Wirkung	51
7.3. Arbeitsblatt: Wenn Eismassen schmelzen: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Anstieg des Meeresspiegels	55
7.4. Arbeitsblatt: Acid Rock Drainage – was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben.....	59

1. Einleitung

„Alpengletscher schmelzen mit beispielloser Geschwindigkeit“ (Redaktion, 2022). Schlagzeilen wie diese liest man heutzutage häufig, denn der Klimawandel ist eine der großen Herausforderungen unserer Zeit. Einem Bericht der UNESCO (2022) zufolge verloren die Welterbe-Gletscher im Zeitraum 2000 bis 2020 durchschnittlich etwa 58 Milliarden Tonnen Eis pro Jahr und trugen dadurch zu etwa 4,5 % zum Anstieg des globalen Meeresspiegels bei (NASA, 2024). Laut Prognosen wird ein Drittel aller Gletscher in Welterbe-Gebieten bis 2050 und die Hälfte bis 2100 verschwunden sein, sollte sich am Ausstoß der Emissionen nichts ändern (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022).

Zugegebenermaßen ist es schwer, bei all den Negativschlagzeilen und beinahe schon apokalyptischen Prognosen nicht den Mut zu verlieren, doch noch ist es nicht zu spät. Würden Treibhausgas-Emissionen drastisch reduziert und die Erderwärmung so auf 1,5°C beschränkt werden, könnten so etwa zwei Drittel der Gletscher gerettet werden (UNESCO, 2022). Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein Umdenken in der Gesellschaft nötig – Lehrpersonen kommt hier eine tragende Rolle zu, da sie entscheidend zur Ausbildung der künftigen Generationen beitragen. Das Konzept der Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) strebt danach „angesichts der Ressourcenverknappung und den damit verbundenen Verteilungsproblematiken [zu] helfen, ein friedliches, solidarisches Zusammenleben in Freiheit und Wohlstand sowie in einer lebenswerten Umwelt den heutigen und künftigen Generationen zu ermöglichen“ (Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung [BMBWF], 2023). Durch kritische Reflexion des eigenen Denkens und Handelns soll so nachhaltige Entwicklung bewirkt werden. Dies soll unter anderem durch Umweltbildung an Schulen erreicht werden, welche junge Menschen dazu befähigen soll, „bei der Bewältigung von gesellschaftlichen sozialen, ökonomischen und ökologischen Herausforderungen eine aktive Rolle einzunehmen“ (Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen/Fassung vom 18.05.2024).

Das ERASMUS+-Projekt GlacierXperience setzt es sich zum Ziel, seinen Beitrag zur Umweltbildung zu leisten, indem es jungen Menschen die Bedeutung der Gletscher sowohl für den Menschen als auch für das Weltklima näherbringt. Dies geschieht durch eine Betrachtung des Themas aus mehreren Perspektiven – es sollen die chemischen, physikalischen sowie geologischen Aspekte von Gletschern beleuchtet werden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Aufbereitung unterrichtstauglicher Experimente zur Vermittlung naturwissenschaftlicher Phänomene in alpinen und glazialen Regionen. Um diese Phänomene einer breiten Masse zugänglich zu machen, wird zusätzlich eine digitale Lernumgebung entwickelt, damit auch Lernende ohne direkten Zugang zu Gletschern die Kompetenzen entwickeln können, die es braucht, um ihre aktive Rolle bei der Bewältigung der Klimakrise einnehmen zu können.

2. Gletscher – ein Überblick

Die letzten Jahre waren von Krisen geprägt – neben der Corona-Pandemie und dem Krieg in der Ukraine sehen sich die Menschen weltweit mit der Klimakrise konfrontiert. Der aktuellen Eurobarometer-Umfrage (Europäische Kommission, 2022) zufolge empfinden knapp ein Fünftel der Österreicherinnen und Österreicher die Umwelt und den Klimawandel als das aktuell wichtigste Thema, mit dem die EU konfrontiert ist. Die Erderwärmung als Folge des Klimawandels bringt ein Abschmelzen der Gletscher mit sich – bis 2050 wird ein Drittel aller Gletscher verschwunden sein, falls der Ausstoß der Emissionen nicht drastisch reduziert wird (IPCC, 2022). Um die Auswirkungen dieser Prognosen zu verstehen und etwas dagegen unternehmen zu können, ist es zuerst notwendig, sich ein grundlegendes Wissen über Gletscher anzueignen.

2.1. Begriffsabgrenzung

Oftmals fälschlich als „ewiges Eis“ bezeichnet, stellen Gletscher eine große Faszination für den Menschen dar. Die fälschliche Verwendung dieses Begriffs dürfte den meisten in den letzten Jahren schmerzlich bewusst geworden sein. So kann man regelmäßig in diversen Medien vom Gletscherschwund infolge der globalen Erwärmung lesen. Gletscher gelten als zuverlässige Anzeiger für Veränderungen im Klima, weswegen das Verständnis eben jener essenziell für all jene ist, die den Klimawandel verstehen und etwas gegen ihn unternehmen wollen (Hagg, 2020).

Der Begriff Gletscher leitet sich vom lateinischen Wort *glacies* („das Eis“) ab, umfasst aber weit mehr: „Ein Gletscher wird definiert als eine sich aktiv bewegende Masse aus Schnee, Firn und Gletschereis. Darüber hinaus sind auch Schmelzwasser und mitgeführtes Gestein Bestandteile eines Gletschers“ (Hagg, 2020, S. 4).

Die Betonung liegt hierbei auf der aktiven Bewegung der Eismassen und ist entscheidend zur Abgrenzung von anderen Eisablagerungen (Hagg, 2020).

Werden andere Eisablagerungen miteinbezogen, spricht man von der Kryosphäre. Sie beinhaltet neben Gletschern auch die Eisschilde, Schelfeis, Eisberge, Meereis sowie das Eis auf Seen und Flüssen und zusätzlich den gefrorenen Untergrund. (Ehlers, 2020)

2.2. Vom Neuschnee zum Gletschereis: Entstehung und Veränderung von Gletschern

2.2.1. Voraussetzungen für die Gletscherentstehung

Damit Gletscher entstehen können, muss – vereinfacht gesagt – mehr Schnee fallen als abschmelzen (Hagg, 2020). Die grundlegende Voraussetzung für die Gletscherentstehung ist also, dass die Schneemenge, die im Winter fällt, den Sommer überdauert und im darauffolgenden Winter durch erneute Schneefälle erhöht wird. Die Temperatur spielt dabei neben ausreichendem Niederschlag eine

wichtige Rolle: Im Sommer muss es warm genug sein, dass der Schnee auftaut und wiedergefroren, um Gletschereis bilden zu können, aber nicht so warm, dass der gefallene Schnee wieder abschmilzt (Ehlers, 2020; Fraedrich, 2016). Geringe Temperaturen allein sind aber nicht ausreichend. Auch eine hinreichende Menge an Niederschlag ist zur Entstehung von Gletschern erforderlich (Grotzinger & Jordan, 2017). Dabei ist der Zeitpunkt des Niederschlags von Bedeutung, denn Regen im Sommer trägt kaum zur Gletscherbildung bei; niederschlagsreiche Winter, in denen der Niederschlag in Form von Schnee fällt, sind für die Entstehung von Gletschern essenziell (Ehlers, 2020). Damit der Schnee auch liegenbleiben und sich ansammeln kann, ist abseits vom Klima noch das passende Relief nötig, denn die Schneemassen können sich nur in Verflachungszonen und nicht auf Steilhängen anhäufen (Hagg, 2020). Diese Bedingungen sind hauptsächlich in höheren Breiten wie den polaren und subpolaren Gebieten sowie in großen Höhen erfüllt (Grotzinger & Jordan, 2017), weswegen Gletscher vor allem auf der Nordhalbkugel der Erde anzutreffen sind (Fraedrich, 2016).

2.2.2. Schneemetamorphose

Dass Schnee die Voraussetzung für die Entstehung von Gletschern ist, ist weithin bekannt. Doch mit dem Fallen von Schnee allein ist der Prozess der Gletscherentstehung nicht beendet, sondern beginnt erst. Denn mit dem Erreichen der Erdoberfläche setzt die sogenannte Schneemetamorphose ein – ein Umwandlungsprozess, der Schnee zu Gletschereis verwandelt (Hagg, 2020).

Neuschnee, der einen Luftanteil von 90 % und eine Dichte von $0,3 \frac{g}{cm^3}$ aufweist, bildet durch wiederholtes Auftauen und Wiedergefroren mit der Zeit Gletschereis (Fraedrich, 2016). Dies geschieht hauptsächlich während der warmen Monate, wenn der Schnee tagsüber taut und nachts wieder gefriert. Durch neue Schneefälle verdichtet sich der Schnee, die Dichte nimmt immer weiter zu und der Luftanteil sinkt. So entsteht nach einiger Zeit körniger Altschnee, der als Firn bezeichnet wird und dessen Luftanteil nur noch bei 50 % und Dichte bei $0,4 \frac{g}{cm^3}$ liegt. Die Schneemasse verdichtet sich weiter, bis eine Dichte von 0,82 bis $0,85 \frac{g}{cm^3}$ erreicht ist und damit per Definition Gletschereis vorliegt. In Abbildung 1 ist die Entstehung von Gletschereis aus Neuschnee vereinfacht grafisch dargestellt.

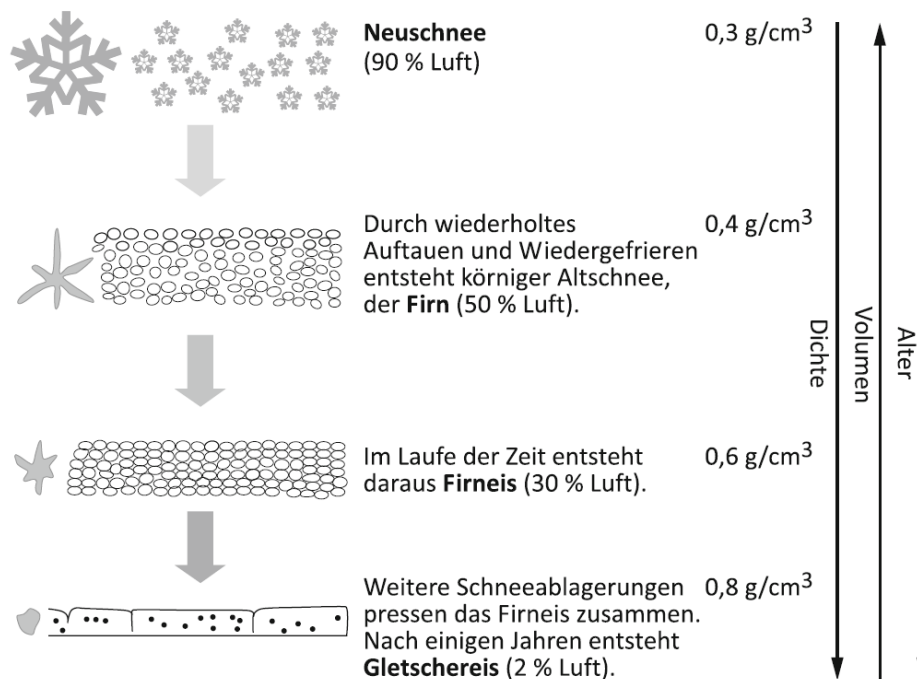


Abbildung 1: Entstehung von Gletschereis (Fraedrich, 2016).

Der Vergletscherungsprozess kann je nach klimatischen Rahmenbedingungen eine Zeitspanne von wenigen Jahren in niedrigen Breiten bis einige tausend Jahre in den extrem kalten Gebieten der Antarktis umfassen (Grotzinger & Jordan, 2017).

2.3. Die Massenbilanz: ein Zusammenspiel von Akkumulation und Ablation

Gletscher unterliegen einer ständigen Veränderung - ob ein Gletscher wächst oder sich zurückzieht, hängt unmittelbar vom Klima ab (Winkler, 2009). Die Beschreibung dieser Veränderung findet allerdings nicht über die mit freiem Auge sichtbare Länge oder Ausbreitung statt, da selbst sich zurückziehende Gletscher auf Grund der Eisbewegung paradoxerweise vorwärts fließen (Fraedrich, 2016). Darüber hinaus wird die Gletscherlänge und -fläche auch durch andere Faktoren beeinflusst und Änderungen werden erst zeitlich verzögert sichtbar, wodurch sie keinen unmittelbaren Rückschluss auf Änderungen im Lokalklima zulassen (Hagg, 2020). Um die Veränderungen ganzheitlich beschreiben zu können, bedient man sich der Massen- und Energiebilanz.

Die Massenbilanz beschreibt die Veränderung der Gletschermasse durch den Vergleich des Zuwachses an Eis durch Akkumulation und den Verlust an Eis durch Ablation. Akkumulation meint den Massenzuwachs hauptsächlich durch Schneefälle oder Schneeverfrachtungen durch Wind und Lawinen. Unter Ablation wird im Wesentlichen der Massenverlust eines Gletschers verstanden. Dieser ist bedingt durch das Abschmelzen von Schnee, Firn und Eis sowie durch Windverwehungen von Schnee oder auch Lawinenabgänge. Während bei Gebirgsgletschern die Schmelze den Hauptteil des Verlustes ausmacht, ist das Abbrechen von Eismassen (Abkalben) bei Gletschern und Eisschelfen, die in Gewässern enden, ebenfalls von Bedeutung – dies kann regional bis zu 90 % der Ablation ausmachen. (Böhm et al., 2007; Hagg, 2020; Winkler, 2009)

Durch das Sinken der Lufttemperatur mit zunehmender Höhe sowie die Veränderung der Niederschlagsmenge mit der Höhe bilden sich zwei Teilbereiche, die als Grundlage für die räumliche Differenzierung von Gletschern dienen. In höher gelegenen Gebieten überwiegt der Zuwachs an Schnee und Eis – der Bereich, in dem die Akkumulation innerhalb eines definierten Jahres höher als die Ablation ist, wird als Akkumulationsgebiet oder veraltet als Nährgebiet bezeichnet. In den tiefer gelegenen Bereichen des Gletschers schmilzt innerhalb eines Jahres nicht nur der im Winter gefallene Schnee komplett ab, sondern zusätzlich auch ein Teil des Eises der Vorjahre. Der Bereich, in dem die Ablation die Akkumulation übertrifft, heißt Ablationsgebiet oder veraltet Zehrgebiet. Dort, wo das Akkumulations- auf das Ablationsgebiet trifft, befindet sich die sogenannte Gleichgewichtslinie. Auf dieser Grenzlinie halten sich Akkumulation und Ablation die Waage – hier ist im Sommer also die exakt selbe Menge an Schnee geschmolzen wie im Winter gefallen ist. Die Gleichgewichtslinie ist damit eine theoretisch kalkulierte und vom Klima determinierte, variable Größe. Mit freiem Auge ist die Gleichgewichtslinie ungefähr dort erkennbar, wo die am Ende des Sommers schneefreie Fläche (Ablationsgebiet) auf das für gewöhnlich noch von Schnee bedeckte Akkumulationsgebiet trifft. (Böhm et al., 2007; Winkler, 2009)

Durch die Entnahme von Proben zu genau definierten Zeitpunkten sowie das Treffen von vereinfachenden Annahmen für unzugängliche Stellen können sowohl der Massenzuwachs als auch der Massenverlust annähernd bestimmt werden. Die jährliche Massenbilanz bezieht sich auf ein sogenanntes Haushaltsjahr – dieses beginnt mit der Akkumulationssaison (meist Anfang Oktober) und endet mit Abschluss der Ablationssaison (meist Ende September des folgenden Jahres). Durch Bildung der Differenz von Akkumulation und Ablation erhält man die Massenbilanz. Ist die Massenbilanz positiv, so bedeutet dies, dass der Gletscher an Masse zugelegt hat und wächst. Eine negative Massenbilanz hingegen lässt auf einen Gletscherschwund schließen. (Alean, 2010)

Ein Subsystem des Massenhaushaltes bildet die Energiebilanz einer Gletscheroberfläche. Sie quantifiziert die Energieflüsse, die zum Abschmelzen von Schnee, Eis und Firn und damit zur Ablation beitragen. Sie setzt sich aus den Größen und Richtungen der einzelnen Energieflüsse zusammen und wird hauptsächlich von der Strahlungsbilanz beeinflusst. Diese stellt die Summe aus ein- und ausgehender Strahlungsenergie dar und wird in kurzwellige und langwellige Strahlung unterteilt. Die kurzwellige Strahlung meint dabei die in einem Wellenlängenbereich von 300 bis 4000 nm liegende von der Sonne zur Erde gelangende Strahlung und stellt die primäre Energiequelle für Gletscher dar. Mit langwelliger Strahlung ist die von jedem Körper ausgehende, mit einer Wellenlänge über 4000 nm liegende Wärmestrahlung gemeint. (Böhm et al., 2007; Hagg, 2020; Winkler, 2009)

2.4. Bedeutung für den Menschen

Der Einfluss von Eismassen und insbesondere Gletschern kann Menzies (2002) zufolge in zwei Kategorien unterteilt werden: Zum einen üben Gletscher Einfluss auf Menschen und Lebensräume in ihrer unmittelbaren Umgebung aus und zum anderen haben sie weitreichenden Einfluss auf das globale

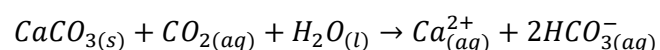
Klima und den Meeresspiegel. Global betrachtet lassen sich beinahe alle Aspekte des Lebens wie zum Beispiel die Ausbreitung von Pflanzen und Tieren, aber auch die Verteilung der Bodenarten sowie die Küstenmorphologie auf den Einfluss von Gletschern zurückführen. Selbst die Tropen, deren klimatische Bedingungen seit über 15 Millionen Jahren annähernd unverändert sind, wurden durch biogeographische Reaktionen auf die globale Vergletscherung beeinflusst.

Eine der wichtigsten Funktionen von Gletschern ist das Speichern und Bereitstellen von Frischwasser. Nicht umsonst werden Berge als natürliche Wasserspeicher bezeichnet, denn sie versorgen die tiefer gelegenen Gebiete mit lebensnotwendigem Frischwasser, welches sowohl der Trinkwasserversorgung, als auch der Bewässerung von Feldern und damit der Nahrungsmittelproduktion dient (Biemans et al., 2019; Viviroli & Weingartner, 2008). Etwa 1,9 Milliarden Menschen leben in unmittelbarer Nähe solcher Gebiete und sind auf das Wasser und das durch die Sedimente und Nährstoffe geprägte Ökosystem angewiesen (Clason et al., 2022; Immerzeel et al., 2020).

Weiters fungieren Gletscher als Puffer für die Wasserversorgung in niederschlagsarmen Regionen oder während Trockenzeiten und senken sowohl Häufigkeit als auch Schwere von Dürreperioden. Diese Pufferwirkung dürfte auch trotz des Rückgangs der Gletscher im 21. Jahrhundert erhalten bleiben, die Wirkkraft nimmt aber mit der Zeit und steigenden Emissionen ab. (Ultee et al., 2022)

Darüber hinaus setzen viele Länder (unter anderem auch Österreich) auf Wasserkraft für die Stromversorgung. Wie sich der Rückgang der Gletscher darauf auswirken wird, ist Milner et al. (2017) zufolge noch schwer abzuschätzen, da die Wasserkraft von dem verstärkten Wasserabfluss sowie der Erschließung neuer Plätze für Stauseen kurzfristig profitieren könnte, der Rückzug der Eisvorkommen sich langfristig aber vermutlich negativ auswirkt.

Abseits der Wasserversorgung kommt Gletschern auch eine Rolle als Ökosystem zu – sie beherbergen hauptsächlich Viren, Bakterien, Pilze und Algen, welche vor allem in zylinderförmigen Schmelztrichtern zu finden sind (Koch, 2010). Diese Organismen leisten durch mikrobielle Aktivität einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag am Kohlenstoffkreislauf und dienen als Kohlenstoffsenke (Anesio et al., 2009). Doch nicht nur die auf dem Eis lebenden Mikroorganismen binden CO₂, auch von Gletschern gespeiste Flüsse und Seen fungieren als CO₂-Senken: Dabei reagiert in Wasser gelöstes CO₂ gemäß der nachstehenden Reaktionsgleichung im Rahmen einer sogenannten Verwitterungsreaktion mit Carbonaten wie Kalziumcarbonat zu gelösten Calcium- und Bicarbonat-Ionen (St Pierre et al., 2019).



Durch diese Reaktion kommt es zur Bindung atmosphärischen Kohlenstoffdioxids, was eine Senkung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zur Folge hat. St Pierre et al. (2019) zufolge kann so bis zu 40 Mal mehr Kohlenstoff pro Quadratmeter gebunden werden als im Regenwald des Amazonas.

2.5. Gletscher und Klima

Wie das Klima die Entstehung von Gletschern beeinflusst, wurde bereits in Kapitel 2.2 und 2.3 beschrieben. Gletscher üben aber umgekehrt auch Einfluss auf das Klima auf lokaler und globaler Ebene aus: Da die Temperatur von sauberen Schnee- und Eisflächen nicht über 0 °C steigt, ist die Wärmeabgabe dieser Flächen gering. Dadurch kommt es im Vergleich zu eisfreien Flächen nur zu einer geringfügigen Erwärmung der oberflächennahen Luft. Weiters kommt es durch das Zusammenspiel von Luftaustausch und Wasserdampf über kalten Eisflächen zu einer Kühlung der oberflächennahen Luft. All dies trägt zur Bildung einer kühlen und stabilen Luftschicht über Gletschern bei und kann zu einer Inversion des oberflächennahen Temperaturgradienten führen. Dabei sinkt die kalte Luft aufgrund ihrer höheren Dichte ab und fließt talabwärts, was sogenannte katabatische Winde (auch bekannt als Gletscherwinde) erzeugt. Die Luftströmungen bewegen sich in die Täler und wirken so kühlend auf die umliegenden Gebiete. Besonders stark sind Gletscherwinde an Tagen, an denen die Temperaturdifferenz zwischen eisbedeckten und eisfreien Oberflächen besonders hoch ist. (Benn & Evans, 2013)

Eine Studie untersuchte die Bedeutung dieses Phänomens für das lokale Klima am Himalaya (Salerno et al., 2023). Die seit 1994 erhobenen Daten zeigen, dass die Temperaturen am Fuße des Mount Everests konstant geblieben oder sogar gesunken sind. Die Autorinnen und Autoren heben hervor, dass dies nicht trotz, sondern wegen der globalen Erwärmung geschieht. Durch die Erderwärmung wird der Fluss von warmer Luft zu Gletscheroberflächen verstärkt, was zur vermehrten Bildung katabatischer Winde führt. Die verstärkten Gletscherwinde ziehen die kühlen Luftmassen aus den Höhen herab und führen so zu einer lokalen Abkühlung. Dieser Effekt hat möglicherweise zur Erhaltung des Gletschers trotz globaler Erwärmung beigetragen. Was vorerst positiv klingt, hat aber auch negative Auswirkungen. Durch die veränderten Windmuster kommt es zu einer Abnahme der Niederschlagsmengen in glazialen Gebieten, was sich langfristig negativ auf die Massenbilanz auswirkt und somit zu einer verstärkten Gletscherschmelze führt.

Gletscher stellen offensichtlich sehr komplexe und sensible Systeme dar, was sie laut Hagg (2020) aus mehreren Gründen zu hervorragenden Klimaindikatoren macht: Aufgrund ihrer Sensibilität zeigen sie die Auswirkungen von geringen Veränderungen von Klimaparametern auf (wie den Rückzug der Gletscherzunge als Reaktion auf den Anstieg der Jahresmitteltemperaturen um wenige Zehntel Grad Celsius). Gleichzeitig geben sie einen langfristigen Trend an, da einmalige, extreme Wetterereignisse kaum einen Einfluss haben und im klimarelevanten Gesamtbild nicht abgebildet sind. Weiters geben sie nicht nur Hinweise über gegenwärtige Klimaänderungen, sondern sie helfen auch bei der Rekonstruktion des Paläoklimas, dessen Verständnis wiederum relevant für die Einordnung der zukünftigen klimatischen Bedingungen ist.

3. Experimente und deren didaktische Umsetzung

Die Bedeutung der Gletscher zeigt sich eindeutig sowohl für den Menschen direkt als auch für den Planeten generell. Die prognostizierte Schmelze der Gletscher stellt die Menschheit vor neue Herausforderungen. Im Zuge des Projekts GlacierXperience werden Schülerinnen und Schüler mit den Eigenschaften und Besonderheiten von Gletschern sowie den Auswirkungen des Klimawandels auf diese vertraut gemacht. So gewinnen sie Einsicht in die komplexen Wechselwirkungen des Mensch-Umwelt-Systems Gletscher und können geeignete Handlungsstrategien für die Zukunft entwickeln. Dies geschieht im Rahmen angeleiteter Experimente, welche in den nachstehenden Kapiteln vorgestellt werden sollen.

3.1. Der Einfluss der Albedo auf die Gletscherschmelze

3.1.1. Theoretischer Hintergrund

In den vergangenen Jahren nahm die Geschwindigkeit der Eisschmelze am grönländischen Eisschild zu, wobei die sogenannte Albedo einen Schlüsselparameter darstellt (Box et al., 2012). Oberflächen reflektieren in Abhängigkeit ihrer Beschaffenheit einen gewissen Anteil der eintreffenden Strahlung. Dieses Reflexionsvermögen wird als Albedo bezeichnet und beschreibt das Verhältnis von Licht, das auf eine nicht spiegelnde Fläche trifft, zu dem von dieser Fläche zurück gestrahlten Licht. Die Albedo nimmt Werte zwischen 0 (keine Reflexion) und 1 (totale Reflexion eines perfekt weißen Körpers) an. Eine Albedo von 0,9 wie bei Neuschnee bedeutet also, dass 90 % der solaren Strahlung reflektiert und nur 10 % der solaren Strahlung absorbiert und für Schmelzvorgänge genutzt werden. Bei von Schutt bedecktem Eis liegt die Albedo bei etwa 0,2 - hier wird also 80 % der Solarstrahlung für Schmelzvorgänge genutzt. Die Albedo gibt damit Aufschluss über den Energieanteil, der für die Ablation zur Verfügung gestellt wird. Sie trägt also unmittelbar zur Energiebilanz und damit zum Massenhaushalt von Gletschern bei. (Fraedrich, 2016; Hagg, 2020)

Bei Gletschern liegt die Albedo im Bereich von etwa 20 bis 90 % - die breite Streuung kommt durch die unterschiedlichen Schneearten zustande und ist von der Beschaffenheit der jeweiligen Oberfläche abhängig. Die Werte der Albedo der einzelnen Oberflächen variieren je nach Autor ein wenig, stimmen im Mittel aber gut überein. In der nachstehenden Tabelle wird nach Cuffey und Paterson (2010) ein Überblick über die einzelnen Albedo-Werte je nach Oberfläche gegeben:

Tabelle 1: Albedowerte für unterschiedliche Oberflächen (Cuffey & Paterson, 2010)

Oberfläche	Albedo (Wertebereich)	Albedo (Mittelwert)
Frischer trockener Schnee	0,75 – 0,98	0,85
Alter sauberer trockener Schnee	0,70 – 0,85	0,80
Alter sauberer feuchter Schnee	0,46 – 0,70	0,60
Blaues Eis	0,60 – 0,65	0,64
Sauberer Firn	0,50 – 0,65	0,55
Schuttbedeckter feuchter Schnee	0,30 – 0,50	0,40
Sauberes Eis	0,30 – 0,46	0,35
Schuttbedecktes Eis	0,06 – 0,30	0,20

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass die Albedo bei Neuschnee am höchsten ist und mit der Zeit sowie der Veränderung der Struktur und Oberfläche abnimmt. Dafür sind mehrere Prozesse verantwortlich: Die Größe der Eiskörner, die Dicke der Schneeschichten, Schmelzwasser auf der Schneeoberfläche und vor allem Verunreinigungen auf der Oberfläche durch Sandstaub oder andere Ablagerungen wie Ruß beeinflussen die Albedo maßgeblich (Warren & Wiscombe, 1980; Wiscombe & Warren, 1980). Die Freisetzung von Ruß, welcher das Produkt unvollständiger Verbrennungsvorgänge ist, nahm seit der industriellen Revolution massiv zu (McConnell et al., 2007) und wird auch durch Waldbrände, welche im Zuge der Klimaerwärmung häufiger auftreten, verstärkt (Aubry-Wake et al., 2022). Der als Aerosol vorliegende Ruß verbreitet sich neben anderen Staubpartikeln wie Sand weltweit auf Gletscheroberflächen und trägt so zur Herabsetzung der Albedo auf Gletscheroberflächen bei (Skiles et al., 2018).

Das Abschmelzen von Schnee wird stark durch lichtabsorbierende Partikel wie Staub, Ruß oder durch von Bakterien produzierten Farbstoff beeinflusst, da durch die dunklen Ablagerungen die Albedo herabgesetzt und der Schmelzvorgang so beschleunigt wird (Skiles et al., 2018). In der Schweiz konnte ein Anstieg der Schmelzraten von mit Rußpartikeln und Saharastaub verschmutztem Schnee von 15 bis 19 % im Vergleich zu reinem Schnee ausgemacht werden, wobei die Absorption von Rußpartikeln eindeutig der dominierende Faktor zu sein scheint (Gabbi et al., 2015).

Schnee und Eis schmelzen durch die dunklen Ablagerungen also schneller ab, was zu einem Rückgang der Eisschilde und damit zur Freisetzung des dunklen Gesteins unter der Eisschicht führt. Es wird dadurch weniger Strahlung reflektiert, was wiederum eine Erwärmung und damit eine weitere Eisschmelze zur Folge hat. Dieser Effekt ist als Eis-Albedo-Rückkopplung bekannt. (Glaser et al., 2010)

Beobachtbar ist dieser Effekt unter anderem auch beim arktischen Meereis: In einer Studie (Pistone et al., 2014) wurde die Änderung der Albedo über der Arktis mittels Satellitenmessungen untersucht und es konnte ein Zusammenhang zwischen dem Rückgang der Albedo und dem damit einhergehenden Rückzug der Meereisdecke nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die planetarische

Albedo der Arktis in den Jahren von 1979 bis 2011 von 0,52 auf 0,48 gesunken ist. Dies wirkt sich mit einem zusätzlichen solaren Energieeintrag von $6,4 \pm 0,9 \frac{W}{m^2}$ in den arktischen Ozean auf die Erwärmung der Ozeane aus.

3.1.2. Experimentelles

In diversen Internetforen finden sich zahlreiche Varianten dieses Versuchs. Die meisten beruhen darauf, ein Gefäß mit Eis auf eine schwarze Unterlage und ein Gefäß mit Eis auf eine weiße Unterlage zu stellen, dies mit einer Lampe zu bestrahlen und zu beobachten, in welchem Gefäß das Eis zuerst schmilzt. Dies erfüllt natürlich den Zweck, jedoch war es das Ziel, die Realität so genau wie möglich abzubilden. Da der Albedo-Effekt auf Gletschern aber hauptsächlich in Form von Kryokonit-Löchern sichtbar wird, sollte eine Variante des Versuchs entwickelt werden, die diesem Phänomen nahekommt.

Dafür wurden in zwei Petrischalen jeweils zwei annähernd gleich große Eiswürfel platziert und einer mit Kohlenstaub, welcher das Kryokonit simuliert, bestreut. Die beiden Petrischalen wurden bei etwa 25°C Außentemperatur in der Sonne platziert und die Zeit bis zum Schmelzen beider Eiswürfel gestoppt. Erwartungsgemäß schmolz der mit Kohlenstaub bestreute Eiswürfel zuerst. Es zeigte sich aber einerseits, dass es äußerst lange dauerte, bis beide Eiswürfel vollständig geschmolzen waren (17,45 Minuten), was zu langen Wartezeiten im Unterricht führen kann. Andererseits war die beobachtete zeitliche Differenz zwischen dem Schmelzen beider Eiswürfel angesichts der Gesamtdauer mit 42 Sekunden geringer als erwartet. Um die Schmelzzeit zu verkürzen, wurde auf Crushed Ice zurückgegriffen, da dieses aus mehreren kleinen Eisstücken besteht, daher großflächiger auf der Petrischale verteilt und so mit größerer Fläche der Sonnenstrahlung ausgesetzt werden kann. Dieses eignet sich nicht nur aufgrund der kürzeren Schmelzzeit besser, sondern auch aufgrund der einfacheren Dosierbarkeit der Eismasse. Während es bei Eiswürfeln kaum möglich ist, zwei Stück mit derselben Masse zu finden, kann Crushed Ice einfach und mit ausreichender Genauigkeit abgewogen werden. Weiters wurde eine isolierende Unterlage aus 5 cm dickem Styropor verwendet, um eine Erwärmung des Eises durch den aufgeheizten Untergrund zu verhindern. So konnte eine Verringerung der Schmelzzeit auf 8,8 Minuten und eine zeitliche Differenz von 1,76 Minuten erreicht werden.

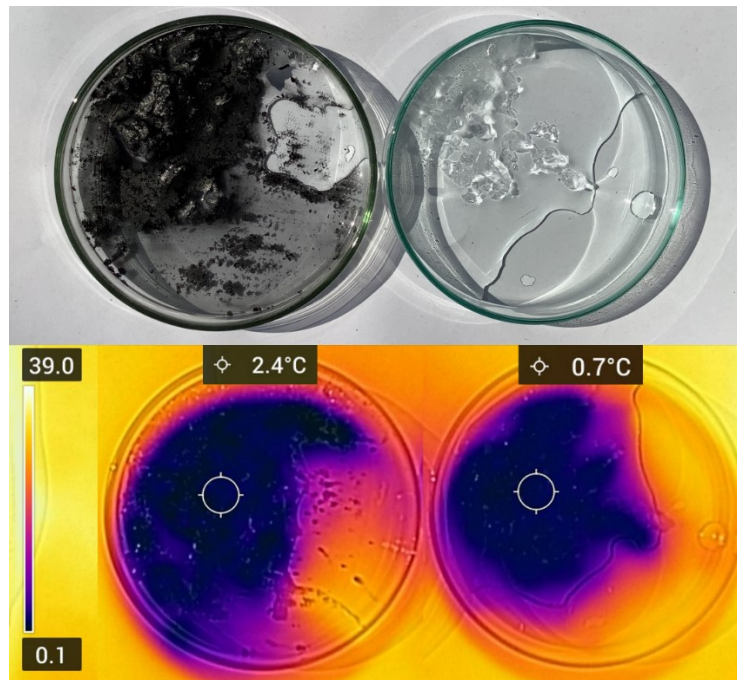


Abbildung 2: Vergleich der Oberflächentemperatur des mit Kohlenstaub bestreuten und des reinen Crushed Ice. Mit einer Wärmebildkamera können die Unterschiede der Oberflächentemperatur noch deutlicher hervorgehoben werden. So sieht man in Abbildung 2, dass die Oberflächentemperatur des mit Kohlenstaub bestreuten Eises mit $2,4^{\circ}\text{C}$ deutlich höher ist als die des reinen Eises mit $0,7^{\circ}\text{C}$.

3.1.3. Didaktische Umsetzung

Dass helle Kleidung im Sommer angenehmer zu tragen ist als dunkle, ist weithin bekannt. Dass die Kryosphäre sprichwörtlich das weiße T-Shirt der Erde ist, dürfte allerdings weitaus weniger Menschen ein Begriff sein. Das in diesem Kapitel beschriebene Experiment zielt darauf ab, Schülerinnen und Schülern dieses Phänomen, den Albedo-Effekt, und seine Bedeutung für die Gletscher und damit das globale Klima näher zu bringen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Anleitungen und Arbeitsblätter sind im Anhang zu finden.

Da der Versuch für eine Durchführung im Freien im Rahmen des GlacierXperience-Projekts konzipiert wurde, wird als Strahlungsquelle auf die Sonne zurückgegriffen, um unabhängig von Strom zu sein. Dadurch ist eine Abhängigkeit vom Wetter gegeben, welche sich bei Exkursionen aber ohnehin nicht vermeiden lässt. Alternativ kann der Versuch auch in einem Innenraum mit einer Glühbirne als Strahlungsquelle durchgeführt werden. Zu beachten ist hierbei, dass LED-Lampen für den Einsatz nicht geeignet sind.

Wird der Versuch im Freien durchgeführt, ist eine isolierende Unterlage aus z.B. Styropor essenziell, um eine Erwärmung des Eises durch den Untergrund zu verhindern. Gerade in den Sommermonaten ist dieser Einfluss nicht zu vernachlässigen.

Um aussagekräftige Schlüsse ziehen zu können, ist es wichtig, dass in beide Petrischalen dieselbe Menge an Eis eingewogen wird. Daher eignet sich Crushed Ice aufgrund der Dosierbarkeit weitaus besser als

Eiswürfel. Darüber hinaus wird die Schmelzzeit durch die Verwendung von Crushed Ice verkürzt und es entstehen kürzere Wartezeiten im Unterricht. Diese können mit der Bearbeitung der Aufträge des Arbeitsblattes überbrückt werden.

Für die dunklen Ablagerungen kann jegliche fein zerriebene, dunkle Substanz wie Aktivkohle oder fein gemörserte Kohlestücke verwendet werden. Das Crushed Ice muss vollständig mit einer dünnen Schicht Kohlenstaub bedeckt sein, um einen sichtbaren Effekt zu erzielen. Wenn vorhanden, können Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera gemacht werden – so können die Oberflächentemperaturen der einzelnen Eisflächen gemessen und miteinander verglichen werden.

3.2. Kryokonit: Kleine Partikel, große Wirkung

3.2.1. Theoretischer Hintergrund

„Upon first glance, glaciers seem so silent, passive and lifeless; and yet, [...] they are some of the most sensitive and dynamic parts of our planet [...]“ (Wadham, 2022). So beschreibt Jemma Wadham, Professorin für Glaziologie, fasziniert das zu seiner Artenvielfalt kontroverse Erscheinungsbild der Gletscher. Gletscher sind aber alles andere als leblos, denn sie werden von einer Vielzahl, an die extremen Bedingungen angepasster Spezialisten besiedelt (Koch, 2010). Aufgrund der enormen Artenvielfalt der mikrobiellen Gemeinschaften und deren Signifikanz für den Kohlenstoffkreislauf wurde die Kryosphäre als eines der Biome der Erde eingestuft (Anesio & Laybourn-Parry, 2012). Besondere Bedeutung kommt dabei Kryokonitlöchern (siehe Abbildung 3) zu.

Der Begriff Kryokonit bezeichnet Sedimente, welche durch Verwehungen auf den Gletschern abgelagert und von Mikroorganismen wie Bakterien verklebt werden. Die meist schwarzen Partikel bilden eine dünne Schicht am Eis, senken die Albedo-Werte und führen so zu einem verstärkten Tauen der Oberfläche. Die so entstehenden, für gewöhnlich mit Wasser gefüllten Vertiefungen werden als Kryokonitlöcher bezeichnet. (Hagg, 2020)



Abbildung 3: Kryokonitlöcher (Alean & Hambrey, 2017).

Den anorganischen Anteil des Kryokonits bilden hauptsächlich Gesteinsstaub und kleinste Bruchstücke von nahen Hängen (Koch, 2010). Doch auch durch den Menschen verursachte, lichtabsorbierende Partikel wie Ruß, welcher durch die Industrialisierung (McConnell et al., 2007) und zunehmende Waldbrände entsteht, lagern sich auf Gletschern ab (Aubry-Wake et al., 2022). Der organische Anteil des Kryokonits setzt sich aus diversen in den Vertiefungen lebenden Mikroorganismen wie Viren, Bakterien und Algen zusammen (Anesio & Laybourn-Parry, 2012; Zawierucha et al., 2015). Die in den Löchern beheimateten, zahlreichen Spezies variieren je nach geographischer Lage der Gletscher (Cameron et al., 2012). Algen können für eine Verfärbung der Schneeoberfläche sorgen, da sie sich durch die Produktion von diversen dunkelfarbigem Pigmenten vor Strahlung schützen (Remias et al., 2005). Die Färbung des Schnees reicht dabei von grün über rot bis zu grau (Jones, 2001).



Abbildung 4: Schneevalgen produzieren ein rotes Pigment, das für das Phänomen des "Blutschnees" verantwortlich ist (Specktor, 2020).

Das bekannte Phänomen des „Blutschnees“ (siehe Abbildung 4) geht auf die vom Schmelzwasser lebenden Schneevalgen und nicht wie häufig angenommen auf Saharastaub zurück (Koch, 2010). Das Wachstum dieser Algen setzt unmittelbar mit der Schmelze ein und wirkt sich massiv auf die Albedo aus – in Abhängigkeit von der Komplexität der produzierten Pigmente können die Werte für die Albedo auf bis zu 40 % reduziert werden (Lutz et al., 2014). Die Autoren weisen darauf hin, dass dies zu verstärkten Schmelzvorgängen und damit zu verstärktem Algenwachstum führt, was eine positive Rückkopplung darstellt. Durch die Anhäufung dunkler Partikel auf der Gletscheroberfläche kommt es wie bereits weiter oben beschrieben zu einem Absinken der Albedo und infolgedessen zu einem Anstieg an für Schmelzprozesse verfügbarer Energie (MacDonell et al., 2012). Die Autoren zeigten, dass die Ablation auf mit dunklen Sedimenten bedeckten Stellen bis zu neunmal größer ist als auf freien Eisflächen.

3.2.2. Experimentelles

Der Analyseprozess orientiert sich an den für analytische Verfahren typischen Schritten (Otto, 2019). Ziel des Experiments ist es, die Zusammensetzung von Kryokonit zu bestimmen. Da eine Element- oder Speziationsanalyse mit Schulgeräten nicht umsetzbar und für das gesetzte Lernziel auch nicht erforderlich ist, liegt der Fokus auf einer Unterscheidung zwischen organischem und anorganischem Anteil des Kryokonits. Das analytische Ziel ist also die quantitative Bestimmung des organischen und anorganischen Anteils von Kryokonit.

Die untersuchte Realprobe wurde am 17.03.2023 am Dachsteingletscher durch oberflächliches Abschaben der mit freiem Auge sichtbaren, mit Kryokonit bedeckten Flächen genommen. Die Probe wurde in einem mit Schraubverschluss verschließbaren Kunststoffgefäß verwahrt. Da die Probe unter anderem Bakterien und Algen enthält, ist eine rasche Weiterverarbeitung angeraten, um eine etwaige Veränderung der Probenzusammensetzung zu vermeiden.

Da das Interesse lediglich den Feststoffen gilt, wurde in der Probenvorbereitung das Eis geschmolzen und die Probe anschließend filtriert, um die Flüssigkeit vom Feststoff zu trennen. Eine einfache Filtration mit Filterpapier und Glasrichter erwies sich als nicht erfolgreich, da die Flüssigkeit nur sehr langsam abfloss. Es wurde stattdessen eine Vakuumfiltration mit Büchnertrichter durchgeführt. Die Filtrerrückstände wurden über Nacht getrocknet und anschließend in einen verschließbaren Behälter überführt.

Um die organischen Anteile zu abzutrennen, wurde die Probe verascht. Dafür wurde das Leergewicht eines Porzellantiegels bestimmt, eine definierte Menge der getrockneten Probe eingewogen und der Tiegel anschließend bis zur Massenkonstanz über einem Kartuschenbrenner erhitzt. Die danach bestimmte Masse entspricht dem anorganischen Anteil. Durch die Bildung der Differenz der ursprünglichen Masse und des anorganischen Anteils wurde der organische Anteil ermittelt. Dieser Schritt wurde dreimal wiederholt.

Tabelle 2: Analysenergebnisse der Kryokonitproben

Probe	Kryokonit gesamt	Anorganischer Anteil		Organischer Anteil	
	[g]	[g]	[%]	[g]	[%]
1	0,1027	0,0728	70,89	0,0299	29,11
2	0,1581	0,1136	71,85	0,0445	28,15
3	0,1273	0,0899	70,62	0,0374	29,38

Wie in Tabelle 2 ersichtlich ist, zeigt sich eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Der Mittelwert des anorganischen Anteils liegt bei $71,12 \pm 0,53$ % und jener des organischen Anteils bei $28,88 \pm 0,53$ %.

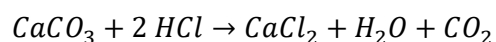
Nach dem Verbrennen der organischen Bestandteile änderte sich auch der Geruch der Probe bei Kontakt mit Wasser. Wurde das getrocknete Kryokonit vor dem Veraschen mit Wasser vermengt, konnte ein modriger Geruch wahrgenommen werden. Nach dem Veraschungsvorgang blieb ein Geruch bei Kontakt mit Wasser aus. Der Geruch rührt also von den organischen Bestandteilen des Kryokonits wie Algen und Bakterien, die bekannterweise in Kryokonitlöchern leben (Sävström et al., 2002).



Abbildung 5: Kryokonit vor (links) und nach (rechts) dem Veraschen.

Die Farbe des Feststoffs änderte sich, wie in Abbildung 5 zu sehen ist, während des Veraschungsprozesses von grau-schwarz zu rötlich-braun. Dies lässt die Anwesenheit von Eisen, welches durch die Verbrennung oxidiert wurde, vermuten. Ein schultauglicher Nachweis von Eisen ist beispielsweise durch eine Reaktion mit Kaliumhexacyanoferrat für Eisen-II-Ionen oder Kaliumthiocyanat für Eisen-III-Ionen möglich (aprentas, 2016). Dafür wäre jedoch eine Überführung der Probe in einen gelösten Zustand notwendig. Da Eisenoxid nur in konzentrierter Säure löslich ist, wäre ein Aufschluss für die Schulpraxis zu riskant, weswegen darauf verzichtet wurde.

Ein einfacher und weniger gefährlicher Nachweis ist der von Kalk. Dafür wurden wenige Tropfen Salzsäure nach dem Veraschen auf den anorganischen Anteil des Kryokonits getropft. Bei der Reaktion von Salzsäure mit Calciumcarbonat entsteht, wie nachstehender Reaktionsgleichung zu entnehmen ist, neben Calciumchlorid und Wasser auch Kohlenstoffdioxid:



Kohlenstoffdioxid ist zum einen durch die Entstehung von Blasen mit freiem Auge sichtbar und kann zum anderen durch die Glimmspanprobe nachgewiesen werden. Dafür wird ein noch glimmender Holzstab über die reagierende Probe gehalten und die Glut erlischt innerhalb kürzester Zeit.

3.2.3. Didaktische Umsetzung

Regelmäßig sind im Sommer Bilder von dunkel gefärbten Schneeflächen in den Medien zu sehen. Im Rahmen des in diesem Kapitel beschriebenen Versuchs soll die Zusammensetzung von dem für die Färbung verantwortlichen Material, Kryokonit, untersucht werden. Die dafür benötigte Probe nehmen die Schülerinnen und Schüler im Rahmen der Exkursion unter Anleitung der Lehrenden selbstständig. Die Analyse erfolgt anschließend im Schülerlabor. Anleitung sowie Arbeitsblatt sind im Anhang zu finden.

Um das Kryokonit analysieren zu können, muss der Feststoff zuerst vom geschmolzenen Schnee getrennt werden. Dies gelingt am besten durch Vakuumfiltration, da das Kryokonit aufgrund seiner organischen Anteile wie Algen die Filterporen verstopft und die Flüssigkeit so bei einer einfachen Filtration nicht abfließen kann. Falls keine Möglichkeit zur Vakuumfiltration besteht, kann die Flüssigkeit alternativ durch Dekantieren abgetrennt und der Feststoff zur Trocknung in eine große Kristallisierschale überführt werden. Die Trocknung des Feststoffs kann über Nacht an freier Luft erfolgen.

Der Veraschungsvorgang sollte mit den Schülerinnen und Schülern im Vorhinein durchbesprochen werden, da die Schritte sechs und sieben in der Durchführung zu Verwirrung führen könnten. Hier kann im Plenum die Notwendigkeit des Glühens bis zur Gewichtskonstanz diskutiert werden. Auch der neunte Schritt bedarf der Diskussion. Sommer et al. (2019) betonen die fachliche Richtigkeit als eine Grundanforderung an jedes Schulexperiment: „So darf ein Reagenz nur dann als spezifisch bezeichnet werden, wenn es dies tatsächlich ist“ (S. 464). Die Glimmspanprobe dient bekanntermaßen dem Nachweis von Sauerstoff und nicht wie in der Anleitung als Nachweis für Kohlenstoffdioxid, da das Erlöschen der Glut auch durch andere Gase wie Stickstoff herbeigeführt werden kann. Jedoch findet der Begriff bei manchen Didaktikerinnen und Didaktikern aus Deutschland als Nachweis für Kohlenstoffdioxid Verwendung. Darüber hinaus kann aufgrund der Ausgangsstoffe die Entstehung von Stickstoff ausgeschlossen werden.

3.3. Wenn Eismassen schmelzen: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Anstieg des Meeresspiegels

3.3.1. Theoretischer Hintergrund

„Wo die Klimakrise den Meeresspiegel nach oben treibt“ (Sica, 2022)

Schlagzeilen wie diese liest man in den letzten Jahren häufig, denn der Anstieg des Meeresspiegels ist ein aktuelles Thema mit weitreichenden Folgen. Die aktuelle Forschung bezieht sich auf den globalen durchschnittlichen Meeresspiegel (global mean sea level, GMSL), welcher die zeitlich gemittelte Höhe der Meeresoberfläche meint und somit kurzzeitige Schwankungen wie Wellen, Fluten und Gezeiten vernachlässigt (IPCC, 2022). Nachstehend bezieht sich der Begriff Meeresspiegel ebenfalls auf den globalen durchschnittlichen Meeresspiegel, wird aber zwecks besserer Lesbarkeit abgekürzt.

Ausgelöst wird der Anstieg zum einen durch die geringere Dichte warmen Wassers und die damit einhergehende Expansion von Wasser durch die Klimaerwärmung und zum anderen durch das Schmelzen der Eismassen auf der Erde, insbesondere von Gletschern und Eisschilden in den Polarregionen (IPCC, 2022). Die Inlandeisschilde der Antarktis und Grönlands stellen mit einer Fläche von etwa 13,5 Millionen und 1,7 Millionen km² und mehreren Kilometern Dicke die größten Wasserspeicher der Erde dar. Das Abschmelzen des antarktischen Eisschildes würde zu einem Anstieg

des Meeresspiegels um etwa 57 m und das des grönländischen Schildd um bis zu 7 m führen (Hagg, 2020).

Viele Forschungsgruppen haben es sich zur Aufgabe gemacht, Modelle zu entwickeln, um den Anstieg des Meeresspiegels bis zum Jahr 2100 unter diversen Szenarien zu berechnen. Im nachstehenden Abschnitt werden die aktuellen Forschungsergebnisse kurz zusammengefasst.

Sowohl der antarktische als auch der grönländische Eisschild tragen durch Schmelzprozesse seit den frühen 1990er-Jahren zunehmend zum Anstieg der Meeresspiegel bei (Gardner et al., 2018; Rignot et al., 2019). Allein der antarktische Eisschild hat zwischen 1992 und 2017 Berechnungen zufolge insgesamt $2,720 \pm 1,390$ Billionen Tonnen Eis verloren, was einem Anstieg des Meeresspiegels von in Summe $7,6 \pm 3,9$ mm in diesem Zeitraum entspricht (The IMBIE Team, 2018). Aus den Daten geht außerdem hervor, dass die Schmelzraten im Laufe der Jahrzehnte auf etwa das Vierfache angestiegen sind. Dies stimmt in etwa mit den Untersuchungen von Bamber et al. (2018) überein, die einen Anstieg der jährlichen Rate des Meeresspiegelanstiegs von etwa 0,07 mm pro Jahr für die Zeit von 1992 bis 1996 auf 0,53 mm pro Jahr für den Zeitraum von 2012 bis 2016 errechnen. Der Eisschild Grönlands schmilzt noch stärker ab als jener der Antarktis und trägt nach Bamber et al. (2018) mit einem Anstieg von etwa 0,69 mm jährlich im Zeitraum von 2012 bis 2016 auch stärker zum Anstieg des Meeresspiegels bei als der antarktische Schild. Forscherinnen und Forscher sind sich einig, dass seit der Jahrtausendwende ein deutlicher Anstieg der Schmelzrate erkennbar ist (Bamber et al., 2018; Sandberg Sørensen et al., 2018; Shepherd et al., 2012; WCRP Global Sea Level Budget Group, 2018).

Für die Modellierung des zukünftigen Meeresspiegels wird auf unterschiedliche Szenarien – die sogenannten Representative Concentration Pathways (RCP) – zurückgegriffen. Diese beschreiben unterschiedliche Bemühungen zum Klimaschutz und schließen unter anderem die durchschnittliche Erderwärmung ein. Das RCP2.6-Szenario stellt das bestmögliche Szenario dar und geht dabei von starken Maßnahmen wie dem Senken der Treibhausgasemissionen und einem Temperaturanstieg von unter 2°C bis zum Jahr 2100 aus. Das RCP8.5-Szenario ist das Worst-Case-Szenario und beschreibt die Zukunft bei Ausbleiben von Maßnahmen zum Schutz des Klimas und geht von einem Temperaturanstieg von 4,3°C bis 2100 aus. (IPCC, 2022)

Die Prognosen für den Anstieg der Meeresspiegel für die diversen Szenarien variieren je nach verwendetem Modell, den gemachten Annahmen und verwendeten Datensets. Die nachstehende Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Prognosen der beiden Eisschilde. Die Grenzen der angegebenen Intervalle bilden die Mittelwerte der minimalen und maximalen Ergebnisse der jeweiligen Berechnungen.

Tabelle 3: Prognosen für den Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels [m] durch den antarktischen Eisschild bis 2100.

Autor \ Szenario	Bulthuis et al. (2019)	Golledge et al. (2019)	Levermann et al. (2014)
RCP2.6	0,02 – 0,06	-	0,07 – 0,09
RCP4.5	0,01 – 0,10	0,02 – 0,05	-
RCP8.5	0,05 – 0,21	0,08 – 0,14	0,09 – 0,15

Die Beiträge des antarktischen Eisschilds von weit unter einem Meter bis ins Jahr 2100 erscheinen wenig besorgniserregend, jedoch ist man sich einig, dass die Antarktis bezogen auf ihr Eisvolumen aktuell noch verhältnismäßig wenig beiträgt und wie bereits oben erwähnt Grönland und die Gletscher im Moment stärker zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen. Außerdem prognostizieren die Autoren einen rapiden Anstieg dieser Beiträge nach diesem Jahrhundert und einen Beitrag des antarktischen Eisschilds von bis zu knapp 4 Meter bis 2300 (Aschwanden et al., 2019; Bulthuis et al., 2019). Darüber hinaus sind die angegebenen Intervallgrenzen nur die je nach Modell berechneten Mittelwerte – die Schwankungsbreite ist damit deutlich höher. So geben beispielsweise Bulthuis et al. (2019) einen möglichen Anstieg von bis zu 0,43 m bis 2100 allein durch den antarktischen Eisschild für das RCP8.5-Szenario an.

Tabelle 4: Prognosen für den Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels [m] durch den grönländischen Eisschild bis 2100.

Autor \ Szenario	Aschwanden et al. (2019)	Calov et al. (2018)	Golledge et al. (2019)
RCP2.6	0,05 – 0,19	-	-
RCP4.5	0,08 – 0,23	0,02 – 0,06	0,08 – 0,11
RCP8.5	0,14 – 0,33	0,05 – 0,13	0,09 – 0,11

Wie man Tabelle 4 entnehmen kann, ist der Beitrag des grönländischen Eisschilds zum Anstieg des Meeresspiegels bis 2100 mindestens gleich groß wie der des antarktischen Eisschilds und das, obwohl der antarktische Eisschild bei weitem größer ist als der grönländische. Grönlands Eisschild verliert aktuell etwa doppelt so schnell an Masse wie der der Antarktis (IPCC, 2022).

Dagegen erscheinen die Gletscher außerhalb dieser beiden Eisschilde mit einem maximalen Beitrag von $0,32 \pm 0,08$ m zum Meeresspiegel im Falle eines kompletten Abschmelzens (Farinotti et al., 2019) bedeutungslos. Der Schein trägt jedoch, denn Gletscher reagieren aufgrund ihrer spezifischen Akkumulations- und Ablationsraten sehr empfindlich auf Klimaänderungen und stellen somit sensible Indikatoren für das Klima dar (IPCC, 2022). Darüber hinaus haben Gletscher im vergangenen Jahrhundert stärker zum Anstieg des Meeresspiegels beigetragen als die Eisschilde Grönlands und der

Antarktis zusammen (Gregory et al., 2013). Die Beiträge der beiden Eisschilde zum Meeresspiegelanstieg steigen seit den 1990er-Jahren aber stetig an (Rignot et al., 2019).

Aufgrund der weitreichenden Prognose und unterschiedlichen Ansätze kommt es zu Schwankungen in den Vorhersagen. Es sind sich jedoch alle Prognosen in einem Punkt einig: Der Meeresspiegel wird unweigerlich ansteigen – um welchen Wert ist von den Maßnahmen abhängig, die die Menschheit in Zukunft setzen wird.

3.3.2. Experimentelles

Als Ausgangspunkt des Experiments diente die Vorschrift von Homann und Melle (2022), nach welcher die Auswirkungen des Abschmelzens von Landeismassen auf den Meeresspiegel veranschaulicht werden sollen. Der Vorschrift zufolge wird ein Stück Styropor so zurechtgeschnitten, dass es auf der Wasseroberfläche eines Becherglases schwimmen kann. Dieses Becherglas wird mit Wasser gefüllt und auf dem Styroporstück werden ein paar Eiswürfel platziert. In einem zweiten Becherglas wird die gleiche Anzahl an Eiswürfeln direkt im Wasser platziert. Bei beiden Gefäßen wird der Wasserstand angeglichen, sodass das Wasser gleich hoch steht. Um die Wartezeit, bis das Eis geschmolzen ist, zu verkürzen, werden die Bechergläser vorsichtig mit einem Föhn erwärmt. Sobald das Eis vollständig geschmolzen ist, wird der Wasserstand der beiden Bechergläser verglichen. In Abbildung 6 ist deutlich ersichtlich, dass sich der Wasserpegel in dem Becherglas, in dem das Eis bereits im Wasser platziert wurde, nicht ändert. Im Becherglas, in dem das Eis auf einem Stein platziert wurde, ist jedoch ein deutlicher Anstieg des Wasserstands erkennbar.

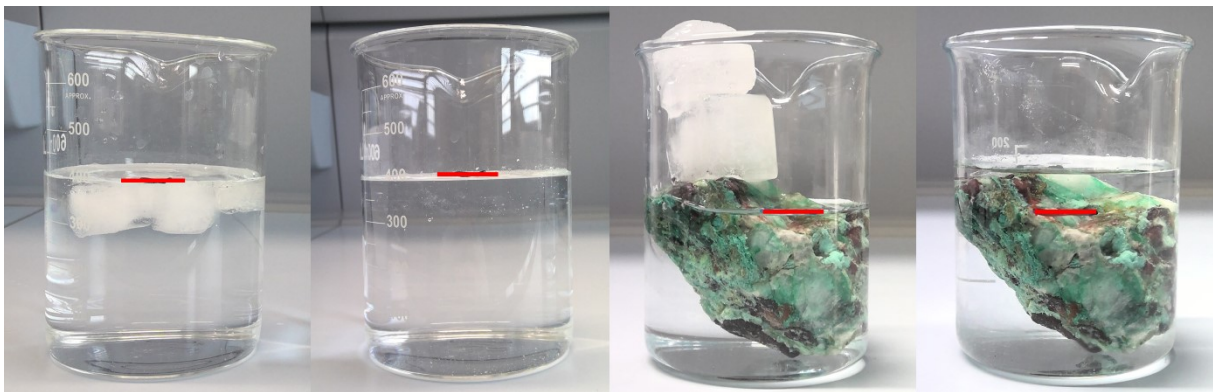


Abbildung 6: Vergleich der Wasserstände (links vor und rechts nach dem Schmelzen der Eiswürfel).

Es erwies sich als schwierig, die Eiswürfel so auf dem Styroporstück zu platzieren, dass es nicht kippte und die Eiswürfel direkt ins Wasser rutschten. Sobald das Schmelzwasser abfloss und sich die Gewichtsverteilung am Styropor änderte, kam es im Verlauf sämtlicher Versuche immer zum Kippen der Plattform. Um dies zu verhindern und für den Unterricht einfacher zu gestalten, wurden ähnlich wie bei Stinken-Rösner (2021) statt dem Styroporstück Steine verwendet, um die Landmassen zu simulieren. Je nach Größe ist ein Stein ausreichend, ansonsten können auch mehrere übereinander gestapelt werden. Weiters wurde darauf verzichtet, die Wasserstände wie in der Vorschrift vorgesehen exakt anzugleichen, da dies für das Erreichen des Lernziels nicht notwendig ist. Stattdessen wurde der Wasserstand vor dem

Schmelzvorgang mit einem Permanentmarker markiert – so kann die Änderung des Wasserstands nach dem Schmelzen ebenfalls verglichen werden.

3.3.3. Didaktische Umsetzung

Der in diesem Kapitel beschriebene Versuch soll den Schülerinnen und Schülern den Einfluss der Gletscherschmelze auf den Anstieg der Meeresspiegel näherbringen. Darüber hinaus soll die Fähigkeit, Informationen kritisch zu hinterfragen und die Annahme oder Verwerfung dieser begründen zu können, gefördert werden. Anleitung sowie Arbeitsblatt zu diesem Versuch sind im Anhang zu finden.

Der Versuch ist sehr einfach durchzuführen und eignet sich daher für alle Altersgruppen. Es ist lediglich darauf zu achten, dass der Wasserstand erst markiert wird, wenn die Eiswürfel richtig platziert worden sind. Da es eine Weile dauern kann, bis die Eiswürfel geschmolzen sind, wird die Zuhilfenahme eines Föhns oder etwas Ähnlichem empfohlen, um die Wartezeit zu verkürzen. Um die Wartezeit zu überbrücken, können die Vermutungen der Lernenden, wie sich der Wasserstand ändern wird, diskutiert werden.

Zuletzt soll anhand des erworbenen Wissens ein Bild beurteilt werden, welches sich in sozialen Medien verbreitete und den angeblichen Beweis liefert, dass schmelzendes Eis durch die Klimaerwärmung den Meeresspiegel nicht beeinflusse. Jugendliche beziehen der JIM-Studie (Feierabend et al., 2022) zufolge Informationen und Nachrichten zu einem hohen Anteil online über soziale Netzwerke, Suchmaschinen oder ähnliches. Dabei gaben 78 % an, sich für den Klimawandel zu interessieren. Um die Verbreitung von falschen Informationen zu verhindern, soll im Rahmen dieses Arbeitsblattes ein Fallbeispiel diskutiert werden. Das Beispiel eignet sich gut für eine Diskussion, da es zum einen genau auf das im Experiment vermittelte Wissen zurückgreift und zum anderen im Prinzip keine falschen Informationen liefert. Es wird lediglich demonstriert, dass Eis, welches sich bereits im Wasser befindet, beim Schmelzen zu keiner Änderung des Wasserstandes führt. Die Schlussfolgerung, dass der Meeresspiegel durch den Klimawandel nicht ansteigt, ist jedoch falsch, da die Landeismassen nicht bedacht oder vielleicht auch mit Absicht nicht berücksichtigt wurden. Dies könnte als Ausgangspunkt für eine Diskussion über die Entstehung und die Struktur von Verschwörungstheorien dienen, um den Jugendlichen eine Beurteilung von Informationen aus diversen Medien durch fachwissenschaftliche Kriterien zu ermöglichen.

3.4. Acid Rock Drainage: was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben

3.4.1. Theoretischer Hintergrund

Der Klimawandel wirkt sich in vielerlei Hinsicht auf die Ökosysteme und damit auf die Kryosphäre der Erde aus – Gletscher, Eisschilde und Meereis ziehen sich zurück und auch Permafrostböden, welche den Wasser-, Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt beeinflussen, nehmen in ihrer räumlichen Ausdehnung ab (Hauck et al., 2019). Permafrost ist definiert als Boden, der für mindestens zwei Jahre Temperaturen von weniger als 0°C aufweist (Permafrost Subcommittee, Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada, 1988), und macht etwa ein Viertel der Landoberfläche der Erde aus (Steven et al., 2006). Durch das oberflächliche Schmelzen im Sommer nimmt Permafrost einen wichtigen Platz in der Wasserversorgung der Flora in trockenen Sommern ein (Sugimoto et al., 2002). Das durch die Klimaerwärmung verstärkte Abtauen führt langfristig zu einem Rückgang der Permafrostfläche (Hauck et al., 2019). Dies ist mit weitreichenden Konsequenzen verbunden. Permafrost dient als Kohlenstoffsенke und bindet mehr als das Doppelte der Menge an Kohlenstoff als in der Atmosphäre enthalten ist – der mikrobielle Abbau dieses Kohlenstoffs zu den Treibhausgasen Kohlenstoffdioxid und Methan als Folge des Auftauens des Permafrosts zählt zu den wichtigsten potenziellen Rückkopplungen auf die Atmosphäre (Schuur et al., 2008).

Weiters tritt Permafrost in den Alpen am häufigsten in Form von sogenannten Blockgletschern auf: Das sind „lappen- bis zungenförmige Körper aus ständig gefrorenem Lockermaterial, die sich langsam hangabwärts bewegen“ (Schallhart & Erschbamer, 2015, S. 9). Den Autoren zufolge bestehen sie aus einem Permafrostkörper, welcher von einer massiven Schuttmasse bedeckt ist. Das Auftauen dieses Permafrostkörpers kann in Gebieten mit sulfidhaltigem Grundgestein wie z.B. Pyrit zur Entstehung sogenannter saurer Grubenwässer (Acid Mine Drainage, AMD, bzw. Acid Rock Drainage, ARD) führen. Pyrit (FeS_2) ist das am häufigsten vorkommende und am weitesten verbreitete Sulfidmineral, das durch die Bildung von Schwefelsäure bei Reaktion mit Schmelzwasser und Sauerstoff zur Versauerung von Flüssen und Seen beiträgt und damit massiven ökologischen Schaden verursacht (Dos Santos et al., 2016; Ilyashuk et al., 2018; Usher et al., 2004; Zarroca et al., 2021).

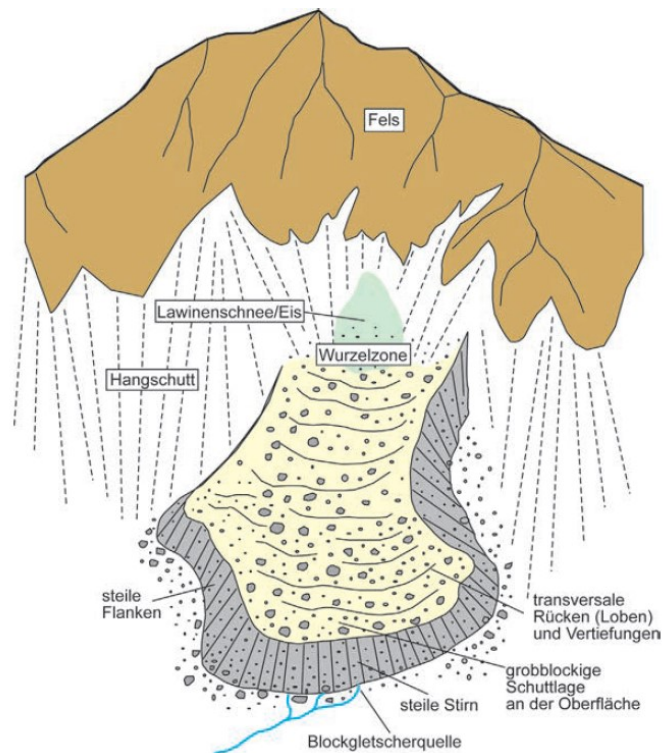
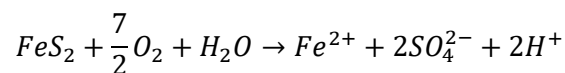


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines Blockgletschers (Schallhart & Erschbamer, 2015)

Die Oxidation von Pyrit in der Gegenwart von Wasser kann Usher et al. (2004) zufolge vereinfacht durch nachstehende Reaktionsgleichung beschrieben werden:



Die Teilreaktionen sind aber bei weitem komplexer. Da die Schwefelatome im Edukt die Oxidationszahl -1 haben und im Produkt die Oxidationsstufe +6 aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass es im Laufe der Reaktion zu mehreren Elektronenübertragungen kommt (Dos Santos et al., 2016). Der Mechanismus wird außerdem durch die Anwesenheit von diversen Bakterien, welche die Pyritoxidation katalysieren, verkompliziert (Schippers, 2004).

Sit et al. (2012) zeigten, dass die Oxidation von Pyrit durch sukzessive Reaktion der Oberfläche mit adsorbierten Sauerstoff- und Wassermolekülen abläuft, wobei die beiden Moleküle hauptsächlich an unterkoordinierten Eisenatomen adsorbiert werden. Da es energetisch günstiger ist, dissoziiert O_2 und formt die Ferryl-oxo-Spezies $Fe^{4+}=O^{2-}$. Durch die Ausbildung von Wasserstoffbrücken dieser Spezies mit Wasser kommt es zu einem Proton-gekoppelten Elektronentransfer, welcher zur Entstehung von Eisenhydroxo-Gruppen ($Fe^{3+}-OH^-$) führt. Die Autoren beschreiben das Verhalten der O^{2-} und OH^- Spezies an der Oberfläche als Protonenakzeptoren für die beteiligten Wassermoleküle als entscheidend für die Reaktion.

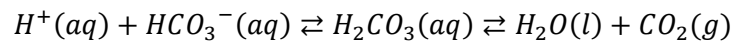
Dos Santos et al. (2016) schlagen eine Aufteilung dieser Reaktion in zwei Typen vor, welche nachfolgend kurz erläutert werden. Reaktionen vom Typ 1 wiesen niedrige Aktivierungsenergien auf und sind Redoxreaktionen, bei welchen je zwei Fe(II)-Atome an der Oberfläche zu $Fe(III) - OH^-$

oxidiert werden. Dies geschieht durch den Transfer von Wasserstoff von dem adsorbierten Wassermolekül zum adsorbierten Sauerstoffmolekül. Typ-2-Reaktionen weisen eine höhere Aktivierungsenergie auf und führen zur Bildung einer $S=O$ -Bindung durch den Transfer eines Wasserstoffradikals von einem Wassermolekül zu einer $Fe(III) - OH^-$ -Spezies, was zur Entstehung von $Fe(II) - OH_2$ und $S - OH$ führt. Die Autoren sehen im Gegensatz zu Sit et al. (2012) die Bildung der $Fe(IV) = O^{2-}$ -Spezies als nicht notwendig oder nur von kurzer Dauer an, stimmen aber bezüglich der tragenden Rolle der OH^- -Spezies an der Oberfläche überein. Auch Li et al. (2018) betonen die Wichtigkeit der Bildung von Hydroxyl-Radikalen, welche die wichtigste reaktive Sauerstoffspezies der Pyritoxidation darstellt und schlussendlich Schwefel an der Oberfläche zu Sulfat oxidiert. $S - OH$ und $S=O$ werden Zhu et al. (2018) zufolge durch $Fe(III) - OH^-$ zu $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} oder SO_4^{2-} oxidiert, wobei $S_2O_3^{2-}$, SO_3^{2-} in einem letzten Schritt durch O_2 ebenfalls zu SO_4^{2-} oxidiert werden. Experimentelle Untersuchungen durch Isotopenmarkierung zeigen, dass der Großteil der Sauerstoffatome im Sulfat von Wassermolekülen stammt (Dos Santos et al., 2016; Usher et al., 2004). Der letzte von Zhu et al. (2018) vorgeschlagene Schritt liefert eine mögliche Erklärung für die Herkunft der übrigen Sauerstoffatome des Sulfations. Li et al. (2018) zeigten eine andere Möglichkeit, um den geringen Prozentsatz der nicht von Wassermolekülen stammenden Sauerstoffatome im Sulfation zu erklären: Die Autoren konnten erstmalig eine direkte dissoziative Chemisorption von O_2 an einer Schwefelstelle auf der Oberfläche von Pyrit nachweisen. Sie zeigen weiters, dass die Herkunft der Sauerstoffatome im Sulfation von der Stelle abhängig ist, an der das Wasser- und Sauerstoffmolekül angreifen: Wird O_2 an einer $S-S$ -Stelle oder $Fe-S$ -Stelle adsorbiert, so stammt der Sauerstoff im Sulfation aus dem Sauerstoffmolekül. Wird O_2 an einer $Fe-Fe$ -Stelle adsorbiert, kann der Sauerstoff im Sulfation aus dem Wassermolekül abgeleitet werden. Die Zwischenprodukte der Gesamtreaktion sind aber stark von der Art und Verfügbarkeit der Oxidationsmittel sowie vom pH-Wert der Lösung abhängig (Feng et al., 2019).

Der Mechanismus der Pyritoxidation erweist sich als äußerst komplex und bedarf weiterer Forschung. Die Forscherinnen und Forscher heben immer wieder die Vielschichtigkeit der Reaktion und die Möglichkeit mehrerer Mechanismen hervor, die zu der Gesamtreaktion beitragen. Darüber hinaus werden für die Modelle Annahmen wie Reinheit und optimale Struktur getroffen, welche nicht der Realität entsprechen – dort ist die Oberfläche für gewöhnlich nicht stöchiometrisch und verschiedenste Unreinheiten tragen zu einer Änderung der Aktivierungsenergie der einzelnen Reaktionen bei (Dos Santos et al., 2016). Je nach Voraussetzungen können also unterschiedliche Reaktionen ablaufen, welche weiterhin erforscht werden.

Die Oxidation von Pyrit stellt für das Grundwasser keine Bedrohung dar, da die Reaktion aufgrund der Tiefe von der Sauerstoffversorgung abgeschnitten ist und der pH-Wert durch exogene Puffersysteme annähernd konstant gehalten wird (van der Perk, 2014). Eines dieser Puffersysteme bildet der Kohlensäure-Hydrogencarbonat-Puffer, welcher für die puffernde Wirkung von hartem Trinkwasser

verantwortlich ist. Die nachstehende Gleichung nach Brown et al. (2011) beschreibt die wichtigsten Gleichgewichte dieses Puffersystems:



Sobald das an der Oberfläche liegende pyrithaltige Gestein jedoch (z.B. durch Abschmelzen von Eisflächen) mit Luft in Kontakt kommt, ist die Reaktion nicht mehr durch fehlenden Sauerstoff limitiert (van der Perk, 2014). Darüber hinaus weist Gletschereis und damit dessen Schmelzwasser eine außerordentliche Reinheit auf, welche auf das Verdampfen und Kondensieren des Wassers im Rahmen des Wasserkreislaufs als Destillationssystem zurückzuführen ist (Cuffey & Paterson, 2010). Daher weist geschmolzenes Gletschereis eine äußerst geringe Wasserhärte auf und agiert somit nur geringfügig als Puffer.

Die Pyritoxidation läuft unter nicht-biologischen Bedingungen nur langsam ab und erreicht einen pH-Wert von etwa 4, während Bakterien wie *Acidithiobacillus ferrooxidans* als Katalysator fungieren und zu einer Beschleunigung der Reaktion und einem Absinken des pH-Werts auf bis zu 2 beitragen (Korehi et al., 2013; Schippers, 2004; van der Perk, 2014). Dies kann zu einer Mobilisierung von Schwermetallen und damit einem Anstieg der Schwermetallkonzentration in exponierten Gewässern führen (Zarroca et al., 2021). Die Löslichkeit von Schwermetallen hängt in erster Linie vom Redoxpotential sowie vom pH-Wert ab, wobei der pH-Wert der dominierende Faktor ist. Grundsätzlich gilt, dass die Löslichkeit mit sinkendem pH-Wert zunimmt – je niedriger also der pH-Wert, desto mehr Schwermetalle können freigesetzt werden. (Calmano et al., 1992)

Das Projekt „permaqua“ untersucht die Folgen von abschmelzenden Blockgletschern in Hinblick auf Hochgebirgsseen in Italien und Österreich und konnte feststellen, dass das Abschmelzen des Permafrosts zu starken Veränderungen in der Wasserchemie mit Auswirkungen auf Fauna und Flora führt. Bei allen von Blockgletschern beeinflussten Seen zeigte sich eine erhöhte Konzentration an Sulfationen, ein vergleichsweise niedriger pH-Wert sowie ein erhöhter Gehalt an Schwermetallen (Thaler et al., 2015). Die Schwermetallkonzentrationen lagen dabei teilweise um den Faktor 10 über den Grenzwerten für Trinkwasser (Thies et al., 2013).

3.4.2. Experimentelles

Die Wasserhärte der Proben (destilliertes Wasser, Grazer Leitungswasser und eine Realprobe von geschmolzenem Gletschereis) wurde über die Leitfähigkeit bestimmt. Da es das Ziel des Versuchs ist, die geringe Wasserhärte von geschmolzenem Gletschereis zu erkennen, ist eine genaue Angabe der Wasserhärte nicht notwendig und es genügt eine ungefähre Einordnung durch Vergleich mit bekannten Größen. Daher wird zur Veranschaulichung die Leitfähigkeit des geschmolzenen Gletschereises mit der von destilliertem Wasser und Grazer Leitungswasser verglichen. Die Messungen ergaben für destilliertes Wasser eine wie erwartet geringe Leitfähigkeit von $13 \frac{\mu S}{cm}$. Grazer Leitungswasser wies mit $569 \frac{\mu S}{cm}$ eine erwartungsgemäß hohe Leitfähigkeit auf und die geschmolzene Realprobe von

Gletschereis, welche am 13.08.2023 am Dachsteingletscher genommen wurde, zeigte eine Leitfähigkeit von $12 \frac{\mu S}{cm}$. Zusätzlich wurde eine Wasserprobe von einem Schmelzwassersee am Dachsteingletscher genommen, welche eine Leitfähigkeit von $19 \frac{\mu S}{cm}$ aufwies. Es ist somit ersichtlich, dass die Leitfähigkeit und damit die Wasserhärte von Gletschereis deutlich näher an jener von destilliertem Wasser als an jener von Leitungswasser liegt.

Um die Bildung von Schwefelsäure durch Pyritoxidation und das Absinken des pH-Werts durch die fehlende Pufferwirkung von geschmolzenem Gletschereis im Vergleich zu herkömmlichem Leitungswasser zu veranschaulichen, wurde ein Vergleichsversuch durchgeführt. Dafür wurden vier Lösungen in 50 ml Falcon-Tubes vorbereitet: Das erste und zweite Röhrchen wurden bis zur Hälfte mit Leitungswasser gefüllt, wobei dem zweiten Röhrchen in etwa 1 cm hoch grobkörniger Pyrit beigelegt wurde. Beim dritten und vierten Röhrchen wurde gleich vorgegangen, jedoch wurde statt Leitungswasser destilliertes Wasser verwendet. Die Röhrchen, die Pyrit enthielten, wurden kurz geschüttelt und dann für etwa fünf Minuten stehen gelassen. Da die pH-Sonde durch die entstehenden Sulfat-Ionen gestört wird und kein eindeutiges Ergebnis liefert, wurde der pH-Wert mit einem Flüssigindikator bestimmt. Dafür wurde aus jedem Falcon-Röhrchen ein wenig Flüssigkeit in ein Schnappdeckelglas überführt und dieses mit zwei Tropfen Universalindikator versetzt. Es zeigte sich, dass der pH-Wert des Leitungswassers und jener des mit Pyrit versetzten Leitungswassers ident waren und nach Farbskala einen pH-Wert von 8 aufwiesen. Bei den Röhrchen drei (destilliertes Wasser) und vier (destilliertes Wasser und Pyrit) zeigten sich Unterschiede. Während das destillierte Wasser einen pH-Wert von 6 aufwies, zeigte das mit Pyrit versetzte Wasser einen pH-Wert von 4 und kann damit als klar sauer deklariert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

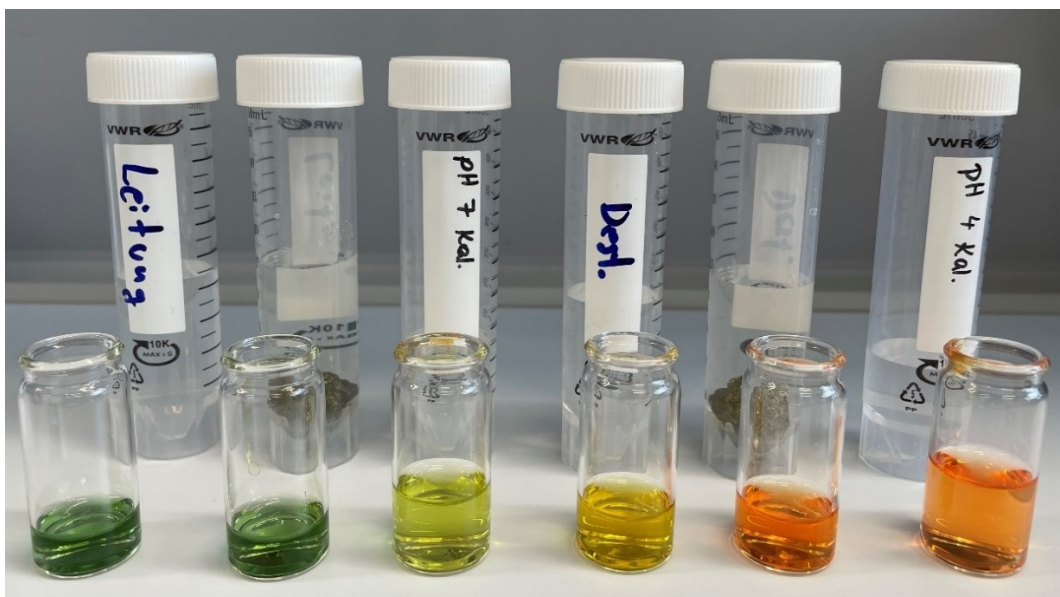
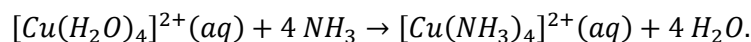


Abbildung 8: mit Universalindikator versetzte Lösungen. Leitungswasser, mit Pyrit versetztes Leitungswasser, Kalibrationslösung mit pH-Wert von 7, dest. Wasser, mit Pyrit versetztes dest. Wasser und Kalibrationslösung mit pH-Wert von 4 (von links nach rechts).

Anschließend soll gezeigt werden, dass die sich im Vorversuch gebildete Schwefelsäure Schwermetalle in Lösung bringen kann. Als Gestein für den Modellversuch wurde der kupferhaltige Malachit gewählt, da Kupfer in Wasser nicht, aber in Schwefelsäure gut löslich ist (Riedel & Janiak, 2022). Dafür wurde ein Becherglas etwa 1 cm hoch mit grobkörnigem Pyrit befüllt und darauf der Malachit platziert. Anschließend wurde mit destilliertem Wasser aufgefüllt, bis der Malachit gänzlich bedeckt war. Als Kontrollprobe wurde ein Malachit nur in destilliertes Wasser eingelegt. Die Bechergläser wurden etwa 15 Minuten stehen gelassen und anschließend wurde der Kupfergehalt mit einer Kupfersonde von Vernier bestimmt. Da die Sonde aber durch die sich bildenden Sulfationen gestört wird, wurde als alternative Bestimmungsmöglichkeit eine photometrische Messung entwickelt.

Dafür wurde eine Kalibrationsreihe ausgehend von einem Kupfer(II)-Ionen-Standard mit einer Konzentration von $1000 \frac{mg}{L}$ erstellt. Um die Lösungen photometrisch vermessen zu können, mussten sie zuerst in eine farbige Form überführt werden. Kupfer(II)-Ionen können durch Zugabe von Ammoniak im Überschuss in den charakteristisch tiefblauen Tetraamminkupfer(II)-Komplex, welcher sein Absorptionsmaximum bei 600 nm hat, überführt werden (Binnewies et al., 2016). Dabei werden die Liganden des Aquakomplex in einer Ligandenaustauschreaktion gemäß folgender Reaktionsgleichung durch Ammoniak-Moleküle substituiert:



Den Lösungen wurde tropfenweise Ammoniak bis zur Farbkonzanz zugefügt, wodurch es anschließend möglich war, die Lösungen mit einem Colorimeter von Vernier bei 635 nm zu vermessen. Die Messwerte können Tabelle 5 entnommen werden.

Tabelle 5: Messergebnisse der photometrischen Vermessung der Kalibrationsreihe.

Konzentration	$0 \frac{mg}{L}$	$10 \frac{mg}{L}$	$100 \frac{mg}{L}$	$500 \frac{mg}{L}$	$1000 \frac{mg}{L}$
Extinktion	0	0	0,066	0,322	0,608

Mit Microsoft Excel wurde eine Kalibrationsgerade als lineare Trendlinie erstellt, wobei die Kupfer(II)-Ionenkonzentration auf der ersten und die Extinktion auf der zweiten Achse aufgetragen wurde. Den zuvor vorbereiteten Probelösungen wurden wenige Milliliter entnommen, diese ebenfalls bis zur Farbkonzanz mit Ammoniak versetzt und dann photometrisch vermessen. Die Messung der Lösung aus dem mit Pyrit gefüllten Becherglases lieferte eine Extinktion von 0,053, während die Lösung des mit ausschließlich destilliertem Wasser gefüllten Becherglases eine Extinktion von 0 aufwies. Aufgrund der geringen Extinktion der Probe wurde der Punkt der Kalibrationsreihe mit der größten Konzentration (1000|0,608) nicht in die Auswertung miteinbezogen. In Abbildung 9 sind sowohl die Punkte der Regressionsgeraden (blau) als auch das Messergebnis der Probe mit Pyrit (orange) und der überzählige Punkt der Kalibrationsreihe (grün) dargestellt. Die Gleichung der Regressionsgeraden lautet $y = 0,0006x - 0,002$ und weist ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9995$ auf. Durch Einsetzen der

Extinktion der Probe der mit Pyrit versetzten Lösung in die Regressionsgerade und Umformen nach der Konzentration konnte eine Kupfer(II)-Ionenkonzentration von $91,67 \frac{mg}{L}$ bestimmt werden. Im Vergleich dazu wies die Lösung der Kontrollprobe wie erwartet eine Kupfer(II)-Ionenkonzentration von $0 \frac{mg}{L}$ auf. Die Mobilisierung von Schwermetallen durch Säuren ist daher nachweisbar.

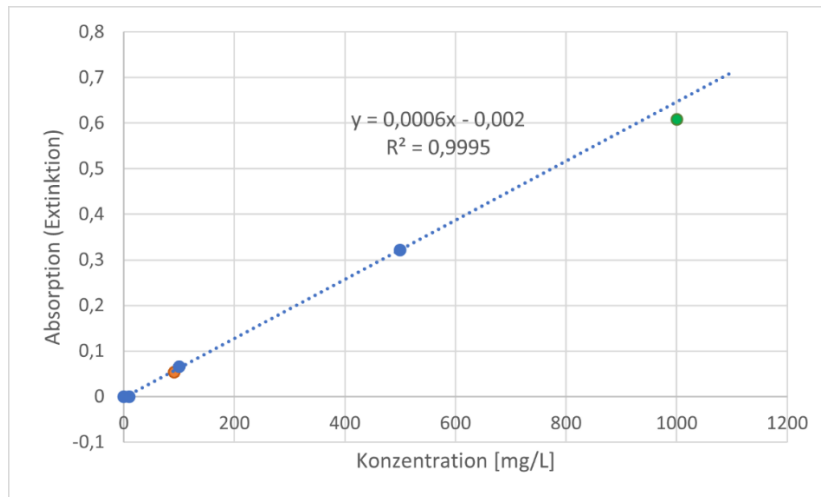


Abbildung 9: Kalibrationsgerade zur Bestimmung der Kupfer(II)-Ionenkonzentration. Die Messwerte der Standards sind als blaue Punkte und der Messwert der Probe ist als orangefarbener Punkt dargestellt.

3.4.3. Didaktische Umsetzung

Die bisher beschriebenen Versuche beschäftigen sich mit medial stärker vertretenen Phänomenen und dürften daher vielen Schülerinnen und Schülern bekannt sein. Acid Rock Drainage durch tauende Permafrostböden und schmelzende Gletscher ist dagegen noch eher unbekannt. Daher wurde ein dreiteiliger Modellversuch entwickelt, um dieses Phänomen und seine möglichen Auswirkungen auf die Umwelt zu simulieren und für Lernende greifbar zu machen. Die Versuchsanleitungen und Arbeitsblätter sind im Anhang zu finden.

Da die geringe Wasserhärte und die damit niedrige Pufferkapazität von Schmelzwasser eine entscheidende Rolle für die Acid Rock Drainage spielen, wird in einem ersten Versuch die Wasserhärte von Gletschereis über die Leitfähigkeit bestimmt. Ziel ist es, dass die Lernenden erkennen, dass Gletschereis eine sehr geringe Wasserhärte und damit in weiterer Folge eine geringe Pufferwirkung aufweist. Dafür werden unter der Anleitung der Lehrenden im Rahmen der Exkursion Proben von Gletschereis genommen, welche anschließend untersucht werden. Die Lernenden wissen bereits aus dem Chemie- und Physikunterricht, dass freie Ladungsträger eine Voraussetzung für Leitfähigkeit sind. Mit Hilfe dieses Vorwissens und dem Vergleich der Messwerte mit Wasser bekannter Wasserhärte kann darauf geschlossen werden, dass in der Probe nur wenige Ionen vorhanden sind und die Wasserhärte damit gering ist.

Im darauffolgenden Versuch soll die Bildung von Schwefelsäure durch Pyritoxidation demonstriert werden. Dafür werden die pH-Werte von Leitungswasser mit und ohne Pyrit sowie von destilliertem Wasser mit und ohne Pyrit miteinander verglichen. Die Änderung des pH-Werts wird durch die Zugabe

von Universalindikator sichtbar gemacht. Der Farbumschlag ist unmittelbar sichtbar, wodurch keine Wartezeiten entstehen. Durch den Vergleich der Lösungen erkennen die Schülerinnen und Schüler, dass sich der pH-Wert nur bei den Proben mit destilliertem Wasser ändert. Da die eigentliche Reaktion sehr komplex ist (siehe Kapitel 3.4.1.), wird den Lernenden die Entstehung der Säure anhand eines Infotexts und einer vereinfachten Reaktionsgleichung nähergebracht. Die Reaktionsgleichung stellt den komplizierten Vorgang der Pyritoxidation nur vereinfacht dar und ist für die Erkenntnis, dass Schwefelsäure entsteht, nicht optimal geeignet, da laut Reaktionsgleichung gleich viele Sulfat- wie Wasserstoffionen entstehen, obwohl es intuitiv doppelt so viele Wasserstoffionen sein müssten. Es geht jedoch eindeutig hervor, dass Säure entsteht, was für den Folgeversuch essenziell und ausreichend ist. Die Reaktionsgleichung ist weiters insofern irreführend, als dass sie impliziert, dass der Großteil der Sauerstoffatome des Sulfations seinen Ursprung im Sauerstoffmolekül hat. Mehrere Studien belegen aber, dass der Sauerstoff im Sulfat hauptsächlich aus den Wassermolekülen stammt (Dos Santos et al., 2016; Usher et al., 2004). Da der Ursprung des Sauerstoffs im Sulfation für das Lernziel aber nicht relevant ist, kann dieser Aspekt vernachlässigt werden. Anschließend wird auf die Pufferwirkung von Leitungswasser aufgrund der hohen Wasserhärte hingewiesen. Durch Rückgriff auf die Erkenntnisse aus dem ersten Teilversuch gelangen die Lernenden schlussendlich zu der Einsicht, dass die geringe Wasserhärte von Schmelzwasser für die Bildung von Säure durch Pyritoxidation entscheidend ist. Dieser Schritt ist ein Schlüsselpunkt des Modellversuchs und bedarf möglicherweise einer Unterstützung durch die Lehrperson.

Im dritten und abschließenden Versuch wird eine der Auswirkungen der Säurebildung demonstriert – die Mobilisierung von Schwermetallen. Als Schwermetall wird hier Kupfer verwendet, da es einfach als Gestein in Form von Malachit erhältlich sowie gut qualitativ und quantitativ nachweisbar ist. Um Kupfer in Lösung zu bringen, wird laut Anleitung das kupferhaltige Gestein in ein Becherglas mit Pyrit und destilliertem Wasser gelegt und stehen gelassen. Die Zeit, die die Lernenden zur Vorbereitung der Kalibrationsreihe benötigen, reicht für gewöhnlich aus, sodass sich eine nachweisbare Menge an Kupfer im Wasser löst. Bei mehrfacher Durchführung des Versuchs wird empfohlen, sowohl das grobkörnige Pyrit als auch den Malachit regelmäßig zu erneuern, da mit wiederholter Verwendung die Menge an gelöstem Kupfer abgenommen hat. Da die Dauer, bis eine nachweisbare Menge an Kupfer gelöst wird, je nach der Beschaffenheit des Gesteins variiert, wird weiters empfohlen, dass von der Lehrperson bereits im Vorhinein eine Lösung vorbereitet wird. So kann notfalls auf diese Lösung zurückgegriffen werden.

Da die Lösung aber kaum farbige und so photometrisch nicht messbar ist, werden die Kupferionen durch die Zugabe von Ammoniak in den tiefblauen Tetraamminkupfer(II)-Komplex $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$ überführt. Dieser Schritt ist aufgrund der gesundheitsschädlichen Wirkung von Ammoniak unbedingt im Abzug durchzuführen. Die Falcon-Röhrchen sind nach Zugabe des Ammoniaks wieder zu verschließen und sollten nur für die photometrische Messung, welche am besten ebenfalls in einem Abzug stattfindet, geöffnet werden. Die Auswertung der Daten erfolgt mit Hilfe eines Programms – empfohlen wird Excel,

da die Erstellung der Kalibrationsgeraden über die Funktion Trendlinie einfach durchführbar ist. Falls das Kolorimeter von Vernier verwendet wird, ist eine Auswertung direkt über die „Graphical Analysis“ App möglich. Durch Vergleich der Kupferkonzentrationen der Lösungen mit und ohne Pyrit erkennen die Lernenden, dass sich Kupfer nur in saurem Milieu löst.

4. Didaktische Aspekte

Steigende globale Temperaturen, die Zunahme von Wetterextremen und sich zurückziehende Gletscher sind eindeutige Indikatoren für den Klimawandel. Einer Eurobarometer-Umfrage (Europäische Kommission, 2020) zufolge sehen in Spanien mit 90 % der befragten Personen die meisten den Klimawandel als ein sehr ernstes Problem, während dies in Österreich nur 52 % der Befragten tun und unser Land somit auf dem drittletzten Platz einordnen. Den Schutz der Umwelt halten EU-weit bis zu 99 % der Befragten für ziemlich bis sehr wichtig (EU-Durchschnitt: 94 %), wobei Österreich hier mit nur 86 % Zustimmung das Schlusslicht bildet. Es ist eindeutig, dass die Gefahren des Klimawandels und seine Folgen sowie die Wichtigkeit des Klimaschutzes in Österreich einer höheren Aufmerksamkeit bedürfen. Die Implementierung umweltrelevanter Themen in den Unterricht stellt einen wichtigen Ansatz dar, um zu Bildung und Aufklärung beizutragen. Das Konzept der Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) ist neben dem Lehrplan ein zentraler Bestandteil dieses Ansatzes. In den nachfolgenden Kapiteln werden sowohl der Lehrplanbezug, die Deckung mit dem Konzept der BNE als auch die Lernziele und Kompetenzen aufgezeigt, die mit den oben beschriebenen Experimenten erreicht werden.

4.1. Bildung für Nachhaltige Entwicklung

Die Bildung für Nachhaltige Entwicklung setzt es sich zum Ziel „angesichts der globalen Ressourcenverknappung und den damit verbundenen Verteilungsproblematiken [zu] helfen, ein friedliches, solidarisches Zusammenleben in Freiheit und Wohlstand sowie in einer lebenswerten Umwelt den heutigen und künftigen Generationen zu ermöglichen“ (BMBWF, 2023). Es geht dabei um kritische Reflexion des eigenen Denkens und Handelns und soll so nachhaltige Entwicklung anregen. Das Konzept der BNE basiert auf Ziel 4 der Sustainable Development Goals (SDG) und soll neben dem Beitrag zum Hauptziel (inklusive, gerechte und hochwertige Bildung) auch zur Bekämpfung des Klimawandels (Ziel 13) beitragen (Deutsche UNESCO-Kommission, 2017). Der Schutz der Umwelt ist also ein explizites Ziel der BNE, wie in der UNESCO Roadmap zur Umsetzung des Weltaktionsprogramms „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (2014) deutlich gemacht wird: „BNE befähigt Lernende, informierte Entscheidungen zu treffen und verantwortungsbewusst zum Schutz der Umwelt [...] für aktuelle und zukünftige Generationen zu handeln [...].“

Der Bildungsauftrag scheint klar und doch scheint die Umsetzung nicht zufriedenstellend zu funktionieren. So äußern sich Schülerinnen und Schüler einer Vorstudie zu Zukunftsbildern in Bezug auf BNE im österreichischen Schulsystem (Heinrich, 2005) unzufrieden mit den Widersprüchlichkeiten des Schulsystems. So werde laut ihnen zwar die Wichtigkeit der Ressourcenschonung mehrfach betont, gleichzeitig werde man aber in die nicht-nachhaltige Wirtschaft unserer Gesellschaft eingegliedert. Die Lernenden wünschen sich Heinrich (2005) zufolge nicht nur die „lebensweltliche Verankerung der Inhalte ...“, da sich nur durch den konkreten Bezug zu einem globalen Problem Verständnis und

Betroffenheit erzielen ließen“ (S. 15), sondern auch innovative Unterrichtsmethoden. Um dies zu gewährleisten, kooperiert das Projekt GlacierXperience direkt mit Schulen. Konkret wird mit einer 8. Klasse des BG/BORG Deutschlandsberg (12. Schulstufe) im Rahmen des Wahlpflichtfachs „Regionale Gebirgsgeografie“ eine mehrtägige Exkursion zum Dachsteingletscher durchgeführt. Im Zuge dieser erforschen die Lernenden durch den Einsatz didaktisch aufbereiteter Schülerversuche Phänomene rund um das Thema Gletscher und werden für die Bedeutung dieser für die Umwelt und die Folgen des Klimawandels sensibilisiert. Dass „Umweltschutzimperative mit erhobenem Zeigefinger verkündet würden, ohne dass hier genügend Aufklärungsarbeit geleistet worden wäre“ (Heinrich, 2005, S. 17) ist ein weiteres Problem, das Lernende am Bildungssystem sehen. Um der Forderung nach umfassender Aufklärung nachzukommen, werden die am Projekt teilnehmenden Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Wahlpflichtfachs bereits mit den theoretischen Grundlagen, die sie für die Umsetzung vor Ort benötigen, vertraut gemacht. Die ausgewählten Experimente werden während der Exkursion durchgeführt und sind so aufbereitet, dass sie die Lernenden mit dem benötigten Wissen vertraut machen, um die Versuche durchführen zu können. Anschließend werden sie durch Hilfestellungen und durch eigene Schlussfolgerungen zum Erkenntnisgewinn geleitet.

4.2. Lehrplanbezug

Einer der Grundpfeiler der BNE ist die Umweltbildung, welche sich auch im neuen Lehrplan (Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen/Fassung vom 18.05.2024) abzeichnet: Bereits in den Leitvorstellungen wird deutlich gemacht, dass der Unterricht dazu beitragen soll, dass „junge Menschen befähigt werden, bei der Bewältigung von gesellschaftlichen sozialen, ökonomischen und ökologischen Herausforderungen eine aktive Rolle einzunehmen“. Weiters soll integratives Denken „der ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension nachhaltiger Entwicklung“ durch fachspezifische und fächerübergreifende Bezüge geschult werden. Aus diesem Grund bereitet das Projekt GlacierXperience Phänomene rund um den Gletscher aus den vielschichtigen Blickwinkeln mehrerer Fächer auf und leistet damit einen Beitrag zu den Bildungs- und Lehraufgaben des Lehrplans in den Fächern Chemie, Physik, Geografie und Wirtschaftskunde, welche nachstehend näher betrachtet werden sollen.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Experimente erfüllen im Unterrichtsfach Chemie mehrere Forderungen des Lehrplans. So wird durch das Beschreiben, Protokollieren und Präsentieren der durchgeführten Versuche ein wertvoller Beitrag zum Bildungsbereich „Sprache und Kommunikation“ geleistet. Auch für den Bereich der didaktischen Grundsätze ist der Mehrwert erkennbar. So üben die Schülerinnen und Schüler das empirische Arbeiten anhand der Versuche und lernen anhand authentischer Probleme - der Klimawandel lag im Jahr 2022 auf Platz zwei der interessantesten Themen für Jugendliche (Feierabend et al., 2022). Darüber hinaus findet das Lernen vor Ort auf einem Gletscher statt, wodurch eine maximal authentische Situation geschaffen wird. Dass integratives Denken durch fächerübergreifende Bezüge geschult wird, wurde bereits in den Leitvorstellungen deutlich gemacht,

findet sich aber auch in den didaktischen Grundsätzen des Chemieunterrichts wieder. So wird das Lernen unter multiplen Perspektiven durch den Einsatz von Lehrausgängen und Exkursionen gefordert, was durch die Einbindungen mehrerer fachlicher Bezüge sowie einer mehrtägigen Exkursion erfüllt wird.

Eine Aufgabe des Physikunterrichts ist es, die Lernenden zum verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt zu befähigen. Darüber hinaus sollen sie „die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag, in der Umwelt sowie für die Welterkenntnis erfassen und diese für ihre Lebensgestaltung nutzen“. Die Albedo-Strahlung und der Auftrieb sind zwei physikalische Phänomene, die für die Gletscherschmelze und deren Auswirkungen auf die Umwelt und den Menschen unmittelbar von Bedeutung sind. Nur durch umfassendes Wissen über diese Phänomene und deren Folgen können Maßnahmen für die Zukunft ergriffen werden. Der Physikunterricht soll die Fähigkeit fördern, die Darstellung von Naturwissenschaften in Medien kritisch bewerten zu können und trägt so zum Bildungsbereich „Sprache und Kommunikation“ bei. Dass diese Fähigkeit von enormer Bedeutung ist, hat uns nicht nur die Corona-Krise gezeigt, denn auch zum Thema Klimawandel gibt es eine Vielzahl an Falschmeldungen, häufig verbreitet durch sogenannte Klimaleugner. Da Jugendliche Informationen und Nachrichten häufig online beziehen (Feierabend et al., 2022), ist gerade hier eine Sensibilisierung für potenzielle Fake-News notwendig. Daher werden die Schülerinnen und Schüler im Rahmen des Experiments zum Anstieg der Meeresspiegel mit einer auf sozialen Medien kursierenden, fälschlichen Behauptung zu diesem Thema konfrontiert. Im Rahmen des Experiments erwerben die Lernenden das nötige Wissen, um diese Aussage kritisch beurteilen und als falsch einstufen zu können. So soll das kritische Beurteilen von Informationen gefördert werden.

Das Basiskonzept „Nachhaltigkeit und Lebensqualität“ des Unterrichtsfachs Geographie und Wirtschaftskunde sieht die Auseinandersetzung mit nachhaltigen Themen vor. In diesem Zusammenhang sollen Überlegungen angestellt werden, „wie das fragile Mensch-Umwelt-System in eine gewünschte Balance“ gebracht werden kann. Die BNE soll es diesem Basiskonzept zufolge Lernenden ermöglichen, sich „Wissen und Werte anzueignen sowie Verhaltensweisen und Lebensstile zu erlernen, die für eine lebenswerte Zukunft und eine positive Veränderung der Gesellschaft(en) erforderlich sind“.

Das Basiskonzept „Mensch-Umwelt Beziehungen“ spricht die aktuellen Umweltprobleme deutlich an:

Eine der großen Herausforderung [*sic*] des Anthropozäns bzw. der Zukunft liegt darin, dass die Geschwindigkeit der Abläufe im Mensch-Umwelt-System ansteigt und die Ausmaße der Folgewirkungen mittlerweile globale Dimension erreicht haben. ... Im Unterricht ist die Entwicklung eines eigenen Handlungsrepertoires zu ermöglichen, wobei die vorhersehbaren Folgen dieser Handlungen unter Bezugnahme auf Konzepte der Nachhaltigkeit zu reflektieren sind. (Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen/Fassung vom 18.05.2024)

Im Rahmen des Projekts GlacierXperience werden die Lernenden mit den Folgen menschlichen Handelns für die Umwelt konfrontiert und erlangen tiefgehende Einblicke in diese Thematik. Sie erlangen Verständnis über die komplexen Zusammenhänge des Mensch-Umwelt-Systems Gletscher und können basierend darauf ein geeignetes Handlungsrepertoire für die Zukunft entwickeln.

Auf der rein fachlichen Ebene gestaltet sich die Zuordnung als schwierig, da die betrachteten Phänomene sehr spezifisch sind und aufgrund ihrer Komplexität meist nur auf einer phänomenologischen Ebene betrachtet werden. Natürlich findet (um nur ein Beispiel zu nennen) bei der Pyritoxidation eine Redoxreaktion statt, wodurch eine Zuordnung zum Kompetenzmodul 6 und dem Unterpunkt Übertragung möglich ist. Darüber hinaus kommt es zur Bildung von Schwefelsäure, was zur gleichen Zuordnung führt. Dies steht aber nicht im Vordergrund der Experimente. Vielmehr sollen die oben angeführten Erkenntnisse zum komplexen Mensch-Umwelt-System, unsere Rolle darin und die Schulung integrativen Denkens junge Menschen, wie im Leitbild deutlich gemacht wurde, dazu befähigen, ihre Rolle in der Bewältigung der Herausforderungen unserer Zeit einzunehmen.

4.3. Lernziele und Kompetenzen

Die in diesem Abschnitt genannten Lernziele basieren auf der Lernzieltaxonomie nach Krathwohl (2002), welcher das von Bloom (1976) entwickelte Klassifikationssystem in seine heute genutzte Form umstrukturierte. Das heute bekannte System beruht auf sechs Stufen, die in einem hierarchischen System angeordnet sind und meist als Pyramide (siehe Abbildung 10) dargestellt werden. Diese Stufen umfassen folgende Schritte (von grundlegenden zu komplexen Denkprozessen geordnet): Erinnern, Verstehen, Anwenden, Analysieren, Beurteilen, Schaffen.

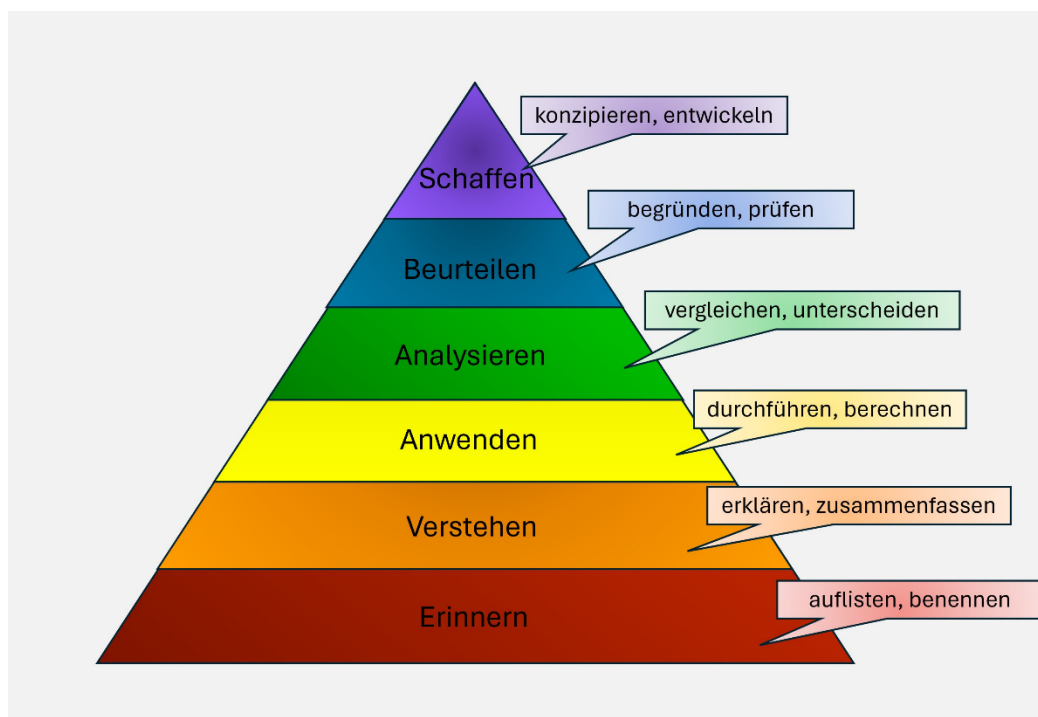


Abbildung 10: Lernzieltaxonomie nach Krathwohl (2002) und Bloom (1976).

Die Experimente basieren auf den in Kapitel 4.2 genannten Inhalten des Lehrplans und erfüllen folgende Lernziele:

- Die Lernenden sind in der Lage angeleitet zu experimentieren, Daten zu erheben und diese auszuwerten und zu interpretieren.
- Die Lernenden können den Einfluss dunkler Ablagerungen (z.B. Kryokonit) auf die Gletscherschmelze unter Bezugnahme der Albedo erklären.
- Die Lernenden sind in der Lage, die Bedeutung der Kryosphäre für das globale Klima und die Folgen der Eis-Albedo-Rückkopplung zu erläutern.
- Die Lernenden können die organischen und anorganischen Anteile von Kryokonit experimentell bestimmen und Eigenschaften wie Geruch auf die Zusammensetzung zurückführen.
- Die Lernenden können die Eismassen nennen, die beim Abschmelzen zu einer Erhöhung des Meeresspiegels führen würden und ihre Wahl fachlich begründen.
- Die Lernenden sind in der Lage, Informationen aus diversen Medien nach fachwissenschaftlichen Kriterien zu beurteilen.
- Die Lernenden können das Phänomen der Säurebildung durch Pyritoxidation durch die zunehmende Gletscherschmelze erläutern und Folgen wie die Mobilisierung von Schwermetallen nennen.

Um die im Unterricht erworbenen Kompetenzen beschreiben zu können, wird in der Chemie auf das dreidimensionale Kompetenzmodell (siehe Abbildung 11) zurückgegriffen. Die drei Dimensionen setzen sich dabei aus der Inhaltsdimension, der Handlungsdimension und der Anforderungsdimension zusammen. Dabei deckt die Inhaltsdimension die Inhalte des Lehrplans ab und die Anforderungsdimension umfasst zwei Niveaustufen, wobei die Schülerinnen und Schüler auf Niveau 1 eine Aufgabe angeleitet bearbeiten und auf Niveau 2 weitgehend selbständig arbeiten. Die Handlungsdimension gliedert sich in die Bereiche Wissen organisieren, Erkenntnisse gewinnen und Konsequenzen ziehen. (Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen/Fassung vom 18.05.2024)

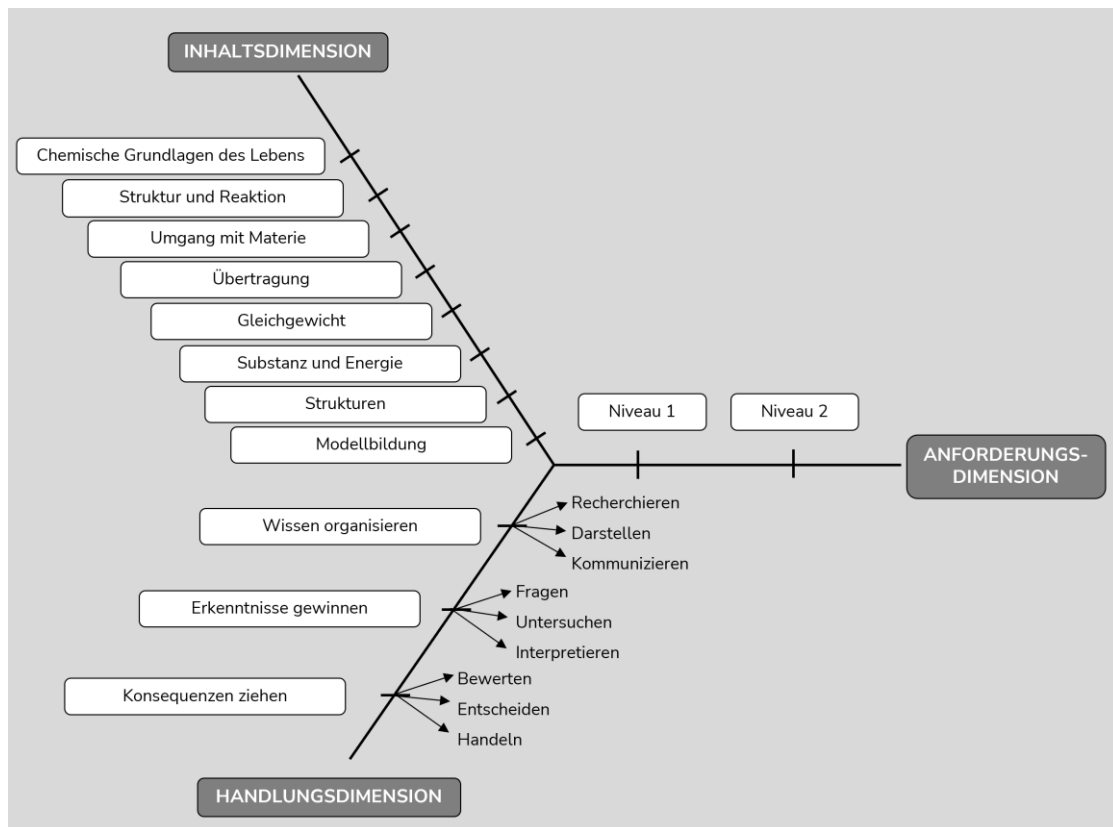


Abbildung 11: Das Kompetenzmodell für Chemie in der AHS-Oberstufe nach (Kern et al., 2017)

Durch den Einsatz der in Kapitel 3 beschriebenen Experimente erwerben die Schülerinnen und Schüler nachfolgende auf den Handlungsdimensionen basierende Kompetenzen (Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen/Fassung vom 18.05.2024):

Wissen organisieren:

- Erhobene Daten in verschiedenen Formen (Tabelle, Graphik, Text, Modell) unter Verwendung der chemischen Fachsprache adressatengerecht darstellen und erläutern.
- Fachlich und fachsprachlich korrekt und folgerichtig auf Grundlage des erworbenen Wissens (z.B. Albedo-Strahlung, Meeresspiegelanstieg, Klimawandel) argumentieren.
- Die Bedeutung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse und Modelle zum Klimawandel für die Entwicklung der Gesellschaft darstellen, erläutern und diskutieren.

Erkenntnisse gewinnen:

- Experimente zu chemischen Fragen, Vermutungen und Problemstellungen durchführen und protokollieren.
- Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren.
- Naturwissenschaftliche Modelle verwenden, um Daten und Ergebnisse von Untersuchungen sowie Vorgänge und Zusammenhänge zu erklären.
- Zu Vorgängen und Phänomenen in der Natur Vermutungen aufstellen, die mit Hilfe naturwissenschaftlicher Kenntnisse und Untersuchungen bearbeitet bzw. überprüft werden.
- Auf der Basis von Daten und Untersuchungsergebnissen sowie deren Interpretation Hypothesen über Vorgänge und Zusammenhänge aufstellen.

Konsequenzen ziehen:

- Daten, Fakten und Ergebnisse zum Klimawandel und seinen Folgen für Gletscher und die Gesellschaft kritisch hinterfragen und Gründe für deren Annahme oder Verwerfung angeben.
- Auswirkungen des eigenen sowie gesellschaftlichen Handelns auf Klima und Gletscher sowie Chancen und Risiken für sich persönlich und die Gesellschaft einschätzen.
- Entscheidungen zu klimarelevanten Fragen aus naturwissenschaftlicher Sicht begründen und bewerten.

5. Conclusio und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vier unterrichtstaugliche Experimente vorgestellt, die den Schülerinnen und Schülern verschiedene Aspekte der Bedeutung der Gletscher sowie die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf diese näherbringen.

Die Untersuchung des Albedo-Effekts zeigt die Auswirkungen von dunklen Partikeln wie Ruß oder anderem organischem Material auf die Schmelzgeschwindigkeit von Eisflächen. Die signifikante Rolle, die Ruß- und Schadstoffemissionen in Hinblick auf die Gletscherschmelze einnehmen, wird dadurch verdeutlicht. Darüber hinaus wird die Rolle der Eis-Albedo-Rückkopplung und die Wichtigkeit der Gletscher als Regulatoren der Erdtemperatur diskutiert.

Die Analyse von Kryokonit gibt Aufschluss über die Zusammensetzung dieser Ablagerungen, denn diese ist für die Auswirkungen entscheidend. Die Unterscheidung zwischen organischen und anorganischen Bestandteilen durch Veraschung liefert Informationen über das Vorhandensein von Mikroorganismen wie Algen. Anschließend werden die Auswirkungen der Produktion von dunklen Farbstoffen durch eben jene Organismen auf den Albedo-Effekt diskutiert.

Ein entscheidender Aspekt der Gletscherschmelze ist ihr Beitrag zum Anstieg des Meeresspiegels. Um die Auswirkungen dieses Aspekts zu veranschaulichen, wird ein Vergleichsexperiment durchgeführt. Dafür wird einerseits das Schmelzen von Eismassen im Wasser sowie andererseits das Schmelzen von Landeismassen simuliert. Dadurch kann demonstriert werden, dass Schmelzwasser von Gletschern im Gegensatz zu beispielsweise Eisbergen zum Anstieg des Meeresspiegels beiträgt. Dies wird anhand eines viralen Postings aus den sozialen Medien diskutiert, wodurch die Medien- und Argumentationskompetenz geschult wird.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Experimentierreihe zum Phänomen der Acid Rock Drainage zeigt die potenziell schädlichen Auswirkungen der Schmelze von Gletschern und Permafrostflächen in Form der Versauerung von Flüssen und Seen durch Pyritoxidation auf. Dabei wird zuerst die Wasserhärte von Schmelzwasser über die Leitfähigkeit bestimmt und darauf basierend auf dessen schlechte Pufferwirkung geschlossen. Anschließend wird die Entstehung von Schwefelsäure durch Pyritoxidation sowie die daraus resultierende Mobilisierung von Schwermetallen demonstriert.

Da im Rahmen dieser Arbeit nur ausgewählte Aspekte behandelt wurden, bleibt viel Raum für eine Ausweitung dieses interdisziplinären Projekts. Beispielsweise wäre eine didaktische Aufbereitung der beschriebenen Aspekte durch andere Fachrichtungen denkbar: Die Aufbereitung der Auswirkungen der Versauerung von Bergseen sowie der Mobilisierung von Schwermetallen auf die lokale Fauna und Flora durch Biologiedidaktikerinnen und -didaktiker wäre nur eine der vielen Möglichkeiten. Weiters ist eine Implementierung der Experimente in die bereits bestehende digitale Lernumgebung denkbar, um auch Lernenden ohne physischen Zugang zu Gletschern die Möglichkeit zu geben, diese Phänomene zu erleben.

Insgesamt liefern die entwickelten Experimente einen Ansatz, um die komplexen Prozesse, die mit Gletschern und ihrer Bedeutung für das Klima verbunden sind, in den Unterricht zu integrieren. Sie unterstreichen die Dringlichkeit der Einführung von Maßnahmen zum Schutz dieser empfindlichen Ökosysteme und dienen als Anstoß für junge Menschen, ihre Rolle „bei der Bewältigung von gesellschaftlichen sozialen, ökonomischen und ökologischen Herausforderungen“ gemäß der Bildung für nachhaltige Entwicklung einzunehmen.

6. Literaturverzeichnis

- Alean, J. (2010). *Gletscher der Alpen* (1. Aufl.). Haupt.
- Alean, J. & Hambrey, M. (2017, 19. Juni). *Kryokonitloch*. SwissEduc. <https://www.swisseduc.ch/glaciers/glossary/cryoconite-hole-de.html>
- Anesio, A. M., Hodson, A. J., FRITZ, A., Psenner, R. & SATTLER, B. (2009). High microbial activity on glaciers: importance to the global carbon cycle. *Global change biology*, 15(4), 955–960. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01758.x>
- Anesio, A. M. & Laybourn-Parry, J. (2012). Glaciers and ice sheets as a biome. *Trends in ecology & evolution*, 27(4), 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.09.012>
- aprentas. (2016). *Laborpraxis Band 4* (6th ed.). Springer International Publishing. <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4722667>
- Aschwanden, A., Fahnestock, M. A., Truffer, M., Brinkerhoff, D. J., Hock, R., Khroulev, C., Mottram, R. & Khan, S. A. (2019). Contribution of the Greenland Ice Sheet to sea level over the next millennium. *Science advances*, 5(6), eaav9396. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav9396>
- Aubry-Wake, C., Bertoncini, A. & Pomeroy, J. W. (2022). Fire and Ice: The Impact of Wildfire-Affected Albedo and Irradiance on Glacier Melt. *Earth's Future*, 10(4). <https://doi.org/10.1029/2022EF002685>
- Bamber, J. L., Westaway, R. M., Marzeion, B [Ben] & Wouters, B. (2018). The land ice contribution to sea level during the satellite era. *Environmental Research Letters*, 13(6), 63008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac2f0>
- Benn, D. I. & Evans, D. J. A. (2013). *Glaciers & glaciation* (Second edition). Routledge. <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=615876>
- Biemans, H., Siderius, C., Lutz, A. F., Nepal, S., Ahmad, B., Hassan, T., Bloh, W. von, Wijngaard, R. R., Wester, P., Shrestha, A. B. & Immerzeel, W. W. (2019). Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain. *Nature Sustainability*, 2(7), 594–601. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0305-3>
- Binnewies, M., Finze, M., Jäckel, M., Schmidt, P., Willner, H. & Rayner-Canham, G. (2016). *Allgemeine und anorganische Chemie* (3., vollständig überarbeitete Auflage). *Lehrbuch*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45067-3>
- Bloom, B. S. (Hrsg.). (1976). *Beltz-Studienbuch: Bd. 35. Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich* (5. Aufl. (17. - 21. Tsd.). Beltz.
- Böhm, R., Schöner, W., Auer, I., Hynek, B., Kroisleitner, C. & Weyss, G. (2007). *Gletscher im Klimawandel: Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern*. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.
- Box, J. E., Fettweis, X., Stroeve, J. C., Tedesco, M., Hall, D. K. & Steffen, K. (2012). Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers. *The Cryosphere*, 6(4), 821–839. <https://doi.org/10.5194/tc-6-821-2012>

- Brown, T. L., LeMay, H. E. & Bursten, B. E. (2011). *Chemie: Studieren kompakt* (10., aktualisierte Auflage). *always learning*. Pearson Higher Education.
- Bulthuis, K., Arnst, M., Sun, S. & Pattyn, F. (2019). Uncertainty quantification of the multi-centennial response of the Antarctic ice sheet to climate change. *The Cryosphere*, 13(4), 1349–1380. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1349-2019>
- Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen Fassung vom 18.05.2024). <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. (2023). *Bildung für Nachhaltige Entwicklung*. <https://www.bmbwf.gv.at/Themen/schule/schulpraxis/ba/bine.html>
- Calmano, W., Jihua, H. & Ulrich, F. (1992). Einfluss von pH-Wert und Redoxpotential auf die Bindung und Mobilisierung von Schwermetallen in kontaminierten Sedimenten. *Vom Wasser*(78), 245–257.
- Calov, R., Beyer, S., Greve, R. [Ralf], Beckmann, J., Willeit, M., Kleiner, T., Rückamp, M., Humbert, A. & Ganopolski, A. (2018). Simulation of the future sea level contribution of Greenland with a new glacial system model. *The Cryosphere*, 12(10), 3097–3121. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3097-2018>
- Cameron, K. A., Hodson, A. J. & Osborn, A. M. (2012). Structure and diversity of bacterial, eukaryotic and archaeal communities in glacial cryoconite holes from the Arctic and the Antarctic. *FEMS microbiology ecology*, 82(2), 254–267. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01277.x>
- Clason, C., Rangecroft, S., Owens, P. N., Łokas, E., Baccolo, G., Selmes, N., Beard, D., Kitch, J., Dextre, R. M., Morera, S. & Blake, W. (2022). Contribution of glaciers to water, energy and food security in mountain regions: current perspectives and future priorities. *Annals of Glaciology*, 63(87-89), 73–78. <https://doi.org/10.1017/aog.2023.14>
- Cuffey, K. M. & Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers* (4 [rev.] ed.). Elsevier.
- Deutsche UNESCO-Kommission. (2017). *Bildungsagenda 2030 Aktionsrahmen: Für die Umsetzung von Sustainable Development Goal 4 : inklusive, chancengerechte und hochwertige Bildung sowie lebenslanges Lernen für alle* (Bei dieser Publikation handelt es sich um eine von der Deutschen UNESCO-Kommission übersetzte und gekürzte Fassung des Education 2030 Framework for Action. Verantwortlich ist die Deutsche UNESCO-Kommission. Der Originaltext wurde von der UNESCO unter der Lizenz CC-BY-ND 3.0 IGO herausgegeben und ist unter folgendem Link verfügbar: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002456/245656E.pdf>. (Stand: Februar 2017). Deutsche UNESCO-Kommission.
- Dos Santos, E. C., Mendonça Silva, J. C. de & Duarte, H. A. (2016). Pyrite Oxidation Mechanism by Oxygen in Aqueous Medium. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(5), 2760–2768. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10949>

- Ehlers, J. (2020). *Das Eiszeitalter* (2nd ed.). Springer Berlin / Heidelberg. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6414273>
- Europäische Kommission. (2020). *Special Eurobarometer 501 Attitudes of Europeans towards the Environment*. Europäische Kommission. <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2257>
- Europäische Kommission. (2022). *Die größten Herausforderungen unserer Zeit - Herbst 2022*. <https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2892>
- Farinotti, D., Huss, M [Matthias], Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F. & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
- Feierabend, S., Rathgeb, T., Kheredmand, H. & Glöckler, S. (2022). *JIM 2022: Jugend, Information, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland*.
- Feng, J., Tian, H., Huang, Y., Ding, Z. & Yin, Z. (2019). Pyrite oxidation mechanism in aqueous medium. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 66(4), 345–354. <https://doi.org/10.1002/jccs.201800368>
- Fraedrich, W. (2016). *Spuren der Eiszeit: Landschaftsformen in Mitteleuropa* (2. Auflage). *Lehrbuch*. Springer Spektrum. <http://www.springer.com/> <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46260-7>
- Gabbi, J., Huss, M [M.], Bauder, A., Cao, F. & Schwikowski, M. (2015). The impact of Saharan dust and black carbon on albedo and long-term mass balance of an Alpine glacier. *The Cryosphere*, 9(4), 1385–1400. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1385-2015>
- Gardner, A. S., Moholdt, G., Scambos, T., Fahnestock, M., Ligtenberg, S., van den Broeke, M. & Nilsson, J. (2018). Increased West Antarctic and unchanged East Antarctic ice discharge over the last 7 years. *The Cryosphere*, 12(2), 521–547. <https://doi.org/10.5194/tc-12-521-2018>
- Glaser, R., Hauter, C., Faust, D., Glawion, R., Saurer, H., Schulte, A. & Sudhaus, D. (2010). *Physische Geographie kompakt*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50461-1>
- Golledge, N. R., Keller, E. D., Gomez, N., Naughten, K. A., Bernalles, J., Trusel, L. D. & Edwards, T. L. (2019). Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt. *Nature*, 566(7742), 65–72. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0889-9>
- Gregory, J. M., White, N. J., Church, J. A., Bierkens, M. F. P., Box, J. E., van den Broeke, M. R [M. R.], Cogley, J. G., Fettweis, X., Hanna, E., Huybrechts, P., Konikow, L. F., Leclercq, P. W., Marzeion, B [B.], Oerlemans, J., Tamisiea, M. E., Wada, Y., Wake, L. M. & van de Wal, R. S. W. (2013). Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts? *Journal of Climate*, 26(13), 4476–4499. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00319.1>
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017). Gletscher: Die Tätigkeit des Eises. In J. Grotzinger & T. Jordan (Hrsg.), *Press/Siever Allgemeine Geologie* (S. 593–620). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48342-8_21

- Hagg, W. (2020). *Gletscherkunde und Glazialgeomorphologie*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61994-0>
- Hauck, M., Leuschner, C. & Homeier, J. (2019). *Klimawandel und Vegetation - Eine globale Übersicht* (1. Aufl. 2019). Springer Berlin Heidelberg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1573062>
- Heinrich, M. (2005). *Bildung und nachhaltige Entwicklung: Empirische Studien zu SchülerInnen-sichtweisen. Schriftenreihe Bildung und nachhaltige Entwicklung: Bd. 2*. Verlags- Haus Monsenstein und Vannerdat.
- Homann, A. & Melle, I. (2022). *Wege aus der Klima-Krise? Experimente zum Verständnis des Klimawandels und seiner Folgen*. Chemielehrerfortbildungszentrum Dortmund.
- Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Psenner, R., Tessadri, R. & Koinig, K. A. (2018). Rock glaciers in crystalline catchments: Hidden permafrost-related threats to alpine headwater lakes. *Global change biology*, 24(4), 1548–1562. <https://doi.org/10.1111/gcb.13985>
- The IMBIE Team (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558(7709), 219–222. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T [T.], Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., . . . Baillie, J. E. M. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577(7790), 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Physical Sciences*. Cambridge University Press. <https://doi.org/90938>
- Jones, H. G. (Hrsg.). (2001). *Snow ecology: An interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/23665>
- Koch, E.-M. (2010). *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl*. innsbruck university press. <https://library.oapen.org/bitstream/id/86515402-7259-4fe3-adcb-a51fff3c6115/459081.pdf>
- Korehi, H., Blöthe, M., Sitnikova, M. A., Dold, B. & Schippers, A [A.] (2013). Metal mobilization by iron- and sulfur-oxidizing bacteria in a multiple extreme mine tailings in the Atacama Desert, Chile. *Environmental science & technology*, 47(5), 2189–2196. <https://doi.org/10.1021/es304056n>
- Krathwohl, D. R. (2002). A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview. *Theory Into Practice*, 41(4), 212–218. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4104_2
- Levermann, A., Winkelmann, R., Nowicki, S., Fastook, J. L., Frieler, K., Greve, R [R.], Hellmer, H. H., Martin, M. A., Meinshausen, M., Mengel, M., Payne, A. J [A. J.], Pollard, D., Sato, T., Timmermann, R., Wang, W. L. & Bindshadler, R. A. (2014). Projecting Antarctic ice

- discharge using response functions from SeaRISE ice-sheet models. *Earth System Dynamics*, 5(2), 271–293. <https://doi.org/10.5194/esd-5-271-2014>
- Li, Y., Chen, J., Chen, Y., Zhao, C., Zhang, Y. & Ke, B. (2018). Interactions of Oxygen and Water Molecules with Pyrite Surface: A New Insight. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 34(5), 1941–1952. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b04112>
- Lutz, S., Anesio, A. M., Jorge Villar, S. E. & Benning, L. G. (2014). Variations of algal communities cause darkening of a Greenland glacier. *FEMS microbiology ecology*, 89(2), 402–414. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12351>
- MacDonell, S. A., Fitzsimons, S. J. & Mölg, T. (2012). Seasonal sediment fluxes forcing supraglacial melting on the Wright Lower Glacier, McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Hydrological Processes*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/hyp.9444>
- McConnell, J. R., Edwards, R., Kok, G. L., Flanner, M. G., Zender, C. S., Saltzman, E. S., Banta, J. R., Pasteris, D. R., Carter, M. M. & Kahl, J. D. W. (2007). 20th-century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing. *Science (New York, N.Y.)*, 317(5843), 1381–1384. <https://doi.org/10.1126/science.1144856>
- Menzies, J. (2002). *Modern and Past Glacial Environments: Revised Student Edition* (1. Aufl.). Elsevier professional. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=296736>
- Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Gíslason, G. M., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. & Brown, L. E. (2017). Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(37), 9770–9778. <https://doi.org/10.1073/pnas.1619807114>
- NASA. (2024). *Understanding Sea Level: Key Indicators: Global Mean Sea Level*. <https://sealevel.nasa.gov/understanding-sea-level/key-indicators/global-mean-sea-level>
- Otto, M. (2019). *Analytische Chemie* (5. Auflage). Bachelor. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. <http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN978-3-527-34465-9/>
- Permafrost Subcommittee, Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada. (1988). *Glossary of permafrost and related ground-ice terms. Technical Memorandum / National Research Council, Canada: Bd. 142.*
- Pistone, K., Eisenman, I. & Ramanathan, V. (2014). Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3322–3326. <https://doi.org/10.1073/pnas.1318201111>
- Redaktion. (2022). *Schwindendes Klimaarchiv: Alpengletscher schmelzen mit beispielloser Geschwindigkeit*. <https://www.derstandard.at/story/2000132844745/alpengletscher-schmelzen-mit-beispielloser-geschwindigkeit>

- Remias, D., Lütz-Meindl, U. & Lütz, C. (2005). Photosynthesis, pigments and ultrastructure of the alpine snow alga *Chlamydomonas nivalis*. *European Journal of Phycology*, 40(3), 259–268. <https://doi.org/10.1080/09670260500202148>
- Riedel, E. & Janiak, C. (2022). *Anorganische Chemie* (10. Auflage). *De Gruyter Studium*. De Gruyter. <https://www.degruyter.com/isbn/9783110696042>
- Rignot, E., Mouginot, J [Jérémie], Scheuchl, B., van den Broeke, M., van Wessem, M. J. & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(4), 1095–1103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>
- Salerno, F., Guyennon, N., Yang, K., Shaw, T. E., Lin, C., Colombo, N., Romano, E., Gruber, S., Bolch, T [Tobias], Alessandri, A., Cristofanelli, P., Putero, D., Diolaiuti, G., Tartari, G., Verza, G., Thakuri, S., Balsamo, G., Miles, E. S. & Pellicciotti, F [Francesca] (2023). Local cooling and drying induced by Himalayan glaciers under global warming. *Nature Geoscience*, 16(12), 1120–1127. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01331-y>
- Sandberg Sørensen, L., Simonsen, S. B., Forsberg, R., Khvorostovsky, K., Meister, R. & Engdahl, M. E. (2018). 25 years of elevation changes of the Greenland Ice Sheet from ERS, Envisat, and CryoSat-2 radar altimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 495, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.015>
- Säwström, C., Mumford, P., Marshall, W., Hodson, A. & Laybourn-Parry, J. (2002). The microbial communities and primary productivity of cryoconite holes in an Arctic glacier (Svalbard 79°N). *Polar Biology*, 25(8), 591–596. <https://doi.org/10.1007/s00300-002-0388-5>
- Schallhart, N. & Erschbamer, B. (Hrsg.). (2015). *Series / Alpine Forschungsstelle Obergurgl: Bd. 4. Forschung am Blockgletscher: Methoden und Ergebnisse*. Innsbruck Univ. Press.
- Schippers, A [Axel]. (2004). Biogeochemistry of metal sulfide oxidation in mining environments, sediments, and soils. In J. P. Amend, K. J. Edwards & T. W. Lyons (Hrsg.), *Sulfur Biogeochemistry - Past and Present*. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2379-5.49>
- Schuur, E. A. G., Bockheim, J., Canadell, J. G., Euskirchen, E., Field, C. B., Goryachkin, S. V., Hagemann, S., Kuhry, P., Lafleur, P. M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F. E., Rinke, A., Romanovsky, V. E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J. G. & Zimov, S. A. (2008). Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle. *BioScience*, 58(8), 701–714. <https://doi.org/10.1641/B580807>
- Shepherd, A., Ivins, E. R., A, G., Barletta, V. R., Bentley, M. J., Bettadpur, S., Briggs, K. H., Bromwich, D. H., Forsberg, R., Galin, N., Horwath, M., Jacobs, S., Joughin, I., King, M. A., Lenaerts, J. T. M., Li, J., Ligtenberg, S. R. M., Luckman, A., Luthcke, S. B., . . . Zwally, H. J. (2012). A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science (New York, N.Y.)*, 338(6111), 1183–1189. <https://doi.org/10.1126/science.1228102>

- Sica, J. (14. Mai 2022). Acqua Alta auf dem Globus: Wo die Klimakrise den Meeresspiegel nach oben treibt. *Der Standard*. <https://www.derstandard.at/story/2000135582963/wo-die-klimakrise-den-meeresspiegel-nach-oben-treibt>
- Sit, P. H.-L., Cohen, M. H. & Selloni, A. (2012). Interaction of Oxygen and Water with the (100) Surface of Pyrite: Mechanism of Sulfur Oxidation. *The journal of physical chemistry letters*, 3(17), 2409–2414. <https://doi.org/10.1021/jz300996c>
- Skiles, S. M., Flanner, M., Cook, J. M., Dumont, M. & Painter, T. H [Thomas H.] (2018). Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nature Climate Change*, 8(11), 964–971. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0296-5>
- Sommer, K. A., Wambach-Laicher, J. & Pfeifer, P. (Hrsg.). (2019). *Unterricht Chemie. Konkrete Fachdidaktik Chemie: Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht* (2. Auflage). Aulis.
- Specktor, B. (2020). *Spooky "blood snow" invades Antarctic island*. Euronews. <https://www.euronews.com/2020/02/28/spooky-blood-snow-invades-antarctic-island-n1145256>
- St Pierre, K. A., St Louis, V. L., Schiff, S. L., Lehnerr, I., Dainard, P. G., Gardner, A. S., Aukes, P. J. K. & Sharp, M. J. (2019). Proglacial freshwaters are significant and previously unrecognized sinks of atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(36), 17690–17695. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904241116>
- Steven, B., Lévêillé, R., Pollard, W. H. & Whyte, L. G. (2006). Microbial ecology and biodiversity in permafrost. *Extremophiles : life under extreme conditions*, 10(4), 259–267. <https://doi.org/10.1007/s00792-006-0506-3>
- Stinken-Rösner, L. (2021). Eine experimentelle Unterrichtseinheit zum Treibhauseffekt: Experimente mit der Wärmebildkamera & Co. *Plus Lucis*(3), 20–24.
- Sugimoto, A., Yanagisawa, N., Naito, D., Fujita, N. & Maximov, T. C. (2002). Importance of permafrost as a source of water for plants in east Siberian taiga. *Ecological Research*, 17(4), 493–503. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2002.00506.x>
- Thaler, B., Tait, D. & Tolotti, M. (2015). Permafrost und seine Auswirkungen auf die Ökologie von Hochgebirgsseen. *Geo.Alp*(12), 183–234.
- Thies, H., Nickus, U., Tolotti, M., Tessadri, R. & Krainer, K. (2013). Evidence of rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams. *Cold Regions Science and Technology*, 96, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.06.006>
- Ultee, L., Coats, S. & Mackay, J. (2022). Glacial runoff buffers droughts through the 21st century. *Earth System Dynamics*, 13(2), 935–959. <https://doi.org/10.5194/esd-13-935-2022>
- UNESCO. (2014). *UNESCO-Roadmap zur Umsetzung des Weltaktionsprogramms Bildung für nachhaltige Entwicklung* (4. Auflage). Dt. UNESCO-Kommision.

- UNESCO. (2022). *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000578916>
- Usher, C. R., Cleveland, C. A., Strongin, D. R. & Schoonen, M. A. (2004). Origin of oxygen in sulfate during pyrite oxidation with water and dissolved oxygen: an in situ horizontal attenuated total reflectance infrared spectroscopy isotope study. *Environmental science & technology*, 38(21), 5604–5606. <https://doi.org/10.1021/es0494003>
- van der Perk, M. (2014). *Soil and water contamination: From molecular to catchment scale* (2. ed.). CRC Press/Balkema.
- Viviroli, D [Daniel] & Weingartner, R. (2008). “Water Towers”—A Global View of the Hydrological Importance of Mountains. In E. Wiegandt (Hrsg.), *Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge* (S. 15–20). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6748-8_2
- Wadham, J. (2022). *Ice Rivers: A Story of Glaciers, Wilderness and Humanity*. PENGUIN BOOKS.
- Warren, S. G. & Wiscombe, W. J. (1980). A Model for the Spectral Albedo of Snow. II: Snow Containing Atmospheric Aerosols. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), 2734–2745. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2)
- WCRP Global Sea Level Budget Group (2018). Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data*, 10(3), 1551–1590. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>
- Winkler, S. (2009). *Gletscher und ihre Landschaften: Eine illustrierte Einführung*. WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft).
- Wiscombe, W. J. & Warren, S. G. (1980). A Model for the Spectral Albedo of Snow. I: Pure Snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), 2712–2733. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<2712:AMFTSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2712:AMFTSA>2.0.CO;2)
- Zarroca, M., Roqué, C., Linares, R., Salminci, J. G. & Gutiérrez, F. (2021). Natural acid rock drainage in alpine catchments: A side effect of climate warming. *The Science of the total environment*, 778, 146070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146070>
- Zawierucha, K., Kolicka, M., Takeuchi, N. & Kaczmarek, Ł. (2015). What animals can live in cryoconite holes? A faunal review. *Journal of Zoology*, 295(3), 159–169. <https://doi.org/10.1111/jzo.12195>
- Zhu, J., Xian, H., Lin, X., Tang, H., Du, R., Yang, Y., Zhu, R., Liang, X., Wei, J., Teng, H. H. & He, H. (2018). Surface structure-dependent pyrite oxidation in relatively dry and moist air: Implications for the reaction mechanism and sulfur evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 228, 259–274. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.02.050>

7. Anhang

7.1. Arbeitsblatt: Der Einfluss der Albedo auf die Gletscherschmelze

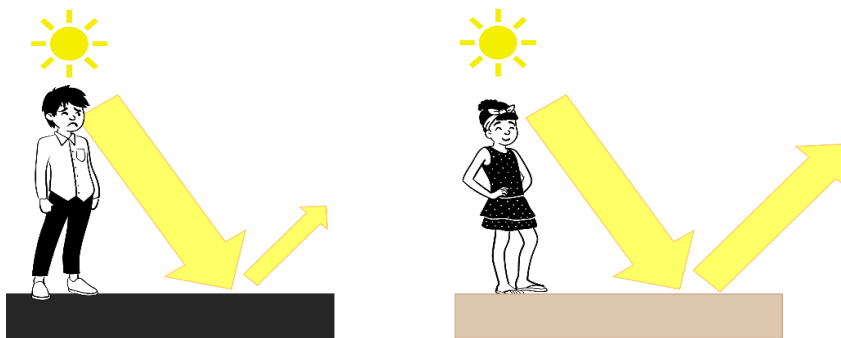
Der Einfluss der Albedo auf die Gletscherschmelze



Einleitung

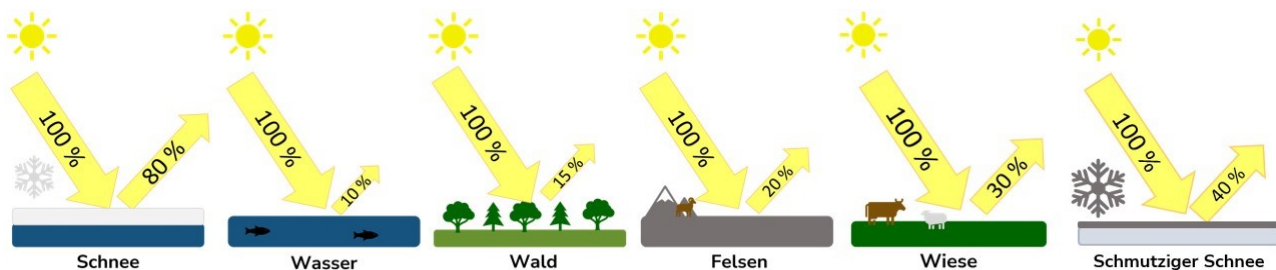
Hast du dich schon einmal gefragt, warum manche Oberflächen in der Sonne viel wärmer sind als andere? Das hat etwas mit der sogenannten Albedo-Strahlung zu tun. Albedo bezeichnet die Fähigkeit eines Objekts, das einfallende Licht zu reflektieren. Sie nimmt Werte zwischen 0 (keine Reflexion) und 1 bzw. 100 % (totale Reflexion) an.

Stell dir vor, du gehst an einem sonnigen Tag spazieren. Wenn der Boden mit hellem Sand bedeckt ist, reflektiert er das Sonnenlicht gut und bleibt mehr oder weniger kühl. Das liegt daran, dass der Sand eine hohe Albedo hat. Anders sieht es bei einer Asphaltstraße aus. Asphalt ist dunkel und absorbiert das Sonnenlicht, anstatt es zurückzustrahlen. Dadurch wird der Asphalt sehr heiß. Das ist auch der Grund, warum man barfuß darauf kaum laufen kann.



Die Albedo-Strahlung hat jedoch nicht nur Auswirkungen auf die Temperatur von Oberflächen, sondern auch auf unser Klima. Wenn große Flächen wie Eis oder Schnee schmelzen, wird weniger Sonnenlicht reflektiert und stattdessen von darunter liegenden dunkleren Flächen (wie Felsen oder Wasser) absorbiert. Dadurch heizen sich die betroffenen Regionen weiter auf, was zu einer Beschleunigung des Klimawandels führen kann.

Im Sommer findet man häufig dunkle Flecken auf Gletschern. Diese werden Kryokonit genannt und bestehen aus winzigen Partikeln wie Gesteinsstaub oder Algen. Durch die dunkle Farbe wird das Sonnenlicht kaum reflektiert, die Oberfläche erwärmt sich und das Eis schmilzt schneller. Das beschleunigt das Abschmelzen der Gletscher.



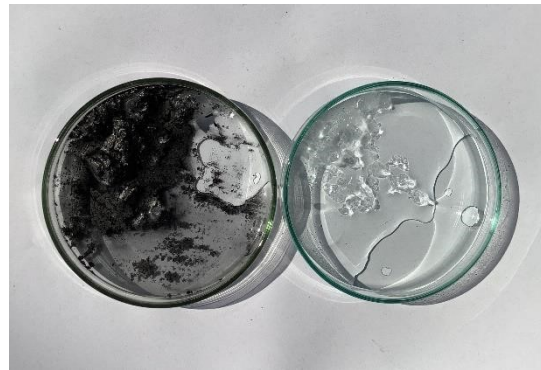


Versuchsanleitung



Material

- 2 Petrischalen
- Kohlenstaub (z.B. zerriebene Grillkohle)
- Eiswürfel oder Crushed Ice
- Isolierende Unterlage (z.B. Styropor)
- Waage
- Stoppuhr



Durchführung

- 1) Suche dir einen sonnigen Platz und leg deine isolierende Unterlage auf den Boden – achte darauf, dass sie gerade steht und die Sonne darauf scheinen kann.
- 2) Gib in jede Petrischale jeweils ca. 10 g Eis.
- 3) Bestreue das Eis in einer Petrischale mit dem Kohlenstaub, sodass das Eis bedeckt ist.
- 4) Stelle die beiden Petrischalen auf die Unterlage in der Sonne.
- 5) Stoppe die Zeit, bis das Eis geschmolzen ist.



Aufträge

- 1) Stelle eine Vermutung auf, in welcher Petrischale das Eis zuerst schmilzt.
- 2) Formuliere eine Begründung für deine Vermutung.
- 3) Schreibe deine Beobachtungen auf.

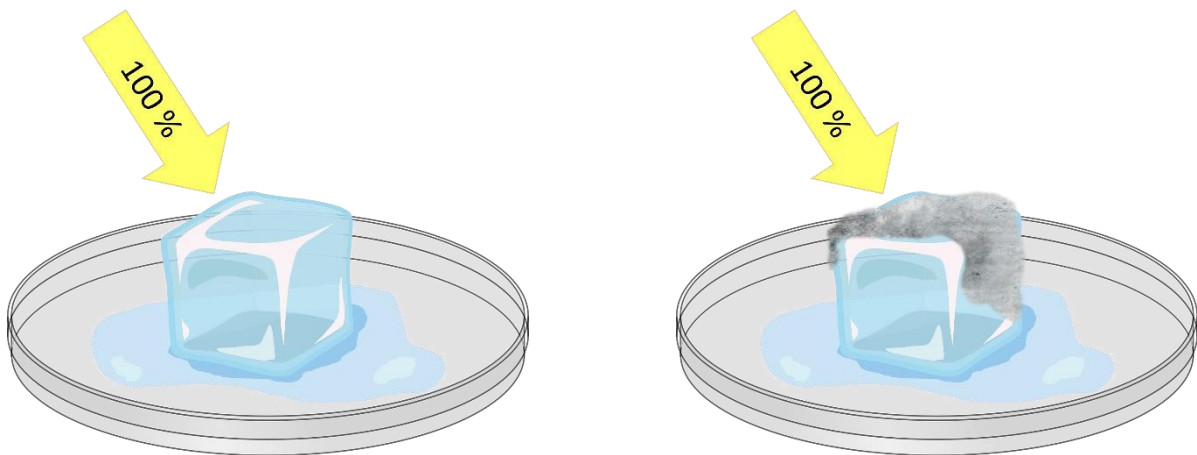


Ergebnisse

Trage in die Tabelle ein, wie lange es jeweils gedauert hat, bis das Eis geschmolzen ist.

ohne Kohlenstaub	mit Kohlenstaub

Zeichne einen Pfeil ein, der die reflektierte Strahlung darstellt. Gib den prozentuellen Anteil der Strahlung an, der reflektiert wird (Tipp: Lies den Infotext auf Seite 1).



Erkenntnis

Die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung beschreibt die Wechselwirkung zwischen der Kryosphäre (Schnee - bzw. eisbedeckte Erdoberfläche) und dem globalen Klima. Durch die Erderwärmung schmilzt Eis und es kommt der darunterliegende Boden (z.B. bei Gletschern) oder das Meer (im Fall der Arktis) zum Vorschein.

- 1) Vergleiche die Albedo -Werte von Schnee und Boden bzw. Meer.
- 2) Diskutiere die Folgen des Abschmelzens der Eisflächen in Hinblick auf die Erderwärmung.

7.2. Arbeitsblatt: Kryokonit: Kleine Partikel, große Wirkung



Einleitung

In den Sommermonaten sieht man häufig dunkle Flecken auf Gletschern.

Sie werden Kryokonit genannt und bestehen aus winzigen Partikeln, die sich im Sommer auf Gletscheroberflächen sammeln. Das Wort kommt aus dem Altgriechischen: *krýos* bedeutet Frost und *konía* heißt Staub.

Kryokonit besteht aus einer Mischung aus organischen Materialien wie Algen und Bakterien und anorganischen Materialien wie Gesteinsstaub.



Der Dachstein im Winter (links) und im Sommer (rechts)
– die dunklen Ablagerungen sind deutlich zu erkennen.

Aber warum ist Kryokonit so wichtig?

Es spielt eine wichtige Rolle bei der Gletscherschmelze. Die dunkle Farbe des Gesteinsstaubs und der Algen absorbieren das Sonnenlicht. Anstatt das Licht zu reflektieren, wie es beim weißen Schnee der Fall ist, nehmen Kryokonit-Partikel die Energie des Sonnenlichts auf und erwärmen dadurch die Oberfläche des Gletschers. Dadurch schmilzt das Eis schneller.

Die Zusammensetzung von Kryokonit ist entscheidend für seine Auswirkungen. Wenn sich Algen und Bakterien in den Kryokonit-Partikeln vermehren, entstehen mehr dunkle Flecken und absorbieren noch mehr Sonnenlicht. Dadurch wird der Schmelzprozess verstärkt. Diese Algen können auch Nährstoffe freisetzen, die das Wachstum anderer Algenarten begünstigen, was ebenfalls die Schmelze beschleunigt.

Die Erforschung von Kryokonit ist wichtig, um das komplexe Zusammenspiel zwischen organischen und anorganischen Materialien zu verstehen und mögliche Lösungen zur Begrenzung der Gletscherschmelze zu finden. Denn je besser wir die Rolle von Kryokonit verstehen, desto besser können wir Maßnahmen ergreifen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf unsere Gletscher zu mildern.

Im folgenden Versuch bestimmen wir den organischen Anteil des Kryokonits (also den Teil, der aus Algen und Bakterien besteht) und bestimmen die Zusammensetzung des anorganischen Anteils (das ist der Teil, der aus Gesteinsstaub besteht).

Bilder: <https://glaciereducation.com/wp-content/uploads/2023/05/Winter-Sommer-scaled.jpg>

Kryokonit: Kleine Partikel, große Wirkung



Versuchsanleitung



Material

- Wasserstrahlpumpe
- Saugflasche
- Gummidichtung
- Büchnertrichter
- Filterpapier
- Porzellantiegel
- Kartuschenbrenner
- Tondreieck
- Dreifuß
- Waage
- Spatel
- Tiegelzange
- Salzsäure
- Kryokonit-Probe



Durchführung

- 1) Filtriere deine Kryokonit-Probe und lass den Filter mitsamt Rückstand trocknen.
- 2) Wiege einen Porzellantiegel ab und notiere dir die Masse m_{leer} .
- 3) Kratze den Rückstand vorsichtig von einem Filter und fülle ihn in deinen Tiegel.
- 4) Wiege den Tiegel samt Inhalt erneut ab (m_{voll}) und bestimme die eingewogene Masse m_1 des Kryokonits.
- 5) Verasche nun deine Probe: Stelle dafür den Tiegel in ein Tondreieck über einen Kartuschenbrenner und entzünde diesen.
- 6) Nimm den Tiegel nach etwa 5 Minuten mit einer Tiegelzange aus dem Feuer (Kartuschenbrenner abstellen!) und lass ihn abkühlen. Bestimme die Masse.
- 7) Stelle den Tiegel für weitere 2 – 3 Minuten in das Feuer und bestimme danach erneut die Masse. Wenn sich die Masse nicht geändert hat, kannst du die Endmasse deiner Probe m_2 bestimmen.
- 8) Gib ein wenig deiner Probe auf eine Petrischale. Tropfe vorsichtig etwas Salzsäure dazu.
- 9) Führe die Glimmspanprobe durch: Entzünde dafür ein Holzstäbchen, puste es aus und halte den noch glühenden Teil direkt über die reagierende Probe (du musst vielleicht noch etwas Salzsäure nachtropfen).

Kryokonit: Kleine Partikel, große Wirkung

Auswertungsblatt



Beobachtung

- 1) Beschreibe, wie sich die Kryokonit-Probe während des Veraschens verändert hat. Gehe dabei auf die Änderung der Masse, Farbe und des Geruchs ein.
- 2) Beschreibe, was du sehen und hören konntest, als du die Salzsäure auf deine Probe getropft hast.



Ergebnisse

- 1) Durch das Veraschen wurde der organische Anteil verbrannt. Übrig bleibt der anorganische Anteil m_2 . Berechne den prozentuellen Anteil des organischen Materials.

Ein Teil des Kryokonits besteht aus Staub und kleinen Steinen der umliegenden Gesteine. In den Alpen bestehen diese Gesteine zu einem großen Teil aus Kalk – oder wie wir Chemiker:innen ihn nennen: Calciumcarbonat (CaCO_3).

Bei der Reaktion von Kalk mit Salzsäure entstehen Calciumchlorid (CaCl_2), Wasser und ein Gas, das du mit der Glimmspanprobe nachgewiesen hast. Welches Gas ist entstanden?

- 2) Formuliere eine Reaktionsgleichung, die die Reaktion des Kalks mit Salzsäure beschreibt.



Aufträge

Der Gletschermikrobiologe Joseph Cook untersucht Organismen, die auf der Oberfläche von Eisschilden leben. Einer dieser Organismen ist eine Alge, die einen dunklen Farbstoff produziert. Cook sagt: „Diese Algen sind wie ein schwarzes T-Shirt für den Gletscher [...]“. Diskutiere diese Aussage und den Einfluss solcher Organismen in Bezug auf die Gletscherschmelze. *Tipp: Denke an den Versuch zur Albedo.*

7.3. Arbeitsblatt: Wenn Eismassen schmelzen: Die Bedeutung der Gletscherschmelze für den Anstieg des Meeresspiegels



Einleitung

„Klimakrise ‚verschluckt‘ Küstengebiete Europas“

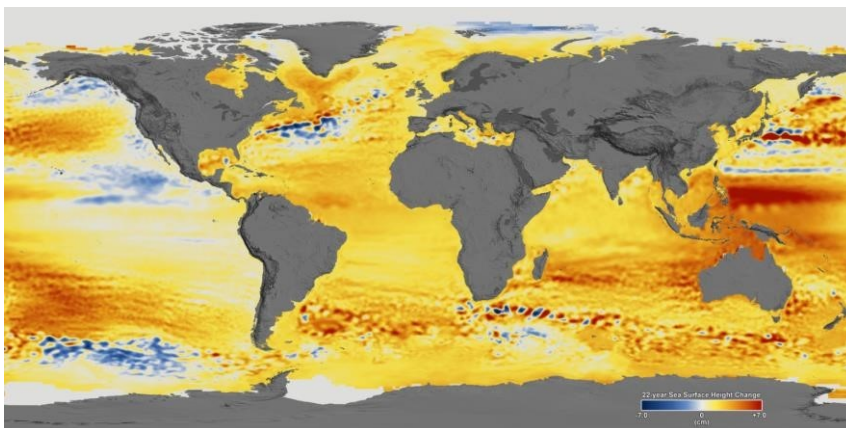
„Grönlandeis schmilzt, Meeresspiegel steigt stärker als angenommen“

„Meeresspiegelanstieg bedroht 300 Millionen Menschen“

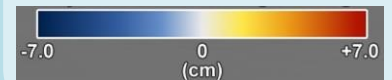
Schlagzeilen wie diese liest man in den letzten Jahren häufig, denn der Anstieg des Meeresspiegels ist ein aktuelles Thema mit weitreichenden Folgen. Der Hauptgrund dafür ist das Schmelzen der Eismassen auf der Erde, insbesondere von Gletschern und Eisschilden in den Polarregionen.

Gletscher sind große Eismassen, die sich über lange Zeiträume hinweg gebildet haben. Wenn sie schmelzen, fließt das Wasser in die Ozeane und führt zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Dieser Prozess wird durch die steigenden Temperaturen aufgrund des Klimawandels beschleunigt.

Aktuelle Prognosen deuten darauf hin, dass der Meeresspiegel in den nächsten Jahrzehnten weiter ansteigen wird. Schätzungen variieren, aber einige Studien sagen voraus, dass der Anstieg bis 2100 zwischen 0,3 und 1 Meter liegen könnte. Das klingt vielleicht nicht nach viel, aber bedenke, dass viele Küstenregionen und Inseln bereits jetzt mit den Auswirkungen zu kämpfen haben.



Änderung des Meeresspiegels in den letzten 22 Jahren.



Die Folgen des Anstiegs des Meeresspiegels sind vielfältig. Küstenregionen sind von Überflutungen bedroht, da das Wasser weiter ins Land eindringen kann. Inseln könnten sogar ganz verschwinden, wenn der Meeresspiegel weiter ansteigt. Auch das Grundwasser kann durch den Anstieg des Meeresspiegels salzig und somit unbrauchbar für Trinkwasser werden.

Es ist wichtig, den Anstieg der Meeresspiegel und seine Auswirkungen ernst zu nehmen. Wir müssen Maßnahmen ergreifen, um den Klimawandel zu bekämpfen und die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Nur so können wir die Schmelze der Eismassen und den Anstieg der Meeresspiegel verlangsamen und die Auswirkungen auf Küstenregionen und Inseln minimieren. Dafür müssen wir aber zuerst verstehen, welche Faktoren zum Anstieg des Meeresspiegels führen – einen dieser Faktoren lernst du im folgenden Experiment kennen.

Bilder:

https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a004300/a004345/23year_SeaSurfaceHeightChange_7to7cm_PrintStill_wColorbar.jpg

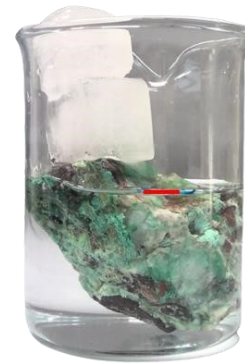


Versuchsanleitung



Material

- 2 Bechergläser
- Kleine Steine
- Eiswürfel
- Permanentmarker



Durchführung

- 1) Lege ein paar Steine in ein Becherglas und fülle so viel Wasser hinein, dass die Spitze der Steine noch herausragt (das Becherglas soll ca. halb voll sein).
- 2) Fülle ein zweites leeres Becherglas etwa bis zur Hälfte mit Wasser.
- 3) Gib in beide Bechergläser zwei Eiswürfel – achte beim ersten Becherglas darauf, dass die Eiswürfel auf dem Stein stehen und nicht ins Wasser eintauchen.
- 4) Markiere die Wasserhöhe in beiden Bechergläsern mit einem Permanentmarker.
- 5) Warte, bis die Eiswürfel geschmolzen sind (du kannst mit einem Föhn nachhelfen).
- 6) Beobachte, wie sich die Wasserhöhe verändert.



Vorüberlegung

Äußere eine Vermutung, wie sich der Wasserstand in den Bechergläsern ändern wird.



Beobachtung

Beschreibe, wie sich der Wasserstand in den Bechergläsern verändert hat.



Ergebnisse

Der Zusammenhang zwischen Dichte ρ , Masse m und Volumen V kann mit folgender Formel beschrieben werden: $\rho = \frac{m}{V}$

Dichte von Eis: $\rho = 0,917 \frac{g}{cm^3}$ Dichte von Wasser: $\rho = 0,997 \frac{g}{cm^3}$

1) Gehe jeweils von einer Masse von 10 g aus. Berechne das Volumen, das diese Masse einnimmt.

Eis hat also bei gleicher Masse ein größeres Volumen als Wasser. Wasser dehnt sich beim Gefrieren um etwa 10 % aus. 10 Liter Wasser ergeben also ca. 11 Liter Eis. Dieses Eis wiegt aber immer noch so viel wie 10 Liter und verdrängt daher genau diese Menge an Wasser, wenn es schwimmt (das sagt uns das *archimedische Prinzip*). Schmilzt also Eis, das bereits im Wasser treibt, nimmt es einfach den Platz ein, den es vorher verdrängt hat – anders verhält es sich bei den Landeismassen.

2) Nenne die Eismassen der Erde, die beim Abschmelzen zu einer Erhöhung des Meeresspiegels führen würden.



Aufträge

Nebenstehendes Bild verbreitete sich im März 2023 auf Facebook und TikTok. Es wird behauptet, dass schmelzendes Eis durch die Klimaerwärmung keinen Einfluss auf den Meeresspiegel habe. Diskutiert diese Aussage unter Einbezug eures Experiments: Welche Aspekte sind richtig? Was wurde nicht bedacht?



7.4. Arbeitsblatt: Acid Rock Drainage – was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben

Acid Rock Drainage – was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben.



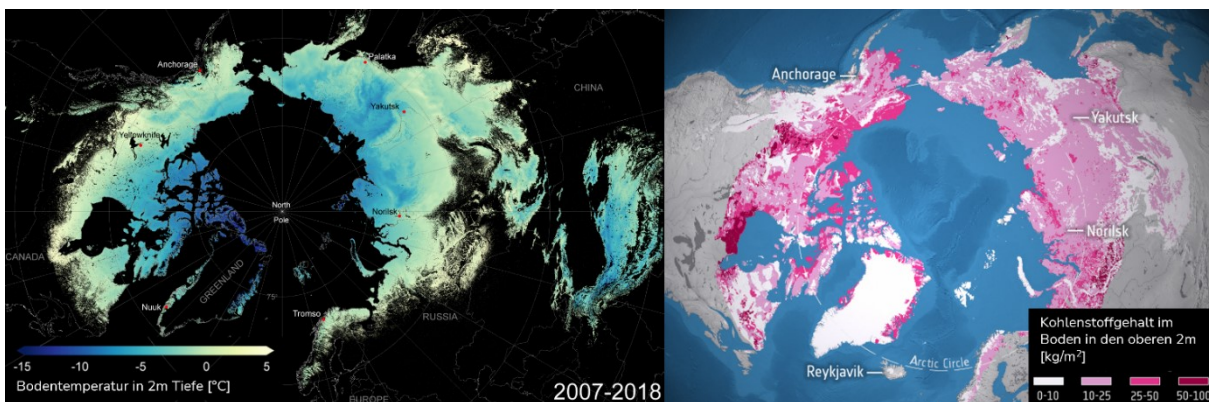
Einleitung

Der Klimawandel wirkt sich in vielerlei Hinsicht auf die Ökosysteme und damit auf die Kryosphäre der Erde aus – Gletscher, Eisschilde und Meereis ziehen sich zurück und auch Permafrostböden, welche den Wasser-, Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt beeinflussen, nehmen in ihrer räumlichen Ausdehnung ab.

Permafrost ist definiert als Boden, der für mindestens zwei Jahre Temperaturen von weniger als 0°C aufweist, und macht etwa ein Viertel der Landoberfläche der Erde aus (siehe Abbildung, links).

Durch das oberflächliche Schmelzen im Sommer nimmt Permafrost einen wichtigen Platz in der Wasserversorgung der Flora in trockenen Sommern ein. Das durch die Klimaerwärmung verstärkte Abtauen führt langfristig zu einem Rückgang der Permafrostfläche und damit zur Austrocknung großer Gebiete.

Dies ist mit weitreichenden Konsequenzen verbunden: Permafrost dient als Kohlenstoffseneke (siehe Abbildung, rechts) und bindet mehr als das Doppelte der Menge an Kohlenstoff als in der Atmosphäre enthalten ist. Der mikrobielle Abbau dieses Kohlenstoffs zu den Treibhausgasen Kohlenstoffdioxid und Methan als Folge des Auftauens des Permafrosts zählt zu den wichtigsten potenziellen Rückkopplungen auf die Atmosphäre.



Permafrostböden (links) enthalten große Mengen an Kohlenstoff (rechts), die durch Auftauen der Böden in Form von Treibhausgasen freigesetzt werden können.

Permafrost tritt in den Alpen am häufigsten in Form von sogenannten Blockgletschern auf. Sie bestehen aus einem Permafrostkörper, der von einer massiven Schuttmasse bedeckt ist. Das Auftauen dieses Permafrostkörpers kann in Gebieten mit sulfidhaltigem Grundgestein wie z.B. Pyrit zur Entstehung sogenannter saurer Grubenwässer (Acid Rock Drainage) führen.

Wie genau das geschieht und warum das ein Problem sein kann, erfährst du in den folgenden Experimenten.

Bilder (adaptiert):

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Permafrost_thaw_it_s_complicated

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Long-term_permafrost_record_details_Arctic_thaw



Versuchsanleitung



Material

- Bechergläser
- Leitfähigkeitsmessgerät
- Wasserproben
(Schnee/Gletschereis
bzw. Regenwasser,
Leitungswasser)
- Destilliertes Wasser



Durchführung

- 1) Fülle etwas von deiner Probe in ein Becherglas.
- 2) Schalte das Leitfähigkeitsmessgerät ein und spüle die Sonde mit destilliertem Wasser ab.
- 3) Halte die Sonde in deine Probe und notiere dir den Wert.
- 4) Spüle die Sonde danach erneut mit destilliertem Wasser ab.
- 5) Führe die Schritte 1) bis 4) für alle Proben durch.



Beobachtung

Trage die Leitfähigkeit der Proben in die Tabelle ein.

Leitungswasser	destilliertes Wasser	Schnee/Gletschereis	

Hier ist Platz für eine
Probe deiner Wahl!



Ergebnisse

Ordne deine Proben nach ihrer Leitfähigkeit. Beginne mit der geringsten Leitfähigkeit.

Die Leitfähigkeit hängt von der Anzahl der im Wasser gelösten Ionen ab – je mehr Ionen gelöst sind, umso höher ist die Leitfähigkeit.

Ordne deine Proben den nachstehenden Abbildungen basierend auf deinen Messungen zu.

Wassermolekül
Ionen

Wenn sich viele Ionen wie Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Carbonat (CO_3^{2-}), und Hydrogencarbonat (HCO_3^-) im Wasser befinden, spricht man von „hartem Wasser“. Die Menge an gelösten Calcium- und Magnesiumionen wird dabei durch die Wasserhärte beschrieben. Wie du sehen kannst, hängt die Wasserhärte mit der Leitfähigkeit zusammen. Formuliere einen je-desto-Merksatz, der diesen Zusammenhang beschreibt:



Aufträge

Diskutiere und vergleiche deine Messwerte. Welche Probe hat die höchste Wasserhärte, welche die niedrigste? Entsprechen die Ergebnisse deiner Erwartung?

Acid Rock Drainage – Bildung von Schwefelsäure durch Pyritoxidation



Versuchsanleitung



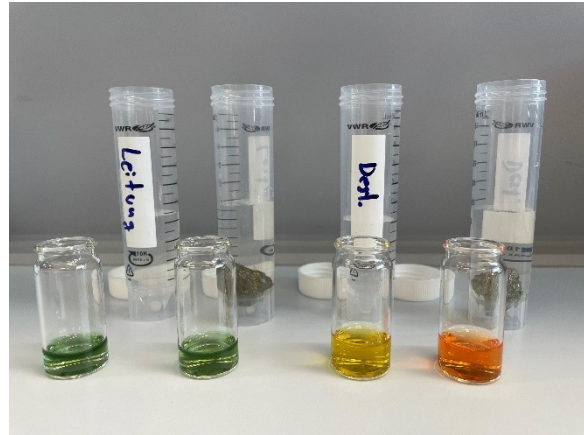
Material

Geräte

- 50 ml Falcon-Tubes
- Reagenzgläser
- Pyrit (grobkörnig)

Chemikalien

- Universalindikator (flüssig)
- Destilliertes Wasser



Durchführung

- 1) Befülle die Röhren folgendermaßen bis jeweils zur Hälfte:
 - Röhren 1: Leitungswasser
 - Röhren 2: ca. 1 cm hoch Pyrit und Leitungswasser
 - Röhren 3: destilliertes Wasser
 - Röhren 4: ca. 1 cm hoch Pyrit und destilliertes Wasser
- 2) Verschließe die Röhren und schüttele alles einmal gut durch. Lass danach alles ca. 5 Minuten stehen.
- 3) Fülle in ein Reagenzglas ca. 2 cm hoch die Lösung aus Röhren 1, in ein zweites Reagenzglas ca. 2 cm hoch die Lösung aus Röhren 2 usw.
- 4) Gib in jedes Reagenzglas 2 Tropfen des Universalindikators und schwenke vorsichtig.

SICHERHEIT



Universalindikator

H225: Flüssigkeit und Dampf leicht entzündbar.

Entsorgung:

Abfälle können im Abfluss entsorgt werden.

Acid Rock Drainage – Bildung von Schwefelsäure durch Pyritoxidation



Auswertungsblatt



Beobachtung

Trage die Farben der Lösungen in die Tabelle ein.

Leitungswasser	Pyrit & Leitungswasser	dest. Wasser	Pyrit & dest. Wasser



Ergebnisse

1) Vergleiche die Farben der Lösungen mit der Farbskala des Indikators. Trage den pH-Wert der Lösungen in die Tabelle ein.

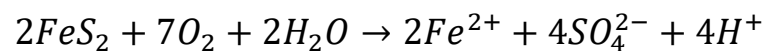
Leitungswasser	Pyrit & Leitungswasser	dest. Wasser	Pyrit & dest. Wasser

2) Vergleiche die pH-Werte miteinander. Gehe dabei vor allem auf die Unterschiede von Pyrit in Leitungswasser und Pyrit in destilliertem Wasser ein.



Erklärung

Pyrit ist der Name eines Minerals, das Chemiker:innen als Eisen(II)disulfid oder auch FeS_2 bekannt ist. Wie du am pH-Wert siehst, bildet sich bei der Reaktion von Pyrit mit Wasser eine Säure – Schwefelsäure, um genau zu sein. Diese Reaktion kann vereinfacht mit folgender Gleichung beschrieben werden:



Wasser hat bereits einen langen Weg zurückgelegt, wenn es bei dir zuhause aus der Wasserleitung kommt – es ist bereits über Steine und durch den Boden geflossen und hat dabei viele Mineralstoffe wie Calcium oder Magnesium gelöst. Aus dem vorigen Versuch weißt du, dass Leitungswasser daher eine viel höhere Wasserhärte als destilliertes Wasser hat. Leitungswasser wirkt dadurch als Puffer – das bedeutet, dass der pH-Wert annähernd gleich bleibt, wenn ein wenig Säure dazugegeben wird.

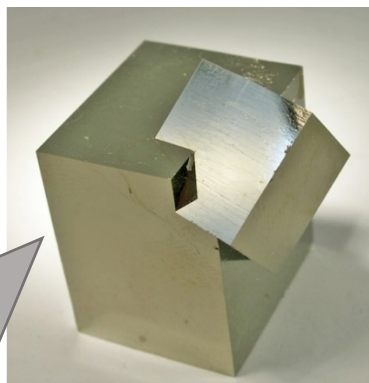
- 1) Schau in deinen Ergebnissen des vorigen Experiments nach, ob Schnee bzw. Gletschereis eine hohe oder geringe Wasserhärte hat. Diskutiere den Einfluss dieser Wasserhärte auf die Änderung des pH-Werts.

Pyrit ist das am häufigsten vorkommende Sulfidmineral und auf der Erde weit verbreitet. Es kann auch im Gestein unter Gletschern gefunden werden. Schmilzt Gletschereis und versickert im darunterliegenden Boden, so gelangt es mit Pyrit in Kontakt.

Warum die Entstehung von Säure problematisch ist, siehst du im nächsten Versuch.

Es gibt über 60 bekannte Kristallformen von Pyrit. Der Würfel und der Oktaeder zählen zu den häufigsten Formen!

Übrigens: Im Englischen wird Pyrit als „fool’s gold“ (also „Narregold“) bezeichnet, da die Farbe dem seltenen Edelmetall gleicht.



Von Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10174418>
Von Rob Lavinsky, iRocks.com – CC-BY-SA-3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10154101>

Acid Rock Drainage – was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben.



Versuchsanleitung



Geräte

- 15 ml Falcon-Tubes
- 250 ml Bechergläser
- Kolbenhubpipette 1 ml und Spitzen
- Kolorimeter
- Pyrit (grobkörnig)
- Kupferhaltiges Gestein (z.B. Malachit)

Chemikalien

- Cu^{2+} -Lösung ($c = 1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$)
- Ammoniak
- Destilliertes Wasser



Durchführung

Vorbereitung der Probe

- 1) Gib so viel Pyrit in das Becherglas, dass der Boden etwa 1 cm hoch bedeckt ist.
- 2) Lege ein Stück Malachit dazu.
- 3) Fülle mit so viel destilliertem Wasser auf, dass alles bedeckt ist und rühre mit einem Glasstab vorsichtig um.
- 4) Lege ein Stück Malachit in ein weiteres Becherglas und fülle es mit dest. Wasser auf.
- 5) Lass die Proben 15 Minuten lang stehen und bereite die Kalibrationsreihe vor.

Erstellung der Kalibrationsreihe

- 1) Stelle ausgehend von der Cu^{2+} -Lösung ($c = 1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$) in den Falcon-Tubes fünf Lösungen von jeweils 10 ml her. Diese sollen folgende Konzentrationen haben:
 $0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ (nur dest. H_2O), $10 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$, $100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$, $500 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$, $1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$
- 2) Gib zu allen Lösungen 2-3 Tropfen Ammoniak (im Abzug!) und schwenke vorsichtig.
- 3) Vermess die Lösungen bei einer Wellenlänge von 630 nm und notier dir die Werte.
- 4) Erstelle eine Kalibrationsgerade.

Bestimmung des Kupfergehalts in der Probe

- 1) Fülle von deinen Proben jeweils etwa 5 ml in ein Falcon-Röhrchen.
- 2) Gib 2-3 Tropfen Ammoniak dazu (im Abzug!) und schwenke vorsichtig.
- 3) Vermess die Proben bei einer Wellenlänge von 630 nm und notiere dir die Werte.
- 4) Bestimme die Kupferkonzentration der Proben mit Hilfe der Kalibrationsgerade.

SICHERHEIT



Ammoniak

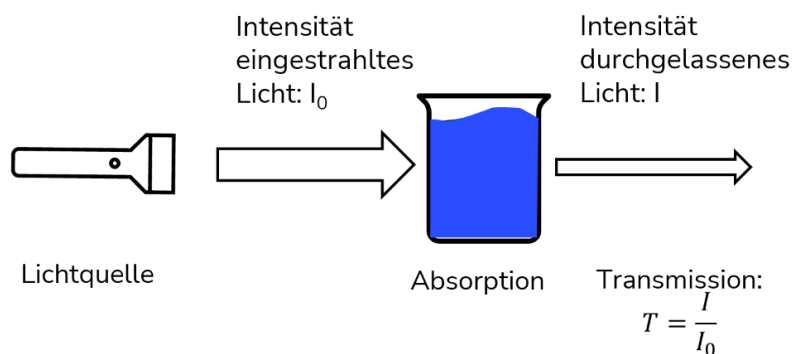
H290: Auf Metalle korrosiv wirkend
H314: Ätz-/Reizwirkung auf die Haut
H318 Schwere Augenschädigung/Augenreizung
H335: Reizung der Atemwege
H400 & H411: Gewässergefährdend



Information

Fotometrie ist eine Methode, die es uns ermöglicht, die Konzentration einer gelösten Substanz zu bestimmen. Sie basiert auf dem Prinzip der Absorption von Licht.

Trifft Licht auf eine Lösung, interagiert es mit den Molekülen der darin enthaltenen Substanz. Die Moleküle absorbieren Lichtenergie in Abhängigkeit von ihrer spezifischen Zusammensetzung und Konzentration. Diese Absorption führt zu einer Verringerung der Lichtintensität. Den Anteil des Lichts, der durch die Substanz durchgelassen wird, bezeichnen wir als Transmission und können wir messen.

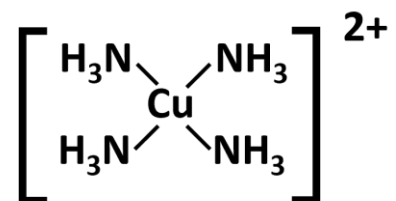


Um die Transmission zu bestimmen, verwenden wir ein Kolorimeter. Dieses Gerät sendet Licht einer bestimmten Wellenlänge durch die Lösung und misst die Intensität des Lichts, das auf der anderen Seite der Lösung austritt. Da die Transmission exponentiell mit der Konzentration zusammenhängt, verwenden wir die Extinktion, um einen linearen Zusammenhang zu erhalten. Die Extinktion E ist der negative dekadische Logarithmus der Transmission und wird meist direkt vom Kolorimeter berechnet:

$$E = -\log_{10} T$$

Um die Konzentration unserer Probe zu bestimmen, verwenden wir eine Kalibrationsgerade: Dafür bestimmen wir die Extinktion bekannter Konzentrationen der Substanz. Je höher die Konzentration der Lösung, umso größer ist die Menge an Licht, die absorbiert wird. Diese Beziehung ist linear und wir können sie grafisch als Gerade darstellen. So erhalten wir eine lineare Funktion mit der allgemeinen Gleichung $y = kx + d$, wobei x die Konzentration und y die Extinktion beschreibt. Setzen wir in diese Gleichung die gemessene Extinktion der Probe ein und formen um, erhalten wir die Konzentration der Probe.

Häufig sind die Lösungen wenig oder gar nicht farbig – so wie unsere Probe. In diesem Fall muss die Substanz in eine farbige Verbindung überführt werden. Wir haben durch die Zugabe von Ammoniak (NH_3) den tiefblauen Tetraamminkupfer(II)-Komplex $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ hergestellt.



Acid Rock Drainage – was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben.



Auswertungsblatt



Beobachtung

Beschreibe, wie sich die Farbe der Kupferlösungen verändert hat, nachdem du den Ammoniak dazu getropft hast.



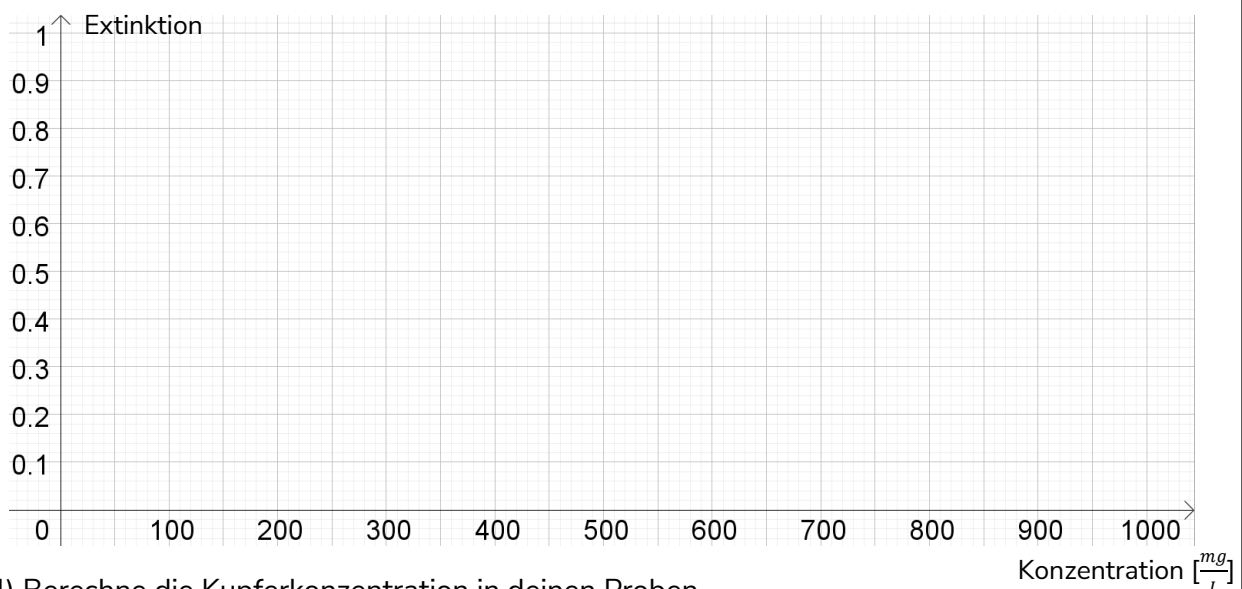
Ergebnisse

1) Trage die gemessene Extinktion in die Tabelle ein.

$0 \frac{mg}{L}$	$10 \frac{mg}{L}$	$100 \frac{mg}{L}$	$500 \frac{mg}{L}$	$1000 \frac{mg}{L}$	Probe mit Pyrit	Probe mit dest. H ₂ O

2) Erstelle mit Hilfe eines Programms deiner Wahl (z.B. Excel) eine Kalibrationsgerade (in Excel als Trendlinie bekannt) für die Lösungen mit den bekannten Konzentrationen. Gib die Gleichung der Geraden an:

3) Zeichne die Punkte aus der Tabelle und die Kalibrationsgerade in das nachstehende Koordinatensystem ein.



4) Berechne die Kupferkonzentration in deinen Proben.

Acid Rock Drainage – was schmelzende Gletscher mit Schwermetallen in Bergseen zu tun haben.

Auswertungsblatt



Ergebnisse

- 5) Beschreibe, wie sich die Kupferkonzentration der beiden Proben unterscheidet.
- 6) Stelle eine Vermutung auf, wovon die Löslichkeit von Kupfer abhängt.



Aufträge

Acid Rock Drainage (deutsch: saure Grubenwässer) bezeichnet Wasser mit niedrigem pH-Wert und hohen Konzentrationen an Metallionen.

Kupfer ist ein sogenanntes Schwermetall und kann wie alle Schwermetalle bei zu hohem Konsum zu schweren gesundheitlichen Schäden führen. Aus diesem Grund werden Gewässer gut überwacht.

Das Projekt „permaqua“ untersuchte die Folgen von abschmelzenden Blockgletschern auf die Wasserchemie von Hochgebirgsseen. In der Nähe von Pyrit haltigem Gestein konnte ein Abnehmen des pH-Werts sowie ein Anstieg des Gehalts an Schwermetallen festgestellt werden.

- 1) Diskutiere den Einfluss der Gletscherschmelze auf Hochgebirgsseen. Gehe dabei auf die Rolle von Pyrit ein. Was könnte das in Zukunft für die Trinkwasserversorgung bedeuten?

Eine Schweizer Tageszeitung berichtet im Juni 2020 von einem „seltenen Alpen-Phänomen“, bei dem sich die Steine eines Bachbetts auf einer Strecke von über einem Kilometer weiß färbten. Grund für die Farbe sind weiße Flocken aus Aluminiumsulfat.

- 2) Formuliere eine Erklärung für dieses Phänomen. Die Skizze dient dir als Hilfestellung.

